

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1988/3

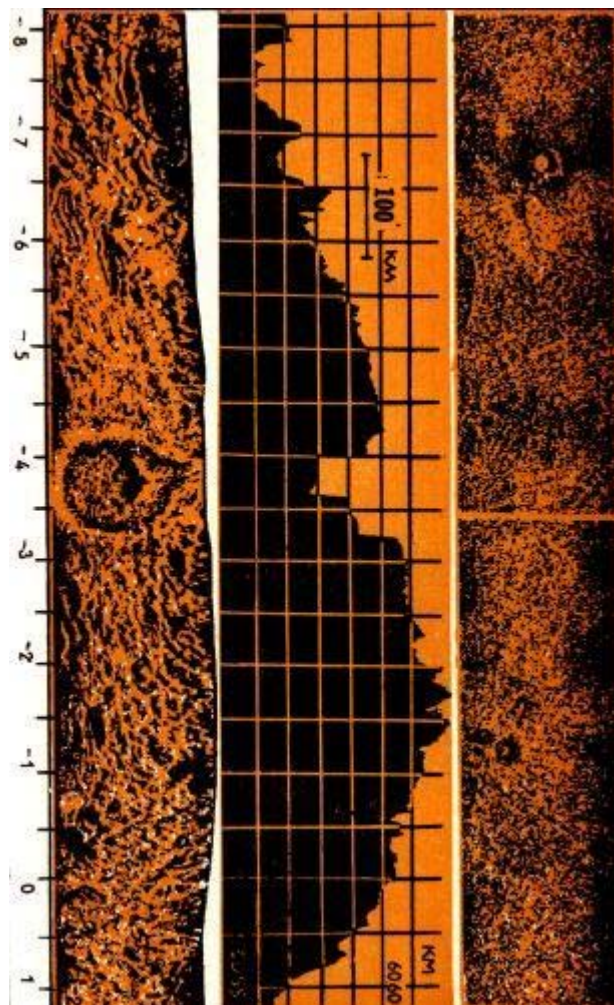
О.Н.Ржига

НОВАЯ ЭПОХА В ИССЛЕДОВАНИИ ВЕНЕРЫ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ



О. Н. Ржига,

**доктор физико-математических наук,
лауреат Ленинской и Государственной премий**

НОВАЯ ЭПОХА В ИССЛЕДОВАНИИ ВЕНЕРЫ

**(Радиолокационная съемка с помощью космических аппаратов «Венера-15» и
«Венера-16»)**

в приложении этого номера:

НОВОСТИ АСТРОНОМИИ



Издательство «Знание» Москва 1988

Ржига О. Н.

Р 48 Новая эпоха в исследовании Венеры (Радиолокационная съемка с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»). – М.: Знание, 1988. – 64 с, ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 3).

11 к.

В ноябре 1987 г. было закончено построение полной карты части территории Венеры на основании радиолокационного картографирования планеты с помощью советских космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16». В брошюре научным руководителем этого выдающегося космического эксперимента дана его методика и приведены некоторые результаты радиолокационного картографирования Венеры.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся проблемами астрономии и космонавтики.

1605050000

ББК 22.654.1

© Издательство «Знание», 1988 г.

Хроника исследований Венеры с помощью космических аппаратов

Роль радиометодов в исследованиях Венеры

Радиолокационные изображения Венеры, полученные с Земли

Топографическая карта Венеры, построенная по данным радиовысотомера орбитального аппарата «Пионер-Венера»

Научные идеи, положенные в основу эксперимента

Радиолокационная система космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»

Космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16»

Передача радиолокационной информации на Землю

Центр обработки радиолокационной информации

Обработка отраженных сигналов

Орбиты космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»

Некоторые результаты радиолокационной съемки

Создание фотокарт и топографических карт Венеры

Строение Земли Иштар

Поверхность Венеры - зеркало геологической истории планеты

Планета загадок

Немного истории

Заключение

Рекомендуемая литература

ХРОНИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕНЕРЫ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.

Новый этап в исследовании Венеры начался с запуском советских станций «Венера-15» и «Венера-16»... Фактически в истории космических исследований только единичные эксперименты приводили к столь резкому количественному увеличению и качественному улучшению фундаментальных знаний о происхождении и эволюции планет Солнечной системы.

академик Р. З. САГДЕЕВ

Из многих вопросов, заданных автору при подготовке и проведении космического эксперимента по радиолокационному картографированию планеты Венера, запомнились два. «Зачем надо было лететь к Венере?» — спросил автора этой брошюры в самом начале 1985 г. известный советский астрофизик И. С. Шкловский. С ним тесно переплетается вопрос одного из астрономов, который, случайно увидев первое изображение венерианской поверхности и приняв его за оптическую фотографию, воскликнул: «Как Вам удалось сфотографировать Венеру через ее облака?»

Эта брошюра, описывающая задачи, стоявшие перед космическими аппаратами «Венера-15» и «Венера-16», и результаты радиолокационного картографирования планеты Венера, по существу, и является ответом на эти вопросы. «Человека всегда влекло то неизвестное, что лежит за горизонтом. Для Венеры таким «горизонтом» были ее облака», — ответил тогда автор И.С. Шкловскому.

На протяжении двух последних десятилетий планета Венера является объектом интенсивных исследований с помощью научных приборов, установленных на борту космических аппаратов. В 1967 г. спускаемый аппарат советской межпланетной станции «Венера-4» впервые вошел в атмосферу планеты и произвел измерения ее химического состава и распределения температуры и давления в зависимости от высоты. В результате этого выдающегося эксперимента было установлено, что атмосфера Венеры почти целиком состоит из углекислого газа, в то время как до полета это считалось маловероятным. Было обнаружено, что у Венеры отсутствуют радиационные пояса, подобные тем, которые существуют у Земли.

В 1970 г. спускаемый аппарат советской межпланетной станции «Венера-7» прошел всю толщу атмосферы) планеты и в течение 20 мин. передавал на Землю данные непосредственно с поверхности Венеры. Было установлено, что на поверхности Венеры температура составляет 460° С, а давление — 90 атм. Радиоастрономические и радиолокационные наблюдения планеты с Земли указывали на возможность таких необычных по земным представлениям условий на поверхности Венеры, но только прямые измерения позволили окончательно решить этот вопрос.

Советская межпланетная станция «Венера-8» произвела в 1972 г. измерения солнечной освещенности при спуске в атмосфере Венеры. При этом было обнаружено, что облачный слой на Венере оканчивается на высоте 35 км над поверхностью, а ниже находится чистая атмосфера. Освещенность на поверхности Венеры примерно такая же, как в пасмурный день на Земле, и достаточна для осуществления телевизионной съемки.

Новые спускаемые аппараты, разработанные советскими конструкторами, были рассчитаны на осуществление телесъемки и проведение научных исследований

наповерхности Венеры в течение около 0,5 ч. В действительности каждый из аппаратов работал на поверхности Венеры около 1 ч. А ведь надо помнить, что температура на поверхности Венеры как в жарко натопленной печи, а давление — как на глубине 900 м в океане.

В 1975 г. весь мир облетели первые панорамы венерианской поверхности, переданные спускаемыми аппаратами межпланетных станций «Венера-9» и «Венера-10». И хотя точки их посадок отстоят друг от друга не очень далеко в масштабе планеты, вид панорам совершенно различен. Одновременно к Венере были выведены первые искусственные спутники планеты, с помощью которых ретранслировалась информация, передававшаяся со спускаемых аппаратов.

В 1982 г. советские межпланетные станции «Венера-13» и «Венера-14» передали цветные панорамы венерианской поверхности. Преобладающими тонами оказались зелено-коричневые, так как синие и голубые лучи поглощаются необычайно плотной атмосферой Венеры. На этих станциях был проведен поистине уникальный эксперимент: забор грунта с поверхности Венеры и анализ его химического состава. В результате было установлено, что Венера покрыта разновидностями базальтов.

Мы узнали также, что на Венере существуют грозы, и они во много раз мощнее, чем на Земле; что ураганные ветры, постоянно дующие со скоростью 100 м/с на высоте верхней границы облачного слоя, сменяются у поверхности легким дуновением (около 1 м/с). Это далеко не исчерпывающий перечень достижений советской космической науки и техники в исследованиях Венеры.

Определенный вклад в наши знания о Венере внесли и полеты американских космических аппаратов. В 1962 г. американская межпланетная станция «Маринер-2», пролетев на расстоянии 35000 км. от поверхности Венеры, не обнаружила у планеты собственного магнитного поля. В 1974 г. межпланетная станция «Маринер-10», пролетев около Венеры на пути к Меркурию, подтвердила вращение надоблачной части венерианской атмосферы с периодом 4 сут., обнаруженное ранее с Земли при наблюдении в ультрафиолетовых лучах. В 1978 г. одна из двух американских межпланетных станций «Пионер-Венера» доставила к Венере четыре спускаемых аппарата, которые произвели измерения химического состава и физических параметров в диаметрально противоположных областях венерианской атмосферы. При этом был установлен в высшей степени поразительный факт: верхний слой венерианских облаков состоит из мельчайших капелек концентрированной серной кислоты. Благодаря этому слою в верхней атмосфере Венеры почти не содержится водяного пара.

К моменту выхода автоматических межпланетных станций «Венера-15» и «Венера-16» в 1983 г. на орбиты спутника Венеры полеты советских и американских космических аппаратов позволили нарисовать детальную картину физических условий, существующих на поверхности, в атмосфере и околопланетном пространстве Венеры. Советские спускаемые аппараты передали подробные панорамы окружающей местности и провели физико-химические исследования видимого на панорамах грунта, изучался химический состав ничтожных примесей атмосферы... И в то же время мы не располагали ее обычной топографической картой, хотя такие карты были созданы для Луны, Марса и даже Меркурия.

Парадоксальное на первый взгляд положение объясняется оптической непрозрачностью атмосферы Венеры, препятствующей прямому фотографированию поверхности с орбиты ее искусственного спутника. В видимых лучах мы наблюдаем только верхнюю границу облачного слоя Венеры, лежащую на высоте 65—70 км над поверхностью. До сих пор еще никто ни с Земли, ни из космоса не наблюдал разрывов в венерианских облаках, через которые можно было бы разглядеть ее поверхность. Но для радиоволн определенной длины атмосфера оказалась прозрачной, что позволило получить с помощью радиолокационной и радиоастрономической техники первые сведения о поверхности Венеры.

РОЛЬ РАДИОМЕТОДОВ В ИССЛЕДОВАНИЯХ 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, лежащую на высоте 65—70 км, радиоволны проникают через атмосферу Венеры и отражаются твердой поверхностью. Это было доказано уже в первых радиолокационных наблюдениях, начатых в 1961 г. по инициативе академика В.А. Котельникова — директора Института радиотехники и электроники АН СССР. В Советском Союзе для этих наблюдений использовалась передающая антенна Центра дальней космической связи, предназначенная для управления космическими аппаратами.

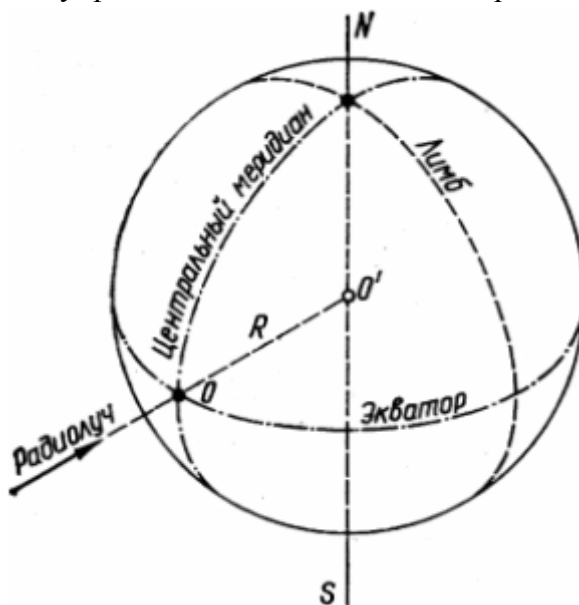


Рис. 1. Радиолуч, посланный с Земли, освещает поверхность планеты, начиная от центра видимого диска O до его краев (лимба).

Уже в первых наблюдениях было обнаружено, что в центре видимого с Земли диска планеты (рис. 1), где радиоволны падают перпендикулярно поверхности, существует блик (яркое пятно), как у зеркального шара. Коэффициент отражения поверхности, определенный по величине мощности отраженных сигналов, оказался в среднем 0,15. Среди земных пород такое значение коэффициента отражения имеют скальные породы на силикатной основе в сухом состоянии. Проведенные тогда же эксперименты с изменением поляризации приемной антенны подтвердили, что отражение радиоволн обусловлено твердой поверхностью Венеры.

Несколько позже, в середине 60-х годов, при анализе спектра сигнала, отраженного Венерой, было обнаружено, что планета рассеивает радиоволны не как однородная сферическая поверхность. Обширные области планеты отражают радиоволны к источнику излучения более интенсивно, чем окружающая местность, и выглядят «радиояркими» на ее фоне. В спектре отраженного сигнала эти области проявлялись как характерные детали, которые регулярно меняют свое положение с вращением планеты (рис.2).

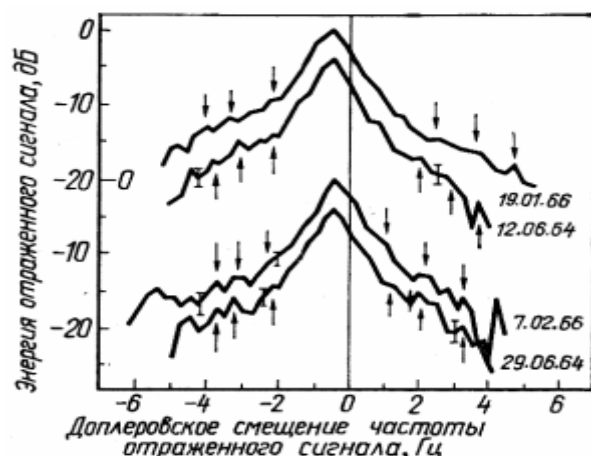


Рис. 2. Доплеровские спектры, полученные на длине волны 39 см вблизи нижних соединений Венеры (соответственно 19 июня 1964 г. и 26 января 1966 г.). Центральный максимум соответствует сигналам, отраженным центром диска планеты. Стрелками отмечены детали, обусловленные областями поверхности с повышенной отражательной способностью. Спектры, отстоящие го времени на равное число суток относительно моментов нижнего соединения, совмещены между собой, чтобы показать повторяемость их деталей.

При отражении от поверхности вращающейся планеты одинаковое доплеровское смещение имеют сигналы, отраженные точками окружности 1, плоскость которой параллельна радиолучу и оси вращения планеты (рис. 3).

