

**ВНОВЬ ОТКРЫТАЯ ПЛАНЕТА
(РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕНЕРЫ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
ВЕНЕРА 15 И ВЕНЕРА 16)**

*Ю. Н. Александров, А. Т. Базилевский, В. А. Котельников, Г. М. Петров,
О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко*

«Итоги науки и техники». Сер. Астрономия, т. 32. Москва: ВИНТИ, 1987,
с. 201–234

1. Введение

В исследованиях планеты Венера, поверхность которой закрыта сплошным облачным слоем, радиолокационным методам принадлежит особая роль. В то время как в видимых, инфракрасных и ультрафиолетовых лучах мы наблюдаем верхнюю границу облачного слоя, лежащую на высоте 65–70 км, радиоволны проникают через атмосферу Венеры и отражаются твердой поверхностью.

При радиолокации с Земли удалось установить период и направление вращения Венеры, а также радиус ее твердой поверхности, см., например, [4]. Оказалось, что Венера в отличие от других планет вращается в сторону, обратную своему движению вокруг Солнца, и к тому же очень медленно — делая один оборот за 243 земных суток. Исследуя интенсивность отражаемого сигнала, удалось установить, что электрические свойства венерианской поверхности соответствуют широко распространенным на Земле скальным породам на силикатной основе. Выполненный в 1982 г. на спускаемых аппаратах советских межпланетных станций Венера 13 и Венера 14 эксперимент по забору венерианского грунта и анализу его химического состава показал, что Венера действительно покрыта разновидностями базальтов.

Еще в 60-х годах при анализе спектра отраженного Венерой сигнала как в США [9], так и в Советском Союзе [1] были обнаружены обширные области ее поверхности, рассеивающие радиоволны более интенсивно, чем окружающая местность, и выглядящие «радиояркими» на окружающем фоне. Впоследствии с помощью крупнейших радиолокационных установок в Аресибо и Голдстоуне (США) были

получены изображения отдельных участков поверхности Венеры с пространственным разрешением 10–20 км [14, 6]. В последнее время для некоторых снимков горных районов разрешение было несколько улучшено [7]. Однако на этих снимках окружающие пространства с более гладкой поверхностью не различимы вследствие низкого уровня отраженного сигнала. Полярные районы вообще недоступны для наблюдения с Земли.

В 1980 г. с помощью радиовысотометра, установленного на американском космическом аппарате «Пионер-Венера», была построена топографическая карта, охватывающая поверхность Венеры между 60° южной широты и 75° северной [13]. На этой карте видны детали континентального масштаба, такие как Земля Иштар с Горами Максвелла, Земля Афродиты, Область Бета. Измерения высоты шли через 50–150 км. Более мелкие детали — горные хребты, кратеры, рифтовые долины — оказались неразличимы. Между тем, именно эти детали поверхности в совокупности могли бы дать ответ на многие вопросы и, в частности на такой: в настоящее время Венера геологически активна, подобно Земле, или так же безжизненна, как Луна и Меркурий?

Чтобы увидеть эти характерные детали поверхности и в конечном итоге составить детальную карту части северного полушария, и были направлены к планете Венера в 1983 г. космические аппараты Венера 15 и Венера 16.

2. Принципы радиолокационной съемки поверхности Венеры

Космические аппараты Венера 15 и Венера 16 оборудованы радиолокационной системой восьмисантиметрового диапазона волн, состоящей из радиолокационной станции бокового обзора (для получения полутонных изображений поверхности планеты) и радиовысотометра (для построения профилей высот поверхности по трассе полета космических аппаратов). Для получения необходимого пространственного разрешения (1–2 км) применен метод радиолокации с «синтезом апертуры», который для исследования Венеры с космического аппарата использовался впервые.

Во время радиолокационной съемки с помощью системы астроориентации космического аппарата электрическая ось антенны радиовысотометра направлена вдоль местной вертикали к центру планеты. Электрическая ось антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой отклонена от местной вертикали в сторону от плоскости орбиты (рис. 1). С помощью передатчика, установленного на космическом аппарате, периодически «освещается» участок 1 поверхности планеты, оказавшийся в пределах диаграммы направленности антенны.

Элементы поверхности в пределах этого участка находятся на разном расстоянии и имеют разные радиальные скорости относительно космического аппарата. Поэтому отраженные ими и принятые на кос-

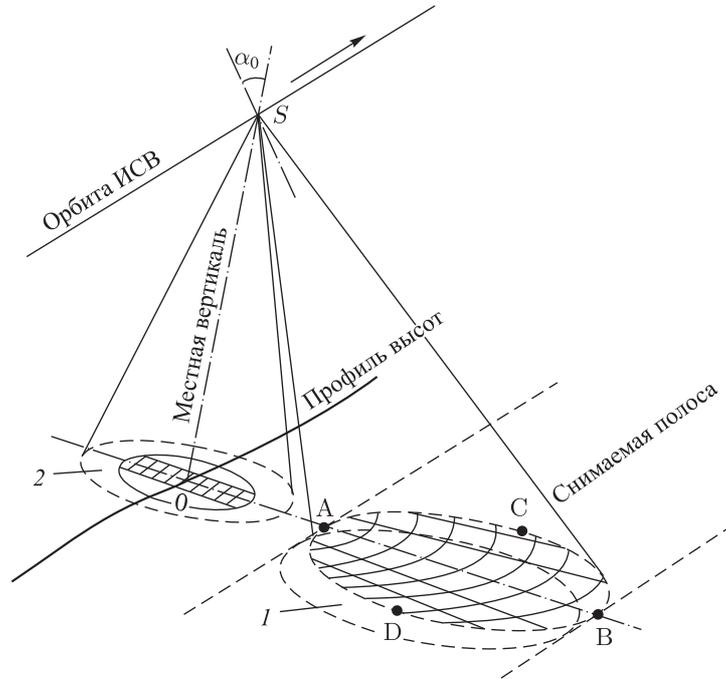


Рис. 1. Схема радиолокационной съемки с космического аппарата. 1, 2 — участки поверхности планеты, попадающие в диаграммы направленности антенн радиолокационной станции с синтезированной апертурой и радиовысотомера. Штриховкой показан участок поверхности планеты, относительно которого измеряется высота космического аппарата при разделении отраженных сигналов радиовысотомера не только по запаздыванию, но и по частоте

мическом аппарате сигналы не одинаково запаздывают и имеют разную частоту вследствие эффекта Доплера. Например, точка *A* находится ближе к космическому аппарату, чем точка *B*, и отраженные ею сигналы приходят раньше. С другой стороны, точка *C* приближается к аппарату и отраженные ею сигналы имеют более высокую частоту, чем сигналы, отраженные точкой *D*, которая удаляется. Это и используется при наземной обработке для разделения сигналов, отраженных отдельными элементами поверхности, и построения «кадра» радиолокационного изображения. В проекции на плоскость линии равного запаздывания представляют концентрические окружности с центром в точке *O* под космическим аппаратом, линии равного доплеровского смещения — конические сечения. Отдельные кадры, получаемые по мере движения космического аппарата, объединяются в сплошную полосу (рис. 1).

Радиовысотомер служит для измерения профиля высот поверхности планеты по трассе полета. Непосредственно измеряется высота

космического аппарата SO относительно некоторого среднего уровня поверхности в освещаемом пятне 2 под аппаратом (рис. 1). Величина местного радиуса планеты вычисляется как разность расстояния аппарата от центра планеты и измеренной высоты.

Пространственная разрешающая способность радиолокационной системы определяет детальность полученного изображения и, следовательно, круг задач, которые могут быть решены по результатам радиолокационной съемки. Первые советские космические аппараты серии «Зонд» фотографировали Луну с номинальным разрешением 3 км. Телевизионная съемка всей поверхности Марса, которая расценивалась как основной результат полета американского космического аппарата «Maginer 9», была выполнена широкоугольной камерой с номинальным разрешением 1 км. Фактическое разрешение зависит от расстояния и угла наблюдения (зенитного расстояния космического аппарата) в момент фотографирования. По этой причине разрешение поверхности Марса при съемке менялось от 1 км до 3 км.

Для картографирования поверхности Венеры с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 технически оказалось возможным создать радиолокационную станцию с синтезированной апертурой с фактическим разрешением 1–2 км, достаточность которого для геологического анализа была подтверждена полученными в этом эксперименте изображениями.

Разрешающая способность по высоте радиовысотомера космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 составляла 230 м, что существенно лучше, чем у радиовысотомера аппарата Пионер-Венера (600–900 м). Вдоль трасс измерения шли через 2,5 км (у радиовысотомера Пионер-Венера через 100 км).

3. Контрастность радиолокационного изображения

Контрастность радиолокационного изображения определяется вариацией мощности отраженных сигналов для отдельных участков поверхности, имеющих разный наклон к падающему лучу. Мощность отраженных сигналов прямо пропорциональна удельной эффективной площади обратного рассеяния $\sigma(\varphi)$. Она показывает, как изменяется эффективная площадь обратного рассеяния участка поверхности единичной геометрической площади в зависимости от угла падения φ . Эта зависимость, полученная ранее на основе наземных радиолокационных наблюдений Венеры и пересчитанная к волне 8 см, на которой работала радиолокационная система космических аппаратов Венера 15 и Венера 16, приведена на рис. 2. Отсюда следует, что при приеме на антенну, поляризация которой согласована с поляризацией зеркально отраженных волн, вначале мощность отраженных сигналов зависит от угла φ очень резко и изменение его на 1° приводит к изменению мощности на 1 дБ (в 1,26 раза).

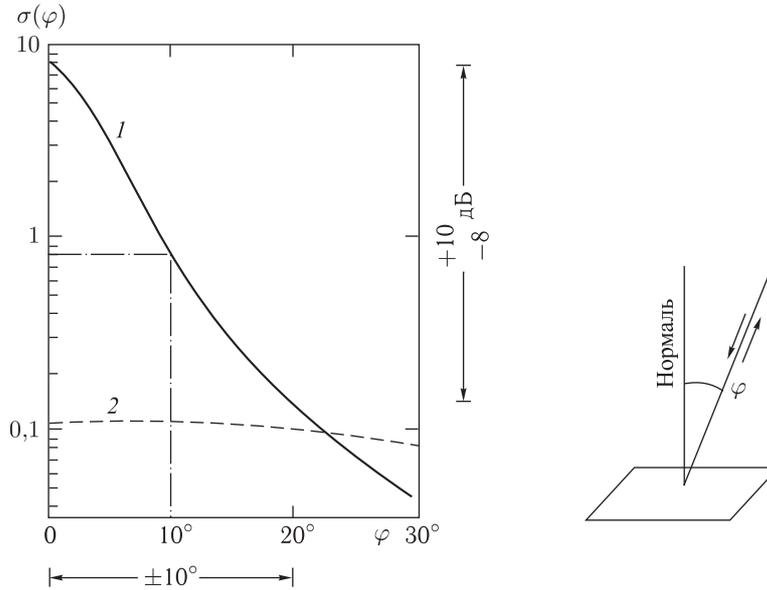


Рис. 2. Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры, характеризующая мощность отраженных сигналов в зависимости от угла падения (по данным, полученным ранее при радиолокации с Земли). Изменение угла φ в пределах $\pm 10^\circ$ относительно среднего значения (10°), на что был рассчитан эксперимент, приводит к изменению мощности отраженных сигналов на 18 дБ

У радиолокационной станции с синтезированной апертурой космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 угол α_0 , составляемый электрической осью диаграммы направленности антенны и местной вертикалью (см. рис. 1), выбран в 10° . При отклонении падающего луча от вертикали на 10° мощность отраженных сигналов уменьшается на 10 дБ (в 10 раз). Эта величина определяет среднее значение яркости изображения, относительно которого выделяются детали изображаемой поверхности. При этом некоторые элементы поверхности, такие как склоны горных хребтов, кратеров и долин, обращенные к космическому аппарату, могут занять более удачное положение по отношению к падающему лучу. Мощность отраженных сигналов для них будет иметь превышение над средним значением до 10 дБ. Другие элементы оказываются ориентированными к падающему лучу менее удачно: для них значение угла φ больше 10° и мощность отраженных сигналов ниже среднего значения до -8 дБ (в 6,3 раза) при $\varphi = 20^\circ$. Следовательно, контрасты между отдельными элементами поверхности могут достигать 18 дБ (63 раз), подчеркивая форму геологических структур.

