

СОЗДАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КАРТЫ ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА

*Ю. Н. Александров, В. М. Дубровин, А. И. Захаров, В. А. Котельников,
А. А. Крымов, Г. М. Петров, О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко, В. П. Синило,
Г. А. Соколов*

Проблемы современной радиотехники и электроники.
Под ред. В. А. Котельникова. М.: Наука, 1987, с. 46–69

Опыт наблюдения планет с помощью радиолокационной установки Центра дальней космической связи [1] был использован для разработки космического эксперимента по картографированию поверхности планеты Венера. С этой целью в начале июня 1983 г. к Венере стартовали космические аппараты «Венера-15 и -16» с радиолокационной аппаратурой, созданной ОКБ Московского энергетического института. В середине октября 1983 г. оба космических аппарата были выведены на орбиту спутников планеты Венера. С 11 ноября 1983 г. по 10 июля 1984 г. была проведена съемка всего северного полушария планеты выше 30° общей площадью 115 млн. км².

Основными задачами этого эксперимента, продолжавшегося непрерывно 8 месяцев, было получение радиолокационных изображений поверхности планеты Венера, измерение профиля высот по трассе полета космических аппаратов и исследование локальных характеристик отражения планеты [2].

Роль радиолокационных методов в исследовании Венеры

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, находящуюся на высоте 65–70 км, радиоволны проникают через атмосферу Венеры и отражаются от ее поверхности.

С помощью радиолокации с Земли удалось установить период и направление вращения Венеры, а также радиус ее твердой поверхности. 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

отраженный сигнал, 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 -14» уникальный эксперимент по забору грунта с поверхности Венеры и анализу его химического состава показал, что Венера действительно покрыта разновидностями базальтов.

В 1967 г., когда спускаемый аппарат советской межпланетной станции «Венера-4» впервые вошел в атмосферу планеты и произвел измерения ее химического состава и распределений температуры и давления на высотах до 20 км от поверхности Венеры, данные радиолокации позволили оценить температуру и давление на самой поверхности [3], которые оказались чудовищными по земным представлениям. Однако в 1970 г. эти данные были подтверждены и уточнены прямыми измерениями прибором спускаемого аппарата межпланетной станции «Венера-7», передавшего информацию непосредственно с поверхности Венеры [4].

Радиолокация Венеры позволила существенно уточнить значение астрономической единицы — среднего расстояния от Земли до Солнца, которая, как оказалось, была известна с ошибкой около 100 000 км. Уточнение астрономической единицы сделало возможным вывод искусственных спутников к планетам и доставку спускаемых аппаратов в заданные районы их поверхности.

В то же время радиолокационные наблюдения Венеры и других планет показали, что и после внесения поправки в величину астрономической единицы остаются значительные расхождения между фактическими и рассчитанными на основе оптических наблюдений положениями планет относительно Земли, достигающие нескольких сот километров. Ввиду того, что эти расхождения носят непредсказуемый характер, при каждом полете к планетам приходилось измерять расстояние с помощью радиолокационной установки Центра дальней космической связи для прогнозирования положения планеты в момент встречи с ней космического аппарата. На основе радиолокационных наблюдений в Советском Союзе создана единая релятивистская теория движения планет, обеспечивающая вычисление их взаимных положений с погрешностью 1–3 км, что в 100 раз превышает точность теорий, построенных ранее на основе только оптических наблюдений [5].

Еще в 60-х годах при анализе спектра отраженного Венерой сигнала как в США, так и в СССР [6] были обнаружены обширные области ее поверхности, рассеивающие радиоволны более интенсивно, чем окружающая местность, т. е. выглядящие «радиояркими» на окружающем фоне. Впоследствии с помощью крупнейших радиолокационных установок в Аресибо и Голдстоуне были получены с пространственным разрешением 10–20 км изображения отдельных участков полушария

Венеры, обращенного к Земле в период сближения¹⁾. В последнее время для отдельных снимков горных районов разрешение было улучшено до 3 км [7]. Однако окружающие пространства с более гладкой поверхностью на этих снимках не различимы вследствие низкого уровня отраженного сигнала. Полярные районы вообще недоступны для наблюдения с Земли. Ввиду ограниченности области картографирования, разрозненности и невысокого качества изображений данные, полученные при радиолокации с Земли, оказались недостаточны для построения карты Венеры.

В 1980 г. с помощью радиовысотометра-профилографа, установленного на американской межпланетной станции «Пионер-Венера», была построена карта высот (гипсометрическая карта), охватывающая поверхность Венеры между 60° южной широты и 75° северной [8]. 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 или Меркурий?

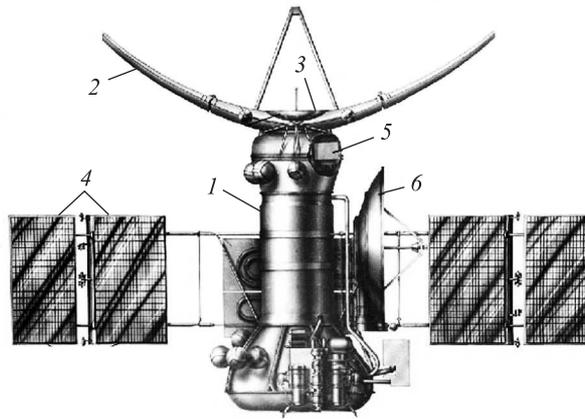


Рис. 1. Общий вид космических аппаратов «Венера-15 и -16». 1 — корпус АМС; 2 — антенна радиолокатора бокового обзора; 3 — антенна радиовысотометра; 4 — панели солнечной батареи; 5 — аппаратура радиолокатора; 6 — антенна радиолинии

¹⁾ Период вращения Венеры так соотносится с периодами обращения ее и Земли вокруг Солнца, что в каждом сближении, когда отношение сигнал/шум оказывается достаточным для проведения наблюдений, она повернута к Земле одним и тем же полушарием.

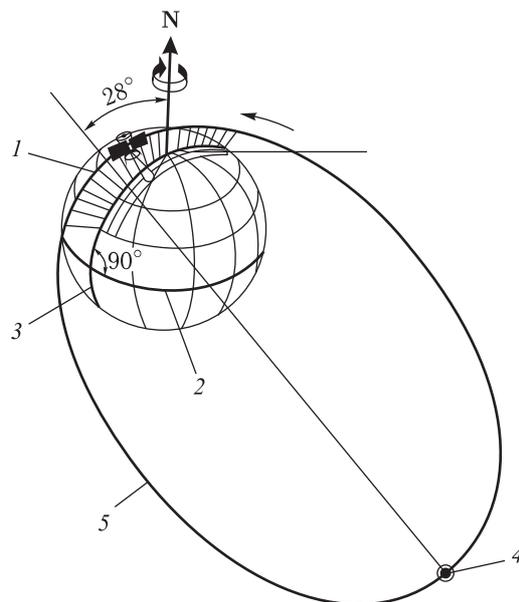


Рис. 2. Орбита искусственных спутников Венеры. 1 — перигеум; 2 — траектория орбиты; 3 — экватор Венеры; 4 — апогеум; 5 — зона сканирования

Чтобы увидеть эти характерные детали поверхности, и были направлены к планете Венера космические аппараты «Венера-15 и -16».

Искусственные спутники «Венера-15 и -16» (рис. 1) созданы на базе орбитальных аппаратов автоматических межпланетных станций «Венера-9–14», доставивших к Венере спускаемые аппараты. Они были выведены на близкие к полярным эллиптические орбиты (рис. 2) с периодом обращения 24 ч. Минимальное расстояние аппаратов от поверхности Венеры в перигеуме, приходящемся примерно на 60° северной широты, было около 1000 км, максимальное расстояние — в апогеуме — 66 000 км.

Принцип радиолокационной съемки

Космические аппараты «Венера-15 и -16» оборудованы радиолокационной системой восьмисантиметрового диапазона волн, состоящей из радиолокационной станции бокового обзора (РЛС СА) и радиовысотомера-профилографа (РВП). Для получения необходимого пространственного разрешения (1–2 км) применен метод радиолокации с «синтезом апертуры» [9], который для исследования Венеры используется впервые.

Во время радиолокационной съемки с помощью системы астроориентации космического аппарата электрическая ось антенн РВП направ-

лена вдоль местной вертикали к центру планеты. Электрическая ось антенны РЛС SA отклонена от местной вертикали на угол $\alpha_0 = 10^\circ$ и находится в плоскости, проходящей через местную вертикаль перпендикулярно плоскости орбит (рис. 3). С помощью передатчика, установленного на космическом аппарате, «освещается» участок поверхности планеты, оказавшийся в пределах диаграммы направленности антенны.

