УДК 621.37 ББК 32.8 К 73

Котельников В.А. **Собрание трудов.** В 3 т. Т. 3. **Радиолокационная астрономия** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 360 с. — ISBN 978-5-9221-1189-8.

Собрание трудов выдающегося российского ученого В.А. Котельникова (1908–2005) подготовлено к 100-летию со дня его рождения. В настоящий третий том вошли его работы по радиолокационному картографированию поверхности Венеры. Радиолокационные съемки поверхности планеты Венера, осуществленные в 1983–1984 гг. под руководством В.А. Котельникова, проводились с помощью бортовой комплексной радиолокационной системы автоматических межпланетных станций «Венера-15» и «Венера-16» и стали крупнейшим достижением планетной радиолокации. Получение глобальных изображений планеты, полностью закрытой облаками, стало выдающимся научным достижением, внесшим огромный вклад в мировую науку. Анализ этих изображений позволил существенно развить наши представления в области сравнительной планетологии.

Для ученых, специалистов, студентов, а также для всех, кого интересует история развития и достижения отечественной науки в области исследования космоса и радиоастрономии.

#### Комиссия по изданию трудов В.А. Котельникова

Ю.В. Гуляев (председатель комиссии) Н.Н. Удалов (зам. председателя комиссии) Н.А. Арманд (главный редактор)



#### Составитель — Н.В. Котельникова

### оглавление

Предисловие	6
Исследование области гор Максвелла планеты Венера космиче- скими аппаратами «Венера-15» и «Венера-16» (В. А. Котельников, Э. Л. Аким, Ю. Н. Александров, Н. А. Арманд, А. Т. Базилевский, А. Ф. Богомолов, А. С.Вышлов, В. М. Дубровин, Н. В. Жерихин, А. И. За- харов, В. Е. Зимов, В. И. Каевицер, В. М. Ковтуненко, Р. С. Кремнев, А. П. Кривцов, Г. А. Крылов, А. А. Крымов, И. Л. Кучерявенкова, Е. П. Молотов, Г. М. Петров, О. Н. Ржига, А. С. Селиванов, А. И. Си- доренко, В. П. Синило, А. В. Скнаря, Г. А. Соколов, В. П. Сорокин, К. Г. Суханов, В. Ф. Тихонов, Ю. С. Тюфлин, Б. Я. Фельдман, А. М. Ша- ховской и В. А. Шубин).	9
Первые результаты геолого-морфологического анализа радио- локационных изображений поверхности Венеры, полученных AMC «Венера-15» и «Венера-16» (Член-корреспондент АН СССР В. Л. Барсуков, А. Т. Базилевский, А. А. Пронин, Р. О. Кузьмин, В. П. Крючков, О. В. Николаева, И. М. Черная, Г. А. Бурба, Н. Н. Бо- бина, В. П. Шашкина, академик В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, Ю. Н. Александров, А. И. Сидоренко, В. М. Ковтуненко, Р. С. Кремнев, член-корреспондент АН СССР А. Ф. Богомолов, М. Н. Мешков, Н. В. Жерихин, Ю. С. Тюфлин, Э. Л. Аким, М. С. Марков, А. Л. Суханов)	19
<b>Radar Study of Venus Surface by Venera-15 and -16 Space-</b> <b>craft</b> ( <i>4V. A. Kotelnikov, A. F. Bogomolov and O. N. Rzhiga</i> )	27
<b>Радиолокация в исследованиях планет</b> (В. А. Котельников, О. Н. Ржига)	39
Venus: Detailed Mapping of Maxwell Montes Region (Yu. N. Alexand- rov, A. A. Crymov, V. A. Kotelnikov, G. M. Petrov, O. N. Rzhiga, A. I. Sido- renko, V. P. Sinilo, A. I. Zakharov, E. L. Akim, A. T. Basilevski, S. A. Kad- nichanski, Yu. S. Tjuflin)	50
Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокар- та поверхности Венеры, лист В-4) (А.А.Пронин, А.Л.Суханов, Ю.С.Тюфлин, С.А.Кадничанский, В.А.Котельников, О.Н.Ржига, Г.И.Петров, А.И.Сидоренко, Ю.Н.Александров, А.П.Кривцов, В.П.Синило, Г.А.Бурба, Н.Н.Бобина)	57

\_\_\_\_\_

Геолого-морфологическое описание Земли Иштар (фотокарта поверхности Венеры, лист В-5) (А. Л. Суханов, А. А. Пронин, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. И. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, А. И. Захаров, А. А. Крымов, Н. Н. Бобина)	74
<b>Геолого-морфологическое описание равнин Седны и Гиневры (ли- сты фотокарты В-11, В-20, В-21)</b> (А. А. Пронин, Г. А. Бурба, И. Н. Бо- бина, Ю. С. Тюфлин, А. И. Сидоренко, С. А. Кадничанский, М. В. Ост- ровский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, Ю. Н. Алек- сандров, В., А. Шубин, Н. В. Родионова)	87
<b>Геолого-морфологическое описание области тессер Фортуны и</b> <b>Мешкенет (фотокарта поверхности Венеры, лист В-6)</b> (А. Л. Суха- нов, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржи- га, Г. М. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, В. М. Дубровин, А. И. Захаров, Г. А. Бурба, В. И. Шашкина)	102
Геолого-морфологическое описание области тессеры Лаймы и равнины Берегини (фотокарта поверхности Венеры, лист В-12) (А. Л. Суханов, А. А. Пронин, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, В. П. Синило, А. П. Кривцов, И. И. Бобина, Г. А. Бур- ба)	116
Геолого-морфологическая характеристика северного по- лушария Венеры (В. Л. Барсуков, А. Л. Суханов, А. Л. Аким, Ю. Н. Александров, А. Т. Базилевский, М. Ю. Бергман, Н. Н. Бобина, А. Ф. Богомолов, И. М. Бокштейн, Г. А. Бурба, С. А. Кадничанский, В. А. Котельников, М. А. Кронрод, В. П. Крючков, Л. В. Кудрин, Р. О. Кузьмин, М. С. Марков, О. В. Николаева, Г. М. Петров, А. А. Пронин, О. Н. Ржига, Л. Б. Ронка, Ю. И. Сидоров, Г. М. Скрыпник, Ю. С. Тюфлин, И. М. Черная, П. А. Чочия, В. П. Шашкина)	132
The Geology and Geomorphology of the Venus Surface as Revealed by the Radar Images Obtained by Veneras15 and 16(V. L. Barsukov, A. T. Basilevsky, N. N. Bobinna, V. P. Kryuchkov, R. O. Kuzmin, O. V. Nikolaeva, A. A. Pronin, L. B. Ronca, I. M. Chernaya, V. P. Shashkina, A. V. Garanin, E. R. Kushky, M. S. Markov, A. L. Sukhanov, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. M. Petrov, Yu. N. Alexandrov, A. I. Sidorenko, A. F. Bogomolov, G. I. Skrypnik, M. Yu. Bergman, L. V. Kudrin, I. M. Bokshtein, P. A. Chochia, Yu. S. Tyuflin, S. A. Kadnichansky and E. L. Akim).	160
Вновь открытая планета (Радиолокационные исследования Венеры с космических аппаратов Венера 15 и Венера 16) (Ю. Н. Александ- ров, А. Т. Базилевский, В. А. Котельников, Г. М. Петров, О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко)	200
Создание радиолокационной карты планеты Венера (Ю. Н. Алек- сандров, В. М. Дубровин, А. И. Захаров, В. А. Котельников, А. А. Кры- мов, Г. М. Петров, О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко, В. П. Синило, Г. А. Со- колов)	235

Геолого-морфологическое описание области гряд Томэм и Геры (фотокарта поверхности Венеры, лист В-22) (А. Л. Суханов, Г. А. Бурба, В. П. Шашкина, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, А. А. Крымов, А. И. Захаров)	266
Геолого-морфологическое строение области Белл (фотокарта по- верхности Венеры, лист В-23) (М. С. Марков, Ю. С. Тюфлин, С. А. Кад- мичанский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, А. И. Сидо- ренко, Ю. Н. Александров, Н. В. Родионова, В. М. Дубровин, Г. А. Бурба, В. П. Шашкина)	277
Геолого-морфологическое описание тессеры Лаймы, области Теллуры и равнины Леды (фотокарта поверхности Венеры, лист В-13) (А. Л. Суханов, Н. Н. Бобина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, Л. С. Ледовская, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, Г. М. Петров, А. И. Захаров, А. П. Кривцов)	288
Геолого-морфологическое описание области Теллуры (фотокарта поверхности Венеры, лист В-24) (М. С. Марков, В. П. Шашкина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, Ю. Н. Александров, А. И. Сидоренко, В. П. Синило, Н. В. Родионова)	300
Геолого-морфологическое описание области гряд Лукелонг– Окипеты (фотокарта поверхности Венеры, лист В-2) (А. Л. Су- ханов, А. А. Пронин, Н. Н. Бобина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. И. Кабешкина, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Ю. Н. Александров, А. И. Сидоренко, Г. М. Петров, Н. В. Родионова, О. С. Зайцева)	312
Геолого-морфологическое описание района равнин Винмары и Ганики (фотокарта поверхности Венеры, лист В-8) (А.А. Про- нин, А.Л. Суханов, В.П. Шашкина, Г.А. Бурба, В.А. Котельников, О.Н. Ржига, Ю. Н. Александров, А.И. Сидоренко, Г.М. Петров, Г.А. Крылов, А.А. Крымов, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский)	323
<b>Геолого-морфологическое описание равнин Лоухи и Аталанты (фо- токарта поверхности Венеры, лист В-7)</b> (А. Л. Суханов, Н. Н. Бо- бина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельни- ков, О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко, Г. М. Петров, Ю. Н. Александров, В. П. Шубин, В. Е. Зимов, И. Л. Кучерявенкова)	334
Приложение. Атлас поверхности Венеры	347

5

### Предисловие

В третий том настоящего издания Собрания трудов выдающегося российского ученого Владимира Александровича Котельникова вошли работы по радиолокационному картографированию поверхности Венеры.

В.А. Котельников по праву считается основоположником целого ряда научных направлений, в число которых входят и исследования космоса. Одной из ярких страниц творческой биографии В.А. Котельникова явилось открытие нового научного направления — планетной радиолокации, начало которому было положено проведенными по инициативе, под руководством и при непосредственном участии Владимира Александровича блестящими экспериментами по радиолокации Венеры, Меркурия, Марса и Юпитера (1961–1964 гг.). Научные результаты, полученные в ходе этих выдающихся экспериментов, имеют исключительно важное значение как для астрономии, так и для управления дальними полетами космических кораблей. Дальнейшим развитием космической планетной радиолокации стала осуществленная в 1983-1984 гг. под руководством В.А. Котельникова радиолокационная съемка поверхности закрытой плотным слоем атмосферы планеты Венера, проведенная с помощью бортовой комплексной радиолокационной системы автоматических межпланетных станций «Венера-15» и «Венера-16». Идея эксперимента и его научно-методическая основа были разработаны в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР (ИРЭ АН СССР). Однако его успешная реализация стала возможна лишь благодаря объединению усилий коллективов многих научных и промышленных организаций. По инициативе В.А.Котельникова и, в основном, благодаря его усилиям, для осуществления этого выдающегося эксперимента был использован научный, технический и производственный потенциал отечественной радиотехники и космонавтики. Научно-производственным объединением им. С.А.Лавочкина были построены межпланетные станции «Венера-15» и «Венера-16» и обеспечивалось управление ими в ходе эксперимента. В особом конструкторском бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭЙ) была создана бортовая радиолокационная система. Научно-исследовательским институтом космического приборостроения (НИИКП) была разработана радиолиния и велся прием информации в Центре дальней космической связи в Крыму. В Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша Академии наук СССР (ИПМ АН СССР) проводилась обработка траекторных измерений. Во Фрязинском филиале ИРЭ АН СССР был создан компьютерных центр, проведена вся обработка полученного материала и созданы цифровые карты Венеры. В Институте геохимии Академии наук СССР (ГЕОХИ АН СССР) был проведен геолого-морфологический анализ полученных данных. В Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского (ЦНИИГАиК) были разработаны математические основы картографического обеспечения, производилась подготовка карт. На этапе создания Атласа поверхности Венеры к работе были подключены и некоторые другие организации.

В. А. Котельников в ходе проведения работ по проекту выступал неформальным лидером, под его научным руководством осуществлялась реализация фундаментальных идей и методов этого уникального эксперимента. Владимир Александрович сыграл решающую роль и в обеспечении согласованной работы всех организаций-участников эксперимента, что позволило успешно осуществить этот грандиозный проект.

Поскольку поверхность Венеры постоянно закрыта облаками, то получить ее изображение в оптическом диапазоне волн и с Земли и с искусственного спутника планеты, как это было сделано при исследовании Луны, нельзя. Съемка поверхности стала возможной лишь с борта аппаратов, опускающихся на поверхность планеты. Осуществлено это было в 1975 г. с помощью космических аппаратов «Венера-9» и «Венера-10», однако площадь наблюдаемого ими участка поверхности была слишком мала для того, чтобы делать существенные выводы относительно геологического строения планеты. Для этого необходимы изображения больших территорий, которые можно получить лишь с помощью спутников.

Эта задача и была решена в 1983–1984 гг. миссиями «Венера-15» и «Венера-16». Установленные на их борту радиолокаторы с синтезированной апертурой позволили с расстояния 1000 км получить радиоизображение поверхности планеты с высоким пространственным разрешением.

В результате успешного выполнения эксперимента была выполнена съемка 115 млн. км<sup>2</sup> (25 % поверхности планеты) северного полушария Венеры с разрешением порядка 1 км.

После обработки полученных уникальных данных был создан и впоследствии издан первый в истории науки «Атлас поверхности Венеры», главным редактором которого являлся академик В. А. Котельников.

Получение глобальных изображений планеты, полностью закрытой облаками, стало выдающимся научным достижением, внесшим огромный вклад в мировую науку. Анализ этих изображений позволил существенно развить наши знания в области сравнительной планетологии.

При реализации этого проекта были сделаны важные шаги в развитии техники обработки радиолокационных изображений. В частности, впервые в Советском Союзе проведена процедура получения цифрового изображения. Накопленный опыт в дальнейшем использовался при создании программного обеспечения для обработки данных радиолокатора с синтезированной апертурой орбитального комплекса «Алмаз», предназначавшегося для радиолокационного картографирования поверхности Земли с пространственной разрешающей способностью 10 м.

Радиолокационные исследования планет Солнечной системы, инициированные и проведенные под руководством В.А. Котельниковым, получили продолжение в программах ИРЭ РАН, направленных на развитие техники подповерхностного зондирования планет с борта их искусственных спутников.

Поскольку Атлас поверхности Венеры, содержащий 328 страниц форматом 500 мм на 350 мм с изображениями карт, воспроизвести в настоящем томе невозможно, то для общего представления об этом уникальном издании в Приложении к настоящему тому приводятся оглавление и несколько иллюстраций из Атласа.

Н.А. Арманд

Н.В. Котельникова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ ГОР МАКСВЕЛЛА ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16»

В. А. Котельников, Э. Л. Аким, Ю. Н. Александров, Н. А. Арманд,

А. Т. Базилевский, А. Ф. Богомолов, А. С.Вышлов, В. М. Дубровин,

Н. В. Жерихин, А. И. Захаров, В. Е. Зимов, В. И. Каевицер, В. М. Ковтуненко,

Р. С. Кремнев, А. П. Кривцов, Г. А. Крылов, А. А. Крымов, И. Л. Кучерявенкова,

Е. П. Молотов, Г. М. Петров, О. Н. Ржига, А. С. Селиванов, А. И. Сидоренко,

В. П. Синило, А. В. Скнаря, Г. А. Соколов, В. П. Сорокин, К. Г. Суханов,

В. Ф. Тихонов, Ю. С. Тюфлин, Б. Я. Фельдман, А. М. Шаховской и В. А. Шубин

Письма в АЖ, 1984, т. 10, № 12, с. 883-889

С помощью радиолокационной системы космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», обеспечивающей высокое пространственное разрешение, получены некоторые данные о геологическом строении гор Максвелла — самой высокой области Венеры. Установлено, что они и значительная часть окружающей местности образованы горизонтальными тектоническими деформациями сжатия, что сближает их со складчатыми горами Земли. Примыкающие к горам Максвелла равнины, вероятно, сформированы базальтовыми излияниями подобно равнинам морского типа других планетных тел земной группы. Депрессия Патеры Клеопатры по своему строению похожа на двухкольцевые ударные кратеры, а не на вулканические кальдеры.

Study of the Maxwell Montes Region on Venus by Venera 15 and Venera 16 Spacecrafts, by V. A. Kotel'nikov, Eh. L. Akim, Yu. N. Aleksandrov, N. A. Armand, A. T. Bazilevskij, A. F. Bogomolov, A. S. Vyshlov, V. M. Dubrovin, N. V. Zherikhin, A. I. Zakharov, V. E. Zimov, V. I. Kaevitser, V. M. Kovtunenko, R. S. Kremnev, A. P. Krivtsov, G. A. Krylov, A. A. Krymov, I. L. Kucheryavenkova, E. P. Molotov, G. M. Petrov, O. N. Rzhiga, A. S. Selivanov, A. I. Sidorenko, V. P. Sinilo, A. V. Sknarya, G. A. Sokolov, V. P. Sorokin, K. G. Suchanov, V. F. Tikhonov, Yu. S. Tyuflin, B. Ya. Fel'dman, A. M. Shakhovskoj and V. A. Shubin. The data on geological structure of Maxwell Montes, the highest region of Venus, are obtained by means of the radar system of the Venera 15 and Venera 16 spacecrafts, providing high surface resolution. It is found that Maxwell Montes and significant part of the locality are formed by horizontal tectonic deformation of compression origin, approximating them to folded mountains of the Earth. Adjacent to the Maxwell Montes plains, possibly, are formed with basaltic extrusions similar to sea-type plain of other earth-group planetary body. Patera Cleopatra depression is similar to double-ring craters of impact origin rather than volcanic calderas.

Основной задачей космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», выведенных в середине октября 1983 г. на орбиту спутников планеты Венера, является радиолокационное картографирование ее поверхности. За 8 мес., с 11 ноября 1983 г. по 10 июля 1984 г., снято все северное полушарие планеты выше 30° общей площадью 115 млн. км<sup>2</sup>. В настоящем сообщении приведены результаты радиолокационного картографирования области гор Максвелла — одного из интереснейших образований на поверхности Венеры. При радиолокационной съемке Венеры космическим аппаратом «Пионер-Венера» (Мазурский и др., 1980) было установлено, что горы Максвелла — самые высокие на Венере, однако из-за низкого пространственного разрешения достоверных заключений об их природе сделать было нельзя.

Космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» оборудованы радиолокационной системой 8-см диапазона волн, состоящей из радиолокационной станции бокового обзора и радиовысотомера-профилографа. Они выведены на близкие к полярным эллиптические орбиты с периодом обращения 24 ч. Расстояние аппаратов от поверхности Венеры в перицентре, приходящемся примерно на 60° северной широты, около 1000 км, в апоцентре — 65 000 км.

Во время радиолокационной съемки, проводящейся в районе перицентра, с помощью системы астроориентации космического аппарата электрическая ось антенны радиовысотомера-профилографа направлена по местной вертикали к центру планеты. Электрическая ось антенны радиолокационной станции бокового обзора отклонена от местной вертикали на угол в 10° и находится в плоскости, проходящей через местную вертикаль перпендикулярно плоскости орбиты (рис. 1). Элементы поверхности в пределах «освещенного» радиоволнами пятна находятся на разном расстоянии и движутся с разными радиальными скоростями относительно космического аппарата. Поэтому отраженные ими и принятые на космическом аппарате сигналы по-разному запаздывают друг относительно друга 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 D, которая удаляется. Это и используется для разделения радиоволн, отраженных отдельными элементами поверхности, и построения изображения. В одном прохождении космического аппарата снимается полоса поверхности длиной 7000-8000 км, вытянутая вдоль трассы. К следующему прохождению планета поворачивается на угол около 1.5° и снимается новая полоса.

Вследствие резкой зависимости коэффициента обратного рассеяния поверхности планеты от угла  $\varphi$  (рис. 2), составляемого падающим



Рис. 1. Схема радиолокационной съемки

лучом и нормалью к данному элементу поверхности, изменение угла  $\varphi$  в пределах  $\pm 10^{\circ}$  относительно среднего значения  $10^{\circ}$ , определяемого ориентацией электрической оси антенны, приводит к изменению мощности отраженного сигнала в пределах ( $\pm 10 \, {\rm div} - 8$ ) дБ, что и определяет контраст радиолокационного изображения.

Отсчеты мгновенного напряжения отраженного сигнала запоминаются на борту космического аппарата и затем передаются на Землю для обработки. Разделение отраженных сигналов по запаздыванию момента их прихода и доплеровскому смещению частоты и построение радиолокационного изображения и профилей высот поверхности Венеры производятся на Земле цифровыми методами. Пространственное разрешение полученных изображений в проекции на поверхность планеты перпендикулярно трассе составляет 0,9–1,5 км, вдоль трассы — 1,2–2,5 км в диапазоне высот 1000–2000 км.

При обработке для каждой точки изображаемой поверхности вычисляется наклонная дальность и радиальная составляющая скорости относительно космического аппарата, для чего используются данные о его расстоянии и скорости по отношению к центру масс Венеры. Шаг по обеим координатам (0,8 км) меньше исходного разрешения. Эта методика учитывает изменение высоты и скорости космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, и возможные (как



Рис. 2. Коэффициент обратного рассеяния  $\sigma(\varphi)$  элемента поверхности (изображен справа), характеризующий мощность отраженных сигналов в зависимости от угла падения: 1 — поверхность Венеры в 8-см диапазоне волн (по данным, полученным ранее при радиолокации с Земли); 2 — диффузное рассеяние (оптические волны

правило, в пределах  $\pm 0^{\circ}$ ,5), отклонения электрической оси антенны от среднего положения. Устраняется неравномерность освещенности по полю изображения, вызванная неравномерностью усиления в диаграмме направленности антенны и неравномерностью диаграммы обратного рассеяния поверхности планеты. Средняя мощность отраженных сигналов сглаживается вдоль полосы скользящим окном размером 160 км. Для согласования с динамическим диапазоном фотопленки измерения мощности отраженного сигнала перед выводом изображения через фототелеграфный аппарат логарифмируются.

Полученное распределение мощности отраженных сигналов радиовысотомера-профилографа по запаздыванию момента их прихода сравнивается с рядом моделей этого распределения, отличающихся значениями коэффициента шероховатости и дисперсии высот в «освещенном» пятне поверхности (рис. 1) и вычисленных с учетом высоты космического аппарата и возможного отклонения электрической оси антенны от местной вертикали. Измерения, следующие через 0,3 с, усредняются по 7 измерений скользящим окном и наносятся по трассе космического аппарата с учетом отклонения электрической оси антенны. Результат дает высоту аппарата OS над средней поверхностью в пятне диаметром 40–50 км со среднеквадратичной ошибкой около 30 м. На рис. З приведена часть полосы, снятой 20 января 1984 г. космическим аппаратом «Венера-16». На ней изображен район гор Максвелла с огромным кратером Патера Клеопатра диаметром около 100 км. По горизонтальной оси отложено угловое расстояние относительно перицентра, по вертикальной — угловое расстояние относительно плоскости орбиты, измеренные в градусах из центра планеты. Длина фрагмента 1100 км при полной ширине изображенной полосы 156 км (полезная часть изображения несколько у́же).

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.

С радиолокационным изображением совмещен профиль высот, полученный тремя днями раньше, трасса которого Т-Т показана белой линией. Справа по вертикальной оси для профиля высот дана величина радиуса поверхности планеты в данной точке в километрах, вычисленная как разность расстояния космического аппарата от центра планеты и измеренной высоты.

Максимальная высота горного массива для данного профиля составляет 11 км над средним радиусом Венеры, в качестве которого Международный астрономический союз принял значение 6051 км. Кратер, который пересекла трасса измерений высоты, расположен на склоне горного массива и имеет сложную форму. Из сопоставления изображения с профилем следует, что внутри большого 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 и его смещению, которое было учтено при нанесения трассы радиовысотомера-профилографа на изображение.

На основе данных, полученных космическими аппаратами «Венера-15» и «Венера-16», будут созданы карты, которые позволят изучить процессы, протекающие на поверхности Венеры, и судить об истории развития планеты. На рис. 4 приведен фрагмент фотокарты Венеры для области гор Максвелла, построенный по результатам радиолокационной съемки космического аппарата «Венера-16» ежедневно с 12 по 25 января 1984 г.

Радиолокационные изображения для каждого дня съемки наносились на сферу радиуса 6051 км в венорографической системе координат<sup>1</sup>), а затем проектировались на коническую поверхность, проведенную через две стандартные параллели. Проектирование велось

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>) В соответствии с рекомендацией Международного астрономического союза прямое восхождение северного полюса Венеры принято 272°,8, склонение 67°,2; период вращения 243,01 сут. Венерографическая долгота определя-





Рис. 4. Фотокарта области гор Максвелла, построенная по результатам радиолокационной съемки космического аппарата «Венера-16» с 12 по 25 января 1984 г. Проекция — нормальная равноугольная коническая Ламберта-Гаусса. Стандартные параллели: 58°,3 и 72°,4. Линии равных высот следуют с шагом 0,5 км относительно среднего радиуса планеты 6051 км. Радиоволны падают с востока под углом около 10° к средней вертикали

цифровыми методами с шагом 0,8 км на плоскости фотоплана. Использовалась линейная интерполяция мощности отраженного сигнала по трем ближайшим точкам. В местах перекрытия соседних полос ее величина бралась с весом, убывающим линейно к краю изображения.

При проектировании данных учитывалась высота местного рельефа и вносились поправки в координаты космического аппарата, уточненные по методике, учитывающей возмущения параметров орбиты при работе двигателей системы астроориентации. Сравнение с рис. 3 показывает, что учет высоты местного рельефа практически устраняет перспективные искажения, особенно заметные в районе Патеры Клеопатра.

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

Общая площадь территории, представленной на фотокарте, составляет 2 млн. км<sup>2</sup>. Ее центральную часть занимают самые высокие на Венере горы Максвелла с Патерой Клеопатра, для которых один из профилей высот был приведен на рис. 3. Наиболее высокая область находится к западу от Патеры Клеопатра, где в овале протяженностью 400 км с севера на юг и 200 км с запада на восток осредненные высоты поверхности превышают уровень 10 км. Примерно в середине этого овала в 200 км к западу от Патеры Клеопатра (долгота 3°, широта 66°) находится точка с высотой 11,5 км, зафиксированная радиовысотомером-профилографом космического аппарата «Венера-16» 14 января 1984 г.

На западе горы Максвелла кончаются уступом, к которому примыкает плато Лакшми высотой 4–5 км. С юго-запада Горы Максвелла обрываются еще более крутым уступом, к которому подходит краевая часть равнины Седны, где высоты уменьшаются с севера на юг от 3 до 1,5 км. В юго-восточном, восточном и северном направлениях от гор Максвелла местность понижается не столь резко. На крайний север территории, показанной на карте, заходит небольшой участок обширной околополярной равнины, открытой по результатам съемки космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16», которой предполагается дать название «Аврора».

Геолого-морфологическое изучение представленной фотокарты и исходных полос изображения и анализ стереомодели северной части этой территории, где имеется значительное перекрытие соседних полос, приводит к следующим заключениям.

ется таким образом, что 20 июля 1964 г. на 0 ч эфемеридного времени долгота центрального меридиана Венеры составляла 320°.

Горы Максвелла и местность к северо-востоку, востоку и юговостоку от них образованы нагромождением множества тектонических чешуй, выражающихся в рельефе в виде асимметричных (восточный склон круче западного) хребтов с простиранием, близким к меридианальному. Ширина этих хребтов от 4–5 до 15–20 км при длине от нескольких десятков до сотен километров. Возможно, что некоторые из этих форм представляют собой крутые складки, хотя при анализе стереомодели взбросонадвиговая природа большинства этих хребтов-чешуй кажется вполне очевидной. В любом случае это приводит к однозначному выводу о формировании наблюдаемых структур в результате горизонтальных тектонических деформаций в обстановке сжатия, что сближает их со складчатыми горами Земли. Направление сжатия — близкое к широтному.

В северо-западной части описываемой территории наблюдается местность, сложенная полосовидными блоками северо-восточного и северо-западного простирания шириной 50–100 км, длиной в пределах нескольких сотен километров. Внутреннее строение этих относительно крупных блоков определяется множеством мелких (5–10 км в длину, редко больше) чешуй взбросонадвигов и тектонических блоков второго порядка. Ориентировка их на большей части каждого блока примерно перпендикулярна его простиранию, а ближе к периферии нередко разворачивается и согласно смыкается со структурными линиями разделов между блоками. Эти границы между блоками обычно имеют вид протяженных систем узких параллельных хребтов и, вероятно, являются зонами тектонических сдвигов. По своей природе эта блоковая местность, по крайней море там, где блоки состоят из мелких чешуй, близка к образованиям гор Максвелла. Возрастные и генетические соотношения между этими образованиями требуют дальнейшего изучения.

Местность равнинного типа, присутствующая на севере, западе и юго-западе описываемой территории, по общей морфологии похожа на базальтовые равнины морского типа Луны, Меркурия, Марса, а также дна земных океанов. Вероятно, ее поверхность тоже сформирована покровами базальтовых лав. Этот процесс, очевидно, является универсальным механизмом дифференциации недр планетных тел земного типа (Барсуков, 1981). За пределами описываемой территории на похожих поверхностях равнины Седны и плато Лакшми иногда дешифруются протяженные лавовые потоки. На некоторых равнинных участках наблюдаются системы зияющих борозд-трещин, свидетельствующие о тектонических деформациях в обстановке растяжения.

Депрессия патеры Клеопатра по своему строению похожа на двухкольцевые ударные кратеры типа бассейна Шредингер на Луне, бассейна Ахмад-Баба на Меркурии и бассейна Ловелл на Марсе и не похожа на вулканические кальдеры. Вокруг Патеры Клеопатра наблюдается асимметричная зона частично выравненной поверхности, сложенная, вероятно, выбросами из этого кратера. Близкие по строению двухкольцевые ударные бассейны обнаружены на изображениях «Венеры-15» и «Венеры-16» и за пределами описываемой территории. Поскольку родовой термин «патера» присваивается, как правило, округлым депрессиям вулканической природы, а патера Клеопатра, вероятно, образование ударное, придется, видимо, ставить вопрос об изменении его названия на «Кратер Клеопатра».

#### Литература

- 1. Барсуков В. Л., отв. ред. Очерки сравнительной планетологии. М.: Наука, 1981.
- 2. *Мазурский и др.* (Masursky H., Eliason E., Ford P. G., McGill G. E., Pettengill G. H., Schaber G. G., Schubert G.) J. Geophys. Res., 1980, v. 85, p. 8232.

Ин-т радиотехники и электроники АН СССР, Москва

Поступила в редакцию 17 сентября 1984 г.

# ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫХ АМС «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16»

Член-корреспондент АН СССР В. Л. Барсуков, А. Т. Базилевский,

А. А. Пронин, Р. О. Кузьмин, В. П. Крючков, О. В. Николаева, И. М. Черная,

Г.А.Бурба, Н.Н.Бобина, В.П.Шашкина, академик В.А.Котельников,

О. Н. Ржига, Г. М. Петров, Ю. Н. Александров, А. И. Сидоренко,

В. М. Ковтуненко, Р. С. Кремнев, член-корреспондент АН СССР

А. Ф. Богомолов, М. Н. Мешков, Н. В. Жерихин, Ю. С. Тюфлин, Э. Л. Аким, М. С. Марков, А. Л. Суханов

Доклады Академии наук СССР, 1984. Том 279, №4, с. 946-949

В настоящей работе изложены первые результаты геолого-морфологического анализа радиолокационных изображений поверхности Венеры, полученных АМС «Венера-15» и «Венера-16» с начала регулярной съемки 11 XI 1983 г. по 7 IV 1984 г. Изображения получены радиолокаторами бокового обзора, устройство и особенности работы которых описаны в [1]. Съемкой захвачены участки местности шириной около 160 км и длиной до 8000 км. Полосы монтировали в фотоплан с разрешением 1–2 км на местности. Частичное перекрытие соседних полос создает возможность анализа стереомодели.

Съемка проводилась с околополярной эллиптической орбиты с широтой перицентра около 62° с.ш. Территория, геолого-морфологический анализ которой уже выполнен, расположена между 270 и 140° в. д. и 25–30 и 75–80° с.ш. (рис. 1). Она включает в себя известные по ранее проведенной КА «Пионер-Венера-Орбитер» съемке низкого разрешения [2] крупную горную область земли Иштар, равнины Гиневры, Седны, Леды и Ниобы, возвышенные области Теллуры, Белл и частично Бета. Большая площадь покрытия, высокое разрешение и хорошее качество изображений радиолокационной съемки АМС «Венера-15» и «-16» впервые создали основу для аргументированного регионального геолого-морфологического анализа поверхности Венеры.



Рис. 1. Орографическая схема северного полушария Венеры с указанием районов, показанных на рис. 2 и 3. Штриховая линия — граница проанализированной территории

По результатам этого анализа в исследованной области выделяются несколько типов местности.

Специфической местностью, не имеющей прямых аналогов на других планетах, занята бо́льшая часть земли Иштар и область Теллуры. Структурный рисунок этой сильно пересеченной территории удобно называть условным термином «паркет». Выделяются два основных типа паркета и ряд промежуточных разновидностей. К востоку от гор Максвелла на площади около  $1000 \times 3000$  км развит паркет с диагонально-хаотическим структурным рисунком (рис. 2, *a*). Его основные рельефо-образующие элементы — относительно короткие (первые десятки километров) хребты с асимметричными склонами, образованные наклонно залегающими мощными пластинами (пластами?) горных пород. Хребты-пластины разделяются продольными и поперечными долинами, образуются диагональные и хаотические системы, внешне напоминающие картину торошения застывшей корки на поверх-



Рис. 2. *а* — участок паркета с диагонально-хаотическим структурным рисунком, земля Иштар к востоку от гор Максвелла; *б* — участок паркета с ортогональным структурным рисунком, юго-восточная часть земли Иштар; *в* — северная часть плато Лакшми и обрамляющие горы Акны (слева) и Фрейи (вверху справа). В левой части рисунка — два ударных кратера с центральными горками. Здесь и на рис. 3 стрелка указывает направление на север, длина масштабной линейки 100 км

ности лавовых потоков. Вероятно, поверхность такого типа образована нагромождением тектонических чешуй при горизонтальных движениях в обстановке сжатия толщ, возможно, слоистого строения.

К юго-востоку от гор Максвелла развита другая разновидность паркета — обширная (1000  $\times$  1500 км) область ортогональных хребтов и долин (рис. 2,  $\delta$ ). Основные рельефообразующие элементы этой местности — протяженные (сотни километров) параллельные друг другу долины и между ними короткие поперечные расселины, чередующиеся с хребтами. Возникшая ортогональная система по структурному рисунку напоминает зоны растяжения в некоторых структурах Земли. Местность этого типа также имеет тектоническую природу и также образована горизонтальными движениями, но уже в обстановке растяжения.