Обычно при картографировании земных горных районов величину угла α_0 рекомендуется брать в пределах 35° – 55° [11], чтобы сохранить

однозначность между мощностью отраженных сигналов и отклонением элемента от средней поверхности планеты. В данном случае однозначность должна нарушаться, если крутизна склонов, обращенных к космическому аппарату, превышает 10° . Однако такие крутые склоны с достаточной протяженностью, чтобы проявиться при пространственном разрешении 1–2 км, встречаются редко.

4. Погрешность измерения мощности отраженных сигналов

Качество радиолокационного изображения, помимо разрешающей способности и контрастности, определяется также погрешностью измерения мощности отраженных сигналов. Эта погрешность зависит от величины отношения средних значений мощности отраженных сигналов и шумов приемной аппаратуры s/n , определяемого параметрами радиолокационной станции, а также от числа N независимо усредняемых измерений мощности отраженных сигналов. Усреднение необходимо для снижения влияния интерференции сигналов, отраженных отдельными точками в пределах разрешаемого элемента (в оптике это явление называется «спекл-эффект»).

Величина среднеквадратичного значения σ погрешности измерения мощности отраженных сигналов, отнесенная к среднему значению s этой мощности, на выходе устройства обработки имеет вид

$$\frac{\sigma}{s} = \frac{1}{\sqrt{N}} \left(1 + \frac{n}{s} \right).$$

В радиолокационной станции с синтезированной апертурой космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 возможность усреднения независимо полученных измерений мощности отраженных сигналов обеспечивается тем, что соседние кадры радиолокационного изображения перекрываются между собой (см. рис. 1). В зависимости от высоты космического аппарата число N изменяется от 6 до 14. Для элементов поверхности, находящихся в центре диаграммы направленности антенны, отношение сигнал/шум s/n равно 26–20 дБ (400–100 раз по мощности) в диапазоне высот 1000–2000 км и относительная величина среднеквадратического значения погрешности измерения мощности отраженных сигналов σ/s изменяется от 0,41 до 0,27. Для элементов, находящихся на краю диаграммы направленности, отношение сигнал/шум падает в 10 раз. Кроме того, для некоторых элементов поверхности мощность отраженных сигналов может быть еще в 10 раз ниже средней (в зависимости от ориентации к падающему лучу). Для этих элементов σ/s возрастает до 0,5.

Как следует из рис. 2, изменение мощности отраженных сигналов в $\left(1 + \frac{\sigma}{s} \right) = 1,5$ раза (на 1,8 дБ) в среднем происходит при изменении угла наклона элемента поверхности относительно падающего луча на 2° . Следовательно, возможное изменение углов наклона от 0° до

20°, на что рассчитан эксперимент, должно приводить к изменению мощности, превышающему среднеквадратическое значение погрешности ее измерения в $18 \text{ дБ} : 1,8 \text{ дБ} = 10$ раз. Это оказалось достаточным для получения изображения хорошего качества.

5. Влияние венерианской атмосферы

При ограниченном времени ν синтеза апертуры пространственное разрешение Δ в направлении трассы космического аппарата тем выше, чем короче рабочая волна λ :

$$\Delta = \frac{\lambda r}{2\nu v},$$

где r — наклонная дальность, v — горизонтальная составляющая скорости космического аппарата.

С другой стороны, на волнах короче 10–20 см резко падает мощность отраженных сигналов вследствие нерезонансного поглощения электромагнитного излучения в газовых составляющих атмосферы Венеры и, прежде всего, в углекислом газе, из которого она почти целиком состоит (табл. 1).

Ослабление радиолокационного сигнала в атмосфере Венеры при вертикальном прохождении

Длина волны, см	5	6	8	10	12	15	20
Ослабление, дБ	5,6	3,9	2,2	1,4	1,0	0,6	0,4

На волне 8 см, которая была выбрана для радиолокационной системы космических аппаратов Венера 15 и Венера 16, поглощение при вертикальном прохождении атмосферы составляет 2,2 дБ, что было учтено при расчете энергетического потенциала системы. Для сигналов радиолокационной станции с синтезированной апертурой, которые излучаются под углом 10° относительно вертикали, поглощение возрастает на 1,5%.

Очень плотная атмосфера Венеры увеличивает время запаздывания отраженного сигнала, причем над средней поверхностью планеты это увеличение составляет 1,7 мкс или 260 м в пересчете к высоте. Дополнительное запаздывание изменяется в соответствии с толщиной атмосферы над данной точкой поверхности, что учитывалось при обработке по данным измерений профиля высот.

Вследствие рефракции траектория радиолуча радиолокационной станции с синтезированной апертурой в атмосфере несколько искривляется и приближается к вертикали. Это вызывает смещение точки, в которой происходит отражение, по поверхности планеты. Однако из-за небольшой величины угла, составляемого радиолучем с вертикалью, это смещение не превышает 100 м.

Ввиду отсутствия у Венеры заметного магнитного поля можно было использовать при передаче и приеме линейную поляризацию антенн,

не опасаясь возникновения поляризационных помех при прохождении радиоволн через ее ионосферу.

6. Принцип работы радиолокационной системы

Упрощенная блок-схема радиолокационной системы космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 [3], представлена на рис. 3. Это полностью когерентная система, все сигналы которой получаются от общего задающего генератора.

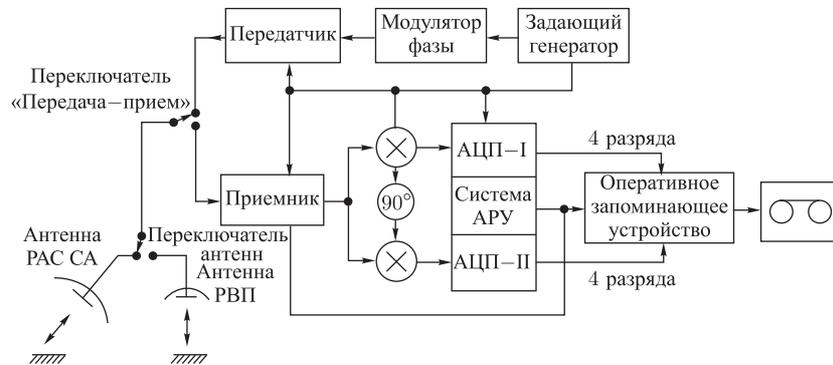


Рис. 3. Упрощенная блок-схема радиолокационной системы космических аппаратов Венера 15 и Венера 16

Передатчик непрерывного излучения (длина волны 8 см) работает высокочастотными импульсами длительностью около 15 мс (рис. 4). Во время первого импульса и последующей паузы, используемой для приема отраженных сигналов, передатчик и приемник подключены к антенне радиолокационной станции с синтезированной апертурой (рис. 4, а), а во время второго импульса и паузы — к антенне радиовысотомера (рис. 4, б).

Внутри импульсов фаза сигнала изменяется на 180° в моменты, определяемые кодом периодически повторяемой последовательности максимальной длины, рис. 5 [8]. Длительность элементарного импульса, определяющего разрешающую способность радиолокационной системы по наклонной дальности и высоте равна 1,54 мкс. В режиме радиолокационной станции с синтезированной апертурой период кодовой последовательности содержит 127 элементарных импульсов (195,4 мкс), в режиме радиовысотомера — 31^1 элементарный импульс (47,7 мкс). Циклы излучения импульсов через антенну радиолокацион-

¹⁾ В режиме радиовысотомера период кодовой последовательности может быть установлен равным также 127 элементам, что облегчает раскрытие неоднозначности в измеренном расстоянии.

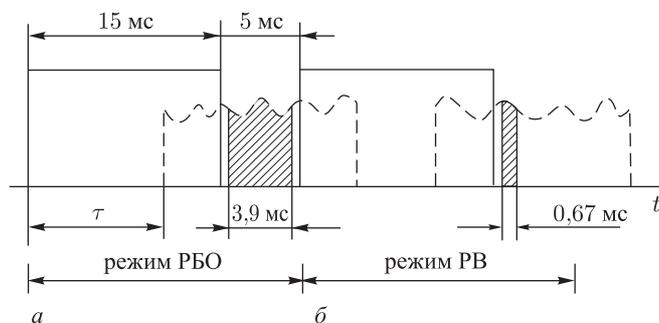


Рис. 4. Циклограммы сигналов радиолокационной станции (а) и радиовысотомера (б)

ной станции с синтезированной апертурой и антенну радиовысотомера следуют через 0,3 с.

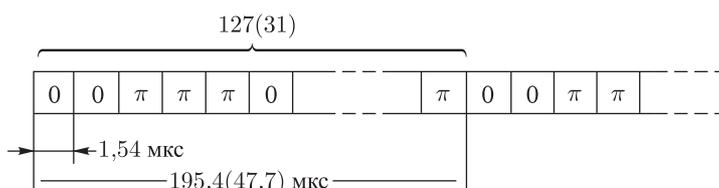


Рис. 5. Модуляция фазы сигнала передатчика

Прием и регистрация отраженных сигналов производится в паузе по окончании импульса передатчика. Для простоты длительности излучения и приема фиксированы, а не изменяются в зависимости от высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите. При этом время регистрации меньше того времени, в течение которого отраженные сигналы присутствуют на входе приемника. В режиме радиолокационной станции с синтезированной апертурой отраженные сигналы регистрируются 3,9 мс, а в режиме радиовысотомера 0,67 мс, что и определяет время когерентного накопления в дальнейшем при обработке.

Мгновенное напряжение отраженных сигналов, преобразованных к нулевой частоте в двух каналах, сдвинутых по фазе на 90° друг относительно друга, усредняется на интервале, равном длительности элементарного импульса (1,54 мкс) и представляется 4-разрядным двоичным кодом (см. рис. 5). Согласование уровня отраженных сигналов с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП) обеспечивается цифровой системой автоматического регулирования усиления (АРУ). Через каждые 0,3 с 2540 отсчетов отраженных сигналов в режиме радиолокационной станции с синтезированной апертурой (20 периодов 127-элементарной последовательности

максимальной длины — 3,9 мс) и 434 отсчета отраженных сигналов в режиме радиовысотомера (14 периодов 31-элементной последовательности максимальной длины — 0,67 мс, см. рис. 4, а) поступают двумя 4-разрядными словами в буферное запоминающее устройство совместно с данными об усилении, установленном системой АРУ, а затем записываются на бортовых цифровых накопителях информации. За 16 мин., в течение которых проводится радиолокационная съемка, получается около 3200 таких массивов общим объемом 100 миллионов бит.

