

ЗНАНИЕ

НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ

8'79

К.Я.Кондратьев
Н.Н.Крупенио

НОВОЕ
О ПЛАНЕТЕ
ВЕНЕРА



**НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ**

**Серия
«Космонавтика,
астрономия»
№ 8, 1979**

**Издается
ежемесячно
с 1971 г.**

К. Я. Кондратьев,
член-корреспондент АН СССР
Н. Н. Крупенио,
кандидат физико-математических наук

**НОВОЕ
О ПЛАНЕТЕ
ВЕНЕРА**

**Издательство
«Знание»
Москва
1979**

22.654
К64

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
«Космическая эра» в изучении Венеры	6
Поверхность и внутреннее строение	14
Состав и структурные особенности атмосферы	26
Облачный покров	46
Динамика атмосферы	54
Проблемы эволюции Венеры	60

Кирилл Яковлевич Кондратьев
Николай Николаевич Крупенио

НОВОЕ О ПЛАНЕТЕ ВЕНЕРА

Гл. отраслевой редактор *В. П. Демьянов*. Редактор *Е. Ю. Ермаков*. Мл. редактор *О. А. Васильева*. Ответств. редактор *А. А. Астреева*. Худож. редактор *М. А. Гусева*. Техн. редактор *С. А. Птицына*. Корректор *Р. С. Колокольчикова*.

ИБ № 1676

Т 13708. Индекс заказа 94208. Сдано в набор 28.05.79. Подписано к печати 13.07.79. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,46. Тираж 32 200 экз. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1060. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

Кондратьев К. Я. и Крупенио Н. Н.

К64 Новое о планете Венера. М., «Знание», 1979.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия»; 8. Издается ежемесячно с 1971 г.)

В результате недавних полетов к Венере советских автоматических станций «Венера» и американских «Пионер-Венера» получено много экспериментальных данных, касающихся этой планеты. В брошюре приводятся различные сведения о нашем космическом соседе, основанные главным образом на результатах полета этих станций.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

20604

22.654

© Издательство «Знание», 1979 г.

ВВЕДЕНИЕ

Венера — вторая после Меркурия планета от Солнца, ее среднее расстояние до Солнца составляет 108,21 млн. км, или 0,72333 а. е. Она совершает один оборот по орбите за 224,7 земных суток (сидерический период обращения) со средней скоростью 34,99 км/с. Ее орбита почти круговая: Венера имеет самый малый среди планет Солнечной системы эксцентриситет орбиты — 0,0068. Интервал времени между двумя нижними соединениями¹ (синодический период обращения) в среднем составляет 583,9 земных суток.

В 1610 г. Галилей, наблюдая Венеру в телескоп, обнаружил у нее смену фаз, подобную той, которая имеется у Луны. Таким образом, эта планета, как и Луна, должна представлять собой сферическое тело, различная степень освещенности Солнцем которого (относительно земного наблюдателя) приводит к наблюдаемой смене фаз. Действительно, как мы сейчас знаем, форма Венеры мало отличается от сферы: ее полярный радиус на 0,1 км меньше среднего экваториального радиуса, равного 6050 км, т. е. полярное сжатие этой планеты всего $1,8 \cdot 10^{-5}$, тогда как у Земли оно в 186 раз больше — $3,35 \cdot 10^{-3}$. Центр геометрической фигуры Венеры смещен относительно центра масс планеты на $1,5 \pm 0,3$ км в направлении Солнца при нижнем соединении.

6 июня 1761 г. М. В. Ломоносов, наблюдая прохождение планеты по диску Солнца, обнаружил у Венеры атмосферу. Покрытие Солнца Венерой довольно редкое

¹ Для внутренних планет Солнечной системы (орбиты которых лежат внутри орбиты Земли) расположение планеты, Земли и Солнца на одной прямой называется соединением. При верхнем соединении, когда Солнце находится между Землей и планетой, расстояние от Земли до планеты максимально, при нижнем (планета расположена между Солнцем и Землей) — минимально.

явление: оно лишь 3 раза происходило после наблюдений Ломоносова и в ближайшее время произойдет только 8 июня 2004 г.

Венера обладает довольно плотной атмосферой общей массой $5,3 \cdot 10^{23}$ г. Начиная с XVII в., астрономы не раз пытались «разглядеть» в телескоп поверхность планеты, однако осуществить это не позволял ее плотный облачный покров. Дело в том, что в видимом диапазоне длин волн верхняя граница этих облаков выглядит относительно однородной и наблюдавшиеся иногда детали впоследствии обычно не повторялись.

Совершенствование техники астрономических исследований, использование поляриметрических и спектроскопических измерений, освоение инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов длин волн позволили получить более достоверную информацию о структуре верхней границы облаков Венеры и о составе ее надоблачной атмосферы.

В 1874 г. немецкий ученый Г. Фогель обнаружил (как впоследствии оказалось, ошибочно) в спектре Венеры полосы поглощения кислорода и водяного пара. В 1921 г. К. Сент-Джонсон и С. Никольсон показали, что содержание кислорода в надоблачной атмосфере Венеры по крайней мере в 1000 раз меньше, чем в земной атмосфере, а максимально возможное содержание воды значительно меньше, чем в атмосфере Земли.

Сотрудники обсерватории Маунт-Вилсон У. Адамс и Т. Дэнхем в 1932 г. выявили в спектре атмосферы Венеры три сильные линии поглощения углекислого газа. По их измерениям содержание углекислого газа в надоблачной атмосфере Венеры в 1330 раз должно превышать его содержание в земной атмосфере.

В 1961 г. американский астроном У. Синтон обнаружил в спектре Венеры линию поглощения окиси углерода. По расчетам советского ученого В. И. Мороза, отношение содержаний окиси углерода и углекислого газа в атмосфере Венеры должно составлять 10^{-5} .

Первые инфракрасные измерения Венеры были выполнены в 1929 г. на обсерватории Маун-Вилсон Э. Петтитом и С. Никольсоном. Дополнительные наблюдения и новая обработка прежних измерений позволили этим ученым в 1955 г. показать, что на уровне верхней границы облаков Венеры суточное изменение температуры весьма незначительно. По данным измерений 1962 г.

разница температур между дневной и ночной сторонами верхней границы облаков Венеры не должна превышать 2—3 К.

Радиоизлучение Венеры впервые было уверенно зарегистрировано в 1956 г. К. Майером, Т. Мак-Коллафом и Р. Слонейкером при помощи 15-метрового радиотелескопа на длине волны 3,15 см. Обнаруженная неожиданно высокая радиояркая температура² Венеры, равная по этим измерениям 620 ± 110 К, заставила ученых проявить повышенное внимание к данной планете. Проведенные в 1958—1962 гг. измерения радиояркой температуры планеты в зависимости от ее фазы (степени освещенности Солнцем) показали, что распределение энергии в радиоспектре соответствует тепловому излучению поверхности планеты.

Большой вклад в радиоастрономические исследования Венеры внесли советские ученые А. Д. Кузьмин и А. Е. Соломонович. Они подтвердили, что радиояркая температура Венеры имеет более низкие значения в миллиметровом диапазоне длин волн по сравнению с сантиметровым диапазоном, и обнаружили изменение радиояркой температуры в миллиметровом диапазоне в зависимости от фазы планеты. Это позволило им выдвинуть в 1960 г. гипотезу о высокой температуре поверхности Венеры и более низкой температуре ее атмосферы.

Во время нижнего соединения 1962 г. советские ученые во главе с Ю. Н. Парийским провели ряд наблюдений радиоизлучения Венеры на длине волны 3 см и получили карту радиального распределения интенсивности радиоизлучения вблизи поверхности этой планеты. Было обнаружено, что радиоизлучение Венеры практически отсутствует уже на расстоянии 1,07 радиуса планеты от центра диска.

В 1964 г. советский ученый А. Д. Кузьмин и американский радиоастроном Б. Кларк выполнили интерферометрические измерения радиоизлучения Венеры на длине волны 10 см и установили, что источником этого радиоизлучения может быть твердая поверхность планеты, нагретая до температуры 650 ± 70 К.

² Радиояркая температура равна температуре абсолютно черного тела, излучение которого тождественно излучению данного радиоисточника.

Первая успешная радиолокация Венеры была проведена во время нижнего соединения в 1961 г. с помощью четырех радиотелескопов: Центра дальней космической связи СССР, Центра дальней космической связи США, обсерватории Джодрелл-Бэнк (Великобритания) и лаборатории им. Линкольна (США). Наземные радиолокационные измерения Венеры впервые позволили определить направление и скорость собственного вращения планеты, уточнить параметры ее орбиты, изучить топографические характеристики поверхности, найти массу и размеры Венеры, уточнить величину астрономической единицы — среднего расстояния от Земли до Солнца.

Оказалось, что Венера единственная из планет Солнечной системы, которая имеет обратное вращение — с востока на запад (только еще Уран обладает необычным вращением — «бокком», так как плоскость его орбиты почти перпендикулярна плоскости экватора этой планеты). Период вращения Венеры вокруг своей оси, определенный из радиолокационных измерений, равен 243 земным суткам, что близко к так называемому «резонансному» периоду вращения (243,16 земных суток), когда Венера в каждом верхнем и нижнем соединениях обращена к Земле одной и той же стороной. Угловая скорость вращения равна $2,99 \cdot 10^{-7}$ рад/с (у Земли $7,292 \cdot 10^{-5}$ рад/с).

Благодаря обратному и медленному вращению Венеры солнечные сутки на этой планете делятся 116,8 земных суток, а в венерианском году имеется лишь 1,92 венерианских солнечных суток. Как показали радиолокационные измерения, наклонение плоскости экватора планеты к плоскости орбиты не превышает 3° . Столь незначительное наклонение и ничтожный эксцентриситет орбиты приводят к тому, что на Венере практически не бывает смены времен года.

«КОСМИЧЕСКАЯ ЭРА» В ИЗУЧЕНИИ ВЕНЕРЫ

Уже к концу 50-х годов стало ясно, что методы оптической, инфракрасной и ультрафиолетовой астрономии не пригодны для исследования подоблачной атмосферы Венеры с Земли. Радиоастрономические методы позволили получить лишь глобальные характеристики данной планеты. Однако без знания химического со-

става и структурных параметров подоблачной атмосферы (температуры, давления, плотности и скорости ветра) результаты радиоастрономических измерений трудно интерпретировать. Более полные сведения о Венере могли дать только непосредственные измерения, выполненные в подоблачной атмосфере этой планеты с помощью космических аппаратов.

Первым космическим аппаратом, запущенным в сторону Венеры, стала советская автоматическая межпланетная станция (АМС) «Венера-1». Стартовав с Земли 12 февраля 1961 г., она на 97-й день своего полета прошла на расстоянии 100 тыс. км от планеты. Через 1,5 года в сторону Венеры была запущена американская АМС «Маринер-2», с помощью которой было установлено, что магнитное поле этой планеты мало по сравнению с земным.

В 1966 г. советская АМС «Венера-2» благодаря более точному выведению на траекторию перелета к Венере пролетела на расстоянии 24 тыс. км от ее поверхности, а АМС «Венера-3» после использования коррекции траектории доставила вымпел с изображением Герба Советского Союза на поверхность планеты.

С первых же полетов АМС к Венере наметилось различие в программах космических исследований этой планеты, проводившихся в СССР и США. Если американские специалисты в качестве основной схемы полета к Венере выбирали схему пролета АМС около планеты, то в СССР основной задачей являлась мягкая посадка космического аппарата на поверхность. Эта задача значительно сложнее, но, как показал последующий опыт, более перспективна.

В июне 1967 г. к Венере почти одновременно были запущены советская АМС «Венера-4» и американская АМС «Маринер-5». В состав первой из них входил спускаемый аппарат (СА), который после аэродинамического торможения плавно (на парашюте) спустился в плотные слои атмосферы Венеры. Его корпус, рассчитанный на относительно малое внешнее давление, обеспечил работу научной аппаратуры СА до высоты 22 км над поверхностью планеты.

С помощью системы манометрических датчиков и термосопротивлений были впервые измерены давление и температура в подоблачной атмосфере Венеры. Так, на участке спуска СА длиной около 25 км температу-

ра менялась от 310 до 550 К, а давление — от 1 до 15 атм. Самым значительным достижением работы АМС «Венера-4» явилось подтверждение наличия у Венеры атмосферы, состоящей в основном из углекислого газа при относительной его концентрации (по объему) около 93%. Большое содержание углекислого газа в надоблачной атмосфере планеты было известно и ранее, но мало кто ожидал, что и вся атмосфера Венеры состоит из углекислого газа. Это открытие советских ученых, которые под руководством академика А. П. Виноградова подготовили эксперимент по прямому измерению концентрации различных компонентов венерианской атмосферы, произвело переворот в геохимии Солнечной системы.

АМС «Маринер-5» пролетела около планеты на следующий день после посадки СА «Венеры-4», и с помощью ее аппаратуры проводились измерения околопланетной плазмы и магнитного поля. Они позволили обнаружить на высоте 140 км над поверхностью Венеры ионосферный слой, в котором максимальная концентрация электронов составляла $(5-6) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Стартовавшие к Венере в январе 1969 г. советские АМС «Венера-5 и -6» конструктивно не отличались от своей предшественницы «Венеры-4». Однако корпус СА этих АМС был несколько упрочнен по сравнению с корпусом СА «Венеры-4», что позволило провести измерения подоблачной атмосферы на более низких высотах (до 19 км над поверхностью планеты).

Результаты полета АМС «Венера-5 и -6» подтвердили выводы о составе атмосферы Венеры, сделанные после полета АМС «Венера-4», и уточнили содержание углекислого газа, азота, кислорода и водяного пара в венерианской атмосфере. Кроме того, они показали, что для проведения измерений в нижних слоях атмосферы и на поверхности Венеры требуется сконструировать СА, который смог бы выдерживать внешнее давление более 100 атм и иметь хорошую теплоизоляцию, обеспечивающую работу бортовой аппаратуры при наружной температуре до 750 К.

СА подобной конструкции был создан и вошел в состав советской АМС «Венера-7», которая достигла окрестностей планеты в декабре 1970 г. Ее аппаратура проводила измерения не только во время спуска во всей толще атмосферы, но и в течение 23 мин на самой по-

верхности планеты. В частности, проведенные измерения показали, что температура у поверхности Венеры близка к 750 К.

С помощью СА советской АМС «Венера-8», запущенной в марте 1972 г., кроме традиционных измерений температуры и давления, были впервые проведены разносторонние исследования атмосферы и поверхности Венеры. Они, в частности, показали, что, несмотря на сплошной облачный покров, освещенность у поверхности планеты достаточно высока для проведения фотографирования места посадки СА без искусственной подсветки.

По доплеровскому смещению несущей частоты передатчика СА рассчитывалась горизонтальная скорость ветра в атмосфере Венеры на различных высотах. Оказалось, что на высотах более 40 км над поверхностью горизонтальная скорость ветра достигала 100—140 м/с, на высотах меньше 10 км не превышала 3 м/с, плавно уменьшаясь к поверхности до 0—1 м/с.

Таким образом, с помощью советских АМС «Венера-4, -5, -6, -7, -8» удалось получить данные о температурном режиме подоблачной атмосферы Венеры и выяснить давление у поверхности планеты. На «повестку дня» встала задача разработки АМС нового поколения, способных проводить более широкий круг научных исследований. Такими АМС стали «Венера-9 и -10», но прежде чем перейти к результатам их полетов, рассмотрим данные о Венере, полученные с пролетной траектории аппаратурой американской АМС «Маринер-10».

Запущенная в сторону Меркурия АМС «Маринер-10» пролетела около Венеры в феврале 1974 г., и с помощью телевизионной аппаратуры было получено много высококачественных изображений облачного слоя венерианской атмосферы. Они подтвердили наличие четырехсуточной циркуляции в верхней атмосфере планеты, был отмечен волнообразный характер темных и светлых образований (размеры около 1000 км), обнаружались и мелкомасштабные структуры размером 10—20 км, свидетельствующие о наличии развитой конвекции.

Проводились измерения и ряда других характеристик динамического состояния атмосферы Венеры. Кроме того, при помощи этой АМС было получено с хорошей точностью отношение масс Солнца и Венеры

(408523,9 ± 1,2), рассчитаны размеры планеты, ее средняя плотность и другие характеристики.