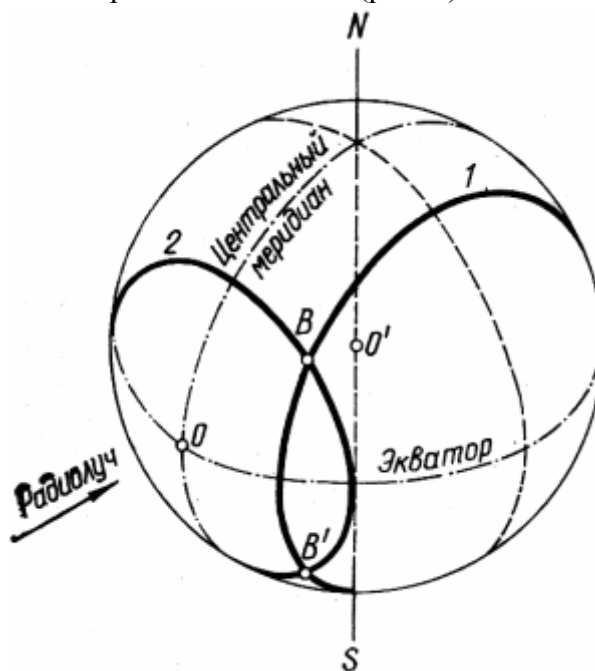


Рис. 3. Линии равных доплеровских смещений (1) и равного запаздывания радиолокационного сигнала (2) на поверхности планеты. Одновременный анализ отраженных сигналов по запаздыванию и доплеровскому смещению позволяет выделить сигналы, отраженные точками В и В'.

Отраженные сигналы, соответствующие точкам каждой такой окружности, собираются в одном месте на оси частот. Поэтому интенсивность обратного отражения для этих областей должна быть в 10 раз выше по сравнению с окружающей местностью, чтобы соответствующие им спектральные детали уверенно выделялись на общем фоне.

Положение центров областей с повышенной отражательной способностью на диске Венеры, как они были определены в то время по измерениям, выполненным в Советском Союзе, показано на рис. 4.

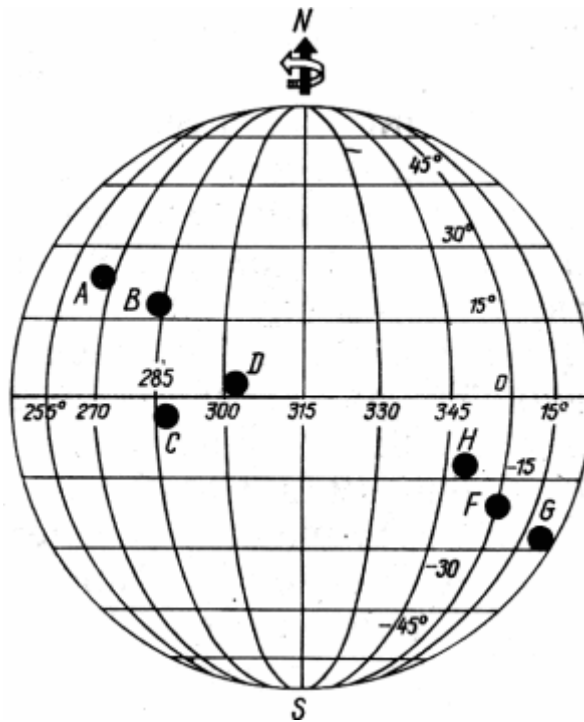


Рис. 4. Расположение центров областей с повышенной отражательной способностью в проекции на диск Венеры.

По перемещению деталей в спектре отраженного сигнала удалось с большой точностью установить период вращения Венеры и ориентацию оси ее вращения. Международным астрономическим союзом период вращения Венеры принят равным 243,01 сут, координаты северного полюса: прямое восхождение $272,8^\circ$, склонение $67,2^\circ$. В отличие от других планет направление вращения Венеры противоположно ее движению вокруг Солнца. Ось вращения Венеры почти перпендикулярна плоскости ее орбиты, и смена сезонов должна отсутствовать. Результаты измерения периода вращения близки к величине 243,16 сут, при которой Венера в каждом нижнем соединении должна быть обращена к Земле одной и той же стороной, т. е. находиться в синодическом резонансе. И действительно, как следует из рис. 2, на котором совмещены две пары спектров, отстоящие на равное число суток относительно моментов нижних соединений в 1964 и 1966 гг., положение деталей в таких парах спектров практически совпадает. Не исключено, что синхронизация вращения Венеры вызвана действием приливных сил со стороны Земли. Впрочем, последние данные указывают, что период вращения Венеры, вероятно, несколько меньше 243,16 сут и резонанс еще не наступил. Если вращение Венеры и отличается от синодического резонанса, то это отличие очень мало; период меньше резонансного всего на 2—4 ч. Потребуется 500—700 лет, чтобы Венера в нижнем соединении оказалась бы обращенной к Земле обратным полушарием. При радиолокации непосредственно измеряется расстояние до ближайшей к антенне точки поверхности планеты О (центра диска; см. рис. 1), в то время как положение центра масс планеты О' определяется теорией движения планет, уточняемой в процессе измерений. Таким образом, возможно определить радиус планеты в этой точке. Вращение планеты позволяет исследовать рельеф поверхности вдоль экватора. На рис. 5 изображен профиль высот экваториальной области Венеры, полученный этим методом по наблюдениям 1980 г. Он соответствует обширной горной области, получившей наименование «Земля Афродиты». Один из горных массивов, входящих в эту область, имеет высоту около 4 км (долгота 90°), второй — 3 км (долгота 195°).

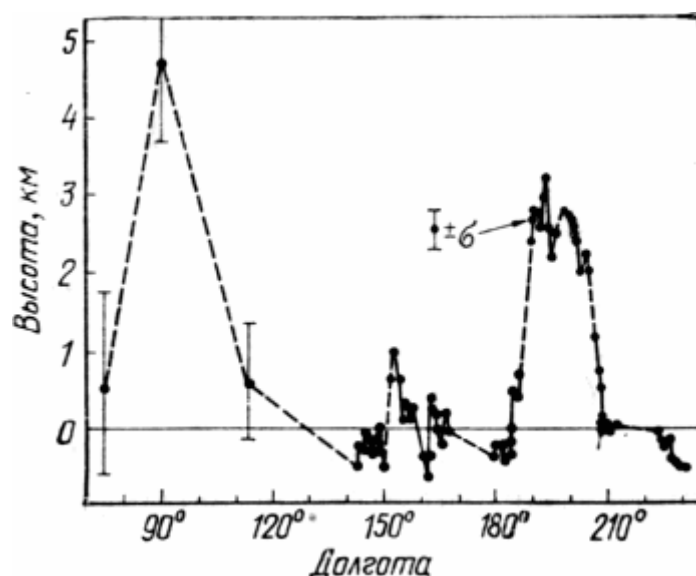


Рис. 5. Профиль высот поверхности Венеры, полученный по наблюдениям 1980 г. в СССР.

Радиолокация позволила установить границу, после которой начинает проявляться поглощение в атмосфере Венеры и та становится непрозрачной для электромагнитного излучения. В первых наблюдениях, осуществленных в дециметровом и метровом диапазоне длин волн, величина отражательной способности Венеры получилась примерно одинаковой — 0,15, если за единицу взять отражательную способность гладкого металлического шара равного диаметра. Поэтому неожиданным оказалось резкое уменьшение отражательной способности, обнаруженное в середине 60-х годов американскими исследователями в Хайстеке при радиолокации Венеры в сантиметровом диапазоне (рис. 6).

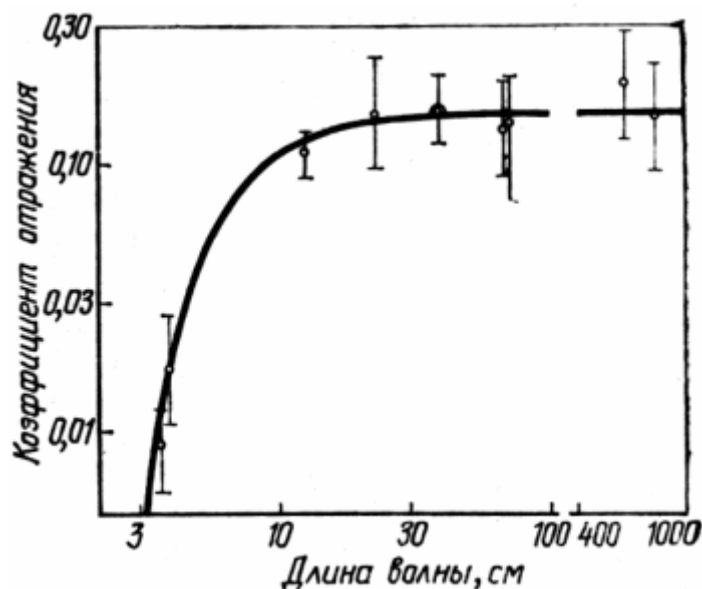


Рис. 6. Зависимость отражательной способности Венеры от длины волны (точки — экспериментальные данные). Резкое уменьшение отражательной способности в сантиметровом диапазоне вызвано поглощением электромагнитного излучения в атмосфере Венеры.

Указанное явление могло быть связано с поглощением радиоволн в атмосфере Венеры, но проверить это предположение удалось лишь после анализа химического состава атмосферы Венеры, полученного с помощью приборов спускаемых аппаратов советских межпланетных станций «Венера». Так было установлено, что уменьшение отражательной способности Венеры вызвано нерезонансным поглощением электромагнитного излучения

в углекислом газе, из которого почти целиком состоит ее атмосфера, и парах воды, возникающем в условиях высокого давления (до 90 атм. у поверхности Венеры). Первые данные о возможности существования необычайно высоких по земным представлениям температур на поверхности Венеры были получены в результате радиоастрономических измерений собственного радиоизлучения Венеры, начатых в США и СССР во второй половине 50-х годов. На рис. 7 приведен спектр радиояркостной температуры видимого диска Венеры, измеренный на многих длинах волн в диапазоне от 1 мм до 70 см. Такую температуру должна была бы иметь Венера, если бы она была абсолютно черным телом, чтобы создать наблюдаемый поток радиоизлучения.

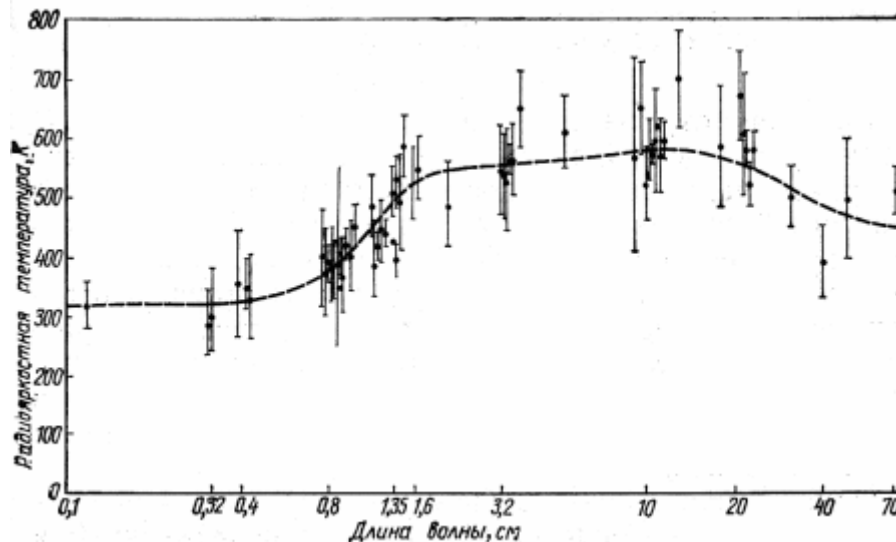


Рис. 7. Спектр радиояркостной температуры видимого диска Венеры (А.Д. Кузьмин, 1967 г.). Точки - экспериментальные данные.

Абсолютно черное тело ничего не отражает, а его излучательная способность равна единице. В действительности, как показали радиолокационные измерения, отражательная способность твердой поверхности Венеры 0,15. Следовательно, ее излучательная способность должна быть меньше на эту величину, т. е. 0,85. Яркостная температура Венеры на волнах длиннее 3 см составляет около 600 К (Уменьшение измеренных температур к длинноволновому концу спектра на рис. 7, как оказалось впоследствии, связано с ошибкой в калибровке аппаратуры). Разделив эту величину на излучательную способность поверхности, получим 705 К, что лишь немного меньше температуры 735 К, непосредственно измеренной впоследствии с помощью спускаемых аппаратов советских межпланетных станций «Венера» на поверхности планеты.

Уменьшение радиояркостной температуры в сторону более коротких длин волн вызвано поглощением электромагнитного излучения поверхности в атмосфере Венеры. В инфракрасном диапазоне яркостная температура Венеры равна 235 К и относится к верхней границе ее облачного слоя.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВЕНЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ЗЕМЛИ.

Разделяя отраженные сигналы не только по доплеровскому смещению, но и по их запаздыванию, можно построить радиолокационное изображение поверхности планеты. Точки окружности 2, плоскость которой перпендикулярна радиолучу (см. рис. 3), находятся на одинаковом расстоянии от антенны радиолокатора, и отраженные ими сигналы приходят одновременно. Зная расстояние до некоторой точки В и ее радиальную составляющую скорости, можно рассчитать запаздывание и доплеровское смещение и выделить сигналы, отраженные этой точкой.

Однако, как видно из рисунка, окружности равных запаздываний и доплеровских смещений пересекаются не только в точке В, но и в точке В', расположенной симметрично относительно плоскости экватора. Чтобы принять отраженные этими точками сигналы раздельно и получить неналоженное изображение, применяют радиоинтерферометр. Зная точно разность расстояний от точки В' до каждой из двух антенн, образующих интерферометр, можно изменить фазу сигналов, принятых одной из антенн, так, чтобы отражения точки В' взаимно вычлись после суммирования сигналов. Отражения точки В, занимающей другое пространственное положение, при этом сложатся. Переходя от точки к точке и измеряя мощность отраженных сигналов, можно построить радиолокационное изображение поверхности планеты.

Большое расстояние между Венерой и Землей требует применения самых крупных антенн и мощных передатчиков. Наиболее детальные радиолокационные изображения поверхности Венеры были получены этим методом в 1975—1977 гг. в

радиоастрономической обсерватории в Аресибо (Пуэрто-Рико). При использовании антенны с неподвижным зеркалом сферической формы диаметром 300 м и передатчика мощностью 450 кВт на длине волны 13 см было достигнуто пространственное разрешение 10—20 км. На полученных изображениях в северном полушарии Венеры видны гигантское Плато Лакшми, массив Гор Максвелла, область Бета. В южном полушарии лежит Область Альфа, от которой ведется отсчет меридианов на Венере.

Эти изображения относятся к тому полушарию, которым Венера обращена к Земле каждый раз в период нижнего соединения. Противоположным полушарием планета поворачивается к Земле спустя 3 месяца, когда расстояние между нею и Землей возрастает в 3 раза и мощность отраженных сигналов уменьшается почти в 100 раз. Полярные области Венеры вообще недоступны для наблюдений с Земли, поскольку ее ось вращения почти перпендикулярна плоскости земной орбиты.

ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ КАРТА ВЕНЕРЫ, ПОСТРОЕННАЯ ПО ДАННЫМ РАДИОВЫСОТОМЕРА ОРБИТАЛЬНОГО АППАРАТА «ПИОНЕР-ВЕНЕРА».

В конце 1978 г. на орбиту спутника Венеры был выведен американский космический аппарат «Пионер-Венера», на борту которого среди другой научной аппаратуры был установлен небольшой радиовысотомер, работавший на длине волны 17 см. По измерениям этого прибора в 1980 г. была построена топографическая карта Венеры (рис. 8). Карта охватывает ее поверхность между 65° южной широты и 75° северной широты. На ней Земля Иштар с Горами Максвелла, Области Альфа и Бета, Земля Афродиты, расположенная у экватора на том полушарии Венеры, которое не видно с Земли в период сближения.