Отраженные сигналы с учетом запаздывания τ при распространении должны попасть в интервал, отведенный для их кодирования (рис. 6, а). Длительность импульса передатчика и интервала кодирования обеспечивают заполнение всего этого интервала отраженными сигналами в диапазоне высот примерно от 660 км до 2250 км (крайние случаи приведены на рис. 6, б, в).

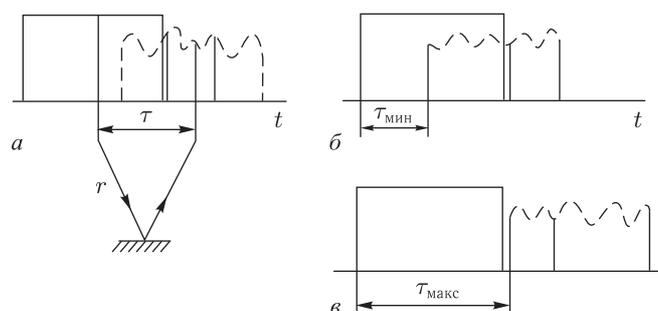


Рис. 6. Запаздывание момента прихода отраженных сигналов относительно момента излучения (а). Запаздывание отраженных сигналов для минимальной (б) и максимальной (в) дальности

Отсчеты мгновенного напряжения отраженных сигналов вместе с данными об усилении приемного тракта, установленном системой АРУ, и служебной информацией затем передаются по радиолинии на Землю для обработки и построения изображений и профилей высот поверхности.

7. Космические аппараты Венера 15 и Венера 16. Передача радиолокационной информации на Землю

Искусственные спутники Венера 15 и Венера 16 созданы на базе орбитальных аппаратов автоматических межпланетных станций Венера 9 — Венера 14, доставивших к Венере спускаемые аппараты. Новое назначение внесло серьезные изменения в их конструкцию (рис. 7). Вместо спускаемого аппарата установлен герметичный контейнер с аппаратурой радиолокационной системы и увеличены баки с топливом для торможения при выходе на орбиту искусственного спутника Вене-

ры и осуществления ее коррекции. Увеличена на 70% площадь панелей солнечной батареи для обеспечения энергоснабжением радиолокационной системы и радиотелеметрической аппаратуры при ежедневной работе.

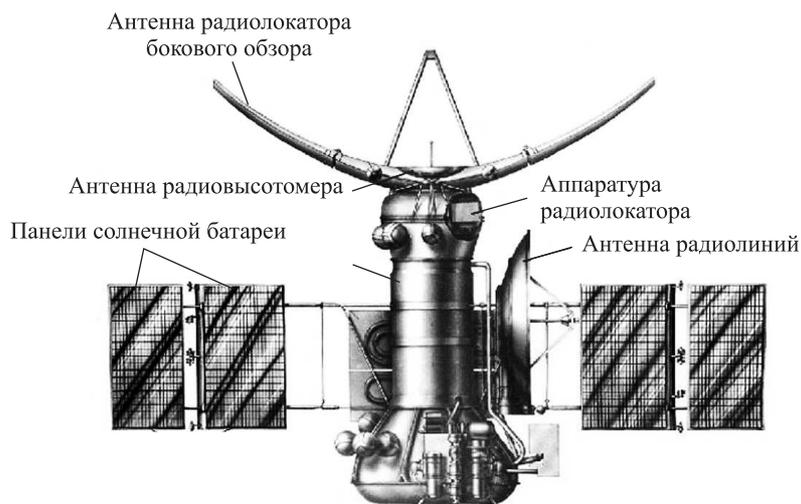


Рис. 7. Общий вид космических аппаратов Венера-15 и Венера-16 с аппаратурой радиолокационной системы

В передней части космического аппарата установлены две антенны радиолокационной системы (см. рис. 7). Зеркало антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой имеет форму параболического цилиндра размером 6 м на 1,4 м. Зеркало радиовысотомера — параболическое диаметром 1 м. Электрическая ось антенны радиовысотомера совмещена с продольной осью космического аппарата. Электрическая ось антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой отклонена от продольной оси аппарата на угол 10° . При старте с Земли и выводе на трассу перелета к Венере зеркало этой антенны находилось под защитным обтекателем в сложенном положении, а после его сброса раскрылось.

Электрическая ось антенны радиовысотомера должна быть направлена во время радиолокационной съемки по местной вертикали (т.е. к центру планеты), электрическая ось антенны бокового обзора должна находиться точно в плоскости, перпендикулярной трассе (см. рис. 1). Эти функции выполняет система астроориентации, непрерывно изменяющая положение космического аппарата по заданной программе при облете планеты.

Для передачи данных радиолокационной съемки на Землю разработана радиолония, работающая в пятисантиметровом диапазоне волн и обеспечивающая скорость передачи 100 кбит/с на всех возможных

расстояниях между Венерой и Землей вплоть до 260 млн. км. Ее антенна диаметром 2,6 метра видна справа от корпуса космического аппарата (см. рис. 7).

На Земле прием информации обеспечивался двухзеркальной антенной с диаметром главного зеркала 70 метров (рис. 8) в Центре дальней космической связи под Евпаторией. Другая двухзеркальная антенна с диаметром главного зеркала 64 м обеспечивала прием информации в Медвежьих Озерах под Москвой (рис. 9).



Рис. 8. Общий вид антенны Центра дальней космической связи под Евпаторией



Рис. 9. Общий вид антенны в Медвежьих Озерах под Москвой

8. Орбиты космических аппаратов Венера 15 и Венера 16

Космические аппараты Венера 15 и Венера 16 стартовали с промежуточной орбитой спутника Земли 2 и 7 июня 1983 года. 10 и 11 октября оба космических аппарата были выведены на орбиты спутников Венеры с периодом обращения 24 часа (рис. 10). Минимальное расстояние аппаратов от поверхности Венеры (в перигентре) составляло 1000 км и приходилось примерно на 62° северной широты. Максимальное расстояние (в апоцентре) — 66 000 км. Наклонение плоскости орбиты к экватору Венеры $92,5^\circ$.

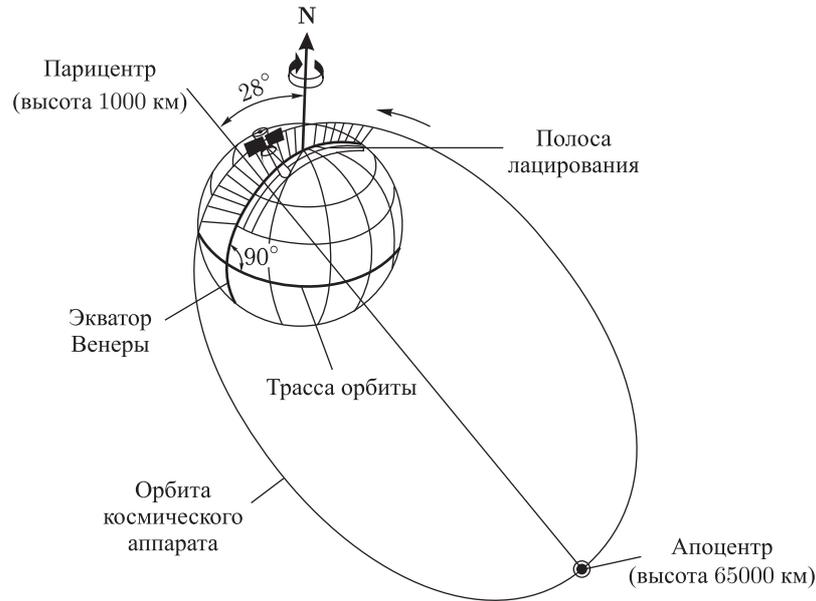


Рис. 10. Орбита космических аппаратов Венера-15 и Венера-16

Параметры орбит космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 были выбраны таким образом, чтобы снять часть северного полушария Венеры, включающую континент Земля Иштар, область Бета, равнину Аталанты, некоторые сведения о которых были известны в результате полета космического аппарата «Пионер-Венера», а также полярную область к северу от широты 75° , которая оставалась вообще неисследованной.

После коррекции параметров орбит и проведения пробных сеансов съемки 11 ноября 1983 г. началось регулярное картографирование Венеры. При прохождении космических аппаратов вблизи планеты за 16 мин. ежедневно снималась полоса поверхности шириной около 120 км и длиной 7500 км, вытянутая вдоль трассы полета (рис. 11). Обычно съемка начиналась на широте 80° за северным полюсом Венеры. Аппарат проходил вблизи него и, двигаясь примерно вдоль меридиана, заканчивал съемку на широте 30° . За 24 часа Венера поворачивалась вокруг своей оси на $1,5^\circ$ и при следующем прохождении космического аппарата снималась новая полоса поверхности, частично перекрывающаяся с предыдущей. Длина полосы съемки определялась рабочим диапазоном высот радиолокационной системы (от 1000 км до 2000 км).

За 8 месяцев, в течение которых велась регулярная радиолокационная съемка, Венера сделала полный оборот вокруг своей оси, и под орбитой оказалась та же самая область, что была в начале съемки. Площадь снятой территории составляет 115 млн. км² или 25% от

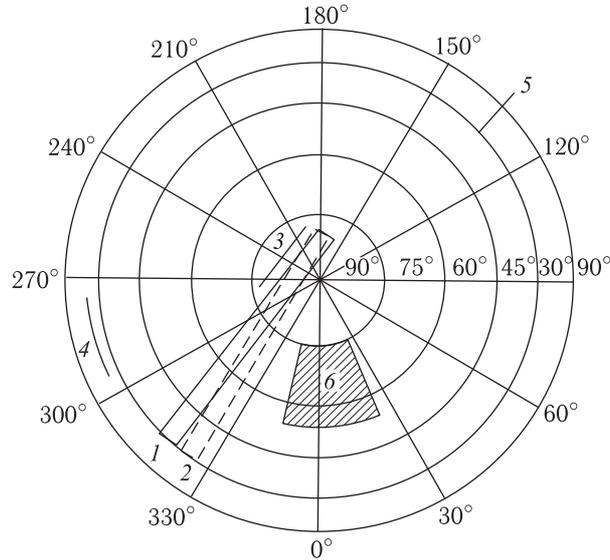


Рис. 11. Последовательность радиолокационной съемки поверхности Венеры: 1 — снимаемая полоса при прохождении космического аппарата вблизи Венеры; 2 — снимаемая полоса в следующем прохождении, спустя сутки; 3 — направление движения космического аппарата; 4 — направление вращения Венеры; 5 — граница снятой области (параллель 30° северной широты); 6 — положение области Гор Максвелла, представленной на рис. 17

площади поверхности Венеры. Она простирается от северного полюса до широты в среднем 30° (см. рис. 11).

Аппараты Венера 15 и Венера 16 функционировали как единая космическая система. При выводе плоскости их орбит были смещены друг относительно друга на угол около 4° , что обеспечивало при необходимости возможность повторной съемки одной и той же области, не прерывая регулярности съемки, ведущейся одним из аппаратов. За счет воздействия на аппараты солнечного притяжения высота в перигеистрии постепенно увеличивалась, и параметры орбит приходилось корректировать с помощью двигателя. Всего было проведено 3 сеанса коррекции параметров орбиты космического аппарата Венера 15 и 2 — Венера 16. Перед сеансами коррекции съемка велась также двумя аппаратами.