Накопленный опыт космических исследований Венеры позволил советским специалистам создать совершенно новый тип конструкции АМС, в состав которой вошли искусственный спутник Венеры (ИСВ) и СА массой 1560 кг. При этом аппаратура ИСВ могла ретранслировать на Землю радиосигналы с борта СА, совершившего посадку на освещенной Солнцем, но невидимой (в нижнем соединении) с Земли стороне планеты.

Советские АМС нового поколения «Венера-9 и -10» были запущены соответственно 8 и 14 июня 1975 г. 22 и 25 октября СА этих АМС произвели зондирование атмосферы и совершили мягкую посадку на поверхность Венеры в точках с планетоцентрическими координатами³: 32° с. ш., 291° д. (СА «Венеры-9») и 16° с. ш., 291° д. (СА «Венеры-10»). С помощью фототелевизионных устройств СА впервые были переданы на Землю панорамные изображения поверхности Венеры (в моменты посадки СА «Венеры-9 и -10» высота Солнца над горизонтом составляла соответственно 57 и 63°).

Приборы СА «Венеры-9 и -10» определили содержание естественных радиоактивных элементов в венерианском грунте, а на участках спуска измерялись скорость ветра, содержание водяного пара, температура, давление и освещенность. Отношение смеси водяного пара (т. е. масса водяного пара на единицу массы венерианского воздуха) на высоте 40 км над поверхностью планеты оказалось равным примерно 10^{-3} . Температура и давление у поверхности составляли 730 К и 90 атм, что свидетельствовало о возвышении районов посадки на 1,5—2 км относительно среднего уровня поверхности (радиусом 6050 км). Измерения солнечной радиации дали величину интегрального потока солнечной радиации на поверхности Венеры около 100 Вт/м² и значение освещенности 14 тыс. лк.

Через двое суток после отделения СА от АМС вышли на орбиты ИСВ «Венеры-9 и -10» с максимальным удалением от поверхности — 112 140 км (ИСВ «Венеры-9») и 113 880 км (ИСВ «Венеры-10»), минимальным удалением от поверхности — 1545 км (ИСВ «Венеры-9») и

³ Планетоцентрическая долгота Венеры измеряется в пределах 0—360°.

1665 км (ИСВ «Венеры-10»), с наклоном к плоскости экватора — $34^{\circ}10'$ (ИСВ «Венеры-9») и $29^{\circ}30'$ (ИСВ «Венеры-10») и периодом обращения — 48 ч 18 мин (ИСВ «Венеры-9») и 49 ч 23 мин (ИСВ «Венеры-10»).

Научная аппаратура ИСВ позволила получить ценную информацию о температурном режиме и структуре верхней границы облаков и надоблачной дымки в атмосфере Венеры, о составе и температурном режиме верхней части этой атмосферы. Получены также данные о взаимодействии солнечного ветра с планетой, о рельефе ее поверхности, диэлектрической проницаемости грунта, высотном распределении температуры, давления и плотности в атмосфере и других характеристик. Впервые были надежно зарегистрированы спектры свечения ночного неба Венеры, обнаружены значительные изменения высотных распределений концентрации электронов в зависимости от времени суток.

В 1978 г. в сторону Венеры были запущены сразу четыре АМС: советские «Венера-11 и -12» (9 и 14 сентября) и американские «Пионер-Венера-1 и -2» (21 мая и 8 августа). Советские АМС состояли из СА и пролетного аппарата, причем последний использовался и как ретранслятор при передаче телеметрической информации с борта СА на Землю. АМС «Пионер-Венера-1» должна была выйти на орбиту ИСВ, а в состав АМС «Пионер-Венера-2» входили один большой СА (БСА) и три малых СА: «Север», «День», «Ночь» (САС, САД, САН), причем мягкая посадка этих СА не предусматривалась.

4 декабря 1978 г. АМС «Пионер-Венера-1» подошла к Венере, и ее ИСВ был выведен на околополярную орбиту с максимальным удалением от поверхности 66 900 км и минимальным удалением⁴ 149—156 км. Средний период обращения ИСВ вокруг планеты составлял около 24,04 ч, наклонение к плоскости экватора $105,6^{\circ}$. ИСВ стабилизировался вращением (4,90—4,99 об/мин), причем ось вращения направлена к южному полюсу эклиптики. Функционирование ИСВ «Пионер-Венеры-1» на орбите рассчитано на 243 сут. В течение 17 витков перицентр орбиты ИСВ оставался на

⁴ Первоначальное значение минимальной высоты ИСВ над поверхностью планеты было 385 км, но позже, под влиянием торможения атмосферой, она установилась (после 16 декабря 1978 г.) на указанных высотах.

дневной стороне планеты, а затем пересек терминатор и располагался на ночной стороне до 130-го витка.

АМС «Пионер-Венера-2» подошла к Венере 9 декабря 1978 г., и его СА произвели жесткую посадку на поверхность планеты в точках с планетоцентрическими координатами: $4,0^\circ$ с. ш., $304,0^\circ$ д. (БСА), $60,1^\circ$ с. ш., $4,4^\circ$ д. (САС), $32,4^\circ$ ю. ш., $318,4^\circ$ д. (САД) и $27,4^\circ$ ю. ш., $56,7^\circ$ д. (САН). Несмотря на жесткую посадку, САД передавал информацию с поверхности планеты более 67 мин, но на всех четырех СА функционирование датчиков температуры прекратилось примерно на высоте 12—14 км над поверхностью Венеры (температура на этой высоте составляла 640 К).

✓ 21 и 25 декабря 1978 г. около Венеры совершили пролет соответственно «Венера-12» и «Венера-11», которые прошли на расстоянии около 34 тыс. км от поверхности планеты. Ранее отделившиеся от них СА совершили мягкую посадку на поверхность планеты в точках с планетоцентрическими координатами: 13° ю. ш., 300° д. (СА «Венеры-11») и 7° ю. ш., 294° д. (СА «Венеры-12»). На рис. 1 показаны места посадки этих и других СА на поверхность Венеры.

Во время спуска СА «Венеры-11 и -12» проводился анализ состава атмосферы, исследовалась природа облаков, изучался тепловой баланс в атмосфере. Изменялись температура, давление и аэродинамические перегрузки, а также электрическая активность атмосферы. В частности, аппаратура СА «Венеры-11» зарегистрировала спорадическое (импульсное) радиоизлучение и некоторый акустический эффект в атмосфере планеты, которые могли быть следствиями грозовых процессов, происходящих на Венере.

В средней части траектории спуска СА «Венеры-11» на протяжении 13 мин была зарегистрирована группа импульсов (с частотой до 25 с^{-1}), имеющих напряженность электрического поля до 700, 130, 40 и 6 мкВ/м (соответственно на частотах 10, 18, 36 и 80 кГц). Частота этих импульсов намного превышает наблюдаемую при земных грозах. На высоте 2 км и на самой поверхности напряженность электрического поля резко падает. Возможно, приповерхностный слой атмосферы Венеры может оказывать сильное экранирующее воздействие на распространение радиоволн в интервале частот 8—100 кГц.

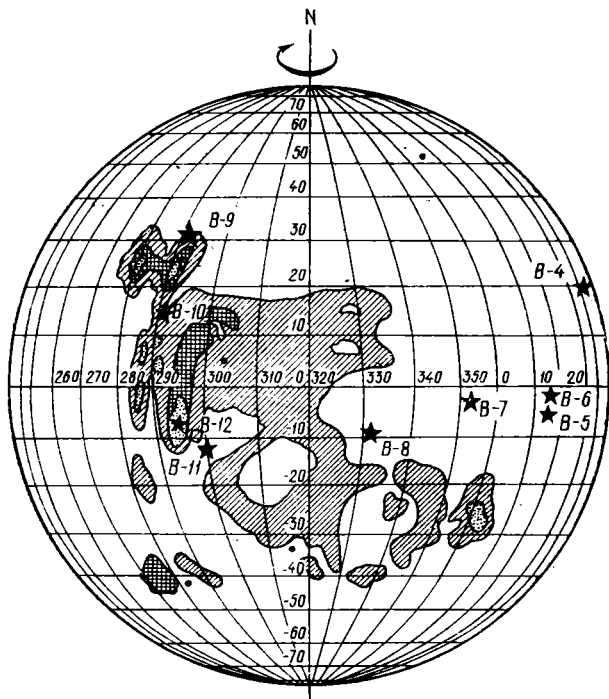


Рис. 1. Места посадок СА советских (отмечены звездочками) и американских (точками) АМС на поверхности Венеры. Штриховкой обозначены области повышенного отражения радиоволн при радиолокационных измерениях

При спуске СА «Венеры-11 и -12» регистрировался аэродинамический шум (на уровне более 88 дБ), который прекратился после посадки, за исключением отдельных импульсов, обусловленных работой аппаратуры СА. Однако через 32 мин после посадки приборы СА «Венеры-11» зарегистрировали акустический сигнал на уровне 82 дБ, происхождение которого пока неизвестно.

Комплекс приборов, установленных на СА «Венеры-11 и -12» и «Пионера-Венеры-2», позволил уточнить химический состав газового и аэрозольного (облачного) компонентов венерианской атмосферы, измерить структуру и концентрацию частиц ее облачного слоя, определить температуру, давление, плотность и

скорость ветра в шести различных районах поверхности Венеры, при разных условиях освещенности Солнцем. Научная аппаратура ИСВ «Пионера-Венеры-1» дополнила данные о поверхности и структуре планеты, позволила исследовать динамику, циркуляцию, турбулентность и тепловой баланс атмосферы Венеры.

Проведенный в 1978 г. комплексный эксперимент по изучению этой планеты с помощью четырех АМС дал много новой информации, которая в настоящее время продолжает изучаться. При этом обнаружилось расхождение в показаниях приборов различных космических аппаратов, а также расхождения с данными, полученными с помощью предыдущих АМС.

Обратимся теперь к рассмотрению характеристик поверхности и атмосферы Венеры с учетом той информации, которая была получена в основном с помощью АМС «Венера-11 и -12» и «Пионер-Венера-1 и -2». При этом следует отметить, что основная масса данных, полученных с помощью АМС «Венера-11 и -12», продолжает тщательно изучаться советскими учеными*, в то время как уже опубликованные результаты измерений с помощью АМС «Пионер-Венера-1 и -2» имеют предварительный характер и могут измениться при последующей обработке.

ПОВЕРХНОСТЬ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ

Физические характеристики грунта. О веществе верхнего покрова Венеры мы знаем пока очень мало, и все, что нам известно, получено с помощью наземных и космических радиофизических измерений, а также по данным приборов СА, опустившихся на поверхность планеты.

На СА «Венеры-8, -9, -10» устанавливались 160-канальные гамма-спектрометры, которые позволили определить содержание естественных радиоактивных элементов урана, тория и изотопа калия (^{40}K) в венерианском грунте. Результаты измерений показали, что в районах посадок этих СА грунт по содержанию радиоактивных элементов напоминает земные базальты, причем в районе посадки СА «Венеры-8» эти «базальты» близ-

* Прим. в корректуре. Более подробно о результатах, полученных с помощью АМС «Венера-11 и -12», см.: «Письма в АЖ», № 5, 1979.

ки к щелочным. В табл. 1 показаны результаты этих измерений, обработанных в Институте геохимии и аналитической химии АН СССР под руководством академика А. П. Виноградова и профессора Ю. А. Суркова.

После фотометрической обработки панорамных снимков районов посадки СА «Венеры-9 и -10» определена отражательная способность (альbedo) поверхности в видимом диапазоне длин волн. Согласно обработке, выполненной советскими учеными под руководством А. С. Селиванова, поверхность Венеры в местах посадки этих СА по коэффициенту отражения близка к лунной: среднее значение альbedo при падении света по нормали к поверхности равно 6% (на Луне 7%), а вариации альbedo находятся в интервале 3—12%.

С помощью радиационного плотномера СА «Венеры-10» измерялась плотность камня, на который опустился датчик плотномера. Плотность камня оказалась равной 2,7—2,9 г/см³, и это хорошо согласуется с тем, что венерианский грунт близок к земным базальтам.

Методы наземной радиолокации позволили получить информацию об отражении радиоволн поверхностью Венеры. На основании этих измерений рассчитывались средние значения диэлектрической проницаемости, а также плотность грунта для экваториальной зоны планеты. Как было показано, верхний покров Венеры толщиной 1 м имеет диэлектрическую проницаемость около 3, что соответствует средней плотности грунта 1,2—1,9 г/см³. Кроме того, оказалось, что с увеличением глубины грунта его плотность повышается и соответст-

Таблица 1

Относительное содержание урана, тория и ⁴⁰K в венерианском грунте в районах посадки СА «Венеры-8» (САВ-8), «Венеры-9» (САВ-9), «Венеры-10» (САВ-10) и в некоторых земных породах

	Уран	Торий	Калий (⁴⁰ K)
САВ-8	$(2,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$	$(6,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$(4,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$
САВ-9	$(0,6 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$	$(3,65 \pm 0,42) \cdot 10^{-6}$	$(0,47 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$
САВ-10	$(0,46 \pm 0,26) \cdot 10^{-6}$	$(0,70 \pm 0,34) \cdot 10^{-6}$	$(0,30 \pm 0,16) \cdot 10^{-2}$
Земные граниты	$9,04 \cdot 10^{-6}$	$21,9 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-2}$
Земные базальты	$0,86 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$0,76 \cdot 10^{-2}$

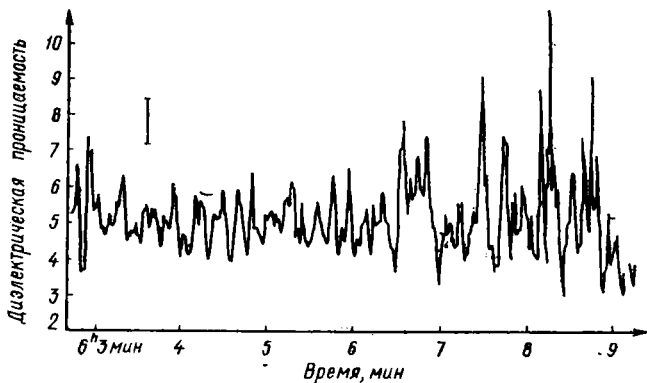


Рис. 2. Результаты измерений диэлектрической проницаемости грунта Венеры с помощью ИСВ «Венеры-10» по данным бистатической радиолокации поверхности планеты на длине волны 32 см

венно увеличивается его диэлектрическая проницаемость. Так, на глубине около 5 м значение плотности венерианского грунта достигает величины 2,2—2,7 г/см³.

Анализ данных, полученных САД «Пионера-Венеры-2» на поверхности Венеры, свидетельствует о том, что грунт в месте посадки САД состоит из слабо связанного мелкодисперсного материала, часть которого (мелкая «пыль») поднялась вверх после посадки, а затем осела на поверхность. Через несколько минут после посадки атмосфера вблизи САД вновь стала свободной от этих частиц.

Радиолокационные измерения, проводившиеся с помощью СА «Венеры-8», позволили получить оценку плотности грунта (для гладкой модели поверхности), равную $1,4 \pm 0,2$ г/см³. С учетом величины средней шероховатости поверхности Венеры, которая была определена из наземных радиолокационных измерений, эту цифру необходимо увеличить до 1,6 г/см³.

Во время полета ИСВ «Венеры-9 и -10» осуществлялась бистатическая радиолокация⁵ поверхности Венеры, что также позволило оценить величину диэлектрической проницаемости грунта (рис. 2). Согласно полученным данным локальные значения диэлектрической

⁵ При бистатической радиолокации в отличие от обычной (моностатической) приемник и передатчик радиосигналов разнесены в пространстве (см. Н. Н. Крупенин. Радионисследования планет с космических аппаратов. М., «Знание», 1978).

проницаемости изменяются в интервале 3—9,1 (при точности определения $\pm 0,4$). Это соответствует изменению средней плотности грунта для слоя толщиной 2—3 м от 1,5 до 4 г/см³ (при среднем значении для всех измерений, равном 2,56 г/см³).