В западной части земли Иштар находится обширное плато Лакшми. Его относительно гладкая поверхность внешне напоминает сложенные базальтовыми излияниями равнины (рис. 2, в). Эта поверхность осложнена депрессиями двух крупных плоскодонных кальдер Колетт и Сакаджавея, по ряду признаков похожих на вершинные кальдеры гигантских щитовых вулканов Марса. Система протяженных (до 150–200 км) лавовых потоков, выделяющихся повышенной радиояркостью поверхности (вероятно, за счет высокой шероховатости), тяготеет к кальдере Колетт как наиболее молодому центру излияний.

Плато Лакшми практически со всех сторон окружено областью линейных хребтов и долин, ориентированных параллельно его границам, что указывает на генетическую связь зоны обрамления со структурой плато. В это обрамление входят, в частности, горы Акны, Фрейи и Максвелла (рис. 2, в). Иногда системы таких линейных образований встречаются вне связи с плато Лакшми, в виде протяженных поясов на вулканических равнинах (см. ниже). Природа зон линейных хребтов и долин, несомненно, тектоническая. По-видимому, это результат складкообразования при горизонтальных перемещениях в условиях сжатия.

Остальная часть изученной территории занята равнинами двух типов. Гладкие равнины морфологически сходны с базальтовыми равнинами морского типа на Луне, Меркурии и Марсе (рис. 3, *a*). Спецификой венерианских равнин является присутствие относительно небольших куполообразных возвышенностей, иногда с вершинными кратерами, и узких (первые километры)протяженных (сотни километров) гряд. В общем почти бесструктурная поверхность гладких равнин сформирована в основном площадными базальтовыми излияниями, возможно с участием эоловых осадков.

К западу, востоку и местами к югу от земли Иштар развиты холмистые равнины, отличающиеся от гладких повышенной расчлененностью поверхности. Характерным для них является «просвечивание» крупных кольцевых структур, иногда встречаются останцовые возвышенности с рельефом диагонально-хаотического паркета. На некоторых участках



Рис. 3. *а* — участок вулканической равнины Седны с останцами паркета и сетью узких радиоярких гряд; *б* — овоид к западу от гор Акны; *в* — овоид к северо-западу от области Бета; *г* — участок северной части области Бета, видна система уступов с простиранием, близким к меридианальному

видны скопления куполов с вершинными кратерами и без них. В формировании холмистых равнин, так же как и гладких, значительную роль играли, очевидно, базальтовые излияния. Однако «просвечивание» более древних структур указывает на относительно небольшую мощность в этих местах равнинообразующего материала.

Местами на равнинах выделяются очень крупные кольцевые структуры — овоиды диаметром от 150-200 до 500-600 км, которые очерчиваются системой концентрически-параллельных кольцевых или дугообразных гряд (рис. 3, 6, в). Эти структуры не имеют прямых морфологических аналогов на других планетных телах. В системе планетной номенклатуры им предлагается присвоить термин «венцы» (согоnae). Природа овоидов в наблюдаемой сейчас их форме, несомненно, тектоно-магматическая. Гряды, очерчивающие овоиды, возникли, видимо, при гравитационном оползании и смятии горных пород на склонах растущего куполообразного поднятия (мантийный диапир, горячая точка?),что хорошо воспроизводится при лабораторном моделировании. Внутри одного из овоидов видны радиально расходящиеся системы гряд, которые, возможно, являются отражением этапа прекращения роста и проседания поднятия и также хорошо воспроизводятся при моделировании. Структурными (но не морфологическими из-за эрозионного среза) аналогами венерианских овоидов могут быть крупные круговые структуры в раннеархейских образованиях Земли.

Возвышенная область Бета заходит в пределы описываемой территории лишь своим северным краем (рис. 3, *г*). Граница ее с примыкающими к ней с севера равнинами постепенная — местность повышается и осложняется прерывистыми уступами субмеридионального простирания, которые иногда обращены навстречу друг другу, образуя грабенообразные депрессии. В целом этот структурный рисунок создавался в обстановке тектонического растяжения на фоне сводового поднятия.

Область Белл изучена пока фрагментарно. Обработка изображений ее центральной части еще не закончена. На ее западном фланге находится относительно крупная вулканическая возвышенность с вершинным кратером диаметром около 30 км, от которого в западном направлении на 300 км протянулся сигарообразной формы шлейф с повышенной радиояркостью поверхности. Это может быть зона развития пирокластических отложений.

На всех охарактеризованных типах местности наблюдаются ударные кратеры диаметром от 10 до 100 км (рис. 2, в). По морфологии они близки к ударным кратерам соответствующего размера на других планетных телах [3]. По плотности кратеров модельная оценка возраста (определяемого возрастом преобладающих по площади равнин) всей изученной территории составляет около 0,5–1 млрд. лет. Областей с высокой плотностью кратеров, соответствующей этапу интенсивной метеоритной бомбардировки (более 3,9 млрд. лет назад), на изученной территории нет.

Итак, радиолокационная съемка поверхности Венеры АМС «Венера-15» и «-16» позволила ввести в число геологических объектов сравнительной планетологии недостающее звено — планету размером с Землю, с развитой атмосферой, но без гидросферы.

Оказалось, что по интенсивности экзогенных процессов Венера резко уступает Земле и по этому признаку примыкает, скорее, к небольшим планетным телам (Луна, Меркурий, Марс). На Земле морфологические черты ударных кратеров утрачиваются всего за 10 млн. лет (их нет у кратеров древнее плиоценовых), а на Венере ударные кратеры сохраняют отчетливую морфологическую выраженность в течение примерно 1 млрд. лет (с протерозоя). Каких-либо следов водной эрозии или других процессов с жидкой водой в рельефе Венеры не обнаружено, хотя эоловое перераспределение материала, очевидно, имеет место [4]. На поверхности Венеры мы видим уникальную, по земным меркам, ситуацию — прямой тектоно-магматический рельеф, практически не нарушенный экзогенной переработкой.

Геологическое прочтение этого рельефа обнаруживает, что по уровню эндогенной (особенно, тектонической) активности Венера резко выделяется на фоне Луны, Меркурия и даже Марса. В этом отношении она сопоставима лишь с Землей. Действительно, признаки крупных горизонтальных тектонических движений до сих пор были известны только на Земле, а теперь мы знаем, что они есть и на Венере и проявляются в виде деформаций сжатия (со складкообразованием и возникновением тектонических чешуй) и растяжения (образование структур, напоминающих земные зоны рифтогенеза).

Площадной базальтовый вулканизм развивается на всех планетных телах земной группы, и Венера в этом отношении не составляет исключения. Это еще раз подтверждает ранее высказанный [3] тезис о том, что базальтовый вулканизм является универсальным процессом дифференциации недр планетных тел земного типа. Отметим, однако, что средний возраст площадных базальтовых излияний, сформировавших равнины изученной территории Венеры, 0,5–1 млрд. лет, тогда как на Луне и Меркурии аналогичные образования имеют возраст 3–4 млрд. лет, а базальтовые равнины ложа земных океанов продолжают формироваться до сих пор.

Принципиально важным фактором является то, что несмотря на слабую экзогенную переработку поверхности Венеры, на ней не обнаруживается рельефа материковой коры в том его обильно кратерированном облике, который характерен для Луны, Меркурия, Марса. Нет такого рельефа и на Земле. Причины этих различий следует искать, вероятно, в разном характере самых ранних процессов становления коры на небольших и более крупных планетных телах. Для последних характерно наличие атмосферы и осадочных образований, региональный метаморфизм пород. Эти процессы могут провоцироваться не только эндогенными причинами, но и крупными ударными событиями [5]. Основная масса корового вещества Земли представлена глубокометаморфизованными породами. На Венере также можно ожидать метаморфические образования, тесно переплетающиеся с магматическими и, наверное, не похожие на земные из-за разницы состава флюидов. Предстоящее детальное дешифрирование равнин Венеры с их кольцевыми структурами вплотную подведет к познанию ранней геологической истории Земли с ее неясными тенями крупных кольцевых структур архея и постепенно затухающим региональным метаморфизмом.

### Литература

- 1. Ржига О. Н. Земля и Вселенная, 1984, вып. 1, с. 2.
- 2. Masursky H. et. al. J. Geophys. Res., 1980, vol. 85, № A13, p. 8232.
- 3. Очерки сравнительной планетологии / Ред. К.П. Флоренский и др. М.: Наука, 1981. 326 с.
- 4. Флоренский К. П. и др. Космич. исследов., 1983, т. 21, вып. 3, с. 340.
- 5. Grieve R.A.F. Precambrian Res., 1980, vol. 10, № 3/4, p. 217.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Академии наук СССР

Институт радиотехники и электроники Академии наук СССР

Совет «Интеркосмос» Академии наук СССР

Московский энергетический институт

Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Академии наук СССР Геологический институт Академии наук СССР, Москва

Поступило 1 Х 1984

## RADAR STUDY OF VENUS SURFACE BY VENERA-15 AND -16 SPACECRAFT

4V. A. Kotelnikov, A. F. Bogomolov and O. N. Rzhiga

Adv. Space Res. 1985, Vol. 5, № 5, P. 5-16

Description is given of the first results of radar study of Venus surface by Venera 15 and 16 spacecraft. Unique images of the Venus surface were obtained on which mountain ridges, craters, plateau, folds and breaks of the Venus crust are seen. Indications of tectonic activity of Venus were discovered. Areas with anomalous character of radio waves reflection were found.

#### Introduction

On June 2, 1983 an interplanetary station Venera 15 with radar equipment for mapping Venus surface was launched. On June 7 a similar interplanetary station Venera 16 was sent in the same direction. 130 days later, on October 10 and 14, 1983 both spacecraft were placed in the elliptical orbits of Venus satellites. After correcting the orbits and carrying out tests of radar equipment, on November 11, 1983 a regular mapping of Venus surface began.

The main aim of the cosmic experiment, which is underway for more than half a year is to obtain radar images of Venus surface, to measure of height profile along the path of the spacecraft, as well as the study of the local characteristics of radio waves reflection [1].

The synthetic aperture side-looking radar which was installed on the Venera 15 and 16 (Fig. 1) gives a surface resolution of 1-2 km. A radio altimeter has a rootmeansquare error not more than 50 m. The wave length of both systems, radar and altimeter, is 8 cm.

#### **Principles of the experiment**

To get a separate image of the elements of Venus surface, which have dimensions of 1-2 km, from a height of 1000-2000 km, the surface resolution must be such as an unequipped eye would give observing Venus surface from the same height, if there were no dense clouds. Ordinary antennas can't ensure the necessary resolution. That is why a radar method with synthetic aperture was used.



Fig. 1. General view of Venera 15 and 16 spacecraft

With the help of a radar transmitter and antenna which are installed on the spacecraft a region of the planet surface from the side of the path is «illuminated» by radio waves. The angle between the electrical axis of the antenna and the local vertical is  $10^{\circ}$  (Fig. 2). The surface elements in the limits of the «illuminated» spot are found on different distances and they move with different radial velocities when they are observed from the spacecraft. That is why the signals reflected by them and received on the spacecraft have a different tine delay and have a different frequency as a result of the Doppler effect. For example, point A is closer to the spacecraft the point B, and the signals reflected it come earlier. On the other hand, point C approaches the spacecraft, and the signals reflected by it have a higher frequency, than the signals, reflected by point D which moves off. This effect is used to separate the radio waves reflected by separate elements of the surface and to create an image. When the spacecraft approaches Venus a survey of a surface band stretched along the path is made. When the spacecraft approaches Venus next time the planet turns and a new survey is made. It must be said, that using an ordinary method the same surface resolution could be received installing an 70-m antenna on a spacecraft.

Separate surface elements of the planet, constructing mountain ridges, valleys, slopes of craters, are differently orientated as regards the incident waves. As a result of a strong dependence of the backscattering coefficient of the planet on angle  $\varphi$  (Fig. 3) which is made by the incident wave and the normal to the surface element, the variation of angle  $\varphi$  in the limits  $\pm 10^{\circ}$  relatively the mean value of 10°, which is determined by the orientation of the antenna electric axis, leads to a change of the reflected signal intensity in the limits  $\pm 10$  to -8 dB. This effect determines the contrast of the radar image.



Fig. 2. Scheme of radar survey from the spacecraft

It is difficult to judge the height of the observed formation based on the radar image, as well as on a single photograph. The height profile of the planetary surface along the path the spacecraft is given by radio altimeter, the antenna electric axis of which is directed along the local vertical to the centre of the planet (see Fig. 2). During a single approach to the planet the radar image and the height profile of the surface do not coincide, however, in a few orbits of the spacecraft they will coincide as a result of the rotation of the planet.

#### Radar system

The reflector of the side-looking radar antenna has the shape of a parabolic cylinder the dimentions of which are 6 m by 1,4 m (see Fig. 1). The reflector of the radio altimeter antenna is a paraboloid the diameter of which is 1 m.

The polarization of waves when they are transmitted and received is linear. With the help of a high frequency switch to the transmitting and receiving equipment either one or the other antenna is periodically switched.

The transmitter of the radar system works by high frequency impulses, inside which the phase of the signal changes by  $180^{\circ}$  at the moment,



Fig. 3. Backscattering coefficient of surface element (3) which characterises reflected signal power versus incident angle: 1) Venus surface at 8 cm wavelength (according to the radar data obtained earlier from the Earth); 2) diffuse scattering (optics)

determined by the code of periodically repeated M-sequence (maximum length sequence). The length of the code sequence is 127 digits in side-looking mode, it may be 127 or 31 in radio altimeter mode. The length of the elementary impulse which determines the resolution along the slant range and altitude is  $1,54 \,\mu$ s.

When the transmitter is switched of, the instant voltage of the reflected signal is recorded on board the the spacecraft in digital form and then transmitted to the Earth to construct a radar image and a height profile of the Venus surface. In every 0,3 s 2540 complex readings of the reflected signal in the side-looking mode (20 periods of 127 element sequence) and 434 complex readings of the reflected signal in the radio altimeter mode (14 periods of 31 element sequence) are recorded. Within 16 min., during which the radar survey is made, we get about 3200 of such groups.

### Processing of the reflected signal

On the earth the processing of the reflected signal and the construction of the radar images and height profiles of the Venus surface is made with the help of computers. The separation of reflected signals according to time delay and the Doppler frequency is made by a special digital device an electronic Fourier processor. A matched filtration of the reflected signal for 127 readings of time delay and 31 readings of Doppler shift is made. This corresponds to approximately 4000 points in the direction diagram of the antenna (see Fig. 2). The surface resolution in the direction ortogonal to the path of the spacecraft is 0.9-1.5 km and along the path is 1.2-2.7 km in the height range of 1000–2000 km.

Within 0,3 s, in which the groups of the reflected signal are recorded, the spacecraft shifts along the orbit to the part of the width of the spot which is in the direction diagram of the antenna. This ensures reciprocal overlapping and a possibility of averaging about 10 independent power measurements of the reflected signal to make the fluctuation errors which are caused by the radio wave interference smaller. The irregular illumination along the image which is caused by the irregular form of the direction diagram of the antenna and the backscattering diagram of the planetary surface are removed. The images which are received from different height get one scale. For this purpose data about the distance and velocity of spacecraft with respect to Venus are used.

In the radio altimeter mode the readings of the reflected signal are convolved with the replica of the code sequence modulating the transmitter phase. The received power distribution of the reflected signal according to the time delay then convolves with the model of this distribution for a number of the value of the roughness factors and a height dispersion. The height of the spacecraft and the possible inclination of the electric axis of the antenna from the local vertical was taken into consideration. The inclination of the electric axis is measured by the shifts of the spectrum central frequency of the reflected signal. The position of the convolution maximum gives the spacecraft height relative to the mean surface in the spot the diameter of which is 40-50 km (see Fig. 2) with a rootmeansquare error which was less than 50 m.

The Venera 15 and 16 spacecraft were launched on an elliptical orbit with a period of rotation of 24 hours. The minimum distance of the spacecraft from the Venus surface (periapsis) is 1000 km and falls on the  $60^{\circ}$  of the northern latitude (Fig. 4). The maximum distance (in apoapsis) is 65000 km. Under the influence of solar attraction the height in periapsis gradually increases and the orbit has to be corrected. When the spacecraft moves in the periapsis region of its orbit, a surface bend of 7000–8000 km long is surveyed within 16 min. The spacecraft begins the survey at an latitude of  $80^{\circ}$  beyong the North Pole of Venus, moves near it and, moving approximately along the meridian, ending the survey at latitude  $30^{\circ}$ .

#### Results

The first radar images of Venus surface which were received by the Venera 15 and 16 spacecraft in October 1983 are given in Figs. 5 and 6. The spacecraft moved from left to right, its path is above the surveyed bend. The length shown is  $2 \times 1100$  km, the width is 156 km (the useful part of the image is somewhat narrower). The angular distance relative



Fig. 4. Movement of Venera 15 and 16 spacecraft under radar survey

to the periapsis of the orbit is plotted on the horizontal axis, the angular distance relative to the orbit plain is plotted on the vertical axis. These distances are measured in degrees from the centre of the planet (one degree on the Venus surface corresponds to 105,6 km). The image is constructed assuming that the Venus surface is a sphere of a radius of 6051 km. The deviation of the local radius from this value caused an irregular shift of the boundaries along the vertical, which is seen on the image. A gradual change of the boundaries is caused by a change of the spacecraft height when it moves along the elliptical orbit.

An ancient folded area, covered with half destroyed craters of impact origin lies from the beginning of the image up to  $-29^{\circ}$  from the periapsis. The remains of these craters the diameter of which is about 30 km are seen on  $-32,7^{\circ}$  and  $-31,8^{\circ}$  (Fig. 5). The slopes which face the falling ray look light; the slopes which do not face the falling ray are dark.

The folded formations are, evidently, younger. On Fig. 6 we see how the folded formations moved from left to right across the middle of the crater the diameter of which is about 100 km (the centre of the crater is  $-32,5^{\circ}$ ). Some areas of the bottom of the crater with a smooth surface look dark. Then we see a plain, which has no structure, that runs up to  $-24^{\circ}$ . This region is the nearest to the North Pole of Venus, from which it is  $4^{\circ}-5^{\circ}$  along the meridian.

The plain suddenly breaks at  $-24^{\circ}$ , from where a young folded area spreading for about 500 km begins. Numerous parallel mountain ridges





Radar Study of Venus Surface by Venera-15 and -16 Spacecraft

cross the path at an angle of  $45^{\circ}$  and then run along the path hundreds of kilometers on and on, gradually separating. Where the mountains end a second mountaneous area appears at an angle of  $45^{\circ}$ . A big crater of elliptical form the dimentious of which are 80 km to 60 km with a central hill at  $-20,7^{\circ}$  can be seen inside the sharp angle, which is formed by the two groups of folds (See Fig. 6). As is seen the mountain folds do not bear visible traces of water erosion which creates transversal ravines and valleys. On earth photographs they have a «fir-tree» shape.

Now the relief becomes less-montaneous. The most outstanding objects in this area are two mountains from  $-18,3^{\circ}$  to  $-17,7^{\circ}$  (Fig. 5) running along the path for about 80 km. At the base they are 15–20 km wide. The slopes facing the spacecraft look light, the opposite look dark. Two halfruined craters with a diameter of 15–20 km can be seen at  $-19,0^{\circ}$  and  $-18,7^{\circ}$ . These formations can be seen on Fig. 6 with the exception of the second crater, which couldn't be surveyed because Venus moved around its axis by  $6,5^{\circ}$  between the surveyes.

Radio altimetery helps to decipher the formations on the surveys. Fig. 7 shows the area of Maxwell Monts with a huge crater of Patera Cleopatra the diameter of which is about 100 km. The height profile is matched with the radar image. The white line shows the path of the spacecraft when the profile was measured. The radius of the planet surface in a given point in kilometers is plotted to the right on the vertical axis. This value is the difference of the distance of the spacecraft from the centre of the planet and measured height.

The maximum height of the mountain range for the given profile is 11 km above the mean radius of Venus which is according to the International Astronomic Union 6051 km. The crater which was crossed by the path of survey is on a mountain slope and has a complex shape. The comparison of the image with the profile shows that inside the big crater 1,5 km deep there is a second of a smaller, diameter the bottom which is 1 km deeper. It should be noted, that considerable deviation of the local radius from value 6051 km which is a sphere radius on which the image is plotted, has resulted in a considerable distortion of the crater shape and its dislocation. This was taken into consideration when the path of radio altimeter was plotted on the image.

Interesting phenomena were discovered on the Venue surface that were caused by an anomalous character of the wave reflection. Fig. 8 shows an image of two big craters of impact origin. The bottom of one of them looks unusually bright as compared to the locality. To cause this phenomenon structure of crater bottom must creats an intensive reflection of the radio waves in the direction of the spacecraft. For example, if there are dunes on the bottom of the crater similar to ones on Mars and the path of the spacecraft is parallel to the dunes, the signal will mainly be reflected in the direction of the spacecraft if the steepness of the slopes is about 10°.

There is another supposition that the bottom of this crater is covered with spherical stones. The incident wave, refracting on the boundary with





Fig. 8. Image of two craters of impact origin, one of which has a very bright bottom

the atmosphere, passes inside the sphere, partly reflects from the opposite boundary and returns to the atmosphere. If the refraction coefficient of the sphere material is about 2 (the relative dielectrical permeability is about 4), the sphere acts as retroreflector and the wave returns in the same direction from where it came.

In some other areas of Venus with a reduced radiowave backscattering under a sloping incident look dark on the surroundings. The average signal power at the output of the side-looking radar receiver reduced to 5-10 dB passing one of such plots of land 200–300 km long. At the same time the average signal power of the reflected signal at the cutput the radio altimeter receiver the electric axis the antenna which is directed vertically not only became less but somewhat increased. We may conclude that wave backscattering under sloping incident in this case is caused by a greater smoothness of the surface in this area.
## Conclusion

As a result of a radar survey carried out by Venera 15 and 16 spacecraft unique images of the Venus surface were obtained on which mountain ridges, craters, plains, folds and crushes of the Venus core can be seen. Indications of tectonic activity of Venus were discovered. We may state that geologically the Venus surface is much more interesting than that of the Moon, Mercury and, probably, Mars, where craters of impact origin prevail. A dense atmosphere protects the Venus surface from meteorites of not very large size. Water erosion dosn't exist, wind erosion is reduced (these kinds of erosion exist on the Earth and Mars). That is why the Venus surface has fixed and preserved like a photo plate all the changes that have taken place for billions of years under tectonic forces.

By the beginning of June 1984, the Venera 15 and 16 spacecraft has surveyed an area of 100 million  $\text{km}^2$ , which comprises 20 percent of the whole surface of Venus. Within 8 months in which Venus makes a full rotation around its axis it is possible to survey the northern hemisphere of Venus above 30°.

Based on these data it will be possible to make maps which will help to study the processes taking place on the Venus surface and to made a conclusion about the history of the planet development. The data will help to decide the question of the geologic activity of Venus. Detailed maps are necessary, for example, to investigate climate, atmosphere circulation and structure of the gravitation field of the planet. Such maps are necessary for a purposeful investigation of Venus by spacecraft. They will give a possibility to extend the interpretation of data which were obtained by landers of interplanetary stations to other areas of the planet.

#### References

1. O. N. Rzhiga, Through Venus clouds, Zemlja i Vselennaja, № 1, 2 (1984).

# РАДИОЛОКАЦИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЛАНЕТ

В. А. Котельников, О. Н. Ржига

Сборник «90 лет Радио». Москва: Радио и связь, 1985. С. 171-181

Радиолокация небесных тел основана на тех же физических принципах, что и обычная наземная радиолокация, разница состоит лишь в дальности действия, достигающей межпланетных расстояний.

В первых опытах по радиолокации Луны, проведенных в 1946 г. в США и Венгрии, использовались военные радиолокационные станции, предназначенные для обнаружения самолетов. Однако, чтобы обнаружить сигнал, отраженный, например, Венерой, энергетический потенциал радиолокационной установки надо было увеличить в 10<sup>7</sup> раз, а для обнаружения сигнала от Марса, который меньше Венеры, находится дальше и вращается быстрее ее, — в 10<sup>9</sup> раз.

Необходимые условия для радиолокации планет появились к началу 60-х гг., когда для управления полетом и приема информации с межпланетных станций были созданы большие зеркальные параболические антенны, мощные передатчики с усилительными клистронами и малошумящие приемники с параметрическими и парамагнитными усилителями, высокостабильные стандарты частоты и времени, а также ЭВМ. Требовалось лишь разработать и создать аппаратуру для выделения отраженного сигнала и определения его параметров.

В Советском Союзе первые радиолокационные наблюдения Венеры были проведены в апреле 1961 г. При атом использовались антенна и передатчик непрерывного излучения на волне 39 см Центра дальней космической связи в Крыму под Евпаторией. На входе приемного устройства был установлен параметрический усилитель.

Для обнаружения слабого отраженного сигнала на фоне флуктуационного шума приемной аппаратуры нужно было обеспечить длительное накопление информации (от единиц до десятков часов), а также измерить его энергию и частоту на выходе приемника. Это осуществлялось многоканальным анализатором спектра при излучаемом сигнале в виде простой периодической последовательности, состоящей из импульсов и пауз равной длительности. Доплеровское смещение частоты, вызванное движением планеты относительно антенны радиолокационной установки, оценивалось по изменению средней частоты отраженного сигнала, скорость вращения планеты — по ширине его спектра.

Наличие астрономических таблиц, позволяющих рассчитать предполагаемое расстояние и скорость планеты относительно антенны радиолокационной установки, резко сокращало диапазон измерений за счет того, что измерялись не полные значения доплеровского смещения частоты или времени запаздывания отраженного сигнала, а их отклонения относительно расчетных значений. Специальный генератор изменял несущую частоту передатчика так, чтобы прием отраженного сигнала обеспечивался вблизи номинальной частоты. Другое устройство отсчитывало задержку начала накопления энергии отраженного сигнала относительно первого излученного импульса. Частота повторения импульсов передатчика поддерживалась в кратном соотношении с частотой несущей, что компенсировало доплеровский сдвиг в огибающей импульсов из-за изменения расстояния между планетой и антенной. Эти меры обеспечивали неизменное положение сигнала на частоте и времени запаздывания на входе анализатора, что необходимо для эффективного накопления отраженного сигнала.

В 1962 г. энергетический потенциал Крымской радиолокационной установки был повышен в 6 раз за счет применения на входе приемного устройства квантового парамагнитного усилителя и увеличения мощности передатчика. Точность измерения расстояния возросла благодаря использованию периодической линейной частотной модуляции. Отклонение запаздывания отраженного сигнала от расчетного значения преобразовывалось в пропорциональное смещение частоты сигнала на выходе приемника, которое измерялось многоканальным анализатором спектра. Система регистрации и обработки сигнала при этом получилась более простой, чем для других видов модуляции, вследствие сужения полосы частот при гетеродинировании. Среднеквадратическое значение погрешности измерения расстояния до Венеры в 1962 г. удалось снизить до 15 км, в то время как в 1961 г. оно составляло 2700–4000 км.

В 1964 г. было произведено несколько записей отраженного Венерой сигнала на магнитную ленту в цифровой форме, которые затем обрабатывались с помощью ЭВМ, вычислявшей спектры отраженного сигнала. На полученных спектрограммах были обнаружены детали, соответствующие локальным областям поверхности Венеры с более высокой отражательной способностью, чем окружающая местность. По существу это было одним из первых применений в радиолокации метода синтезирования апертуры, позволяющего получить высокое пространственное разрешение.

В радиолокационной астрономии разработан метод получения изображений поверхности планет, основанный на возможности разделять отраженные сигналы по запаздыванию момента прихода и доплеровскому смещению частоты, которые определяются расстоянием и радиальной составляющей скорости данной точки поверхности относительно антенны радиолокатора и закономерно изменяются от точки к точке. Точки, лежащие на некоторой окружности 1, плоскость которой перпендикулярна лучу (рис. 1), находятся на одинаковом расстоянии от антенны радиолокационной установки; эта окружность является линией равных запаздываний. С другой стороны, точки, лежащие на окружности 2, плоскость которой параллельна лучу зрения и оси вращения планеты PP', имеют по отношению к антенне радиолокационной установки одинаковые радиальные составляющие скорости; эта окружность является линией равных доплеровских смещений. Рассчитав запаздывание и доплеровское смещение для окружностей 1 и 2, из суммарного отраженного сигнала выделяют сигналы, отраженные поверхностью вблизи точек B и B' на пересечении окружностей, и измеряют их интенсивность. Сигналы, отраженные точками B и B', для которых расстояние и радиальная составляющая скорости одинаковы, разделяют за счет пространственной избирательности антенны или радиоинтерферометра.





Возможность разделения отраженных сигналов по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты проиллюстрируем на примере сигнала с линейной частотной модуляцией. В этом случае спектр отраженного сигнала на выходе приемника имеет линейчатую структуру, причем в соседние спектральные линии попадают сигналы, отраженные участками поверхности планеты, разнесенными на расстояние, определяемое девиацией частоты. Каждый такой участок имеет форму шарового пояса, осью которого является луч зрения, проведенный в центр планеты (рис. 1).

Вращение планеты вызывает расширение спектральных линий в соответствии с диаметром шарового пояса, отражающего сигнал. Наиболее интенсивная линия соответствует сигналу, отраженному центральной частью диска планеты, находящейся ближе всего к антенне радиолокационной установки, где волны падают почти перпендикулярно поверхности. Расположенные слева от нее линии обусловлены отражением от более удаленных участков. Минимальную ширину имеет линия, соответствующая отражению от центральной части диска. Более удаленные участки имеют бо́льший диаметр и соответственно бо́льшую разность радиальных составляющих скорости на краях.

К 1971 г. энергетический потенциал радиолокационной установки Центра дальней космической связи в Крыму возрос в 70 раз. За прошедшее время в США и Советском Союзе были созданы новые крупные антенны, которые значительно расширили возможности радиолокационного исследования планет. В 1980 г. в Центре дальней космической связи вступила в строй полноповоротная антенна диаметром 70 м. Оригинальная схема облучения зеркала антенны обеспечивает высокий коэффициент использования поверхности.

Повышение эффективной площади антенны, снижение шумовой температуры антенно-фидерного тракта и приемника, а также увеличение мощности передатчика позволили увеличить энергетический потенциал радиолокационной установки еще в 50 раз. Для наглядности укажем, что видимой поверхности Венеры при ее сближении с Землей теперь достигает сигнал мощности около 250 Вт. Предельное расстояние радиолокации увеличилось более чем в 2,5 раза. Появилась возможность наблюдать Венеру практически на всей орбите, а также наблюдать регулярно Марс и Меркурий.

Аппаратура радиолокационной установки подвергалась коренному усовершенствованию. Цифровой синтезатор сигнала периодической линейной частотной модуляции обеспечивает девиацию частоты 128 кГц, что позволяет получить разрешение 1,2 км при измерении расстояния. С помощью цифрового доплеровского синтезатора с программным изменением частоты можно интерполировать расчетное изменение доплеровского смещения частоты отраженного сигнала полиномом третьей степени в диапазоне +300 кГц с дискретностью 0,01 Гц на интервале длительностью до 20 мин. Первичной основой излучаемого сигнала является водородный стандарт частоты со стабильностью лучше 10<sup>-13</sup>.

Программно-временное устройство радиолокационной установки обеспечивает отсчет прогнозируемого значения времени запаздывания в диапазоне до 10 000 с с дискретностью установки расчетного значения 0,1 мкс.

С начала 1982 г. обработка отраженного сигнала и измерение его параметров ведутся с помощью ЭВМ типа СМ-4. Программа ускоренного спектрального анализа обеспечивает обработку отраженного сигнала в текущем времени в полосе 0,25 div 4 кГц с разрешением лучше 0,1 Гц.

Применение радиолокации в астрономии позволило непосредственно измерять расстояние до небесных объектов. Точность этих измерений значительно превышает точность астрономических методов. Поэтому они позволяют уточнять значения фундаментальных астрономических постоянных, параметры движения тел Солнечной системы, их размеры.

Основным результатом первых радиолокационных наблюдений Венеры, имеющим исключительное значение для космонавтики, явилось

уточнение астрономической единицы длины, равной среднему расстоянию Земли от Солнца. В аналитической теории движения планет, созданной Ньюкомом в конце прошлого века на основе оптических наблюдений планет, с помощью которой вычисляются расстояния в Солнечной системе, астрономическая единица является масштабным множителем. Поэтому, измерив расстояние до одной из планет в километрах и поделив его на это же расстояние, вычисленное в долях астрономической единицы, можно было найти ее значение в километрах и уточнить расстояния в Солнечной системе. Уточнение астрономической единицы позволило выводить искусственные спутники к планетам и доставлять межпланетные станции в заданный район их поверхности.

В то же время радиолокационные измерения показали, что и после внесения поправки в значение астрономической единицы остаются значительные регулярные расхождения между фактическим и рассчитанным на основе аналитической теории Ньюкома расположением планет относительно Земли, достигающие нескольких сотен километров. Хотя эти расхождения невелики по сравнению с полным расстоянием, их наличие затрудняло выведение межпланетных станций на траекторию, обеспечивающую посадку в определенном районе планеты, и не позволяло с необходимой точностью прогнозировать момент входа аппарата в атмосферу планеты. В связи с этим при каждом полете межпланетных станций приходилось наряду с измерениями дальности и радиальной скорости станции вести радиолокационные измерения для уточнения положения планеты.

На базе накопленного к настоящему времени экспериментального материала в Советском Союзе проведена работа по уточнению орбит Земли, Венеры, Марса, Меркурия и построена теория движения этих планет, позволяющая вычислять относительные расстояния примерно в 100 раз точнее, чем аналитическая теория Ньюкома.

При радиолокации планет в периоды их прохождения за Солнцем было обнаружено дополнительное по отношению к вычисленному по теории Ньютона запаздывание момента прихода отраженного сигнала, обусловленное уменьшением скорости распространения электромагнитных волн в поле тяготения Солнца в соответствии с теорией Эйнштейна. Обнаружение этого эффекта явилось одной из экспериментальных проверок общей теории относительности.

Измеренное расстояние до ближайшей к антенне радиолокационной установки точки поверхности O в сочетании с расстоянием до центра масс планеты C, положение которого уточняется в процессе измерений, позволяет вычислить удаление точки O от центра планеты и, таким образом, высоту ее над некоторой средней поверхностью. Вращение планеты дает возможность исследовать рельеф в различных областях поверхности, проходящих через точку O. Полученный этим методом профиль высот поверхности Марса изображен на рис. 2. Наиболее высокая точка 17,5 км — склон вершины потухшего вулкана Олимп, крупнейшей горы из известных в Солнечной системе высотой 27 км.



Рис. 2. Профиль высот поверхности Марса, полученный радиолокационным методом в период 15.02.80 г. – 15.04.80 г.

Решение многих астрофизических задач с помощью радиолокации основано на исследовании смещения и расширения спектральной линии отраженного сигнала под влиянием эффекта Доплера. Возможность обеспечить в радиодиапазоне высокую когерентность излучения позволяет получить при этом очень высокое спектральное разрешение (10<sup>-10</sup> от частоты излучения и выше). Этим методом изучается движение метеоров в атмосфере Земли, движение ионизированных образований в солнечной короне, вращение планет. Крупнейшим достижением радиолокации явилось определение периода и направления вращения Венеры и Меркурия.