В середине июня 1984 г., когда Венера, находясь в верхнем соединении, проходила за Солнцем, связь с аппаратами прекратилась на несколько дней. Чтобы снять пропущенную в этот период область, плоскость орбиты космического аппарата Венера 16 была повернута назад на угол около 20° . Одновременно продолжалась съемка космическим аппаратом Венера 15 в прежнем режиме.

9. Цифровой комплекс аппаратуры обработки радиолокационной информации

Для обработки отраженного сигнала и построения радиолокационных изображений, профилей высот и карт поверхности Венеры был создан комплекс аппаратуры (центр), оборудованный электронными вычислительными машинами, устройствами отображения телевизионного типа и устройствами вывода изображений на фотопленку (рис. 12).

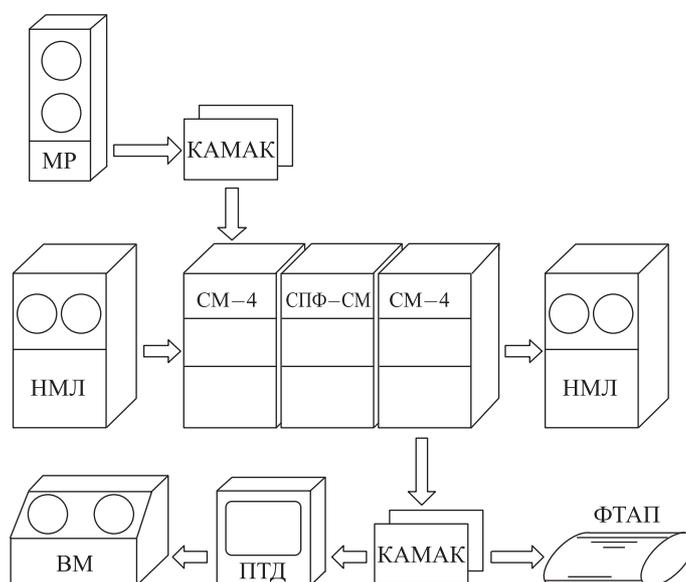


Рис. 12. Структурная схема цифрового комплекса аппаратуры обработки. МР — магнитный регистратор; КАМАК — аппаратура КАМАК; СМ — малая ЭВМ; СПФ-СМ — специализированный процессор для выполнения преобразования Фурье; НМЛ — накопитель на магнитной ленте; ВТ — видеотерминал; ФТАП — приемный фототелеграфный аппарат; ПТД — полутонной видеодисплей; ВМ — видеомагнитофон

С приемных пунктов информация доставлялась в записи на магнитную ленту. Ввод информации производился с магнитных регистраторов, подключенных к малой электронной вычислительной машине через аппаратуру «КАМАК». Через ту же аппаратуру производился вывод полученных изображений на фотопленку, видеомагнитофон, а также телевизионный экран для предварительного анализа.

Малая электронная вычислительная машина была оснащена накопителями на магнитной ленте от большой машины, что увеличило скорость обмена данными в 10 раз. Поскольку обмен с магнитной лентой используется на всех этапах обработки, это оснащение решающе

повлияло на возможность выполнения обработки в реальном масштабе времени.

Отраженный сигнал представляет собой одномерную радиоголограмму и, обычно, радиолокационное изображение получают с помощью когерентного оптического процессора, работу которого при постоянных параметрах съемки организовать несложно. Здесь же для синтеза изображений и профилей высот поверхности в условиях, когда космический аппарат движется по эллиптической орбите и его высота и скорость непрерывно меняются, впервые использовалось специализированное цифровое устройство — процессор для выполнения преобразования Фурье, сопряженный с электронной вычислительной машиной. Он предназначен для выполнения прямого и обратного преобразования Фурье, взвешивания входного массива данных, расчета энергетических спектров и некоторых вспомогательных операций [2]. За счет ограничения видов операций удалось построить конвейерную систему из 15 идентичных арифметических устройств и при ограниченном объеме оборудования достичь суммарной производительности около 50 млн. операций в секунду. Подключение Фурье-процессора к малой управляющей электронной вычислительной машине позволило создать цифровой комплекс, обладающий и высокой производительностью, и достаточной универсальностью для полного обеспечения наземной обработки сигналов такой радиолокационной системы, которая была установлена на космических аппаратах Венера 15 и Венера 16.

10. Обработка отраженных сигналов

Для каждого массива отсчетов, полученных в режиме радиолокационной станции с синтезированной апертурой, с помощью процессора Фурье осуществляется согласованная фильтрация отраженных сигналов для 127 значений запаздывания и 31 значения доплеровского смещения частоты, соответствующих примерно 4000 элементов поверхности планеты в диаграмме направленности антенны (см. рис. 1). Значения мгновенной мощности отраженных сигналов по оси частот вычисляются в 1,5 раза чаще реального разрешения, чтобы не ухудшить его при дальнейшем объединении полученных кадров радиолокационного изображения в сплошную полосу.

За 0,3 с, через которые регистрируются массивы отсчетов отраженных сигналов, космический аппарат смещается по орбите на часть ширины участка поверхности, попадающей в диаграмму направленности антенны (см. рис. 1, где пунктиром отмечено положение следа диаграммы направленности антенны в момент регистрации предыдущего массива данных). Это обеспечивает взаимное перекрытие кадров и возможность усреднения мгновенных измерений мощности отраженных сигналов для уменьшения флуктуационной погрешности, вызываемой интерференцией радиоволн, отраженных отдельными точками поверхности в пределах разрешаемого элемента.

При объединении отдельных кадров в сплошную полосу для каждой из точек изображаемой поверхности, попадающих в диаграмму направленности антенны, вычисляется наклонная дальность и радиальная составляющая скорости относительно космического аппарата, для чего используются данные о его расстоянии и скорости по отношению к центру масс Венеры. Шаг разложения 0,8 км, что меньше фактического разрешения 1–2 км). Методика учитывает изменение высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, и возможные (как правило, в пределах $\pm 0,5^\circ$) отклонения электрической оси антенны от требуемого положения.

Мгновенные измерения мощности взвешиваются перед усреднением, для чего строится модель двумерного распределения средней мощности отраженных сигналов в диаграмме направленности относительно средней мощности шумов приемной аппаратуры. При этом устраняется неравномерность освещенности по полю изображения, вызванная неравномерностью усиления в диаграмме направленности антенны и неравномерностью диаграммы обратного рассеяния поверхности планеты, а также неодинаковым размером элементов разрешения. Для получения одинакового контраста деталей поверхность в районах с высокой и низкой отражательной способностью мощность отраженных сигналов нормируется к среднему значению, сглаженному вдоль трассы в скользящем окне размером 160 км. Для согласования с динамическим диапазоном фотопленки измерения мощности отраженного сигнала перед выводом изображения через фототелеграфный аппарат логарифмируются, что делает измерения равноточными.

При обработке массивов отсчетов радиовысотомера, следующих также через 0,3 с, сначала с помощью процессора Фурье осуществляется согласованная фильтрация отраженных сигналов по запаздыванию (для 31 или 127 значений) и доплеровскому смещению частоты. Измеренные значения мгновенной мощности суммируются по частоте. Полученное распределение мощности отраженных сигналов по запаздыванию затем сравнивается методом математической свертки с рядом моделей этого распределения, отличающихся значениями коэффициента шероховатости и дисперсии высот в участке поверхности 2, оказавшемся в пределах диаграммы направленности антенны радиовысотомера (см. рис. 1). При выборе моделей учитывается высота космического аппарата и возможное отклонение электрической оси антенны от местной вертикали, которое измеряется по смещению средней частоты спектра отраженного сигнала. Положение наибольшего максимума свертки дает высоту космического аппарата над средней поверхностью в пятне диаметром 40–50 км с неоднозначностью, определяемой периодом модулирующей последовательности максимальной длины: 7,15 км при 31 элементе и 29,3 км при 127 элементах. Для раскрытия неоднозначности используются данные о расстоянии космического аппарата относительно центра масс планеты. Вносится поправка на дополнительное запаздывание сигнала в атмосфере Венеры.

Полученные данные усредняются по 7 измерениям скользящим окном. Величина радиуса поверхности планеты в данной точке, вычисленная как разность расстояния космического аппарата от центра планеты и измеренной высоты, наносится по трассе аппарата с шагом 8 км с учетом отклонения электрической оси антенны от местной вертикали. Среднеквадратическое значение погрешности измерений высоты, определенное по разбросу измерений над ровной местностью, составило 30 м. Эта ошибка характеризует точность определения относительной высоты рельефа поверхности вдоль трассы при удалении до 1000–1500 км. На краях трассы, а также между трассами ошибка может быть в 10 раз больше.

Затем была использована возможность разделения отраженных сигналов по доплеровскому смещению частоты при 31-элементной последовательности, что позволило сузить размер пятна, относительно которого измерялась высота космического аппарата, по трассе полета до 6–14 км (см. рис. 1).

11. Полученные результаты

Радиолокационные изображения поверхности Венеры, полученные космическим аппаратом Венера 16 20 октября 1983 г. и 3 июля 1984 года, спустя 8 месяцев, когда Венера совершила оборот вокруг своей оси и под орбитой оказался тот же самый район²⁾, приведены на рис. 13.

По горизонтальной оси отложено угловое расстояние относительно перицентра орбиты, по вертикальной оси — угловое расстояние относительно плоскости орбиты, измеренные в градусах из центра планеты (один градус на поверхности Венеры занимает 105,6 км). Положению трассы соответствует 0° по вертикальной шкале. Несовпадение горизонтальных шкал связано с изменением широты перицентра аппарата. Длина приведенных фрагментов 1100 км при полной ширине изображенной полосы 156 км (195 элементов по 0,8 км). Полезная часть изображения зависит от высоты космического аппарата. Изображение построено в предположении, что поверхность Венеры — сфера радиуса 6051 км³⁾. Отклонения местного радиуса от этой величины проявляются в нерегулярном смещении границ по вертикали, видимом на изображении. Плавное смещение границ вызвано изменением высоты аппарата при его движении по эллиптической орбите.

Космический аппарат двигался слева направо, его трасса проходит выше снятой полосы. Чем больше мощность отраженных сигналов, тем

²⁾ В середине июня 1984 г., когда Венера проходила за Солнцем, плоскость орбиты космического аппарата Венера 16 была повернута назад на угол около 20°. Вследствие этого тот же самый район оказался под орбитой на 2 недели позже, чем время полного оборота Венеры (243 суток).

³⁾ Рекомендация Международного астрономического союза.

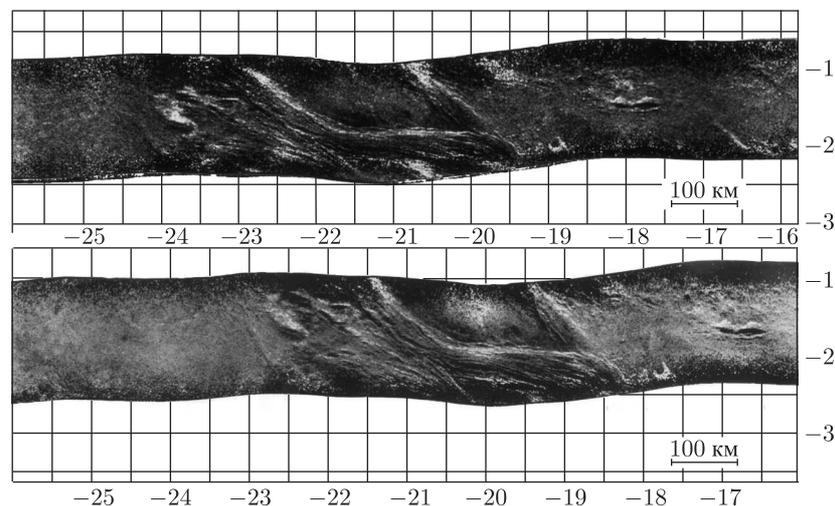


Рис. 13. Радиолокационные изображения одного и того же района поверхности Венеры, полученные космическим аппаратом Венера 16 20 октября 1983 г. и 3 июля 1984 г., спустя 8 месяцев

светлее образования на изображении. Склоны, обращенные к падающему лучу, выглядят светлыми; склоны, отвернутые от него — темные.