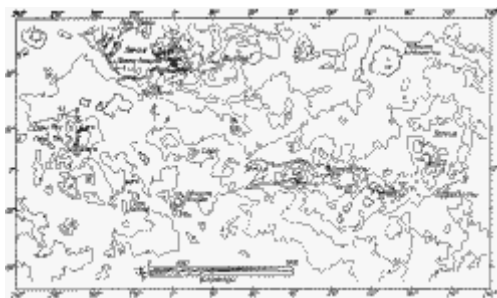


Рис. 8.

Топографическая карта Венеры, построенная по данным радио-высотомера орбитального аппарата «Пионер-Венера» (Г.Мазурский и др., 1980г.). Горизонтالي следуют с шагом 1 км относительно уровня средней сферы радиуса 6051 км.

Космический аппарат вращался вокруг своей оси, делая один оборот за 12 с. Антенна высотомера также вращалась в пространстве, и измерения высоты проводились один раз за 12 с, когда она оказывалась направленной к поверхности планеты. За это время аппарат, имевший скорость около 10 км/с, пролетал 120 км. С такой частотой шли измерения по трассе при каждом прохождении аппарата у поверхности планеты. Обращаясь вокруг планеты с периодом в 24 ч, аппарат проходил у ее поверхности каждые сутки. За это время планета поворачивалась на некоторый угол, и новая трасса измерений на поверхности планеты смещалась относительно предыдущей. У экватора трассы измерений шли через 150—160 км, сближаясь к полюсам.

Невысокая частота измерений определила и детальность приведенной карты: на ней хорошо видны детали континентального масштаба. Более мелкие детали - горные хребты, кратеры, рифтовые долины - оказались неразличимы, как неразличимы эти детали и на Луне при наблюдении с Земли невооруженным глазом.

По современным представлениям земная кора не является сплошной, а состоит из гигантских тектонических плит, окаймляющих земной шар. Континенты являются верхней частью этих плит, которые находятся в постоянном движении. Там, где плиты расходятся, расплавленная магма поднимается к поверхности, а там, где сталкиваются, — вздымаются горные хребты. Границы плит на Земном шаре очерчены зонами интенсивной геологической активности, сопровождающейся сильнейшей вулканической деятельностью. При разделении тектонических плит образуются разломы — рифтовые долины, при столкновении — горные цепи и океанические желоба.

Американские ученые проделали такой несложный эксперимент. Они построили гипсометрическую карту (карту высот) земного шара с той детальностью, которая была получена при измерении высотного рельефа Венеры. Океаны и моря на земном шаре предварительно были «осушены». Из-за недостаточной детальности этой карты на ней исчезли горные цепи и вулканы, окаймляющие тектонические плиты, рифтовые долины и океанические желоба, являющиеся следствием их перемещения. Между тем именно эти детали поверхности в совокупности могли бы дать ответ на многие вопросы. В частности: «В настоящее время Венера геологически активна, подобно Земле, или так же безжизненна, как Луна или 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».

НАУЧНЫЕ ИДЕИ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ ЭКСПЕРИМЕНТА.

Космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» оборудованы радиолокационными системами, состоящими из радиолокационной станции бокового обзора для получения изображений поверхности планеты и радиовысотомера для измерения ее высотного рельефа и локальных характеристик отражения. Установка радиолокатора на искусственном спутнике, движущемся около поверхности планеты, позволяла обеспечить высокий уровень отраженных сигналов, необходимый для получения изображений высокого качества. Создавались одинаковые условия наблюдения разных районов независимо от расположения на глобусе Венеры. Идея эксперимента и его научно-методические основы разработаны в Институте радиотехники и электроники АН СССР. Они подготовлены предшествующими радиолокационными наблюдениями Венеры с Земли.

Принцип получения радиолокационных изображений. В основе радиолокационного метода получения изображений лежит то, что отдельные элементы поверхности планеты, образующие горные хребты, долины, склоны кратеров, не одинаково отражают падающие

на них радиоволны вследствие различной ориентации этих элементов по отношению к антенне радиолокатора, а так-же из-за отличия в электрических свойствах слагающих их пород. Измерив интенсивность радиоволн, отраженных отдельными элементами поверхности планеты, и представив ее, скажем, соответствующими потемнениями фотобумаги, можно получить изображение, подобное фотографическому.

Пространственная разрешающая способность. Детальность полученного изображения и, следовательно, круг задач, которые могут быть решены по результатам радиолокационной съемки, определяются пространственной разрешающей способностью радиолокационной системы. Первые советские космические аппараты серии «Зонд» фотографировали Луну с разрешением 3 км. Телевизионная съемка всей поверхности Марса, которая расценивалась как основной результат полета американского космического аппарата «Маринер-9», была выполнена широкоугольной камерой с разрешением 1 км. Фактическое разрешение зависело от расстояния и угла наблюдения (зенитного расстояния космического аппарата) в момент фотографирования. По этой причине разрешение поверхности Марса при съемке менялось от 1 до 3 км. Для картографирования поверхности Венеры с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» технически оказалось возможным создать радиолокационную станцию с синтезированной апертурой с фактическим разрешением 1—2 км.

Для раздельного восприятия элементов поверхности Венеры размером 1 - 2 км с высоты 1000 - 2000 км, на что рассчитана радиолокационная аппаратура станций «Венера-15» и «Венера-16», пространственное разрешение должно быть примерно таким, какое дал бы невооруженный глаз при наблюдении поверхности Венеры с той же высоты, если бы над ней не было плотного облачного слоя. Обычные радиоантенны не могут обеспечить ту пространственную разрешающую способность, какую дают оптические приборы, вследствие много большей длины волны. Поэтому для получения необходимого пространственного разрешения применен метод радиолокации с «синтезом искусственного раскрыва антенны» (с «синтезом апертуры»), который для исследования Венеры с космического аппарата использовался впервые.



Рис. 9. Принцип синтеза апертуры

Метод синтезированной апертуры. Он основан на том, что расположенная на космическом аппарате антенна перемещается в пространстве, последовательно занимая позиции 1, 2, ... N (рис. 9). Обработывая отраженные сигналы одновременно, синтезируют антенну в N раз длиннее той, что была на космическом аппарате. Соответственно возрастает пространственное разрешение по направлению трассы космического аппарата (Δx на рис. 9). Разрешение, достигнутое обработкой сигналов радиолокационной станции космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», можно было

получить при длине антенны 70 м, в то время как ее длина составляла всего 6 м. В направлении, перпендикулярном трассе, разрешение (Δy на рис. 9) достигалось, как обычно, за счет модуляции зондирующего сигнала, позволяющей разделять отраженные сигналы по времени их прихода к антенне.

Принципы радиолокационной съемки. Во время радиолокационной съемки антенна радиовысотомера направлена вдоль местной вертикали к центру планеты. Антенна радиолокационной станции с синтезированной апертурой отклонена от местной вертикали в сторону от плоскости орбиты (рис. 10). 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 космическом аппарате сигналы не одинаково запаздывают и имеют разную частоту вследствие эффекта Доплера.

Например, точка А находится ближе к космическому аппарату, чем точка В, и отраженные ею сигналы приходят раньше. С другой стороны, точка С приближается к аппарату и отраженные ею сигналы имеют более высокую частоту, чем сигналы, отраженные точкой О, которая удаляется. Различие в запаздывании отраженных сигналов и их доплеровском смещении и было использовано для построения «кадра» радиолокационного изображения. Отдельные кадры, получаемые по мере движения космического аппарата, объединяются в сплошную полосу изображения (см. рис. 10).

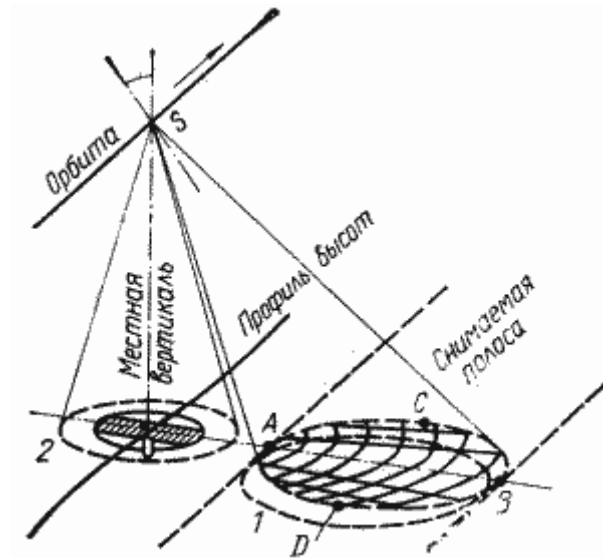


Рис. 10. Схема радиолокационной съемки с космического аппарата: 1, 2 — участки поверхности планеты, попадающие в диаграмму направленности антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой и радиовысотомера (штриховкой показан участок поверхности планеты, относительно которого измеряется высота космического аппарата при разделении отраженных сигналов радиовысотомера не только по запаздыванию, но и по частоте).

Так же, как и при радиолокации с Земли (см. рис. 3), на поверхности планеты можно выделить линии равного запаздывания и доплеровского смещения. Линии равного запаздывания 1 являются концентрическими окружностями с центром в точке О под космическим аппаратом, линии равного доплеровского смещения 2 — гиперболы (рис. 11). Точки В и В', расположенные симметрично относительно трассы, находятся на одинаковом расстоянии от антенны и имеют равные радиальные составляющие скорости. Отраженные ими сигналы разделяют, направив антенну в сторону от трассы. Отсюда происходит другое название метода - «боковой обзор».

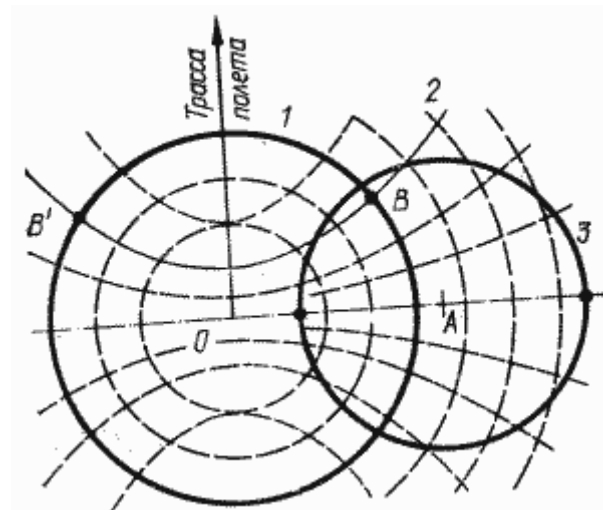


Рис. 11. Линии равных запаздываний (1) и доплеровских смещений (2) на поверхности планеты. Для разделения сигналов, отраженных точками В и В', расположенными симметрично относительно трассы, диаграмму направленности антенны (3) направляют в сторону от трассы.

По одному радиолокационному изображению так же, как и по одиночному фотографическому снимку, трудно судить о высоте видимых образований.. Для измерения высотного рельефа поверхности планеты служит радиовысотомер. Непосредственно измеряется высота космического аппарата S0 относительно среднего уровня поверхности в освещаемом пятне 2 под аппаратом (см.рис. 10). Величина местного радиуса планеты, зависящая от рельефа в данной точке, вычисляется как разность расстояния аппарата от центра планеты и измеренной высоты.

В отличие от орбитального аппарата «Пионер-Венера» измерения высоты шли через 2,5 км, и профиль высотного рельефа по трассам получался непрерывным. Разрешающая способность радиовысотомера космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» была также выше и составляла 230 м. против 600 - 900 м. у аппарата «Пионер-Венера».

Измерение локальных характеристик отражения. Мощность отраженных сигналов зависит от электрических свойств материала поверхности и степени ее неровности.

Электрические свойства материала характеризуются коэффициентом отражения радиоволн при нормальном падении, степень неровности поверхности - среднеквадратичным значением углов наклона. Эти параметры можно разделить, сравнивая между собой мощности отраженных сигналов в антенне радиовысотомера, направленной по вертикали к поверхности, и в антенне радиолокационной станции с синтезированной апертурой, направленной под углом 10° к вертикали.

Трасса измерения мощности отраженных сигналов радиолокационной станции с синтезированной апертурой отстоит от трассы полета, вдоль которой расположены измерения мощности отраженных сигналов радиовысотомера, на 180—360 км в зависимости от высоты (см. рис. 10). Прямое сопоставление измерений, относящихся к разным областям, может приводить к ошибке, связанной с различием характеристик отражения. Чтобы сопоставлять измерения, относящиеся к одной и той же области, берутся данные, полученные в разных проходах космического аппарата, для которых трассы измерений радиолокационной станции с синтезированной апертурой и радиовысотомера совпадают.

Выбор длины волны. При выборе длины волны радиолокационной системы руководствовались тем, что при заданном размере антенны (в том числе и синтезированной) с укорочением длины волны ширина луча уменьшается и, следовательно, растет разрешение. С другой стороны, на длинах волн короче 10 см резко падает мощность отраженных сигналов вследствие поглощения электромагнитного излучения в атмосфере Венеры, через которую проходят радиоволны, зондирующие поверхность. Как было показано выше, это проявляется в уменьшении отражательной способности планеты (см. рис. 6). Вычисленное отсюда ослабление радиолокационного сигнала в атмосфере Венеры приведено в таблице.

Ослабление радиолокационного сигнала в атмосфере Венеры (при вертикальном прохождении)						
Длина волны,	см	4	5	8	10	15
Ослабление	ДБ	8,8	5,6	2,2	1,4	0,6
	разы	7,6	3,6	1,7	1,4	1,15

На длине волны 8 см, которая была выбрана для радиолокационной системы космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», поглощение при вертикальном прохождении атмосферы составляет 2,2 дБ (ослабление в 1,7 раза), что было учтено при расчете энергетического потенциала системы. Выбор волны для исследования Венеры очень критичен. Если бы волна была в 2 раза короче, то атмосфера ослабила бы отраженный

сигнал почти в 8 раз (см. таблицу). Его мощности тогда бы не хватило для получения изображений хорошего качества.

Качество радиолокационного изображения. Качество радиолокационного изображения определяется его контрастностью и величиной шумов, присущих этому методу.

Контрастность же зависит от того, насколько сильно изменяется мощность отраженных сигналов для участков поверхности, имеющих разный наклон к падающему лучу. Эта зависимость, полученная ранее на основе наземных радиолокационных наблюдений Венеры и пересчитанная к длине волны 8 см, приведена на рис. 12. Отсюда следует, что вначале мощность отраженных сигналов очень резко зависит от угла падения, и изменение его на 1° приводит к изменению мощности на 1 дБ (в 1,26 раза). У радиолокационной станции с синтезированной апертурой космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» угол обзора, составляемый электрической осью антенны и местной вертикалью (см. рис. 10), 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.