Высокая проникающая способность радиоволн позволила преодолеть плотный облачный слой Венеры, непрозрачный для оптических лучей, и получить первые сведения о ее поверхности. Измерения мощности отраженного сигнала, которая зависит от коэффициента отражения материала поверхности, показали, что поверхность Венеры по электрическим свойствам близка к скальным породам на силикатной основе, которые широко распространены на Земле. В центре диска Венеры наблюдается яркий блик, а края тонут в тени, как у гладкой сферы. Это явление наблюдается и у других планет, кроме Юпитера и Сатурна, которые имеют мощную газовую оболочку и не дают заметного отражения. В тоже время кольца Сатурна оказались хорошим отражателем и рассеивают радиоволны так, как облака — видимый свет.

В Массачусетском технологическом институте (США) радиолокационным методом при помощи разделения отраженных сигналов по времени их запаздывания и доплеровскому смещению частоты было получено изображение участка Луны (рис. 3, a). Качество изображения мало уступает фотографическому снимку, сделанному с Земли с помощью оптического телескопа. Отраженный сигнал принимался одновременно двумя антеннами, что позволило измерить по разности фаз принятых сигналов отклонение каждой точки поверхности Луны от некоторой средней поверхности (рис. 3, б, где темный фон имеют низкие места, светлый — возвышенные).



Рис. 3. Изображение участка Луны, полученное радиолокационным методом

Опыт наблюдения планет с помощью радиолокационной установки Центра дальней космической связи был использован для разработки космического эксперимента по картографированию поверхности Венеры. Для этого в начале июня 1983 г. к Венере стартовали космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» с радиолокационной аппаратурой. В середине октября 1983 г. оба космических аппарата были выведены на эллиптическую орбиту спутника Венеры с периодом обращения 24 ч и высотой над поверхностью планеты около 1000 км в перицентре и 65 000 км в апоцентре.

Метод бокового обзора с синтезированной апертурой антенны, примененный для получения радиолокационного изображения поверхности Венеры с космического аппарата, имеет то общее с описанным ранее методом, разработанным в радиолокационной астрономии, что в обоих случаях используется разделение отраженных сигналов по запаздыванию момента прихода и доплеровскому смещению частоты. Элементы поверхности, попадающие в пределы диаграммы направленности бортовой антенны 1 (рис. 4), находятся на разном расстоянии и движутся с разными радиальными скоростями при наблюдении их с космического аппарата C. Например, точка A расположена ближе, чем точка B, и отраженный ею сигнал приходит раньше, чем от точки B. Точка G на набегающем крае диаграммы направленности приближается к космическому аппарату, в то время как точка D на противоположном крае удаляется. Сигнал, отраженный точкой G, имеет бо́льшую частоту из-за эффекта Доплера, чем сигнал, отраженный точкой D. На плоской поверхности линии равного запаздывания образуют концентрические окружности с центром в точке O под космическим аппаратом; линии равного доплеровского смещения частоты представляют конические сечения.



Рис. 4. Схема получения радиолокационного изображения и профиля высот поверхности Венеры: 1 — след диаграммы направленности антенны РЛС бокового обзора; 2 — след диаграммы направленности антенны радиовысотомерапрофилографа

Несущая частота передатчика радиолокационной станции (8 см) манипулировалась по фазе 127-элементным кодом так называемой М-последовательности при длительности элементарного импульса 1,5 мкс. Это дало возможность при обработке отраженного сигнала на Земле

путем свертки его с копией зондирующего сигнала получить пространственное разрешение около 1,5 км.

Затем отраженный сигнал когерентно накапливается в течение 4 мс, за которые космический аппарат пролетает по орбите около 35 м. Это обеспечивает пространственное разрешение вдоль трассы 1 div 2 км в диапазоне высот 1000 div 2000 км.

Метод бокового обзора для исследования поверхности Венеры с космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» был применен впервые. Планируя эксперимент, надо было знать характеристики отражения поверхности Венеры, а также коэффициенты рефракции и поглощения радиоволн в ее атмосфере, которые на волне 8 см имеют заметные значения. Эти данные были получены на основе радиолокационных наблюдений Венеры с Земли.

В основном канале отраженный сигнал в цифровой форме запоминался на борту и затем передавался на Землю по телеметрической линии. Для обработки отраженного сигнала и построения радиолокационного изображения был создан комплекс аппаратуры, оборудованный ЭВМ. Для разделения отраженных сигналов по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты разработано специализированное цифровое вычислительное устройство — процессор для выполнения преобразования Фурье.

При построении радиолокационного изображения производилось усреднение результатов измерений мощности отраженного сигнала, полученных под разным ракурсом для уменьшения флуктуационной погрешности, вызываемой интерференцией радиоволн, отраженных отдельными участками исследуемой поверхности в пределах разрешаемого элемента. Устранялась неравномерность освещенности по полю изображения, вызванная неравномерностью формы диаграммы направленности антенны РЛС и диаграммы обратного рассеяния поверхности планеты, а также изменением высоты космического аппарата. Данные приводились к одному масштабу по вертикали и горизонтали. При этом учитывалась нелинейность координат «запаздывание отраженного сигнала — доплеровское смещение частоты», в которых проводились измерения, а также разномасштабность и перемещение изображения вследствие изменения высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, и возможная неточность ориентации электрической оси антенны РЛС.

В течение одного прохождения искусственного спутника Венеры (ИСВ) в районе перицентра его орбиты снималась полоса поверхности шириной около 100 км и длиной 7000 км. Один из районов Венеры протяженностью 1100 км, снятый космическим аппаратом «Венера-16», изображен на рис. 5. Космический аппарат двигался слева направо, его трасса проходила выше снятой полосы. Электрическая ось антенны РЛС бокового обзора составляла с плоскостью орбиты угол 10°, ширина диаграммы направленности в вертикальном сечении 5,5°

(рис. 4). Полная ширина изображенной полосы 156 км, полезная часть несколько у́же и ширина ее зависит от высоты ИСВ.



Рис. 5. Изображение поверхности Венеры, полученное 20 октября 1983 г. ИСВ «Венера-16»

Снимок на рис. 5 начинается равниной без заметных деталей, резко переходящей в горную область. Множество параллельных хребтов простирается под углом 45° к трассе, а затем меняет направление и тянется параллельно ей. В конце под углом 45° примыкает другая горная область. Внутри острого угла, образованного двумя группами складок, просматривается большой кратер эллиптической формы размером 80 × 60 км<sup>2</sup> с центральной горкой. Затем рельеф становится более спокойным. Наиболее примечательной деталью в этой области являются два горных образования, вытянутые вдоль трассы на 80 км при ширине основания 15 div 20 км. Их склоны, обращенные к космическому аппарату, выглядят светлыми, что является следствием резкой диаграммы обратного рассеяния поверхности (зависимости мощности отраженных к РЛС сигналов от угла наблюдения). Внизу слева от этих гор виден полуразрушенный кратер диаметром 15 div 20 км. Заканчивается отснятый участок двумя параллельными грядами, расположенными под углом  $45^{\circ}$  к трассе, которые переходят в группу округлых холмов с диаметром основания 6 div 8 км.

Во время радиолокационной съемки к приемопередающей аппаратуре РЛС периодически подключались антенны то бокового обзора, то радиовысотомера-профилографа, электрическая ось которой направлена вдоль местной вертикали (рис. 4). В режиме радиовысотомерапрофилографа М-последовательность зондирующего сигнала имела либо 127, либо 31 элемент при длительности элементарного импульса 1,5 мкс. После свертки с копией зондирующего сигнала при обработке на Земле реализуется разрешение 230 м по вертикали. Распределение мощности отраженного сигнала по запаздыванию момента прихода затем свертывается с моделью этого распределения для ряда значений коэффициента шероховатости и дисперсии высот. Положение наблюдаемого максимума сверток дает высоту ИСВ над средней поверхностью в пятне диаметром 40 div 50 км со среднеквадратической погрешностью около 30 м. При 31-элементной М-последовательности это пятно можно разделить вдоль трассы на  $3 \operatorname{div} 5$  полос за счет различия в доплеровском смещении частоты отраженных ими сигналов (рис. 4).

Профиль высот поверхности Венеры, измеренный по трассе полета ИСВ «Венера-16», показан на рис. 6. По горизонтальной оси отложено угловое расстояние космического аппарата относительно перицентра, измеренное в градусах из центра планеты (один градус на поверхности Венеры занимает 105,6 км). По вертикальной оси — радиус планеты в данной точке трассы в километрах, вычисленный как разность планетоцентрического расстояния ИСВ и измеренной высоты. Как видно из рисунка, крайние значения высоты по данной трассе лежат в пределах от -1,0 до +1,7 км относительно значения 6051 км, принятого Международным астрономическим союзом за среднее значение радиуса Венеры.



Рис. 6. Профиль высот поверхности Венеры по трассе полета ИСВ «Венера-16» 12 ноября 1983 г.

За восемь месяцев с ноября 1983 г. космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» произвели радиолокационное картографирование всего северного полушария Венеры выше 30° общей площадью 115 млн. кв. км. Получены уникальные изображения поверхности Венеры, на которых видны кратеры, горные хребты, равнины, складки и разломы венерианской коры. Обнаружены признаки тектонической активности Венеры. На основе этого материала создаются первые карты Венеры. Они позволят изучить процессы, происходящие на поверхности планеты, и судить об истории ее развития.

Сравнивая приведенные описания первых радиолокационных установок и установок 80-х гг., сопоставляя полученные с их помощью результаты, нетрудно видеть, какой огромный скачок в своем развитии совершила радиолокация планет за последнее десятилетие. Значение полученных при этом результатов трудно переоценить, поскольку они дают практический материал, необходимый для дальнейшего изучения Вселенной.

# VENUS: DETAILED MAPPING OF MAXWELL MONTES REGION

Yu. N. Alexandrov, A. A. Crymov, V. A. Kotelnikov, G. M. Petrov, O. N. Rzhiga, A. I. Sidorenko, V. P. Sinilo, A. I. Zakharov, E. L. Akim, A. T. Basilevski, S. A. Kadnichanski, Yu. S. Tjuflin

Science, 28 February 1986. Vol. 231. P. 1271-1273

From October 1983 to July 1984, the north hemisphere of Venus, from latitude  $30^{\circ}$  to latitude  $90^{\circ}$ , was mapped by means of the radar imagers and altimeters of the spacecraft Venera 15 and Venera 16. This report presents the results of the radar mapping of the Maxwell Montes region, one of the most interesting features of Venus' surface. A radar mosaic map and contour map have been compiled.

The main purpose of the space-craft Venera 15 and Venera 16 was to map the north hemisphere of Venus. For a period of 8 months, an area of  $115 \times 10^6$  km<sup>2</sup> was mapped. As an example, this report gives the results of the mapping of Maxwell Montes.

The spacecraft were launched in elliptical, approximately polar orbits with periods of rotation of 24 hours. Their distance above Venus' surface was from 1 000 km at periapsis (about  $62^{\circ}$  latitude) to  $65\,000$  km at apoapsis.

The spacecraft were equipped with an 8-cm wavelength radar system comprising the synthetic aperture side-looking radar and radar altimeter. In the course of the radar survey, the electrical axis of the radar altimeter antenna was directed along the local vertical to the center of the planet using the spacecraft's astro-orientation system. The angle between the electrical axis of the side-looking radar antenna and the local vertical was  $10^{\circ}$ .

Because the elements of the planet's surface were spaced at different intervals and had different radial velocities relative to the spacecraft, reflected and received signals had a different time delay and frequency because of the Doppler effect. This was used to separate waves reflected from particular elements and to create an image. The reflected signal readings were stored on board the spacecraft and then transmitted to Earth for processing. Separation of the reflected signals according to the time delay and the Doppler frequency shifts and construction of the radar images and the height profiles were subsequently accomplished by a special digital device — an electronic Fourier processor. In each passage of the spacecraft near Venus5 surface, a swath 120 km in width and 7500 km in length extending along the ground track was surveyed. Part of a swath 1100 km in length, surveyed by Venera 16 on 20 January 1984, is shown on the bottom of Fig. 1 (1). This is a picture of the Maxwell Montes region showing a large crater, previously named Cleopatra Patera. The spacecraft was moving from left to right, its track being above the swath (corresponding to  $0^{\circ}$  in vertical scale). The stronger the power of the reflected signals, the brighter the detail on the image. The slopes facing the incident ray look bright, and the slopes facing away from the incident ray look dark.

The radar image is matched with the height profile (top of Fig. 1) (2) obtained 3 days earlier; the white line shows the ground track (offsets are due to altitude differences). The maximum elevation for a given track is 11 km above the mean radius of Venus (6051 km according to the International Astronomical Union). The crater crossed by the track of the survey is situated on a mountain slope and is of complex shape. Comparison of the image with the profile shows that, inside the larger crater (1,5 km deep), there is another crater of smaller diameter whose bottom is 1 km deeper. The bottom of the inner crater is flat, and the walls are steep.

At present, mosaic and topographic maps of Venus are drawn by combining individual swaths and height profiles in a definite map projection. Figure 2 shows a mosaic map of Maxwell Montes and the surrounding region and Fig. 3 shows a topographic map. Both were compiled from the radar survey of Venera 15 and Venera 16 from 30 December 1983 to 1 February 1984 (3).

The territory as shown in Fig. 2 (total area,  $3,75 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) is the most detailed image of Maxwell Montes available (4). Lakshmi Planum, a large plateau 5 km in height, is slightly west of the two craters in the Cleopatra Patera region. Both craters are circular in shape (5). The center of the inner crater (55 km in diameter) is slightly north-west of the center of the outer crater (95 km in diameter). The eastern wall of the outer crater is low, and the bottom merges with the eastern slope of the mountain range (6).

To the west the Cleopatra Patera region is fringed with almost parallel ridges extending hundreds of kilometers and spaced 5 to 15 km apart. In this oval-shaped region (400 km from north to south, 200 km from east to west), the highest altitudes exceed 10 km (above the sphere radius of 6051 km), making it the most elevated region of Venus. In the northern part of the oval, 200 km from the center of Cleopatra Patera (2,3° longitude, 65,9° latitude) the highest point (elevation, 11,5 km) is located, as fixed by the radar altimeter of Venera 16 on 14 January 1984 (Fig. 4) (7). South-southeast of this point (3,9° longitude, 64,4° latitude) is the second highest point (elevation, 11,3 km). As shown by horizontals (Fig. 4), the northern part of this mountain region extends westward, where the heights are still greater than 9 km.

4\*





Fig. 2. Mosaic map of the Maxwell Montes and surrounding region taken from Venera 15 and Venera 16 radar observation data from 30 December 1983 to 1 February 1984. Projection, Lambert–Gauss normal equiangular conic. Standard parallels, 58,3° and 72,4°. Radiowaves are incident from the east at an angle of about 10° to the local vertical

The height decreases sharply toward the southwest. Over a distance of 20 km the slope descends by 4 km, and the average slope angle exceeds  $10^{\circ}$ . From this side the Maxwell Montes region is pressed by Lakshmi Planum, and parallel folds are frequent. The folds fringing Cleopatra Patera are also seen from the east (Fig. 2), but here their structure is destroyed by transverse shifts. The region surrounding Cleopatra Patera thus appears to be flatter than the Maxwell Montes region. The relief folds seem to be covered by material from volcanic activity or meteorite impacts. Another possible impact crater (25 km in diameter) is situated slightly below the middle of Fig. 2 (6,5° longitude, 56,9° latitude).

Toward the south, the Maxwell Montes region and Lakshmi Planum merge into Sedna Planitia. The steepness of the slope in the southern



Fig. 3. The Maxwell Montes and surrounding region contour map (coordinates given in Fig. 2). Horizontals with 500-m steps are plotted relative to the level of the mean sphere of radius 6051

portion of Lakshmi Planum (Vesta Rupes) is greater than 10°. In the northern portion the folds come together in a winding «plait», which descends to an altitude of 2 km over a distance of more than 500 km in the meridional direction and then merges into the plain. This is a southern part of the vast plain close to the pole that was discovered by Venera 15 and Venera 16. In the northern and southern parts of this region (Fig. 2) are numerous cone-shaped features standing out especially clearly on the background of smooth surface relief. These cones are most likely of volcanic origin.

#### **R**eferences and notes

1. The image contains 1350 vertical lines, each having 195 points. The slant range and radial velocity relative to the spacecraft were calculated for each point of the image; for this purpose the data for distance and



Fig. 4. The height profile of the Venus surface in the Maxwell Montes region, obtained from Venera 16 on 14 January 1984, showing the location of the highest point of the Venus surface  $(-3,7^{\circ}$  relative to periapsis). The symbols are the same as in Fig. 1. The vertical scale is enlarged 320 times compared to the horizontal scale. The total track length is 7100 km. The north pole lies at approximately  $-30^{\circ}$ . In contrast to the data for Fig. 1, reflected signal processing represents the altitude of the spacecraft above the mean surface of a region 40 to 50 km in diameter

velocity with respect to the Venus center of mass were used. The fines and points arc separated from each other by 800 m, which is slightly less than the radar spatial resolution ( $\sim 1$  km), for obtaining the same contrast of surface features in the regions of high and low reflectivity, the power of the reflected signal was normalized to the mean value in the window (160 km) running along the swath.

2. The processing of the radar altimeter reflected signals yielded the spacecraft altitude over the mean surface of the strip (40 km long, 7 km wide) with a root-mean-square error of about 50 m, the step along the ground track being 3 km. This error characterizes the relative accuracy of the relief height determination at over a distance of 500 to 1000 ion along the track. At the ends of a track, as well as between tracks, the error may be 10 times larger. Considerable deviations of the local radius from the value of 6051 km, which is considered the radius of the sphere on which the image is plotted, resulted in appreciable perspective distortions in the crater configuration that were also taken into account while plotting the radar altimeter track on the image.

3. The radar image bands for each day of the survey were plotted on the sphere of 6051 km radius (venusian coordinate system) and then projected onto the cone surface drawn between two standard parallels. In accordance with the International Astronomical Union, the right ascension of the Venus rotation north pole is taken as  $273,8^{\circ}$ , the declination as  $67,2^{\circ}$ , and the period of rotation as 243,01 days. Zero meridian position of the venusian coordinate system is defined from the observation that, on 20 June 1964 at 0 hours ephemeric time, the longitude of Venus' central meridian was  $320^{\circ}$ . On a contour map the measured height values were reproduced directly on the altimeter track, whereas between the tracks they were interpolated.

4. Radar surveys by the spacecraft Pioneer Venus [H. Masursky et al., J. Geophys. Res. 85, 8332 (1980)] showed that Maxwell Montes is the most elevated region on Venus, although low spatial resolution made the analysis of their nature difficult. The general structure of the central part of the mountainous region together with Cleopatra Patera was visible on the radar images obtained recently from Earth at the Arecibo facility [D. B. Campbell, in *Abstracts of the Twenty-fifth Plenary Meeting* of COSPAR (Graz, Austria, 1984), p. 69], However, the surrounding areas having smoother surfaces were less visible because of the low level of reflected signal. When Venus is observed from Earth (taking into account the large distance), the angle between the incident ray and the local vertical is equal to the venusian latitude, which is 60° to 70° for Maxwell Montes. From the Venera 15 and Venera 16 radar survey, the incident angle is from 9° to 15°. Therefore backscattering has a high intensity, and the surface features are observed fairly well throughout the map (Fig. 2). As a rule, the reflected signal does not drop below the level that exceeds the noise power of the receiving equipment by 10 decibels. This gives a uniform quality of radar images in regions with both high and low reflectivity.

5. The height of the local relief and corrections to the spacecraft coordinates were taken into consideration. The spacecraft coordinates were specified in accordance with the procedure that considers disturbances in the parameters at the time when the astro-orientation system is being switched on. Comparison with Fig. 1, where the image was constructed on the sphere of 6051 km radius, shows that taking into account the height of the local relief leads to cancellations of the image distortions that arc particularly observable in the Cleopatra Patera region.

6. In the initial construction of the contour map, the measurements were averaged in a running window with a 100-km effective diameter, which caused smoothing of the relief [V. A. Kotelnikov *et al.*, *Pis'ma Astron. Zh.* (U.S.S.R.) **10**, 883 (1984)].

7. According to the Pioneer Venus altimeter data, the highest point of Maxwell Montes lies 220 km farther south (longitude  $2,2^{\circ}$ , latitude  $63,8^{\circ}$ ), its height being 11,1 km (also above the level of the mean sphere of radius 6051 km) [H. Masursky *et al.*, *J. Geophys. Res.* **85**, 8332 (1980)].

8 July 1985; accepted 7 November 1985

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЛАТО ЛАКШМИ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-4)

А. А. Пронин, А. Л. Суханов, Ю. С. Тюфлин, С. А. Кадничанский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. И. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, А. П. Кривцов, В. П. Синило, Г. А. Бурба, Н. Н. Бобина

Астрономический вестник, 1986, т. XX, №2, с. 83-98

Представлено морфологическое описание плато Лакшми и его обрамления, которые представляют собой единую структуру. Считается, что в основе образования структуры лежит механизм подъема вещества из недр планеты и его горизонтальное растекание, сопровождавшееся деформациями складчатости и/или образованием тектонических чешуй. Это позволяет говорить о Лакшми как о локальном центре радиального спрединга. Масштабы структуры свидетельствуют об участии в ее образовании астеносферных потоков.

#### Введение

Одной из задач радиолокационного картографирования Венеры с автоматических межпланетных станции (AMC) «Венера-15, -16» является создание серии фотокарт и геолого-морфологических карт на снятые районы. Карты поверхности Венеры создаются отдельными листами по трапециям. Территорию описываемого листа карты В-4 занимает плато Лакшми в центре, обрамленное крупнейшими горными сооружениями Венеры — горами Акны и Фрейи на северо-западе и севере и горами Максвелла на востоке. Южное обрамление плато представлено уступом Весты.

Углы рамок трапеции B-4 имеют венерографические координаты:  $\varphi_1 = 80^\circ$ ,  $\lambda_1 = 300$ ,  $\varphi_2 = 80$ ,  $\lambda_2 = 60$ ,  $\varphi_3 = 60$ ,  $\lambda_3 = 300$ ,  $\varphi_4 = 60$ ,  $\lambda_4 = 0^\circ$ . При создании фотопланов для перекрытия со смежными фотопланами их границы выходят за пределы площади установленных трапеций.

#### Построение фотопланов поверхности Венеры

С ноября 1983 по июль 1984 г. с АМС «Венера-15, -16» выполнена радиолокационная съемка северных областей поверхности Ве-

неры примерно до широты 30°. Съемку и радиопрофилирование по высоте проводили с помощью созданного в ОКБ Московского энергетического института комплекса радиолокационной аппаратуры, включающего радар бокового обзора и радиовысотомер. Обработка отраженных от поверхности сигналов и синтез отдельных радиолокационных панорам и профилей высот поверхности выполнены в Институте радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ). Преобразование радиолокационных панорам в картографические проекции и создание фотопланов поверхности Венеры выполнены совместно ИРЭ и Центральным научно-исследовательским институтом геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского [1]. Уточненное определение движения АМС и вычисление элементов орбиты съемочных витков проведено в Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша АН СССР. Геолого-морфологический анализ проведен в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского АН СССР, а также в Геологическом институте АН СССР.

При создании фотопланов масштаба 1:5000000 поверхность северного полушария Венеры, покрытая радиолокационной съемкой, разделена условно на 27 трапеций (рис. 1). В диапазоне широт от 20 до 80° фотопланы с обозначениями от В-2 до В-27 строятся в нормальной конической проекции Ламберта-Гаусса. С целью уменьшения искаже-



Рис. 1. Схема разбиения северного полушария Венеры на трапеции

ний при переходе от сферической поверхности к плоскости карты для каждого 20-градусного широтного пояса были рассчитаны свои значения широт двух стандартных параллелей картографической проекции. Для широтного пояса от 60 до 80°, к которому относится описываемый фотоплан В-4, значения широт стандартных параллелей следующие:

$$\varphi_1 = 63^{\circ}18'00,0'', \quad \varphi_2 = 77^{\circ}30'00,1''.$$

Построение цельных фотопланов по трапециям выполняется цифровыми методами с помощью ЭВМ и систем вывода изображений [1]. Элемент дискретизации на фотопланах соответствует на местности  $\sim 1$  км. Положение элементов рельефа на фотопланах дано в венерографической системе координат, рекомендованной Рабочей группой по картографическим координатам и элементам вращения планет и спутников Международного астрономического союза [4]. Отсчет высот точек рельефа, как и при вычислении картографических проекций, ведется от принятой для Венеры уровенной сферической поверхности радиусом 6051,0 км.

# Морфологическое описание района

Плато Лакшми. Основная часть плато Лакшми имеет в плане форму неправильного шестиугольника со сглаженными углами поперечником около 1400 км, с трапециевидным выступом на севере и с протяженным выступом на востоке вплоть до подножья гор Максвелла (рис. 2). Ровная поверхность плато имеет высоты 4-4,5 км относительно принятой уровенной поверхности Венеры и осложнена рядом структур меньших размеров. В первую очередь к ним следует отнести патеру Колетт в центре западной половины плато, которая имеет форму вытянутого в меридиональном направлении овала размером  $130 \times 80$  км и глубиной около 2 км. В окрестностях Колетт на расстояниях до 250 км прослеживаются узкие полосы и фестончатые участки радарно светлых поверхностей, которые по очертаниям в плане похожи на потоки жидких лав. Как правило, они ориентированы радиально по отношению к патере. В целом патера Колетт с системой расходящихся потоков представляет собой гигантский щитовой вулкан поперечником около 600 км, слегка вытянутый в меридиональном направлении и занимающий почти всю западную половину плато Лакшми (рис. 3).

В центре восточной половины плато расположена еще одна овальная депрессия — патера Сакаджавея размером 200 × 120 км и глубиной около 1,5 км, ориентированная в северо-восточном направлении. Выражена депрессия менее отчетливо, чем Колетт; на ее присутствие кроме гипсометрии указывают также два концентрических светлых овала и подковообразное темное пятно в центре.

Севернее депрессии Сакаджавея через всю восточную половину плато в широтном направлении протягивается полоса плосковершинных возвышенностей, поднимающихся над уровнем плато в среднем на





500 м. Характер соотношения равнинного материала плато с возвышенностями вдоль изрезанных границ позволяет считать эти возвышенности останцами. Их расчлененная диагональной сетью гряд и борозд поверхность, очевидно, несет на себе следы прежних деформаций, которыми не затронуты более молодые равнинные отложения плато Лакшми.



Рис. 2 б. Фотокарта плато Лакшми и прилегающих территорий. Контурами показаны фрагменты, приведенные на рис. 3-6 (а); схема планетографических названий (б)

**Горное обрамление плато Лакшми.** На юге основной массив плато обрамлен узким поясом шириной около 100 км (горы Дану), состоящим из линейных хребтов и долин между ними, которые ориентированы почти повсюду вдоль кромки плато. Отдельные хребты внутри пояса прослеживаются на десятки километров (до 100 км) в длину и имеют 10–15 км в ширину. В рельефе поясу линейных хребтов соответствует обращенный к югу уступ Весты высотой 3–5 км, так что региональный уклон на уступе может достигать нескольких градусов, а верхняя кромка уступа местами возвышается над поверхностью плато. Подножье уступа местами налегает на расположенную южнее область хаотического рельефа и захоранивает ее (рис. 2).

На западе плато ограничено пологим валом меридионального простирания, который к западу обрывается уступом. На поверхности вала





Рис. 3. Место сочленения плато Лакшми с горами Акны. Параллельная система асимметричных хребтов с крутыми склонами, обращенными к плато. С удалением от плато характерная длина хребта уменьшается. Размер участка 240 × 400 км

Рис. 4. Тессера Мойры — предположительно концевая часть гигантского потока пластичного материала, выжатого из-под югозападного края плато Лакшми. Размер участка 240 × 400 км

прочитываются несколько крутосклонных расселин, которые скорее всего являются зияющими трещинами растяжения. Крупнейшая из них имеет северо-восточное простирание и тянется примерно на 150 км при ширине в первые километры. В юго-западном углу листа к обрамлению Лакшми примыкает выраженная в рельефе структура в форме ограниченного четким уступом диска поперечником около 300 км, наложенного на поверхность холмистой равнины (рис. 4).

На северо-западе границей плато являются подножья гор Акны, поднимающиеся над его поверхностью на 2,5 км. В наиболее высокой части массив гор Акны сложен последовательностью асимметричных хребтов и депрессий длиной до 300 и шириной до 50 км с короткими крутыми склонами, обращенными к плато, и длинными пологими противоположными. В плане это кулисообразно расположенные куэсты, осложненные подобными же структурами более высоких порядков (рис. 3). В направлении к тессере Атропос характерный размер структур и высота гор уменьшаются. Максимальная длина отдельного хребта здесь не превышает 100 км, а вся эта сложно построенная горная страна протягивается на север вплоть до границы с равниной Снегурочки.

На севере основной массив плато имеет трапециевидный выступ, обрамление которого представлено массивом гор Фрейи. В наиболее высокой части массив состоит из системы линейных хребтов длиной до 200 и шириной до 5–15 км, ориентированных в субширотном направлении. Эта упорядоченная система параллельных хребтов прослеживается в субширотной полосе шириной 150 и длиной 400 км. Восточнее полоса хребтов изгибается к югу, а на примыкающей поверхности плато видны радарно светлые полосы шириной в первые километры, ориентированные параллельно кромке плато и образующие в месте изгиба обрамления сеть с ромбическими ячейками. Наиболее высокие части массива возвышаются над поверхностью плато на 2,5–3,0 км (рис. 5).

Расположенная севернее горная страна (тессера Ицпапалотль) характеризуется менее упорядоченным рельефом. В восточной ее части преобладают субширотные простирания хребтов, но относительно упорядочены они лишь в пределах линзовидных блоков размером  $200 \times 100$  км. Они также ориентированы субширотно и разделены разломами, которые прочитываются по линиям смещения структур и желобам (каньоны Мисне и Виресакки). На севере тессера Ицпапалотль ограничена крутым уступом Уорсар высотой 2,5 км, обрамляющим структуру Лакшми с севера на протяжении 1500 км (рис. 2).

К востоку от гор Фрейи в общем непрерывное обрамление плато Лакшми прервано обширной котловиной, днище которой смыкается с равниной Снегурочки. В изометричное понижение котловины поперечником 600-700 км и с высотами днища 2,5-3,0 км над уровенной поверхностью с северо-запада спускаются валообразные структуры внешнего обрамления Лакшми. Они погружаются под материал равнины, который покрывает их по извилистым контактам. Восточной границей котловины являются гряды Семуни — пояс линейных структур длиной 600-700 км. Гряды и сопряженные с ними борозды вытянуты меридионально и имеют характерную длину 100 км при ширине 10-15 км. Северная оконечность пояса погружается под поверхность равнины Снегурочки, а южная смыкается с массивом гор Максвелла. Восточнее гряд Семуни в поле развития тесерры Фортуны прослеживаются пилообразные структуры, которые являются как бы продолжением внешнего обрамления Лакшми. Их Т-образные сочленения с поясом гряд Семуни свидетельствуют о том, что пояс является структурой наложенной (рис. 2).

На юго-восточном борту котловины расположен зажатый между двумя расселинами серповидный в плане хребет длиной около 400 и шириной 50–60 км. В центральной части он состоит из трех отдельных массивов, которые выглядят как линзообразные блоки размером 50 × 60 км относительно жестких пород, погруженных в более пластичную толщу. Сходство подчеркивается системами узких сопряженных

гряд и борозд, ориентированных конформно этим блокам и напоминающих линии течения. Далее на юго-восток начинается крутой подъем в сторону массива Максвелла.

Восточный выступ плато Лакшми и горы Максвелла. На широте патеры Сакаджавея плато Лакшми имеет выступ, протягивающийся на восток на 800 км при ширине 200-300 км. Его восточная оконечность упирается в подножье гор Максвелла, поднимающееся крутым уступом над плато на высоту более 5 км. Поверхность плато к востоку слегка повышается: в центре плато Лакший высоты составляют 3,0-3,5 км, и у подножья гор Максвелла 5,5 км над уровенной поверхностью. В юго-восточном углу выступа поверхность плато рассечена серией параллельных дугообразных борозд Рангрид северо-западного простирания, причем их юго-восточные концы имеют максимальную ширину до 10-15 км и сужаются к северо-востоку, постепенно сходя на нет. Длины борозд от 50 до 200 км. Судя по характеру отражения радиосигнала они имеют V-образный профиль поперечного сечения без признаком валов вдоль резких кромок. Похожие борозды меньших размеров имеются вдоль всей южной кромки выступа плато. Для образования таких борозд, очевидно, была нужна обстановка растяжения (рис. 6).

Массив гор Максвелла в пределах листа В-4 представлен своей северо-западной частью, где по гипсометрии и рисунку рельефа выделяется несколько зон. Юго-западный склон массива субпараллельно подножью изрезан системой сопряженных гряд и борозд шириной до 5 и длиной до 100 км. По смещениям полосчатой структуры можно выделить несколько крупных линзовидных в плане блоков, также ориентированных субпараллельно подножью. На поверхности плато вдоль кромки массива видна система асимметричных гряд с крутыми западными и пологими восточными склонами. Эти гряды не выражены в гипсометрии и располагаются на высотном уровне плато. Создается впечатление, что именно здесь поверхностный слой плато Лакшми раскалывается на чешуеобразные блоки с падениями на восток, которые «плотно упакованы» на западном склоне массива Максвелла.

В центральной части массива рисунок рельефа резко меняется, причем граница с крутым западным склоном почти прямолинейна и совпадает с линией нарушения структур. Этой части массива присущи длинные асимметричные гряды (до 200 км) шириной 20–25 км, состоящие как бы из пластин с падениями на запад, поскольку восточные «освещенные» склоны их, как правило, уже (менее 10 км), а западные шире. В целом рисунок обращенных к радару склонов напоминает систему ячеек сети, сильно вытянутой в северо-западном направлении. Эта зона приходится на область максимальных высот массива, но при картировании с разрешением 500 м по высоте вершина массива оказывается почти плоской (уклоны здесь на порядок меньше, чем на западном склоне). Ширина зоны 200, длина 400 км. К северо-востоку поверхность массива полого спускается к области





горами С хребтов В область В 240 × 400 км

Рис. 5. Сочленение плато Лакшми Рис. 6. Место сочленения восточного вы-Фрейи. Система ступа плато Лакшми с горами Максвеласимметричных субпараллельных ла. В центре сжатые структуры крутого центре переходит юго-западного склона массива, к которым разупорядоченного примыкает участок плато, расчлененный рельефа вверху. Размер участка на чешуеобразные блоки; наверху участок центральной зоны расколов на своде поднятия. Внизу слева — борозды Рангрид. Размер фрагмента 240 × 400 км

хаотического рельефа, где высоты в среднем такие же, как на восточном выступе плато Лакшми. Примерно в центре склона располагается крупная (диаметр 130 км по внешнему валу) двухкольцевая структура, похожая на ударный кратер.