Усредненное для всей планеты значение диэлектрической проницаемости грунта Венеры было ранее найдено А. Д. Кузьминым и Б. Кларком при проведении радиоинтерферометрических измерений в 1964 г. Полученное после окончательной обработки результатов среднее значение $3,6 \pm 1$ согласуется с возможным диапазоном плотности грунта (в слое толщиной около 1 м) 1,2—2,3 г/см³.

Суммируя данные о плотности вещества верхнего покрова Венеры (рис. 3), можно сделать вывод о том, что грунт на этой планете более плотный, чем на Луне и Марсе (в слое одинаковой толщины). Правда, следует

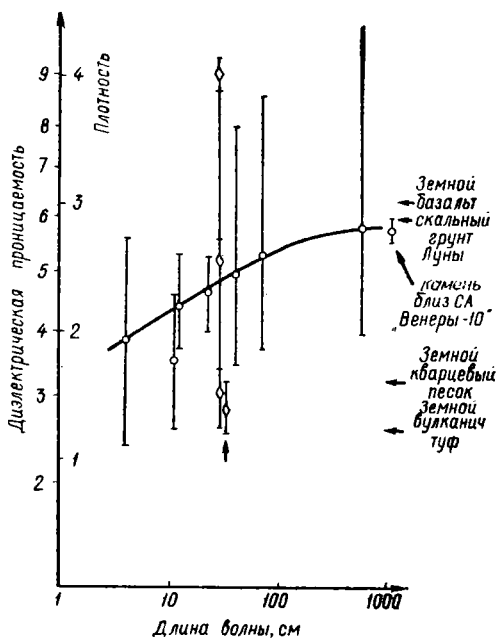


Рис. 3. Зависимости диэлектрической проницаемости и плотности вещества верхнего покрова Венеры от длины волны использующегося радиоизлучения. Стрелкой вниз указаны данные СА «Венеры-8»

отметить, что дистанционная радиофизическая информация о поверхности и поверхностном слое Венеры может дать надежные результаты только в дециметровом и метровом диапазонах длин волн, поскольку миллиметровые и даже сантиметровые волны существенно ослабляются венерианской атмосферой. Поэтому для оценки свойств поверхностного слоя Венеры по данным радиолокационных измерений необходимо учитывать ослабление сантиметровых радиоволн атмосферой. Например, результаты измерений так называемой эффективной площади рассеяния Венерой, проводившихся на разных длинах волн, свидетельствуют о десятикратном ослаблении радиолокационного сигнала ее атмосферой на длине волны 3 см.

Наличие у Венеры плотной атмосферы, поглощающей радиоволны, приводит к тому, что тепловое радиоизлучение планеты в коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазоне формируется главным образом в атмосфере, а не в поверхностном слое, и чем короче длина волны, на которой производятся измерения, тем более низкую радиояркую температуру планеты фиксирует радиоаппаратура, поскольку температура венерианского «воздуха» убывает с высотой.

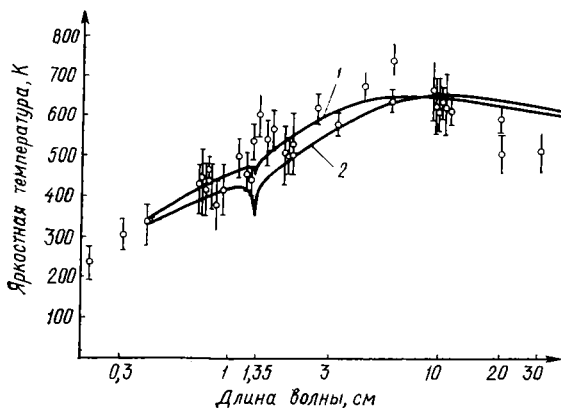


Рис. 4. Зависимость яркостной температуры Венеры от используемой длины волны. Сплошные кривые построены по данным теоретического расчета для двух значений относительной влажности: 1 — 0,1%; 2 — 0,5%

На рис. 4 показана рассчитанная А. П. Наумовым зависимость теплового радиоизлучения атмосферы планеты (выраженного через радиояркостную температуру) от длины волны для различных содержаний водяного пара (при одинаковой его концентрации на разных высотах). Очевидно, что только радиоизлучение с длиной волны > 6 см генерируется твердой поверхностью планеты. На более коротких длинах волн значительный вклад в общее излучение Венеры вносит и атмосфера.

Наземные радиоастрономические наблюдения Венеры позволили оценить температуру ее поверхности. Причем в результате радиоинтерферометрических измерений удалось определить вариации поверхностной температуры как вдоль экватора Венеры, так и в зависимости от широты. По данным этих измерений разность поверхностных температур в районе полюса и экватора составляет менее 17 К, а вариации локальных температур вдоль экватора равны $18 \pm 9,2$ К. Это находится в хорошем согласии с предположением о том, что из-за огромной тепловой инерции атмосферы и вследствие парникового эффекта вариации температуры на поверхности Венеры не могут быть велики. Так, по расчетам, вариации локальной температуры в течение солнечных суток (около 120 земных суток) не превосходят 2 К.

Рельеф и топография поверхности. Облачный покров Венеры не позволяет применить для изучения рельефа этой планеты такие классические оптические методы, как измерение формы края ее диска и размера теней, отбрасываемых горными массивами и изменяющихся при различных высотах Солнца над венерианским горизонтом. Единственным методом изучения рельефа Венеры при наблюдениях с Земли являлась радиолокация.

Первые радиолокационные измерения рельефа этой планеты, проведенные во время нижнего соединения 1967 г. У. Смитом, Р. Ингалсом и их сотрудниками, обнаружили на поверхности Венеры возвышенность протяженностью около 150 км и высотой 2 км, которая находилась в экваториальном районе планеты.

На рис. 5 показаны результаты измерений высотного профиля поверхности Венеры, проводившихся 21 и 23 мая 1969 г. Наблюдается хорошая корреляция измеренных форм рельефа: возвышенности порядка 1,5—

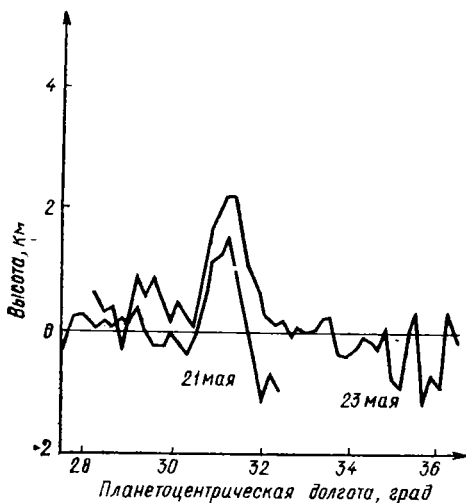


Рис. 5. Высота рельефа поверхности вдоль экватора Венеры 2 км на планетоцентрической широте $\varphi = 31^\circ$ и впадины на широтах $\varphi \approx 29-30^\circ$.

В течение 1967—1970 гг. на обсерваториях Хейстек и Аресибо проводились радиолокационные измерения высот рельефа поверхности Венеры в течение восьми полных оборотов планеты вокруг оси относительно наземного наблюдателя. В первых сеансах этих наблюдений точность измерений составляла 1 км, а в последних сеансах она достигла уже 150 м. После обработки результатов на поверхности Венеры обнаружилась огромная возвышенная область (размерами около 6000 км по долготе и примерно 500 км по широте), которая возвышалась почти на 3 км над средним уровнем поверхности планеты. Склоны этой возвышенности оказались невелики — со средним углом наклона около $0,5^\circ$, перепад высот не превосходил 5 км и в среднем составлял 2—3 км.

Начиная с 1972 г., при помощи 64-метрового радиотелескопа в Голдстоуне (США) проводилось радиолокационное картографирование поверхности Венеры на длине волны 12,5 см, в результате которого были получены карты рельефа 15 областей поверхности планеты (диаметр каждой около 1500 км) с разрешением

около 10 км. Для восьми районов поверхности Венеры построены гипсометрические карты с разрешением по высоте 500 м и точностью измерения перепада высот 220 м.

В результате этих измерений на поверхности Венеры обнаружены перепады высот до 2,5 км. С учетом химического состава атмосферы, перепадов давления и температуры в ее нижних слоях и при некоторых предположениях относительно характера отражения радиоволн было получено, что максимальный перепад высот на поверхности Венеры может достигать 8 км.

Анализируя результаты измерений перепада высот на поверхности планеты, А. Д. Кузьмин пришел к заключению, что вследствие более высокой температуры Венеры по сравнению с Землей и в соответствии с физико-механическими характеристиками ее поверхностного покрова и более глубоких слоев вряд ли на Венере существуют горы высотой более 10 км. Проведенные впоследствии измерения высот поверхности с помощью бортовой аппаратуры космических аппаратов полностью подтвердили этот вывод.

Космические методы определения перепада высот на поверхности Венеры разделяются на три группы. Во-первых, по измерениям давления близ поверхности в районах посадки СА можно рассчитать перепады давления, а отсюда — оценить перепад высот между различными точками посадки СА. Как показали результаты подобных измерений, перепад высот между районами посадки СА «Венер» не превышает 1,5 км.

Во-вторых, можно просто измерять текущую высоту спуска СА, «дрейфующего» вдоль поверхности планеты. Этот метод использовался при посадке СА «Венеры-8», параметры движения которого по горизонтали определялись из наземных измерений доплеровской частоты сигнала передатчика СА. Результаты обработки соответствующих данных показали, что перепад высот на трассе длиной 60 км составлял 3,3 км, т. е. средний угол наклона оказался равным 18° . На одном из участков этой трассы (протяженностью 1,25 км) был измерен перепад высот в 1,5 км, что соответствовало среднему углу наклона более 52° (такие крутые склоны совершенно исключаются на Луне).

В-третьих, можно использовать результаты бистатических радиолокационных измерений, проводившихся

с помощью ИСВ. При точности определения высот этим методом, составляющей около ± 1 км, с помощью аппаратуры ИСВ «Венеры-10» были обнаружены перепады высот на поверхности Венеры до 3 км.

Таким образом, данные измерений с помощью космических аппаратов указывают на отсутствие в исследуемых районах гор выше 5 км, а перепады высот там в среднем составляют 1—2 км.

Наибольшие перепады высот поверхности на Венере сопровождаются сравнительно малыми углами наклона поверхности. Так, по результатам наземной радиолокации Венеры максимальные углы наклона на расстоянии 100 км в среднем составляет $1,2^\circ$, что примерно соответствует значению этого параметра для Луны.

Анализ панорамного изображения, переданного аппаратурой СА «Венеры-9», показал, что посадка была осуществлена на поверхность, имеющую на протяжении 2—3 км угол наклона 25° . Бистатическая радиолокация, проведенная с помощью ИСВ «Венеры-9 и -10», выявила ряд холмистых образований высотой 2—3 км, протяженностью 30—40 км и с углами наклона $6\text{--}7^\circ$. В других районах обнаружены и более резкие перепады высот поверхности при углах наклона до $10\text{--}18^\circ$. Однако при этих измерениях также были зарегистрированы и очень гладкие равнины с углами наклона от $1\text{--}2$ до $3\text{--}4^\circ$.

Наземные радиолокационные и космические бистатические радиолокационные измерения позволяют определять мелкомасштабный рельеф Венеры, размеры неоднородностей которого примерно в 200 раз больше используемой длины волны. Индикатором неоднородностей служит величина σ_α , характеризующая степень неровности поверхности и соответствующие углы наклона. Чем больше эта величина σ_α (она называется среднеквадратичным углом наклона поверхности), тем больше степень неровности поверхности.

В результате наземной радиолокации Венеры, проведенной в диапазоне длин волн 3,6—70 см, была рассчитана зависимость σ_α от частоты. При сопоставлении с соответствующей зависимостью для Луны (рис. 6) обнаружилось, что мелкомасштабный рельеф на Венере в среднем более гладкий, чем на Луне.

Проведенная в 1972—1975 гг. наземная радиолокация Венеры выявила на поверхности планеты кратеры,

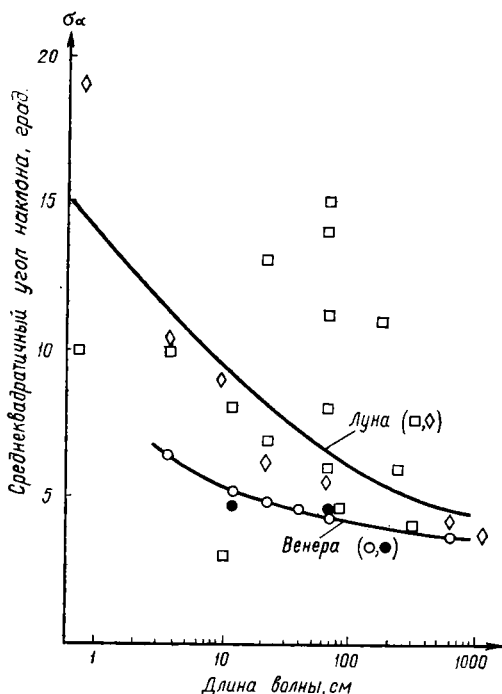


Рис. 6. Среднеквадратичные углы наклона в зависимости от длины волны по данным наземной радиолокации Луны и Венеры

наибольший из которых имеет диаметр 160 км и сравнительно небольшую глубину — всего 500 м. Другой из кратеров диаметром 75 км имеет ту же глубину, а на его склоне находится меньший кратер диаметром около 30 км. Следует отметить, что предельное пространственное разрешение в этих экспериментах составляло 10 км, что позволило обнаруживать кратеры с диаметром, превышающим 30 км. Таких кратеров было зарегистрировано более десятка.

В ходе осуществления радиолокационных измерений обнаружилась большая каналобразная структура шириной около 120 км, глубиной 1,5 км и длиной 1500 км. Она пересекает экватор в области планетоцентрических долгот 240—250°. Подобный разлом длиной 860 км был выявлен вблизи экватора также в области планетоцент-

рических долгот 350—360° (глубина разлома не была установлена). ИСВ «Пионера-Венеры-1» зарегистрировал еще одну крупную рифтовую долину на поверхности Венеры.

Самым интересным является то, что геологический анализ радиолокационных изображений обнаружил наличие индикаторов тектонической деятельности на планете, проявляющихся в образовании разломов и впадин. В связи с этим специалисты не исключают возможность современной вулканической деятельности на планете.

Полученные с помощью СА «Венеры-9 и -10» изображения поверхности планеты содержат также весьма ценную информацию о различных структурных образованиях рельефа более мелкого масштаба. Оба района посадки отличаются друг от друга по своим морфологическим характеристикам. Так, в месте посадки СА «Венеры-9» обнаружена россыпь камней с преобладающими размерами в несколько десятков сантиметров. Многие камни имеют остроугольные грани, что говорит о геологической молодости этого участка поверхности.

В месте посадки СА «Венеры-10» рельеф более сглаженный, со слабо возвышающимися камнями, причем поверхность между этими каменными глыбами покрыта слоем мелкозернистого грунта. Выходы скальных пород в этом районе имеют сглаженные ребра и пятнистую изъязвленную поверхность. Последнее свидетельствует о достаточном геологическом «возрасте» этого участка поверхности; на что указывают и следы эрозии горных пород.

Обнаружение столь разных в геологическом отношении структур поверхности является еще одним свидетельством в пользу активности геологических процессов на планете, протекавших в сравнительно недавнее время, а, возможно, происходящих и в наши дни.

Внутреннее строение. Для изучения внутреннего строения планет и их спутников, имеющих твердые оболочки, используется большой арсенал методов. Это и сейсмические методы, и методы электроразведки, гравиметрии, магнитной разведки, и измерения теплового потока из недр планеты.

Экспериментальные исследования внутреннего строения Венеры еще не начаты. Однако, пользуясь аналогиями (методами сравнительной планетологии), уже

сейчас можно предсказать, каково внутреннее строение этой планеты — на основании вполне достоверных результатов измерений различных параметров Венеры.