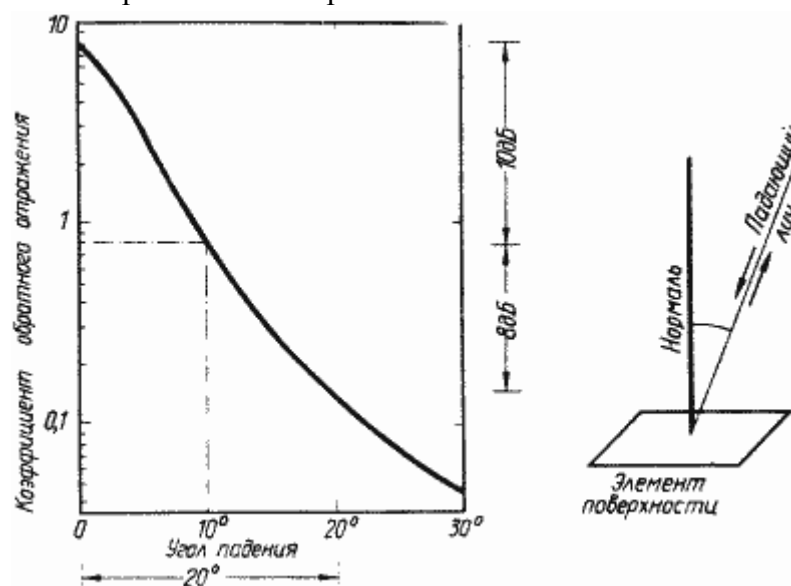


Рис. 12. Зависимость мощности отраженных сигналов от угла падения, по данным, полученным при радиолокации Венеры с Земли. Изменение угла падения от 0 до 20° , на что был рассчитан эксперимент, приводит к изменению мощности отраженных сигналов на 18 дБ (в 63 раза).

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 падения больше 10° и мощность отраженных сигналов ниже среднего значения до 8 дБ (в 6,3 раза) при угле падения 20° . Следовательно, контрасты между отдельными элементами поверхности могут достигать 18 дБ (в 63 раза), подчеркивая форму геологических структур.

Максимальное отражение дают элементы с крутизной 10° , ориентированные перпендикулярно падающему лучу. Если крутизна становится больше 10° , то, как следует из рис. 12, мощность отраженных сигналов начинает уменьшаться, как и в случае меньшей крутизны. Поэтому при картографировании земных горных районов величину угла обзора рекомендуется брать в пределах $35\text{—}55^\circ$, 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 склоны с

протяженностью, достаточной для того, чтобы проявиться при пространственном разрешении 1—2 км, встречаются редко.

Радиолокационная съемка ведется на одной частоте (в монохроматическом «свете»), что создает явление, носящее в оптике название «спекл-эффект». Оно вызывается интерференцией волн, отраженных отдельными точками поверхности в пределах разрешаемого элемента. Из-за случайного расположения точек отраженные ими волны у антенны радиолокатора в какой-то момент могут сложиться в фазе. На изображении в соответствующем кадре элемент будет выглядеть светлым. В следующий момент, когда антенна займет другое положение, они могут взаимно погаситься, и тот же элемент станет темным. По этой причине исходное радиолокационное изображение выглядит «зашумленным»: имеет рыхлый ноздреватый вид. Подобное явление наблюдается в оптике при освещении монохроматическим лазерным лучом. Лист белой бумаги, освещенный в темной комнате лазерным лучом, выглядит пятнистым.

В повседневной жизни это не наблюдается из-за широкого спектра частот, занимаемого видимым светом. Каждый его частотный компонент интерферирует посвоему, и изображение выглядит «гладким». Чтобы сгладить спекл-шумы и приблизить качество радиолокационного изображения к фотографическому, было применено совмещение нескольких кадров, полученных один за другим по мере движения космического аппарата. Один и тот же элемент поверхности виден с космического аппарата под разным ракурсом. Радиоволны при получении каждого кадра интерферируют независимо, и после совмещения кадров и усреднения измерений мощности отраженных сигналов происходит сглаживание изображения по свойству статистики.

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16».

Радиолокационная система космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» была создана ОКБ Московского энергетического института совместно с Институтом радиотехники и электроники АН СССР. Для картографирования Венеры был разработан новый вид радиолокационной системы, совмещающий в себе радиолокационную станцию с синтезированной апертурой и радиовысотомер (рис. 13). С помощью переключателя к передатчику и приемнику периодически подключаются то антенна радиолокационной станции с синтезированной апертурой, то антенна радиовысотомера.

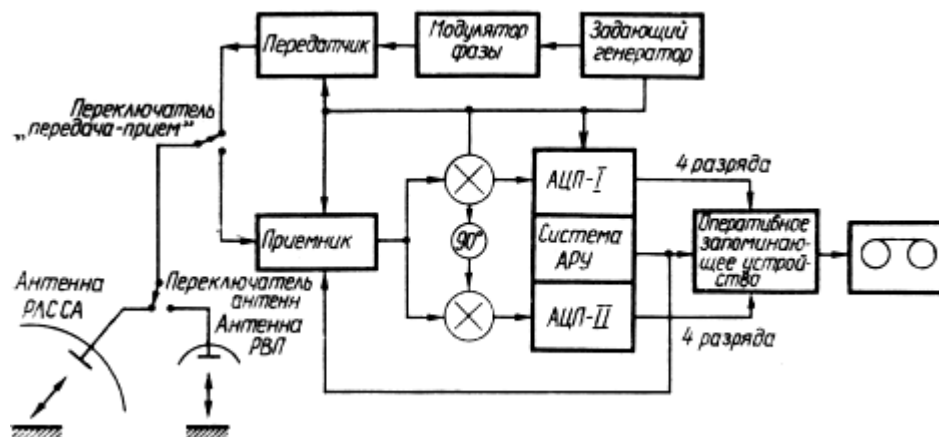


Рис. 13. Упрощенная блок-схема радиолокационной системы космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16».

Прием и регистрация отраженных сигналов, запаздывающих относительно излученного сигнала, производятся в паузе по окончании импульса передатчика (рис. 14, а).

Зарегистрированная порция сигналов используется затем для построения кадра радиолокационного изображения или получения одного измерения высоты. За 16 мин съемки регистрировалось около 3200 порций сигналов. Излучение и прием через каждую из антенн следуют через 0,3 с (рис. 14, б). Таким образом, в обоих режимах передатчик, приемник, а также регистрирующая аппаратура общие, в то время как антенны разные.

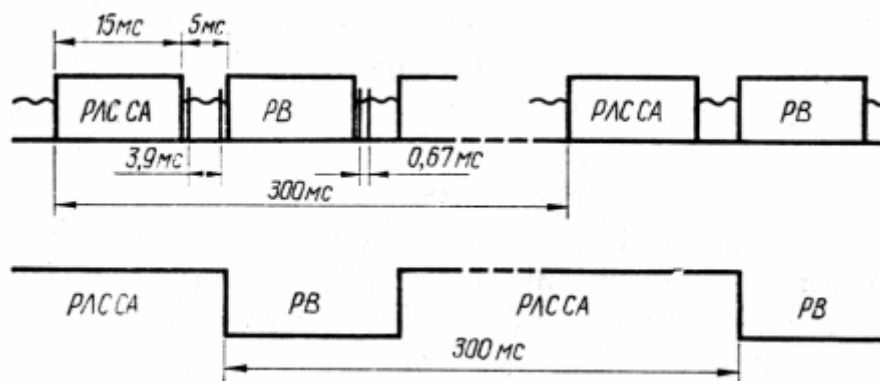


Рис. 14. Циклограммы сигналов радиолокационной системы (а) и работы переключателя антенны (б): РЛС СА — радиолокационная станция с синтезированной апертурой; РВ — радиовысотомер.

Метод бокового обзора с синтезом искусственного раскрытия антенны уже давно применяется на Земле для исследования земной поверхности и морских льдов с самолетов. Однако использовать имеющиеся радиолокаторы для съемки с космического аппарата, обращающегося вокруг Венеры, было невозможно по ряду причин. Надо было создать бортовую антенну достаточно больших размеров, чтобы обеспечить на входе приемного устройства радиолокационной станции высокое отношение мощности отраженных сигналов к помехам, создаваемым собственными шумами приемника. При этом надо помнить, что радиолокационная съемка с космического аппарата ведется в диапазоне высот 1000 - 2000 км, что в 100 раз больше, чем при съемке с самолета. Зеркало антенны бокового обзора имеет форму параболического цилиндра длиной 6 м и шириной 1,4 м. Вторая антенна (радиовысотомера) имеет параболическое зеркало диаметром 1 м. Руководил разработкой антенн в ОКБ МЭИ Б.А. Попереченко. Необычна форма модуляции зондирующего сигнала, применяемой для разделения отраженных сигналов по времени их запаздывания при построении изображения. Обычно в радиолокационных станциях, устанавливаемых на самолете, используется сигнал в виде периодической последовательности коротких импульсов, при котором отраженные импульсы приходят тем позже, чем дальше от антенны радиолокационной станции расположены соответствующие элементы поверхности. Однако большая масса импульсного передатчика и высокое питающее напряжение, необходимое для создания большой энергии в коротком импульсе, создают трудности при размещении на космическом аппарате. Поэтому в радиолокационной системе, установленной на космических аппаратах «Венера-15» и «Венера-16», применен проверенный в условиях космического полета передатчик непрерывного излучения от спутника связи «Молния-1» на лампе бегущей волны со средней мощностью 80 Вт. Фаза сигнала передатчика изменяется на 180° в моменты, определяемые специальным кодом. Это так называемая фазокодовая модуляция (рис. 15).

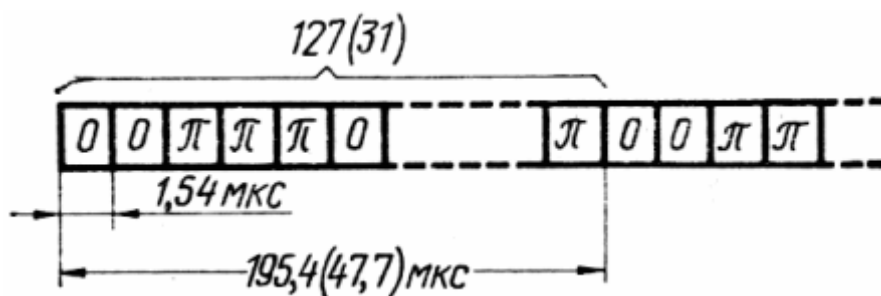


Рис. 15. Модуляция фазы сигнала передатчика. Передатчик излучает непрерывную последовательность импульсов, каждый из которых имеет длительность 1,54 мкс, с начальной фазой 0 или π . Значение фазы определяется специальным кодом. В режиме радиолокационной станции с синтезированной апертурой период последовательности содержит 127 импульсов, в режиме радиовысотомера - 31 или также 127.

Надо было решить также вопрос с передачей отраженных сигналов на Землю, где осуществлялось построение изображений и измерение высотного рельефа. В самолетных радиолокаторах бокового обзора с синтезированной апертурой отраженный сигнал обычно регистрируется на киноплёнку в виде голограммы, которую затем доставляют на наземный пункт, где после ее проявления получают видимое изображение с помощью когерентного оптического процессора (вычислителя). Доставлять киноплёнку на Землю со спутника Венеры было неразумно, и конструкторы космического аппарата предложили сначала осуществить прямую передачу информации по радиолинии. При этом одна из антенн, установленных на спутнике планеты (антенна радиолокатора), должна смотреть на Венеру, а вторая (радиолинии) — в это же время отслеживать положение Земли. Однако в период съёмки космический аппарат мог быть заслонен от Земли Венерой, и чтобы сохранить информацию, ее следовало запомнить. На космических аппаратах «Венера-15» и «Венера-16» были установлены проверенные в условиях космического полета цифровые запоминающие устройства, позволяющие записать, а затем считать в радиолинию для передачи на Землю до 100 Мбит (миллионов двоичных единиц) информации. В качестве магнитного носителя информации использовалась специальная магнитная лента (толщина ее в несколько раз тоньше лезвия безопасной бритвы!), что обеспечило высокую надежность записи информации. Руководил разработкой этих ответственных устройств и приспособлением к условиям эксперимента В.С. Баринов. Скорость поступления информации с выхода приемного устройства радиолокатора в 150 раз выше скорости, с которой может восприниматься информация магнитным запоминающим устройством. Для согласования скоростей поступления и регистрации информации разработано электронное запоминающее устройство ёмкостью около 30 кбит, собранное на интегральных микросхемах памяти. Электронное запоминающее устройство заполняется информацией с выхода приемника за 0,004 с; затем эта информация переносится на магнитную ленту за 0,6 с, после чего цикл регистрации повторяется. На космическом аппарате были установлены два комплекта запоминающих устройств, работавших со сдвигом на 0,3 с. Они обеспечивали непрерывную запись информации в течение 16 мин съёмки.

Средняя частота и мощность отраженных сигналов на входе приемного устройства непрерывно изменяются вследствие изменения высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите. На уровень сигналов влияют также характеристики отражающей поверхности. Особенностью радиолокационной системы космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» является применение цифровых устройств для регистрации отраженных сигналов и адаптации к их уровню и частоте. Цифровая система автоматического регулирования усиления поддерживает в среднем постоянное значение напряжения отраженных сигналов на выходе приемника. Цифровая система автоматической подстройки частоты измеряет среднее значение частоты отраженных сигналов и сводит его к постоянной величине. Результаты измерения

напряжения и средней частоты также передавались на Землю для восстановления фактической мощности и частоты отраженных сигналов.

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16».

При создании искусственных спутников планеты «Венера-15» и «Венера-16» за основу был взят орбитальный аппарат, разработанный при жизни Г.Н.Бабакина. С его помощью к Венере были доставлены спускаемые аппараты автоматических межпланетных станций «Венера-9» - «Венера-14». Новое назначение внесло серьезные изменения в их конструкцию (рис. 16). Руководил разработкой космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» В.М.Ковтуненко.

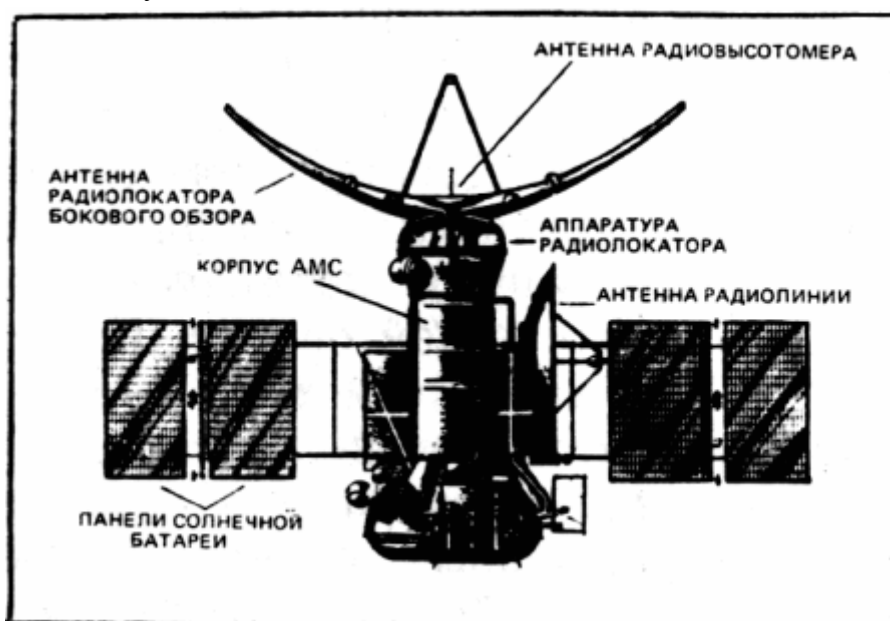


Рис. 16. Общий вид космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» с аппаратурой радиолокационной системы.