Все склоны массива, кроме обращенного к Лакшми юго-западного, характеризуются радарно яркой поверхностью и «разупорядоченным» рельефом. На северо-западе центральная зона массива с крупным рисунком рельефа по зубчатой неровной границе контактирует с участком, резко отличающимся по рисунку структур, их ориентировке и шероховатости поверхности. Участок вытянут в северо-восточном направлении на 400 км, его северо-западная граница относительно прямолинейна, а на юго-востоке он имеет два треугольных выступа, вдающихся в центральную зону массива. Неровности пологого «морщинистого» рельефа пересечены здесь пятнами и линиями с низкой отражательной способностью, которые на стереомодели выглядят зияющими расселинами. В целом соотношение границ участка с полосчатыми структурами массива таково, как если бы весь участок представлял собой покров, испытавший деформации растяжения.

Рельеф северо-восточного склона массива (за пределами листа) также разупорядочен: здесь наблюдаются относительно короткие (20–30 км) гряды и бугры и лишь в отдельных местах сохраняется параллельно-полосчатая упорядоченная структура.

Разупорядоченный рельеф, элементами которого являются короткие гряды и бугры, развит и на южном склоне массива (за пределами листа). Здесь он организуется в некоторое подобие валов, повторяющих очертания границ массива и почти точно следующих направлению изогипс, что, возможно, обусловлено оползанием материала вниз по склону.

Внешние границы описанных радарно ярких участков склона массива прослеживаются по резкому изменению альбедо в радиодиапазоне, а сходство рельефа позволяет объединить их в самостоятельный комплекс или тип местности, обрамляющий центральную зону массива гор Максвелла (см. также [2]).

#### Ударные кратеры

Помимо упоминавшегося выше кратера Клеопатра предположительно ударного происхождения в пределах плато Лакшми и его горного обрамления есть несколько кратеров, несущих отчетливые признаки ударного образования. Среди них обращают на себя внимание кратер Ивка (68° с.ш., 304° в.д.), наложенный на равнинную местность и имеющий бабочковидную радиояркую зону выбросов, и кратер Коттон (71° с.ш., 300° в.д.), наложенный на гористую местность и также имеющий радиояркую зону выбросов. Ряд кратеров меньшего размера обнаружен на поверхности собственно плато Лакшми — это кратеры Рита, Магда, Злата, Берта, Людмила.

#### Интерпретация геологического строения

Наиболее молодыми образованиями структуры Лакшми являются области собственно плато, образованные излияниями жидких лав из двух крупнейших центров — патер Колетт и Сакаджавея, а также ряда более мелких. Больший размах рельефа патеры Колетт при равных размерах с патерой Сакаджавея, а также отчетливо прослеживающиеся границы отдельных потоков свидетельствуют в пользу относительной молодости Колетт. Из-под поверхности лавовых потоков выступают над плато приподнятые останцы с пересекающимися системами трещиноватости, свидетельствующими об обстановке растяжения на этапе, предшествовавшем образованию лавовой равнины [3].

На окраинах плато (подножья гор Фрейи и Максвелла) видно, что в образование горного обрамления вовлекается материал плато. Судить

о строении горных районов можно на основании стереомодели в тех местах, где это позволяют условия съемки. В адекватности стереомодели убеждает ее сопоставление с данными альтиметрии и с относительно хорошо известной морфологией ударных кратеров. Анализ стереоизображений показывает, что значительные части массивов гор Акны и Фрейи оказываются системами асимметричных хребтов с простираниями, конформными плато, а это может косвенно указывать на их единое происхождение. Подобные системы асимметричных субпараллельных хребтов могут возникать как при блоковом (чешуйчатом), так и при складчатом их строении. Однако их образование независимо от механизма требует присутствия относительно жесткого поверхностного слоя мощностью порядка 10 км [5] и условий горизонтального сжатия. В направлении к периферии структуры Лакшми возрастает степень разупорядоченности в строении горных сооружений Акны и Фрейи (тессеры Атропос и Ицпапалотль соответственно), что может свидетельствовать об усложнении истории деформаций и об увеличении возраста структуры в этом направлении (рис. 7).

Зона линейных хребтов южного обрамления в целом не возвышается или возвышается незначительно над поверхностью плато, уклоны же на уступе Весты могут достигать нескольких градусов. При таком региональном уклоне структуры обрамления Лакшми на юге могут образоваться при пассивном гравитационном растекании массива плато, чему, возможно, способствовали высокие температуры поверхностного слоя [6]. В возникновении поднимающихся над уровнем плато гор Акны и Фрейи, видимо, принимали участие более активные усилия горизонтального сжатия.

Косвенно о горизонтальном течении вещества с уступа Весты свидетельствует дискообразная структура на юго-западе внешнего обрамления Лакшми (тессера Мойры), которая напоминает концевую часть гигантского потока пластичного вещества, излившегося или выдавленного из-под края плато. В сторону плато ее поверхность со структурами течения постепенно переходит в бугристый рельеф с расселинами, напоминающими трещины отседания. Такая картина могла возникнуть при движении потока, захватившего кровлю ниши, где он берет свое начало.

Восточный выступ Лакшми резко переходит в крутое подножье массива Максвелл с его уступом высотой 5 км, где сжатые структуры ориентированы поперек направления выступа. Структурно ситуация сходна с подножьями гор Акны и Фрейи: здесь также материал поверхностного слоя плато вовлекается в формирование горного массива с участием активных сил горизонтального сжатия. Все три ситуации находят свое объяснение с позиций горизонтальных подповерхностных потоков вещества, расходящихся радиально из центра Лакшми (рис. 8).

В случае массива Максвелла картина дополняется существованием субширотных сдвигов на его северной и южной границах. Об обстановке сдвига на северо-западной границе массива свидетельствуют протяженные желоба, маркирующие «притертые» линии нарушений, и







Рис. 8. Схема тектонического строения региона, иллюстрирующая направления астеносферных потоков (крупные стрелки) и гравитационного оползания (малые стрелки)

зажатые между ними жесткие линзовидные блоки с одной стороны разломов и зияющие расселины — с другой. Эта ситуация укладывается в схему правостороннего сдвига, обрывающего массив гор Максвелла с северо-запада. С юга восточный выступ Лакшми и горы Максвелла обрывает протяженная широтная линия нарушения, которая также является сдвигом, но с левосторонним смещением и значительной вертикальной составляющей. На присутствие сдвига указывают борозды Рангрид, являющиеся скорее всего оперяющими сколами, и гряды Ауски, похожие на валы сжатия, причлененные к сдвигу с юга под острым углом. Широтные сдвиги, ограничивающие выступ плато и массив Максвелла, очевидно, играют роль земных трансформных разломов, позволяющих потоку вещества двигаться в разных местах с различными скоростями.

Особо следует остановиться па радиоярком типе местности с разупорядоченным рельефом на склонах массива Максвелл. Он представляет собой, очевидно, единый геологический комплекс, о чем можно судить по рисунку рельефа, фототону и четкости границ распространения. На северо-западном склоне массива он выглядит как покров, лежащий на полосчатых структурах гряд Семуни и центральной зоны массива. Однако разупорядоченный рельеф покрова говорит о том, что он, вероятно, деформировался в период образования пояса и претерпел растяжение вплоть до возникновения зияющих трещин. В строении поверхности вытянутого далеко на запад отрога массива Максвелла принимают участие радарно светлые участки с изрезанными кромками, которые по характеру рельефа могут быть отторжениями покрова, тем более что между ними проглядывает темная полосчатая структура, характерная для центральной зоны массива. С другой стороны, эти участки почти вплотную примыкают к северной кромке восточного выступа плато Лакшми. Это наводит на мысль, что и сам покров может быть сложен деформированными лавовыми толщами плато. Комплекс крутого западного склона массива по сути также сложен деформированными породами поверхностного слоя плато Лакшми, так как видно, что материал плато вовлекается в образование массива у его подножья. Однако здесь мы видим результат деформаций интенсивного сжатия, что привело к «плотной упаковке» блоков-чешуй, «нарезанных» из материала плато.

Центральная зона массива с ее крупным полосчатым рисунком рельефа выглядит совершенно отлично от сжатых структур западного склона, напоминая более всего систему гигантских сопряженных кулисообразно расселин, возникших как следствие растяжения на своде массива. На основе такого допущения образование массива можно рассматривать как результат воздымания с расколами на своде и концевой части мощного горизонтального потока вещества из центра Лакшми, что сопровождалось оползанием поверхностного слоя на склонах формирующегося поднятия. При этом возникла зона сжатых структур на западе, где поток из Лакшми набегал на формирующимся массив, и разупорядоченный рельеф на остальных склонах за счет оползаний по направлению потока или поперек его движения.

Основываясь на идее потоков, расходящихся из единого центра, образование складчато-разрывного обрамления Лакшми можно себе представить как результат скучивания материала поверхностного слоя, который должен был обладать большей жесткостью относительно подповерхностного, что следует из разумного допущения о существовании вертикального температурного градиента на Венере. Это приводит к неизбежному выводу о необходимости отрыва пластичного глубинного слоя от более жесткого поверхностного и о короблении и раскалывании на чешуеобразные блоки или смятия в складки последнего. Очевидно, следы именно такого процесса мы наблюдаем наиболее отчетливо на стыке восточного выступа Лакшми с массивом гор Максвелла. Возможным местом зарождения подповерхностных потоков следует считать центральную область замкнутой почти со всех сторон структуры Лакшми; на это указывают огромные масштабы молодого вулканизма и присутствие гигантских кальдер Колетт и Сакаджавея, что свидетельствует о притоке горячего материала недр в этом регионе.

Учитывая общие размеры структуры Лакшми и размеры ее обрамления, уместно называть потоки астеносферными, а жесткий поверхностный слой литосферой Венеры. С этих позиций структура Лакшми заслуживает названия своеобразного центра радиального спрединга, возникающего над восходящим током разогретого глубинного вещества.

#### Выводы

1. Плато Лакшми и его обрамление — единая структура, образованная единым процессом, на что указывают ее компактность и конформность обрамления.

2. В основе механизма образования структуры лежит процесс подъема вещества из недр планеты к поверхности и его горизонтальное растекание, сопровождавшееся деформациями типа складчатости и (или) образования тектонических чешуй. Это позволяет говорить о Лакшми как о своеобразном локальном центре радиального спрединга, однако процесс спрединга прекратился после скучивания литосферы в массивы горных сооружении, что сопровождалось отрывом астеносферного потока от более жесткой литосферы планеты. В ходе формирования структуры мощность литосферы составляла порядка 10 км.

3. Крупномасштабные горизонтальные перемещения позволяют говорить о Венере как о планете с более сложной тектонической жизнью по сравнению с примитивными членами земной группы (Луна, Меркурий, Марс), где стиль тектоники ограничен преимущественно вертикальными движениями. Это дает основание считать Венеру промежуточным звеном в ряду усложнения типов деформаций между Землей с ее тектоникой плит и Марсом, тектоническая жизнь которого замерла на этапе образования гигантских каньонов и обширных поднятий, увенчанных крупными щитовыми вулканами.

## Литература

- Александров Ю. Н., Захаров А. И., Крымов А. А. и др. Построение фотопланов поверхности Венеры по материалам радиолокационной съемки с АМС «Венера-15» и «Венера-16». — Геодезия и картография, 1985, № 9, с. 41–48.
- 2. Суханов А. Л., Пронин А. А., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание Земли Иштар. Фотокарта Венеры, лист В-5. Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 2, с. 99–111.
- Basilevskij A. T., Pronin A. A., Ronca L. B. et al. Styles of tectonic deformation on Venus: Analysis of Venera-15 and 16 data. Proc. Lunar Planet Sci. Conf. 16, Porgamon Press, 1985.
- 4. Davies M. E., Abalakin V. K., Lieske J. H. et al. Report of the IAU Working group on Cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 1982. Celestial Mechanics, 1983, v. 29, p. 309–321.
- 5. Solomon S. C., Head J. W. Venus banded terrain: tectonic models for band formation and their relationship to lithospheric termal structure. J. Geophys. Res., 1984, v. 89, № B8, p. 6885–6897.
- 6. Weertman J. Height of moutains on Venus and the creep properties of rock. Phys. Earth and Planet. Internal., 1979, v. 19, p. 197–207.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского АН СССР

Поступила в редакцию 5.11.1986

Геологический институт АН СССР

Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского

Институт радиотехники и электроники АН СССР

### Geological-morphological Description of the Lakshmi Planum (Photomap of the Venusian Surface Sheet B-4)

A. A. Pronin, A. L. Sukuanov, Yu. S. Tyuflin, S. A. Kadnichanskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. I. Petrov, A. I. Sidorenko, Yu. N. Alexandrov, A. P. Krivtsov, V. P. Sinilo, G. A. Burba, N. N. Bobina

The morphological description of Lakshmi Planum and its surrounding is given: they are parts of a single structure. It is suggested that the mechanism of plume ascent from planetary interiors and its horisontal spreading is responsible for the structure formation. Folding and/or imbricating are the result of the process. Thus Lakshmi structure can be considered as a local center of radial spreading. The structure dimensions suggest that asthenospheric currents have boon involved in its formation.
# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗЕМЛИ ИШТАР (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-5)

А. Л. Суханов, А. А. Пронин, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. И. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, А. И. Захаров, А. А. Крымов, Н. Н. Бобина

Астрономический вестник, 1986, т. ХХ, №2, с. 99-110

Основная часть Земли Иштар восточнее гор Максвелла покрыта системами площадных дислокаций нескольких направлений, называемых «паркетом». По структурным рисункам здесь выделяются: 1) центральный стабильным блок; 2) меньшие периферические блоки, отделенные от центрального разрывами и грабенами; 3) зоны мобилизованного паркета, вещество которых растекалось вниз под уклон в стороны от центрального блока в виде пластичных потоков; 4) частично «паркетизированные» лавовые толщи. Горы Максвелла образовались в результате столкновения центрального блока и плато Лакшми.

#### Введение

Лист фотокарты B-5, построенный по материалам радиолокационной съемки с AMC «Венера-15» и «Венера-16», как и фотокарта листа B-4 [2], расположен в широтном поясе от  $\varphi = 60^{\circ}$ до  $\varphi = 80^{\circ}$  и построен в нормальной равноугольной конической проекции Ламберта-Гаусса. Углы рамок трапеции листа B-5 имеют венерографические координаты:  $\varphi_1 = 80^{\circ}$ ,  $\lambda_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 80$ ,  $\lambda_2 = 60$ ,  $\varphi_3 = 60$ ,  $\lambda_3 = 0$ ,  $\varphi_4 = 60$ ,  $\lambda_4 = 60^{\circ}$ .

### Морфологическое описание региона

Эта фотокарта включает северо-восточную часть Земли Иштар, которая занимает всю центральную часть описываемой территории (рис. 1–3). На западе региона высоты достигают 11 км (в полосе гор Максвелла западнее двойного кратера Клеопатра); восточнее местность понижается — до 3–4 км на южной и юго-восточной границе Земли Иштар и до 0–1 км по ее северной границе.

Поверхность этого поднятия на огромных пространствах покрыта монотонно чередующимися пологими грядами и бороздами с характер-

ной шириной около 10 км (5–15 км) и длиной от первых десятков до 100–200 км. Эти субпараллельные структуры образуют как бы прямые или изогнутые пакеты, и в одном участке можно обычно проследить наложение двух или более взаимопересекающихся структур. В мелком масштабе этот тип местности напоминает рисунок уложенных «елочкой» или ромбами планок, почему, увиденный впервые, и был назван «паркетом», хотя при дальнейшей съемке были обнаружены существенно иные рисунки. Общим для всех таких местностей является площадное развитие однотипных дислокаций, не объединенных в изолированные пояса, кольца и др., но равномерно покрывающих сотни тысяч квадратных километров [1].

Для отдельных крупных областей развития паркета было предложено морфологическое название «тессера», и восточная часть Земли Иштар названа тессерой Фортуны. Геологически эта область относится к одним из самых сложных на заснятой территории.

В целом схема строения паркета этого региона представляется следующим образом (рис. 4): центральный однородный массив (А) площадью около 800 000 км<sup>2</sup>, окруженный мозаикой периферических блоков. Эти блоки либо являются небольшими плитами, отделенными от центрального массива зонами растяжения (З, К), либо они образованы огромными языками материала, как бы растекающимися от него (Б, Д, Ж). Ниже дано описание основных блоков.

# Центральный массив

Образующий нейтральный массив блок А занимает плато, очень полого понижающееся с удалением от гор Максвелла от 5,5 км на западе до 3–3,5 км на востоке. Перекрестные системы северо-западных и северо-восточных гряд и борозд разбивают местность на ромбовидные участки, вытянутые обычно широтно; местами преобладают структуры одного направления или появляются их округленные дуговидные сочленения (рис. 2*a*). Крупные разрывы тех же ориентировок образуют сеть с большим размером ячеек. Все эти структуры должны были образоваться в поле преобладающего широтного сжатии.

Западной границей блока служит субмеридиональный пояс линейных дислокаций, за которым после слабо выраженного прогиба начинается поднятие Максвелла. В восточной части блока крупные сбросы образуют гигантскую систему ветвящихся грабенов шириной до 100 км и глубиной до 1–1,5 км, частично заполненных лавами; эта система представляется несомненной зоной растяжения, где от основного массива отрезаются меньшие блоки. Но ширину грабенов нельзя считать величиной истинного раздвигания: реликты паркета внутри грабенов указывают на проседание их дна, вероятно, при относительно небольшом расхождении их бортов.

Местами на фоне однородных перекрещивающихся дислокаций видны структуры других типов: 1) реликты кольцевых или субконцен-



Рис. 1. Фотокарта Венеры, лист 5. Показано положение фрагментов, приведенных на рис. 2





Рис. 2. Некоторые характерные участки поверхности Земли Иштар. Масштаб 1:5000000



Рис. 3. Геолого-морфологическая карта поверхности Венеры, лист В-5. Условные обозначения: 1 — структурные линии паркета; 2 — древнейший «хрупкий» рельеф; 3 — гладкие равнины; 4 — холмистые равнины; 5 — полосчатые равнины; 6 — складчатое обрамление Лакшми; 7 — пояса линейных дислокаций; 8 — овоид; 9 — дайки; 10 — валы на равнинах; 11 — вулканы; 12 — депрессии и кальдеры; 13 — крупные разрывы и основные структурные линии

трических структур неясного генезиса: они сохраняют очертания, хотя пересечены разрывами, т.е. смещения по разрывам были невелики; 2) система вложенных одна в другую вытянутых петель на 71° с.ш. и 17° в. д.: кажется, что они обрисовывают поток какого-то вещества, двигавшегося на юго-восток; на самом деле эти гряды и борозды расположены вдоль склонов местного желоба 200 × 100 км в поперечнике и 1,5 км глубиной и, похоже, образовались при перемещении материала со склонов желоба к его оси (рис. 2a); 3) длинные полосы несколько приподнятого вещества со сглаженной поверхностью (одна из них протягивается на юг от этого же желоба). Местами материал полос перекрывает материал паркета, и они образованы, вероятно, эффузивно-экструзивной деятельностью вдоль крупных зон линейной проницаемости.

Весь блок, видимо, первоначально сформировался в едином поле напряжений с преобладающим сжатием по широте, но с небольшой амплитудой дислокаций, а затем был рассечен крупными разрывами,



Рис. 4. Структурное районирование тессеры Фортуны. Условные обозначения: 1 — отдельные блоки паркета; 2 — пояса линейных дислокаций (пустыми кружками показаны частично перекрытые пояса); 3 — зона растяжения; 4 обрамление Лакшми; 5 — лавовые равнины; 6 — разломы; 7 — направления перемещений; 8 — ось цепи вулканических центров

по которым образовались грабены и зоны проницаемости, но лишь с небольшими горизонтальными подвижками.

### Зоны пластического оттока материала

Зона Б образована серией гигантских V- и U-образных структурных дуг, как бы вложенных одна в другую, обращенных вершинами на восток (к сожалению, на приводимом изображении вершины этих дуг размыты из-за плохого совмещения полос съемки при разной высоте орбит, но они хорошо прочитываются при просмотре серии полос под стереоскопом). В целом картина напоминает как бы корку гигантского потока пластического вещества, отходящего к востоку от блока А, с растяжением в тыловом части. Осевая часть этого «потока» имеет более сглаженный и однородный рельеф по сравнению с его краями, как если бы вещество здесь было более пластичным, и, судя по рисунку структур, она продвинута дальше на восток по сравнению с краями. Эта осевая часть в общем на несколько сотен метров выше, чем края, но в целом эта зона лежит ниже на 2-2,5 км, чем блок А, и на 0,5-2 км ниже юго-восточной окраины Земли Иштар. Создается впечатление, что блоки А и Б вместе с описанными далее зонами К и Л образовывали некогда единый огромный массив с общей поверхностью,

который затем был расчленен за счет проседания и «оттока» материала зоны Б на восток и северо-восток.

На восточном окончании «потока» острые дуги становятся все более широкими и открытыми и постепенно сменяются извилистыми субмеридиональными структурами блока В (рис. 26), который представляет собой зону скучивания материала, перемычку, зажатую между блоками Б и Г (в блоке Г, относящемся к следующему листу 6, движение направлено навстречу — на запад и северо-запад).

На фоне прихотливо изогнутых структур блока В прослеживаются прямые сколы, ориентированные на ЗСЗ, однако неясно, образованы ли они за счет встречного движения материала соседних зон или здесь «просвечивают» какие-то древние структуры.

Примыкающая к горам Максвелла наиболее приподнятая часть центрального блока А при движении на юг быстро понижается и переходит в блок Д. Здесь на фоне коротких диагональных структур появляются также округлые дуги, обращенные вершинами на юг, вниз по склону, как если бы поток пластичного вещества стекал здесь под действием собственной тяжести. Это впечатление подтверждается тем, что вещество «стекающего» блока перекрывает лежащие ниже структуры блока Е (в блоке Е преобладающие северо-западные структуры созданы, очевидно, широтными напряжениями, и здесь также видны U-образные в плане формы, но обращенные вершинами на восток).

Соседний блок Ж представляет собой веерообразный язык материала, как бы растекающегося вниз под уклон к югу от блока А. Узкие, слегка изогнутые и ветвящиеся гряды, образующие «пластинки» этого веера, похожи на мелкие складки или чешуи, надвинутые в восточном направлении, а крайние гряды веера четко перекрывают более древние структуры. В нижней части веера видна серия субширотных изогнутых трещин, нарезающих материал поперек склона на пластины, ступенчато понижающиеся и как бы соскальзывающие к местной депрессии.

Остается неясным, почему однонаправленное течение вещества соседних блоков Д и Ж создало в них такие различающиеся структуры. Возможно, вещество блока Ж (веера) было больше размягчено и (или) какая-то часть этого блока образована лавами.

В целом в описанных зонах есть признаки одновременно действовавших сопряженных сжатий и растяжений в результате горизонтальных перемещений поверхностного материала в виде пластических «потоков» с движением вниз под уклон, даже если видимый сейчас уклон очень мал.

### Периферические зоны растяжения

На севере и северо-западе массив паркета окаймлен протяженной изогнутой зоной З. Она состоит из полос паркета, структуры которых ориентированы преимущественно вдоль границ центрального массива,

из параллельных им прогибов, заполненных лавами (очевидно, это области растяжения), и из поясов линейных дислокаций.

Пояса линейных дислокаций шириной порядка 100 км состоят из субпараллельных гряд и борозд, выраженных более резко, чем гряды и борозды паркета: они не образуют перекрестных структур, как на паркете, но протягиваются далеко по простиранию поясов, сжимаясь и раздуваясь. В северо-западной части карты такой пояс явно срезает структуры паркета, но на севере, между 30 и 40° в.д., часть того же пояса «съедена» дуговидными структурами паркета, т.е. пояс и (или) паркет формировались в несколько этапов. В этом же поясе есть суженные флексуровидные участки, созданные сжатием, но по простиранию они сменяются раздувами, в центре которых видны депрессии с небольшими вулканами или экструзиями, - эти участки надо интерпретировать как зоны растяжения. Наконец, есть и признаки горизонтальных перемещений вдоль границ поясов, так что в примыкающем паркете образуются формы волочения. Кроме механических дислокаций в этих поясах есть гребни, образованные мощными магматическими дайками.

Основная масса поясов находится гораздо восточнее, от 150 до 260° в. д., и они будут описаны позднее, в других статьях. Здесь же можно лишь сказать, что, по всей вероятности, эти пояса представляют собой шовные зоны между литосферными блоками и неоднократные дифференциальные подвижки этих блоков создавали в одни периоды напряжения сжатия, в другие — растяжения или же — при появлении сдвиговой составляющей — сжатие в одних участках с одновременным растяжением в других.

На западе эта периферическая зона паркета воздымается и переходит в горный массив Максвелла (зона И). Его характеристика и характеристика участков к западу и северо-западу от массива даны в описании листа 4 [2]. Здесь достаточно отметить следующее.

На широте примерно 68° пояс линейных дислокации, окаймляющий паркет, одновременно с резким воздыманием скрывается под более молодым массивным покровом, очевидно эффузивным. Местами структуры пояса перекрыты полностью или же их очертания «просвечивают» сквозь покров, выражаясь в удлиненных депрессиях; в вершинной части гор Максвелла этот пояс «выныривает» из-под покрова явно за счет растяжения: остатки покрова ясно видны между структурами пояса, а так как крупномасштабная эрозия на Венере отсутствует [1], то материал не мог быть удален отсюда водой или ветром.

Сам покров, видимо, является красной частью плато Лакшми, т. е. лавовой толщей, некогда соединявшейся с основным плато. Впоследствии эта часть плато была по северо-западным разрывам отколота и приподнята на несколько километров, что сопровождалось раздроблением некогда ровной поверхности. В юго-восточной части гор Максвелла этот дробленый покров по степени дислоцированности приближается к паркету, однако он отличается от него по структуре и фототону (рис. 2в). В его северо-западной части треугольный останец покрова отделен от него довольно глубокими долинами растяжения.

Зона очень узких линейных структур западного подножья Максвелла заметно отличается от структур пояса на его вершине: эта зона состоит из явных складок нагнетания, сминающих самые молодые лавовые толщи поверхности плато Лакшми.

Южная часть гор Максвелла обрезана и опущена по широтному левостороннему сбросо-сдвигу. Опущенное крыло перекрыто лавами, и только по короблению и растрескиванию их поверхности угадывается продолжение поясов линейных дислокации, описанных выше. А непосредственно к югу от сдвига широтный прогиб дополнительно залит молодыми лавами, скрывшими и структуры коробления лав промежуточного этапа.

Смещения по сдвигу непосредственно не фиксируются, и его сдвиговый характер определен по рисунку оперяющих трещин и соотношению структуры Максвелла с соседними областями, а сам сдвиг исчезает в молодых зонах паркета восточнее. По-видимому, здесь этот сдвиг постепенно затухает, и его сдвиговая компонента переходит в вертикальные составляющие, так что происходит одновременное выгибание северного крыла вверх с образованием гор Максвелла, а южного крыла вниз с последующим заполнением прогиба лавами.

Вторая, еще более интересная периферическая зона К примыкает к блокам А и Б с юга. Она лежит на пересечении меридионального грабена, подходящего сюда с севера, и широтной полосы разломов протяженностью более 1500 км, прослеживающейся к востоку. В этой зоне с севера на юг прослеживаются следующие структуры: 1) изогнутая депрессия шириной 150 км, заполненная лавами, с близкими контурами северного и южного бортов; по оси депрессии, повторяя контуры ее бортов, протягивается валообразное вздутие с продольными бороздами и расщелинами (рис. 2г); 2) два субширотных блока высотой до 2,5 км над соседними лавами: их структура похожа на структуру паркета, но отличается более упорядоченной частой бороздчатостью; блоки разделены узкой расщелиной; 3) угловатая депрессия, вытянутая на северо-восток, заполненная лавами, с сетью пересекающихся даек; А) удлиненный к северо-востоку приподнятый блок, смыкающийся с блоком 2. По-видимому, вся эта зона представляет собой область растяжения, в которой отдельные блоки отошли от основного массива паркета с одновременным разворотом к юго-востоку, — как бы лезвия раскрытых ножниц с шарниром на 43° с.ш., 63° в.д. При этом лавовая депрессия 3 похожа па самостоятельно двигавшуюся микроплиту, а центральный вал в депрессии 1 представляет собой миниатюрный аналог срединно-океанического хребта (сходство этого вала со многими участками в поясах линейных дислокаций еще раз говорит о значительной роли растяжения при образовании этих поясов).

83

Возвышающиеся блоки 2 и 4, вероятно, образованы паркетом с модифицированной поверхностью. Для сохранения их высоты они должны быть либо легче окружающих базальтов, либо состоять из тех же базальтов, но гораздо большей мощности. Если основной массив паркета построен так же, то, значит, он имеет корни, частично поддерживающие его повышенное положение.

Не исключено, впрочем, что эти блоки образованы за счет выдавливания горячего глубинного материала.

Последний участок паркета — зона Л на его юго-восточной окраине — имеет относительно сглаженную поверхность, гофрированную тонкими меридиональными бороздами и гребнями. На севере материал этой зоны явно перекрывает более грубые структуры паркета, которые едва прослеживаются внутри этой зоны по слабым перегибам ее поверхности. На юге же эта зона постепенно переходит в почти недислоцированную лавовую холмистую равнину. Гипсометрически зона Л представляет собой широкий вал с абсолютными высотами до 3–4 км, а вдоль ее южного края проходит цепь округлых впадин, по всей вероятности, вулканических кальдер. Похоже, что здесь южная окраина паркета перекрыта массивными вулканическими покровами еще до завершения движений на паркете, и эти покровы были вовлечены в последние фазы «паркетизации», что и привело к их гофрировке. Возможно, эти покровы одновременны покровам Максвелла.

### Другие образования

С севера паркет перекрыт холмистыми лавами равнины Снегурочки, которая, возможно, состоит из нескольких блоков: так, с запада сюда вероятно заходит окончание субширотной плиты, протягивающейся от 320° в.д. Но в основном детали строения фундамента скрыты под лавами. Следует лишь отметить смещение отрезков двойного вала в северо-западном углу планшета но нескольким сдвигам, напоминающим трансформные разломы, с общей амплитудой по крайней мере 90 км.

Здесь же, на 78° с.ш., 20° в.д., на перегибе пояса линейных дислокаций местность перекрыта пологим щитовым вулканом с кальдерой поперечником 50 км, с отходящими от него протяженными лавовыми потоками и сетью радиальных структур (даек?). Вероятно, эта структура является относительно свежей разновидностью «пауков» — вулканотектонических форм, которые будут охарактеризованы при описании южных планшетов.

Равнина в юго-восточной части планшета — это западная половина овальной впадины, которая, по-видимому, относится к жестким плитам, судя по тому, как ее обтекают структуры паркета и пояса линейных дислокаций. На дне этой впадины из-под материала холмистых равнин проступают полосчатые равнины: области, пересеченные узкими низкими гребнями и полосами, смыкающимися и пересекающимися. При собственном рельефе их можно считать дайками, или узкими горстами, или уступами вдоль разрывов. Сочетание таких мелких форм рельефа, образующих ступенчатую, или «рубчатую», поверхность, положение этих равнин под материалом холмистых и тем более гладких равнин, а также перекрытие полосчатого материала материалом паркета на листе 6 позволяют отнести их к древним образованиям.

# Геологическая история района

Окончательное выяснение последовательности геологических событий в значительной мере зависит от результатов картирования других территорий, поэтому здесь дается лишь общая схема.

1. Формирование структур основного массива паркета в виде огромного плато или пологого купола от 0° на западе до 90° в. д. покрытого северо-западными и северо-восточными дислокациями и обрамленного линейным поясом дислокации на западе и на севере. Излияние древних лав.

2. Излияния лав среднего этапа и частичное перекрытие ими массива паркета и линейных поясов с образованием холмистых равнин.

3. Движение блоков плато Лакшми на восток и их столкновение с массивом паркета. Севернее 68° и южнее 62° с.ш. эти блоки продвинулись относительно дальше на восток, сминая паркет и прогибаясь. В промежутке между ними часть паркета с перекрывающими его покровами была вздыблена и раздроблена, образовав массив Максвелла. Одновременно происходил региональный перекос нейтрального массива паркета с образованием уклонов в сторону от Максвелла — на восток, север и юг.

4. Прогрев, размягчение и расползание краевых зон паркета в стороны от центрального блока А в виде отдельных блоков (зоны З и К) и путем пластического течения крупных масс (зоны Б, Д и Ж) с образованием грабенов в первом случае и дуговых структур во втором. Вовлечение части лав среднего этапа в «паркетизацию».

5. Лавовые излияния гладких равнин.

6. Формирование складчатой зоны западного подножья Максвелла путем смятия молодого лавового материала плато Лакшми.

### Литература

- 1. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О. и др. Основные типы структур северного полушария Венеры. Астрон. вестн., 1985, т. 19, № 1, с. 3–14.
- 2. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Локшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В 4). Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 2, с. 83–98.

Институт геохимии и аналитической химии им. Поступила в редакцию В. И. Вернадского АН СССР 5.II.1986 Геологический институт АН СССР Центральный научно-исследовательский институт геодозии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского Институт радиотехники н электроники АН СССР

### Geological-morphological Description of the Ishtar Terra (Photomap of the Venusian Surface Sheet B-5)

A. I. Sukhanov, A. A. Pronin, Yu. S. Tyuflin, M. V. Ostrovskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. I. Petrov, A. I. Sidorenko, Yu. N. Alexandrov, A. I. Zakharov, A. A. Krymov, N. N. Bobina

The main part of Ishtar Terra surface to the east of Maxwell Montes is covered with areal dislocations of several directions, called «parquet». They can be divided by their structural patterns as follows: 1) central stable block; 2) lesser outlying block separated by faults and grabens from the central one; 3) mobilized zones where material moved downslope away from the central block as viscous flows; 4) partly «parqueted» lava sheets. The Maxwell Montes have been made as a result of collision between central parquet block and Lakshmi Planum.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАВНИН СЕДНЫ И ГИНЕВРЫ (ЛИСТЫ ФОТОКАРТЫ В-11, В-20, В-21)

А. А. Пронин, Г. А. Бурба, И. Н. Бобина, Ю. С. Тюфлин, А. И. Сидоренко, С. А. Кадничанский, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, Ю. Н. Александров, В., А. Шубин, Н. В. Родионова

Астрономический вестник, 1986, т. XX, №3, с. 163-176

Приведены описание и карты района равнины Седны и Гиневры — представителей крупнейших геологических провинций Венеры, сложенных вулканическими породами. Выделены разновозрастные комплексы, показаны их соотношения и даны интерпретации предполагаемых механизмов образования.

В пределы описываемой территории попадают три листа фотокарты Венеры, границы которых имеют следующие координаты: лист В-11 —  $\lambda = 315-0^{\circ}$  в. д.,  $\varphi = 60-40^{\circ}$  с. ш.; лист В-20 —  $\lambda = 300-330^{\circ}$  в. д.,  $\varphi$  от 40° с. ш. до границы съемки на юге; лист В-21 —  $\lambda = 330-0^{\circ}$  в. д.,  $\varphi$  от 40° с. ш. до границы съемки на юге.

Выбор границ описываемого участка обусловлен тем, что лишь трапеция B-11 обеспечена съемкой полностью, а листы B-20 и B-21 только вдоль их северных кромок, примерно до 30° с.ш., так что они являются небольшими дополнениями к полному листу B-11.