Известны масса, размеры, средняя плотность, орбитальная скорость и скорость собственного вращения Венеры. По этим данным можно оценить момент инерции планеты, а зная

температуру поверхности и поток тепла, получаемый планетой от Солнца, можно оценить тепловой режим верхнего покрова планеты. Основываясь на этих данных, С. В. Козловская рассчитала модель Венеры, в рамках которой допускается наличие железного ядра у планеты. Эта модель (рис. 7) имеет

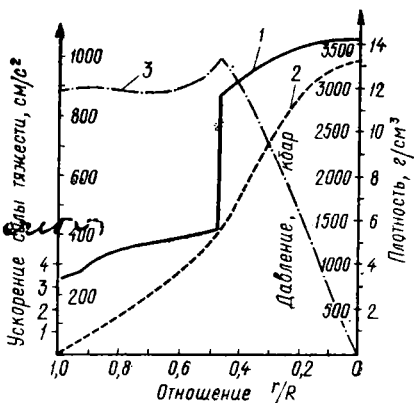


Рис. 7. Модель внутреннего строения Венеры, рассчитанная Козловской: 1 — плотность; 2 — давление; 3 — ускорение силы тяжести (r — расстояние от центра планеты, R — ее радиус)

такое распределение плотности, давления и ускорения силы тяжести вдоль радиуса планеты, которое приводит к существованию у Венеры коры толщиной 16 км, силикатной оболочки и железного ядра (граница между ядром и оболочкой находится на глубине 3224 км).

Кроме того, обнаруженное СА «Венеры-11 и -12» и «Пионера-Венеры-2» повышенное содержание радиогенного изотопа Ag в атмосфере планеты (по сравнению с его содержанием в атмосферах Земли и Марса) свидетельствует о специфической тепловой истории Венеры, а это также обуславливает специфичность внутреннего строения этой планеты.

Обнаруженные на поверхности Венеры тектонические разломы и следы возможной вулканической деятельности на планете требуют проведения более детальных исследований внутреннего строения Венеры с помощью доставляемого на ее поверхность комплекса

сейсмических приборов, как это ранее было осуществлено для Луны и Марса. Подобный комплекс должен содержать аппаратуру активного и пассивного сейсмического зондирования, гравиметрическую аппаратуру и аппаратуру электромагнитного зондирования (измерения диэлектрической и магнитной проницаемости, а также электропроводности).

СОСТАВ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ

Прежде чем перейти к рассмотрению химического состава и структурных особенностей атмосферы Венеры, ознакомимся с физическими условиями, существующими в приповерхностном слое венерианской атмосферы. Информация об этих условиях, в основном полученная с помощью СА советских и американских АМС, позволяет сделать определенные выводы относительно всей атмосферы планеты в целом и должна учитываться при построении различных моделей венерианской атмосферы.

Приповерхностный слой. Анализ результатов радиофизических измерений, а также данные, полученные с помощью АМС «Венера-4», привели советских ученых Ю. Н. Ветухновскую и А. Д. Кузьмина к предположению о том, что температура и атмосферное давление у поверхности Венеры достигают соответственно значений 700 ± 100 К и $65(+25, -15)$ атм. Последующие полеты АМС «Венера-5, -6, -7 и -8» подтвердили это предположение, в частности, с помощью аппаратуры их СА было установлено, что температура и атмосферное давление у поверхности Венеры могут достигать значений ~ 750 К и ~ 100 атм.

Более надежные данные о температуре и атмосферном давлении около поверхности планеты получены АМС «Венера-9 и -10». Так, оказалось, что дневная температура в атмосфере Венеры выше ночной. Суточные вариации температур на поверхности планеты не превышают 2 К, а разница поверхностных температур между полюсом и экватором — 12 К.

Температура и атмосферное давление в районах посадок СА «Венеры-9 и -10» равнялись 730 К и 90 атм. Тщательная обработка результатов измерений позволила определить температуру и атмосферное давление около среднего уровня поверхности планеты (6050 км),

**Температура и атмосферное давление у поверхности Венеры
по данным эксперимента 1978 г.**

Спускаемый аппарат	Температура, К	Давление, атм
САВ-11	735	92
САВ-12	743	90
БСА	731 *	90,3
САС	721 *	86,2
САД	729 *	91,5
САН	732 *	94,5

* Эти значения получены путем экстраполяции результатов измерений, поскольку, как уже упоминалось выше, аппаратура СА «Пионера-Венеры-2» перестала функционировать при достижении уровня, где температура составляла 640 К.

которые, как показали расчеты, равны соответственно 741 ± 7 К и $93 \pm 1,5$ атм. Перепад температур вблизи поверхности составляет 8 К на каждый километр.

В табл. 2 приведены данные о температуре и атмосферном давлении, полученные с помощью СА «Венеры-11» (САВ-11), СА «Венеры-12» (САВ-12) и СА «Пионера-Венеры-2». Расхождение в измеренных величинах, по-видимому, обусловлено различным рельефом в районах посадки СА.

Результаты измерений температуры на трассе спуска СА «Пионера-Венеры-2» (рис. 8) хорошо согласуются при высотах ниже 25 км над поверхностью с данными, полученными при аналогичных измерениях с помощью СА «Венеры-8». Имеющиеся расхождения с данными СА «Венеры-8» относительно результатов измерений на больших высотах, хотя и невелики (до 30 К на высоте 45 км), но ведут к принципиально важному выводу, касающемуся состояния атмосферы в ее приповерхностном слое. Дело в том, что если по данным СА «Венеры-8» можно было сделать заключение о конвективной неустойчивости венерианской атмосферы на высотах ниже 35 км, то перепад температур с высотой, полученный в результате измерений СА «Пионера-Венеры-2», соответствует условиям устойчивого высотного распределения температуры в атмосфере на высотах выше 15 км.

Данные измерений, проведенных с помощью СА «Пионера-Венеры-2», дают перепад температур с высотой, очень близкий к адиабатическому значению на высотах меньше 20 км. По этим же данным на высотах более 40 км происходит постепенное изменение высотного распределения температур от адиабатического до характерного для состояния лучистого равновесия.

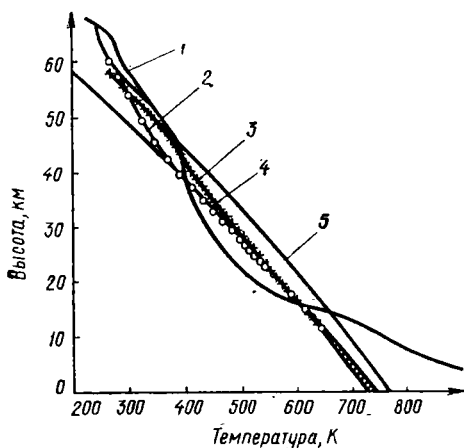


Рис. 8. Высотные распределения температуры в атмосфере Венеры:

1 — по данным расчета на основе гипотезы лучистого равновесия; 2 — по результатам СА «Венеры-8»; 3 — по результатам СА «Пионера-Венеры-2»; 4 — по данным расчета на основе предположения о адиабатическом распределении; 5 — согласно стандартной модели атмосферы Венеры (НАСА)

С помощью СА различных АМС «Венера» удалось впервые получить представление о ветровом режиме в нижних слоях венерианской атмосферы. По данным СА «Венеры-4» средняя скорость ветра в атмосфере достигала 40—50 м/с, но на высотах ниже 40 км ветер не был зарегистрирован. Измерения доплеровского смещения несущей частоты радиопередатчика СА «Венеры-5 и -6» обнаружили очень медленное изменение скорости ветра на трассе спуска обоих СА, причем скорость ветра не превышала 5—14 м/с (несколько ниже высоты 38 км скорость ветра равнялась нулю). В самом нижнем слое атмосферы скорость ветра монотонно уменьшалась от 2,5 км до 0 м/с при снижении высоты от 3,5 до 0 км. Вертикальная составляющая ветра на высоте 3,5 км в среднем равнялась 0,5 м/с при максимальной величине до 1 м/с.

Измерения, проведенные с помощью АМС «Венеры-8», показали, что скорость ветра возрастает от 0—0,5 у поверхности до 100—140 м/с в верхней атмосфере, причем направление ветра заметно не изменяется.

В слое на высотах 20—40 км скорость ветра составляла постоянную величину 30—36 м/с. По данным СА «Венеры-8» на высотах 12—18 км и около 48 км находятся зоны резкого изменения скорости ветра, а в нижней части венерианской атмосферы (0—10 км) существуют очень слабые ветры. Основываясь на наличии таких слабых ветров у поверхности Венеры, советский ученый М. Я. Маров высказал предположение о малой концентрации пыли в нижних слоях атмосферы и слабой ветровой эрозии.

Интересно отметить, что аппаратура СА «Венеры-8» зарегистрировала гораздо более сильные ветры в атмосферном слое 12—18 км, чем это было получено ранее. Так, например, по результатам, полученным с помощью СА «Венеры-7», скорость ветра в этом слое не превышала 5 м/с.

Данные, полученные с помощью СА «Венеры-9 и -10», подтвердили наличие малой скорости ветра у поверхности Венеры. Результаты прямых измерений скорости ветра при помощи чашечных анемометров СА «Венеры-9 и -10» соответственно дали значения: $0,4 \pm 0,15$ и $0,9 \pm 0,15$ м/с. Используя эти данные, Г. С. Голицын выполнил расчеты характеристик турбулентного перемешивания в приповерхностном слое венерианской атмосферы в предположении, что турбулентный поток тепла у поверхности Венеры не превосходит потока рассеянной солнечной радиации.

Химический состав. Для понимания процессов, происходящих в венерианской атмосфере, необходимо знать ее химический состав, включая аэрозольный (облачный) компонент. Так, например, при построении первой эмпирической модели структуры атмосферы Венеры (высотные распределения давления, температуры и плотности) использовались данные, полученные с помощью АМС «Венера-4»: атмосфера на 93% состоит из углекислого газа и на 7% — из азота (при среднем молекулярном весе 42,4).

Последующие полеты к Венере советских и американских АМС уточнили содержание этих элементов и указали на наличие в венерианской атмосфере других химических элементов. Большое количество информации о химическом составе атмосферы Венеры было получено в результате полетов к этой планете АМС «Венера-11 и -12» и «Пионер-Венера-1 и -2».

Масс-спектрометры СА «Венеры-11 и -12» передали на Землю около 220 масс-спектров. Оба масс-спектрометра были включены на высоте около 24 км над поверхностью планеты и функционировали вплоть до мягкой посадки СА. Анализ полученных масс-спектров показал, что в венерианской атмосфере имеется значительное количество азота, относительная объемная концентрация которого составляет около 5%. В малых количествах обнаружен водяной пар, а также, по-видимому зарегистрированы в сравнимых количествах хлор, сера и, возможно, соединения, содержащие хлор и серу. Отношение изотопов углерода $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в пределах ошибок измерений равняется примерно 10%, что соответствует его земному значению.

Неожиданностью стало обнаружение необычных концентраций аргона, неона и криптона. Их содержание, полученное из анализа масс-спектров, составляет соответственно 0,01, 0,001 и 0,0005%. Причем изотопный состав аргона оказался аномальным по сравнению с земным: концентрация радиогенного («вторичного») изотопа ^{40}Ar равняется суммарной концентрации изотопов ^{36}Ar и ^{38}Ar . Однако относительная концентрация последних двух изотопов соответствует «земному» значению.

Предварительный анализ результатов, полученных с помощью газового хроматографа СА «Венеры-11 и -12» выявил, помимо углекислого газа, азот (~2%), аргон (~0,04%), окись углерода (несколько тысячных долей процента). Эти же результаты указывают на присутствие в атмосфере Венеры сернистых соединений, в частности, сернистого газа с относительной концентрацией 0,01%.

После раскрытия парашюта СА «Венеры-11 и -12» через каждые 10 с регистрировались спектры дневного неба Венеры в диапазоне длин волн 0,45—1,2 мкм, а также передавались данные об угловом распределении яркости рассеянного солнечного излучения (на длинах волн 0,49, 0,71, 1,02 и 1,3 мкм). Анализ около 500 спектров дневного неба, которые получены впервые в условиях Венеры, выявил глубокие полосы поглощения углекислого газа (на длинах волн 0,78, 0,87 и 1,05 мкм), водяного пара (0,82, 0,95 и 1,14 мкм) и широкую (пока не отождествленную) полосу поглощения в интервале длин волн 0,46—0,55 мкм.

Таблица 3

**Химический состав атмосферы Венеры по данным СА
«Пионера-Венеры-2» ***

Составляющие	Высота над поверхностью, км		
	54	44	24
CO ₂	95,4±20,1	95,9±5,84	96,4±1,03
N ₂	4,6±0,9	3,54±0,03	3,41±0,02
H ₂ O	<0,06	0,519±0,068	0,135±0,015
O ₂	59,2±25,2	65,6±7,32	69,3±1,27
Ar	30,3(+46,95; -20,3)	28,3±13,7	18,6±2,37
Ne	<8	10,6(+31,6; -9,6)	4,31(+5,54; -3,91)
SO ₂	<600	176(+2000; -0)	186(+349; -156)

* Содержание первых трех составляющих (CO₂, N₂, H₂O) дано в процентах, содержание остальных — в миллионных долях (млн.⁻¹). Наиболее надежными считаются данные, относящиеся к высоте 24 км.

Таблица 4

**Верхние пределы некоторых составляющих атмосферы Венеры
по данным СА «Пионера-Венеры-2», млн.⁻¹**

Составляющие	Высота над поверхностью, км		
	54	44	24
H ₂	200	70	10
CO	10	3	0,6
CH ₄	40	10	0,2
Kr	40	10	0,2
N ₂ O	200	70	10
C ₂ H ₄	20	7	1
C ₂ H ₆	20	7	1
H ₂	40	10	2
COS	40	10	2
C ₃ H ₈	90	30	5

Следует отметить, что полученная с помощью СА «Венеры-11 и -12» информация в настоящее время продолжает тщательно изучаться учеными и, в частности, планируется проведение обработки измерений с целью

выявить более полный химический состав венерианской атмосферы.

Американские специалисты уже закончили предварительный анализ данных АМС «Пионера-Венеры-1 и -2». В табл. 3 и 4 даны содержание и верхние пределы различных составляющих венерианской атмосферы согласно показаниям газового хроматографа СА «Пионера-Венеры-2».

Приведенные результаты хорошо согласуются с данными, полученными с помощью СА «Венеры-9 и -10», за исключением содержания аргона (около 200 млн.^{-1}).

Зондирование венерианской атмосферы с помощью масс-спектрометра БСА «Пионера-Венеры-2» позволило получить данные о химическом составе атмосферы в интервале масс атомов от водорода до свинца. Масс-спектрометр успешно функционировал во всем диапазоне высот во время спуска БСА, но на высоте 50 км его входные отверстия примерно на 10 мин оказались «заблокированными» веществом в жидкой фазе (каплями облаков). Анализ 55 масс-спектров показал довольно высокую концентрацию изотопов ^{36}Ar , ^{38}Ar и ^{20}Ne . По оценкам специалистов, абсолютное содержание аргона-36 в венерианской атмосфере должно в 200—300 раз превышать содержание этого изотопа аргона в земной атмосфере. Отношение же концентраций изотопов аргона $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ примерно такое же, как для Земли, Луны и метеоритов, что хорошо согласуется с предварительными результатами СА «Венеры-11 и -12».

Таблица 5

Относительная концентрация изотопа ^{36}Ar и отношение $^{36}\text{Ar}/^{12}\text{C}$ в атмосферах Солнца и планет земной группы

Солнце и планеты земной группы	Относительная концентрация ^{36}Ar , г/г	Отношение концентраций $^{36}\text{Ar}/^{12}\text{C}$
Солнце	$\sim 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Венера	10^{-4}	$\sim 10^{-4}$
Земля	$3,5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Марс	$1,9 \cdot 10^{-13}$	$1,7 \cdot 10^{-5} - 6,6 \cdot 10^{-8}$

Как видно из табл. 5, относительная концентрация изотопа аргона ^{36}Ar убывает с ростом расстояния до Солнца. Аналогичная закономерность наблюдается и в случае отношения $^{36}\text{Ar}/^{12}\text{C}$.

Относительное (к массе планеты) содержание летучих компонентов в атмосферах планет земной группы

Летучие соединения	Венера	Земля	Марс
N ₂	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-8} - 1,2 \cdot 10^{-7}$
CO ₂	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-7} - 4,9 \cdot 10^{-6}$
H ₂ O	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-6} - 3,2 \cdot 10^{-5}$
Ne	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$4,2 \cdot 10^{-14}$
³⁶ Ar, ³⁸ Ar	$8,1 \cdot 10^{-10}$	$4,6 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$
⁴⁰ Ar	$8,1 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$

Величина этого отношения для Венеры указывает на то, что, по-видимому, большая часть аргона-36 и углерода-12 находится там в атмосфере. Для атмосферы Земли это справедливо лишь в случае аргона-36, тогда как углерод-12 в основном содержится в карбонатных минералах. Если бы на Марсе основная доля этих изотопов находилась в его атмосфере, то отношение $^{36}\text{Ar}/^{12}\text{C}$ тогда равнялось бы $1,7 \cdot 10^{-5}$.