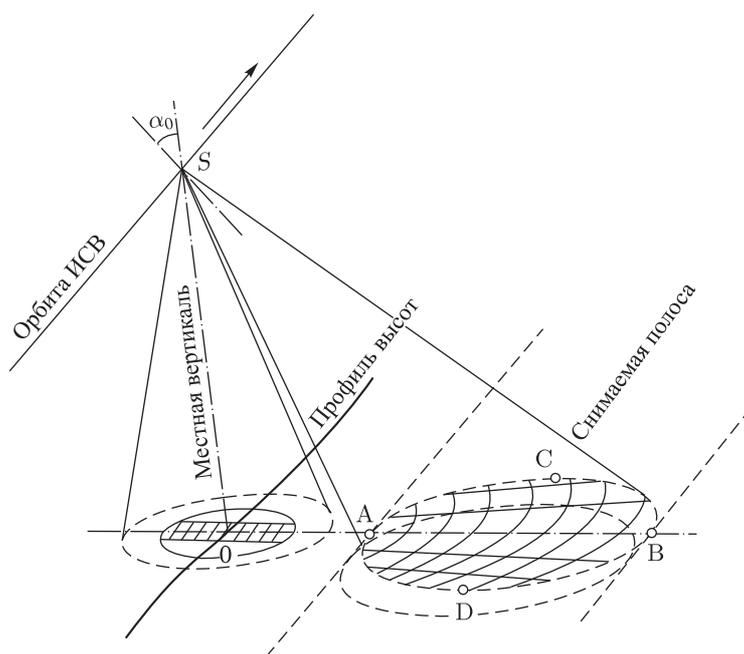


Рис. 3. Схема радиолокационной съемки с космического аппарата

Элементы поверхности в пределах этого участка находятся на разном расстоянии и движутся с разными радиальными скоростями относительно космического аппарата. Поэтому отраженные ими принятые на космическом аппарате сигналы не одинаково запаздывают друг относительно друга и имеют разную частоту вследствие эффекта Доплера. Например, точка A находится ближе к космическому аппарату, чем точка B , и отраженные ею сигнал 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 для разделения сигналов, отраженных отдельными элементами поверхности, при обработке и построении 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.

В одном прохождении космического аппарата около планеты снимается полоса поверхности Π_1 , вытянутая вдоль трассы T_1 (рис. 4). К следующему прохождению через 24 ч планета поворачивается на угол около $1,5^\circ$ и снимается новая полоса Π_2 .

Профиль высот поверхности планеты по трассе полета космического аппарата дает радиовысотомер-профилограф. Непосредственно измеряется высота космического аппарата SO (см. рис. 3) относительно некоторого среднего уровня поверхности в пятне, находящемся под аппаратом. Величина местного радиуса вычисляется как разность планетоцентрического расстояния аппарата и измеренной высоты.

В одном прохождении снимаемая полоса и трасса измерений профиля высот разнесены в пространстве. Однако при регулярной съемке трассы совмещаются с полосами за счет вращения планеты.

Пространственное разрешение

Для некоторой точки поверхности, находящейся в данный момент на расстоянии r от космического аппарата и имеющей по отношению к нему радиальную составляющую скорости v_r , время запаздывания отраженного сигнала (τ) и доплеровское смещение его частоты (ν) равны соответственно

$$\tau = 2r/c, \quad (1)$$

$$\nu = -2v_r/\lambda, \quad (2)$$

где λ — длина волны зондирующего сигнала, а c — скорость света.

Можно показать, что в сферической системе координат, центр которой совмещен с центром масс планеты (с одним из фокусов орбиты космического аппарата), а экваториальная плоскость — с плоскостью орбиты,

$$r = \sqrt{R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cos(i - i_n) \cos \Phi}, \quad (3)$$

$$v_r = -\frac{1}{r} \{v_r R \sin(i - i_n) \cos \Phi - v_v [\rho - R \cos(i - i_n) \cos \Phi]\}. \quad (4)$$

Здесь R — радиус поверхности планеты в данной точке; ρ — планетоцентрическое расстояние, i_n — истинная аномалия (угловое расстояние аппарата относительно перигея, измеренное из центра планеты), v_r , v_v — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите.

В этой системе координат долгота i отсчитывается в плоскости орбиты от перигея в сторону движения космического аппарата, широта Φ — вдоль орбитального меридиана от плоскости орбиты в сторону, откуда движение аппарата наблюдается против часовой стрелки.

Дифференцируя r по координате Φ и v_r по координате i и переходя к конечным приращениям, с учетом (1) и (2) при $i = i_n$ (что соответствует точкам линии AB на рис. 3, лежащим в плоскости, проведенной через местную вертикаль OS перпендикулярно плоскости орбиты), получим линейные размеры элемента разрешения:

— в направлении трассы:

$$\Delta_x = R\Delta_r \cos \Phi = \lambda r / 2L_a, \quad L_a = \vartheta v_r, \quad (5)$$

— в направлении, перпендикулярном трассе:

$$\Delta_y = R\Delta_\Phi = \frac{cr\Delta_r}{2\rho \sin \Phi}, \quad (6)$$

где ϑ — время синтеза апертуры (или время когерентного накопления отраженных сигналов — величина, обратная частотному разрешению Δ_ν при спектральном анализе), Δ_r — разрешающая способность по запаздыванию (определяется полосой частот зондирующего сигнала), L_a — размер синтезированной апертуры.

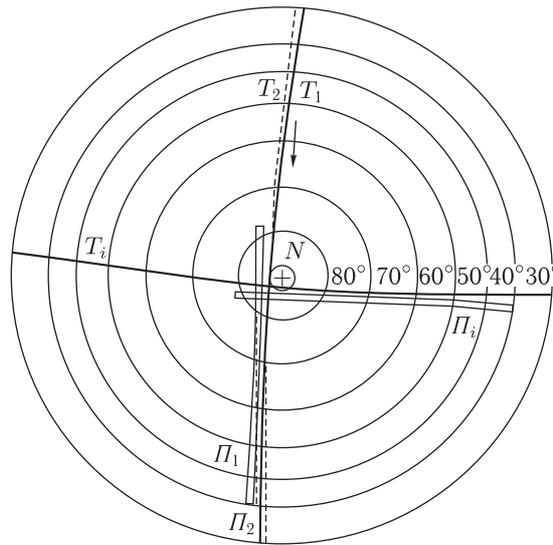


Рис. 4. Последовательность радиолокационной съемки поверхности Венеры: T_1, P_1 — трасса космического аппарата при его прохождении вблизи Венеры и снимаемая полоса; T_2, P_2 — трасса и полоса в следующем прохождении спустя сутки; T_i, P_i — трасса и полоса спустя четверть оборота Венеры

Для РЛС СА космических аппаратов «Венера-15 и -16» $\vartheta = 3,9$ мс. В перигентре $L_a = 36$ м и уменьшается в начале и конце съемки до 33 м из-за уменьшения v_r .

При постоянной величине времени синтеза пространственное разрешение в направлении трассы падает с ростом высоты косми-

ческого аппарата ($h = \rho - R$), движущегося по эллиптической орбите, из-за роста наклонной дальности r и уменьшения размера синтезированной апертуры. Изменение h , v_r и Δ_x в зависимости от истинной аномалии для РЛС СА космических аппаратов «Венера-15 и -16» ($\lambda = 8$ см) показано на рис. 5.

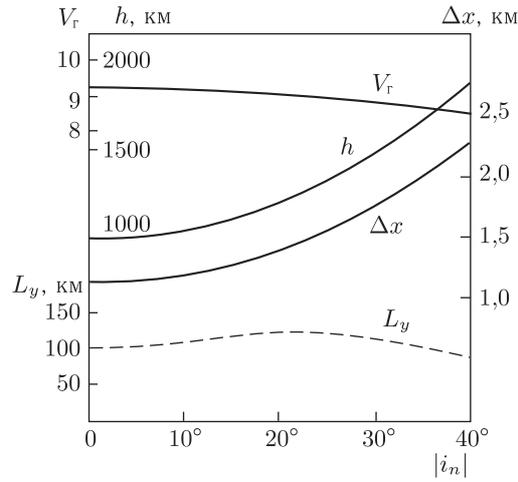


Рис. 5. Изменение высоты h и горизонтальной составляющей скорости v_r космического аппарата, а также пространственного разрешения вдоль трассы Δ_x и ширины полезной части снимаемой полосы L_y в зависимости от истинной аномалии

Пространственное разрешение в перпендикулярном направлении от высоты зависит мало. Для треугольника $O'SG$ (рис. 6), построенного в плоскости, проведенной через местную вертикаль $O'S$ перпендикулярно плоскости орбиты, по теореме синусов

$$\frac{r}{\sin \Phi} = \frac{R}{\sin \alpha} \quad \text{и} \quad \Delta_y = \frac{cR\Delta_\tau}{2\rho \sin \alpha}. \quad (7)$$

При заданном значении угла α Δ_y изменяется обратно пропорционально $\rho = R + h$.

Более существенно изменение пространственного разрешения Δ_y в зависимости от угла α , составляемого направлением на определенную точку и местной вертикалью. При большей высоте полоса съемки L_y видна под меньшим углом (рис. 7) и меньше изменение пространственного разрешения от одного края изображения к другому. Для РЛС СА космических аппаратов «Венера-15 и -16» (высота перигея 1000 км, $\alpha_0 = 10^\circ$, $\Delta_\tau = 1,54$ мкс) в пределах полосы съемки оно меняется от 0,9 км до 1,5 км (не более, чем в 1,7 раза).

Диаметр пятна, в котором измеряется высота с помощью радиовысотомера-профилографа (см. рис. 3), определяется разрешаю-

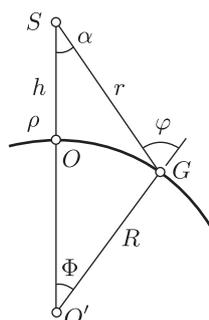


Рис. 6. Геометрические соотношения между наклонной дальностью r , планетоцентрическим расстоянием космического аппарата ρ , радиусом планеты R и углом α

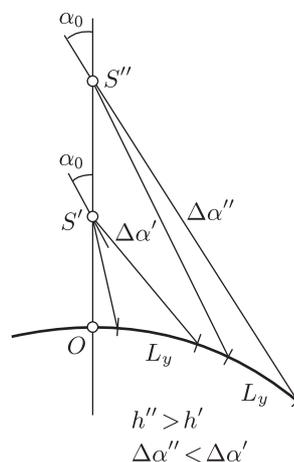


Рис. 7. Изменение угла обзора $\Delta\alpha$ в зависимости от выбора высоты космического аппарата при съемке

щей способностью по высоте Δh и зависит от высоты:

$$2a = 2\sqrt{2\frac{R}{\rho}h\Delta h}, \quad (8)$$

причем

$$\Delta h = \frac{c\Delta\tau}{2},$$

где $\Delta\tau$ — разрешающая способность по запаздыванию. В диапазоне высот 1000–2000 км диаметр пятна изменяется от 40 до 50 км.