Схема получения изображений, составления и расположения фотокарт была описана нами ранее [4], поэтому здесь будут даны лишь описания структур поверхности и их геологическое истолкование.

Основные геолого-морфологические образования исследованной территории представлены южной частью структуры Лакшми на севере листа В-11, равниной Седны (листы В-11, В-21) и равниной Гиневры (лист В-20). Соответственно этому перечню составлены и описания (рис. 1–3).

### Южное обрамление плато Лакшми

Вдоль северной границы территории располагается южная часть структуры Лакшми. Здесь плато заходит на лист В-11 в виде небольшого участка, который обрамлен с юга узким поясом горных сооружений (горы Дану) шириной около 100 км, состоящим из линейных хребтов и долин между ними, ориентированных почти всюду вдоль







кромки плато. Сама кромка имеет здесь в плане форму тупого угла (120°), повернутого вершиной к югу. Отдельные хребты внутри пояса прослеживаются на десятки километров в длину (до 100 км) и имеют ширину 10–15 км. Судя по общей морфологии, хребты образованы складками сжатия или выступами тектонических «чешуй» типа надвигов. Близ южной оконечности плато в том месте, где кромка плато меняет направление с запад-северо-западного на северо-восточное, две системы параллельных обрамлению хребтов сосуществуют и пересекаются под углом около  $60^{\circ}$  (рис. 1–3).

Поясу линейных хребтов соответствуют возвышенности вдоль границы плато (горы Дану) и обращенный к югу уступ высотой 3-5 км (уступ Весты). На юге подножье уступа граничит с областью хаотического рельефа — тессерой Клото, которая протягивается полосой шириной 400 и длиной 1000 км и северо-восточном направлении. Расчлененный рельеф этой области состоит из хаотично ориентированных невысоких хребтов и возвышенностей с характерным размером в десятки километров. Местность подобного типа сходна с образованиями, называемыми паркетом. Обращает на себя внимание строение юговосточной границы тессеры Клото. Она имеет «рваный» облик и для нее характерны дуговидные выемки, прочитывающиеся в нескольких местах. Вкупе с дугообразным разломом на северо-востоке тессеры, прерывающим структуры паркета и подчеркнутым двумя депрессиями с относительно гладкими днищами, ситуация наводит на мысль о развитии здесь крупномасштабных оползней, по которым блоки паркета сползли с образованием ниш отрыва в сторону равнины Седны в соответствии с региональным уклоном местности (рис. 4). При этом дугообразный разлом на северо-западе тессеры следует считать готовящимся либо не состоявшимся оползнем. В южном направлении участки резко расчлененного рельефа почти повсеместно переходят в равнину Седны постепенно через зону полого-холмистого рельефа часто с грядами, ориентированными согласно с обрамлением плато Лакшми.

# Равнина Седны

Более 3/4 описываемой площади занято равниной Седны с высотными отметками, близкими к нулевому уровню (сфера радиусом 6051 км, описанная из центра масс планеты) или несколько ниже его. На севере равнина граничит с гористой местностью внешнего обрамления плато Лакшми, а на западе, востоке и юге она выходит за пределы территории. Над монотонной гладкой поверхностью равнины лишь в отдельных местах возвышаются останцы более древнего рельефа.

Вдоль восточной границы территории протягивается цепочка останцов паркета (тессеры Манзан-Гурмэ) — системы хаотично ориентированных коротких хребтов (первые десятки километров длиной). Эти останцы имеют 200–400 км в поперечнике и, судя по извилистым границам с «заливами» равнинного материала, являются более древни-



Рис. 2. Геолого-морфологическая карта Венеры (листы В-11, В-20, В-21): 1 — комплекс холмистых равнин, 2 — комплекс гладких равнин, 3 — комплекс собственно плато Лакшми, 4 — комплекс обрамления плато Лакшми, 5 — комплекс тессер — областей хаотического рельефа (паркет), 6 — вулканические образования, 7 — отдельные лавовые потоки с видимыми границами, 8 — области низкого альбедо в радиодиапазоне, 9 — купола, 10 — купола с кратерами, 11 — купола крутосклонные, 12 — депрессии, 13 — радиально-концентрические структуры предположительно вулканического происхождения («пауки»), 14 — ударные кратеры, 15 — валы, 16 — гряды, 17 — уступы, 18 — линии смещения структур, зияющие трещины (разломы), 19 — основные простирания структур, 20



ми по отношению к равнине. Некоторые останцы окружены пологими валами шириной 30–50 км, которые следуют очертаниям их границ.

В северо-восточном углу листа B-11 поверхность равнины не столь монотонна, как на западе. Здесь появляются отличные по фототону области, ограниченные фестончатыми контурами, небольшие (первые десятки километров) куполообразные структуры и изометричные в плане образования, в центре которых наблюдаются круглые пятна 30-40 км в поперечнике с очень темным фототоном, окруженные концентрично диффузной светлой областью, внешние границы которой имеют подчас фестончатые очертания, а иногда прочитываются как уступы, обращен-



ные от центра структуры. В центре темного пятна присутствует иногда небольшая депрессия. Диффузность очертаний и присутствие в ряде случаев центральной депрессии отличает такие структуры от ударных кратеров и позволяет рассматривать их как вулканические постройки с очень пологими склонами типа щитовых вулканов с округлой кальдерой в центре, днище которой либо засыпано рыхлым материалом, либо представляет собой ровную поверхность лавового заполнения, что объясняет ее темный фототон. Пологие склоны сложены материалом лавовых потоков, концевые части которых сливаются в фестончатую границу обрамления.

Встречаются также отдельные купола с «освещенной» и «теневой» сторонами, окруженные темными областями с фестончатыми границами. Они могут быть также истолкованы как отдельные вулканические аппараты, возникшие над трещинами и окруженные потоками лав.

Здесь же, в северо-восточной части равнины Седны, присутствует обширный участок поверхности светлого фототона с изрезанными границами и изолированными темными пятнами. Фототон поверхности свидетельствует о ее повышенной шероховатости, а отсутствие выраженных в гипсометрии превышений — о принадлежности к равнине. Фестончатость границ светлой области наводит на мысль о ее происхождении за счет излияния, том более, что темные пятна и линии на ее поверхности образуют рисунок, похожий на систему трещин растяжения, послуживших источником излияния (рис. 5). Повышенная шероховатость поверхности может объясняться относительной молодостью и/или отличием в составе лав.

Эти и другие примеры убеждают в том, что поверхность равнины Седны была ареной обширных проявлений интенсивного вулканизма, что выразилось как в образовании аппаратов центрального типа, так и трещинных излияний на обширных площадях. Кроме того, к югу и к западу от описанных участков на равнине во многих местах прочитываются на пределе разрешения по фототону «тени» структур, напоминающие вулканические постройки по наличию слабо выраженных центральных депрессий и фестончатых «фартуков», окружающих пологие купола.

Другие области равнины Седны выглядят более однообразными, тем не менее в их пределах также встречаются структуры с признаками вулканического происхождения. Так, цепочка куполов северо-восточной ориентировки, протягивающаяся вдоль выраженного в рельефе разорванного вала того же направления на северо-востоке равнины, скорее всего своим происхождением обязана разлому того же простирания (рис. 6).

К вулканическим структурам следует отнести и выраженное в рельефе образование с радиально-концентрическим строением на западе равнины Седны. Система разломов северо-восточного простирания, по которым прослеживаются смещения в горизонтальном направлении, рассекает эту структуру на блоки, которые как бы раздвинуты в сторо-



Рис. 4

Рис. 5

Рис. 4. Участок тессеры Клото с дугообразными разломами, по которым произошло отседание блоком с хаотическим рельефом поверхности с образованием структур, напоминающих ниши отрыва гигантских оползней. Размер участка 300 × 300 км

Рис. 5. Предположительно поверхность площадного излияния, связанного с трещинами или зоной трещин на пересечении разломов северо-восточного и северо-западного простираний: разломы прочитываются на равнине Седны по прямолинейным границам светлых и темных полей и тянутся на сотни километров. Размер участка 300 × 300 км

ны с образованием центральной депрессии и молодого вулканического купола в центре (рис. 7). Эта ситуация может быть истолкована как результат разрушения и горизонтального «расползания» крупной вулканической постройки под действием собственной тяжести.

Особо следует остановиться на структуре гряд Зорилэ. Это северозападный пояс линейных структур  $200 \times 800$  км, представленный на юге системой кулисных коротких (несколько десятков километров) расселин и валов, которые выглядят как «морщины» в тонком поверхностном слое. На севере структура заканчивается протяженным узким валом ( $50 \times 300$  км) того же направления. На значительном протяжении под склонами вала и на его северном конце он обрамлен линейными структурами пояса (рис. 8). Это наводит на мысль, что в целом материал, слагающий вал, возможно, был выжат по расселине, как и в случае с грядами Брексты (см. ниже), по типу соляных диапиров.

У восточной рамки листа B-11 расположены две округленные полигональные структуры: размером 270 × 300 и 160 × 260 км. Их контуры образованы широкими пологими валами, похожими на пояс гряд Зорилэ, а внутренние части заполнены сливающимися куполами и мелкохолмистыми участками, и все вместе они рассечены частыми



Рис. 6

Рис. 7

Рис. 6. Пять куполов поперечником 20–25 км расположены вдоль почти прямой слегка изогнутой линии длиной ~ 300 км северо-восточного простирания с почти равными (~ 50 км) промежутками между ними. Они округлы в плане, с четкими подножьями, у двух северных — темные пятна на вершине, может быть, кратеры. С юго-востока от этой линии, примерно параллельно ей протягивается плосковершинный крутосклонный разорванный в одном месте вал. Размер участка 300 × 300 км

Рис. 7. Сложно построенная структура поперечником около 200 км: центральная депрессия, обрамленная куполами или валами. С востока конформно депрессии проходит дуга узкого вала, с внешней стороны которого более светлая поверхность охватывает кольцом всю структуру. Внешняя граница этого кольца фестончатая, с юга — сеть линеаментов (светлых), грубо радиальных по отношению к структуре. Размер участка 300 × 300 км

открытыми трещинами. Эти формы напоминают крупные кольцевые структуры («овоиды») к западу от Земли Иштар.

Отсутствие видимых значительных структур в однородной центральной части равнины, возможно, объясняется более обширными трещинными излияниями с большими расходами, которые захоранивали собственные источники подобно тому, как это происходило в лунных морях. Сходство с лунными морями подчеркивается округлыми очертаниями области от 41 до 53° с.ш. и 322–335° в.д., частично обрамленной пологими валами. Возможно, это почти полностью затопленный бассейн диаметром 1100 км.

## Равнина Гиневры

Равнина Гиневры занимает большую часть листа В-20 и представлена в центральной части сглаженной поверхностью (комплекс гладкой равнины) с отдельными небольшими куполами, очевидно, вулканического происхождения. На востоке на границе с равниной Седны рельеф усложняется и гладкая равнина сменяется бугристой поверхностью комплекса холмистой равнины, что сопровождается изменением превышений от -0,5 до 0,5 км (над уровенной поверхностью). При ближайшем рассмотрении холмистая равнина оказывается состоящей из почти сомкнувшихся подножьями пологих куполов несколько десятков километров в поперечнике, на вершинах которых иногда присутствуют центральные депрессии или даже расселины. Порой купола представлены малыми более крутосклонными формами (до 10-20 км в поперечнике, часто до первых километров), а иногда округлыми в плане образованиями дисковидной формы с углублениями в центре. Порой группа куполов имеет обрамление в виде пологого вала. Так, в пределах небольшого участка в окрестностях точки с координатами  $\lambda = 325^{\circ}$  в. д.,  $\varphi = 38^{\circ}$  с. ш. сконцентрировано несколько куполов и радарно-светлых образований с фестончатыми границами, напоминающих потоки лав (рис. 9). В центре этого участка протяженный (около 100 км) раздваивающийся поток примыкает к круглому крутосклонному куполу с гребнем диаметром около 25 км. Похоже, что поток брал начало из-под купола и тек на запад.

С юго-запада к холмистой равнине примыкает участок, где развиты линейные структуры северо-восточного простирания: сопряженные гряды и борозды, обрывающиеся на границе участка, который выглядит как останец более древнего рельефа, выступающий из-под отложений гладких равнин (рис. 1).

На западе равнины Гиневры развиты линейные структуры, получившие название гряд Брексты. Это два пояса линейных структур северо-западного простирания длиной 300 и 500 км и пояс северо-восточного простирания, примыкающий к ним с севера подобно перекладине буквы П. Линейные структуры наиболее отчетливо выражены в самом длинном поясе северо-западного простирания и представляют собой субпараллельную систему сопряженных гряд и борозд внешне похожих на систему трещин растяжения на своде линейного поднятия. В нескольких местах эти структуры смещены поперечными линиями нарушений. В центральной части пояс осложнен вытянутым в том же направлении куполом, который в плане имеет линзовидную форму и обрамлен по краям расселинами. Создается впечатление, что купол сложен материалом, внедрившимся в зону растяжения (рис. 1).

На участке равнины между грядами уверенно прочитываются две положительные структуры в форме дисков с центральными депрессиями. Одна, меньших размеров, севернее кратера Патти имеет размеры  $100 \times 60$  км и другая, еще более на север —  $150 \times 100$  км. В юго-западном углу описываемой территории присутствует изометричный в плане участок поверхности, расчлененный системой меридиональных гряд и борозд, похожий на останец более древнего рельефа.

На поверхности равнины Гиневры с трудом прочитываются протяженные линеаменты, которые выглядят как границы поверхности



Рис. 8

Рис. 9

Рис. 8. Северное окончание гряд Зорилэ: пологий вал северо-западного простирания длиной около 300 км и шириной 50 км, обрамленный линейными структурами. Размер участка 250 × 400 км

Рис. 9. Округлый крутосклонный купол с гребнем на вершине в центре участка, к подножью которого с запада примыкает раздваивающийся поток. Светлый фототон, возможно, связан с шероховатой свежей поверхностью потока. Размер участка 250 × 400 км

различного фототона. Линеаменты образуют ортогональную систему северо-восточного и северо-западного простираний, а их длина доходит до нескольких сотен километров.

#### Интерпретация геологического строения

Геолого-морфологический анализ, позволяя выделить типы местности на поверхности, при дальнейших интерпретациях опирается на допущение, что типам местности соответствуют геологические комплексы. Поэтому геолого-морфологическая карта является синтетической (построенной не на одном принципе), в ней наряду с отдельными морфологически выраженными образованиями сделана попытка показать распространенность выделенных геологических комплексов и истолковать их генезис.

Наиболее широко распространенным в пределах изученной территории является комплекс гладких равнин. Представлен он скорее всего потоками вулканических лав, вероятно, базальтового состава [1, 6]. Мы видим их в северо-восточной части листа B-11, где они, видимо, наиболее молоды. На остальной части равнины Седны различия в радиояркости отдельных лавовых потоков, возможно, исчезли под воздействием поверхностных процессов. Средний возраст равнин в зоне съемки «Венеры-15» и «Венеры-16» по плотности распределения наложенных на них ударных кратеров оценивается величиной порядка 1 млрд. лет [4]. По-видимому, примерно таков же и возраст поверхности равнины Седны. Возраст молодых лавовых потоков северо-восточной четверти листа В-11 ориентировочно может быть оценен величиной порядка 200 млн. лет и менее [3].

Присутствием отдельных вулканических куполов и их скоплений равнина Седны напоминает некоторые вулканические области на Марсе и на Земле и отличается от большинства базальтовых морей Луны. По-видимому, образование куполов связано с присутствием в лаве летучих компонентов.

Комплекс холмистых равнин представляется в целом более древним, о чем свидетельствуют видимые в ряде мест соотношения его с комплексом гладких равнин.

Самым древним геологическим комплексом следует считать, очевидно, тессеру Клото. На юго-востоке структуры этого комплекса деградируют, переходя в холмистую равнину, а на северо-западе перекрыты комплексом обрамления плато Лакшми, в котором, в свою очередь, северная часть (горы Дану) представляется относительно более молодой.

Комплекс пород собственно плато Лакшми, слагающий непрерывный покров на его поверхности, по относительному возрасту коррелирует с комплексом гладких равнин и выделен самостоятельно из-за его особого структурного и гипсометрического положения [4].

В формировании тессеры Клото существенную роль играют структуры типа гигантских оползней, со смятием слагающего их вещества и с нишами отрыва и лавовыми излияниями в тыловых частях. «Черепитчатое» строение тессеры в этой модели может возникнуть по механизму, описанному в работе [5].

В комплексе холмистых равнин, очевидно, объединяются разнородные структуры. Это многочисленные лавовые купола и, вероятно, экструзии, остатки крупных вулканических построек, «раздавленных» собственной тяжестью, перекрытые лавами участки «паркета», поля даек и трещин растяжения, а также «просвечивающие» среди лавовых полей реликты крупных кольцевых структур. Особо следует отметить валообразные структуры на сводах линейных поднятий гряд Брексты и Зорилэ, которые могут быть образованы выжиманием более пластичного и более легкого нагретого материала недр из-под более тяжелых и холодных плит базальтовых покровов по типу соляных куполов.

Слабо выраженные, но тем не менее протяженные линеаменты на равнинах, образующие систему двух преимущественно северозападного и северо-восточного простираний, могут быть позднейшими проявлениями древней планетарной сети трещиноватости в наиболее молодых геологических комплексах равнин.

#### Литература

- 1. Барсуков В. Л., Сурков Ю. А., Москалева Л. П. и др. Геохимические исследования поверхности Венеры АМС «Венера-13» и «Венера-14». — Геохимия, 1982, № 7, с. 899–919.
- 2. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О. и др. Геология Венеры по результатам анализа радиолокационных изображений, полученных АМС «Венера-15» и «Венера-16» (предварительные данные). Геохимия, 1984, № 12, с. 1811–1820.
- 3. *Николаева О.В., Ронка Л.Б., Базилевский А.Т.* Круговые образования на равнинах Венеры как свидетели ее геологической истории. Геохимия, 1986, № 5, с. 579–589.
- 4. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми. Фотокарта поверхности Венеры, лист В-4. Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 2, с. 83–98.
- 5. Ромашов А. Н. Кондратьев В. Н., Кулюкин А. М., Цыганков С. С. Моделирование структур разрушения в верхних слоях Земли. Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1985, № 4, с. 81–88.
- 6. Сурков Ю.А., Москалева Л.П., Щеглов О.П. и др. Метод, аппаратура и результаты определения элементного состава венерианской породы на КА «Вега-2». Астрон. вестн., 1985, т. 19, № 4, с. 275—288.

Институт геохимии и аналитической химии им. Поступила в редакцию В. И. Вернадского АН СССР 18.IV.1986

Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского

Институт радиотехники и электроники АН СССР

### Geological-morphological Description of the Sedna and Guinevre planitiae on Venus (Photomaps Lists B-11, B-20, B-21)

A. A. Pronin, G. A. Burba, N. N. Bobina, Yu. S. Tyuflin, A. I. Sidorenko,
S. A. Kadnichanskij, M. V. OStrovskij, V. A. Kotelnikov, O. N.Rzhiga,
G. M. Petrov, Yu. N. Alexandrov, V. A. Shubin, N. V. Rodionova

The description and map are given for the area of Sedna and Guinevre Planitiae, which are representative examples of largest geological provinces of Venus composed of volcanic rocks. Units of different age and their relations are shown and interpretation of their probable origin is given.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ТЕССЕР ФОРТУНЫ И МЕШКЕНЕТ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-6)

А. Л. Суханов, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, В. М. Дубровин, А. И. Захаров, Г. А. Бурба, В. И. Шашкина

Астрономический вестник, 1986, т. ХХ, №4, с. 259-271

Паркет тессеры Фортуны в пределах листа В-6 двигался крупными блоками в северо-западном направлении, а в тессере Мешкенет — на восток и юго-восток, перерабатывая овоиды и пояса линейных дислокаций. На северной равнине более 0,4 млн. кв. км занято лавами с крупномасштабной сетью светлых полос — экструзивных или тектонических. Две крупные субконцентрические структуры на листе, возможно, представляют собой начальные стадии образования овоидов (венцов).

Лист фотокарты B-6, построенный по материалам радиолокационной съемки с AMC «Венера-15, 16» в нормальной равноугольной конической проекции Ламберта-Гаусса [1], охватывает область с венерографическими координатами 60–80° с.ш., 60–120° в.д. (рис. 1). Геолого-морфологическое картирование наиболее сложных участков проводилось в масштабе 1:4 000 000, а вся карта выполнена в масштабе 1:16 000 000 (рис. 2). На рис. 3 даны наименования основных деталей поверхности, а на рис. 4 — структурное районирование листа B-6, в соответствии с которым далее ведется его геолого-морфологическое описание.

### А. Тессера Фортуны

Восточная часть тессеры Фортуны (A<sub>1</sub>), попадающая в пределы листа, представляет собой грядово-бороздчатое паркетное плато [2] с общим уклоном к северу: от 3–3,5 км высоты на юге до 0–0,5 км на севере, на границе с полярной равниной. Это плато делится на несколько блоков, ограниченных особо крупными долинами и валами.





Рис. 2. Геолого-морфологическая карта поверхности Венеры, лист В-6. Условные обозначения: 1 — гладкие равнины; 2 — холмистые равнины; 3 — отдельные потоки; 4 — структурные линии паркета; 5 — активизированные лавы; 6 — пояса линейных дислокаций; 8 — вулкано-тектонические комплексы; 9 — вулканы; 10 — разломы и основные структурные линии; 11 — гребни и светлые полосы (дайки?); 12 — границы комплексов; 13 — неясные кольцевые структуры; 14 — уступы и депрессии; 15 — валы; 16 — кальдеры; 17 — ударные кратеры; 18 — скопления вулканических конусов; 19 — полосчатые равнины

1. U-образный блок с вершиной на 70° с.ш., 70° в.д. и размерами примерно 350 × 200 км, расширяющийся к северу. Борозды внутри блока отличны от борозд за его пределами по размерам, форме и общему рисунку. Южная «вершинная» часть блока как бы вырезана из окружающей местности глубокой изогнутой долиной, и создается впечатление, что это пластина поверхностного вещества, соскальзывающая с южного вала к северным низинам с образованием гигантской тыловой трещины отрыва.

2. Блок, примыкающий к предыдущему с востока, также похож в плане на вытянутое U, но с вершиной, обращенной к северу (рис. 5). На юге, в основании этого языка (находящемся на высоте 2,5–3,5 км) грубые борозды и гряды как бы собираются, стягиваются к его центру, обрамляя относительно сглаженную треугольную сердцевину (рис. 6). С флангов этот язык обрамлен крутыми уступами, а на северном



Рис. 3. Основные названия и границы кадров, приведенных в увеличенном виде (числа указывают номера рисунков в статье)



Рис. 4. Схема геолого-морфологического районирования территории

замыкании, где прилегающая местность опускается до 0,5 км, высота фронта этого языка достигает 1,5-2 км.

Внутренняя структура языка также отличается от структуры окружающей местности, и похоже, что его материал срезает или перекрывает окружающие формы. Напрашивается объяснение, что этот язык образован мобилизованным (прогретым и размягченным) материалом, который как бы стекал с южного возвышенного края тессеры, надвигаясь на северную часть своей фронтальной частью.

3. Признаки течения материала от этой возвышенности в сторону местной депрессии видны также юго-западнее, на участке с центром на 68° с.ш., 70° в.д., который рисунком напоминает лужу битума на несколько наклонном основании. А блок 200 × 100 км на 69° с.ш., 81° в.д. отколот от этой возвышенности дуговым уступом, похожим на тыловые отколы оползней.

Таким образом, структура этом части тессеры Фортуны, видимо, определяется движением поверхностного материала в стороны от ее поднятой южном части в виде отколотых пластин, или в виде потоковидных масс.

4. Северная окраина тессеры образована линейными формами, вытянутыми в северо-западном направлении, и они входят в пояс внешнего обрамления всей тессеры, включая лист В-5. Эти формы можно было бы назвать поясом линейных дислокаций, если бы не наличие поперечных им структур, характерных для паркета.

Паркетное поднятие A<sub>2</sub> — это платформа с несколько опущенной и залитой лавами центральной частью. При этом лавы нарушены сериями мелких трещин, их поверхность слабо изогнута; трещины частью

106



Рис. 5. Язык материала, ограниченный уступами, спускающийся от поднятия на юге. 310 × 220 км

Рис. 6. Треугольник активизированных лав в основании языка на рис. 5

субпараллельны краям центральной депрессии, частью наследуют направления перекрытых структур паркета. Вероятно, вся эта платформа является крупным овоидом, переработанным в паркет.

В южном части платформы валы кратеровидных депрессий смещены на 10–12 км правосторонними северо-западными сдвигами (в работе [2] они ошибочно названы левосторонними). Видимо, породы с юго-западной стороны от разрывов увлекаются общим движением блоков к северо-западу, которое отмечено выше.

Зона  $A_3$  вдоль южного края тессеры непосредственно продолжает краевую зону паркета соседнего листа B-5. Там она была интерпретирована [3] как полоса паркета, перекрытая лавами, в свою очередь смятыми в мелкие складки при продолжающихся движениях. На листе B-6 в этой полосе помимо мелких частых гребней и борозд появляются брахиформенные структуры размерами примерно 20–30 на 40–60 км, напоминающие коробчатые складки. Амплитуды рельефа этих форм слишком велики, чтобы считать их структурами облекания погребенного фундамента лавами. Очевидно, они образовались при продолжающихся подвижках мелких блоков фундамента, которые действовали как штампы. Возможно и продолжение процессов вулканизма в отдельных центрах, что создало часть куполов и мульд (они показаны стрелками на рис. 6). Вся эта полоса систематически выше на 1–2 км, чем соседняя равнина, и по мере ее понижения с удалением от края паркета уменьшается и степень дислоцированности. Эта полоса активизированных лав продолжается по азимуту ЮВ 120° до точки с координатами 64° с.ш., 85° в.д., где меняет направление на СВ 70°, становясь зоной обрамления тессеры Мешкенет.

### Б. Тестера Мешкенет

По данным мелкомасштабной съемки КА «Пионер-Венера» формы, которые называются сейчас тессера Мешкенет, венец Тушоли и прилегающие участки были объединены под одним названием «область Тефии», — и как показало дальнейшее картирование, в таком объединении есть генетический смысл.

Венец Тушоли ( $B_1$ ) — платформа, центральная блюдцевидная часть которой поднята на 2 км над равнинами, а края — на 2,5–3 км, ее центральная часть залита лавами, напоминая структуру  $A_2$ . Первоначально эта возвышенность явно была овоидом, но сейчас овоид сильно деформирован: получил сплюснутую форму, на валу появилось несколько неправильных депрессий с приподнятыми краями, и главное, его северный и восточный склоны смяты в серию узких субконцентрических валов и борозд. Их можно было бы счесть результатом простого гравитационного оползания и смятия склонов купола Тушоли, — но они продолжаются к западу, за пределы купола, и почти смыкаются со структурами тех же направлений на тессере Фортуны, — т. е. относятся к паркетным дислокациям.

На юго-востоке по склону купола, перекрывая концентрические структуры, спускается язык материала 50 × 120 км, напоминающий своей поперечной трещиноватостью ледниковый поток (рис. 7), а на него с тыла наложен материал третьего этапа оползания — в виде гигантском оплывины.

Южнее виден втором «поток», параллельный первому: он начинается в дугообразной «нише отрыва» поперечником свыше 100 км.

Юго-восточнее оба потока скрываются под лавами структурного (и частично выраженного в рельефе) трога протяженностью до 1300 км, который отделяет венец Тушоли от местности юго-восточнее него.

Эта местность (Б<sub>2</sub>) — собственно тестера Мешкенет — представляет собой структурное продолжение и, если можно так сказать, развитие юго-восточного склона купола Тушоли и состоит из 7–10 (в зависимости от принимаемых границ) языковидных «потоков», похожих на глетчерные (рис. 8). Ширина потоков — 50–100 км, длина 200–400 км, высота 0,5–2 км; они сомкнуты флангами и каждый более северный язык продвинут дальше к востоку, подобно костяшкам домино.

Поперечные трещины на их поверхности иногда изгибаются, как ледниковые огивы, иногда по соотношению с рельефом видно их падение на северо-запад — это указывает на движение материала на юго-восток; изредка они переходят с одного языка на другой — такое явление тоже известно для сливающихся ледников.



Рис. 7. Восточный склон купола Тушоли: 1 — концентрически гофрированный (оползающий) материал на склоне; 2 — глетчеровидный язык, берущий начало на склоне купола; 3 — гофрированный материал, наложенный на все остальные структуры. 310 × 220 км

Рис. 8. Участок тессеры Мешкенет: глетчеровидные языки с признаками смещений на юго-восток. 310 × 220 км

В тыловых частях потоки явно оторваны от своих «истоков» и перекрыты лавами трога; а их фронтальные части на юго-востоке останавливаются, упираясь в поднятия г. Мелии, венца Найтингейл и вала севернее него.

Краевые уступы «потоков» имеют углы откоса максимум до 2–5°. Это очень мало для твердых и даже сыпучих тел; такой угол может обеспечиваться либо эрозией, либо понижением вязкости пород. Еще меньше уклон в направлении их движения — менее 1:1000; если массы реально смещались в этом направлении, то они должны быть очень подвижными, действительно напоминая глетчеры.

Наконец, надо отметить следующее. Внутри паркета деформации, очевидно, очень сильны. В юго-западной части тессеры есть овоид, почти не различимый на карте, но хорошо видимый на стереопарах полос: он сильно сдавлен и перекошен широтными напряжениями. Но перед фронтом потоков нет признаков значительных смятий существовавших ранее пород; только на юге паркет окаймлен полосой активизированных лав — с дислокациями в основном брахиформенного, вертикального типа ( $\mathbf{Б}_3$ ), продолжающей аналогичную спокойную полосу вдоль тессеры Фортуны ( $\mathbf{A}_3$ ). Зато в двух случаях соотношения паркета с прилегающей местностью можно рассматривать как перекрытие ее паркетом,
т.е. в движении принимала участие не вся литосфера, а только ее верхние горизонты.

Таким образом, область Тефии в общем плане представляет собой восточное окончание земли Иштар, с которой она фактически смыкается по своим северным и южным границам. Внутренняя структура этой области свидетельствует о пластическом (гравитационном?) движении глетчеровидных масс мощностью 0,5–2 км в стороны от купола Тушоли.

## В. Прогиб между тессерами Фортуны и Мешкенет

Эта депрессия, видимо, создана простым прогибанием при слабой роли растяжения, поскольку обе тессеры практически соединяются на севере и на юге, и для горизонтального движения не остается места: следовательно, под поверхностными лавами должен скрываться паркет, не проявляющийся на поверхности лав.

Но главным образом прогиб интересен структурой в его центре. Это невысокий, но широкий (200 км в поперечнике) вулкан с радиальными трещинами и гребнями (дайками?). Его материал частично перекрывает подковообразную структуру, охватывающую подножье вулкана с трех сторон и состоящую из субконцентрических гряд. От типичного овоида эта форма отличается незамкнутостью и наличием крупного вулкана в центре. Похожая структура — вулкан с зачатками овоидного вала у подножья — видна в средней части борозд Сигрун [4], и такая же форма — в северной части поднятия Белл; возможно, сходные формы образует поднятие Метиды, на которое пока не готовы детальные карты. Похоже, ассоциация вулкана с концентрической структурой у подножья — закономерное, хотя и нечастое явление для Венеры.

## Г. Северные равнины

Эти равнины, занимающие высотные уровни от +0,5 до -0,5 км, делятся грядами Сел-Ани на две области.

Западная равнина Снегурочки ( $\Gamma_1$ ), относимая к холмистым равнинам, должна скорое называться грядово-увалистой: ее поверхность покрыта очень пологими мягкими уступами и валами от предела разрешения до 20 км шириной. Они ветвятся, иногда образуя что-то вроде сети с округлыми ячейками, но почти не пересекаются. По альбедо равнина монотонна, без рядиоярких или темных полос. Происхождение этих линейных форм неясно: это могут быть и края лавовых потоков, и структуры облекания, и дайки.

Еще более загадочно происхождение сети полос на восточной равнине Лоухи ( $\Gamma_3$ ). Эти полосы, яркие на темном фоне равнины (рис. 9), имеют ширину до 20–40 км и протяженность до 200–300 км, они изломаны, ветвятся и соединяются, как трещины, но редко пересекаются; местами они обрисовывают какие-то крупные линзовидные формы.



Рис. 9. Ударный кратер Кленова на полосчатой равнине. 420  $\times$  290 км

И главное — у них почти не виден собственный рельеф: если полосы и выражены валами, то эти мягкие валы едва различимы, так что возникает искушение считать их какими-то эоловыми формами.

Однако если проследить направления основных полос, то они уходят от кратера Кленова на северо-восток, протягиваются через полярную область и в противоположном полушарии превращаются в пояса линейных дислокаций примерно на 170–180° в. д. Пояса же эти, как будет показано в последующих работах, скорее всего являются структурами растяжения.

Можно предложить два варианта происхождения этих полос: а) выжимание по трещинам последних порций малоподвижных лав и б) гидротермальные изменения пород вдоль трещин. Но оба объяснения нечем подкрепить. Судя по рисунку трещин, можно предполагать наличие паркетного основания под частью полосчатых лав, но только южнее 75° с. ш.

Любопытно также, что в этом районе просматривается система выдержанных линеаментов северо-западных и широтных простираний, которые никак не связаны с сетью трещин.

С юга и с запада структуры полосчатой равнины перекрыты материалом холмистой и гладкой равнин и срезаются структурами паркета и поэтому относятся к сравнительно древним образованиям. (Интересно, что по всей северной границе паркета с северными равнинами последние перекрыты чехлом либо гладкого бесструктурного материала, либо материала, выглядящего в масштабе съемки как раздерганная вата: ширина такого плаща достигает десятков и сотен километров. Видимо, это эффузивы, почему-то связанные с зоной контакта поднятого паркета и равнин нулевого уровня. В качестве альтернативы можно предложить только покровы тонкозернистого материала, снесенного ветром с паркетных возвышенностей.)

Ударный кратер Кленова — самый крупный из известных на Венере, 140 км в поперечнике, окружен кольцом сплошных выбросов 20–40 км шириной, имеет террасу на внутреннем склоне, внутреннее кольцо поперечником 100 км и небольшую центральную депрессию.

Гряды Сол-Ани ( $\Gamma_2$ ) — типичный пояс линейных дислокаций, в котором примечательно лишь то, что он рассекает более древний пояс такого же типа (северо-восточного направления), уничтожая все следы последнего, и поэтому вряд ли мог образоваться за счет складчатых преобразований этого древнего пояса.

А в упомянутом древнем поясе интересна структура его осевой части: здесь мелкие борозды направлены поперек простирания пояса, как трещины в интрузиве, перпендикулярные его длинной оси. Краевая часть пояса образована серией фестончато-перекрывающихся лепестковообразных форм, как бы наползающих на равнину Лоухи. Единственное объяснение для такой конструкции — это экструзия в осевой части пояса, от которой расходятся короткие лавовые потоки. На продолжении этого пояса — в поясах противоположного полушария также встречаются осевые экструзии.