Тот факт, что в венерианской атмосфере наблюдается высокая концентрация изотопов ^{36}Ar , ^{38}Ar и ^{20}Ne , но нормальная (по земным стандартам) концентрация ^{40}Ar , ^{12}C и ^{14}N противоречит предположению о подобии концентраций летучих компонентов в планетах земной группы и протопланетном веществе.

В табл. 6 приведены отношения масс различных летучих компонентов к общей массе планеты для Венеры, Земли и Марса. При получении этих оценок учитывались не только результаты непосредственных измерений в атмосферах, но и возможность существования резервуаров некоторых летучих компонентов на планетах (например, водных океанов на Земле). Как сейчас предполагают, образование летучих компонентов на планетах земной группы могло произойти в результате следующих процессов: 1) столкновения планеты с кометами или астероидами, богатыми содержанием летучих компонентов; 2) захват планетой газового компонента протопланетной туманности; 3) дегазация (выделение) летучих компонентов твердыми оболочками планет. Анализ всех этих возможностей приводит к выводу, что инертные газы в атмосферах планет земной

группы, по-видимому, являются продуктами дегазации твердыми оболочками планет.

Результаты измерений в подоблачном слое атмосферы Венеры с помощью масс-спектрометров выявили наличие там соединений (может, содержащих серу), которые характеризуются пиками в масс-спектрах при значении массы 64 и 48 а. е. м. Хотя требуется дальнейшее подтверждение результатов, значительное поступление серы в нижние слои венерианской атмосферы, несомненно, должно существовать.

Аппаратура ИСВ «Пионера-Венеры-1» зарегистрировала ряд составляющих венерианской атмосферы на высотах 150 км над поверхностью планеты вблизи вечернего терминатора. Преобладающим компонентом атмосферы Венеры на высотах ниже 155 км является углекислый газ (рис. 9). На больших высотах, как оказалось, доминирует атомарный кислород, содержание которого характеризуется отношением концентраций O/CO_2 , значительно превышающим предсказанное значение в рамках фотохимических моделей атмосферы Венеры, допускающих наличие интенсивной турбулентной диффузии.

В табл. 7 приведены основные составляющие атмосферы Венеры на высоте 150 км.

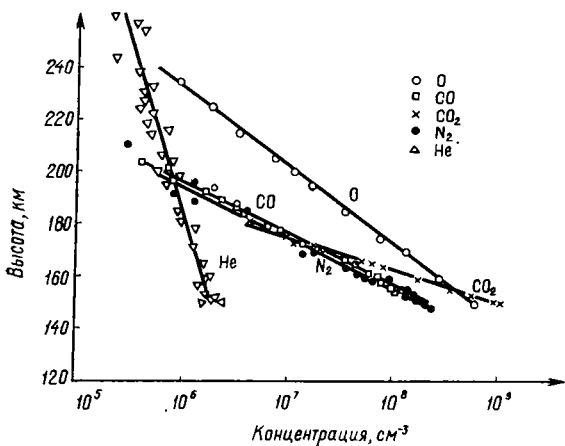


Рис. 9. Высотные распределения концентрации молекул различных газов в венерианской атмосфере по предварительным результатам ИСВ «Пионера-Венеры-1» (17-й виток орбиты)

Основные составляющие атмосферы Венеры на высоте 150 км по данным ИСВ «Пионера-Венеры-1»

Составляющие	Концентрация, см ⁻³
Углекислый газ (CO ₂)	1,1 · 10 ⁹
Окись углерода (CO)	2,4 · 10 ⁸
Молекулярный азот (N ₂)	2,1 · 10 ⁸
Атомарный кислород (O)	6,6 · 10 ⁸
Гелий (He)	(2 ± 1) · 10 ⁶

Следует отметить, что приведенная концентрация гелия в венерианской атмосфере хорошо согласуется с оценками, полученными ранее на основании данных измерений свечения атмосферы Венеры, проведенных с помощью АМС «Маринер-10». Обнаруженное аппаратурой ИСВ «Пионера-Венеры-1» возрастание концентрации гелия на 30% с уменьшением высоты Солнца над горизонтом подтверждает теоретическое предсказание о наличии гелиевого «горба» на ночной стороне Венеры.

Результаты измерений химического состава венерианской атмосферы имеют большое значение для понимания эволюции атмосфер земной группы. Так, например, значительная концентрация молекулярного кислорода в нижней атмосфере Венеры указывает, по-видимому, на более высокую степень окисленности современной атмосферы, чем в геологическом прошлом этой планеты. Подобное могло произойти вследствие фотодиссоциации водяного пара с последующей диссипацией (улетучиванием в космос) молекулярного водорода. В этом случае содержание водяного пара в атмосфере Венеры должно быть в прошлом более высоким, чем теперь.

С помощью рентгено-флуоресцентного анализатора СА «Венеры-12» впервые предпринята попытка определить химический состава аэрозоля венерианских облаков. Предварительный анализ результатов измерения, проведенного на участке парашютного спуска (на высотах 60—45 км), указывает на наличие хлора и, возможно, серы в облаках Венеры. При этом полностью исключается наличие там ртути при плотности более 10⁻⁹ г/см³.

Косвенные данные о составе венерианских облаков дает анализ газов, возникших при испарении жидкого вещества, «заблокировавшего» масс-спектрометр БСА «Пионера-Венеры-2». В частности, был сделан вывод о том, что входные отверстия масс-спектрометра были «забиты» веществом, содержащим соединения серы или соединения серы в смеси с водой.

Все эти результаты согласуются с предположением о том, что верхняя часть облаков Венеры состоит из серной кислоты. На это указывает и то, что вблизи верхней границы венерианских облаков относительные содержания водяного пара, кислорода и сернистого газа составляют соответственно 0,5—40, <1 и 0,1 млн.⁻¹, а под основной частью облачного покрова их концентрация возрастает соответственно до 1300, 70 и 180 млн.⁻¹. Такой резкий перепад в величинах можно, в частности, объяснить удалением рассматриваемых газов из атмосферы после образования 85%-ного водного раствора серной кислоты в результате фотохимических процессов вблизи верхней границы венерианских облаков. Под облаками же эти капли испаряются и возникают пары серной кислоты и воды с последующим разложением серной кислоты на SO₂, O₂ и H₂O.

Данное объяснение возникло после обнаружения с помощью СА «Пионера-Венеры-2» сернистого газа (SO₂) в нижних слоях венерианской атмосферы (см. табл. 3). Дело в том, что ранее основным компонентом серосодержащих соединений в нижних слоях атмосферы Венеры предполагался карбонил сульфид (COS). В частности, считалось, что измеренная над облаками высокая концентрация окиси углерода (CO) характерна и для нижних слоев венерианской атмосферы. Однако, как оказалось, верхний предел концентрации CO на высоте 24 км не превышает 0,6 млн.⁻¹ (см. табл. 3), что также противоречит высокой концентрации COS в венерианских облаках.

Структурные особенности. На рис. 10 схематически изображена вертикальная структура атмосферы Венеры, построенная по аналогии с земной атмосферой. Ниже приведены новые данные о структурных особенностях венерианской атмосферы, полученные с помощью продолжающей успешно функционировать аппаратуры ИСВ «Пионера-Венеры-1». Эти данные с учетом результатов предыдущих полетов советских и американских

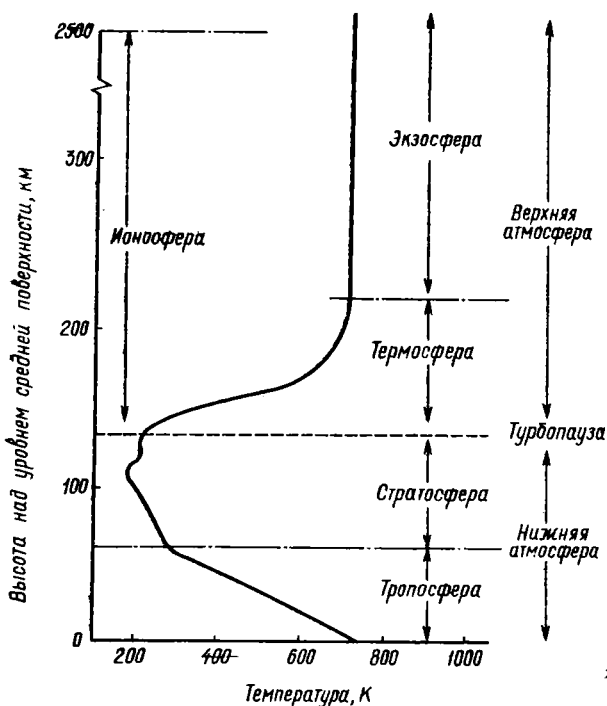


Рис. 10. Структура атмосферы Венеры

АМС позволили сделать ряд принципиальных выводов относительно климатических условий на Венере и эволюции ее атмосферы.

Как показали измерения, проведенные ИСВ «Пионера-Венеры-1», температура атмосферы Венеры на высотах > 180 км равняется примерно 400 К на дневной стороне вблизи экватора и повышается с возрастанием высоты Солнца над горизонтом. Полученный результат противоречит концепции «холодной» верхней венерианской атмосферы. Кроме того, сильное понижение температуры с уменьшением высоты Солнца над горизонтом указывает на наличие горизонтального перепада температур в термосфере Венеры, в 3 раза превосходящего значение, предсказанное моделью глобальной термосферы Венеры, которая была разработана американскими учеными Р. Дикинсоном и Р. Ридли.

Данные о плотности венерианской атмосферы, полученные при анализе процесса торможения АМС «Пионер-Венера-1» атмосферой, согласуются с результатами измерений высотного распределения плотности в атмосфере этой планеты (при температуре венерианской экзосферы, равной 350 К). Обработка полученных данных выполнялась в предположении о возможном существовании турбопаузы⁶ на высотах 124—144 км. Однако наличие турбопаузы на этих высотах можно согласовать с наблюдаемым высотным распределением плотности в атмосфере Венеры лишь в случае, если атомарный кислород является главным компонентом венерианской атмосферы на высотах >160 км, а отношение концентраций кислорода и углекислого газа на высоте 144 км равно 0,5—0,6. Причем высокая концентрация атомарного кислорода может приводить к значительному выхолаживанию венерианской экзосферы.

22 и 23 декабря 1978 г. были обнаружены резкие уменьшения плотности (на высоте 155 км) и температуры экзосферы, что точно соответствовало местному солнечному времени вечернего терминатора. Как показали измерения, температура экзосферы упала с ~ 300 до <150 К. На основании этого был сделан вывод об отсутствии на Венере ночной термосферы, поскольку динамические, химические и радиационные процессы, протекающие на этой планете, не в состоянии поддерживать высокую температуру в термосфере Венеры после захода Солнца.

Значительное косвенное воздействие на ночную верхнюю атмосферу Венеры может оказывать солнечная активность. Так, например, резкий спад скорости солнечных протонов (с 730 до 380 км/с), зарегистрированный 22—23 декабря, сопровождался уменьшением плотности на высоте 155 км в 8,7 раза.

Обнаружение высокой концентрации атомарного кислорода в верхней части венерианской атмосферы может означать малую интенсивность вертикального турбулентного перемешивания, а последнее позволяет объяснить низкую концентрацию водорода в атмосфере Венеры как следствие нетепловой диссипации этого

⁶ Турбопаузой называется переходный слой, отделяющий область интенсивного перемешивания (турбулентности) от расположенной над ней зоны отсутствия турбулентности.

элемента. В свою очередь, такое объяснение дает все основания предположить сильное уменьшение содержания воды на Венере за время ее геологической эволюции.

Следует отметить, что сравнение данных о плотностях в атмосфере Венеры с результатами теоретических расчетов указывает на завышенность ряда значений, предсказанных теорией. Так, например, разработанные американскими специалистами модели атмосферы Венеры дают значения плотности на высотах 160 и 190 км, превышающие наблюдаемые значения соответственно в 4,5 и 3,9 раза.

Результаты, полученные с помощью ИСВ «Пионера-Венеры-1», отчетливо свидетельствуют о несостоятельности любой стационарной модели венерианской атмосферы, поскольку ее плотность резко изменялась со временем. Так, например, на дневной стороне терминатора наблюдались циклические вариации плотности на высоте 150 км с периодом 4—5 земных суток. При этом среднее значение плотности составляло $1,4 \cdot 10^{-13}$ г/см³, а амплитуда изменений — $4 \cdot 10^{-14}$ г/см³. При переходе ИСВ «Пионера-Венеры-1» на ночную сторону планеты зарегистрирован резкий (почти в 4 раза) спад плотности — до среднего значения $4 \cdot 10^{-14}$ г/см³.

Интересно отметить близкое совпадение 4—5-суточных циклов изменения плотности венерианской атмосферы на дневной стороне планеты с 4-суточной циркуляцией верхних атмосферных слоев, обнаруженной в 1957—1960 гг. французским ученым Н. Буайе.

Согласно результатам измерений, проведенных во время спуска СА «Пионера-Венеры-2», на высотах 47,5—49 км над поверхностью в атмосфере Венеры имеются достаточно оптически толстые⁷ облака, находящиеся там при температурах 350—365 К (ниже точки кипения воды) и давлениях 1,0—1,3 атм. Над наиболее мощным облачным покровом находится область слабой неустойчивости атмосферы, а это указывает на то, что поглощенная оптически толстым облаком солнечная радиация должна вызывать обусловленное неустойчивостью конвективное перемешивание в атмосфере над этим поглощающим слоем облаков.

⁷ Оптически толстыми называют облака, обуславливающие сильное ослабление проходящего через них излучения; в оптически тонких облаках излучение почти не ослабляется.

Сопоставление данных зондирования атмосферы Венеры в различных точках подтверждает предположение о малых горизонтальных контрастах температуры. Так, на высотах ниже 50 км эти контрасты не превышают нескольких градусов, причем более высокие температуры зарегистрированы в районах около 30° ю. ш. по сравнению с температурами областей около 5 и 60° с. ш.

По-видимому, температура венерианской атмосферы возрастает с увеличением планетоцентрической широты до некоторого определенного значения, а затем начинает убывать в направлении к полюсам, что согласуется с моделью, предложенной А. Янгом и Д. Поллаком для общей циркуляции атмосферы Венеры. Согласно этой модели возрастание должно продолжаться до широт $\pm 45^\circ$ с последующим уменьшением температуры к полюсам. Причем в нижних слоях венерианской атмосферы температура практически выравнивается на уровне, соответствующем давлению 30 атм, как и следовало ожидать при учете значительной тепловой инерции этих слоев.

Сведения о температуре венерианской атмосферы на больших высотах указывают на наличие там практически изотермического (175—180 К) слоя на высотах 95—105 км. Распределение температуры на высотах 60—70 км характеризуется существованием слабой волнообразной структуры температурного распределения, которая, возможно, является следствием тепловых приливов, происходящих в атмосфере Венеры. Следует отметить, что данный слой также подвержен четырехсуточной циркуляции.

Парниковый эффект. Хотя через толщу венерианской атмосферы проникает лишь небольшая доля солнечной радиации, этого оказывается достаточным для сильного нагрева поверхности Венеры. Очень высокая температура поверхности планеты объясняется действием парникового эффекта, заключающегося в том, что венерианская атмосфера является практически непрозрачной для теплового излучения поверхности в космическое пространство (аналогичный эффект имеет место и в обычном парнике).

Для понимания условий формирования парникового эффекта на Венере исключительный интерес представляют измерения освещенности в различных слоях венерианской атмосферы и на поверхности планеты. Пер-

вые измерения освещенности на различных высотах были проведены 22 июля 1972 г. с помощью фотометра СА «Венеры-8» во время спуска на парашюте (последний занимал около 1% поля зрения фотометра). Обработка полученных результатов осуществлялась большим коллективом советских ученых под руководством В. С. Авдеевского.