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 работает радиолокационная система космических аппаратов «Венера-15 и -16», приведена на рис. 8. Отсюда следует, что вначале мощность

отраженных сигналов зависит от угла φ очень резко и изменение его на 1° приводит к изменению мощности на 1 дБ.

У РЛС СА космических аппаратов «Венера-15 и -16» угол α_0 , составляемый электрической осью диаграммы направленности антенны и местной вертикалью, выбран в 10° , что много меньше, чем у обычных станций бокового обзора, устанавливаемых на самолете [9]. При малом угле обзора не возникает затенений.

При отклонении падающего луча от вертикали на 10° мощность отраженных сигналов уменьшается на 10 дБ. Эта величина определяет средний фон местности, на котором выделяются детали поверхности. При этом некоторые элементы поверхности, такие как склоны горных хребтов, кратеров и долин, могут занять более удачное положение по отношению к падающему лучу. Мощность отраженных сигналов для них будет иметь превышение над средним фоном до 10 дБ. Другие элементы ориентированы к падающему лучу менее удачно: для них значение угла φ больше 10° и мощность отраженных сигналов ниже среднего фона (до -8 дБ при $\varphi = -20^\circ$). Следовательно, контрасты между отдельными элементами поверхности могут достигать величины порядка 20 дБ.

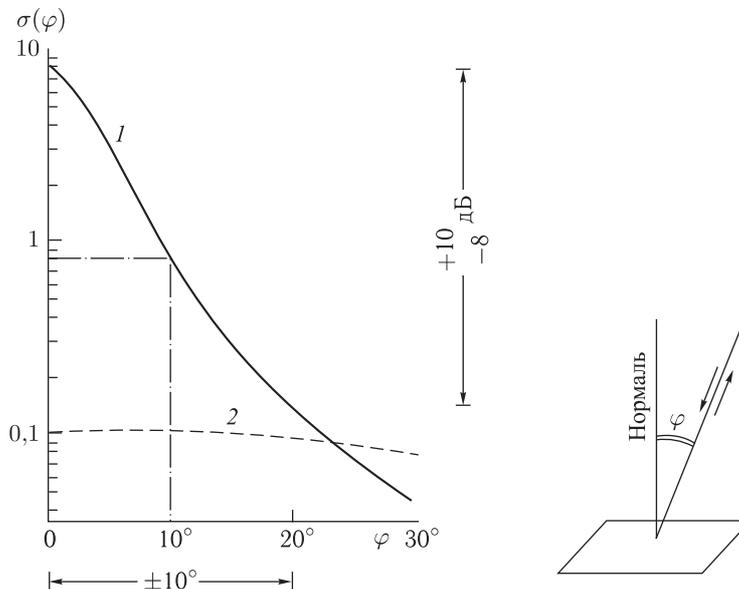


Рис. 8. Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры, характеризующая мощность отраженных сигналов в зависимости от угла падения: для поляризованной составляющей отраженного сигнала (1) и деполаризованной составляющей (2) по данным, полученным ранее при радиолокации с Земли. Кривая 2 приподнята на 10 дБ

Резкая зависимость мощности отраженных сигналов от угла φ и, как следствие, высокая контрастность изображения, получаются при приеме отраженных сигналов на антенну, поляризация которой согласована с поляризацией зеркально отраженной волны. Если же антенна рассчитана на прием волн, деполяризовавшихся при отражении, то уровень принятых сигналов резко падает и к тому же очень слабо зависит от угла φ (см. пунктирную кривую на рис. 8).

Поляризация антенны РЛС СА и РВП линейная, одинаковая при передаче и приеме. Ввиду отсутствия у Венеры заметного магнитного поля при распространении волн через ее ионосферу поляризационных помех не возникает.

Погрешность измерения мощности отраженного сигнала

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 шума приемной аппаратуры $P_c/P_{ш}$, определяемого параметрами РЛС, а также от числа N_n независимо усредняемых измерений мощности отраженного сигнала. Усреднение необходимо для снижения влияния интерференции сигналов, отраженных отдельными точками в пределах разрешаемого элемента.

Относительная величина среднеквадратического значения погрешности измерения мощности отраженных сигналов на выходе устройства обработки имеет вид

$$\frac{\sigma_P}{P_c} = \frac{1}{\sqrt{N_n}} \left(1 + \frac{P_{ш}}{P_c} \right).$$

Для РЛС СА космических аппаратов «Венера-15 и -16» число N_n изменяется от 6 до 14 в диапазоне высот 1000–2000 км. Отношение $P_c/P_{ш}$ в центре диаграммы направленности антенны 26–20 дБ для того же диапазона высот и σ_P/P_c изменяется от 41 до 27%. На краю диаграммы направленности $P_c/P_{ш}$ падает на 10 дБ. Кроме того, для некоторых элементов поверхности уровень отраженных сигналов может быть на 10 дБ ниже среднего (см. предыдущий раздел). Для этих элементов σ_P/P_c возрастает до 50%.

Как следует из рис. 8, изменение мощности отраженных сигналов в 1,5 раза (на 1,8 дБ) происходит при изменении угла наклона элемента поверхности относительно падающего луча на $1,8^\circ$. Следовательно, возможное изменение углов наклона от 0 до 20° , на что рассчитан эксперимент, приводит к изменению мощности, превышающему среднеквадратическое значение погрешности ее измерения, по крайней мере, в 10 раз.

Влияние венерианской атмосферы

При ограниченном времени синтеза апертуры пространственное разрешение в направлении трассы космического аппарата тем выше, чем короче рабочая волна (см. (5)). 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 [1]. Это ослабление отраженных сигналов при вертикальном прохождении в зависимости от длины волны показано ниже:

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 16», поглощение составляет 2,2 дБ, что было учтено при расчете энергетического потенциала системы. Под углом 10° относительно вертикали, под которым излучается сигнал РЛС СА, поглощение возрастает всего на 1,5%.

Необычайно плотная атмосфера Венеры увеличивает время запаздывания отраженных сигналов, причем тем больше, чем больше ее толщина над данной точкой. Над средней поверхностью планеты увеличение запаздывания составляет 1,7 мкс или 260 м в пересчете к высоте.

Вследствие рефракции траектория радиолуча РЛС СА 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 радиолучом с вертикалью, это смещение не превышает 100 м и им можно пренебречь.

Может возникнуть опасение, не будут ли вызывать пространственная неоднородность венерианской атмосферы сильные флуктуации фазы отраженных сигналов, что сделает невозможным когерентную обработку и синтез изображения. Однако надо иметь в виду, что из всего пути, проходимого радиолучом, только небольшая часть приходится на венерианскую атмосферу. При высоте космического аппарата 1000 км путь, пролетаемый аппаратом за время синтезирования (3,9 мс), виден из некоторой точки поверхности под углом $3,6 \cdot 10^{-5}$ рад. На высоте, равной высоте однородной атмосферы, которая для Венеры равна 15 км, радиолуч переместится за время синтезирования всего на 0,5 м. Маловероятно, чтобы такое незначительное отклонение луча вызвало заметное изменение набега фазы в атмосфере.

Косвенно это подтверждается анализом сигналов, передававшихся спускаемыми аппаратами АМС «Венера» с поверхности планеты. Например, фактическая ширина спектральной линии сигналов АМС

«Венера-7» не превышала 1–2 Гц [4], что было вызвано манипуляцией сигнала передававшимся сообщением.

Обеспечение однозначного выделения отраженных сигналов

Двумерная автокорреляционная функция, характеризующая избирательные свойства зондирующего сигнала, помимо главного максимума имеет еще дополнительные максимумы, отстоящие по оси времени τ на T_M , а по оси частот ν на $1/T_M$, где T_M — период повторения модуляции [10]. Если в области значения (τ, ν) , занятой дополнительными максимумами, окажутся отраженные сигналы, то они создадут помеху. В случае протяженной щели, какой является поверхность планеты, прием отраженных сигналов только в той области (τ, ν) , где нет дополнительных максимумов двумерной автокорреляционной функции, можно обеспечить выбором угловых размеров диаграммы направленности антенны. Для этого должны выполняться неравенства

$$\tau_B - \tau_A < T_M, \quad \nu_C - \nu_D < 1/T_M, \quad (10)$$

где $\tau_A, \tau_B, \nu_C, \nu_D$ — время запаздывания и доплеровское смещение частоты для крайних точек участка поверхности, попадающего в диаграмму направленности антенны (см. рис. 3).

Ширина доплеровского спектра $(\nu_C - \nu_D)$ отраженных сигналов определяется шириной диаграммы направленности антенны в горизонтальном сечении:

$$(\nu_C - \nu_D) \simeq (2v_r/\lambda)\theta_r. \quad (11)$$

При максимально возможной длине зеркала антенны, размещенной на космическом аппарате, 6 м ширина ее диаграммы направленности в горизонтальном сечении θ_r на волне 8 см составляет $0,95^\circ$. При максимальной величине $v_r = 9,17$ км/с (см. рис. 5) это дает $(\nu_C - \nu_D) = 3,8$ кГц и $T_M < 263$ мкс (см. второе неравенство (10)). Чтобы обеспечить подавление помехи на краю диаграммы направленности не менее 20 дБ по отношению к полезным сигналам, было выбрано $T_M = 195$ мкс.