Гряды Сел-Ани срезаны паркетом полностью, так что в его пределах не осталось и следов гряд. С этим связана еще одна загадка: почему направления структур полосчатой равнины прослеживаются в паркете (слабо, но очевидно), тогда как они явно древнее гряд Сел-Ани, а они — древнее паркета?

### Д, Е, Ж. Южная равнина

Западная часть равнины (Д) является продолжением прогиба между тессерами Фортуны и Лаймы [4] и включает восточную половину крупной округлой равнины (плиты?) между землей Иштар и областью Теллуры. На равнине преобладают субширотные и юго-восточные направления линеаментов. Морфологически они делятся на: а) зоны трещин, в основном приуроченных к мощному широтному разлому длиной 1300 км, который продолжается сюда с территории листа B-5; б) узкие гряды, собранные в «жгуты», они похожи на полузатопленные пояса линейных дислокаций, отличаясь от них большим числом мелких вулканических конусов; трещины по простиранию переходят в гряды и борозды. Только на юго-западе виден участок равнины с меридиональными яркими узкими полосами, похожими на полосы равнины Лоухи.

В центральной части равнины (Е) почти все линейные структуры скрыты под лавами, а вместо них появляется несколько вулканотектонических комплексов центрального типа [4]. Их появление здесь, видимо, определяется пересечением трех структурных направлений: юго-восточного из зоны Д, юго-западного из зоны Ж и продолжения субмеридионального прогиба зоны В.

Здесь и восточнее встречаются поля вуканических конусов с поперечниками около 5 км (разброс размеров невелик); отдельные поля имеют площадь до 5-8 тыс. км<sup>2</sup> и насчитывают до 100 конусов.

В восточной части равнины (Ж) преобладают линеаменты северо-восточных направлений, выраженные изолированными гребнями, а юго-восточные ориентировки исчезают. Но оба этих направления сосуществуют где-то в фундаменте, что видно по структуре венца Факахоту (рис. 10): он лежит на пересечении линеаментов северозападных и северо-восточных направлений, определяющих угловатый рисунок борозд внутри него.



Рис. 10. Венец Факахоту — вулкано-тектонический купол с растрескивающейся поверхностью. 420 × 290 км

Венец представляет собой очень пологий купол чуть выше 500 м при поперечнике 500 км. Склоны купола залиты светлыми лавовыми потоками, растекающимися от внутренней части к подножью. Внутренняя приподнятая часть поперечником 200 км разбита многочисленными угловатыми зияющими расщелинами, субконцентричное расположение которых было причиной отнесения структуры к венцам или овоидам.

Возможно, здесь действительно виден пример механизма, создавшего по крайней мере некоторые овоиды: аникальная часть этого купола как бы выпирает из него, разрывая лавовую кровлю, и если кровля способна соскальзывать (а угол скольжения составит здесь 2:1000, что, судя по паркету, достаточно для скольжения в условиях Венеры), то у подножья могут появиться концентрические складки нагнетания.

Гора Мелии (3) (вулкан 150 км по основанию и 1,2 км высоты) и участок области Теллуры (И) относятся к комплексам, развитым в основном на листах В-7 и В-13, где они и будут описаны.

### Заключение

Результаты картирования листа В-6 подтверждают основные выводы, полученные по листу В-5, и позволяют их дополнить.

1. Паркет земли Иштар и области Тефии в значительной мере образован при горизонтальных смещениях поверхностных толщ мощностью порядка 1–2 км в направлении слабых уклонов вокруг местных поднятий.

2. Паркет моложе древних полосчатых равнин и по крайней мере части поясов линейных дислокаций, но древнее молодых гладких лав; он формировался геологически длительное время.

3. Попавшие в сферу действия паркета пояса линейных дислокаций и овоиды перерабатываются до неузнаваемости. Лавы, перекрывающие южные окраины паркета земли Иштар и области Тефии, также частично паркетизированы, т.е. дислоцированы в коробчатые складки или мелко гофрированы.

4. Пояса линейных дислокаций, видимо, являются зонами повышенной магматической проницаемости.

5. Концентрические структуры овоидов могут возникать вокруг проседающего тела центрального вулкана или вокруг поднимающегося магматического дианира при оползании с него кровли.

6. Судя по наложению разнонаправленных структур, в верхних слоях Венеры могут существовать несколько структурных ярусов, в равной степени проектирующихся на поверхность.

# Литература

- 1. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В-4). Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 2, с. 83–98.
- 2. Суханов А. Л. Паркет: области площадных пластических дислокаций. Геотектоника, 1986, № 4, с. 60–76.
- 3. Суханов А. Л., Пронин Л. А., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание земли Иштар (фотокарта поверхности Венеры, лист В-5). Астрон. вест., 1986, т. 20, № 2, с. 99–111.
- 4. Суханов А. Л., Пронин А. А., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание тессеры Лаймы и равнины Берегини (фотокарта поверхности Венеры, лист В-12). Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 4, с. 272–286.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского Институт радиотехники и электроники АН СССР Поступила в редакцию 30.VI.1986

# Geological-morphological Description of Tessera Fortuna and Meshkenet Area (Photomap of the Venusian Surface, Sheet B-6)

A. L. Sukhanov, Yu. S. Tyiflin, M. V. Ostrovskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. M. Petrov, A. I. Sidorenko, Yu. N. Alexandrov, V. M. Dubrovin, A. I. Zakharov, G. A. Burba, V. N Shashkina

Parquet of Tessera Fortuna on the list B-6 was moving NW as large slabs of rocks, and that of Tessera Meshkenet — to E and SE, completely reworking coronae and linear bells. More than 0,4 mln. sq. km of northern plains are occupied with large-scaled net of light stripes (extrusive or tectonical). Two big subconcentric structures on the map may be representative of initial stages of coronae.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ТЕССЕРЫ ЛАЙМЫ И РАВНИНЫ БЕРЕГИНИ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-12)

А. Л. Суханов, А. А. Пронин, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, В. П. Синило, А. П. Кривцов, И. И. Бобина, Г. А. Бурба

Астрономический вестник, 1986, т. XX, №4, с. 272-286

Южная часть тессеры Фортуны и северо-западная часть тессеры Лаймы образованы «паркетом» с признаками перемещений вниз по региональным уклонам; южная часть тессеры Лаймы сложена беспорядочным или «стоячим» паркетом. Тессеры разделены двумя поясами растяжения с дайками, линейными экструзиями и вулканами. Закартированы также скопления вулкано-тектонических комплексов центрального типа («пауки») и крупные вулкано-тектонические кольцевые формы (овоиды). Обилие морфологически разнообразных вулканических структур ставит вопрос о типах вулканизма и характере коры на Венере.

Лист фотокарты B-12 построен по материалам радиолокационной съемки с AMC «Венера-15, 16» в нормальной равноугольной конической проекции Ламберта-Гаусса [1] и занимает область с венеро-графическими координатами 40-60° с.ш., 0-45° в. д. (рис. 1). Геолого-морфологическое картирование выполнялось в масштабе 1:4000 000, здесь приведен генерализованный вариант этой карты (рис. 2). На рис. 3 даны наименования основных морфологических деталей поверхности, а на рис. 4 показано деление листа на районы, каждый из которых характеризуется определенным типом геологических структур. В соответствии с этим делением построено приводимое ниже геолого-морфологическое описание листа B-12.

# А. Тессера Фортуны

Входящий в пределы листа южный выступ тессеры Фортуны образует пологий свод, понижающийся к югу: от высот 5–5,5 км на севере до 2,5–3 км на юге. Его поверхность покрыта типичными структурами паркета [2] и разделяется на две подзоны. В западной





Рис. 2. Геолого-морфологическая карта поверхности Венеры, лист В-12: 1 — гладкие равнины; 2 — холмистые равнины: 3 — отдельные потоки; 4 — структурные линии паркета; 5 — пояса линейных дислокаций; 6 — овоиды; 7 — «пауки»; 8 — вулканы с кратерами и кальдерами; 9 — вулкано-тектоническое поднятие; 10 — крупные разрывы и основные структурные линии; 11 — радиояркие полосы и гребни (дайки); 12 — границы; 13 — неясные кольцевые структуры; 14 — уступы; 15 — валы; 16 — депрессии; 17 — ударные кратеры

половине преобладают разрывы широтного и северо-западного, реже северо-восточного направления, а также мелкие дуги, обращенные вершинами на восток. Такая структура могла возникнуть в результате широтно-ориентированных напряжений, возможно, при частичном перемещении материала с запада на восток. Местность здесь «подтоплена» пятнами лав с прихотливыми границами.

Структуры восточной подзоны явно моложе: на фоне сети ориентированных на северо-запад и северо-восток перекрещивающихся линеаментов здесь хорошо видна серия крупных дуг, обращенных вершинами на юг, вниз по склону (рис. 5), а также вытянутые меридиональные «струйчатые» формы, прерывающие (перекрывающие?) структуры древних северо-западных направлений. Видимо, эта подзона образована при региональном пластическом движении материала в направлении общего уклона под действием силы тяжести (средняя величина уклона около 4:1000).



Рис. 3. Основные наименования. Прямоугольники показывают границы участков, приведенных в увеличенном виде, цифры — номера рисунков в статье

120



Рис. 4. Схема геолого-морфологического районирования

По краям этого «расползающегося» свода паркет перекрыт равнинными лавами; его границы в общем прямолинейны, и их направление соответствует ориентировке региональных разрывов этой области (ЗСЗ и ССВ).

### Б. Тессера Лаймы

К сожалению, при используемой разграфке листов тессера Лаймы оказалась разрезанной на две части и в пределах листа B-12 находится лишь ее западная часть, что не позволяет показать постепенную смену плана деформаций с запада на восток. Западная часть структурно делится на северную (Б<sub>1</sub>) и южную (Б<sub>2</sub>) подзоны.

В северной подзоне паркет занимает высоты 3–3,5 км. Здесь местность нарезана на субширотные полосы по 20–50 км шириной, а они разбиты поперечными долинами на отдельные блоки от 10–30 до 100 км длиной, а в блоках местами видны более частные трещины. Поперечные и продольные долины довольно широки и редко расположены (на продолжении тестеры в пределах листа В-13 по мере понижения местности до 0–1 км долины сужаются и пережимаются).

Между полосами или переходя с одной полосы на другую протягиваются ступенчато изогнутые борозды (рис. 6), свидетельствующие о дифференциальных субширотных смещениях (материал южных полос должен был продвинуться дальше к востоку относительно северных участков).



Рис. 5

Рис. 6

Рис. 5. Участок тессеры Фортуны: широкие дуги; обращенные на юг. $320\times \times 210~{\rm кm}$ 

Рис. 6. Участок тессеры Лаймы: ступенчатые и флексуровидные долины. 320  $\times$   $\times$  210 км

Видимо, это обусловлено неравномерным гравитационным течением вещества на восток в виде дифференцированных потоков, хотя уклон здесь выражен очень слабо (менее 2:1000). Не исключено, что движение материала в какой-то мере осуществлялось за счет волочения его астеносферыми течениями. Так или иначе, общее перемещение материала северной части тессеры Лаймы на юго-восток представляется несомненным. В таком случае часть тессеры, расположенная в северо-восточном углу листа В-12, представляет собой зону растяжения, и пояса линейных дислокаций, отделяющие ее от тессеры Фортуны, также должны формироваться в условиях растяжения.

Южнее каньона Бабы-яги площадь около 1 млн.  $\rm km^2$  (Б<sub>2</sub>) занята «беспорядочным» или «стоячим» паркетом, в котором не видно признаков направленных перемещений, равно как и нет заметных региональных уклонов; хотя в целом и прослеживаются общие направления линеаментов на северо-запад и северо-восток, они слабо выделяются среди разноориентированных изогнутых и дуговидных гряд и бороздок. Полосы, похожие па полосу северного участка, появляются только восточнее 40° в. д., т. е. относятся уже к листу В-13. Прихотливые пятна лав перекрывают участки паркета, но структура паркета просвечивает из-под них.

# В. Борозды Сигрун и гряды Аушры

Тессеры Фортуны и Лаймы разделены крупным структурным желобом, который в основном заполнен равнинными лавами. Борозды Сигрун и гряды Аушры, протягивающиеся в целом вдоль длинной оси этого желоба, осложнены рядом очень интересных структур.

Борозды Сигрун по морфологии и рисунку являются зияющими трещинами растяжения. Они протягиваются вдоль свода пологого вала длиной 1200 км (выраженного не столько даже морфологически, сколько структурно, что читается по соотношению с лавами). Трещины возникли, скорее всего, в результате раскалывания лавовой кровли этого вала при ее воздымании.

На участке 1 (рис. 4) этого вала с высотами 1,5–2 км видно, что лавовые толщи вала приподняты так, что образовалось что-то вроде овального растрескавшегося купола, у которого неповрежденной осталась только часть восточного склона (или же этот склон залит новыми лавами, перекрывающими трещины). Некоторые трещины здесь отклоняются от параллельных валу простираний и очерчивают подножье купола.

На участке 2 с высотами 2–3 км (рис. 4) виден уже полностью обособленный купол с радиальными зияющими трещинами, так что линейная структура вала почти полностью преобразуется. Купол слабо возвышается над окружающей местностью, потому что весь он располагается в круглой депрессии, как будто он просел под собственной тяжестью. Радиальные трещины свидетельствуют о сводовом воздымании тела купола, а группа вершинных кратеров и потоки лав на его склонах (самый крупный из которых имеет размеры  $80 \times 100$  км) позволяют считать, что частично купол образован за счет вулканических накоплении, т.е. это вулкано-тектоническая структура. С севера структура ограничена системой субконцентрических гряд и борозд, очень похожих на валы крупных кольцевых форм — овоидов.

Наконец, на участке 3 видна ужо характерная, хотя и фрагментарная структура овоида (рис. 7): два полумесяца параллельных гряд и борозд, обращенные один к другому «рогами», обрамляют уплощенную депрессию с высотами 2-2,5 км. В депрессии среди мелких холмов (вулканов?) просвечивают реликты северо-восточных направлений пояса Аушры, как если бы депрессия была участком пояса, вырезанным из него по дуговым разломам, опущенным и затопленным лавами. Окружающая местность имеет высоты 3-4 км, и грядово-бороздчатые полумесяцы трассируют бровку перегиба от этих высот к центральной депрессии. Концентрические валы и борозды этих дуг по морфологии не похожи на складки. На некоторых участках поперечный профиль дуги образован пологим массивным центральным валом, обрамленным по краям узкими гребнями, - как если бы в центре пояса выжималось по расщелине какое-то вещество с глубины. На других участках центральная полоса пояса опущена, и ее материал перекрывает соседние гребни и борозды. Проще всего эта структура объясняется, если допустить, что проседание центральной плиты сопровождалось образованием дуговидных расколов, отделяющих плиту от соседних участков, и по этим дуговым зонам формировались трещины растяжения, дайки и линейные экструзии и интрузии.

Эта модель отличается от модели, согласно которой овоиды образованы оползанием и смятием поверхностных толщ вокруг воздымающегося центрального ядра, но и та и другая модели требуют наличия зоны расплавления на глубине, размеры которой сопоставимы с поперечником овоида.

Таким образом, мы считаем, что по простиранию вала с бороздами Сигрун наблюдаются три последовательные стадии формирования овоидов: 1) куполовидное поднятие с растрескиванием кровли, возможно, над интрузивом, 2) вулкано-тектонический купол, под тяжестью которого образуется округлая депрессия, а по ее краю закладываются концентрические гребни и борозды, 3) неполный овоид — полукольцевые пояса гряд и борозд (образованных в основном магматизмом), окружающие центральную депрессию. Возможно, мы имеем дело с омоложением структур пояса при движении к юго-западу.

Перпендикулярные валу Сигрун региональные разломы северозападного простирания почти не прослеживаются в его пределах на поверхности, но, видимо, с ними связано разделение вала на участки с разным характером дислокаций: на широте 57–60° тот самый разлом, который срезает с юга горы Максвелла, отделяет собственно вал Сигрун на юго-западе от продолжающего его на северо-восток вала с перекрестно-решетчатой, паркетной поверхностью; смена плана дислокаций на 52–53° с. ш. приходится на продолжение разломов северо-западных простираний, как и замыкание вала на 48–49° с. ш.

Любопытна структура на 55° с. ш., 26–27° в. д. Здесь прямоугольный язык 120язык60 км с гладкой поверхностью срезает гряды соседнего пояса Аушры, возвышаясь над ними на 0,5–1 км. Создается впечатление, что этот материал опустился с соседнего вала Сигрун и перекрыл структуры, лежащие ниже на его пути. Но в то же время несколько гряд прослеживаются внутри этого языка, и как будто без смещений, а прямолинейные края языка трассируются за его пределы в виде слабо видимых трещин на равнине. Происхождение этой структуры остается загадочным.

Гряды Аушры представляют собой типичный пояс линейных дислокаций, подобный тем поясам, что развиты на равнинах от 150 до 250° в. д. Однако здесь эти гряды и борозды выглядят более резкими и свежими, чем у большинства поясов, как если бы пояс Аушры был моложе этих поясов. И действительно, местами краевые трещины пояса Аушры отрезают узкие «ломти» от молодых базальтовых толщ примыкающих равнин (хотя в других местах, как и в большинстве поясов, гряды и борозды перекрыты лавами и слабо просвечивают на поверхности в виде неясных валов или радиоярких полос). В целом этот пояс образован тремя последовательными ветвями: похоже, что как и в поясе Сигрун, структуры омолаживаются к юго-западу.

Первая короткая субширотная ветвь на 57°,5 с.ш. представляется самой древней, так как она перекрыта относительно древним комплексом лав холмистых равнин и срезана второй, изогнутой ветвью пояса.

Вторая ветвь длиной 800 км в ее обнаженном северном участке похожа по структуре на незамкнутый овоид непосредственно к западу от нее, хотя надежных признаков ее изверженной природы нет. Но южнее эта ветвь перекрыта молодыми гладкими лавами, и здесь она прослеживается по серии мелких гребней, очевидно, даек, стягивающихся двумя пучками к небольшому вулкану на продолжении пояса. Вместе первая и вторая ветви образуют «рубец», или шовную зону, от которой к востоку начинается тессера Лаймы.

Третья ветвь — собственно гряды Аушры — тянется на 1200 км от 56 до 45° с. ш. Ранее мы уже отмечали, что в поясах линейных дислокаций встречаются как структуры сжатия, так и структуры растяжения и признаки сопровождающего растяжение магматизма [3, с. 107]. Так, и пояс Аушры с первого взгляда представляется складчатой системой, зажатой между какими-то жесткими блоками. Но на детальных фотографиях видно, что некоторые гряды внутри этого пояса пересекают, перекрывают соседние структуры (рис. 8). Местами ведущими структурами пояса оказываются не гряды, а вытя-



Рис. 7

Рис. 8

Рис. 7. Часть вала новообразованного овоида. 320 × 210 км Рис. 8. Часть пояса Аушры с лниейной экструзией (1) и центральной расщели-

ной (2). 320 × 210 км

нутые депрессии и расщелины, гряды же образуют их края. Наконец, там, где изогнутые гряды Аушры входят в пределы вала Сигрун, на их замыканиях появляются небольшие вулканы. При наложении на фотокарту горизонталей оказывается, что эта самая молодая третья ветвь пояса в целом погружена ниже уровня окружающих равнин на 0,5–1 км. Только на перегибе пояса на 48–50° с. ш. скопление наложенных вулканов с поперечниками 50–100 км создает местное повышение. А на альтиметрических профилях видно, что края пояса и узкие полосы прилегающей местности могут быть приподняты, но центр пояса обычно представляет собой долину до 0,5–1,5 км глубины (рис. 9). Такой профиль напоминает сечение срединно-океанического хребта.



Рис. 9. Субмеридиональные альтиметрические профили через участок пояса Аушры, показанные на рис. 8: 1 — примерно по восточной границе кадра, 2 в центре, 3 — по западной кромке кадра. Вертикальные линии с бергштрихами показывают границы пояса; профили сдвинуты так, чтобы совместить участки, соответствующие центральной оси пояса. По вертикали — высота над принятым нулевым уровнем

Итак, хотя по общей морфологии пояс Аушры похож на складчатую систему, образованную сжатием, детали его строения свидетельствуют о присутствии здесь линейных экструзий, даек и вулканов, размещенных вдоль оси крупной линейной зоны растяжения. Как сказано выше, такой же механизм — растяжение с внедрением линейных интрузий — предполагается для возникновения кольцевых валов овоидов. В этом случае вал овоида отличается от пояса линейных дислокаций только формой в плане. Можно сказать, что такой пояс — это не что иное, как «линейный овоид», и наоборот, овоид есть «свернутый» в кольцо пояс.

На юге оба пояса скрываются под лавами, прослеживаясь под ними по зонам трещин и даек; на 45°,5 с.ш., 12° в. д. и на 43° с.ш., 20° в. д.

зоны даек поворачивают под прямым углом, принимая ориентировку северо-западных региональных разрывов.

## Г. Равнина Седны

Часть равнины Седны, попадающая на лист, делится на три подзоны.

Северная подзона ( $\Gamma_1$ ) представляет собой «залив», образованный за счет прогибания и/или сдвига к востоку части тессеры Фортуны и заполнения сформировавшейся мульды базальтами. На их поверхности появились купола и короткие брахиформенные валы, образованные частью путем коробления лав, частью излияниями, — поскольку они иногда перекрывают трещины соседней равнины. Разрывы северо-западных и северо-восточных простираний прослеживаются в основном по альбедным деталям — смещений по ним не видно. Такая же альбедная полоса с редкими трещинами служит границей подзон  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ .

Центральная подзона ( $\Gamma_2$ ) — это равнина с овоидами или венцами. Два овоида ( $230 \times 140$  км на  $48^\circ$ ,5 с.ш.,  $0^\circ$ ,5 в.д., и  $300 \times 280$  км на  $49^\circ$  с.ш.,  $5^\circ$  в.д.) обрисованы слабо выраженными валами, и только на некоторых участках по простиранию валов идут параллельные гребни и борозды, характерные для овоидов. Первый из них по длинной оси пересечен цепью холмов, вероятно, вулканов, а его вал на севере перекрывает две кольцевые структуры с поперечниками 120-140 км. Во втором трещины и альбедные пятна обрисовывают внутреннее кольцо поперечником около 100 км. Перекрытие соседних структур как будто указывает на продолжающуюся активность вала овоида. Но низкая высота валов, постепенные переходы от них к лавовой равнине и трещины растяжения на валах позволяют утверждать, что валы — это лавы, приподнятые над затопленными «истинными» валами погребенных овоидов, т.е. вещество первичных овоидов вряд ли обнажается на поверхности.

Два других овоида попали в зону разрывов северо-западных простираний, ограничивающих с юго-запада тессеру Фортуны. Ширина этой зоны 100–150 км, и здесь перемешаны обрывки материала тессеры, реликты овоидов, дислокационные гребни и грабены и мозаика потоков разной яркости. Все это настолько разлиновано и перетерто, что весь комплекс можно назвать зоной срыва. Овоиды в этой зоне явно перекошены горизонтальными смещениями и превратились в эллипсы по 320 × 200 и 250 × 160 км: судя по их форме, движение в зоне срыва должно быть правосторонним сдвигом.

Наконец, последнюю структуру на 52° с.ш., 358° в.д. трудно даже назвать овоидом (рис. 11). Это несколько приподнятая платформа поперечником около 300 км, центральная часть которой заполнена многочисленными куполами, депрессиями и мелкими трещинами: очевидно, это множество вулканических центров. Края платформы образованы «фартуком» лав, видимо, растекавшихся от этих центров. Слабо выраженный вал окаймляет только западную часть структуры. Можно думать, что эта уникальная платформа создана вулканизмом над затопленным, но еще активным овоидом.

Подзона  $\Gamma_3$  — это участок с несколькими останцами долавового «стоячего» паркета (тессеры Мазан-Гурме), которые, скорее всего, объединяются под затопившими их лавами.

# Д. Равнина Берегини

Эта равнина примечательна главным образом скоплениями «пауков». Так были при первом знакомстве с ними названы округлые структуры от 50–100 до 200 км, сидящие в «паутине» радиоярких полосок и невысоких узких гребней. На описываемой территории их насчитывается около 30. Западное скопление пауков расположено на пересечении продолжений поясов Сигрун–Аушры и разрывов северо-западных простираний, а восточная группа является частью ветви пауков, тянущейся сюда от области Белл: сопровождаемые трещинами растяжения, они как бы вклиниваются в тессеру Лаймы.

Типичный паук состоит из центрального купола поперечником 15-25 км в пологой депрессии, которая в свою очередь окружена размытым невысоким валом, Обычно вал незаметно переходит в окружающую равнину, реже имеет четкий уступ. Он может быть окружен вторым или даже третьим валом (рис. 10); при этом центры валов могут быть смещены так, что валы перекрывают друг друга ( $39^\circ$  с. ш.,  $14^\circ$  в. д.). Иногда поперечник центрального купола гораздо больше ширины окружающего вала (на  $42,5^\circ$  с. ш.,  $42^\circ$  в. д. ширина купола 80 км, вала — 20 км; на  $42,5^\circ$  с. ш.,  $41,5^\circ$  в. д. — соответственно 100 и 15 км), а иногда купол отсутствует. Бывает, что часть гребня кольцевого вала скрыта под массивными накоплениями, видимо, вулканическими.

Часть полос, образующих «паутину», продолжает структуры поясов Сигрун и Аушры, часть следует северо-западным простираниям, но обычно они образуют беспорядочную сеть с размерностью ячей порядка 20 км. Вокруг пауков эти полосы стремятся расположиться радиально; если они параллельны, то «стягиваются» к пауку, как линии магнитного поля к полюсу магнита (42° с. ш., 16° в. д.). Надо отметить, что концентрические полосы встречаются редко: это или пологие валы или односторонние уступы. Все же остальные полосы при нормальной ориентировке к лучу радара оказываются узкими и длинными гребнями, т. е. на них видны «освещенные» и «затененные» склоны. Такие гребни, очевидно, образованы выходящими на поверхность или остановившимися у поверхности магматическими дайками: иное объяснение подобрать трудно, хотя не вполне понятно, каким все-таки способом образуются гребни, если нет препаровки эрозией.

Обычно они секут внешние склоны валов пауков. Но, например, в патере Тротулы (рис. 10) на внешнем валу видно множество мелких секущих гребней, на среднем валу их почти нет, а на внутреннем валу



Рис. 10

Рис. 11

Рис. 10. «Пауки» — вулкано-тектонические комплексы. Внизу — патера Тротулы. 320  $\times$  210 км

Рис. 11. Группа вулканических центров на лавовом пьедестале, вероятно, перекрывающие древний овоид. 320 × 210 км

и центральном куполе их нет совсем. Аналогично этому внешний вал патеры Ярославны деформирован несколькими мелкими разрывами, а внутренний вал наложен на них. Такая повторяющаяся картина свидетельствует о длительности формирования пауков, в которых центральные части моложе внешних валов.

Ассоциация пауков с сетью даек не обязательна: у структур восточной группы их почти нет, да и в западной группе есть пауки без «паутины». Не обязательны и группировки, — встречаются изолированные пауки, например, у перегиба пояса Аушры.

По общей форме, по разнообразию соотношений параметров, по длительности формирования пауки не могут быть ударными формами: это эндогенные структуры, хотя своеобразные, поскольку при поперечниках в десятки километров размах их рельефа укладывается в немногие сотни метров. Постепенность перехода внешних склонов валов в равнину указывает на воздымание материала равнины при формировании вала. Но появление в центре более молодого материала, вулканические накопления на валах, взаимное перекрытие валов говорят о проявлениях процессов вулканизма. Мы считаем, что пауки это вулкано-тектонические комплексы центрального типа, образованные примерно по такой схеме: а) куполовидное поднятие над магматическим очагом, сопровождаемое формированием трещин и даек по ним на куполе и вокруг него; б) проседание центральной части купола (причиной падения напора в очаге может быть, например, трещинное излияние по соседству); в) вулканизм в центре, образование нового купола и, если очаг не исчерпался, то процесс повторяется: новое обрушение, новый купол и т. д.

Ассоциация групп пауков с обширной сетью даек, видимо, означает существование в данном районе условий повышенной проницаемости литосферы (например, пересечение зон активных крупных разломов).

# Обсуждение

Итак, на листе В-12 выделяются следующие образования.

1. Тессеры Фортуны и Лаймы, вещество которых на значительных площадях проявляет тенденцию к пластическому течению в направлении слабых уклонов.

2. Разделяющий эти тессеры крупный северо-восточный прогиб, служащий продолжением депрессии между тессерой Фортуны и областью Теллуры [4], а в прогибе — две крупные зоны растяжения, насыщенные магматическим материалом в виде линейных интрузий и экструзий и др. Активность поясов сохранялась, видимо, до времени излияния лав гладких равнин.

3. Скопления вулкано-тектонических кольцевых комплексов: а) в области пересечения основных разрывов северо-западных и северовосточных простираний, б) в районе частичного «раздвижения» и затопления участков тессеры Лаймы.

4. Крупные, кольцевые формы (овоиды или венцы) на равнине Седны и в районе борозд Сигрун: они сохраняли активность и после образования гладких равнин.

5. Часто встречаются также отдельные вулканы поперечником от 20-40 до 100 км, но примечательно, что их почти нет в пределах тессер (паркета).

Таким образом, по всей территории видны разнородные вулканические и вулкано-тектонические структуры, которые, судя по их морфологии, созданы вулканизмом иного типа, чем вулканизм базальтовых равнин. Естественно задаться вопросом: отличается ли этот вулканизм от базальтового и по составу продуктов?

Этот вопрос тесно связан с проблемой состава коры, и имеющимся геолого-морфологическим данным отвечают по крайней мере три решения.

**А**. Паркетизированные возвышенности Венеры сложены теми же базальтами, что и низменные равнины; свое возвышенное положение они сохраняют благодаря увеличенной мощности базальтовой коры под ними, а для крупных поднятых массивов паркета возможна дополнительная динамическая поддержка восходящими астеносферными течениями [5]. Тогда состав продуктов вулканизма всюду будет в основном базальтовым и характер вулкано-тектонических построек будет определяться динамикой магматических очагов.

**Б.** Возвышенные «материки» Венеры состоят из более легких пород, чем базальты равнин. По краям они перекрыты равнинными лавами, в которых либо «просвечивают» структуры паркета (например, в юго-восточном углу листа 12), либо появляются полигональные, «черепитчатые» структуры в лавах, вероятно, маркирующие погребенный паркет [2, с. 69, рис. 9]. Возможно, районы развития овоидов также представляют собой «материковое» вещество, залитое маломощными базальтами. Но, по мнению одного из авторов (А. Л. Суханов), эти легкие «материки» даже с присоединением «шельфовых» частей представляют собой изолированные плиты, плавающие в базальтовом слое. Кора Венеры двуслойная, но верхний легкий слой, как и гранитный слой на Земле, не распространяется на всю поверхность. В этом случае межплитный вулканизм представлен базальтами и дериватами подстилающей мантии (т.е. как и в случае А), а на «материках» вулканизм появляется только в зонах глубоких разломов (например, в грабене в центре тессеры Фортуны).

Правда, если принимать эту концепцию, то надо с осторожностью относиться к проведению границ легких плит: паркет — еще не синоним «материкового» вещества, так как есть случаи паркетизации равнинных лав; и полигональные лавы не обязательно скрывают под собой паркет, и наконец, есть возвышенности «материкового» уровня, но базальтового состава (область Бета).

**В.** По мнению другого автора (А. А. Пронин), легкое «материковое» вещество, отдифференцированное на самых ранних стадиях (аналогично анортозитовой коре Луны) распространяется на всю поверхность Венеры. Но там, где это вещество перекрыто толщами базальтов, образуется инверсия плотностей, что в условиях Венеры с ее высокими приповерхностными температурами приводит к мобилизации и плавлению погребенного легкого вещества. Образуются отдельные легкие диапиры, создающие кольцевые формы, или линейные диапиры, проявляющиеся на поверхности в виде поясов линейных дислокаций. Вулканические продукты такого диапиризма будут иметь состав легкого «материкового» вещества, или же гибридный состав при контаминации магм базальтами.

Если принять эту гипотезу, то надо объяснить, почему так редки проявления центрального и поясного вулканизма на обширных равнинах Седны и Гиневры с их мощными лавовыми толщами: здесь инверсия плотностей будет особенно велика.

Выбор между этими моделями, видимо, невозможен без анализа геофизических данных, сведений о геохимии мест посадок станций «Венера» и о рельефе таких образований, как «материк» Афродиты и др., что выходит за рамки настоящей статьи.

Для оценки состояния литосферы на разных этапах развития Венеры представляет интерес схематическая последовательность событий на описываемой территории: 1) формирование овоидов и «стоячего» паркета; 2) смещения по крупным разрывам северо-западного и северо-восточного простираний, создавшие «клавишную» мозаику блоков; 3) пластические перемещения паркета и одновременно (?) формирование крупных разрывных зон растяжения; 4) появление скоплений магматических комплексов центрального типа. Но, конечно, эта схема может оказаться неприменимой к другим районам и составить сводную историю развития можно будет только после завершения картирования всей заснятой территории.

#### Литература

- 1. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В-4). Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 2, с. 83–98.
- 2. Суханов А. Л. Паркет: области площадных пластических дислокаций. Геотектоника, 1986, № 4, с. 60-76.
- 3. Суханов А. Л., Пронин А. А., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание земли Иштар (фотокарта поверхности Венеры, лист В-5). Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 2, с. 99–111.
- 4. Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С., Островский М. В. и др. Геолого-морфологическое описание области тессер Фортуны и Мешкенет (фотокарта поверхности Венеры, лист В-6). — Астрон. вестн., 1980, т. 20, № 4, с. 259–271.
- Phillips R. J., Malin M. C. Tectonics of Venus. Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 1984, v. 12, p. 411-443.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР Поступила в редакцию 30.VI.1986

Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского

Институт радиотехники и электроники АН СССР

#### Geological-morphological Description of Tessera Laima and Bereginy Plain Area (Photomap of the Venusian Surface, SHEET B-12)

A. L. Sukhanov, A. A. Pronin, Yu. S. Tyuflin, M. V. Ostrovskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. M. Petrov, A. I. Sidorenko, Yu. N. Alexandrov, V. P. Sinilo, A. P. Krivtsov, G. A. Burba, N. N. Bobina

Southern part of Tesserae Fortuna and western part of Tesserae Laima are made of parquet with sighns of movements down the small regional slopes; and southern part of Tesserae Laima — of irregular «stagnant» parquet. Tesseraes are divided by two extentional belts with dikes, linear extrusions and volcanoes. Groups of volcano-tectonic central complexes were mapped, and large annular volcano-tectonic structures (coronaes) as well. The abundance of different volcanic structures brings up a question of volcanism types and the venusian crust structure.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ВЕНЕРЫ

В. Л. Барсуков, А. Л. Суханов, А. Л. Аким, Ю. Н. Александров, А. Т. Базилевский, М. Ю. Бергман, Н. Н. Бобина, А. Ф. Богомолов, И. М. Бокштейн, Г. А. Бурба, С. А. Кадничанский, В. А. Котельников, М. А. Кронрод, В. П. Крючков, Л. В. Кудрин, Р. О. Кузьмин, М. С. Марков, О. В. Николаева, Г. М. Петров, А. А. Пронин, О. Н. Ржига, Л. Б. Ронка, Ю. И. Сидоров, Г. М. Скрыпник, Ю. С. Тюфлин, И. М. Черная, П. А. Чочия, В. П. Шашкина

Геотектоника, 1986, июль-август, №4, с. 4-25

Радиолокационная съемка, проведенная космическими аппаратами «Венера-15» и «Венера-16», обнаружила на Венере сложный вулканический и тектонический рельеф. Основная часть заснятой территории занята низменными базальтовыми равнинами с многочисленными вулканическими конусами, потоками и отдельными щитовыми вулканами. На возвышенностях развиты сложные системы линейных и площадных дислокаций, обусловленных горизонтальными напряжениями. Кольцевые формы представлены крупными вулкано-тектоническими структурами и ударными кратерами. Средний возраст равнин по плотности кратеров определяется в 0,5–1 млрд. лет.