Высотное распределение степени освещенности в диапазоне высот 0—50 км свидетельствовало о резком изменении величины освещенности на высоте около 32 км: выше этого уровня наблюдалось гораздо более сильное ослабление освещенности с уменьшением высоты. Освещенность, измеренная на высоте около 48,5 км, была ослаблена вышележащей толщиной венерианской атмосферы примерно в 7 раз, затем она уменьшилась еще в 3 раза в слое 50—32 км и снова в 3 раза — в слое 0—32 км.

Таким образом, результаты измерений освещенности свидетельствовали о вертикальной неоднородности атмосферы. Верхняя граница облаков, определяемая по уровню, которому соответствует оптическая толщина, равная единице, — 68 км. Ослабление солнечной радиации максимально в слое между верхней границей облаков (65—70 км) и высотой около 48 км и минимально — в толще атмосферы, расположенной ниже 32 км.

Высотные распределения радиационных потоков, полученные по данным СА «Венеры-9 и -10», оказались примерно одинаковыми, что указывает на существенное различие ослабления света на разных высотах при сравнительно небольшой горизонтальной неоднородности. Так, на высотах больше 50 ± 2 км изменение в ослаблении радиации во всех спектральных интервалах значительно превосходило аналогичное изменение в нижележащей толще атмосферы (несмотря на возрастание молекулярной плотности венерианского воздуха с глубиной).

Данные измерений свидетельствуют о наличии дополнительного (помимо обусловленного рассеянием на молекулах газа) механизма ослабления света на высотах 30—50 км. Полученные результаты подтвердили предположение о том, что на высоте около 49 км располагается нижняя граница облаков Венеры. В атмосферном слое 15—50 км возможно влияние мелкого аэро-

золя или истинное поглощение радиации, а ниже высоты 15 км доминирует рассеяние молекулами. На высотах ниже 50 км солнечное излучение отсутствует, а на поверхности Венеры освещенность и радиационный поток за счет рассеянной солнечной радиации в диапазоне 0,5—1,06 мкм соответственно равны 14 тыс. лк и 100 Вт/м².

Анализ полученных результатов указывает на то, что ослабление света на высотах 0—32 км обусловлено главным образом молекулярным рассеянием. На высотах >32 км ослабление может вызываться рассеянием и поглощением солнечной радиации аэрозольным компонентом. Хотя поверхность Венеры достигает сравнительно небольшая часть внеатмосферного потока солнечной радиации (около 1,8%), даже этого достаточно для обеспечения значительной освещенности на уровне поверхности (по сравнению с земными условиями) и поддержания высокой температуры в нижней части атмосферы. Таким образом, данные, полученные с помощью АМС «Венера-9 и -10», не противоречат гипотезе о парниковом механизме нагревания атмосферы Венеры.

Американские ученые А. Лацис и Д. Хансен выполнили детальное сопоставление рассмотренных данных по освещенности с результатами теоретических расчетов для двух- и трехслойных (с границей слоев на высотах 35 и 48,5 км) моделей атмосферы Венеры, достаточно точно учитывая многократность рассеяния солнечной радиации. Выбор трехслойной модели был обусловлен тем, что модель однородной атмосферы полностью противоречит данным наблюдений, а двухслойная модель с границей слоев на высоте 35 км мало согласуется с этими данными. Однако отсутствие результатов измерений на высотах >48,5 км вносит неопределенность в выбор параметров моделей. Кроме того, еще больше сказывается на полученных выводах отсутствие сведений о характеристиках облаков в нижних слоях атмосферы.

Данные о распределении рассеянной солнечной радиации по различным направлениям, полученные с помощью БСА «Пионера-Венеры-2», позволили рассчитать величины нисходящих (F^{\downarrow}), восходящих (F^{\uparrow}) и эффективных ($F = F^{\downarrow} - F^{\uparrow}$) потоков радиации (рис. 11)

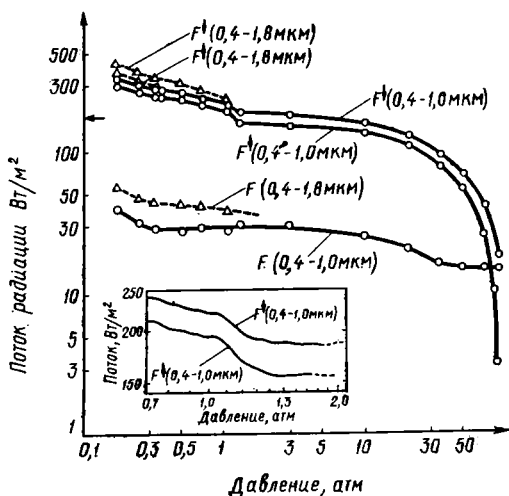


Рис. 11. Высотные распределения восходящих (\uparrow), нисходящих (F^\downarrow) и эффективных ($F = F^\downarrow - F^\uparrow$) потоков радиации для различных интервалов длин волн

с учетом результатов измерений поглощения солнечной радиации различными слоями атмосферы. Были построены высотные распределения радиационных потоков (в диапазоне 0,4—1,0 мкм) по данным для 390 точек в интервале высот 0—61 км.

Анализ результатов измерений выявил наличие трех зон облачного покрова на высотах ≥ 49 км и довольно прозрачную атмосферу на меньших высотах. При этом в момент входа БСА в атмосферу коротковолновая радиация, поглощенная темной поверхностью Венеры, равнялась примерно 15 Вт/м^2 , что составляет около 2% по отношению к внеатмосферной инсоляции (облучение солнечной радиацией).

Полученные данные свидетельствуют о том, что Солнце наблюдалось на уровне раскрытия парашюта (уровень давления около 80 мбар), а оптическая толщина, равная 7 (когда Солнце практически незаметно), была достигнута в атмосферном слое с давлением 80—185 мбар. Ниже уровня 185 мбар азимутальная зависимость коротковолновой радиации практически отсутствует, что упрощает вычисления радиационных пото-

ков. Оказалось, что специфику высотных распределений радиационных потоков можно объяснить с помощью лишь одного молекулярного рассеяния (при слабом поглощении).

Предварительный анализ показывает, что не возникло каких-либо осложнений из-за загрязнения окон радиометра при радиометрических измерениях в слое облачности: точность измерений эффективного потока теплового излучения в диапазоне 0,4—1,0 мкм составляла около 10% и несколько выше — для интервала 1,0—1,8 мкм (ошибки измерений восходящих и нисходящих потоков радиации равны примерно $\pm 2\%$). Разность нисходящего и восходящего потоков была минимальна у поверхности.

Наблюдения показали, что на атмосферных уровнях, где давление превосходит 1,3 атм, изменения восходящих и нисходящих радиационных потоков с глубиной являются очень плавными и медленными в отличие от больших высот, где наблюдается значительная изменчивость с высотой. Последнее подтверждается данными измерений особенности структуры облаков на различных высотах. Особенно сильное уменьшение радиационных потоков наблюдалось в атмосферных слоях с давлениями 1,03—1,3, 0,32—0,97 и $< 0,32$ атм. Поглощение солнечной радиации облаками оказалось незначительным ниже уровня 0,32 атм.

Альbedo поверхности Венеры в видимой области спектра составляет около 15%. При внеатмосферной инсоляции, равной 180 Вт/м^2 , примерно половина солнечной радиации поглощается атмосферой выше уровня с давлением 185 мбар. В среднем для планеты радиация, поглощенная поверхностью, составляет 12 Вт/м^2 .

Эти данные еще раз подтверждают обоснованность гипотезы о парниковом эффекте как основном механизме, обеспечивающем поддержание высокой температуры поверхности Венеры.

Многоканальный инфракрасный радиометр БСА «Пионера-Венеры-2» получил данные об эффективных потоках теплового излучения на высотах 45—61 км (нижнее значение высоты соответствует началу спуска БСА на парашюте).

Высотное распределение разности восходящего и нисходящего потоков (эффективный поток) суммарного

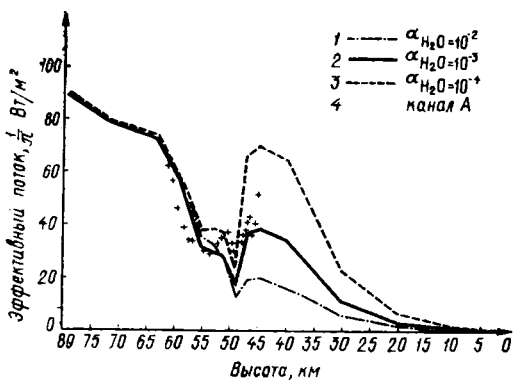


Рис. 12.—Сравнение наблюдаемых (канал А) и расчетных высотных распределений эффективного потока радиации $F = F_{\downarrow} - F_{\uparrow}$. Расчеты проводились для различных величин отношения смеси водяного пара (α_{H_2O})

теплового излучения (рис. 12, канал А) характеризуется быстрым убыванием на высотах 57—61 км, относительно малой изменчивостью — на высотах 47—57 км (наиболее четко выражен спад лишь на высотах 50—47 км) и значительным возрастанием — на высотах 47—45 км. Быстрое убывание этого потока на высотах 57—61 км и спад на высотах 47—50 км, по-видимому, обусловлены ослаблением длинноволновой радиации частицами облаков.

Аппаратура БСА «Пионера-Венеры-2» обнаружила резкий (примерно в 3 раза) спад эффективного потока теплового излучения в интервале длин волн 7—9 мкм на высоте 50,6 км (соответствующей верхней границе нижней зоны облаков) с последующим постепенным возрастанием до прежней величины на более низких высотах. В интервале длин волн 6—7 мкм наблюдалось убывание этого потока примерно на 30% близ высоты 52,25 км, т. е. над нижней зоной облака. Над уровнем верхней границы облаков имеется возрастание потока с последующим убыванием на 50% внутри облака. Сильное увеличение эффективного потока теплового излучения на длинах волн 6—7 мкм при уменьшении высоты начинается на высоте 48 км (перед достижением нижней границы облачного покрова).

Численное моделирование условий наблюдений с ис-

пользованием данных измерений структурных параметров атмосферы и характеристик облачного покрова Венеры показало, что наблюдаемое возрастание эффективного потока суммарного теплового излучения с высотой на высотах ~ 57 км (верхняя зона облачности) сильнее расчетного (см. рис. 12). Более значительны и наблюдаемые изменения эффективного потока в нижней зоне облачного слоя (50—47 км).

Анализ высотного распределения эффективного потока теплового излучения на чувствительность к отношению смеси водяного пара показал, что наилучшее согласие с расчетными данными достигается на высотах ниже 47 км при отношении смеси около 10^{-3} . Последнее подтверждается данными прямых измерений концентрации водяного пара в подоблачном слое атмосферы. Полученное содержание водяного пара под облаками сравнимо с тем, которое необходимо для «перекрытия» окон прозрачности атмосферы в инфракрасном диапазоне спектра CO_2 . Последнее способствует усилению парникового эффекта в атмосфере Венеры, но, несомненно, однако, что значительный вклад в парниковый эффект вносят и частицы облаков.

ОБЛАЧНЫЙ ПОКРОВ

Исследования, проведенные при помощи советских и американских АМС, значительно расширили наши представления о химическом составе, структуре и процессах формирования облачного покрова Венеры. При этом следует учесть, что изучение процессов эволюции аэрозоля на Венере может оказаться весьма полезным при исследовании влияния аэрозоля на земной климат. Дело в том, что Венера представляет собой прекрасную природную лабораторию для анализа глобального взаимодействия облаков, радиации и климата в условиях незначительной силы Кориолиса и отсутствия температурных контрастов суши и моря.

Облака на Венере имеют несколько ярусов. Верхняя граница основного облачного слоя находится на высоте примерно 65 км. Выше облачного покрова, до высот 85 км, имеется слой дымки, отчетливо обнаруживаемый в ультрафиолетовом диапазоне. В основном облачные образования по концентрации в них частиц

похожи на разреженный земной туман с дальностью видимости до нескольких километров.

Данные о расслоении облачного покрова были получены при измерениях распределения степени освещенности в атмосфере Венеры на различных высотах, о чем уже говорилось в предыдущем разделе. Полеты к Венере АМС «Венера-11 и -12» и «Пионер-Венера-1 и -2» дополнили эти данные и расширили наши представления об облачной структуре Венеры.

Результаты измерений с помощью нефелометра и фотометра СА «Венеры-11 и -12» подтвердили вывод о расположении нижней границы основных венерианских облаков на высоте 48—49 км, сделанный на основании данных СА «Венеры-9 и -10». Атмосферный слой на высотах 48—51 км характеризуется максимальным рассеянием излучения, что можно объяснить либо повышенной оптической толщиной этого слоя, либо действием рассеяния. Ниже этого слоя атмосфера довольно прозрачна для солнечной радиации, но аппаратура СА «Венеры-11 и -12» зарегистрировала отдельные слои, в которых усиливается рассеяние под действием аэрозольного компонента. Так, помимо обнаруженного ранее аэрозольного слоя на высотах 14—17 км, замечен аналогичный слой на высотах 5—10 км.

Очень ценную информацию об облачном покрове Венеры содержат телевизионные изображения, полученные с помощью ИСВ.

Анализ изображений облачного покрова, полученных с помощью ИСВ «Пионера-Венеры-1», выявляет прежде всего черты сходства с результатами предшествующих наблюдений. Уже 17 декабря 1978 г. была обнаружена известная У-образная структура облачного покрова, повторно возникавшая с периодичностью около 4 сут. Для периодов отсутствия У-образной неоднородности характерно наличие ярких полярных шапок и относительно темной области в низких широтах при наличии хаотически распределенных ярких неоднородностей облачного покрова вблизи края диска планеты.

От экваториальной стороны полярного кольца облачности часто отделялся небольшой «аппендикс», пересекающий под значительным углом круги широт. Сопоставление двух изображений облачного покрова, разделенных интервалом времени 5—6 ч, отчетливо выявило движение (обратную циркуляцию) планетарного мас-

штаба, противоположное вращению планеты, и особенности циркуляции более мелких масштабов.

Хорошо видна на низких широтах обнаруженная ранее ячеистая структура облачного покрова Венеры, ячейки которой «окаймлены» яркими светлыми «ободками». Анализ увеличенных изображений свидетельствует о группировании ячеек в скопления, имеющие большую горизонтальную протяженность. Ячейки наблюдаются даже в умеренных широтах, имеются и «дугообразные волны», зарегистрированные аппаратурой «Маринера-10».

Первые изображения Венеры, полученные с помощью ИСВ «Пионера-Венеры-1» при фазовом угле около 120° , характеризуются низкими контрастами яркости (не более 5%) по сравнению с наблюдавшимися на изображениях, переданных «Маринером-10» (при фазовом угле около 25°). Относительно низкие контрасты при наклонном визировании (под большим углом к вертикали) можно объяснить тем, что поглощение ультрафиолетового излучения облаками, ответственное за контрасты яркости полученных изображений, происходит под верхней частью ярких сернокислотных облаков. Это подтверждается тем, что на последующих изображениях, относящихся к фазовому углу около 90° , контрасты яркости значительно возросли.

Анализ глобального распределения степени поляризации излучения Венеры обнаружил положительную поляризацию на длине волны 270 нм, которая, по-видимому, вызвана молекулярным рассеянием солнечной радиации атмосферной толщцей газа, находящегося в облаках и над облаками. Отрицательную поляризацию на более длинных волнах можно объяснить рассеянием излучения на каплях серной кислоты, имеющих радиус около 1 мкм, а положительные значения поляризации на этих же длинах волн (особенно 935 нм) в полярных районах и вблизи терминатора — присутствием тонкого слоя дымки из мелких частиц над основным облачным слоем.

При предположении, что показатель преломления этих частиц тот же, что и у капель основного слоя (1,44), радиус частиц дымки не должен превышать 0,4 мкм. Очень приближенные оценки оптической толщины слоя дымки в видимой области спектра дают значения порядка 0,05—0,1. По-видимому, дымка распо-

ложена в стратосфере вблизи атмосферного уровня с давлением 10 мбар. Перспектива продолжения функционирования ИСВ «Пионера-Венеры-1» на протяжении 2—3 лет позволит достичь лучшего понимания «жизненного цикла» аэрозоля, составляющего слой стратосферной дымки, окружающей планету.