Вместо спускаемого аппарата установлен герметический контейнер с аппаратурой радиолокационной системы и увеличены баки с топливом для торможения при выходе на орбиту искусственного спутника Венеры и осуществления коррекции. Увеличена на 70% площадь панелей солнечной батареи для обеспечения энергопитанием радиолокационной системы и аппаратуры радиосвязи при ежедневной работе.

В передней части космического аппарата установлены две антенны радиолокационной системы (см. рис. 16).

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, как крылья у бабочки.

Электрическая ось антенны радиовысотомера должна быть направлена во время радиолокационной съемки по местной вертикали (т. е. к центру планеты), электрическая ось антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой должна находиться точно в плоскости, перпендикулярной трассе (см. рис. 10). Эти функции выполняет система астроориентации, непрерывно изменяющая положение космического аппарата по заданной программе при облете планеты.

Для передачи данных радиолокационной съемки на Землю разработана новая радиолиния, работающая в 5-сантиметровом диапазоне длин волн. Ее антенна диаметром 2,6 м видна справа от корпуса космического аппарата (см. рис. 16). Параболическое зеркало этой антенны сделано подвижным. Механизм поворота позволяет фиксировать зеркало в двух положениях для обеспечения оптимальной ориентации панелей солнечной батареи в период до захода Венеры за Солнце и после ее выхода. Конструкторская разработка космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» осуществлялась под руководством В.Н.Турчанинова.

Ориентация на использование в эксперименте базового космического аппарата и проверенных ранее в условиях космического полета передатчика и запоминающих устройств на магнитной ленте позволило осуществить радиолокационное картографирование Венеры с первой попытки. Был найден разумный компромисс между качеством радиолокационного изображения, разрешающей способностью и площадью снятой территории, определяемый возможностями космического аппарата и бортовых запоминающих устройств.

Интересно отметить, что в США вначале пошли по пути создания совершенно нового аппарата для картографирования Венеры, но он оказался слишком дорогим. Теперь планируется в 90-х годах провести эксперимент по проекту «Магеллан» с использованием элементов конструкции космического аппарата «Вояджер».

ПЕРЕДАЧА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЗЕМЛЮ.

На Земле для приема и регистрации информации были оборудованы две крупнейшие в Советском Союзе радиоантенны. Одна из них, диаметром зеркала 70 м, ежедневно обеспечивала прием в Центре дальней космической связи под Евпаторией. Другая, диаметром зеркала 64 м, - в Медвежьих Озерах под Москвой. Последняя была также оборудована приемной аппаратурой для контроля зондирующего сигнала радиолокационной системы.

Новая радиолиния обеспечила передачу радиолокационной информации космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» со скоростью 100 кбит/с на всех возможных расстояниях между Венерой и Землей вплоть до 260 млн. км. Ежедневно за время сеанса связи принималось и записывалось на магнитную ленту 100 Мбит радиолокационной информации, причем вероятность искажения, как правило, была ниже 0,0001.

По сравнению с прежней радиолинией дальней космической связи дециметрового диапазона длин волн скорость передачи информации возросла в 30 раз. Использование сантиметрового диапазона длин волн сократило в 7 раз угол между направлением на Солнце и космический аппарат, в котором связь невозможна из-за влияния солнечной плазмы и роста шумов приемной антенны. Соответственно сократилось время отсутствия связи при прохождении Венеры за Солнцем в середине июня 1984 г. Новая радиолиния была разработана под руководством В.А.Гришмановского.

Радиолиния, разработанная для передачи радиолокационной информации космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», имеет характеристики, сопоставимые с характеристиками радиолинии передачи научной информации космического аппарата «Вояджер» американской сети дальней космической связи, имеющей скорость передачи 112 кбит/с.

ЦЕНТР ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ.

Отраженный сигнал представляет собой радиоголограмму, из которой можно восстановить видимое изображение, осуществив преобразование Фурье. Обычно после съемки с самолета голограмму доставляют на наземный пункт в записи на киноплёнку. После проявления ее вводят в когерентный оптический процессор, предназначенный для осуществления преобразования Фурье, который представляет собой набор специальных оптических линз. Голограмма освещается лазером, и на выходе процессора, где располагается вторая киноплёнка, получают восстановленное изображение местности. Заметим, что работу оптического процессора при постоянной высоте и скорости самолета организовать несложно. Иначе обстоит дело при съемке с космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, когда высота и скорость постоянно меняются. Для синтеза изображений, а также измерения высотного рельефа в этих условиях в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР была разработана методика обработки отраженных сигналов, в основе которой лежит использование специализированного цифрового процессора для выполнения преобразования Фурье. Это устройство было разработано совместно с Институтом электронных управляющих машин Минприбора. С помощью этого устройства преобразование Фурье выполняется в 50 раз быстрее, чем, скажем, на большой универсальной ЭВМ БЭСМ-6. Совместно с малой ЭВМ СМ-4 Фурье-процессор составил основу Центра обработки радиолокационной информации космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», созданного в ИРЭ АН СССР.

С приемных пунктов информация доставлялась в записи на магнитную ленту. Ввод информации производился с магнитных регистраторов МР, подключенных к малой ЭВМ СМ-4 (рис. 17). Управление регистраторами производилось через аппаратуру КАМАК. Проверялось качество информации, при необходимости вносились исправления, и после разделения информации радиолокационной станции с синтезированной апертурой и радиовысотомера она записывалась на накопитель на магнитной ленте (НМЛ). ЭВМ СМ-4 была оснащена накопителями от большой ЭВМ, что увеличило скорость обмена данными в 10 раз. Это имело существенное значение в ускорении обработки, поскольку обмен с магнитной лентой использовался на всех этапах обработки.

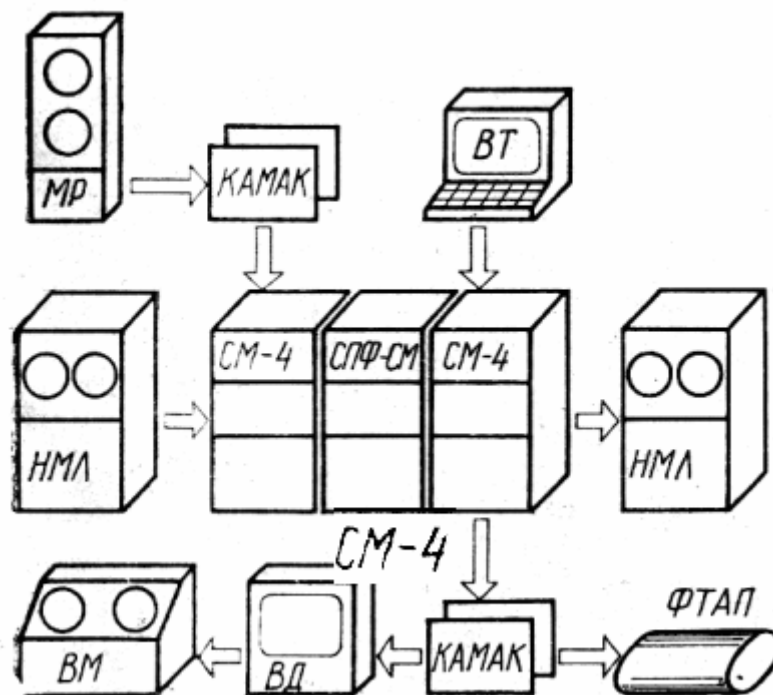


Рис. 17. Структурная схема цифрового комплекса аппаратуры обработки: МР - магнитный регистратор; КАМАК - аппаратура согласования; СМ-4 - малая ЭВМ; СПФ-СМ - специализированный процессор для выполнения преобразования Фурье; НМЛ - накопитель на магнитной ленте; ВТ - видеотерминал; ФТАП -

приемный фототелеграфный аппарат; ВД - видеодисплей; ВМ - видеоманитофон.

Разделение отраженных сигналов по времени запаздывания и доплеровскому смещению частоты для построения кадра радиолокационного изображения выполнялось с помощью специализированного процессора Фурье (СПФ-СМ). Загрузка-выгрузка информации также проводилась с помощью НМЛ через ЭВМ. Затем отдельные кадры радиолокационного изображения объединялись в сплошную полосу, которая через аппаратуру КАМАК, превращавшую числовые коды в электрическое напряжение, выводилась на приемный фототелеграфный аппарат (ФТАП) «Паллада», где получался негатив.

Перед выводом изображение можно было просмотреть на телевизионном экране ВД. Это устройство имело цифровую память, способную запомнить, а затем воспроизвести с частотой телевизионного стандарта кадр изображения из 512 строк по 512 точек при 16 градациях яркости. Изображение можно было рассматривать как неподвижным, так и движущимся, смещая его постепенно в вертикальном направлении и автоматически вводя новую информацию строка за строкой. В этом режиме создавалось впечатление полета над поверхностью Венеры.

Этот цифровой комплекс, обладающий высокой производительностью и достаточной универсальностью, в период регулярной радиолокационной съемки Венеры обеспечил построение полос изображения поверхности и измерение высотного рельефа. По окончании съемки с его помощью цифровыми методами были построены карты Венеры.

ОБРАБОТКА ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ.

Обработка сигналов радиолокационной станции с синтезированной апертурой. Для каждого массива отраженных сигналов, полученных в режиме радиолокационной станции с синтезированной апертурой, с помощью Фурье-процессора осуществлялась согласованная фильтрация для 127 значений запаздывания и 31 значения доплеровского смещения частоты, соответствующих примерно 4000 элементов поверхности планеты в диаграмме направленности антенны (см. рис. 10).

За 0,3 с, через которые регистрируются порции отраженных сигналов, космический аппарат смещался по орбите на часть ширины участка поверхности, попадающей в диаграмму направленности антенны (см. рис. 10, где пунктиром отмечено положение следа диаграммы направленности антенны в момент регистрации предыдущего массива данных). Это обеспечивало взаимное перекрытие 6—14 кадров (в зависимости от высоты космического аппарата) и возможность усреднения измерений мощности отраженных сигналов для уменьшения спекл-шума.

Каждый элемент поверхности проходил через несколько кадров, занимая разное положение. При совмещении отдельных кадров и построении полосы изображения нужно добиться, чтобы измерения мощности, соответствующие одному и тому же элементу в разных кадрах, попали в одну точку полосы. Для получения полного совмещения с помощью ЭВМ для каждой точки полосы вычисляются расстояние и радиальная составляющая скорости относительно космического аппарата. Насколько это непростая работа даже для ЭВМ, видно из того, что при принятом шаге разложения 0,8 км полоса изображения длиной около 8000 км содержит 10000 вертикальных строк по 195 точек (ширина полосы 156 км), т. е. около 2000000 точек, а измерения мощности для каждой точки надо брать из 6—14 кадров!

Эта методика учитывает изменения высоты и скорости космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, а также возможные (как правило, в пределах

$\pm 0,5^\circ$) отклонения электрической оси антенны от требуемого положения в процессе съемки.

Разработанная методика усреднения измерений мощности отраженных сигналов устраняла неравномерность яркости в поле кадра, вызванную неравномерность усиления в диаграмме направленности антенны и неодинаковым углом обзора для элементов, находящихся на разном расстоянии от трассы. При этом яркость тех элементов поверхности, для которых мощность отраженных сигналов равна средней, получается равной единице, и на изображении этим элементам присваивается серый тон. Для других элементов, у которых мощность отраженных сигналов больше или меньше средней, яркость получается больше или меньше единицы. На изображении им присваивается соответственно более светлый или более темный тон.

Обработка сигналов радиовысотомера. Первоначально при обработке отраженных сигналов радиовысотомера применялось разделение только по запаздыванию. Полученное распределение мощности отраженных сигналов сравнивалось с рядом моделей, отличающихся значениями коэффициента шероховатости и дисперсии высот в участке поверхности 2, оказавшемся в пределах диаграммы направленности антенны радиовысотомера (см. рис. 10). При выборе моделей для сравнения учитывалась высота полета космического аппарата и возможное отклонение электрической оси антенны от местной вертикали. Последнее измерялось по смещению средней частоты спектра отраженного сигнала. Модели распределения мощности отраженных сигналов были вычислены заранее, их общее число достигало 3000.

Эта методика давала высоту космического аппарата над средним уровнем поверхности планеты в пятне диаметром 40 - 50 км (в зависимости от высоты). Затем была использована возможность разделения отраженных сигналов также и по доплеровскому смещению частоты, что позволило сузить пятно, относительно которого измеряется высота, по трассе полета до 6 - 14 км (см. рис. 10). Точность измерения высоты определялась по разбросу измерений при полете космического аппарата над ровной местностью и оказалась равной 30 м.

Учитывалось дополнительное запаздывание сигналов в атмосфере Венеры из-за меньшей скорости распространения радиоволн, что как бы удлиняло их путь. Над средним уровнем поверхности Венеры атмосфера увеличивает путь на 260 м. Над возвышенностями дополнительное запаздывание уменьшается, над низменностями - увеличивается.

ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16».

Космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» стартовали с промежуточной орбиты спутника Земли соответственно 2 и 7 июня 1983 г., а 10 и 14 октября, после 130 сут полета, оба космических аппарата были выведены на орбиты спутников Венеры с периодом обращения 24 ч (рис. 18). Минимальное расстояние аппаратов от поверхности Венеры (в перигентре) составляло 1000 км и приходилось примерно на 62° северной широты. Максимальное расстояние (в апоцентре) 66000 км. Наклонение плоскости орбиты к экватору Венеры $92,5^\circ$.

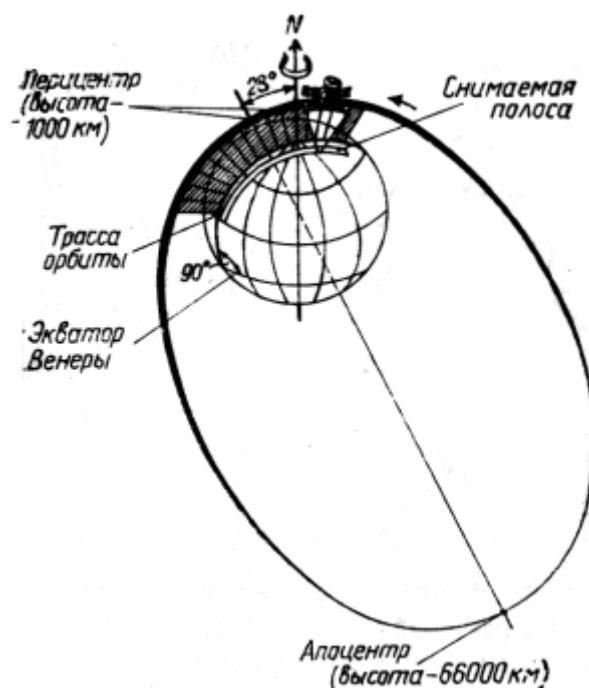


Рис. 18. Орбита космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16».

Параметры орбит космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» были выбраны таким образом, чтобы снять часть северного полушария Венеры, включающую Землю Иштар, Область Бета, Равнину Аталанты, некоторые сведения о которых были известны в результате полета орбитального 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, продолжавшееся до 10 июля 1984 г.