#### Введение

Венера очень похожа на Землю по своим размерам (радиус Венеры 6051, Земли — 6378 км) и средней плотности (5,3 у Венеры и 5,5 г/см<sup>3</sup> у Земли), а, следовательно, как можно думать, и по среднему химическому составу. Но на этом сходство Венеры и Земли кончается и начинаются существенные различия. Так, Венера практически не имеет собственного магнитного поля. Она вращается вокруг своей оси в обратную сторону и крайне медленно, так что солнечные сутки на Венере равны 117 земным. Она находится гораздо ближе к Солнцу, чем Земля, и температура на ее поверхности держится около 470° без каких-либо значительных латеральных колебаний. А это означает, что температура плавления вещества недр на Венере может достигаться на меньшей глубине, чем на Земле, и литосфера Венеры может быть тоньше земной [16]. Мощная сухая атмосфера из углекислоты создает на поверхности давление около 100 атм.

Из-за плотной облачной атмосферы обычная фототелевизионная съемка поверхности возможна только непосредственно вблизи этой поверхности. Такая съемка, выполненная посадочными станциями «Венера-9, 10, 13, 14», позволили увидеть четыре участка с разрешением 0,5–1 см на площади в несколько квадратных метров и с дециметровым-метровым разрешением — на несколько сот метров вокруг [11, 13].

В 70-е годы при помощи радиолокационного зондирования с Земли удалось обнаружить на Венере некоторые крупные линейные и круговые структуры [20].

Первая характеристика глобального рельефа Венеры была получена станцией «Пионер-Венера» с помощью орбитальной радарной съемки с разрешением на местности около 200 км и альтиметрических измерений с разрешением по высоте около 200 м при пятне осреднения 80–100 км [21, 23]. Эта съемка охватила области от 65° ю.ш. до 75° с.ш. На карте, составленной по этим данным [26], на фоне преобладающих равнин разных уровней видны крупные возвышенные области (Земля Иштар и Земля Афродиты), протяженные горные хребты высотой до 11 км, уступы, грабеновидные депрессии и отдельные горы и впадины. Слежение за траекторией движения аппарата позволило сделать некоторые выводы относительно гравитационного поля планеты [15, 24].

В 1983–1984 гг. орбитальные станции «Венера-15 и -16» выполнили радиолокационную съемку северного полушария Венеры от полюса в среднем до 30° с. ш. на площади около 115 млн. км<sup>2</sup> с разрешением 1–2 км. Съемка проводилась субмеридиональными полосами шириной по 160 км при помощи локатора бокового обзора с отклонением луча на 10° к западу, так что «освещение» на изображениях всегда справа. Одновременно с локатором при каждом пролете работал высотомер с разрешением по вертикали 50 м при пятне осреднения 40–50 км. (В дальнейшем, когда говорится о высоте, подразумевается высота над нулевым уровнем, за который принята сфера с радиусом 6051 км.)

Полосы были смонтированы в фотомозаики масштаба 1:4 000 000, что в общем соизмеримо с масштабом съемки Земли из космоса; небольшая часть изображений была обработана на ЭВМ для устранения помех, введения поправок на рельеф и сбивки полос. Надо отметить, что севернее примерно 60° с. ш. полосы частично перекрываются, образуя стереопары.

Яркость фототона на изображениях определяется в основном двумя факторами: 1) рельефом, т.е. наклоном площадок поверхности относительно радиолуча: максимальная яркость у площадок, ориентированных нормально к лучу; 2) степенью шероховатости поверхности в сантиметровом диапазоне (рабочая волна локатора 8 см): чем сглаженнее площадка, тем слабее сигнал, возвращаемый на станцию, и тем темнее изображение; этот фактор лучше проявляется на равнинных участках. (Интенсивность сигнала зависит также от диэлектрической постоянной пород поверхности, но эта величина на Венере колеблется в меньших пределах, чем на Земле, где она сильно зависит от степени увлажненности и развития растительности.)

В масштабе съемки на Венере не обнаружено следов эрозии и осадконакопления, поэтому можно считать, что рельеф и шероховатость поверхности являются прямым выражением тектонических, тектоно-магматических и вулканических процессов, что также отличает эту планету от Земли. Относительно генезиса структур разного типа на Венере у нас нет единого мнения; предварительные результаты дешифрирования опубликованы [2–4, 8], изучение фотографий продолжается. Поэтому в данной статье охарактеризованы лишь самые общие черты морфологии ее поверхности, какими они представляются на сегодняшний день, с целью облегчить читателю восприятие последующих, более специальных статей.

# Глобальная орография

На рис. 1 глобальная гипсометрическая кривая для Венеры показана в сопоставлении с аналогичными кривыми для Земли, Марса и Луны. Нетрудно видеть, что все эти кривые обладают одним общим свойством — бимодальностью. На Земле наиболее низкие уровни этой кривой соответствуют впадинам океанов, выполненным продуктами базальтового вулканизма, а высокие уровни — континентам, с широким развитием пород сиалического состава с преобладанием К-Na полевошпатовой компоненты.

На Луне и Марсе низкий уровень соответствует базальтовым впадинам, а преобладающий высокий уровень — материковой Саполевошпатовой коре со следами древнейшей метеоритной обработки. На Венере низким уровням гипсометрической кривой (от –3 до +2 км) также отвечают вулканические равнины, которые по строению и по данным посадочных аппаратов должны иметь базальтовый состав. Однако в отличие от других планет эти равнины занимают большую часть поверхности — 92%. Оставшиеся 8% занимают гористые возвышенности. Есть основания считать, что материал возвышенностей, как и на Луне и Марсе, характеризуется возрастанием полевошпатовой компоненты, но натриевого ряда [12, 14]. Однако эти возвышенности сильно дислоцированы и слабо кратерированы, отличаясь от «материков» Луны и Марса: это еще одна из интересных особенностей геологии Венеры.

Наиболее общей особенностью рельефа Венеры является ее циркумполярная зональность. Северный полярный регион (рис. 2) представляет собой равнинную область с высотами, близкими к нулевым. Южнее протягивается субширотно ориентированное поднятие Земли Иштар, занимающее около 8000 км по долготе, с высочайшими горами Венеры — горами Максвелла в центре этой области. С запада к этой области примыкает поднятие Метиды, а с востока — поднятие области Тефии, каждое около 2000 км в поперечнике, так что в целом пояс поднятий охватывает 260° по долго-

те. К этому поясу приурочены наибольшие перепады высот рельефа планеты.

К югу от этого пояса начинаются равнины со средними высотами, близкими к нулевым: равнины Гиневры, Седны, Леды, Ниобы, характеризующиеся гладкой, пологоволнистой или мелкохолмистой поверхностью. На западе они сочленяются с Землей Иштар по крупным, 2–3-километровой высоты пологим уступам, на востоке переход сравнительно постепенный. В одном месте пояс равнин прерывается пологим 2000-километровым куполом области Теллуры.

Восточнее 140° в.д. характер местности меняется. Здесь располагается самая низкая область Венеры — округлая равнина Аталанты глубиной около 1,5 км, а за ней к востоку на 4000 км тянутся субмеридиональные системы невысоких (0,5–1,5 км) хребтов, чередующихся с полосами равнин.

Южнее, по данным съемки «Пионер-Венера», протягивается второй широтный пояс возвышенностей; вытянутая вдоль экватора Земля Афродиты и несколько изолированных куполовидных возвышенностей. Съемка «Венеры-15,



Рис. 1. Гистограммы распределения высот рельефа на Венере, Луне, Марсе и Земле [21]. Все кривые так или иначе бимодальны. На Луне охвачена площадь в пределах ±45° по широте

-16» захватывает только северные отроги этого пояса: возвышенности Ульфрун и Бета, возможно, к ним же относится и поднятие Белл (см. рис. 2).

В южном полушарии протягивается новый пояс с невысокими поднятиями, а от  $60^{\circ}$  ю. ш. начинается пологое поднятие Земли Лады (неизвестно, охватывает ли оно всю южную полярную область, где не было съемки).



Рис. 2. Схема северного полушария Венеры. 1 — возвышенности; 2 — низменности; 3 — уступы; 4 — граница съемки «Венеры-15, -16». Буквы на схеме — горы: А — Акны, Ф — Фрейи, М — Максвелла

# Характеристика основных структур

#### Равнины

Как показал опыт картирования Луны и Марса, попытки установить относительный возраст лавовых равнин по их морфологии и особенностям фототона могут привести к серьезным ошибкам: то и другое в значительной мере зависит от состава пород, характера извержений и последующей переработки в разных тектонических условиях. Возрастные соотношения равнин разных типов наблюдаются редко, и поэтому последовательность их описания не означает возрастной



Рис. 3. Геолого-морфологическая карта северного полушария Венеры. Составлена в Лаборатории сравнительной планетологии ГЕОХИ АН СССР в 1985 г. 1-6 — равнины: 1 — гладкие, 2 — плато Лакшми, 3 — холмисто-останцовые, 4 — пологоувалистые, 5 — «пауковые», 6 — полосчатые, 7 — вулканы; 8 — вулкано-тектонические поднятия; 9 — овоиды; 10 — хребты обрамления Лакшми; 11 — пояса линейных дислокаций; 12 — зона открытых трещин; 13 — области площадных перекрестных дислокаций (паркет); 14 — участки ортогональной трещиноватости; 15 — ударные кратеры; 16 — выбросы

последовательности, хотя в целом мы пытались идти от более молодых к более древним образованиям (рис. 3).

Гладкие равнины выделяются наиболее отчетливо по их полной бесструктурности и однородному фототону (рис. 4). Как правило, они располагаются на низком гипсометрическом уровне (равнины Аталанты и Седны) и либо образуют заливы на границе с прилегающими возвышенностями, либо перекрывают эти возвышенности, так что над равниной остаются только их самые высокие незатопленные части. Однако участки таких гладких равнин встречаются и в виде «озер» в западинах среди возвышенностей. Такие толщи во много сотен метров с ровной поверхностью могли бы быть представлены осадочными отложениями, но ни области эрозии материала, ни пути его транспортировки пока не известны. Сходство этих форм с соответствующими формами на Луне и Марсе позволяет рассматривать их как вулканические образования (базальтовая заливка или засыпание пепловым материалом). По-видимому, эти равнины являются одними из самых молодых образований на Венере, но это не значит, что среди древних равнин не может быть таких же гладких форм.



Рис. 4. Равнины: *а* — гладкая равнина в центре и пологоувалистая справа, слева видны темные и светлые потоки, в центре ударный кратер, ширина кадра 350 км; *б* — холмисто-останцовая равнина, ширина кадра 300 км

Пологоувалистые равнины (см. рис. 4) в наиболее типичном виде представлены вдоль южных окраин Земли Иштар, в ее «шельфовой» зоне. Их поверхность осложнена расплывчатыми валами, куполами, уступами и западинами. Некоторые из них выглядят как структуры облекания, другие могли возникнуть при короблении поверхности равнины при последующих движениях. Встречаются также серии узких гряд и борозд, придающих поверхности «сморщенный» облик, как если бы они образовались при застывании корки не вполне затвердевшего массива. Некоторые пологие холмистые возвышения в пределах этих равнин могут быть аккумулятивными вулканическими сооружениями, но в основном возвышения, если они имеют четкие ограничения, являются останцами подстилающего рельефа.

**Холмисто-останцовые равнины** (см. рис. 4, 5) представляют собой пеструю смесь сравнительно сглаженных участков, мелких останцов подстилающего рельефа, структур облекания, мелких гряд и борозд и местами многочисленных холмов размером от 10–15 км до предела разрешения. Эти холмы встречаются как поодиночке, так и мелкими группами и крупными «стадами» и обычно хорошо отличаются от проступающих вершин погребенного рельефа; на их вершинах иногда различаются мелкие кратерки, а местность вокруг холмов обычно сглажена. Видимо, эти холмы являются мелкими вулканическими конусами, наложенными на все более древние структуры.



Рис. 5. Холмисто-останцовая равнина в центре и полосчатые равнины слева и справа вверху. В центре ударный кратер. Ширина кадра 820 км

**Полосчатые равнины** (см. рис. 5) покрыты системами многочисленных узких (первые километры) протяженных (до 100–200 км) невысоких гряд. Иногда эти гряды параллельны одна другой, иногда извилисты, смыкаются и пересекаются, создавая сетчато-петельчатый рисунок. Во многих местах они переходят в светлые узкие линии, не выраженные топографически, возможно, это объясняется тем, что их высоты находятся за пределами разрешения. Лучше всего они проявлены севернее области Тефии, где встречаются также прямые или слегка извилистые борозды (трещины) шириной 10–20 и длиной до 100 км, иногда с приподнятыми бортами. Эти гряды могут быть поверхностным проявлением даек или узких зон дислокаций.

На равнине Леды гряд почти не видно, но вся она покрыта диффузными светлыми и темными пятнами, на которые наложена петельчатая система узких ярких полос.

Между равниной Седны и поднятием Белл такие гряды и яркие полосы вместе с причудливыми светлыми и темными пятнами образуют сплошную паутину, в узлах которой располагаются слегка приподнятые кольцевые структуры — «пауки», с характерными поперечниками 50–120 км. Они очерчиваются широкими пологосклонными валами или просто яркими дугами и системами гряд, радиальных или концентрических к центру этих структур. Местность эта настолько своеобразна, что было предложено выделять ее как самостоятельный тип равнин (рис. 6), хотя возможно, что она представляет собой сочетание полосчатой равнины со скоплением кольцевых структур. Похожие кольцевые структуры часто встречаются на равнине восточнее Аталанты, но там они обычно лишены радиальных и концентрических структур, это как бы «пауки» без паутины.

На всех типах равнин встречаются вытянутые, фестончатые и неправильные светлые и темные пятна с довольно четкими ограничениями без заметного собственного рельефа, иногда накладывающиеся на мелкие линейные структуры равнин и одно на другое, протяженностью от десятков километров до 100–200 км. Местами они окружают куполовидные возвышенности с вершинными кратерами. Скорее всего они образованы потоками сравнительно маломощных и, следовательно, жидких лав (базальтов) от местных вулканических центров. Вся морфология равнин, подтверждаемая изменениями состава пород в местах посадки [4, 10], свидетельствует о том, что они скорее всего сложены толщами базальтовых лав мощностью до сотен метров или даже первых километров.

#### Пояса линейных дислокаций

Во многих местах поверхность равнин осложнена валами и долинами шириной от предела разрешения до 20-40 км, протяженностью в сотни километров и высотой до 0,5-1,5 км (рис. 7). Они группируются субпараллельно или куполообразно в отдельные пояса



Рис. 6. «Пауковая» равнина. Ширина кадра 580 км

шириной до 100-400 и протяженностью до 2000 км, в отдельных случаях до 5000 км. Наиболее широко они развиты на равнине между равниной Аталанты и областью Метиды, где местность представляет собой сплошное чередование таких поясов с лентами равнины шириной по насколько сот километров. По морфологии они несколько напоминают морские валы на Луне, Марсе и Меркурии, а по характеру структурного рисунка — хребты-пояса бороздчатой местности на Ганимеде [25], но отличаются бо́льшими размерами; местами в пределах поясов просвечивают структуры подстилающего основания, что свидетельствует о структурных поднятиях; иногда видны признаки многостадийности формирования пояса, с наложением одних структур на другие. Представляется несомненным, что эти пояса образовались за счет деформации материала равнин, однако самые молодые лавы не только перекрывают их, но в отдельных случаях контакты пояса с лавами образуют что-то вроде извилистого «берегового уступа», как если бы лавы частично эродировали пояс. Иногда валы и долины осложняются системами узких гряд (даек). Если не считать небольшой высоты, то в целом их можно было бы сопоставить с неэродированными складчатыми поясами Земли.



Рис. 7. Пояса линейных дислокаций на равнине Аталанты. Ширина кадров 460 и 500 км

#### Возвышенности

Возвышенности на заснятой территории делятся пространственно и морфологически на две группы: северные возвышенности с системами сложных дислокаций (Земля Иштар, области Тефии и Теллуры) и южные — крупные вулкано-тектонические поднятия (Бета, Белл, Ульфрун). В свою очередь северные возвышенности разделяются на две части: плато Лакшми и его складчатое обрамление западнее нулевого меридиана и области так называемого паркета к востоку от него.

Плато Лакшми. В западной части находится плато Лакшми и его горное окружение (рис. 8). Плато возвышается над средним уровнем Венеры на 2–4 км, а над прилегающей с юга равниной Седны — на 3–5 км. Поверхность плато в основном ровная. Лишь местами встре-



чаются слегка повышенные участки, в пределах которых поверхность рассечена системами трещин-борозд, образующих ортогонально- или диагонально-сетчатый рисунок с размерностью ячеек обычно не более 10 км. Видимо, это останцы тектонически нарушенной местности, более древней, чем поверхность плато.

На поверхности плато видны две плоскодонные удлиненные депрессии — Колетт (80 × 120 км) и Сакаджавея (140 × 280 км). Первая довольно четкая, вторая — сглаженная. Они расположены на вершинах очень пологих поднятий и окаймляются системами кольцевых борозд и узких гряд, а по склонам поднятий расходятся извилистые светлые полосы длиной до 100–300 км при ширине до 10–20 км. По своему строению они напоминают некоторые марсианские кальдеры, например кальдеру на вершине горы Арсия или кольцевую структуру Альба [12, 22]. Представляется очевидным, что эти кальдеры являются вулканическими образованиями, а поверхность плато, как и равнины, покрыта базальтами. Местами лавы через проходы в горном обрамлении спускаются к окружающим равнинам и смыкаются с ними.



Рис. 9. Фотокарта гор Максвелла и прилегающих территорий. Ширина изображения 1900 км

**Обрамление Лакшми.** Плато Лакшми почти со всех сторон окружено зонами субпараллельных или хаотически ориентированных линейных хребтов и долин: горы Акны, Фрейи и Максвелла и узкий пояс горного рельефа вдоль уступа Весты на юге (рис. 9–11). Системы чередующихся хребтов и долин длиной по несколько сот километров протягиваются на расстояния до 1200 км. На стереоизображениях эти хребты выглядят как стопки наклоненных пластин: каждый хребет похож на наклоненную от плато чешую или опрокинутую складку, в любом случае для образования такой структуры необходима обстановка горизонтального сжатия. Это самые высокие горы Венеры — 8 км, а центральная часть массива Максвелла — до 11 км, причем склоны, обращенные к плато, гораздо круче, чем обратные скаты хребтов. Как сказано, молодой равнинный материал плато перекрывает понижения в этих хребтах, но у подножия Максвелла часть лав, по-видимому, вовлекается в дислокации обрамления.

На склонах хребтов обрамления плато Лакшми и на его южном уступе широко развиты структуры гравитационной тектоники: оползания по склонам крупных блоков вещества, обычно сопровождаемые деформациями внутри этих блоков.

На восточном склоне Максвелла видно вытянутое субмеридиональное пятно, которое выглядит как некий покров, дислоцированный слабее соседних участков, а в центре его — депрессия, так называемый



Рис. 10. Горы Акны — северо-западное обрамление плато Лакшми. Ширина кадра 450 км


Рис. 11. Горы Максвелла — восточное обрамление плато Лакшми. В нижней части кадра — субширотный сдвиг с оперяющими разрывами. Ширина кадра 620 км

кратер Клеопатра. Она имеет вид двухкольцевого бассейна — во внешний кратер диаметром 100 и глубиной 1,5 км вложен смещенный к север-северо-западу от центра внутренний кратер диаметром около 50 и глубиной 1,3 км относительно внешнего кратера. Вал внутреннего кратера относительно четкий, а вал внешнего выражен слабо. Кратер Клеопатра наложен на структуру гор Максвелла и похож на ударные двухкольцевые бассейны других планет, но имеет признаки эндогенной активности, поэтому происхождение его спорно, а от толкования его генезиса зависит и определение характера соседних покровных отложений. С юга и севера массив Максвелла обрезан субширотными разрывами, по которым крылья массива опущены и, возможно, сдвинуты в восточном направлении.

Паркет. Восточнее кратера Клеопатра по мере понижения высоты местности до 4–6 км субмеридиональные хребты все чаще разбиваются поперечными нарушениями, иногда со сдвиговыми смещениями осей хребтов, пока, наконец, не исчезают совсем примерно на 20° в. д. Восточнее протягивается пояс 800 × 2500 км с очень своеобразным структурным рисунком: это пересекающиеся северо-западные и северо-восточные валы и долины обычно двух или трех направлений, создающих в плане ортогональный, диагональный или шевроноподобный рисунок, иногда с кольцевыми или петлевидными элементами (рис. 12, 13). Из-за этого рисунка такой тип местности был сначала назван «паркетом», а затем было предложено название «Тессера» (черепица).



Рис. 12. Центральная часть Северного паркета Земли Иштар (тессера Фортуны). Ширина кадра 1400 км

Эта область (так называемый Северный паркет, или Тессера Фортуны) не рассматривается здесь подробно, поскольку она более детально обсуждается в последующих статьях.

Южнее, за полосой увалистых равнин и поясов линейных дислокаций, но еще в пределах Земли Иштар, лежит так называемый



Рис. 13. Фрагмент восточной части Северного паркета Земли Иштар — структуры течения и оползания. Ширина кадра 430 км

Южный паркет с несколько отличным рисунком. Здесь магистральные долины шириной 20–30 км и длиной в сотни километров нарезают местность на полосы шириной 100–150 км, которые в свою очередь рассечены частыми поперечными бороздами и трещинами (рис. 14). Похоже, что рисунок этого района определялся тектоническими нарушениями, возникшими в обстановке сдвига (магистральные долины), сопровождавшегося сжатием и растяжением в перпендикулярном направлении. Наличие сдвиговых деформаций подтверждается характерными S-образными структурами вдоль долин. Еще южнее этот паркет переходит в беспорядочное скопление извилистых невысоких валов и борозд.

В области Тефии, являющейся, видимо, продолжением Земли Иштар, полосовидно-ортогональное строение проявлено еще резче (рис. 15): здесь полосы смещены относительно одна другой, как костяшки до-



Рис. 14. Фрагменты Южного паркета Земли Иштар: *а* — языковидные блоки с продольными и поперечными бороздами, ширина кадра 500 км; *б* — S-образные трещины, ширина кадра 200 км; *в* — депрессии с конусовидными «тенями», свидетельствующими о движении материала на восток. Ширина кадра 220 км

мино, а в их тыловых частях образовалась грабеновидная депрессия протяженностью около 1300 км.



Рис. 15. Область Тефии. Ширина кадра 1300 км

Перекрестно-диагональный рисунок паркета покрывает также область Теллуры с высотой 2–3 км; здесь в сводовой части купола видна серия своеобразных корытообразных прогибов поперечником от 80 до 150 км, заполненных лавами, ориентировка которых в общем согласуется со структурным планом местности (рис. 16).

Для паркета наиболее характерно площадное развитие относительно мелких частых дислокаций, одни из которых возникли как системы сопряженных разрывов, а другие — в результате перемещения корового вещества по типу пластического течения. На других планетах таких структур нет (если не считать ореолов вулкана Олимп на Марсе); их можно сравнивать разве что с докембрийскими складчатыми образованиями Земли, если удалить с них перекрывающие породы, но не эродировать, сохранив первичный рельеф. Видимо, формирование таких структур на Венере связано с более высокой температурой поверхности и соответственно с большим прогревом ее коры.

Возвышенности Бета, Белл и Ульфрун. Эти области построены совершенно отлично от Земли Иштар и от небольших щитовых вулканов (рис. 17). Съемка захватывает только северные части этих образований.

Область Бета расположена на 280–290° в. д. Здесь равнина повышается к югу и одновременно осложняется прерывистыми уступами субмеридионального простирания длиной до сотен километров, которые иногда расположены навстречу один другому, формируя грабенообразные депрессии (рис. 18). Вероятно, южнее эти уступы соединяются с рифтовой зоной, которая проходит через всю эту возвышенность, имеющую максимальную высоту над соседней равниной около 5,5 км [17]. Здесь также видны спускающиеся по склонам лопастевидные и фестончатые светлые и темные пятна, места-



Рис. 16. Область Теллуры: лавовые мульды в южной части купола на фоне сети северо-западных и северо-восточных разрывов. Ширина кадра 470 км

ми перекрывающие структуры равнин, а севшая у подножия Беты «Венера-9» дала по  $\gamma$ -спектрометрии базальтовый состав пород. Очевидно, вся структура представляет собой огромное вулканическое или вулкано-тектоническое сооружение. Есть данные, указывающие на то, что вулканическая активность в этом районе продолжается и сейчас [18].

Возвышенность Ульфрун в 60° западнее Беты представляет собой отрог Земли Афродиты и имеет высоту 3–4 км над нулевым уровнем. Материал этой возвышенности широкими плащами перекрывает пояса линейных дислокаций и кратеры у ее северного подножия, а поверхность самого поднятия выглядит бесструктурной, за исключением нескольких грабенов, сходных с грабенами Беты.



Рис. 17. Вулкан высотой 1,2 км в области Тефии. Ширина кадра 480 км



Рис. 18. Северный склон поднятия Бета с уступами и грабенами. Ширина кадра 580 км

Двухвершинная возвышенность Белл меньше по размерам и ниже (1,5–2 км над равниной), чем две предыдущие; на ней видны два кратера. Интересно, что от южного кратера на запад протягивается шлейф яркого материала 80 × 300 км с диффузными границами. Ориентировка этого шлейфа в направлении господствующих ветров позволяет предпо-

ложить, что это покровы пирокластического материала; к сожалению, восточнее кратера изображение отсутствует.

### Круговые структуры

Эти образования делятся на три типа: 1) кольцевые структуры диаметром 150-600 км — «овоиды»; 2) ударные кратеры; 3) круговые структуры неясного происхождения преимущественно на равнинах.

**Овоиды** концентрируются преимущественно на равнинах по периферии Земли Иштар (рис. 19). Для них характерен мощный кольцевой или незамкнутый вал, разбивающийся на серию концентрических гряд, и сложно построенная центральная платформа, которая обычно несколько ниже вала, но выше уровня окружающей местности. На валах встречаются небольшие вулканические аппараты, от них по склонам вала спускаются радиояркие и темные лавовые потоки. Местами на внутренних склонах и на центральной платформе появляются мелкие площадные дислокации, напоминающие паркет. Овоид может срезать пояс линейных дислокаций в одном месте и деформироваться им в другом, что указывает на длительность его развития.

По структуре овоиды резко отличаются от всех кольцевых структур Луны, Меркурия и Марса и несколько напоминают лишь докембрийские кольцевые структуры Земли [6, 7, 9]. Можно предположить, что их формирование связано с всплыванием и растеканием в верхних горизонтах коры крупных магматических диапиров; возможно, что они закладывались на месте крупных ударных впадин, оставшихся от эпохи интенсивной метеоритной бомбардировки.

Ударные кратеры встречаются на всех типах местности (см. рис. 4, 5, 10, 20). По морфологии они сходны с ударными кратерами других планет: небольшие имеют чашевидную форму, в более крупных появляются центральные горки, а затем внутренние кольца; самый крупный такой кратер расположен севернее области Тефии (поперечник 140 км); выбросы свежих кратеров выглядят яркими, т.е. имеют повышенную шероховатость. Минимальный размер наблюдаемых ударных кратеров 4–5 км; отсутствие меньших форм, видимо, связано с плотной венерианской атмосферой, пропускающей только метеориты с большой массой [1]. Однако на заснятой территории нет и кратеров более 140 км, их место занимают овоиды и неясные реликты кольцевых структур на равнинах: возможно, при достижении кратером определенной глубины в этом месте инициируется эндогенная активность, и кратер подвергается интенсивной переработке.

По плотности ударных кратеров на единицу поверхности средний возраст равнин составляет 0,5–1 млрд. лет. Однако на равнинах есть более молодые участки, совершенно лишенные таких кратеров. Более молодыми представляются также области паркета и горное обрамление



Рис. 19. Крупные кольцевые структуры — овоиды: *а* — кольцевой вал высотой 1–2 км окружает центральную платформу, лежащую на уровне окружающей местности, ширина кадра 650 км; *б* — центральный купол высотой 1 км окружен кольцевой депрессией, ширина кадра 700 км

плато Лакшми, но здесь кратеров слишком мало, чтобы статистически надежно оценить их абсолютный возраст.

**Круговые структуры неясного происхождения** различаются преимущественно на равнинах по ориентировке останцов рельефа, небольших валов и уступов и по рисунку светлых и темных полей. Морфология не позволяет надежно отнести их к эндогенным или ударным формам. Для части круговых структур установлено, что они распределяются по площади случайно, а по размерам — закономерно, соответствуя распределению ударных кратеров. Если это действительно сильно деградированные ударные кратеры, то в морфологии поверхности равнин до сих пор запечатлены следы событий 3,0–3,8 млрд. лет, что примерно соответствует возрасту лунных морей.



Рис. 20. Крупный ударный кратер на полосчатой равнине. Ширина кадра 400 км

## Процессы рельефообразования Вулканизм

По масштабам и разнообразию проявлений вулканизма Венера может быть сопоставлена только с Землей. Площадные излияния базальтов широко развиты на Луне, Меркурии и Марсе, но на этих планетах они охватывают меньшую часть поверхности, а преобладает на них рельеф древней коры со следами интенсивной метеоритной бомбардировки. Кроме того, широкий базальтовый вулканизм на этих планетах в основном завершился к моменту 2,5 млрд. лет назад, и только крупные вулканы Марса, видимо, продолжали работать до геологически недавнего времени. На Венере площадной базальтовый вулканизм преобладает по площади, он действовал по крайней мере до времени 0,5-1 млрд. лет назад, а в отдельных местах и дольше, возможно, вплоть до настоящего времени. Кроме монотонных поверхностей платобазальтов здесь широко представлены аккумулятивные вулканические образования: от скоплений бесчисленных мелких вулканических конусов и небольших щитовых вулканов до огромных вулкано-тектонических сооружений; кроме лав, возможно, присутствуют также и пирокластические накопления, что позволяет ожидать больших вариаций состава вулканических продуктов, чем на Луне, Меркурии и Марсе, и что подтверждается измерениями состава поверхностных пород, среди которых обнаружены и толеитовые и щелочные базальты [5].

#### Тектонические и тектоно-магматические процессы

На Луне, Марсе и Меркурии тектонические процессы были развиты слабо и приводили в основном к формированию линейных структур в мощной жесткой литосфере, иногда весьма протяженных (системы

выбросов Меркурия и каньонов Марса), но с очень небольшой амплитудой горизонтальных смещений.

На Венере большинство участков, возвышающихся над средним уровнем базальтовых равнин, несет следы воздействия тектонических деформаций, вертикальных и горизонтальных. В случае преобладающих вертикальных движений возникают сводовые тектонические и вулкано-тектонические поднятия или специфические венерианские структуры — овоиды. В них горизонтальные напряжения играют производную роль, создавая грабены и мульды на сводах и концентрические валы на периферии овоидов. В случае преобладающих горизонтальных напряжений возникают структуры двух типов: а) крупные разрывы со значительной вертикальной и горизонтальной составляющими и протяженные пояса линейных дислокаций, сходные со складчатыми поясами Земли; б) площадные системы линейных дислокаций (паркет), в какой-то мере напоминающие дислокации докембрийских образований Земли, с зонами преобладающего сжатия или растяжения. Кроме того, имеются многочисленные свидетельства гравитационной тектоники с ее оползаниями и надвиганиями.

## Ударные процессы

Эти процессы сказываются в формировании рельефа Венеры гораздо слабее, чем на Луне, Меркурии и Марсе, что определяется, во-первых, плотной атмосферой, до определенной степени экранирующей поверхность и ограничивающей разлет выбрасываемого из кратеров вещества, и, во-вторых, интенсивной тектонической и вулканической переработкой образовавшихся кратеров. Однако следы ударных воздействий сохранились на Венере гораздо лучше, чем на Земле, поскольку масштабы тектонической и, главное, экзогенной переработки поверхности Венеры, вероятно, существенно уступают земным.

#### Экзогенные процессы

О существовании какой-то поверхностной эрозии свидетельствует разная степень морфологической выраженности ударных кратеров, овоидов и других структур, а также признаки деградации материала в сантиметровом и дециметровом диапазоне, обнаруживаемые на панорамах станций «Венера-9, 10, 13, 14», и наличие на поверхности в местах посадок тонкослоистых непрочных пород [19]. Возможно, какие-то части равнин образованы помимо базальтов пирокластическими и эоловыми накоплениями; возможно, современные «термостатные» условия на поверхности со слабыми ветрами и ничтожными перепадами температур не всегда были такими. Однако в масштабе съемки «Венеры-15 и -16» явных эрозионных структур на поверхности не обнаружено, следы деятельности жидких агентов денудации совершенно отсутствуют, а если нет крупномасштабной эрозии, то вряд ли есть и сколько-нибудь значимое осадконакопление.

#### Заключение

Особенности рельефа Венеры свидетельствуют о том, что по формам проявления тектонических и вулканических процессов она среди всех планет земной группы тяготеет преимущественно к Земле. Однако важнейшей особенностью Венеры, роднящей ее с Луной, Меркурием и Марсом, является сохранность на ее поверхности таких древних образований, какие практически полностью уничтожены на Земле. Таким образом, Венера является промежуточным звеном между активной поныне Землей и другими планетами, где эндогенная активность в основном завершилась на догеологической или ранней геологической стадии. Отсутствие или крайне низкая интенсивность крупномасштабной эрозии и осадконакопления и соответственно сохранение прямого тектонического и вулканического рельефа делают Венеру чрезвычайно полезным (хотя пока и очень слабо изученным) полигоном для сравнения с Землей на ранних стадиях ее развития.

#### Литература

- 1. Базилевский А. Т., Иванов Б. А., Крючков В. П. и др. Ударные кратеры Венеры по данным радиолокационных изображений КА «Венера-15» и «Венера-16». — Докл. АН СССР, 1985, т. 282, № 3, с. 671–674.
- 2. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О. и др. Основные типы структур северного полушария Венеры. Астрон. вестн., 1985, № 1, с. 3–14.
- 3. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О. и др. Геология Венеры по результатам анализа радиолокационных изображений, полученных АМС «Венера-15» и «Венера-16» (предварительные данные). Геохимия, 1984, № 12, с. 1811–1820.
- 4. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Пронин А. А. и др. Первые результаты геолого-морфологического анализа радиолокационных изображений поверхности Венеры, полученных АМС «Венера-15» и «Венера-16». Докл. АН СССР, 1984, т. 279, № 4, с. 946–950.
- 5. Барсуков В. Л., Сурков Ю. А., Москалева Л. П. и др. Геохимические исследования поверхности Венеры АМС «Венера-13» и «Венера-14». Геохимия, 1982, № 7, с. 899–919.
- 6. Гинтов О.Б. Структуры континентальной земной коры на ранних этапах ее развития. Киев: Наук. думка, 1978. 164 с.
- 7. Глуховский М. З., Павловский Е. В. К проблеме ранних стадий развития Земли. Геотектоника, 1973, № 2, с. 3–7.