От начала снимка до -24° на верхнем фрагменте (-23° на нижнем) тянется равнина. Этот район ближе всего к северному полюсу Венеры, который лежит выше на расстоянии -5° вдоль меридиана. Это — часть обширной околополярной равнины, впервые открытой космическими аппаратами Венера 15 и Венера 16, которой дано название «Равнина Снегурочки».

Затем равнина прерывается молодой складчатой областью протяженностью около 500 км. Множество параллельных горных хребтов пересекает трассу под углом около 45° , затем меняет направление и тянется вдоль трассы на сотни километров, медленно расходясь. В конце под углом 45° примыкает вторая горная область. Как можно заметить, горные складки не несут заметных следов водной эрозии, создающей поперечные овраги и долины, проявляющиеся на земных снимках в виде характерной «елочки».

Затем рельеф становится более спокойным. Наиболее примечательной деталью в этой области являются два горных образования на $-18,2^\circ \div 17,4^\circ$ ($-17,2^\circ \div -16,4^\circ$), вытянутые вдоль трассы на 80 км. Ширина их у основания 15–20 км. На $-18,8^\circ$ ($-17,8^\circ$) находится полуразрушенный кратер диаметром 15–20 км. Снимки заканчиваются двумя параллельными грядами в области $-17^\circ \div -15,5^\circ$, расположенными под углом 45° к трассе.

Расшифровать видимые на снимках образования помогают измерения радиовысотомера. На рис. 14 изображен район Гор Максвелла с огромным кратером, названным ранее Патерой Клеопатры, диаметром около 100 км. С радиолокационным изображением совмещен профиль высот, полученный тремя днями раньше, трасса которого показана белой линией. Максимальная высота горного массива для данного профиля составляет 11 км над уровнем средней поверхности радиуса 6051 км.

Кратер, который пересекла трасса измерений высоты, расположен на склоне горного массива и имеет сложную форму. Из сопоставления изображения с профилем следует, что внутри большего кратера глубиной около 1,5 км находится второй меньшего диаметра, дно которого опущено еще на 1 км.

Заметим, что значительное отклонение местного радиуса от величины 6051 км, принятого за радиус сферы, на которую наносится изображение, привело к заметным перспективным искажениям формы кратера, которое было учтено при нанесении трассы радиовысотомера на изображение.

На поверхности Венеры обнаружены интересные явления, вызванные аномальным характером отражения радиоволн [10]. На рис. 15 изображен сюжет с двумя кратерами ударного происхождения диаметрами 15–20 км, у одного из которых дно выглядит необычно ярким. Внутри этого кратера уровень отраженных сигналов возрастает примерно на 10 дБ по сравнению с окружающей местностью. Вероятно, это явление вызвано не только абсолютным увеличением отражательной способности дна кратера в направлении космического аппарата (что само по себе примечательно), но и меньшей величиной обратного рассеяния окружающей равнины по сравнению со средним значением его для поверхности Венеры в целом. При использованной калибровке мощности отраженных сигналов по среднему значению в пятне, размеры которого превышают диаметр кратера, это будет наблюдаться, если окружающая поверхность имеет много большую гладкость, чем дно кратера.

В подтверждение этого было замечено, что в одном из районов Венеры протяженностью 200–300 км средняя мощность отраженных сигналов на выходе приемника радиолокационной станции с синтезированной апертурой уменьшилась на 5–10 дБ. В то же время на выходе приемника радиовысотомера, электрическая ось антенны которого направлена по местной вертикали, средняя мощность отраженных сигналов не только не уменьшилась, а даже несколько возросла. Из этого можно заключить, что пониженное обратное рассеяние радиоволн при их наклонном падении вызвано большой гладкостью поверхности в этом районе. Кратеры с необычно ярким дном на радиоволнах обнаружены и в других областях Венеры.

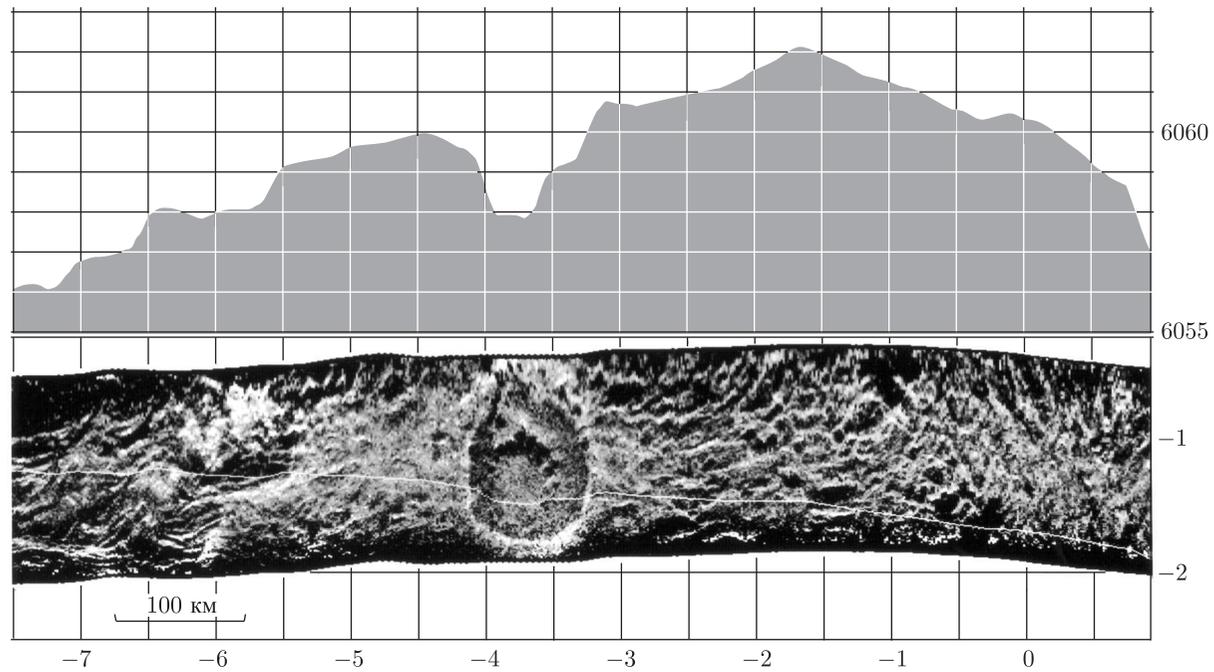


Рис. 14. Внизу: радиолокационное изображение района Гор Максвелла с кратером Клеопатры, полученное космическим аппаратом Венера 16 20 января 1984 г. Вверху: профиль поверхности по трассе полета космического аппарата 17 января 1984 г., отмеченной белой линией. По вертикальной оси профиля указана величина радиуса поверхности планеты в данной точке в километрах. Вертикальный масштаб укрупнен в 32 раза по сравнению с горизонтальным

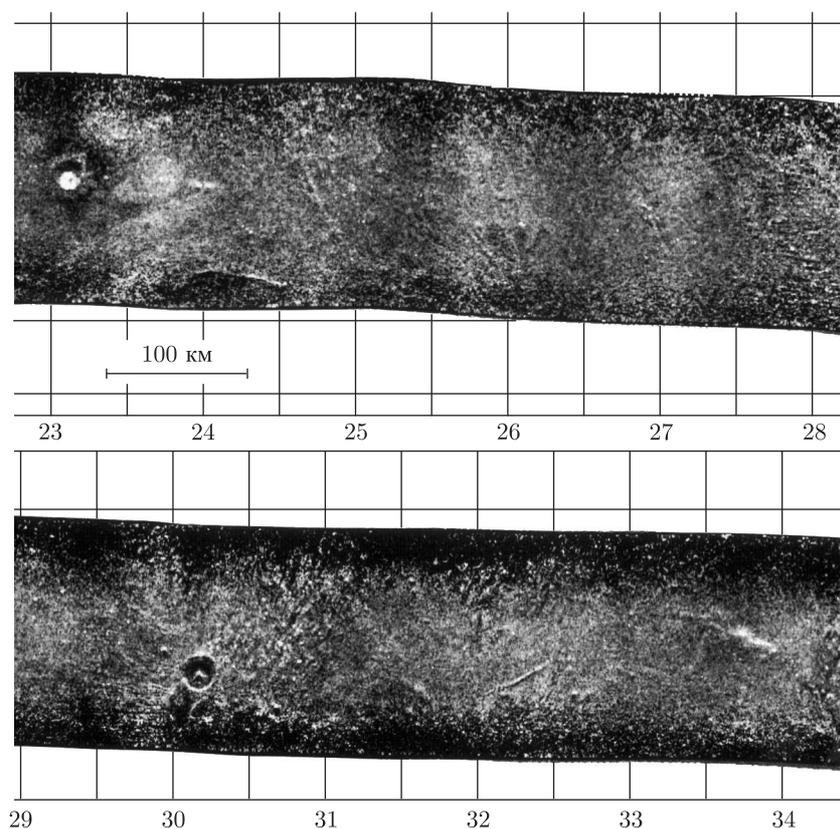


Рис. 15. Сюжет с двумя кратерами ударного происхождения, у одного из которых дно выглядит необычно ярким на радиоволнах. Расстояние между ними около 1000 км

12. Построение фотокарт и топографических карт Венеры

На основе данных, полученных космическими аппаратами Венера 15 и Венера 16, созданы фотокарты и топографические карты Венеры [5]. Все операции по созданию карты, включая перестроение изображений поверхности Венеры в определенную картографическую проекцию, топографическую коррекцию перспективных искажений, нанесение координатной сетки, горизонталей и надписей были выполнены цифровыми методами на ЭВМ. Это обеспечило математическую точность карт и оперативность их получения.

Радиолокационные изображения для каждого дня съемки, нанесенные на сферу радиуса 6051 км, перестраивались в венерографическую

систему координат ⁴⁾, а затем проектировались на коническую поверхность, проведенную через две стандартные параллели. Проектирование велось с шагом 0,8 км на плоскости фотокарты. Использовалась билинейная интерполяция нормированной мощности отраженных сигналов по трем ближайшим точкам. В местах перекрытия соседних полос ее величина нормировалась к среднему значению, сглаженному вдоль полос изображения.

При построении фотокарты учитывалась высота местного рельефа (топографическая коррекция) и вносились поправки в координаты космического аппарата, уточненные по методике, учитывающей возмущения параметров орбиты при работе двигателей системы астроориентации.

Возникновение перспективных искажений в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты, при построении радиолокационных изображений показано на рис. 16. Каждая точка истинной поверхности планеты должна быть спроектирована на некоторую сферу (пунктир). Например, точка B отображается на этой сфере точкой O , и ее положению соответствует центральный угол Φ , характеризующий расстояние точки B относительно плоскости орбиты космического аппарата.