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. 19). 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 ч 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 до 2000 км).

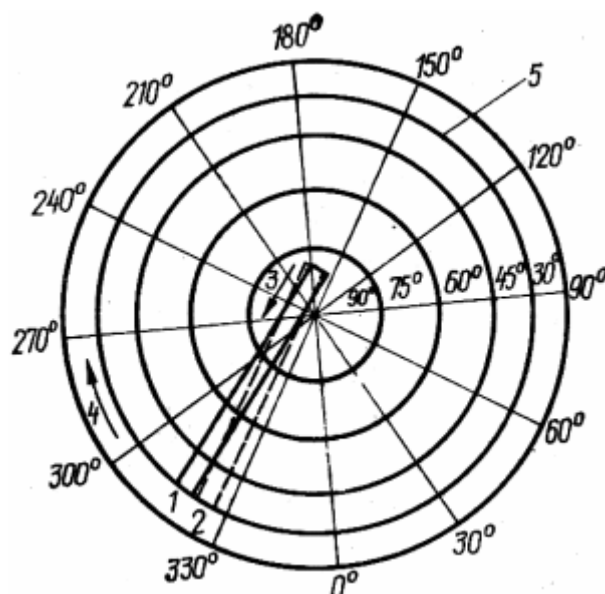


Рис. 19. Последовательность радиолокационной съемки поверхности Венеры: 1 - снимаемая полоса при прохождении космического аппарата вблизи Венеры; 2 - снимаемая полоса в следующем прохождении, спустя сутки; 3 - направление движения космического аппарата; 4 - направление вращения Венеры; 5 - граница снятой области (параллель 30° северной широты).

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% площади поверхности Венеры. Она простирается от северного полюса до широты в среднем 30° (см. рис. 19).

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 вторым аппаратом, не прерывая регулярности съемки, ведущейся одним из них. За счет воздействия на аппараты солнечного притяжения высота в перицентре 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». Ввиду невозможности съемки в эти периоды перед сеансами коррекции съемка велась двумя аппаратами.

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

Управление космическими аппаратами «Венера-15» и «Венера-16» осуществлялось под руководством Р.С.Кремнева.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ.

В качестве примера приведем изображение части Гор Максвелла Венеры с огромным кратером диаметром около 100 км, получившим ранее имя Клеопатры (см. последнюю страницу обложки). По горизонтальной оси здесь отложено угловое расстояние относительно перицентра орбиты, по вертикальной - 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. Длина приведенного фрагмента 1100 км при полной ширине изображенной полосы 156 км (195 элементов по 0,8 км). Изображение построено в предположении, что поверхность Венеры - правильная сфера радиуса 6051 км.

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. Приведенное изображение было получено космическим аппаратом «Венера-16» 20 января 1984 г.

С радиолокационным изображением совмещен профиль высот, полученный тремя сутками раньше, трасса которого показана белой линией. По вертикальной оси для профиля указана величина радиуса поверхности планеты в данной точке в километрах. Вертикальный масштаб укрупнен в 32 раза по сравнению с горизонтальным.

Максимальная высота горного массива для данного профиля составляет 11 км над уровнем средней поверхности радиуса 6051 км. Кратер, который пересекала 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.

Наивысшая точка Гор Максвелла находится несколько в стороне от кратера Клеопатры.

Она была зафиксирована космическим аппаратом «Венера-16» 14 января 1984 г. (рис. 20).

Как видно из рисунка, высота горного массива в этой точке составляет 11,5 км относительно уровня средней сферы радиуса 6051 км.

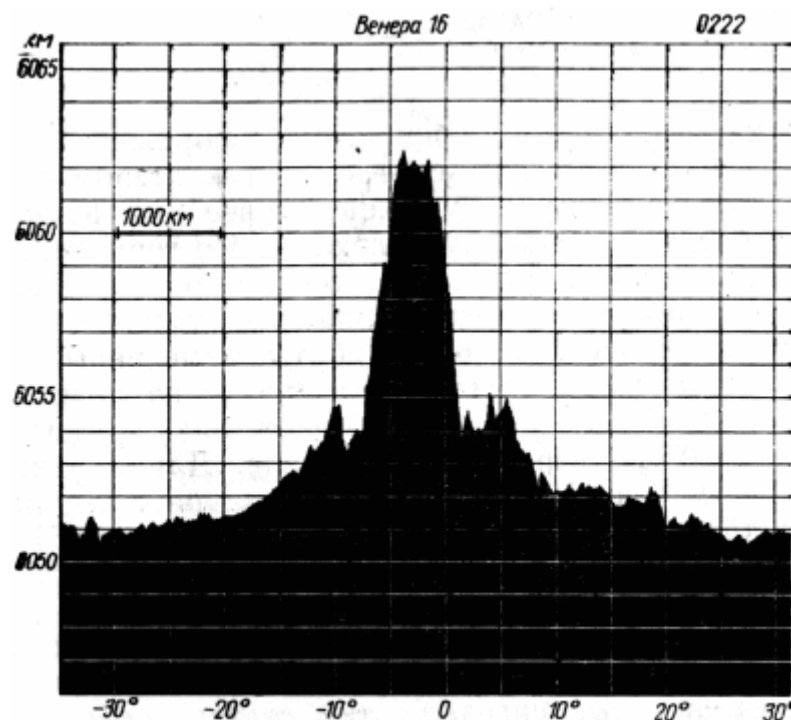


Рис. 20. Профиль высот поверхности Венеры в районе Гор Максвелла, полученный космическим аппаратом «Венера-16» 14 января 1984 г., где находится наивысшая точка поверхности Венеры ($-3,7^\circ$ относительно перигентра). По вертикальной оси указана величина радиуса поверхности планеты в данной точке в километрах. Вертикальный масштаб укрупнен в 320 раз по сравнению с горизонтальным. Длина трассы 7100 км.

На поверхности Венеры обнаружены интересные явления, вызванные аномальным характером отражения радиоволн. На последней странице обложки над профилем высот приведен сюжет с двумя большими кратерами диаметром 15—20 км. По наличию центральной горки можно заключить, что, подобно кратерам на поверхности Луны, они возникли в результате падения метеорита. Оба кратера попали на полосу съемки 1 декабря 1983 г., причем расстояние между ними около 1000 км. Дно кратера, представленного на левом снимке, выглядит необычно ярким. Внутри этого кратера уровень отраженных сигналов возрастает примерно на 10 дБ (в 10 раз) по сравнению с окружающей местностью.

Для объяснения этого явления выдвигалось несколько гипотез, исходящих из того, что структуры, покрывающие дно кратера, создают повышенную направленность отражения радиоволн в сторону космического аппарата. Например, если дно кратера занято дюнами, подобными тем, которые наблюдаются в некоторых районах Марса, и трасса космического аппарата окажется параллельной дюнам, то при крутизне склонов около 10° радиосигнал будет отражаться преимущественно в направлении аппарата.

Другая гипотеза возникла по аналогии с дорожными знаками, ярко светящимися в ночи, когда на них падает свет фар проезжающего автомобиля. Обращенная к водителю сторона дорожных знаков покрыта множеством стеклянных шариков, имеющих определенный коэффициент преломления. Падающая световая волна проникает внутрь шарика и, отразившись с противоположной стороны, выходит наружу в том же направлении, откуда пришла падающая волна. Так действует катафот. Подобно катафоту, но уже по отношению к радиоволнам могли бы действовать круглые камни - валуны, если бы они в действительности были на дне кратера.

Эти гипотезы требуют каких-то специфических условий. Естественнее считать, что дно кратера выглядит ярким в контрасте с окружающей местностью, имеющей низкую отражательную способность при наклонном падении волн из-за ее гладкости. Удар метеорита в условиях высокой температуры вызвал плавление вещества поверхности внутри возникшего кольцевого вала. При последующем остывании расплавленного вещества образовалась корка, которая, растрескиваясь и ломаясь, создала чрезвычайно неровную поверхность (этот процесс можно наблюдать и на Земле при остывании магмы после извержения). Образовавшаяся внутри кратера структура отражает радиоволны при наклонном падении много интенсивнее, чем первоначальная поверхность, сохранившаяся вокруг кратера. Кратеры с необычно ярким дном на радиоволнах обнаружены и в других областях Венеры.

СОЗДАНИЕ ФОТОКАРТ И ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ ВЕНЕРЫ.

Создание карт Венеры являлось главной целью эксперимента. Первоначально предполагалось, что карты будут нарисованы на основе полос радиолокационных изображений, построенных в результате обработки отраженных сигналов. Однако объем снятого материала показал нереальность выполнения этой работы в приемлемые сроки: при рисовании карт вручную с отмывкой рельефа потребовалось бы не менее 10 лет. Поэтому в ИРЭ АН СССР при участии Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК) ГУГК была разработана методика построения карт полностью цифровыми методами, реализованная на ЭВМ СМ-4 Центра, созданного для обработки информации космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16».

Впервые все операции по созданию карты, включая синтез радиолокационных изображений и профилей высот поверхности Венеры по отраженному сигналу, перестроение их в определенную картографическую проекцию, устранение перспективных искажений, нанесение координатной сетки, горизонталей и надписей

целиком выполнены цифровыми методами. Это обеспечило математическую точность карт и оперативность их получения.

Выбор картографической проекции. В масштабе 1:5000000 общая площадь карты на всю снятую территорию Венеры должна составлять $4,6 \text{ м}^2$. Для работы удобнее серия карт меньшего формата, объединенных в атлас. Кроме того, при проецировании большой части сферы на плоскость возникают сильные искажения. По этой причине вся снятая территория была разделена на фрагменты, для каждого из которых создавалась своя карта. Это деление, предложенное Ю.С.Тюфлиным в ЦНИИГАиК, показано на рис. 21.

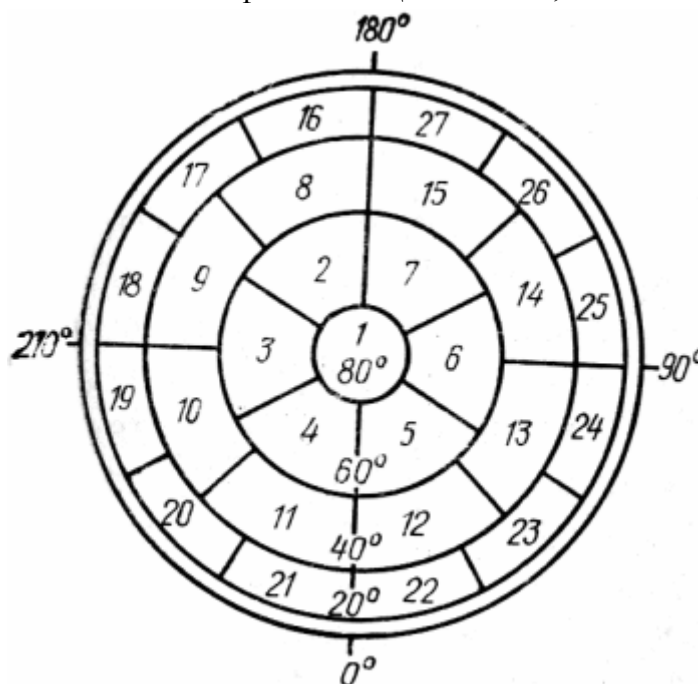


Рис. 21. Разбение снятой территории Венеры на отдельные фрагменты для построения карт.

Как известно, сферу невозможно развернуть на плоскость. Поэтому для большей части территории изображение проецировалось на коническую поверхность, которая уже разворачивалась на плоскости. Ее вершина расположена над северным полюсом планеты. Коническая поверхность сечет сферу по двум параллелям, носящим название стандартных. Стандартные параллели выбирались таким образом, чтобы проекционные искажения в поясе, в котором строилась карта, были минимальными.

Вся площадь фрагмента разбивалась на точки, расстояние между которыми на поверхности Венеры составляет 0,8 км. Для одного фрагмента их получается около 10000000. Чтобы определить яркость каждой точки фрагмента, вычисляли ее координаты на поверхности планеты, а затем находили ее положение на той полосе съемки, которая прошла в данном месте. Ближе к полюсу, где трассы космического аппарата сближаются, точка фрагмента попадает на несколько полос, что повышает достоверность определения яркости. Чтобы устранить полосчатость изображения, возникающую при наложении полос, полученное значение приводится к среднему значению яркости, определенному сглаживанием яркости вдоль полос. Построенное этим методом сплошное изображение в определенной проекции, или фотоплан, и является основой для построения карты.

Топографическая коррекция перспективных искажений. На рис. 22,а изображен космический аппарат **S**, движущийся перпендикулярно картинной плоскости относительно центра масс планеты **P**. Для построения радиолокационного изображения каждая точка истинной поверхности планеты, показанная сплошной линией, должна быть спроецирована 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.

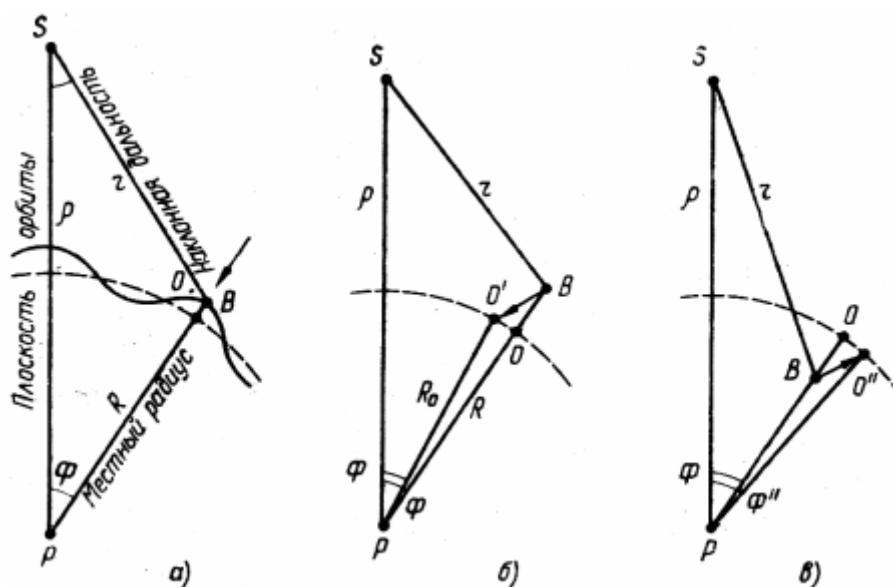


Рис. 22. Отображение (а) точек истинной поверхности (сплошная линия) на некоторой сфере (пунктир) и смещение точек радиолокационного изображения при неучете вариаций местного радиуса планеты в случае возвышенности (б) и в случае низменности (в).