Протяженность отраженных сигналов по запаздыванию $(\tau_B - \tau_A)$ зависит от ширины диаграммы направленности антенны в вертикальном сечении:

$$(\tau_B - \tau_A) \simeq \frac{2h \operatorname{tg} \alpha_0}{c \cdot \cos \alpha_0} \theta_B.$$

При $\alpha_0 = 10^\circ$ с помощью верхнего неравенства (10) величина θ_B была выбрана $5,5^\circ$ и соответственно ширина зеркала антенны 1,4 м. Ширина полезной части снимаемой полосы L_y (где превышение полезных сигналов над помехой не менее 20 дБ) меняется с высотой космического аппарата, как показано на рис. 5 (пунктир).

Мощность отраженных сигналов пропорциональна площади разрешаемого элемента и удельной эффективной площади обратного рассе-

яния поверхности. Величина последней резко (на 10 дБ, см. рис. 3) увеличивается в области, расположенной непосредственно под космическим аппаратом, где возникает зеркальный блик. В этой области резко возрастает и размер элемента разрешения в направлении, перпендикулярном трассе, см. (6). В сумме это увеличивает мощность помехи относительно полезных сигналов примерно на 26 дБ. Добавив к этому ослабление сигналов на краю диаграммы направленности на 10 дБ и необходимое превышение сигналов над помехой на 20 дБ, получим требуемую величину подавления помехи в 56 дБ, которое должна обеспечить антенна РЛС СА. Учитывая ослабление помехи при излучении и приеме, получим, что уровень боковых лепестков, направленных в подспутниковую область, должен быть не выше –28 дБ относительно усиления в максимуме диаграммы направленности.

Принцип работы радиолокационной системы

Упрощенная блок-схема радиолокационной системы представлена на рис. 9. Это полностью когерентная система, все сигналы которой получаются от общего задающего генератора. Передатчик непрерывного излучения работает высокочастотными импульсами длительностью около 15 мс, разделенными паузами длительностью около 5 мс для приема отраженных сигналов (рис. 10, а). Внутри импульсов фаза сигнала изменяется на 180° в моменты, определяемые кодом периодически повторяемой М-последовательности (последовательности максимальной длины [11]) (рис. 11). Длительность элементарного импульса, определяющего разрешающую способность радиолокационной системы по наклонной дальности и высоте, 1,54 мкс. В режиме РЛС СА период кодовой последовательности содержит 127 элементарных импульсов (195,4 мкс), в режиме РВП — 31-элементарный²⁾ импульс (47,7 мкс). Импульсы передатчика следуют как через антенну РЛС СА, так и антенну РВП с интервалами около 0,3 с (см. рис. 10, б).

Прием и регистрация отраженных сигналов производятся в паузе по окончании импульса передатчика. 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. 9). 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 РЛС СА

²⁾ В режиме РВП период кодовой последовательности может быть установлен равным также 127 элементам, что облегчает раскрытие неоднозначности в измеренном расстоянии.

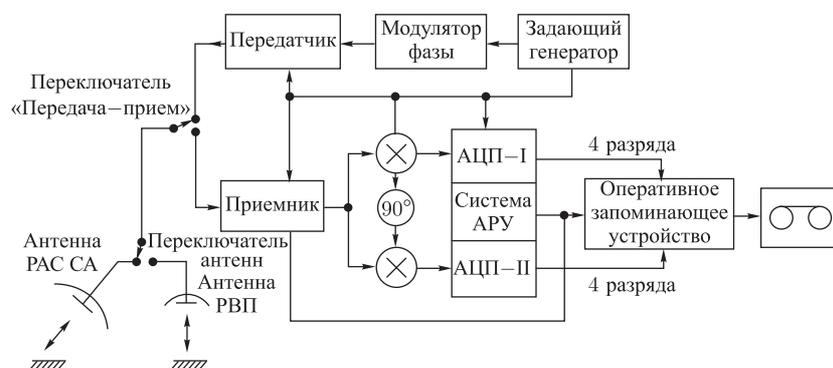


Рис. 9. Упрощенная блок-схема радиолокационной системы

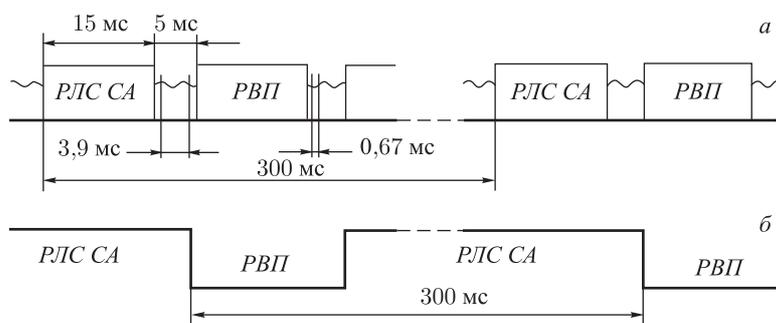


Рис. 10. Циклограмма сигналов радиолокационной системы (а) и работы переключателя антенн (б)

(20 периодов 127-элементной M -последовательности) и 434 отсчета отраженных сигналов в режиме РВП (14 периодов 31-элементной M -последовательности) поступают двумя 4-разрядными словами в оперативное запоминающее устройство совместно с данными об усилении, установленном системами АРУ, а затем записываются на бортовых цифровых магнитофонах. Объем цифровых массивов обеспечивает возможность когерентного накопления отраженных сигналов в течение 3,9 и 0,67 мс соответственно. За 16 мин., в течение которых проводится радиолокационная съемка, получается около 3200 таких массивов³⁾.

³⁾ Кроме импульсов РЛС СА и РВП цикл работы радиолокационной системы содержит еще 13 импульсов, обеспечивающих работу цифрового коррелятора, служащего для построения изображения на борту космического аппарата. Выстраиваемые затем друг за другом, после передачи на Землю, эти строки образуют слитное изображение. При этом пространственное разрешение в 2 раза хуже, чем в основном режиме. Эта система целиком разработана

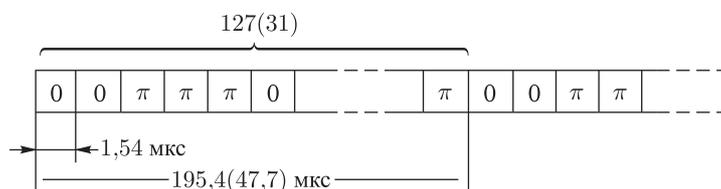
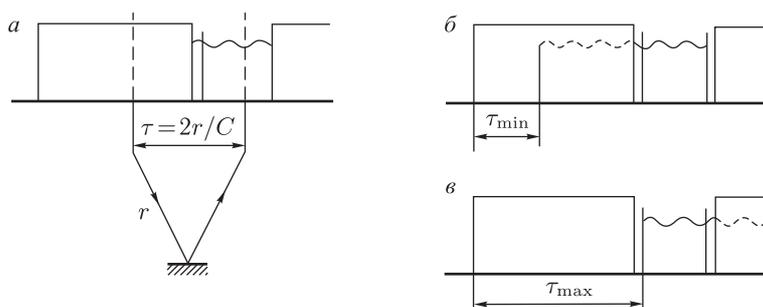


Рис. 11. Модуляция фазы сигнала передатчика

Отраженные сигналы с учетом запаздывания τ при распространении должны попасть в интервал, отведенный для его кодирования (рис. 12, *a*). Длительность импульса передатчика и интервал кодирования обеспечивают заполнение всего этого интервала отраженным сигналом в диапазоне высот примерно от 660 до 2250 км (крайние случаи приведены на рис. 12, *б* и *в*).

Рис. 12. Запаздывание момента прихода отраженного сигнала относительно момента излучения (*a*) и запаздывание отраженного сигнала для минимальной (*б*) и максимальной (*в*) дальностей

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.

Принципы синтеза радиолокационных изображений и профилей высот поверхности Венеры

Обработка отраженных сигналов и построение радиолокационных изображений и профилей высот поверхности Венеры велись в ИРЭ АН СССР, где с этой целью был создан комплекс аппаратуры, оборудов-

ОКБ МЭИ, которое вело обработку поступающей по этому каналу информации совместно с Институтом проблем передачи информации АН СССР.

дованный электронными вычислительными машинами и устройствами отображения и вывода изображений.

Отраженные сигналы представляют собой одномерную радиоголограмму и, обычно, радиолокационное изображение получают с помощью когерентного оптического процессора [9], работу которого при постоянных параметрах съемки организовать несложно. Здесь же для синтеза изображений и профилей высот поверхности и их обработки в условиях изменяющихся высоты и скорости космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, впервые использовалось специализированное цифровое устройство — процессор для выполнения преобразования Фурье. Это устройство разработано ИРЭ АН СССР совместно с Институтом электронных управляющих машин Минприбора [12]. С его помощью операция преобразования Фурье выполняется в 50 раз быстрее, чем, скажем, на большой универсальной ЭВМ тип БЭСМ-6.

Для каждого массива отсчетов, полученных в режиме РЛС СА, с помощью процессора Фурье осуществлялась согласованная фильтрация отраженного сигнала для 127 значений запаздывания и 31 значения доплеровского смещения частоты, соответствующих примерно 4000 элементов поверхности планеты в диаграмме направленности антенны (см. рис. 3). Значения мгновенной мощности отраженных сигналов по оси частот вычислялись в 1,5 раза чаще реального разрешения, чтобы не ухудшить его при дальнейшем усреднении полученных массивов.