Анализ нефелометрических данных БСА «Пионера-Венеры-2» привел к выводу, что вертикальная структура облачного покрова Венеры характеризуется наличием четырех отчетливо выраженных зон (рис. 13): *A* — начинающаяся на высоте около 46,1 км и состоящая из двух тонких (толщиной 50 и 200 м) четко ло-

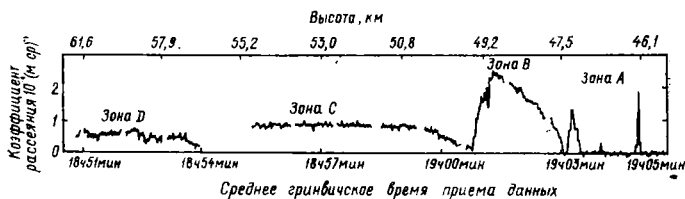


Рис. 13. Изменение коэффициента рассеяния (под углом 175°) в зависимости от времени наблюдений (высоты ИСВ над поверхностью планеты)

кализированных аэрозольных слоев; *B* — охватывающая атмосферный слой на высотах 47,4—49,4 км, где наблюдается сильный и широкий максимум рассеяния (возможно, лишь этот слой следует рассматривать как настоящее облако по соответствующим земным стандартам); *C* — находящаяся на высотах 49,4—56,0 км и характеризующаяся слабой зависимостью коэффициента рассеяния от высоты; и наконец, *D* — имеющая менее сглаженное распределение рассеяния на высотах 56,0—62 км.

Для всех зон характерно присутствие мелкомасштабной (тонкой) вертикальной структуры, которую вполне можно считать реальной. Существенно, что даже зона *D* расположена значительно ниже верхней границы облаков. В согласии с данными АМС «Венера» облачный покров имеет четкую нижнюю границу, а слой атмосферы под облаками относительно свободен от аэрозольных частиц: на высотах меньше 45 км регистрируемый нефелометром сигнал очень мал (как правило, не выходит за пределы чувствительности прибора).

Анализ всех полученных данных позволяет считать, что зона *C* облачного покрова имеет глобальные масштабы, тогда как зоны *A* и *B* подвержены изменениям от точки к точке. Результаты нефелометрических измерений для зоны *D* согласуются с расчетами коэффициентов рассеяния (с учетом данных о микроструктуре облаков, полученных при помощи спектрометра размеров облачных частиц). Кроме того, в этих расчетах предполагается, что данные частицы являются сферическими, а их показатель преломления равен 1,44. Согласие наблюдательных данных с результатами расчетов подтверждает сделанный ранее вывод о том, что облака состоят из капель 75—85% -ного водного раствора серной кислоты.

Аналогичное сопоставление для зоны *C* дает для облачных частиц коэффициент преломления 1,33 и не исключает присутствия и несферических частиц серы с высоким коэффициентом преломления, что может объяснить гораздо более слабое рассеяние излучения назад, чем для сфер того же объема и тем же показателем преломления. Зона *B* облачного покрова состоит, по-видимому, из жидких (сферических) непоглощающих частиц, имеющих показатель преломления около 1,37. В этом случае не обязательно предполагать присутствие крупных частиц серы.

Состав частиц в зоне *A* тот же, что и в зоне *D*, но распределение их по размерам является несколько более широким. Сходство микроструктуры облаков Венеры в нижней части зоны *B* и в зоне *A* заставляет предположить, что последняя представляет собой слой, отделившийся от зоны *B* под влиянием местных погодных условий.

Установленный на БСА «Пионера-Венеры-2» спектрометр размеров частиц впервые позволил выполнить исследования микроструктуры облачного покрова Венеры на различных высотах. Полученные результаты использовались для построения высотных распределений концентрации частиц, а также коэффициента экстинкции (ослабления радиации) на длине волны 600 нм (рис. 14). Последний рассчитывался в предположении, что коэффициент преломления частиц составляет 1,5, а при определении концентрации плотность вещества частиц считалась равной 1,8 г/см³.

Анализ результатов также выявил четкое рассло-

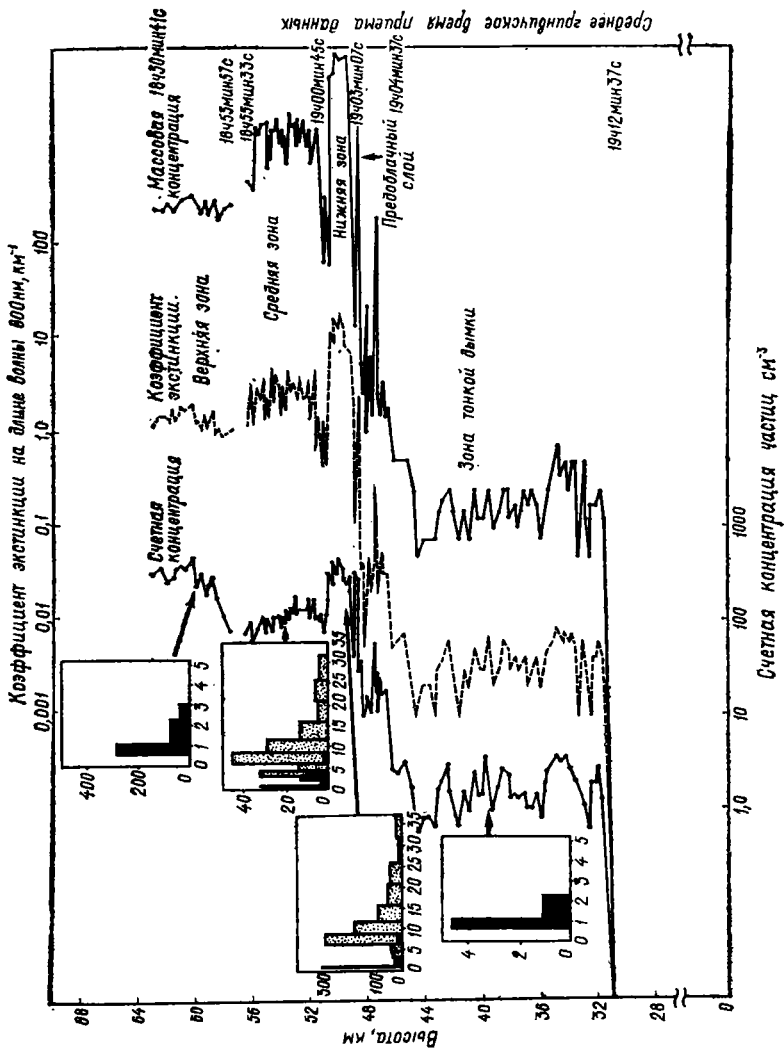


Рис. 14. Вертикальная структура облачного покрова Венеры по данным измерений, проведенных с помощью фотоэлектрического счетчика частиц. В квадратах левой части рисунка изображены распределения концентраций частиц по размерам (диаметру), выраженных в микрометрах. Зачерненные столбики характеризуют счетную концентрацию частиц ($\text{см}^{-3} \cdot \text{мкм}^{-1}$), а заштрихованные — массовую концентрацию (в условных единицах)

ние облачного покрова на четыре зоны с различными свойствами, причем верхние зоны (верхняя, средняя и нижняя) расположены под слоем тонкой дымки. На высотах ниже 31 км вообще не было зарегистрировано никаких частиц. Самым неожиданным оказалось обнаружение многовершинности облачной микроструктуры, т. е. наличие нескольких максимумов в распределении концентрации частиц по размерам. Полученные данные подтверждают существование двух максимумов микроструктуры, но выявили также третий максимум (диаметром около 1 мкм) и зону крупных частиц (размером около 10 мкм). По расположению максимумов можно сделать вывод, что крупные частицы средней облачной зоны являются частицами серы, в то время как крупные частицы нижней зоны облачного покрова — каплями серной кислоты.

В верхней зоне облаков преобладают мелкие частицы диаметром 0,6—4 мкм при довольно высокой счетной концентрации (числа частиц в 1 см^2) — 300—400 см^{-3} , но относительно низкой массовой концентрации (общей массы частиц в 1 см^3) — около 1 мг/м^3 . Если состав облака на высотах 67—62,5 км такой же, как и на высотах 62,5—58 км, то оптическая толщина верхней зоны должна быть вдвое больше.

Данные, полученные для несколько меньших высот, указывают на существование широкого диапазона размеров частиц с диаметром около 1,2 мкм и признаками двухвершинности микроструктуры на некоторых высотах. В средней зоне облачного покрова (51—56 км) наблюдается уменьшение счетной концентрации частиц до 100 см^{-3} , но при возрастании как коэффициента экстинкции (до 2 км^{-1}), так и массовой концентрации (5 мг/м^3) за счет увеличения размеров частиц до 5—25 мкм (оптическая толщина этой зоны составляет 12,5). Микроструктура всей зоны является трехвершинной при наличии очень узкого максимума 3,5 мкм, разделяющей мелкие (1 мкм) и большие частицы.

Наиболее плотной является нижняя зона (49—51 км). Счетная концентрация частиц здесь не очень превышает наблюдаемую в верхней зоне, но коэффициент экстинкции и массовая концентрация оказываются более высокими (соответственно на один и два порядка величины). В данной зоне содержатся наиболее крупные частицы. Непосредственно под ней находится

предоблачный слой, характеризуемый, по-видимому, тем же составом, но имеющий частицы меньших размеров. Суммарная оптическая толщина нижней зоны и предоблачного слоя равна примерно 13, т. е. почти в 2 раза меньше оптической толщины всего облачного покрова.

Микроструктура нижней зоны облаков является практически двухвершинной с преобладанием крупных (~ 10 мкм) и очень мелких частиц. В расположенном ниже слое (32—48 км) находится устойчивая тонкая дымка из частиц диаметром около 1 мкм при их концентрации от 1 до 20 см^{-3} . В своей верхней части эта дымка является относительно более плотной (ее массовая концентрация и оптическая толщина здесь очень малы).

Анализ данных измерений позволяет заключить, что частицы размером 3,5 мкм состоят из жидкого вещества (капли серной кислоты), а более крупные частицы облаков являются твердыми и несферическими (возможно, это частицы серы). Но не исключена и вероятность того, что они представляют собой жидкие капли различных размеров. Характер вертикального распределения концентрации таких частиц указывает на наличие их источника в верхней части облаков и их стока — в нижней (при нисходящем потоке частиц, обусловленном перемешиванием и оседанием под действием собственной тяжести).

По-видимому, существует фотохимический источник образования серы и серной кислоты на высоте ≥ 57 км (верхней границы средней зоны). Это означает, что ультрафиолетовая солнечная радиация не может проникать далеко в глубь облака. Предполагается, что крупные частицы серы образуются на высотах около 57 км и затем медленно оседают, а достигая высоты 51 км, начинают испаряться и на высоте 48 км их остатки плавятся, формируя частицы слоя дымки. Размер крупных частиц (больше 30 мкм), наблюдаемых в средней и нижней зонах облачного покрова, может удваиваться за счет их слияния при падении в слое 49—51 км, что делает вероятным выпадение частиц на поверхность планеты в форме осадков. В целом исследование микроструктуры выявило гораздо более сложную картину венерианских облаков, чем ожидавшаяся.

В частности, обращает на себя внимание роль больших частиц в возвращении массы веществ в нижние слои атмосферы.

ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ

Данные измерений, проведенных с помощью СА «Венера» и АМС «Маринер-10», указали на сложную картину атмосферных движений облачного покрова Венеры. Так, например, анализ 22 телевизионных изображений Венеры, полученных с помощью «Маринера-10», позволил получить убедительное доказательство существования глобального околополярного вихря в венерианской стратосфере Южного полушария, характеризуемого системой спиралеобразных облачных полос, сходящихся к полярной зоне сплошной облачности из зоны более низких широт. Этот вихрь внешне является точным аналогом спиралеобразных систем облачности земных тропических циклонов, наблюдаемых с помощью метеорологических ИСЗ. Хотя информация, относящаяся к Северному полушарию Венеры, гораздо более скудна, имеются основания считать, что там наблюдается аналогичная крупномасштабная структура облачного покрова.

Рассмотрение полушарных мозаик изображений Венеры отчетливо выявляет наличие в полярной зоне Южного полушария сплошного облачного покрова, причем яркость покрова примерно на 50% превосходит яркость облаков в других районах Южного полушария. Зона сплошной облачности имеет форму эллипса, что позволяет предположить существование волнообразных движений в атмосфере на высоких широтах.

Анализ перемещения отдельных структурных особенностей облачного покрова показывает, что на широтах до 60—65° ю. ш. наблюдается зональное (вдоль кругов широты) движение всей стратосферы. В полосе низких и умеренных широт имеется обнаруженное ранее, зависящее от широты вращение атмосферных слоев, которое определяется из меридиональной зависимости зонального переноса неоднородностей облачного покрова вдоль кругов широты.

Вток воздуха в верхнюю часть венерианского околополярного вихря в венерианской стратосфере аналогичен втоку воздуха в зону земного тропического урагана

вблизи подстилающей поверхности. Если такого рода аналогия правильна, следует предположить существование оттока венерианского воздуха в нижерасположенные слои атмосферы в зоне вихря, возможно, вблизи поверхности планеты. Таким образом, на Венере, вероятно, существует циркуляция, аналогичная хорошо известной в тропиках Земли циркуляции Гадлея (подъем воздуха над экватором и опускание в высоких широтах), охватывающая целое полушарие, причем источником энергии циркуляции в этом случае является не выделение скрытого тепла конденсации (как в земном тропическом циклоне), а поглощение солнечной радиации верхним слоем облачного покрова.

Все это означает, что околполярный вихрь на Венере, по-видимому, поддерживается за счет превращения поглощенной солнечной радиации в скрытое тепло. Однако остаются загадочными существование венерианского яркого полярного облачного покрова и долговременной неустойчивости, которая определяет наблюдаемую изменчивость (появление и исчезновение) полярного облака.

Успешное развитие исследований по численному моделированию общей циркуляции земной атмосферы, накопление значительного материала данных по прямым измерениям состава, структурных параметров и ветра создали основу для выполненных за последние годы теоретических работ с целью численного моделирования общей циркуляции венерианской атмосферы.

Расчеты для условий венерианской атмосферы показали, что на высотах меньше 56 км изменение характеристик циркуляции в течение суток (суточный ход) практически отсутствует. На высотах > 56 км, наоборот, суточный ход проявляется наиболее значительно. Для Венеры, как правило, сила Кориолиса незначительна, лишь в глубоких слоях атмосферы учет силы Кориолиса необходим при рассмотрении движения венерианского воздуха вдоль кругов широты. Как показывают расчеты, вероятная скорость этого движения составляет около 1 м/с.

Анализ данных, полученных с помощью АМС, указывает на наличие в атмосфере Венеры двух слоев с различными режимами циркуляции. В нижнем слое (на высотах меньше 40 км) суточный ход отсутствует, вертикальный перепад температур почти адиабатический,

а атмосферные движения медленные. В верхнем слое (выше 70 км) суточный ход значителен, вертикальный перепад температур меньше адиабатического и наблюдается очень сильный (~ 100 м/с) зональный (вдоль кругов широты) перенос в направлении вращения планеты.

Результаты теоретического анализа циркуляции глубоких слоев атмосферы, основанного на теории подобия Земли и Венеры, достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений. Гипотеза о существовании циркуляции Гадлера между экватором и полюсом Венеры (с более обширной зоной восходящих, чем нисходящих движений) хорошо согласуется с наличием адиабатического расслоения венерианской атмосферы, отсутствием в ней турбулентности, почти полным отсутствием горизонтальных перепадов температур (малые контрасты температуры экватор — полюс), а также согласуется со значениями горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра (примеро 2 и 0,5 см/с).

Общая циркуляция атмосферы Венеры является на первый взгляд простейшей по сравнению с другими планетами: из-за медленного вращения планеты и большой продолжительности венерианских суток, а также из-за малого наклона орбиты к эклиптике, приводящего к отсутствию времен года. Отмеченные факторы позволяют предположить симметричность общей циркуляции венерианской атмосферы относительно экватора и побудили ряд авторов разработать модели циркуляции, которая симметрична относительно оси Венера—Солнце.