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 P определяется элементами его орбиты. Расстояние точки B относительно аппарата (наклонная дальность r) определяется радиолокационным методом при обработке отраженного сигнала. Чтобы найти угол Φ , характеризующий расстояние точки B относительно плоскости орбиты, надо знать еще радиус планеты в данной точке R . При построении полос радиолокационного изображения поверхность Венеры считалась правильной сферой с радиусом $R_0 = 6051$ км, принятым Международным астрономическим союзом в качестве среднего радиуса планеты. Неучет вариаций местного радиуса имел следствием перспективные искажения. В случае возвышенности (точка B лежит выше точки O ; рис. 22; б) наклонная дальность уменьшается, и засечка радиусом r дает на средней поверхности точку O' вместо O . Точка O' расположена ближе к плоскости орбиты, чем точка O , и центральный угол Φ' меньше Φ . В случае низменности (точка B лежит ниже точки O ; рис. 22, в) наклонная дальность увеличивается, и 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 фактического радиуса R относительно среднего R_0 (пропорционально высоте точки относительно уровня средней сферы) и обратно пропорционально $\sin a$, где a - угол между направлением на данную точку и плоскостью орбиты (см. рис. 22, а). Для радиолокационной съемки с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» величина этого угла, определяемая ориентацией антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой, составляла в среднем 10° . Поэтому смещение точки изображения на средней сфере примерно в 6 раз больше отклонения фактического радиуса. Смещение точек изображения особенно значительно в горных районах. В районе Гор Максвелла Венеры, где высоты превышают 10 км, смещение достигает 60 км и сильно искажает форму кратера (см. последнюю страницу обложки). При построении фотопланов положение точек корректировалось по данным измерений радиовысотомера. Уточнение орбиты космического аппарата. Надо было уточнить орбиту космического аппарата, которая служит базой при построении фотоплана. В период съемки, когда велось построение полос радиолокационного изображения и профилей высот, высота космического аппарата над поверхностью Венеры могла быть вычислена с погрешностью

до нескольких километров, что было совершенно недостаточно для совмещения соседних полос на фотоплане. Впоследствии в Институте прикладной математики АН СССР под руководством Э.Л.Акима была разработана методика, позволившая повысить точность определения орбит примерно в 10 раз.

Это уточнение решающим образом повлияло на возможность построения фотопланов, поскольку практически не стало заметным двоение изображений в местах перекрытия соседних полос. Следует отметить ту особенность методики уточнения орбит, что она выявляла и устраняла сравнительно небольшие искажения формы орбит, возникавшие в период съемки вследствие работы двигателей системы астроориентации космического аппарата. При построении фотопланов старые параметры орбит заменялись уточненными, а средний радиус планеты - фактическим, найденным по измерениям радиовысотомера. Большим достоинством методики было то, что не надо было заново строить полосы изображений.

Интерполяция измерений высоты. Измерения высоты могли быть получены только в точках, расположенных на трассах космических аппаратов. Пересекаясь вблизи полюса, они расходятся на 130 - 140 км на широте 30° , где оканчивалась съемка. При построении карты высот и нанесении горизонталей на фотоплан для точек, расположенных непосредственно на трассах (например, точка А на рис. 23), брались сами измерения.

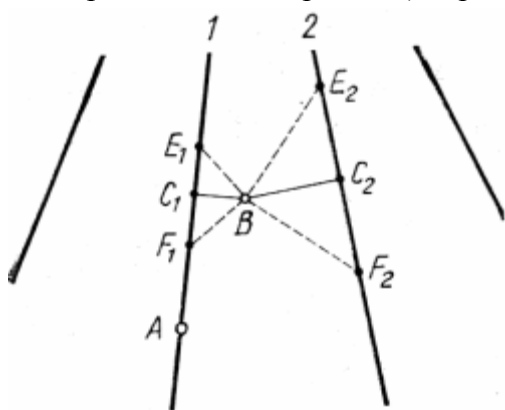


Рис. 23. Интерполяция данных между трассами полета при построении карты высот (топографической карты).

Чтобы распространить данные на область между трассами, применена интерполяция. Для некоторой точки В, расположенной между трассами 1 и 2, данные берутся с весовым множителем, величина которого обратно пропорциональна расстоянию точки В от трасс. Естественно считать, что на большом расстоянии на рельеф в данном месте могут влиять лишь крупные детали поверхности, а влияние мелких ограничено малым радиусом. В связи с этим данные измерений усредняются на некотором участке (E_1F_1 , E_2F_2), длина которого тем больше, чем дальше от трассы находится точка.

СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ ИШТАР.

В ИРЭ АН СССР цифровыми методами построены все 27 карт, на которые разбита снятая территория. В качестве примера приведем фотоплан Гор Максвелла в восточной части Плато Лакшми, входящих в состав Земли Иштар (см. первую страницу обложки). Он подстроен по результатам радиолокационной съемки с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» в январе 1984 г. Это наиболее детальное изображение Гор Максвелла из всех существующих. Топографическая коррекция устранила перспективные искажения (сравните с исходным изображением, приведенным на последней странице обложки).

В свое время при радиолокационной съемке Венеры, с помощью космического аппарата «Пионер-Венера» было установлено, что Горы Максвелла - самая высокая область Венеры (см. рис. 8), однако низкое пространственное разрешение затрудняло анализ их природы. Общее строение центральной части горного района с кратером Клеопатры, имеющего шероховатую структуру, достаточно хорошо просматривается на радиолокационном

изображении, полученном в последнее время с Земли в Аресибо. Однако окружающие пространства с более гладкой поверхностью плохо видны вследствие низкого уровня отраженного сигнала.

Оба кратера, входящие в систему кратера Клеопатры, имеют приблизительно круглую форму. Внутренний кратер диаметром 55 км смещен к северо-западу относительно центра внешнего кратера диаметром 95 км. Методика интерполяции измерений высоты, использованная при построении топографической карты (рис. 24), позволила выявить детали высотного рельефа в этом районе. Отсюда следует, что с востока стенка внешнего кратера имеет минимальную высоту и его дно почти сливается с восточным склоном горного массива.

С запада область кратера Клеопатры окаймлена почти параллельными хребтами, тянущимися на сотни километров (друг от друга они отстоят на 5 - 15 км). Здесь расположена 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 кратера Клеопатры (долгота $2,3^\circ$, широта $65,9^\circ$) находится наивысшая точка 11,5 км*. К юго-востоку от нее (долгота $3,9^\circ$, широта $64,4^\circ$) лежит вторая по высоте точка ниже ее лишь на 200 м. Как показывают горизонталь, северная часть возвышенности продолжается на запад, где высоты еще превышают 9 км.

(* Для сравнения укажем, что, 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.)

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 кратер Клеопатры, просматриваются и с востока, но здесь их структура нарушена поперечными сдвигами. Область, непосредственно окружающая кратер Клеопатры, выглядит более ровной. Возможно, здесь складки рельефа засыпаны выбросом пород, возникшим при образовании кратера. Однако образовался ли кратер в результате извержения магмы или удара очень крупного метеорита - неизвестно (специалисты пока не пришли к единому мнению).

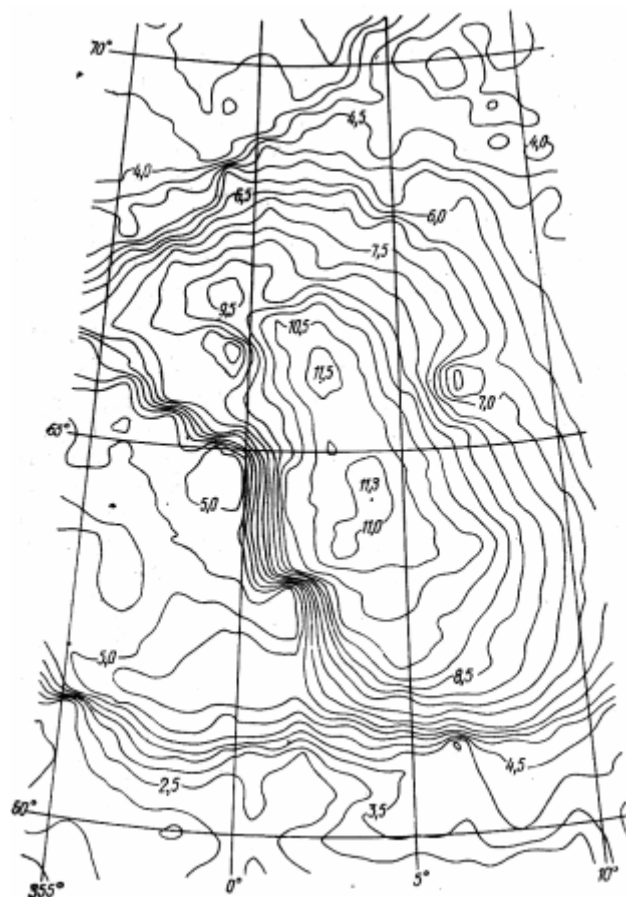


Рис. 24. Фрагмент топографической карты Гор Максвелла и окружающей области, построенной по результатам радиолокационной съемки с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» в январе 1984 г. Горизонтالي следуют с шагом 500 м относительно уровня средней сферы радиуса 6 051 км.

Высокогорное Плато Лакшми протяженностью около 1500 км с севера на юг и 2000 км с запада на восток имеет высоту от 2,5 до 5 км. Со всех сторон его окружают горные хребты. На востоке это - Горы Максвелла, на западе - Горы Акны, на севере - Горы Фрейи, на юге - горные хребты Уступа Весты. По высоте (3—7 км) они уступают Горам Максвелла.

По данным измерений мощности отраженных сигналов с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», среднеквадратичное значение углов наклона, характеризующее неровность поверхности, для Плато Лакшми лежит в пределах от 2,5 до 6°. Для Гор Акны и Фрейи его величина поднимается до 9 - 13°, а для Гор Максвелла - даже до 15°. Самый ровный район находится к северу от плато на Равнине Снегурочки, где среднеквадратичное значение углов наклона поверхности становится ниже 1°. Значение коэффициента отражения поверхности для Гор Акны в 1,5 - 2 раза, а для Гор Максвелла более чем в 2 раза выше среднего значения для Венеры (0,15).

ПОВЕРХНОСТЬ ВЕНЕРЫ — ЗЕРКАЛО ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ПЛАНЕТЫ.

С первых дней радиолокационной съемки Венеры геологический анализ полученных изображений проводился в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского АН СССР под руководством А.Т.Базилевского. Его сотрудниками построена геолого-морфологическая карта Венеры, охватывающая снятую территорию.

Кроме самой высокой на Венере горной страны Земля Иштар, здесь расположен ряд менее крупных горных областей, таких, как Бета, Белл, Теллуры, Тефии, Ильфрун и Метиды. Генеральная ассамблея Международного астрономического союза решила присваивать крупным горным образованиям на Венере имена богинь и великанш. Исключение составляет имя создателя электродинамики, лежащей в основе радиометодов, - английского физика Дж.Х.Максвелла. Название букв греческого алфавита альфа и бета сохранено за первыми обнаруженными на диске Венеры радиояркими областями. В пределах снятой территории находится и самая низкая на Венере область - Равнина Аталанты. Говорят, что если бы на Венере когда-то была вода, то остатки ее должны были стекать в Аталанту. Однако каких-либо следов от возможных водяных потоков найти пока не удалось.

К важнейшим открытиям относится обнаружение тектонической активности Венеры, масштабы которой много больше, чем на Луне, Марсе и Меркурии. Горные хребты и разделяющие их долины, обрамляющие Плато Лакшми, образованы в процессе интенсивного тектонического сжатия, что типично для горных систем Земли. К востоку от Гор Максвелла система параллельных горных хребтов и долин нарушена тектоническими смещениями. Эти зоны, имеющие специфический рисунок поверхности и не встречающиеся на других планетах, получили наименование «Тессера» («черепица» с греческого).

Северная часть Области Бета, попавшая в зону съемки планеты с помощью космических аппаратов «Вене3)а-15» и «Венера-16», рассечена системой уступов и долин, ориентированных в меридианальном направлении. По своему строению она напоминает рифтовые зоны Земли. В этом районе опустился спускаемый аппарат межпланетной станции «Венера-9». По данным его приборов, состав пород в месте посадки близок к земным базальтам.

На поверхности Плато Лакшми выделяются овальные депрессии (провалы коры) Коллет и Сакаджаева похожие на некоторые вулканические кальдеры Марса образовавшиеся на месте излияний расплавленной магмы. Вокруг более молодой кальдеры Коллэт наблюдается система радиально расходящихся лавовых потоков выглядящих яркими на изображении. Во многих местах на равнинах Венеры наблюдаются конусообразные образования, похожие на земные и марсианские вулканы. Они встречаются в 10 раз чаще, чем на Земле.

На равнинах к западу и востоку от Земли Иштар обнаружены необычные кольцевые образования поперечником от 200 км до 600 км. Эти образования, не встречающиеся на других планетах, получили наименование «Венец».

Оценка плотности распределения числа кратеров, возникших в результате падения метеоритов, по сравнению с Луной показывает, что некоторые из них существуют 300 - 600 млн. лет. В то время как вода и ветер до неузнаваемости меняют лицо нашей планеты на протяжении нескольких миллионов лет, поверхность Венеры, слабо подверженная эрозии, запечатлела и сохранила все изменения, происшедшие на протяжении сотен миллионов лет под действием тектонических сил. Приближаясь по масштабам тектонической активности к Земле, Венера может служить моделью при изучении. геологической истории нашей планеты.

ПЛАНЕТА ЗАГАДОК.

Венеру недаром называют планетой загадок. Раскрывая одни, мы сталкиваемся с новыми загадками. И полет космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», принеший небывалый объем информации о планете, вызвал новую волну вопросов.

Так, например, на поверхности Венеры открыто множество признаков тектонической активности планеты, сближающих ее с Землей. Однако мы по-прежнему не располагаем достоверными данными о том, что там в настоящее время происходят вулканические извержения, подобные земным.

Остается неясным вопрос относительно происхождения кратера Клеопатры, расположенного на склоне Гор Максвелла к востоку от высочайшей области поверхности Венеры. По своему строению и размерам Клеопатра напоминает двойные кратеры ударного происхождения, встречающиеся на Луне. Если и этот кратер образовался на месте падения метеорита, то невольно возникает вопрос: «Кто целился в высочайшую точку Венеры и немного промахнулся?» Ведь на тысячи километров от Клеопатры нет ничего подобного этому образованию. Почему некоторые кратеры ударного происхождения выглядят на радиоволнах необычно яркими? В то же время другие, примерно того же размера и формы, не выделяются так резко на окружающей местности. С чем связано это явление?

На поверхности Венеры имеются участки, где мощность отраженных сигналов в канале радиолокационной станции с синтезированной апертурой падала в 10 раз и более. Эти участки выглядят темными на фоне окружающей местности. И хотя из сравнения уровней сигналов в обоих каналах радиолокационной системы следует, что пониженное обратное отражение при наклонном падении вызвано очень высокой гладкостью поверхности, природа этого так же, как и природа различия структур на дне кратеров, остается неясной. Повышение коэффициента отражения в горных районах Венеры должно сопровождаться понижением излучательной способности, что подтверждается измерениями СВЧ-радиометров, также установленных на борту космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16». Эти приборы во время сеанса радиолокационной съемки измеряли интенсивность собственного радиоизлучения Венеры. При прохождении Гор Максвелла и других возвышенных областей наблюдалось понижение радиояркостной температуры до 400 К, в то время как в среднем для Венеры она составляет 600 К (см. рис. 7). Это понижение радиояркостной температуры над горными областями было замечено и американскими исследователями, использовавшими для этого данные радиовысотомера орбитального аппарата «Пионер-Венера», а так-же наблюдения с Земли с помощью многоэлементного радиотелескопа ВЛА (США). Понижение радиояркостной температуры только частично можно отнести на счет понижения температуры атмосферы Венеры с высотой.