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

При усреднении для каждой из точек изображаемой поверхности, попадающих в диаграмму направленности антенны, вычислялись наклонная дальность и радиальная составляющая скорости относительно космического аппарата, для чего использовались данные об удаленности и скорости аппарата относительно центра масс Венеры (см. (3), (4)), Шаг разложения по координатам i и Φ — 0,8 км, что меньше фактического разрешения. Методика учитывает изменение высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, и возможные (как правило, в пределах $0,5^\circ$) отклонения электрической оси антенны от среднего положения.

Мгновенные измерения мощности взвешивались перед усреднением, для чего строилась модель двумерного распределения средней мощности отраженных сигналов в диаграмме направленности относительно

средней мощности шума антенны. При этом устранялась неравномерность освещенности по полю изображения, вызванная неравномерностью усиления в диаграмме направленности антенны и неравномерностью диаграммы обратного рассеяния поверхности планеты. Средняя мощность отраженных сигналов сглаживалась вдоль трассы скользящим окном размером 160 км. Для согласования с динамическим диапазоном фотопленки измерения мощности отраженного сигнала перед выводом изображения через фототелеграфный аппарат логарифмировались, что делало измерения равноточными (см. (9)).

При обработке данных радиовысотомера-профилографа сначала с помощью процессора Фурье также осуществлялась согласованная фильтрация отраженных сигналов по запаздыванию (31 или 127 значений) и доплеровскому смещению частоты. Измеренные значения мгновенной мощности суммировались по частоте. Полученное распределение мощности отраженных сигналов по запаздыванию затем сравнивалось методом математической сверки с рядом моделей этого распределения, отличающихся значениями коэффициента шероховатости и дисперсии высот в участке поверхности, оказавшемся в пределах диаграммы направленности антенны РВП (см. рис. 3). При выборе моделей учитывалась высота космического аппарата и возможное отклонение электрической оси антенны от местной вертикали, которое измерялось по смещению средней частоты спектра отраженных сигналов. Положение наибольшего максимума сверток давало высоту космического аппарата над средней поверхностью в пятне диаметром 40–50 км (см. (8)), с неоднозначностью, определяемой периодом модулирующей M -последовательности: 7,15 км при 31 элементе и 29,3 км при 127 элементах. Для раскрытия неоднозначности использовались данные о расстоянии космического аппарата относительно центра масс планеты. Вносилась поправка на дополнительное запаздывание сигнала в атмосфере Венеры.

Измерения, следующие через 0,3 с, усреднялись по 7 отсчетам скользящим окном. Величина радиуса поверхности планеты в данной точке, вычисленная как разность расстояния космического аппарата от центра планеты и измеренной высоты, наносилась 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, составляло 30 м.

В первые две недели съемки, когда было неясно, с какой ошибкой будет известно планетоцентрическое расстояние космических аппаратов, использовался зондирующий сигнал с 127-элементной M -последовательностью. Переход на сигнал с 31-элементной M -последовательностью для аппарата «Венера-16» был произведен 25 ноября 1983 г. Как видно из рис. 13, на котором приведены профили высот поверхности Венеры для двух близких трасс 24 и 25 ноября 1983 г., смена сигнала прошла без какого-либо заметного систематического смещения.

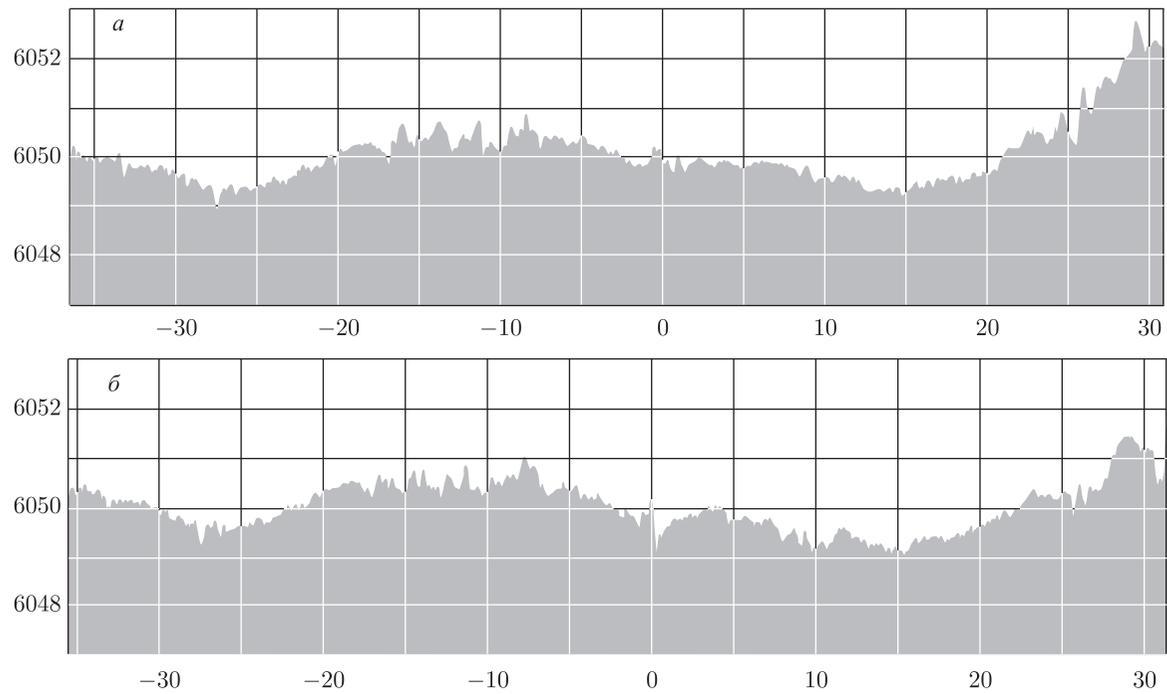


Рис. 13. Профили высот поверхности Венеры, полученные космическим аппаратом «Венера-16» 24 ноября 1983 г. (а) при 127-элементной модулирующей М-последовательности сигнала и 25 ноября 1983 г. (б) при 31-элементной М-последовательности

Полученные результаты

При прохождении космического аппарата в районе перицентра его орбиты за 16 мин. ежедневно снималась полоса поверхности длиной 7000–8000 км. Съемка начиналась на широте 80° за северным полюсом Венеры. Аппарат проходил вблизи него и, двигаясь примерно вдоль меридиана, заканчивал съемку на широте 30° (см. рис. 4).

Первое радиолокационное изображение поверхности Венеры, снятое 16 октября 1983 г. космическим аппаратом «Венера-15» и полученное 21 октября после обработки половины информационных массивов, приведено на рис. 14 вверху. В дальнейшем при обработке использовались все информационные массивы, что существенно улучшает качество изображения за счет уменьшения флуктуационной ошибки яркости, как это видно из нижнего снимка на рис. 14.

По горизонтальной оси отложено угловое расстояние относительно перицентра орбиты (i), по вертикальной оси — угловое расстояние относительно плоскости орбиты (Φ), измеренные в градусах из центра планеты (один градус на поверхности Венеры занимает 105,6 км). Несовпадение шкал связано с тем, что при построении нижнего фрагмента использовались более точные параметры орбиты. Длина фрагментов — 1100 км при полной ширине изображенной полосы 156 км (195 элементов по 0,8 км). Полезная часть изображения зависит от высоты космического аппарата над поверхностью планеты (см. рис. 5). Изображение построено в предположении, что поверхность Венеры — сфера радиуса 6051 км. 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 светлее образования на изображении. Склоны, обращенные к падающему лучу, выглядят светлыми, склоны, отвернутые от него — темные. От начала изображения до -30° от перицентра занимает древняя складчатая область с полуразрушенными кратерами ударного происхождения. Остатки этих кратеров диаметром около 30 км видны на $-32,7^\circ$ и $-31,84^\circ$ (по рис. 14, б). Складчатый образования имеют, вероятно, более молодой возраст. Участки с более гладкой поверхностью меньше отражают назад к космическому аппарату и выглядят темными на окружающем фоне. Они видны на $-35,5^\circ$; $-35,0^\circ$; $-33,0^\circ$.

Затем тянется равнина, на которой разбросаны отдельные холмы с диаметром основания 3–6 км. На верхнем снимке эти образования маскируются шумовым фоном. Этот район ближе всего к северному полюсу Венеры, который лежит выше на расстоянии $4-5^\circ$ вдоль меридиана. Околополярной равнине, впервые открытой космическими аппаратами «Венера-15 и -16», дано звание «Снегурочка».