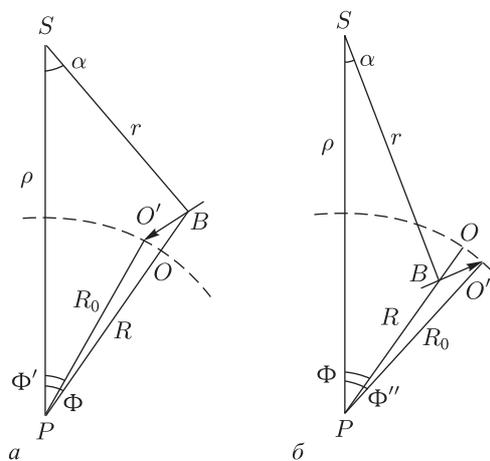


Рис. 16. Смещение точек изображения при вариации местного радиуса планеты: a — в случае возвышенности; b — в случае низменности

⁴⁾ В соответствии с рекомендацией Международного союза прямое восхождение северного полюса вращения Венеры принято $272,8^\circ$; склонение $67,2^\circ$; период вращения $243,01$ сут. Положение нулевого меридиана венерографической системы координат определяется таким образом, что 20 июня 1964 г. на 0 час. эфемеридного времени долгота центрального меридиана Венеры составляла 320° .

Величину угла Φ можно найти, решая треугольник, вершинами которого являются космический аппарат S , центр масс планеты P и точка B . Расстояние аппарата от центра масс планеты ρ вычисляется через элементы его орбиты. Расстояние точки B относительно аппарата (наклонная дальность r) определяется при обработке через запаздывание отраженных сигналов. Чтобы найти угол Φ , надо знать еще местный радиус планеты $R = PB$, который при построении полос изображений был заменен на среднее значение $R_0 = 6051$ км.

Замена R на среднее значение R_0 в случае возвышенности (точка B лежит выше точки O , рис. 16, *a*), когда наклонная дальность уменьшается, при засечке радиусом r дает на средней поверхности точку O' вместо O . Точка O' расположена ближе к плоскости орбиты, чем точка O и центральный угол Φ' получается меньше Φ .

В случае низменности (точка B лежит ниже точки O , рис. 16, *b*), когда наклонная дальность увеличивается, засечка дает на средней поверхности точку O'' вместо O . Точка O'' расположена дальше от плоскости орбиты, чем точка O , и центральный угол Φ'' больше Φ .

Можно показать, что смещение точки изображения прямо пропорционально отклонению местного радиуса R относительно среднего R_0 (пропорционально высоте точки относительно уровня средней сферы) и обратно пропорционально $\sin \alpha$, где α — угол между направлением на данную точку и плоскостью орбиты (см. рис. 16). При средней величине угла α 10° смещение точки изображения на средней сфере примерно в 6 раз больше отклонения местного радиуса.

Смещение точек изображения особенно значительно в районе Гор Максвелла (см. рис. 14), где высоты превышают 10 км и смещение достигает 60 км и более. При построении фотокарт Венеры топографическая коррекция вносилась по данным измерений радиовысотомера и ее результаты видны на рис. 17.

При построении топографических карт в точках, лежащих на трассах радиовысотомера, измеренные значения высоты воспроизводились непосредственно, а в точках между трасс — интерполировались.

В качестве примера на рис. 17 приведена фотокарта Гор Максвелла и окружающей области Венеры, а на рис. 18 — фрагмент топографической карты этого района (построены по результатам радиолокационной съемки с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 с 30 декабря 1983 по 1 февраля 1984 г.). Вся область съемки Венеры разбита на 27 частей, для каждой из которых построены аналогичные фотокарты.

Общая площадь территории, представленной на фотокарте, составляет $3,75 \cdot 10^6$ км². Фотокарта содержит $5,85 \cdot 10^6$ точек. Это наиболее детальное изображение Гор Максвелла из всех существующих.

При радиолокационной съемке Венеры космическим аппаратом Пионер-Венера [12] было установлено, что Горы Максвелла — самая высокая область Венеры, однако, низкое пространственное разрешение

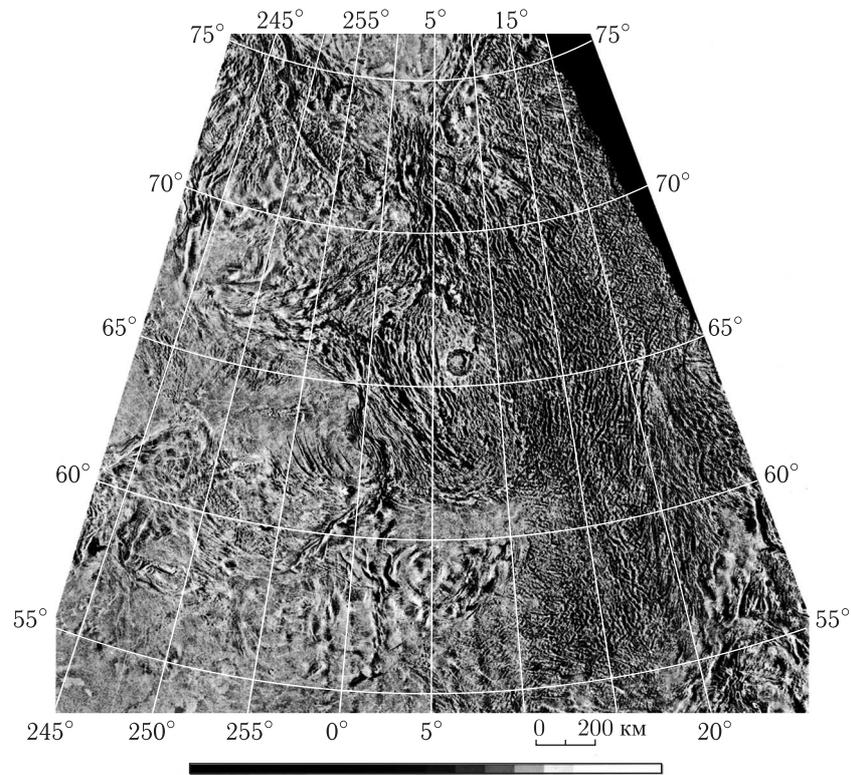


Рис. 17. Фотокарта Гор Максвелла и окружающей области Венеры, построенная по результатам радиолокационной съемки с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 с 30 декабря 1983 г. по 1 февраля 1984 г. Долгота 345° – 25° , широта 55° – 75° . Проекция нормальная, равноугольная коническая Ламберта–Гаусса. Стандартные параллели $58,3^{\circ}$ и $72,4^{\circ}$. Радиоволны падают с востока под углом около 10° к местной вертикали

затрудняло анализ их природы. Общее строение центральной части горного района с Патерой Клеопатры, имеющего шероховатую структуру, достаточно хорошо просматривается на радиолокационных изображениях, полученных в последнее время с Земли в Аресибо [7]. Однако окружающие пространства с более гладкой поверхностью плохо видны вследствие низкого уровня отраженного сигнала.

При наблюдении Венеры с Земли в дополнение к большому расстоянию угол падения между радиолучом и местной вертикалью равен венерографической широте места, которая для Гор Максвелла составляет 60° – 70° . При съемке с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 под углом 10° обратное рассеяние имеет большую интенсивность, и на фотокарте Гор Максвелла (рис. 17) детали поверхности просмат-

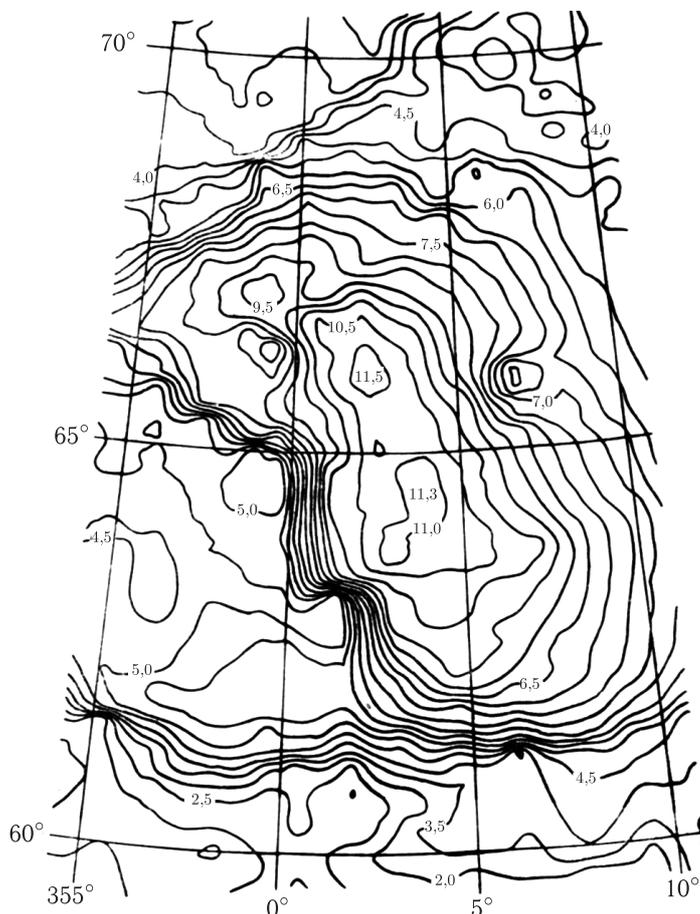


Рис. 18. Фрагмент топографической карты Гор Максвелла и окружающей области (см. подпись к рис. 17). Горизонтالي следуют с шагом 500 м относительно уровня средней сферы радиуса 6051 км

риваются везде одинаково хорошо. Мощность отраженных сигналов, как правило, не опускалась ниже уровня, превышающего на 10 дБ мощность шума приемной аппаратуры. Это обеспечивает практически одинаковое качество радиолокационных изображений как в районах с высокой, так и низкой отражательной способностью.

С Запада к Горам Максвелла вплотную примыкает Плато Лакшми, оба кратера, входящие в систему Патера Клеопатры, имеют приблизительно круглую форму. Внутренний кратер диаметром 55 км смещен к северо-западу относительно центра внешнего кратера диаметров 95 км. С востока стенка внешнего кратера имеет минимальную высоту

и его дно почти сливается с восточным склоном горного массива (см. рис. 18). Первоначально при построении топографической карты измерения усреднялись в скользящем окне с эффективным диаметром 100 км, что вызывало сглаживание рельефа [5].

С запада область Патеры Клеопатры окаймлена почти параллельными хребтами, тянущимися на сотни километров. Друг от друга они отстоят на 5–15 км. Здесь находится самая высокая область Венеры, где в овале протяженностью 400 км с севера на юг и 200 км с востока на запад высоты превышают уровень 10 км (над сферой радиуса 6051 км). В северной части овала в 200 км к западу от центра Патеры Клеопатры (долгота $2,3^\circ$, широта $65,9^\circ$) находится наивысшая точка 11,5 км, зафиксированная радиовысотомером космического аппарата Венера 16 14 января 1984 г.⁵⁾ К юго-юго-востоку от нее (долгота $3,9^\circ$, широта $64,4^\circ$) находится вторая по высоте точка, ниже ее лишь на 200 м. Как показывают горизонталы, северная часть возвышенности продолжается на запад, где высоты еще превышают 9 км.