Однако данные наблюдений и теоретических исследований, выполненных за последние годы, привели к выводу, что общая циркуляция атмосферы Венеры намного сложнее, чем это предполагалось ранее. Основной чертой этой циркуляции на высотах более 50 км является «сверхвращение» атмосферы — зональная циркуляция со скоростью ≤ 100 м/с, причем значительные зональные ветры наблюдаются и на меньших высотах. Меридиональный компонент ветра существенно меньше, он составляет не более 10 м/с на уровне верхней границы облачного покрова.

Горизонтальные контрасты температуры в венерианской атмосфере, по-видимому, относительно малы. Различие температур дневной и ночной сторон планеты

составляет ~ 10 К, но контраст температуры между экватором и полюсом гораздо больше. Иногда обнаруживаются признаки существования атмосферных волн планетарного масштаба (планетарных волн).

Американские ученые Р. Янг и Д. Поллак разработали более полную, чем предложенные ранее, модель общей циркуляции атмосферы Венеры, на основании которой было рассчитано среднее зональное распределение ветра.

Использование модели Янга—Поллака показало, что в зависимости от задания начальных условий возможны различные значения скорости среднего зонального ветра. В случае решения, которому соответствуют максимальные зональные скорости ветра у экватора около 90 м/с, наблюдаются планетарные волны, распространяющиеся вдоль кругов широты. Эти волны особенно четко проявляются на умеренных и высоких широтах и иногда приобретают очертания У-образной структуры, расположенной около экватора.

Максимальные температурные контрасты между дневной и ночной сторонами зарегистрированы на умеренных широтах. Меридиональные скорости ветра в венерианской атмосфере на умеренных и низких широтах не превосходят 10 м/с. Механизмом, ответственным за поддержание сильных зональных ветров на Венере, может быть неустойчивость ее атмосферы, проявляющаяся при взаимодействии средней меридиональной циркуляции и вихрей планетарного масштаба. Некоторые из полученных результатов численного моделирования указывают на наличие неустойчивости атмосферы с большой амплитудой волновых движений атмосферы. Таким образом, возмущения среднего зонального поля ветра должны превысить определенный уровень амплитуды, прежде чем возникнет неустойчивость. Однако этот вывод требует дальнейшего подтверждения.

Меридиональная циркуляция вызывает перенос вверх зонального компонента количества движения. С вихрями планетарного масштаба, оказывается, связан главный механизм генерации потенциальной энергии атмосферы. Эти вихри также дают существенный вклад в горизонтальный перенос углового момента (момента количества движения), причем вращение планеты играет существенную роль в формировании первоначальной средней зональной циркуляции.

Вскоре после «включения» механизма нагревания солнечной радиацией возникает циркуляция от подсолнечной к противосолнечной точке планеты при максимальной горизонтальной скорости переноса атмосферных слоев около 15 м/с. На эту циркуляцию налагаются малые средние зональные ветры, вызываемые на умеренных широтах малыми силами Кориолиса, которые тем самым также воздействуют на среднюю меридиональную циркуляцию атмосферы Венеры. Вследствие первоначального совместного вращения атмосферы и твердой оболочки планеты средняя меридиональная циркуляция переносит вверх большие по величине значения количества движения на экваторе и ускоряет движение атмосферы в направлении вращения планеты.

Вслед за этим под влиянием неустойчивости происходит усиление зонального ветра и планетарные вихри начинают вносить решающий вклад в перенос момента количества движения. Эти вихри продуцируют потенциальную энергию, которая превращается главным образом в кинетическую энергию средней зональной циркуляции (при этом циркуляция на высотах более 30 км практически нечувствительна к особенностям циркуляции на меньших высотах). Специальные численные эксперименты подтвердили, что вращение Венеры оказывает более существенное влияние на первоначальное формирование зональной циркуляции, чем движение зоны нагревания, вызванное солнечной радиацией в процессе перемещения Солнца над планетой.

Суммируя данные об атмосферной циркуляции на Венере, следует отметить, что картина теплового режима и динамики венерианской атмосферы, которая в последнее время стала постепенно вырисовываться, радикально отличается от представлений, существовавших еще несколько лет назад. Неожиданно очень сложной оказалась верхняя атмосфера Венеры: наземные наблюдения в сочетании с данными АМС выявили различные особенности глобальной циркуляции в венерианской атмосфере, которые связаны с наличием волн планетарного масштаба, неустойчивостей и волн регионального масштаба, конвективных движений и т. д. Однако полной уверенности в реальном существовании этих явлений пока еще нет, поскольку данные о них получены в результате малого количества наблюдений.

Остается нераскрытым механизм глобальной зональной (четырёхсуточной) циркуляции в верхней атмосфере Венеры, причем не исключено, что эта циркуляция охватывает (при уменьшающейся скорости) очень глубокие слои атмосферы, и в этом случае потребуется пересмотр существующей концепции спокойной атмосферы с доминирующей медленной циркуляцией Гадлея (подъем воздуха над экватором и опускание на высоких широтах).

По мнению некоторых ученых, наиболее существенными являются следующие особенности динамики венерианской атмосферы: 1) различие циркуляции в верхних и нижних слоях атмосферы с переходной зоной на высотах 40—60 км, где наблюдается сильная турбулентность; 2) важная роль переноса тепла в горизонтальном направлении на всех высотах; 3) значительный суточный и широтный ход в верхней атмосфере, приводящий к сравнимым по величине контрастам температуры «день—ночь» и «экватор—полюс», а также к сравнимым меридиональным и зональным ветрам; 4) пренебрежимо малый суточный ход в нижних слоях атмосферы и медленная меридиональная циркуляция Гадлея, обусловленная меридиональной изменчивостью нагревания атмосферы; 5) адиабатическая, нетурбулентная, структура глубинных слоев атмосферы; 6) циркуляция в термосфере. — от дневной к ночной стороне планеты; 7) отсутствие годового хода (зависимости от времени года); 8) относительно слабое влияние силы Кориолиса.

Хотя есть основания считать движение неоднородностей облачного покрова, наблюдаемых в ультрафиолетовом диапазоне, индикатором реальности четырехсуточной циркуляции, остается все еще неясным взаимодействие этой циркуляции и планетарных волн.

При этом необходимо установить: 1) существует ли зависимость скорости зональной циркуляции от долготы, особенно в подсолнечной зоне; 2) зависит ли скорость зонального ветра от высоты и 3) существует ли отчетливое разделение атмосферы на верхнюю, где сосредоточены сильные ветры, и нижнюю. Центральной проблемой динамики венерианской атмосферы является полное выяснение природы четырехсуточной циркуляции, а также выявление наблюдаемых закономерностей и факторов, определяющих циркуляцию в нижних сло-

ях атмосферы (роль циркуляции Гадлея, конвекции, волновых движений и т. д.).

Принципиальное значение имеют исследования пространственно-временной изменчивости притока тепла (за счет поглощения солнечной радиации), горизонтальных контрастов поля температуры, которые обуславливают существующий характер атмосферной циркуляции. Остаются пока без ответа вопросы о роли скрытого тепла, связанного с фазовыми превращениями в облаках, о компоненте облаков, ответственном за ультрафиолетовые контрасты облачного покрова Венеры.

ПРОБЛЕМЫ ЭВОЛЮЦИИ ВЕНЕРЫ

В заключение изложим некоторые соображения об эволюции Венеры и ее атмосферы. Анализ данных о строении и составе земной коры привел к выводу о неадекватности гипотезы образования планет путем однородной аккреции веществ типа углеродных хондритов (основного компонента «космического вещества»), о чем свидетельствует состав метеоритов. Такого рода вывод можно распространить и на все планеты земной группы.

Более вероятной является модель неоднородной аккреции, при которой вещество планеты должно прогрессивно накапливаться, начиная с конденсатов, образующихся при охлаждении первоначально горячей (~ 2000 К) протопланетной туманности. В этом случае внутренние части планет должны составлять высокотемпературные конденсаты с примесью компонентов, возникающих при более низкой температуре, которые интенсивно поступают снаружи.

О достоверности модели неоднородной аккреции свидетельствует успешное ее применение для объяснения эволюции и строения земной коры. Опираясь на данные о составе земной коры и исходя из общности процессов формирования планет на ранней стадии их эволюции, американские ученые К. Турекян и С. Кларк рассчитали состав венерианской атмосферы (табл. 8). При этом они предположили, что относительные содержания низкотемпературных компонентов на Земле и Венере одинаковы.

Поскольку Венера и Земля близки по массе, а также по средней плотности и положению в Солнечной

Состав атмосферы Венеры по К. Турекяну и С. Кларку

Составляющие	Объемное содержание, %
Углекислый газ (CO ₂)	98,12
Молекулярный азот (N ₂)	1,86
Аргон-40 (⁴⁰ Ar)	0,02
Аргон-36 (³⁶ Ar)	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Неон (Ne)	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Криптон (Kr)	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Ксенон (Xe)	$2,0 \cdot 10^{-6}$

системе, можно предполагать, что обе планеты образовались из более или менее одинакового вещества, испытали сходную эволюцию и имеют похожие атмосферы. Так как последнее обстоятельство не соответствует действительности, необходимо выяснить возможные факторы различия эволюции атмосфер Венеры и Земли, которые стали причиной существенных отличий в их современной структуре и составе.

Масса атмосферы Венеры, состоящей главным образом из углекислого газа, равна $5,3 \cdot 10^{23}$ г и очень близка к общей массе CO₂, содержащегося в земной коре ($5,1 \cdot 10^{23}$ г). Подобное совпадение побуждает предположить схожесть состава первоначальных атмосфер Венеры и Земли, в ходе эволюции которых углекислый газ на Земле оказался захваченным земной корой, а на Венере сохранился в атмосфере (например, благодаря высокой температуре поверхности).

Однако подобные рассуждения являются весьма спекулятивными, так как можно предположить, что на Венере и на Земле атмосфера имеет вторичное происхождение, образовавшись при дегазации, т. е. за счет газов, выделенных твердой оболочкой планеты. При этом главная причина, обусловившая различие эволюций атмосфер Венеры и Земли, вероятно, связана с невозможностью конденсации водяного пара на поверхности Венеры из-за ее большей близости к Солнцу и высокой температуры поверхности.

Исследования, проведенные в последние годы, принесли больше аргументов в пользу гипотезы, предполагающей, что атмосферы на планетах земной группы образовались в результате «взрывной», а не постепен-

ной (медленной) дегазации твердых оболочек. Так, например, анализ древнейших земных осадочных пород обнаружил, что еще около 3,3 млрд. лет назад у Земли существовали атмосфера и гидросфера. В осадочных породах, имеющих возраст около 3,3 млрд. лет, обнаружена примерно такая же доля углерода органического происхождения, как и в настоящее время (соотношение между органическим и карбонатным углеродом составляет около 1:5). Накопление углерода органического происхождения, по-видимому, началось около 3,7 млрд. лет назад, а это означает, что уже тогда на Земле мог происходить фотосинтез. В частности, при достижении парциального давления O_2 , составляющего 1% по сравнению с современным, стало возможным фотохимическое образование озона и, следовательно, постепенное развитие биологического «щита» Земли.

Оценки содержания водяного пара, углекислого газа и азота в атмосферах, гидросфере (для Земли) и литосферах планет земной группы указывают на то, что масштабы дегазации на Земле и Венере были почти одинаковыми, тогда как на Марсе—примерно в 100 раз меньшими. Причиной столь различных масштабов дегазации, вероятно, является различие хода температуры в процессе эволюции этих планет.

Наблюдаемая плотность Венеры на 17% меньше того значения, которое следовало ожидать, если бы Венера имела такие же состав и структуру, как и Земля, но существенно отличалась по общей массе и размерам. Подобное различие можно, вообще говоря, объяснить дифференциацией частиц металлов (из силикатных частиц в протопланетной туманности) до начала процесса аккреции протопланетного вещества, в результате чего аккреция Венеры происходила из обедненного металлами материала. Однако при этом возникают серьезные трудности с объяснением процессов физической дифференциации и детального химического состава земной мантии.

А. Рингвуд и О. Андерсон рассмотрели две альтернативные гипотезы, объясняющие упомянутые различия плотности на основе действия химического фракционирования. Обе гипотезы исходят из предположения, что относительное содержание основных элементов (Fe, Si, Mg, Al, Ca) на обеих планетах одинаково. Согласно первой гипотезе большая часть железа на Венере

присутствует в мантии — в форме окислов железа, и поэтому отношение плотностей коры и мантии меньше, чем на Земле. Из этой модели вытекает, что Венера окислена в большей степени, чем Земля, и имеет меньшую плотность внутренней части твердой оболочки благодаря присутствию большего количества кислорода.

Согласно второй гипотезе мантия Венеры почти лишена окислов железа, а различие плотностей внутренних частей твердых оболочек приписывается тому, что аккреция происходила на Земле при более низкой температуре, чем на Венере (поскольку Земля находилась дальше от центра протопланетной туманности, чем Венера). По этой причине на Земле могла произойти аккреция большого количества серы, чего не случилось на Венере. Сера, имеющая сравнительно высокий молекулярный вес и вошедшая в состав земного ядра, могла вызвать возрастание средней плотности Земли.

Если исходить из второй гипотезы, то плотность Венеры оказывается лишь на 0,4% меньше земной. Существует также целый ряд других фактов, противоречащих этой гипотезе и не согласующихся с вытекающим из первой гипотезы выводом о том, что Венера в большей степени окислена, чем Земля.

Имеются, однако, два обстоятельства, свидетельствующих о том, что Венера не является в действительности такой «сухой», как это может показаться. Одно из этих обстоятельств состоит в том, что при окислении углеводородных соединений в твердой оболочке планеты (до углекислого газа) продуцируется большое количество воды. Второе связано с обнаружением на поверхности Венеры калия и урана, что свидетельствует о присутствии гранитов, образование которых на Земле происходило при высокой упругости водяного пара.

По-видимому, дефицит водяного пара на Венере обусловлен влиянием интенсивной фотодиссоциации, которая сопровождалась диссипацией водорода и связыванием кислорода путем образования Fe_2O_3 из FeO . Возможно также, что большое количество воды было израсходовано на образование сернокислотных облаков.

Как отметил Т. Донахью, количество первоначально выделившегося углекислого газа на Венере и Земле, по всей видимости, было примерно одинаковым (около $5 \cdot 10^{23}$ г). Однако на Венере почти весь углекислый газ

остался в атмосфере, тогда как в процессе эволюции Земли около $\frac{3}{5}$ углекислого газа (или более) оказалось связанным в земной коре в форме карбонатов. Последнее легко могло осуществиться при наличии на Земле $1,4 \cdot 10^{24}$ г водяного пара, дегазированного корой и образовавшегося в результате конденсации морей в океаны (что также способствовало аккумуляции CO_2).

Специфика Венеры определяется отсутствием жидкой воды в отличие от земных условий. До сих пор остается неясной судьба венерианского водяного пара, если предполагать, что из твердой оболочки в атмосферу его выделилось столько же, сколько и на Земле. Следует поэтому предположить, что Венера сформировалась из таких горных пород, которые не содержали значительного количества воды, а дегазированный углекислый газ не испытал эволюции, подобной земной и связанной с образованием карбонатов.

Большое значение в связи с этим приобретает выяснение эволюции парникового эффекта, погоды и климата Венеры. Поскольку погодообразующие процессы на Венере не столь сложны, как на Земле, изучение более простой венерианской модели погоды и климата может оказаться полезным для решения задач земной метеорологии. При этом необходимо, в частности, путем непосредственных наблюдений изучить реальные притоки тепла, определяющие атмосферную циркуляцию на Венере.

Заканчивая брошюру, мы хотели бы отметить, что продолжающаяся обработка результатов полученных с помощью АМС «Венера-11 и -12» и «Пионер-Венера-1 и -2», несомненно, уточнит и дополнит приведенные здесь сведения о Венере. Будущие полеты АМС к этой планете позволят получить более подробную информацию, а также, может быть, дадут ответ на то, почему Венера, так схожая с Землей по массе и размерам, в результате своей эволюции столь сильно стала отличаться от нашей планеты по всем остальным характеристикам. Кроме того, одна из основных перспектив изучения Венеры состоит в том, чтобы с максимальной полнотой использовать информацию о Венере для лучшего понимания закономерностей тех процессов, которые происходят в атмосфере и на поверхности нашей собственной планеты.

11 коп.

Индекс 70101