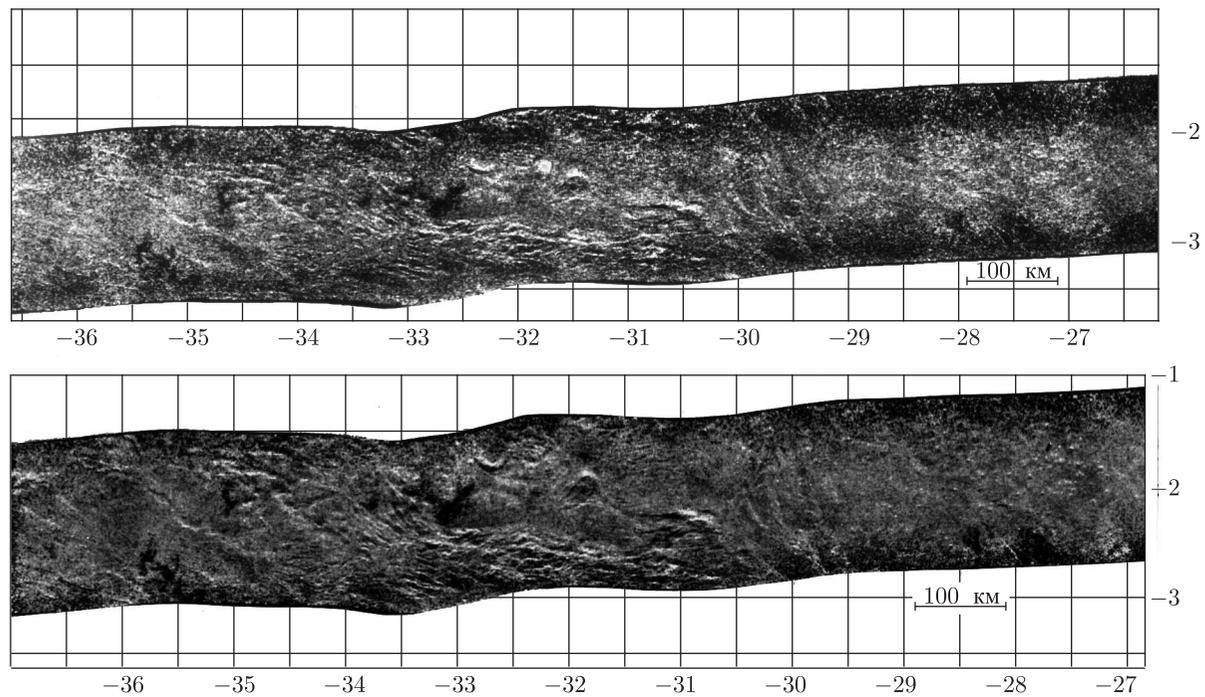


Рис. 14. Первое радиолокационное изображение поверхности Венеры, снятое 16 октября 1983 г. космическим аппаратом «Венера-15» и полученное 21 октября 1983 г. после обработки только половины информационных массивов (верхний снимок). В дальнейшем при обработке использовались все информационные массивы (нижний снимок)

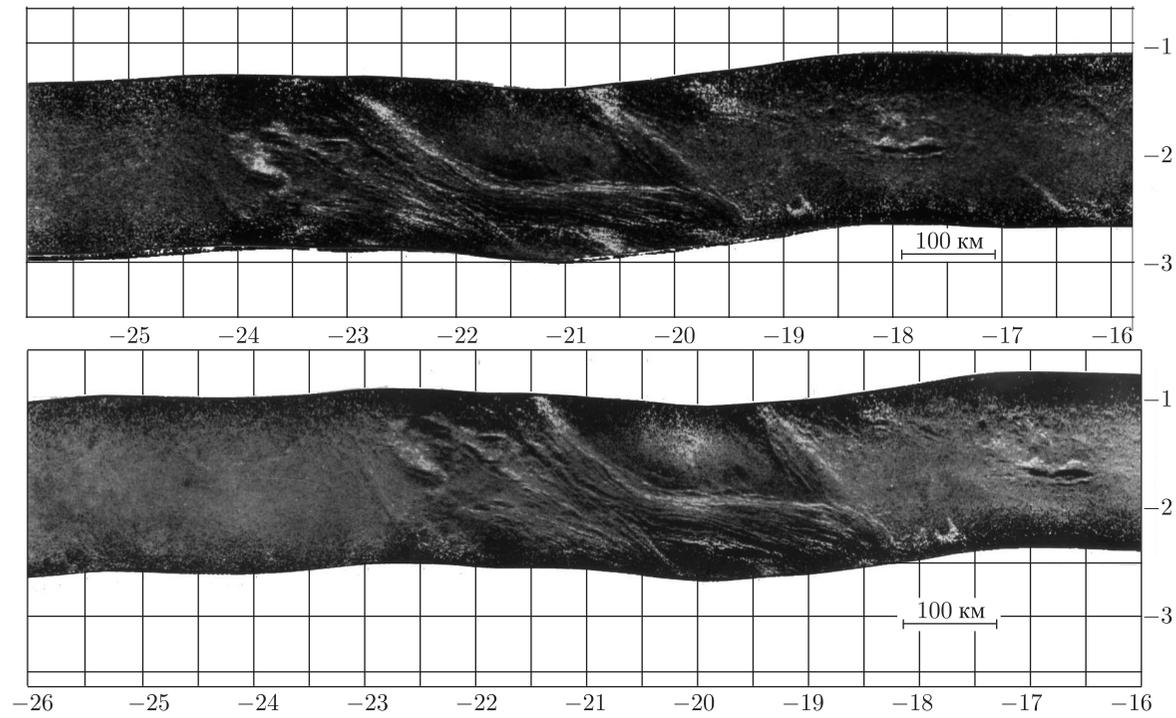


Рис. 15. Радиолокационные изображения одного и того же района поверхности Венеры, полученные космическим аппаратом «Венера-16» 20 октября 1983 г. и 3 июля 1984 г., т. е. спустя 8 месяцев

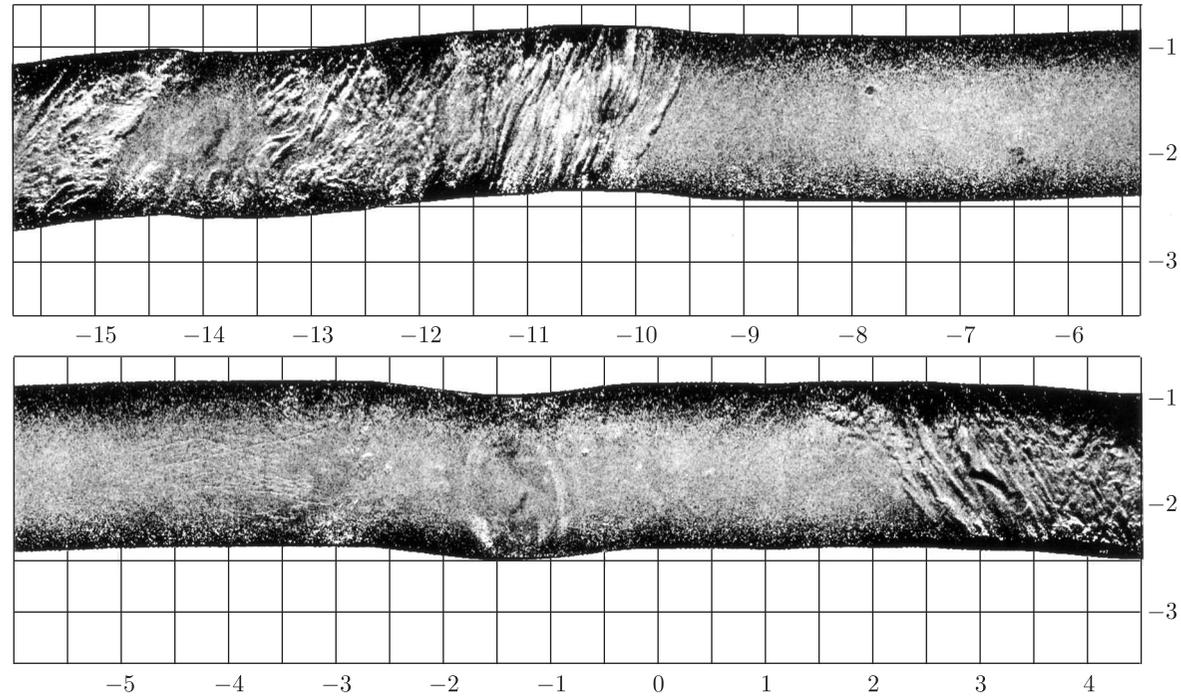


Рис. 16. Радиолокационное изображение района Земли Иштар, полученное космическим аппаратом «Венера-15» 28 декабря 1983 г.

Радиолокационные изображения поверхности Венеры, полученные космическим аппаратом «Венера-16» 20 октября 1983 г. и 3 июля 1984 г., т. е. спустя 8 месяцев, когда Венера совершила оборот вокруг своей оси и под орбитой оказалась та же самая область⁴⁾, приведены на рис. 15. От начала снимка до -24° на верхнем фото (соответственно до -23° на нижнем) продолжается та же самая равнина, которой закончился рис. 14. Затем она прерывается молодой складчатой областью протяженностью около 500 км. Множество параллельных горных хребтов пересекают трассу под углом около 45° , затем меняют направление и тянутся 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 $-18,8^\circ$ ($-17,8^\circ$) находятся полуразрушенный кратер диаметром 15–20 км. Заметных изменений на поверхности Венеры за 8 месяцев, судя по этим снимкам, не наблюдается.

Расшифровать видимые на снимках образования помогает радиовысотометр-профилограф. На рис. 16 полоса съемки прошла через Землю Иштар. Профиль высот в этом районе приведен на рис. 17, в середине которого находится Плато Лакшми, приподнятое на 4–5 км над окружающей местностью. Из сравнения обоих рисунков (с учетом разницы масштабов) следует, что центральную часть Плато занимает однородная равнина, а края (из них правый носит название Уступа Весты) выглядят сильно пересеченными.

На рис. 18 изображен район Гор Максвелла с кратером Патера Клеопатра диаметром около 100 км. С радиолокационным изображением совмещен профиль высот, полученный тремя днями раньше вдоль трассы, которая показана белой линией. Максимальная высота горного массива для данного профиля составляет 11 км над средним радиусом Венеры, в качестве которого Международный астрономический союз принял значение 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.

⁴⁾ В середине июня 1984 г., когда Венера 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 некоторый угол. Вследствие этого та же самая область оказалась под орбитой на 2 недели позже полного оборота Венеры (243 сут.).