Американские исследователи объясняют это явление наличием в горных районах каких-то минералов, резко снижающих излучательную способность горных пород в радиодиапазоне. По их оценкам, для наблюдаемого понижения радиояркостной температуры относительная диэлектрическая проницаемость покрова горных районов должна достигать 20 - 30, в то время как в среднем для всей поверхности Венеры она составляет около 5. Такими свойствами обладают сравнительно редкие на Земле соединения железа и свинца с серой. Другое предположение состоит в том, что покров горных районов имеет высокую удельную электропроводность, как, например, окислы железа.

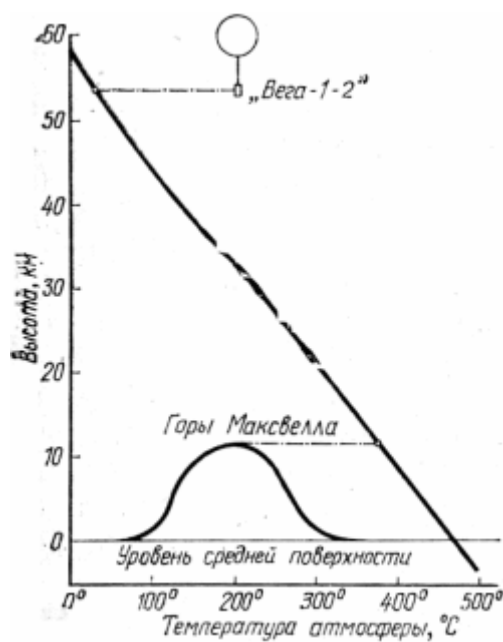


Рис. 26. Изменение температуры с высотой в атмосфере Венеры.

Существование органической жизни на Венере на первый взгляд кажется совершенно невероятным. Нетрудно рассчитать, что при скорости убывания температуры венерианской атмосферы с высотой около 8°C на 1 км температура на вершине Гор Максвелла должна быть на 100°C ниже, чем у подножия (рис. 26). Однако и здесь она будет чудовищной по сравнению с земными условиями - свыше 350°C .

Однако наши представления о возможности приспособления живой материи к окружающей среде все время расширяются. Недавно в районе Галапагосских островов на дне Тихого океана были обнаружены источники с температурой воды 300°C . И что поразительно, в воде этих источников существуют живые микроорганизмы. Это наводит на мысль, что жизнь в каком-то примитивном виде может существовать и на Венере.

Вопросы наличия живой материи на Венере и минералогического состава покрова горных областей

могла бы разрешить посадка в районе Гор Максвелла спускаемого аппарата с приборами для биологического и геохимического анализа.

НЕМНОГО ИСТОРИИ.

Как научному руководителю космического эксперимента по радиолокационному картографированию планеты Венера автору памятные этапы создания уникального космического комплекса «Венера-15» и «Венера-16». Это был пример творческого сотрудничества предприятий промышленности и научных учреждений. Работа велась межведомственным коллективом, возглавлявшимся вице-президентом АН СССР академиком В.А.Котельниковым, где каждый делал свое дело. Академия наук разработала методику эксперимента и провела обработку данных, ОКБ МЭИ Минвуза разработало аппаратуру радиолокационной системы, а кооперация предприятий промышленности создала космический аппарат и обеспечила управление им.

Идея эксперимента возникла в ИРЭ АН СССР осенью 1972 г. Непосредственно ее развивали Ю.Н.Александров, Г.М.Петров и автор. В ноябре 1975 г. автор был принят президентом АН СССР академиком М.В.Келдышем. Вскоре после этого эксперимент по радиолокационному картографированию Венеры был включен в программу космических исследований. За разработку аппаратуры радиолокационной системы взялся директор ОКБ МЭИ А.Ф.Богомолов. В ОКБ МЭИ оказался такой человек - Г.А.Соколов, который сразу проникся задачей и поставил целью своей жизни осуществление эксперимента. Через него осуществлялась связь между ИРЭ АН СССР и ОКБ МЭИ. Он пользовался большим авторитетом, и все, о чем мы с ним договаривались, претворялось в жизнь. Созданная аппаратура, включая антенны, испытывалась сначала автономно на полигоне ОКБ МЭИ Медвежьих Озер. Руководил этой ответственной работой Г.А.Подопригора. Затем в течение года, предшествовавшего полету, проводились испытания совместно с аппаратурой передачи данных на Землю и аппаратурой обработки. На вход приемников радиолокационной системы подавались сигналы, воспроизводящие отражения от точечных целей. Испытательная аппаратура, разработанная под руководством М.Н.Мешкова, позволяла автоматически изменять уровень сигналов, их запаздывание и

частоту по определенной программе. Магнитные ленты с записью сигналов, прошедших через приемно-регистрирующую аппаратуру радиолокационной системы, передавались для обработки и анализа в ИРЭ АН СССР. Эти испытания позволили выявить 2 - 3 серьезных дефекта, после устранения которых аппаратура работала безукоризненно. Большой труд в организацию испытаний вложен В.Г.Тимониным.

Чтобы проверить работу радиолокатора совместно с новой радиолинией, испытания были продолжены в полете. Воспроизводилась информация, записанная заранее на Земле на магнитных запоминающих устройствах. Включался передатчик радиолокатора, его антенны поочередно направлялись на Землю, и на Медвежьих Озерах измерялась мощность зондирующего сигнала, его частота и структура модуляции. Медленно поворачивая аппарат по программе, проверяли форму диаграмм направленности антенн. У сотрудников ИРЭ АН СССР, занимающихся радиолокационными наблюдениями планет в Центре дальней космической связи, стало традицией создавать своими руками сложную аппаратуру для проведения фундаментальных научных исследований. В этой связи является показательным создание комплекса аппаратуры (Центра) для обработки радиолокационной информации космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» и разработка математических программ. В создании Центра и в организации обработки информации большую настойчивость проявил его руководитель А.И.Сидоренко. Разработка процессора для ускоренного выполнения преобразования Фурье над отражениями сигналами была начата в ИРЭ АН СССР под руководством Ю.Н.Александрова. Затем эта работа перешла в Институт электронных управляющих машин Минприбора, где технической разработкой руководил Б.Я.Фельдман, а научное руководство осуществлялось Ю.Н.Александровым. Специализированный Фурье-процессор (СПФ-СМ), разработанный специально для обработки отраженных сигналов при съемке Венеры с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», в настоящее время выпускается промышленностью для научных исследований и народнохозяйственных целей.

Методика, алгоритмы и программы обработки информации создавались целиком в ИРЭ АН СССР. За полтора года до начала эксперимента выяснилось, что программы, написанные на стандартном языке Фортран, работают слишком медленно. Например, оказалось, что одна из 6 основных программ для обработки информации, полученной за один сеанс съемки (программа построения полосы радиолокационного изображения), требует 26 ч машинного времени. Поскольку заставить машину работать быстрее невозможно, пришлось применить «маленькие хитрости», такие, как переход на язык Ассемблер, использование целочисленной арифметики, разложение сложных функций в конечные ряды, интерполяция. Все, вместе взятое, сократило время счета примерно в 10 раз.

Математические программы должны были обеспечить полную обработку поступавшей информации, включая построение полос радиолокационных изображений и измерение высотного рельефа поверхности Венеры. Кроме быстроты счета, от них требовалась самостоятельность в принятии решений в случае возникновения искажений информации. В процессе обработки должны были вычисляться характерные значения параметров отраженных сигналов, такие, как мощность, частота, запаздывание, чтобы оперативно судить о работе радиолокатора и ходе обработки. О сложности программ судят по числу элементарных операций, на которые распадается программа. Некоторые программы имели до 4000 таких операций, а полное их число во всех программах достигало 50000! В мае 1983 г. за несколько месяцев до начала эксперимента по разным причинам уволилось несколько человек из числа тех сотрудников ИРЭ АН СССР, которые готовили алгоритмы и программы. В создавшейся ситуации, когда были потеряны те, кого в течение нескольких лет обучали «маленьким хитростям», никто помочь не мог. Выход был один - работать более напряженно, предельно целеустремленно. Некоторые работали

в период своего отпуска, в выходные дни. В последние два месяца работали с 8 утра до 8 вечера, но не больше, чтобы восстановить силы.

В результате все основные программы были отлажены к моменту поступления магнитных лент с записью информации первого сеанса съемки. Теперь мы находились на последнем этапе длинной цепи, начавшейся с создания радиолокатора и космического аппарата. От нашей работы зависело, насколько успешно завершится труд многих тысяч людей, участвующих в эксперименте. Это и было главным стимулом в работе.

Эксперимент такой сложности осуществлялся впервые, и когда в начале июня 1983 г. космические аппараты стартовали к Венере, было много опасений в его успехе. Сработает ли аппаратура? Не исказит ли изображение атмосфера Венеры? Правильно ли мы понимаем, как отражаются радиоволны поверхностью Венеры? Ведь после первых некачественных радиолокационных изображений, полученных в США, некоторые считали, что Венера такая же гладкая, как и бильярдный шар, и там нечего снимать!

И вот настали знаменательные дни. 16 октября 1983 г. космический аппарат «Венера-15» впервые осуществил радиолокационную съемку планеты Венера. 18 октября магнитные ленты с записью информации первого сеанса съемки скорым поездом были доставлены в Москву Е.П.Молотовым, который руководил разработкой аппаратуры приема и помехоустойчивой регистрации информации космических аппаратов. 20 октября около 15 ч на экране дисплея появился фрагмент первого изображения поверхности Венеры. Все работало безукоризненно.

Когда началась регулярная ежедневная съемка Венеры, стало нарастать отставание в обработке. Тогда в конце 1983 г. решено было перейти на двухсменную работу, включая субботу и воскресенье. Все сотрудники, участвующие в обработке, были разбиты на 3 бригады. Одна из них работала днем, другая - вечером, а третья - в эти сутки отдыхала. В создании сложного комплекса программ, разработке аппаратуры Центра и обработке информации большая роль принадлежала молодым научным сотрудникам А.И.Захарову, В.Е.Зимову, А.П.Кривцову, И.Л.Кучерявенковой, Н.В.Родионовой, В.П.Синило и В.А.Шубину.

Каждую неделю в Институт геохимии и аналитической химии АН СССР и Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии ГУГК передавалось 100 - 150 фотоотпечатков с изображениями и профилями высот поверхности Венеры.

Чтобы ускорить выпуск карт, было решено строить карты цифровыми методами, используя аппаратуру Центра. К середине 1987 г. для снятой территории Венеры построены все 27 карт в четырех вариантах. Они переданы на магнитных лентах в ЦНИИГАиК для подготовки к изданию. Две карты из них изданы небольшим тиражом в 1986 г. В ноябре 1987 г. А.А.Крымовым и О.С.Шампаровой закончено построение полной карты снятой территории Венеры, включившей в себя весь материал, полученный с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16».

Номенклатура деталей поверхности Венеры для издаваемых карт утверждена XIX Генеральной ассамблеей Международного астрономического союза, состоявшейся в ноябре 1985 г. в Дели. В подготовке номенклатуры принимали участие советские специалисты А.Т.Базилевский, Г.А.Бурба, М.Я.Маров, Ю.С.Тюфлин и др. Номенклатура содержит свыше 250 наименований. В ней широко представлены русские женские имена, женские имена народов СССР и социалистических стран. На картах Венеры мы встретим фамилии известных женщин-учеиых, поэтесс, актрис, общественных деятелей. Так, на первой изданной карте «Плато Лакшми» мы видим кратеры имени Екатерины Дашковой, Анны Ахматовой, Полины Осипенко, Эжени Коттон. Издание карт Венеры продолжалось в 1987 г.

Результаты радиолокационной съемки Венеры с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» вызвали огромный интерес не только в Советском Союзе. Готовясь к повторению радиолокационных исследований Венеры с орбиты

искусственного спутника по проекту «Магеллан», американские ученые обратились к Академии наук СССР с просьбой передать материалы радиолокационной съемки Венеры. Передача магнитных лент с изображениями и профилями высот поверхности Венеры осуществляется регулярно через совет «Интеркосмос». В свою очередь, мы получили все данные радиолокационной съемки Венеры с помощью космического аппарата «Пионер-Венера», а также подробные карты Марса, построенные по результатам телевизионной съемки с помощью космических аппаратов «Маринер-9» и «Викинг».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В 1983 - 1984 гг. с помощью советских космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» осуществлена детальная радиолокационная съемка северного полушария Венеры от полюса до широты 30°. Площадь снятой территории 115 млн. км², что составляет четвертую часть от общей площади поверхности Венеры. На полученных изображениях видны горные хребты, кратеры, плоскогорья, складки и разломы венерианской коры. Обнаружены многочисленные результаты тектонической активности Венеры. По результатам съемки построены и издаются карты северного полушария Венеры. Закрытая сплошным облачным слоем Венера стала доступной геологическому изучению, подобно Луне, Марсу и Меркурию.

Поверхность Венеры, слабо подверженная эрозии, запечатлела и сохранила все изменения, происшедшие на протяжении сотен миллионов лет под действием тектонических сил. Приближаясь по масштабам тектонической активности к Земле, Венера может служить моделью при изучении геологической истории нашей планеты. Огромный объем совершенно новой информации «кажет, несомненно, самое серьезное влияние на развитие наук о Земле: геологию, геохимию, геофизику.

Полет космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» открыл новую эпоху в изучении этой планеты. В обращении Генерального секретаря ЦК КПСС М. С. Горбачева к членам делегации конгресса лауреатов Нобелевской премии мира в ноябре 1985 г. этот эксперимент поставлен в один ряд с запуском первого спутника, первым полетом человека в космос и посадкой на Луну, посадкой автоматических станций на Венеру и Марс. Карта Венеры названа прекрасной!

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

Александров Ю. Н., Базилевский А. Т., Котельников В. А., Ржига О. Н., Сидоренко А. И. Вновь открытая планета (Радиолокационные исследования Венеры с космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»). - *Астрономия*. - Т. 32 (Итоги науки и техники, ВИНТИ АН СССР). - М., 1987. - С. 201.

Кауфман У. Дж. Планеты и Луна. - М.: Мир, 1982.

Кузьмин А. Д. Планета Венера. - М.: Наука, 1981.

Кутуза Б. Г., Ржига О. Н. Радиофизические исследования планет и Земли в Институте радиотехники и электроники АН СССР. Очерки истории радиоастрономии в СССР. - Киев.: Наукова думка, 1985. - С. 234.

Ржига О. Н. Радиолокационная астрономия. - Физика космоса. - М.: Советская энциклопедия, 1986. - С. 552.

Ржига О. Н., Александров Ю. Н., Сидоренко А. И., Базилевский А. Т. Лик Венеры. - Наука в СССР. - 1987. - № 2. - С. 30.

Подписное научно-популярное издание

Олег Николаевич РЖИГА

НОВАЯ ЭПОХА В ИССЛЕДОВАНИИ ВЕНЕРЫ

(Радиолокационная съемка с помощью космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»)

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин

Редактор Е. Ю. Ермаков

Мл. редактор С. С. Патрикеева

Обложка художника А. А. Астрецова

Худож. редактор Т. С. Егорова

Техн. редактор Н. В. Клецкая

Корректор О. А. Лагуненко

ИБ № 9251

Сдано в набор 11.12.87. Подписано к печати 26.02.88. Т-05337. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,37. Тираж 30 212 экз. Заказ 2499. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 884203. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.