Наиболее резко высота убывает в юго-западном направлении. Здесь на протяжении 20 км горный массив снижается на 4 км и средний уклон превышает 10° . С этой стороны Горы Максвелла сдавлены массивной плитой Плато Лакшми высотой около 5 км, и параллельные складки идут чаще. Складки, окаймляющие Патеру Клеопатры, просматриваются и с востока, но здесь их структура нарушена поперечными сдвигами. Область, непосредственно окружающая Патеру Клеопатры, выглядит более ровной. Здесь складки рельефа, по-видимому, засыпаны выбросом, возникшим при извержении или ударе метеорита, образовавшего кратер. Еще один кратер определенно ударного происхождения диаметром 25 км находится внизу вблизи середины представленной территории (долгота $6,5^\circ$, широта $56,9^\circ$).

К югу Горы Максвелла и Плато Лакшми переходят в Равнину Седны. Крутизна склонов в южной части Плато Лакшми (Уступ Весты) превышает 10° . В северной части горного массива складки собираются в «жгут», который извиваясь и теряя высоту до 2 км, тянется в меридиональном направлении более, чем на 500 км, а затем переходит в Равнину Снегурочки.

На севере и юге представленной территории просматриваются многочисленные группы куполообразных образований, особенно хорошо выделяющиеся на участках со спокойным рельефом поверхности. Весьма вероятно, что это — конусы вулканического происхождения.

⁵⁾ По данным радиовысотомера космического аппарата «Пионер-Венера» наивысшая точка Гор Максвелла находится на 220 км южнее (долгота $2,2^\circ$, широта $63,8^\circ$) и имеет высоту 11,1 км (также над уровнем сферы радиуса 6051 км) [12].

13. Особенности геологического строения поверхности Венеры

Зона съемки с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 захватывает северное полушарие Венеры к северу от широты 30°. Здесь расположена самая высокая на этой планете горная страна Земля Иштар и окружающие ее равнины, среди которых возвышается также ряд менее крупных горных сооружений областей Бета, Белл, Таллуры, Тефии, Ульфрун и Метиды (рис. 19).

Горная страна Земля Иштар является своеобразным фокусом геологического строения исследованной территории. В ее западной части находится высокогорное Плато Лакшми (рис. 20) высотой от 2,5 км до 5 км. На нем выделяются две овальные депрессии — Колетт (80 × 120 км) и Сакаджавея (100 × 200 км), похожие на некоторые вулканические кальдеры Марса. Вокруг морфологически более выраженной и, очевидно, более молодой кальдеры Колетт наблюдается система радиально расходящихся радиоярких потоков.

Плато Лакшми со всех сторон окружено системами горных хребтов и долин, параллельных друг другу и границам плато. Это горы Акны на западе, горы Фрейи на севере, горы Максвелла на востоке и горные хребты Уступа Весты на юге (см. рис. 20). Горы Акны и Фрейи (6–7 км) уступают Горам Максвелла по высоте. Горные хребты и разделяющие их долины, судя по их морфологии, образованы тектоническими чешуями надвигов или линейной складчатостью коры Венеры. В любом из этих двух случаев для их образования необходимо интенсивное тектоническое сжатие в горизонтальном направлении, что типично для складчато-надвиговых систем Земли и не типично для тектоники Луны и Марса.

С удалением от Плато Лакшми системы параллельных хребтов и долин постепенно, а в ряде случаев резко, переходят в системы пересекающихся хребтов и долин (см. район к востоку от кратера Клеопатры на рис. 17). Они обычно обладают диагональным или шевронным, хаотическим и ортогональным структурным рисунком. Из-за внешнего сходства рисунка с черепицей в системе планетной номенклатуры эти образования получили наименование «tessera» (греч. черепица). Черепица с диагональным структурным рисунком образована системами многочисленных сопряженных разломов, сформированных, по-видимому, в обстановке преимущественно горизонтального тектонического сжатия. Черепица с ортогональным рисунком похожа на структурно-морфологический рисунок срединно-океанических хребтов Земли и, видимо, образована горизонтальными тектоническими деформациями в обстановке растяжения. Ориентировка тектонических напряжений, которые явились причиной образования черепицы Земли Иштар, обнаруживает закономерную связь с ориентировкой напряжений, сформировавших системы параллельных хребтов и долин горного обрамления Лакшми. Местность типа черепицы распространена еще в двух довольно крупных горных сооружениях областей Тефии и Тел-

луры (см. рис. 19), а также в виде небольших останцевых возвышенностей на равнинах.

Другие упоминавшиеся выше горные сооружения в зоне съемки — области Бета, Белл, Ульфрун и Метиды — имеют поверхность со слабо расчлененным и даже равнинным рельефом. Для осевой части области Бета характерно наличие меридиональных уступов и грабенно-видных долин, объединяющихся в систему, похожую на рифтовые зоны Земли. Съемкой с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 захвачена лишь северная часть области Бета (см. рис. 19). Южнее на изображениях, полученных с помощью радиотелескопа в Аресибо, в пределах этой рифтоподобной зоны видны две вулканические горы — Рея и Тейя. Очевидно, область Бета — это сводовое тектоническое поднятие с рифтовой зоной в осевой части и ассоциирующим с ней базальтовым вулканизмом. Строение области Ульфрун, которая так же, как и Бета, заходит в зону съемки лишь своей северной частью, напоминает строение области Бета.

Для области Белл характерна равнинная куполообразная приподнятая поверхность, осложненная наличием большой вулканической горы с вершинным кратером поперечником около 30 км. Область Метиды выровненным характером ее поверхности и наличием в ее пределах вулканических гор похожа на область Белл.

Равнины по распространенности преобладают — 83 из 115 млн. км² снятой территории. По своему положению их поверхность близка к среднему уровню планеты (6051 км над центром масс) или на 0,5–1,5 км ниже его. По характеру строения поверхности к ним можно отнести и Плато Лакшми. На полученных изображениях поверхность равнин в некоторых случаях кажется гладкой и почти не несет на себе никаких осложняющих ее элементов рельефа. В других случаях она в различной степени осложнена куполовидными возвышенностями, иногда с вершинными кратерами, и протяженными грядами, часто группирующимися в пояса.

На равнинах нередко видны радиояркие потоковидные образования, напоминающие по форме потоки базальтовых лав на Земле, Луне и Марсе. В ряде случаев можно видеть, что они тяготеют к округлым депрессиям типа вулканических кратеров и кальдер, как на Плато Лакшми, см. рис. 20, или к линейным зонам разломов. Очевидно, эти образования действительно являются застывшими потоками базальтовых лав с типичной для большинства свежих лав повышенной шероховатостью поверхности, что и придает им высокую отражательную способность в радиодиапазоне.

Измерения химического состава материала поверхности венерианских равнин в местах посадки спускаемых аппаратов межпланетных станций Венера 9, 10, 14 и Вега 1 и 2 выявили его близость к земным магматическим породам основного состава — габброидам нормальной щелочности или их эффузивным аналогам — базальтам. Широкая распространенность базальтовых потоков на Венере говорит о важной

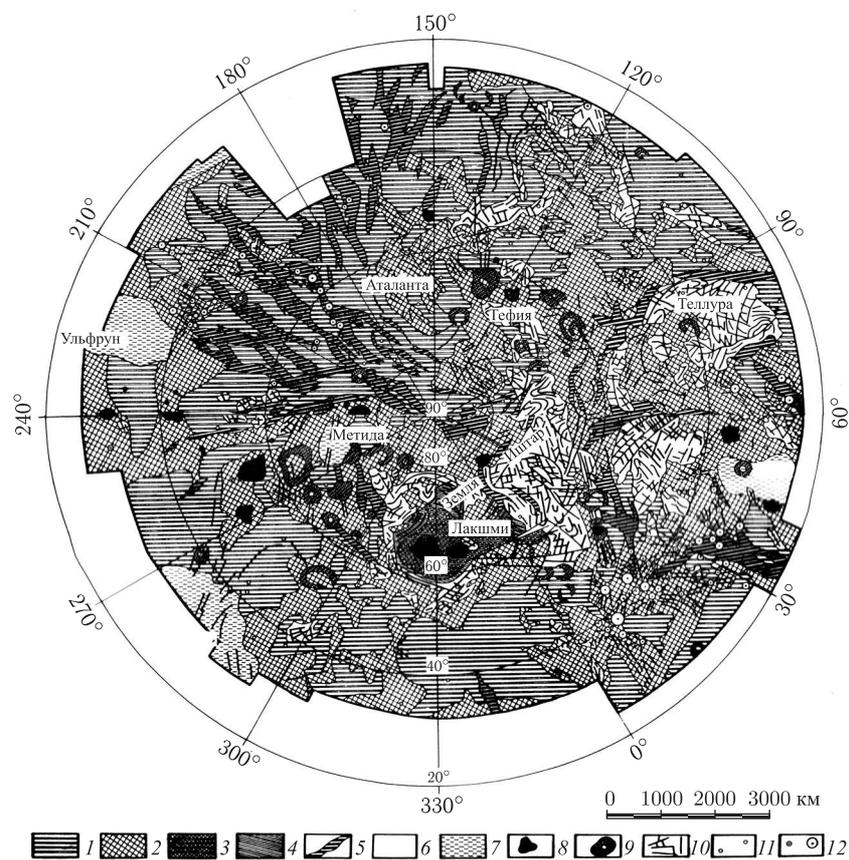


Рис. 19. Геолого-морфологическая карта Венеры, построенная по данным радиолокационной съемки с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16: 1 — гладкие равнины; 2 — холмистые равнины; 3 — Плато Лакшми; 4 — горное обрамление Плато Лакшми; 5 — пояс гряд на равнинах; 6 — области пересекающихся хребтов и долин (черепица); 7 — возвышенности со слабо расчлененным рельефом; 8 — крупные вулканические образования; 9 — венцы; 10 — основные структурные линии; 11 — ударные кратеры; 12 — паукообразные вулcano-тектонические структуры

роли площадного базальтового вулканизма в геологической истории этой планеты. Некоторую, видимо, подчиненную роль в формировании равнин Венеры может играть накопление привнесенных ветром золотых осадков — вулканического пепла, или просто продуктов поверхностного разрушения ранее образованных пород (Венера 14).