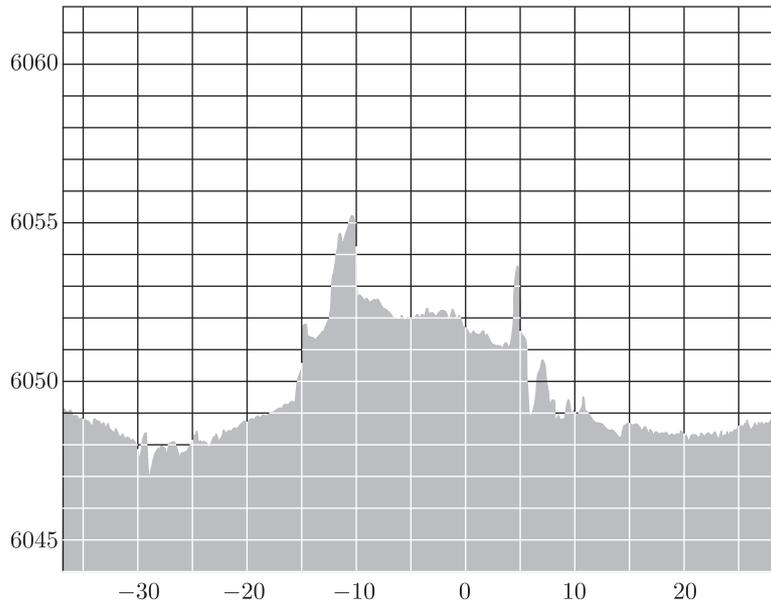


Рис. 17. Профиль высот поверхности Венеры в районе, изображенном на рис. 16, полученный космическим аппаратом «Венера-15» 22 декабря 1983 г.

Заметим, что значительное отклонение местного радиуса от величины 6051 км, принятой за радиус сферы, на которую наносится изображение, привело к заметным перспективным искажениям формы кратера и его смещению, которое было учтено при нанесении трассы радиовысомера-профилографа на изображение.

На поверхности Венеры обнаружены интересные явления, вызванные аномальным характером отражения радиоволн. На рис. 19 изображен сюжет с двумя кратерами ударного происхождения диаметром 15–20 км, у одного из которых дно выглядит необычно ярким. Здесь уровень отраженного сигнала возрастает примерно на 10 дБ по сравнению с окружающей местностью. Вероятно, это явление вызвано не только абсолютным увеличением отражательной способности дна кратера, но и меньшей величиной обратного рассеяния окружающей равнины по сравнению со средним значением его для поверхности Венеры в целом. При калибровке яркости по среднему значению в пятне размером 160 км на 160 км это будет наблюдаться, если окружающая поверхность имеет много большую гладкость, чем дно кратера.

Было замечено, что в одном из районов протяженностью 200–300 км средняя мощность отраженного сигнала на выходе приемника РЛС СА уменьшилась на 5–10 дБ. В то же время на выходе приемника РВП, электрическая ось антенны которого направлена по местной вер-

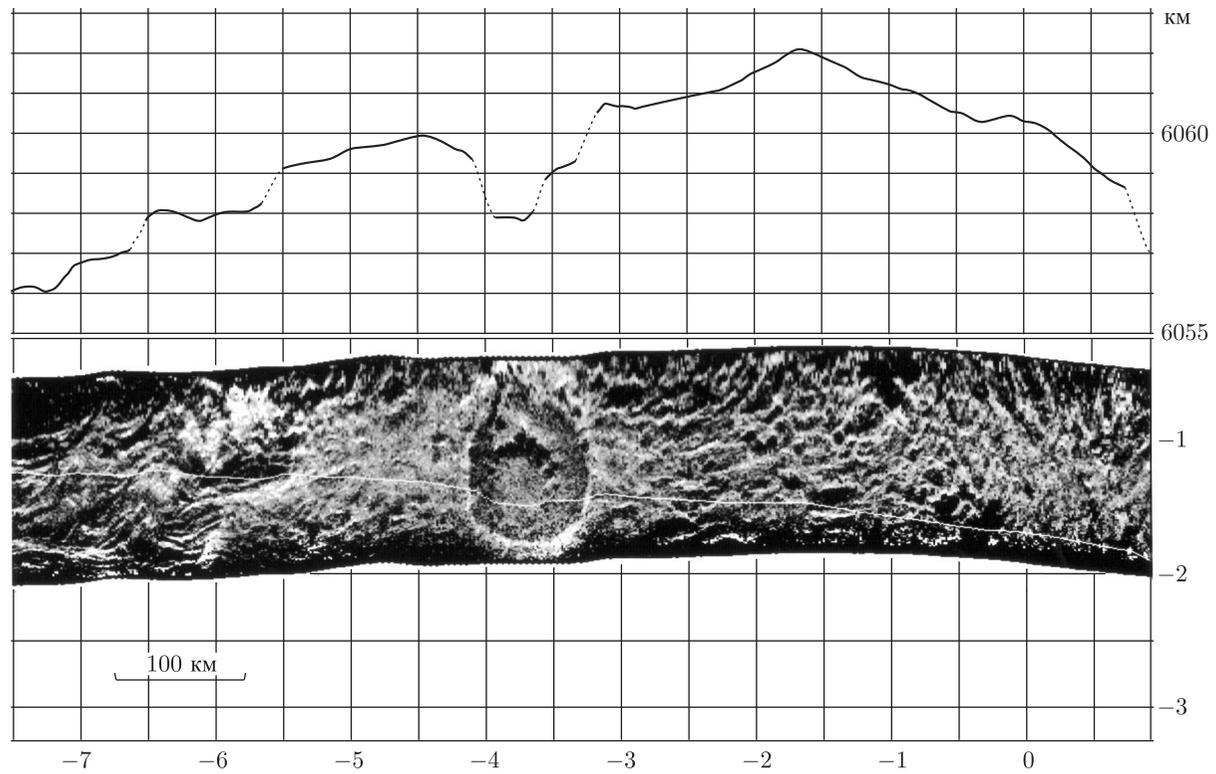


Рис. 18. Радиолокационное изображение района Гор Максвелла, полученное космическим аппаратом «Венера-16» 20 января 1984 г. Вверху приведен профиль поверхности по трассе полета космического аппарата 17 января 1984 г., отмеченной на снимке белой линией

тикали, средняя мощность отраженного сигнала не только не уменьшилась, а даже несколько возросла. Из этого можно заключить, что пониженное обратное рассеяние радиоволн при их наклонном падении вызвано большей гладкостью поверхности в этом районе.

Построение фотокарты области Гор Максвелла

На основе данных, полученных космическими аппаратами «Венера-15 и -16», создаются карты, которые позволят изучить процессы, протекающие на поверхности Венеры, и судить об истории развития планеты. На рис. 20 приведен фрагмент фотокарты Венеры для области Гор Максвелла, построенный по результатам радиолокационной съемки космического аппарата «Венера-16» ежедневно с 12 по 25 января 1984 г. Это наиболее детальная карта из всех существую-

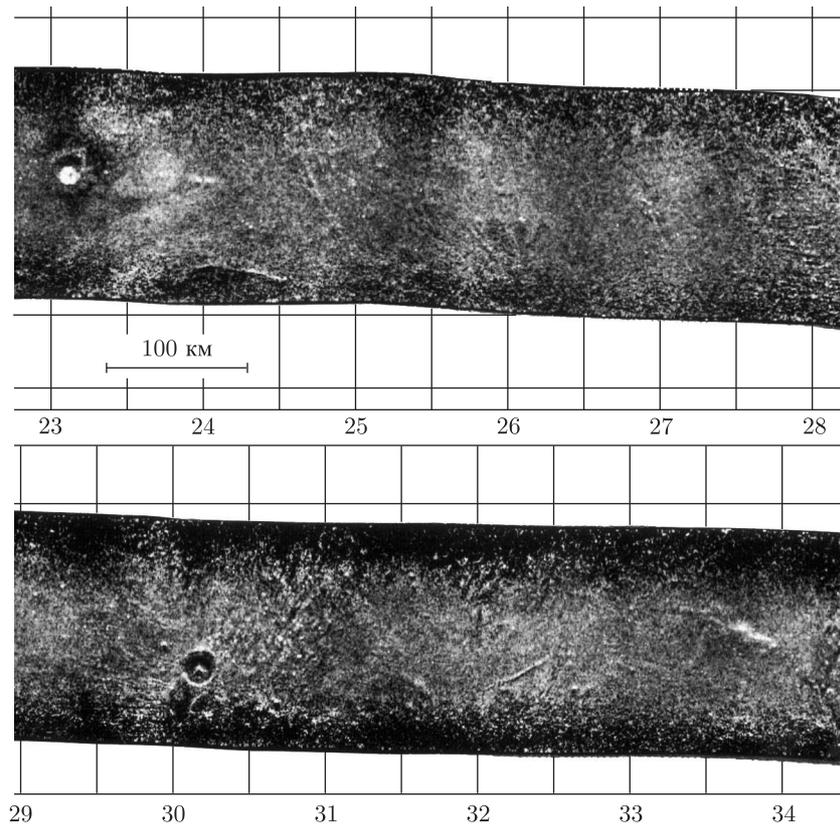


Рис. 19. Сюжет с двумя кратерами ударного происхождения, у одного из которых дно выглядит необычно радиоярким

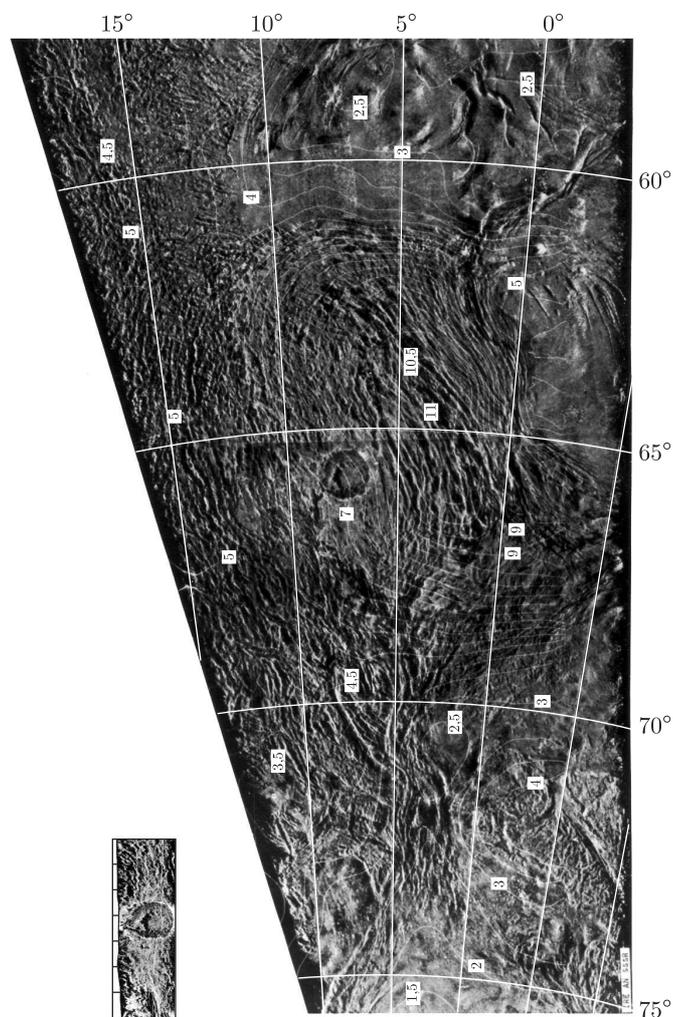


Рис. 20. Фотокарта Гор Максвелла, построенная по результатам радиолокационной съемки космического аппарата «Венера-16» с 12 по 25 января 1984 г. Проекция нормальная равноугольная, коническая Ламберта–Гаусса, стандартные параллели $58,3^\circ$ и $72,4^\circ$. Линии равных высот следуют с шагом 0,5 км относительно среднего радиуса планеты 6051 км. Радиоволны падают с востока

щих. При радиолокационной съемке Венеры космическим аппаратом «Пионер-Венера» [8] было установлено, что Горы Максвелла — самые высокие на Венере, однако из-за низкого пространственного разрешения достоверных заключений об их природе сделать было нельзя. Радиолокационные изображения для каждого дня съемки наносились

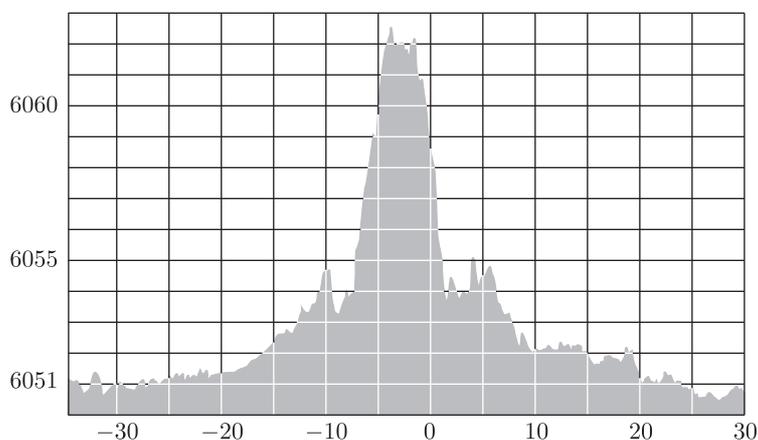


Рис. 21. Профиль высот поверхности Венеры в районе Гор Максвелла, где находится наивысшая точка поверхности Венеры, полученный космическим аппаратом «Венера-16» 14 января 1984 г.

на сферу радиуса 6051 км в венерографической системе координат⁵⁾, а затем проектировались на коническую поверхность, проведенную через две стандартные параллели. Проектирование велось цифровыми методами с шагом 0,8 км на плоскости фотоплана. Использовалась линейная интерполяция мощности отраженного сигнала по трем ближайшим точкам. В местах перекрытия соседних полос ее величина бралась с весом, убывающим линейно к краю изображения.

При построении фотокарты учитывалась высота местного рельефа и вносились поправки в координаты космического аппарата, уточненные по методике, учитывающей возмущения параметров орбиты при работе двигателей системы астроориентации. Сравнение с рис. 18 показывает, что учет высоты местного рельефа практически устраняет перспективные искажения, особенно заметные в районе кратера Патеры Клеопатра.

Линии равных высот на фотокарте следуют с шагом 0,5 км относительно среднего радиуса планеты (6051 км). Между трассами полета космического аппарата измерения интерполировались и усреднялись скользящим окном диаметром 200 км. Данным приписывался вес, линейно убывающий от 1 в центре окна до 0 на его краю. Эта методика сглаживает высотный рельеф, что заметно, например, в районе Патеры Клеопатра.

⁵⁾ В соответствии с рекомендацией Международного астрономического союза за прямое восхождение северного полюса Венеры принято $272,8^\circ$, склонение — $67,2^\circ$; период вращения — 243,01 сут. Венерографическая долгота определяется таким образом, что 20 июня 1964 г. на 0 ч. эфемеридного времени долгота центрального меридиана Венеры составила 320° .

Общая площадь представленной фотокарты составляет 2 млн. км². Ее центральную часть занимают Горы Максвелла с Патерой Клеопатра, профиль которых в центральной части приведен на рис. 18. С запада к ним вплотную примыкает Плато Лакшми. Оба кратера, входящие в систему Патера Клеопатра, имеют приблизительно круглую форму. Внутренний кратер диаметром 55 км смещен к северо-востоку относительно центра внешнего кратера диаметром 95 км, где их края почти совпадают (см. профиль на рис. 18).

С запада область Патеры Клеопатра 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. Примерно в середине овала в 200 км к западу от Патеры Клеопатра (долгота 3°, широта 66°) находится наивысшая точка — 11,5 км, зафиксированная радиовысотометром-профилографом космического аппарата «Венера-16» 14 января 1984 г. (рис. 21). Как показывают уровни высот, северная часть возвышенности продолжается на запад, где высоты еще превышают 9 км.

Наиболее резко высота убывает в юго-западном направлении, где средний уклон составляет 2,5°. С этой стороны Горы Максвелла сдавлены массивной плитой Плато Лакшми высотой около 5 км и параллельные складки идут чаще. Складки, окаймляющие Патеру Клеопатра, прослеживаются и с востока, но здесь они носят менее четкий характер.

Светлая область, непосредственно окружающая Патеру Клеопатра, выглядит более ровной. Возможно, складки рельефа здесь засыпаны выбросом при ударе метеорита, образовавшего кратер.

С юга Горы Максвелла четко ограничены равниной высотой около 3 км. С севера 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. Это южная часть обширной приполярной равнины «Снегурочка».

Заключение

Космические аппараты «Венера-15 и -16» за 8 месяцев произвели радиолокационную съемку всего северного полушария Венеры выше 30° общей площадью 115 млн. км², что составляет 25% всей поверхности планеты. Комплекс аппаратуры, созданный в ИРЭ АН СССР, позволил обеспечить непрерывную обработку поступающей информации и получение радиолокационных изображений и профилей высот поверхности Венеры. На этих изображениях видны горные хребты, кратеры, плоскогорья, складки и разломы венерианской коры. В некоторых районах обнаружен аномальный характер отражения радиоволн.

Полученный материал используется для создания карт снятой части поверхности Венеры. Эти карты позволяют изучить процессы, протекающие на поверхности Венеры, и судить об истории развития планеты.

Полет космических аппаратов «Венера-15 и -16» открыл новую эпоху в изучении природы планеты Венера.

Литература

1. Котельников В. А., Ржига О. Н., Александров Ю. Н. и др. // Проблемы современной радиотехники и электроники. М.: Наука, 1980. С. 32.
2. Ржига О. Н. // Земля и Вселенная. 1984. № 1. С. 2.
3. Ржига О. Н. // Физика Луны и планет. М.: Наука. 1972. С. 367.
4. Александров Ю. Н., Ржига О. Н., Шаховской А. М. // Космич. исслед. 1971. Т. 9. С. 904.
5. Кислик М. Д., Колюка Ю. Ф., Котельников В. А. и др. // ДАН СССР. 1980. № 3. Т. 255. С. 545.
6. Александров Ю. Н., Зятыцкий В. А., Ржига О. Н. // Астрон. журн. 1967. Т. 44. С. 1060.
7. Campbell D. B. The surface of Venus: Recent arecibo radar observations // Pap. present. XXV Plenary Meet. COSPAR. Graz, 1984. P. 15.
8. Masursky H., Eliason E., Ford P. G. et al. // J. Geophys. Res. 1980. Vol. 85, № 13. P. 8232.
9. Буренин Н. И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М.: Сов. радио, 1972.
10. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М.: Сов. радио, 1971.
11. Вакман Д. Е., Седлецкий Р. М. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио. 1973.
12. Александров Ю. Н., Захаров А. И., Крылов Г. А. и др. // Тез. докл. XIV Всесотоз. радиоастроном. конф. Ереван, 1982. С. 24.
13. Kotelnikov V. A., Bogomolov A. F., Rzhiga O. N. // Pap. present. XXV Plenary Meet COSPAR. Graz, 1984. P. 5. (Adv. Space Res.; Vol. 8, № 8).
14. Kotelnikov V. A., Alexandrov Y. N., Dubrovin V. M. et al. // Pap. present. XXVII intern. geol. Congr. Moscow, 1984. P. 38.