В местах посадки спускаемых аппаратов межпланетных станций Венера 8 и Венера 13, расположенных тоже на равнинах Венеры за

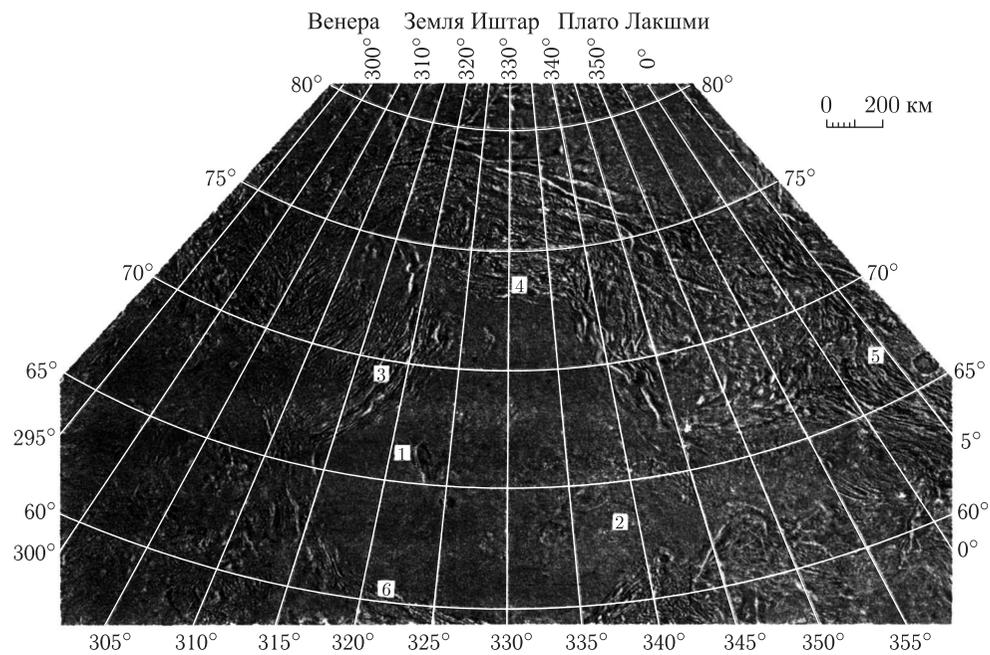


Рис. 20. Фотокарта Плато Лакшми Венеры: 1 — кальдера Колетт; 2 — кальдера Сакаджавеи; 3 — Горы Акны; 4 — Горы Фрей; 5 — Горы Максвелла; 6 — Уступ Весты

пределами зоны съемки Венеры 15 и 16, материал поверхности близок по химическому составу к земным породам повышенной щелочности — щелочным базальтоидам или сиенитам. Геологическое положение этого типа вещества на поверхности Венеры остается неясным и обоснованного соответствия ему среди геологических образований, выделяемых по материалам съемки Венеры 15 и 16, пока еще не найдено.

Среди равнин Венеры к западу и к востоку от Земли Иштар наблюдаются странные кольцевые образования поперечником от 200 до 600 км (рис. 21). Их всего около 30 и нет среди них двух одинаковых. Объединяет их то, что все они — это крупные структуры, создаваемые концентрически-кольцевыми, иногда радиально-концентрическими системами горных гряд, а внутри кольца обычно располагается зона хаотического рельефа. По характеру структурного рисунка эти образования похожи на овоидные тектонические структуры раннего докембрия Земли. В системе планетной номенклатуры таким структурам присвоено наименование «согопа» (венец). С венцами нередко ассоциируют радиояркие потоки базальтовых лав. Вероятно, венцы образовались как результат развития крупных вулкано-тектонических куполовидных поднятий с кольцевыми грядами гравитационного оползания и сжатия на склонах. При остывании этого очага происходило обрушение купола с образованием центральной области хаотического рельефа. При лабораторном моделировании такого образования и последующего обрушения куполов получились структуры, очень похожие на венерианские венцы. На поверхности равнин и горных сооружений в зоне съемки обнаружено около 150 кратеров диаметром от нескольких километров до 140 км (см. например, рис. 15), которые по морфологии очень похожи на ударные кратеры других планетных тел. Они распространены по поверхности равномерно-случайным образом, отсутствуя лишь в пределах областей Бета, Белл, Ульфрун и Метиды. Количество ударных кратеров на единице площади поверхности в зоне съемки соответствует значениям возраста экспозиции порядка 300–600 млн. лет. Отсутствие ударных кратеров в областях Бета, Белл и Метиды говорит о том, что эти структуры могут быть существенно моложе остальной территории съемки. Две трети популяции кратеров в зоне съемки представлено морфологически свежими формами, что в сочетании с приведенными оценками возраста экспозиции свидетельствует об очень низких темпах переработки поверхности в последние 300–600 млн. лет. По исчезновению некоторых деталей строения кратеров эти темпы оцениваются величиной порядка сантиметров за 1 млн. лет, что сравнимо с крайне низкими темпами переработки лунной поверхности в послеморской период геологической истории Луны.

Кроме явных ударных и вулканических кратеров на снятой территории выявлены также круговые структуры (как правило, это депрессии) с нечетким морфологическим выражением, не позволяющим без привлечения дополнительной информации определить их происхождение. По распределению в зависимости от размеров эти круговые структуры

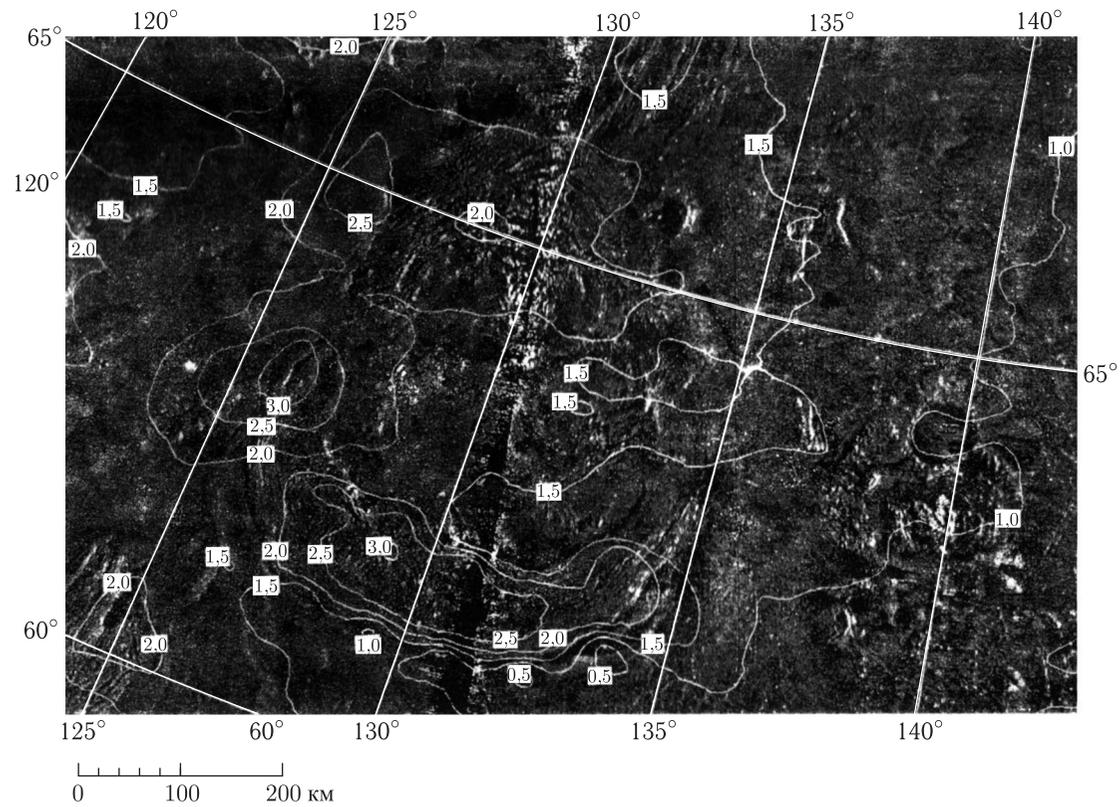


Рис. 21. Венец Нейтингейл в районе Равнины Атланты. Вертикальная полоса в середине изображения является следствием пропуска в съемки 12 апреля 1984 г.

близки к кратерам Венеры, имеющим очевидно ударное происхождение. Так же, как и явно ударные кратеры, они распределены по площади равномерно-случайным образом. Эти особенности в сочетании с их круговой кратероподобной морфологией позволяют предположить, что большинство нечетких круговых структур представляет собой сильно разрушенные ударные кратеры. Оценки возраста суммы популяции этих предполагаемых ударных кратеров с популяцией явных ударных кратеров приводят к значению порядка 3 млрд. лет. Простые расчеты показывают, что для превращения четко выраженного ударного кратера в круговую структуру с неясно выраженной морфологией нужны темпы преобразования поверхности более высокие, чем те, что действовали на Венере в последние 300–600 млн. лет. Очевидно, что в период 600 млн. – 3 млрд. лет назад процессы переработки поверхности на Венере были заметно более интенсивными (дециметры за 1 млн. лет), хотя явно не такими интенсивными, как на Земле.

В целом анализ радиолокационных изображений поверхности Венеры, полученных с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16, показал, что рельеф поверхности этой планеты сформирован, в основном, процессами базальтового вулканизма (равнины, вулканические горы), тектоническими деформациями коры Венеры вертикального (например, сводовое поднятие Беты) и горизонтального (горное обрамление Лакшми, черепаца) типов и их комбинациями (венцы, структура Лакшми и ее горное обрамление в целом). Эндогенные геологические процессы на Венере по масштабам и характеру их проявления в гораздо большей степени напоминают земные, чем эндогенные процессы на Луне, Меркурии и Марсе. В то же время по резкой заторможенности процессов экзогенной переработки поверхности, по крайней мере, в течение последних 300–600 млн. лет, а может быть даже в течение 3 млрд. лет, Венера ближе к безатмосферным Луне и Меркурию, чем к вечно обновляемой Земле. Эта противоречивость геологических характеристик Венеры весьма интересна для сравнительно-планетологического анализа по выявлению закономерностей эволюции планетных тел.

14. Заключение

В течение 8 месяцев с помощью космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 осуществлена детальная радиолокационная съемка северного полушария Венеры от полюса до широты 30°. Общая площадь снятой территории $115 \cdot 10^6$ км², что составляет 25% от площади поверхности Венеры. Пространственное разрешение радиолокационных изображений 1–2 км, точность измерения профиля высот поверхности 30 м.

На полученных изображениях видны горные хребты, кратеры, плоскогорья, складки и разломы венерианской коры. Обнаружены многочисленные результаты тектонической активности Венеры.

По результатам съемки построены фотокарты и топографические карты северного полушария Венеры. Закрытая сплошным облачным слоем Венера стала доступной геологическому изучению подобно Марсу и Меркурию.

Литература

1. Александров Ю. Н., Зяицкий В. А. и Ржига О. И., 1967, Астрон. ж., **44**, 1060.
2. Александров Ю. Н., Захаров А. И., Крылов Г. А., Мелихов А. Г. и Фельдман Б. Я., 1982, Тезисы доклада на XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции, Ереван.
3. Богомолов А. Ф., Жерихин И. В., Соколов Г. А., 1985, Изв. вузов, Радиофизика, **28**, 259.
4. Котельников В. А., Ржига О. И., Александров Ю. Н., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Шаховской А. М. и Францессон А. В., 1980, Проблемы современной радиотехники и электроники (Наука, Москва), с. 32.
5. Котельников В. А., Аким Э. Л., Александров Ю. Н. и др. (33 автора), 1984, Письма в астрон. ж., **10**, 883.
6. Campbell D. B., Dyce R. B. and Pettengill G. H., 1976, Science, **193**, 1123.
7. Campbell D. B., 1984, Recent Arecibo Radar Observations, Paper presented to XXV Meeting COSPAR, Graz, Austria.
8. Cook C. E. and Bernfeld M., Radar signals (Academic Press, New York), p. 266.
9. Goldstein R. M., 1965, Radio Science, **69D**, 1623.
10. Kotelnikov V. A., Bogomolov A. F., Rzhiga O. N., 1985, Adv. Space Res., **5**, 5.
11. Macdonald H. C., Lewis A. I. and Wing R. S., 1971, Geolog. Soc of Amer. Bull., **82**, № 2.
12. Masursky H., Eliason E., Ford P. G. et al. (7 authors), 1980, J. of Geophys. Res., **85**, 8232.
13. Pettengill G. H., Eliason E., Ford P. G. et al. (6 authors), 1980, J. of Geophys. Res., **85**, 8261.
14. Rumsey H. C., Morris G. A., Green R. R. and Goldstein R. M., 1974, Icarus, **23**, 1.