- 8. Котельников В.А., Аким Э.Л., Александров Ю.Н. и др. Исследование области гор Максвелла планеты Венера космическими аппаратами «Венера-15» и «Венера-16». — Письма в Астрон. журн., 1984, т. 10, № 12, с. 883-889.
- 9. Салоп Л. И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982. 343 с.
- Сурков Ю. А., Кирнозов Ф. Ф., Глазов В. И. и др. Содержание естественных радиоактивных элементов в венерианских породах по данным АМС «Венера-9» и «Венера-10». Космич. исслед., 1976, т. XIV, вып. 5, с. 704–709.
- 11. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Пронин А. А., Бурба Г. А. Результаты геолого-морфологического анализа панорам. Первые панорамы поверхности Венеры. Под. ред. Келдыша М. В. М.: Наука, 1979. 132 с.
- 12. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бурба Г.А. и др. Очерки сравнительной планетологии. М.: Наука, 1981. 326 с.
- 13. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Крючков В.П. и др. Геолого-морфологический анализ панорам «Венеры-13» и «Венеры-14». — Космич. исслед., 1983, т. XXI, вып. 3, с. 340–350.
- 14. Флоренский К. П., Николаева О. В. О летучих компонентах и материковом веществе планет. Геохимия, 1984, № 9, с. 1251–1267.
- 15. Ananda M. P., Sjorgen W. L., Phillips R. J., Wimberly R. N., Bilks B. G. A low-order global gravity field of Venus and dynamical implications. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 8303-8318.
- 16. Campbell D. B., Head J. W., Harmon J. K., Hine A. A. Venus: Identification of Banded Terrain in the Mountains of Ishtar Terra. — Science, 1983, v. 221, № 4611, p. 644–647.
- 17. Campbell D. B., Head J. W., Harmon J. K, Hine A. A. Venus: volcanism and rift formation in Beta Regio. Science, 1984, v. 226, № 4671, p. 167–169.
- 18. *Esposito L. W.* Sulfur dioxide: episodic injection shows evidence for active Venus volcanism. Science, 1984, v. 223, № 4640, p. 1072–1075.
- Florensky C. P., Basilevsky A. T., Kryuchkov V. P. et al. «Venera-13» and «Venera-14»: sedimentary rocks on Venus. — Science, 1983, v. 221, № 4605, p. 57–59.
- 20. Malin M. C., Saunders R. S. Surface of Venus: evidence of diverse landforms from radar observations. Science, 1977, v. 196, № 4293, p. 987–990.
- 21. Masursky H., Eliason E., Ford P.G. et al. Pioneer-Venus radar results: geoliogy from images and altimetry. J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 8232–8260.
- 22. Match T.A., Arvidson R.E., Head J. W. III et al. The geology of Mars. Princeton University Press Princeton. New Jersey, 1976. 400 p.
- 23. Pettengill G. H., Eliason E., Ford P. G. et al. Pioneer Venus radar results: altimetry and surface properties. J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 8261–8270.

- 24. Sjorgen W.L., Phillips R.J., Birkeland P. W. Wimberly R.N. Gravity anomalies on Venus. – J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 8295–8302.
- 25. Smith B.A., Beebe R., Boyce J. et al. The Galilean Satellites and Jupiter: Voyager 2 imaging science results. — Science, 1979, v. 206, № 4421, p. 927-950.
- 26. US Geol Survey (1981) altimetric and shaded relief map of Venus. 1:50 000 000.

Институт геохимии и аналитической химии им Поступила в редакцию В.И. Вернадского АН СССР 10.XI.1985

Геологический институт АН СССР

Институт радиоэлектроники АН СССР

Особое конструкторское бюро Московского энергетического института

Центральный научно-исследовательский институт

геодезии, аэрофотосъемки и картографии

Институт прикладной математики АН СССР

Институт проблем передачи информации АН СССР

Университет им. Вейна, США

# THE GEOLOGY AND GEOMORPHOLOGY OF THE VENUS SURFACE AS REVEALED BY THE RADAR IMAGES OBTAINED BY VENERAS 15 AND 16

V. L. Barsukov, A. T. Basilevsky, N. N. Bobinna, V. P. Kryuchkov, R. O. Kuzmin,

O. V. Nikolaeva, A. A. Pronin, L. B. Ronca, I. M. Chernaya, V. P. Shashkina,

A. V. Garanin, E. R. Kushky, M. S. Markov, A. L. Sukhanov, V. A. Kotelnikov,

O. N. Rzhiga, G. M. Petrov, Yu. N. Alexandrov, A. I. Sidorenko, A. F. Bogomolov,

G. I. Skrypnik, M. Yu. Bergman, L. V. Kudrin, I. M. Bokshtein, P. A. Chochia, Yu. S. Tyuflin, S. A. Kadnichansky and E. L. Akim

Journal of geophysical research, Vol. 91, № B4, P. D378-D398, 1986

A region-by-region condensed description of almost all of the area that was radar-photographed by Veneras 15 and 16 is presented. Using some generalizations, the diversity of terrain was reduced to a discrete set from which a geological-morphological map was constructed. The predominant type of terrain of the studied area is a plain that was tentatively subdivided into five morphological types: ridge-and-band, patchy rolling plain, dome-and-butte plain, smooth plain, and high smooth plain. Stratigraphically, the ridge-and-band plains are the oldest and the smooth plains are the youngest. The stratigraphic position of the other types is yet to be determined. Large sections of the plains show similarities to the mare-type basaltic plains of the moon, Mercury, and Mars. Other types of terrain are combinations of ridges and grooves in various patterns: linear parallel, orthogonal, diagonal or chevron-like, and chaotic. In some places the ridge-and-groove terrain is stratigraphically below the plain material, but in other places it appears to be plain material that has been subsequently deformed. Near the eastern and western boundaries of Ishtar Terra large (several hundred kilometers in diameter) ring-like features can be seen that are named coronae or ovoids. Evidence of tectonic deformation and the presence of flow-like patterns support their designation as volcano-tectonic features. Beta Regio seems to be an uplifted plain showing evidence of rifting and volcanism. All types of terrain are sparesely peppered with craters of obvious impact morphology. Their average density gives the plain an age range of 0,5 to  $1 \times 10^9$  years. The fact that many impact craters are still in the pristine state indicates a very low rate of surface reworking, at least for the last 0.5 to  $1 \times 10^9$  years. No evidence for water-erosion-sedimentation processes has been found. The tectonic activity of Venus has no equivalent on the moon, Mercury, or even Mars, and can be

compared only with that of the Earth. Intensive horizontal deformation, previously known only on Earth, occurs on Venus, but in a characteristic Venusian style.

#### Introduction

From October 1983 to July 1984, Veneras 15 and 16 surveyed the planet Venus from an elliptical near-polar orbit with an altitude of about 1000 km at the pericenter and about 65 000 km at the epicenter (Figure 1). The inclination of the orbit was 92,5°, the period of revolution over the planet was 24 h, and the latitude of the pericenter was 62° N. The survey was made alternatively by Venera 15 and 16 using side-looking radar of 8 cm wavelength. The electrical axis of the radar was at an angle of  $10^{\circ}$ from the local vertical and was usually toward the right in relation to the movement of the spaceprobe along the orbit. Surveying started when the spaceprobe, moving northward from the south, arrived at latitude 80° N, and continued through the polar area down to 30-35° N on the opposite side of the planet (Figure 2). The area covered by the images is about  $115 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, or 25% of total Venus surface (Figure 2). Each period of observation produced an image covering a band of terrain 8000 km long and 120-160 km wide. The resolution of the images was 1-2 km if the reflected signal was computer-processed on Earth, and 3-4 km if the signal was processed only by the on-board computers and the images



Fig. 1. Venera 15 and 16 coverage of Venus



Fig. 2. Surface of Venus surveyed by Veneras 15 and 16.

were obtained in real time. The vertically-looking altimeter acquired data simultaneously with the side-looking radar with a precision of  $\pm 50$  m. The diameter of the altimeter spot on the surface was 40–50 km; the rather large size of the spot precludes the obtaining of reliable information on the surface relief features less than 40–50 km wide. Sophisticated processing of the data has given a spatial resolution as small as 5 km along the orbit. However, at the time of preparation of this work, this new information is available only for part of the Montes Maxwell arc.

This paper describes the geographic distribution and geomorphology of the terrains, and discusses some geological interpretations for the area from 265° E to 0° E to 205° E. This area is about  $90 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, or 20% of total Venus surface. Preliminary results for a smaller area have been given by *Barsukov et al.* [1984*a,b*]. Information for this paper was obtained in three different ways: (1) manually assembled photomosaics of 1–2 km resolution, covering almost all the areas of the survey; (2) computer-assembled mosaics of 3–4 km resolution for the north polar area and adjacent high latitude areas; and (3) computer-corrected mosaics of 1–2 km resolution for Montes Maxwell and the adjacent areas. The manually assembled photomosaics do not have a rigorous coordinate system, while the computer mosaics have a coordinate system and obey the appropriate cartographic projection. The altimetry data of Venera 15, 16, and Pioneer Venus Orbiter [*Pettengill et al.*, 1980; *Masursky et al.*, 1980; *U.S. Geological Survey*, 1981] were also used.

## General Description of Venus Orography

The large-scale orographic features (Figure 3) show a distinct circumpolar latitudinal zonality. The northern polar region is a plain with an elevation close to the average elevation of planet (distance from the planetary center of mass 6051,5 km). The northern plain is bordered on the south by the Ishtar Terra highlands with the highest mountains on Venus, Montes Maxwell, and by the highlands or Metis Regio and Tethus Regio. This highland band is bordered by the deepest land on Venus, the lowlands of Atalanta Planitia. Therefore, this Ishtar-Thethus-Atalanta belt is a zone with the largest known elevation contrast on the planet. To the south another circumpolar band is located, composed predominantly of plains of elevation close to the average elevation. These plains are Guinevere Planitia, Sedna Planitia, Leda Planitia, and Niobe Planitia. In addition to plains, this band also contains some highlands: Beta Regio, Bell Regio, Tellus Regio, and part of Ulfrun Regio. These highlands are separated from the highlands of the above-mentioned northern highland band by lowland plains. Farther south a near equatorial zone is found that is not covered by the Venera 15 and 16 survey. Here we see the highlands of Aphrodite Terra and Phoebe Regio. The highlands of Alpha Regio may possibly be included here also. Farther south another band composed mainly of plains of average elevation is found. It includes Helen Planitia, Lavinia Planitia, Aino Planitia, among which we see the relatively low highlands of Themis Regio, Tefnut Mons, Hathor Mons, Indar Regio. Farther south is the relatively low Lada Terra, intruding into the high southern latitudes not covered by any radar surveying.

#### Synoptical Descriptions of the Surveyed Areas



Fig. 3. Circumpolar sublatitudinal zonality of the large-scale orographic features

**Northern Polar Region.** This region, inaccessible to Earth-based radar studies and not covered by Pioneer Venus, is composed mainly of a plain with an elevation close to the average elevation of the planet. The surface of the plain is in many places complicated by subparallel linear ridges organized either in belts or in approximately equidimensional areas, by furrows, by clusters of small dome-like hills, and by craters (Figure 4).



Fig. 4. North polar area. Concentric circles are latitudes  $2^{\circ}$  apart. Notice the plains, the ridges in belts and wide areas, and the furrows and craters

The ridge belts are several hundreds of kilometers long and tens of kilometers wide (Figure 5). In a few places the width is as much as 100-150 km. The belts are composed of systems of subparallel, conforming ridges up to 100-200 km in length and up to 10-15 km in width. The ridges are separated by grooves of the same size. The longest and most prominent belt extends from Ataianta Planitia to the polar region, following meridian  $200^{\circ}$  E. In the vicinity of the north pole the belt turns and goes south along meridian  $80^{\circ}$  E, where it abuts the Ishtar Terra highlands. The ridges of these belts resemble in morphology and pattern the wrinkle-ridges on the mare surfaces of the moon, Mercury, and Mars

[see for example Mutch, 1970; Strom et al., 1975; Mutch et al., 1976]. In some places this pattern resembles the belts of furrowed terrain on Ganymede [see for example Shoemaker et al., 1982].



Fig. 5. First image obtained by Venera 15. Area covered is 150 km w 620 km. Notice the ridge belts and the plain and ridged furrows

Ridges that are organized upon wide areas rather than belts are especially characteristic of the area south of 85° N within the longitude range 80–120° E (Figure 6). Each ridge has a width of several kilometers and a length of several tens of kilometers to 100-200 km. The ridges are sufficiently distant from one another so that it is possible to see that the surface separating them is identical to the normal smooth surface of the plain. In many places the ridges longitudinally merge into bright narrow lines lacking the usual topographic illumination-shadow alternation. Because they are the obvious continuation of topographic structures, these narrow lines are likely to be caused by topographic ridges smaller than the resolution of the picture rather than by changes in radar albedo.



N, 120° E, area 360 km w 360 km. ter at 77° N, 103° E, area 360 km Ridges cover a plain

Fig. 6. Wide-area ridges. Center at 77° Fig. 7. One of the largest craters. Cenw 360 km. Notice the crater is multiringed

Furrows on the polar plain are generally straight, and are slightly sinuous in a few places. In some places they have sharp edges, in other places they are subdued. The length of the furrows can be as much as 100 km with the width up to 10-20 km. Some of these furrows are similar to the furrows on the maria of the moon and on the mare-like plains of Mercury and Mars, but some differ in having raised rims (Figure 5).

The dome-like hills have circular to elliptical planimetric outlines. They have a diameter from the resolution limit of the images (1-2 km) up to 10-15 km. In some cases a summit crater can be seen. The dome-like hills are widely distributed and some form clusters. In morphology they are similar to volcanic domes or cinder cones of Mars and Earth.

Craters not spatially associated with the domes are very similar in morphology to impact craters of other planetary bodies [see also *Ivanov et al.*, 1986]. Most are flat-bottomed with central peaks and prominent surrounding rims. Most of the smaller ones are bowl-shaped. The largest crater of the region and one of the largest anywhere on Venus is situated near Tethus Regio and has a diameter of 140 km. It is very similar in morphology to the two- and three-ring impact basins of the moon, Mercury, and Mars (Figure 7). The morphology of the craters ranges from prominently fresh to highly subdued and deformed. On the whole, the plain of the Northern polar region is similar to the lunar maria and mare-type plains of Mercury and Mars.

The western part of Ishtar Terra is Lakshmi Planum Ishtar Terra. and its mountainous surroundings (Figure 8). Lakshmi Planum is a plateau with an elevation of 6053,5-6055,5 km, which is 3-5 km higher than adjacent Sedna Planitia. Most of the plateau surface is very smooth. Only in a few places can one see areas slightly elevated above the plateau and with the surface cut by systems of grooves with orthogonal or diagonal pattern with a groove-to-groove wavelength of generally no more than 10 km. On the Lakshmi Planum there are two elliptical flat-bottomed depressions: Colette ( $80 \times 120$  km) and Sacajawea ( $140 \times 280$  km). The first is morphologically more prominent than the second. Colette lacks the prominent and rather narrow rim typical of impact craters. According to the contour lines it is located on the summit of a very gently sloping dome. Colette is bordered by a ring-like system of grooves and narrow ridges resembling some Martian calderas, such as the summit caldera of Arsia Mons [Mutch et al., 1976]. Around Colette one can see a radial system of slightly sinuous radar-bright bands up to 100-300 km in length and 10-20 km in width. Colette is most likely a volcanic caldera having a radial system of lava flows. Sacajawea is probably an older volcanic caldera. On the whole, the smooth surface of Lakshmi Planum seems to have been formed by effusions of low-viscosity lavas and the orthogonal and diagonally grooved areas appear to be remnants of technically disturbed older terrain. On the surface of Lakshmi Planum several craters 4-20 km



in diameter are observed; in morphology they are similar to the impact craters of other planetary bodies.

Lakshmi Planum is nearly surrounded by zones of subparallel linear ridges and grooves conforming with the borders of Lakshmi: Akna Mountains to the west, Freyja Mountains to the north (Figure 9), Maxwell Mountains to the east (Figure 10), and a narrow belt of ridges between the plateau surface Pand Vesta Rupes (Figure 11) to the south. The Akna, Freyja, and Maxwell Mountains are the highest on Venus - 8, 9, and 12 km, respectively - over the 6051 km datum. Near the plateau, the surrounding ridges are linear or slightly sinuous and have a length up to 300–500 km and a width up to 15–30 km. The total length of each system is 800–1200 km. In a stereoscopic view these ridge-and-groove systems resemble stacks of inclined plates. They could be either imbricated reverse faults or folds, in either case the product of compression [*Basilevsky et al.*, 1986].



Fig. 9. The northern boundary of Lakshmi Planum and Freyja Montes. Center at 72° N, 320° E, area 880 w 1140 km. Notice the ridge-and-groove pattern bordering the plains

On the border between the plateau and the Maxwell, Akna, and Freyja Mountains a transitional zone is evident, with slight to moderate ridges on the plateau side to prominent ridges on the mountain side. This may indicate that the ridges formed at the expense of the plain-forming material. The opposite is indicated in some places as in the contact zone between Akna and Freyja Montes, for example, where it is possible to see



Fig. 10. Maxwell Montes and Cleopatra Patera. Center at 65° N, 77° E, area 1000 w 1150 km. Notice the ridge-and-groove pattern and the crater

plain-forming material flooding the end of the ridge system and embaying it (Figure 9).

Away from the plateau, the ridge-and-groove system of Akna, Freyja, and Maxwell Montes is cut by another set of grooves and by lineations caused by slight displacements of the major set of ridges and grooves. This change correlates with a decrease in elevation from 6057,5–6062 to 6053,5–6050,5 km.

In the Maxwell Montes between the zone of subparallel ridges and grooves and the ridge-and-groove system cut by other lineations, we find the Patera Cleopatra depression (Figure 12). It is a double-ring basin with an outer ring about 100 km in diameter and an inner ring (displaced NNW of the center) about 50 km in diameter. The depth of the outer ring floor is 1-1,5 km. The bottom of the inner crater is 1-1,3 km deeper. The inner ring is very prominent in the SE part of the crater and subdued in the NW part. The outer rim of the crater is only slightly higher than the surrounding terrain. North and east of the crater the ridges of Maxwell Mountains are partly buried by some plain-forming material. Patera Cleopatra is evidently superimposed upon the Maxwell Montes structure.



Fig. 11. Southern border of Lakshmi Planum and Vesta Rupes. Center at 60° N, 337° E, area 820 w 1140 km. Notice the boundaries between the Planum and the complicated ridge-and-groove pattern of the Rupes



Fig. 12. Patera Cleopatra. Center at  $65^{\circ}$  N,  $78^{\circ}$  E. Area 660 w 740 km. Notice the inner rim, the smoothed zone around the crater and the ridge-and-groove pattern

The origin of Patera Cleopatra is subject to debate. An endogenic origin is suggested by an overall curving of the ridges and grooves around the locus of the crater, which indicates a possible relationship between the two. If this is the case, the plain-forming material near the crater could be lavas or pyroclastics. On the other hand, an impact origin is suggested by the general morphology of the crater, which is typical of double-ring impact basins and is not typical of the known volcanic structures of Mars, Earth, or Io. If Patera Cleopatra is an impact crater, then the plain-forming material is the ejecta blanket [see for example *Mutch et al.*, 1976; *Green and Short*, 1971; *Schaber*, 1982].

Several other craters are superimposed on the mountains bordering Lakshmi Planum. They have typical impact-crater morphology, i.e., they are flat-bottomed with a central peak. A radar-bright halo, probably the ejecta, is present around the freshest-looking craters.

South of Lakshmi Planum a system of linear ridges parallel to the plateau borders changes abruptly in to a highly dissected terrain dominated by short (several tens of kilometers) intersecting ridges and grooves and forming diagonal and chaotic patterns (see Figure 11). This terrain occurs between the Vesta Rupes and Ut Rupes. To the south this terrain becomes the Sedna Planitia. In a few places one can observe the plain-forming material superimposed on the terrain with the diagonal and chaotic structural patterns.

East of Maxwell Mountains within the longitude range of  $25^{\circ}$  to  $80^{\circ}$ E in the northern part of Ishtar Terra, the terrain is characterized by intersecting ridges and grooves with diagonal or chevron-like patterns and sometimes with ring-like or loop-like patterns (Figure 13). This terrain forms an E-W oriented band approximately  $800 \times 2500$  km. The terrain immediately east of Patera Cleopatra merges into the zone of diagonal patterns of ridges and grooves rather gradually, although within a narrow (100–200 km) area. Within this transition the elevation of the terrain decreases from 6060,5–6061,5 to 6054,5–6055,5 km. Long undisturbed ridges or grooves are rare here. Ridges and grooves of NE orientation are combined with ridges and grooves of NW orientation. In some cases the NE lineations off-set the NW lineations and in other cases the situation is reversed. Such a variable character of intersections is characteristic of conjugated faults [*Basilevsky et al.*, 1986].

As the northern boundary of this terrain of diagonal systems of ridges and grooves is approached, one set gradually becomes predominant. It has a NW orientation and is roughly parallel to the boundary. At the boundary proper, embayments of the plain-forming material are visible.

Approaching the southern boundary of this are within the longitude range  $50-75^{\circ}$  E the ridge-and-groove system becomes finer until the ridge-and-groove terrain merges into a plain (Figure 14). The origin of this relationship is being debated. It could mean that the ridge-and-groove terrain is derived from a more ancient plain. On the other hand, the ridge-and-groove pattern may have become finer at the boundary with



Fig. 13. Diagonal ridge-and-groove pattern east of Maxwell Montes. Center at  $70^{\circ}$  N,  $45^{\circ}$  E, area 1100 w 1180 km. Notice the chevron-like pattern

the plain as a result of thermal shrinkage of the plain-forming material overlying the ridge-and-groove terrain. The plain itself displays a system of linear ridges and fine radar-bright lines that make it similar to the northern polar plain. Indistinct circular features that are several tens of kilometers in diameter can also be seen.

Returning to the terrain of diagonal ridges and grooves, along the southern boundary within the longitudinal range  $30^{\circ}$  to  $40^{\circ}$  E, an east-west oriented bulge of the terrain with an altitude level 6055-6056 km occurs. The surface here is complicated by numerous ridges and wrinkles, often with a predominance of diagonal structural patterns. A few patches of plain with a system of parallel and intersecting ridges and radar bright bands are also associated with this terrain.

Farther to the south and southwest at an elevation of 6052–6054 km a terrain with characteristic orthogonal structural pattern occurs (Figure 15). Long valleys extend as much as several hundreds of kilometers and have remarkably constant widths of several to 30 km each. The valleys



Fig. 14. Transition between diagonal ridge-and-groove pattern and the plain. Center at 67° N, 46° E, area 640 w 720 km. On the eastern part of the transition, notice how the ridge-and-groove system becomes finer

divide the region into several zones. In each of these zones the surface is cut by smaller grooves generally orthogonal to the valleys. In some places these grooves have the shape of an elongated «S», suggesting lateral displacement along the valleys (Figure 16). Several elliptical crater-like flat-bottomed depressions, closed at the north, west, and south sides but open to the east, follow the overall trend of the valleys. Most of the orthogonal grooves are open and suggest tectonic expansion (perhaps differential), causing lateral displacements or shears in latitudinal direction.



Fig. 15. Orthogonal ridge-and-groove pattern. Center at  $52^{\circ}$  N,  $55^{\circ}$  E, area 480 w 600 km. Notice the long valleys and the orthogonal grooves

On the southeast boundary of this terrain the features become finer and perhaps change from open fractures to reverse faults. If this is true, a change from extension to compression may have occurred. On the



Fig. 16. Ridge-and-groove pattern. Center at 53° N, 42° E, area 850 w 520 km. Notice in the upper right corner, elongated S-shaped grooves suggest horizontal displacements. Also notice the flat-bottomed depressions



Fig. 17. Orthogonal ridge-and-groove pattern of uplands of Tethus Regio. Center at  $68^\circ$  N,  $115^\circ$  E, area 960 w 1400 km. Notice how the long valleys divide the land into bands



Fig. 18. Corona or ovoid. Center at 61° N, 131° E, area 800 w 1340 km. Notice the ring-like structure and the flow-like patterns on the outside



Fig. 19. Postulated shield volcano in Tethus Regio. Center at 63° N, 120° E, area
560 w 740 km. Interpretation of this feature needs the elevation data given in text. Notice the two crater-like depressions and the flow-like bands

southern boundary the overall regularity is lost, the grooves become sinuous, and the pattern becomes diagonal-chaotic (Figure 16).

**Tethus Regio.** East of Ishtar Terra we find Tethus Regio, an area predominantly composed of a plain, with several isolated uplands (elevation of 6052,5-6054,0 km over the planetary mass center, 0,5-1,0 km above the plain), distributed sublatitudinally. The terrain of these uplands is similar to that of the southern part of Ishtar Terra; i.e., an orthogonal pattern of valleys and grooves (Figure 17). The long valleys divide the area into bands having an east-west or northwest-southeast elongation, cut by the orthogonal grooves.

The plain is in many places covered with dome-like hills, often grouped in clusters. Several large (300–500 km in diameter) ring-like structures are visible (Figure 18). These structures are outlined by concentric



Fig. 20. Portion of Atalanta Planitia. Center at 50° N, 200° E. 1600 km from top to bottom. Notice the ridge belt

systems of ridges having roughly an elliptical form. We have named these features ovoids or coronae. The concentric systems of ridges are higher than the surrounding terrain, while the intraring part of each corona is lower than the ridge system but higher than the adjacent plain. Around the outer limit of the coronae a system of radar-bright flow-like marks is visible; they are possibly flows of volcanic lavas.

At the southern part of Tethus Regio a gently sloping mountain is located with a diameter of about 150 km and with the summit about 1-1,5 km higher than the adjacent plain (Figure 19). At the summit two roughly circular crater-like depressions are. visible. On the slopes a subradial system of radar-bright flow-like bands occurs. This mountain is likely to be a large shield volcano. Within the Tethus Regio several craters having typical impact morphology are also present.

Atalanta Planitia. East of Tethus Regio is Atalanta Planitia, the deepest regional depression on Venus. Elevation at the central part of Atalanta is 6049–6050 km, 6050–6051 km at the periphery. The largest part of Atalanta Planitia is a relatively smooth plain with an even distribution of radar-bright areas (Figures 20–22). It is crossed by ridge belts similar to the ridge belts of the northern polar plain, and together they form a single system. In the western part of Atalanta, adjacent to Tethus Regio, the surface is different. The plain here is complicated by a network of narrow ridges, radar-bright bands, and clusters of dome-like



Fig. 21. Part of Atalanta Planitia. Center at 55° N, 195° E, area 800 w 880 km. Notice the ridge-and-groove pattern and the plain



Fig. 22. Part of Atalanta Planitia. Center at 40° N, 152° E, area 1120 w 1660 km. Notice the ridge belts. The alternating light and dark patterns on each swath of the mosaic are an artifact

hills (Figure 23). Within the Atalanta Planitia, especially in its western part, there are several craters similar in morphology to impact craters on other planetary bodies.

**Mnemosyne Regio.** West of Ishtar Terra is Mnemosyne Regio, an area characterized by several large (200–500 km in diameter) ring-like structures — ovoids (coronae) — already described above for Tethus Regio (Figures 24, 25). They are quite varied in, morphology. As in Tethus Regio, their common characteristic is the presence at their periphery of roughly concentric systems of ridges. Also as in Tethus Regio radar-bright flow-like features are associated with the coronae. They are usually located outside the structure but sometimes they overlap them. Areas outside the coronae consist of plains with elevations 6051–6052,5 km. In some places these areas are variegated because of the mentioned flow-like features, while in other places they are uniform. In places, the plains are disturbed



Fig. 23. Western part of Atalanta Planitia. Center at 60° N, 157° E, area 960 w 1360 km. Notice the network of narrow ridges, radar-bright bands, and clusters of dome-like hills, and the crater

by systems of narrow ridges and radar-bright bands, and dome-like hills similar to those described for the northern polar area and Tethus Regio.

Guinevere Planitia. This region is located between Mnemosyne Regio and Beta Regio and has an elevation of 6050-6051 km. Only the northern part is within the area mapped by Veneras 15 and 16. This plain is mainly characterized by a smooth surface complicated in some places by narrow ridges, clusters of small domes, and craters having typical impact morphology. Here two large elliptical structures ( $250 \times 300$  km and  $400 \times$  $\times$  600 km) are visible (Figures 26 and 27). They probably are coronae considerably overlapped by plain-forming material. At the northwestern part of the Guinevere Planitia there is a circular flat-summit upland,  $80 \times 100$  km in size, around which a ring-like zone with a radial system of radar-bright flow-like features is located (Figure 28). This formation may be a volcanic construction. At the southern part of the mapped zone of Guinevere Planitia is a patch of terrain with a chaotic system of ridges and grooves resembling the terrain located southwest of the zone of orthogonal ridges and grooves at the southern part of Ishtar Terra.

**Beta Regio.** In the southern portion of the area of Guinevere Planitia surveyed by Veneras 15 and 16 a part of Beta Regio upland is visible (Figure 29). The transition from Guinevere Planitia to Beta Regio is



Fig. 24. Coronae in Mnemosyne Regio. Center at  $70^{\circ}$  N,  $273^{\circ}$  E, area 1400 w 1480 km. Notice the large ring-like structures and smaller vague circular features



Fig. 25. Detail of Figure 24. Center at  $75^\circ$  N,  $272^\circ$  E, area 780 w 780 km



Fig. 26. Elliptical structure in Guinevere Planitia. Center at  $43^\circ$  N,  $270^\circ$  E, area  $500 \le 700$  km



Fig. 27. Elliptical structure in Guinevere Planitia. Center at  $54^\circ$  N,  $297^\circ$  E, area  $960 \le 1080 \ \rm km$


Fig. 28. Circular feature in Guinevere Planitia. Center at  $52^\circ$  N,  $264^\circ$  E, area 400 w 800 km. Notice the radar-bright radial patterns

gradual. Within the longitude range 270–300° E and latitude range 34–38° N we see an increase in elevation and the appearance of submeridional, linear, sometimes arcuate scarps up to hundreds of kilometers in length and 5–10 km in width. The scarps join each other in places, forming graben-like depressions. The southern part of Beta Regio, outside the area surveyed by Veneras 15 and 16, has been studied by *Saunders and Malin* [1977], *Campbell et al.* [1984], and others, and has been interpreted to be a submeridional summit rift zone with associated volcanic manifestations. The above-mentioned system of scarps appears to be the continuation of the postulated rift zone.

In the northeast boundary of Beta Regio we see domes, short ridges, and indistinct ring-like features (Figure 30). Venera 9 landed in this area and determined the basaltic composition of the surface material by gamma-spectroscopy [*Surkov et al.*, 1977].



Fig. 29. Part of Beta Regio. Center at 38° N, 280° E, area 760 w 1140 km. Notice the scarps, graben-like depressions, and vague circular features



Fig. 30. Domes, short ridges, and unclear ring-like features at the NE boundary of Beta Regio  $% \left( {{{\rm{B}}_{\rm{B}}} \right)$ 

**Sedna Planitia.** This plain is similar in morphology and elevation to Guinevere Planitia. A smooth plain predominates, in some places complicated by ridges, domes, and impact craters, and in a few places patches of the terrain have the ridge-and-groove pattern resembling that of the southern part of Ishtar Terra (Figure 31). In the northern part of Sedna Planitia near the border, with Lakshmi Planum to the south, numerous and sometimes large radar-bright and radar-dark streaks and patches are visible (Figure 32). These streaks and patches are associated with long prominent lineaments of northeast orientation located approximately 1200 km south of the eastern part of Lakshmi Planum, suggesting that these features are lava flows. In the southwestern part of Sedna Planitia a system of narrow subparallel (and at some places intersecting) ridges are visible that resemble the wrinkle-ridges of the lunar maria.



Fig. 31. Patches of ridge-and-groove terrain in Sedna Platinia. Center at  $43^\circ$  N,  $357^\circ$  E, area 640 w 820 km

The Area Between Sedna Planitia and Bell Regio. A characteristic plain can be seen here, with an elevation of 6050,5-6051,0 km. Especially in the eastern portion, the plain is complicated by numerous ring-like features with diameters of 50-120 km (Figure 33). The features are outlined by ridges or radar-albedo bands. In places the ridges are big (100-200 km in length, 10-20 km in width) and form the radial and concentric patterns of the ring-like features. In a few places the ridges are gathered in braids and belts that merge with the radial and concentric



Fig. 32. Flow-like patterns on Sedna Platinia. Center at  $52^\circ$  N,  $355^\circ$  E, area 760 w 980 km



Fig. 33. «Spiders-and-cobwebs» in the area between Sedna Platinia and Bell Regio. Center at 43° N, 19° E, area 1400 w 1060 km. These puzzling features have been informally called arachnoids ridges. A few clusters of dome-like hills can be seen. The combination of these patterns forms a strange «spiders and cobwebs» appearance informally called «arachnoids» (Figure 33). In the southern part of this zone there are irregularly shaped radar-bright patches 20-50 km in size. In the northwestern part the plain is cut by a northeast-directed belt ( $250 \times 1000$  km) of intersecting furrows up to 100 km long and 10-15 km wide (Figure 34).



Fig. 34. Part of the area between Sedna Platinia and Bell Regio. Center at  $49^{\circ}$  N,  $22^{\circ}$  E, area 940 w 980 km. Notice the furrow belt in the upper right and ridge belt diagonally across the center. Also several vague circular features are apparent

**Bell Regio.** This is an upland area (6054 km elevation), most of which is a plain. Radar-bright irregular patches and flow-like patterns can be seen (Figure 35). A mountain with gentle slopes is located in the central part of Bell Regio and a flatbottomed crater, 40 km in diameter, is visible at the summit. A radar-bright zone extends westward from the crater, about 300 km in length and 80 km in width. As the winds presently blow westward, it could be a pyroclastic train.

**Leda Planitia.** The plain of Leda Planitia (6050,5–6051 km elevation) has a variegated appearance because of the presence of diffuse radar-bright and radar-dark spots combined with a network of narrow radar-bright ridges (Figure 36). At the transitional zone between Bell Regio and Leda Planitia two large craters are superimposed on the plain (Figure 37). One of them is a double-ring basin with a diameter near 100 km. The other, 50 km in diameter, has a central peak and a prominent radar-bright apron with clear bilaterial symmetry. Both are probably impact craters.



Fig. 35. Part of Bell Regio. Center at 31° N, 43° E, area 680 w 680 km. Regional elevation increases toward the right. The crater on the right edge is at the summit. Notice the train-like radar-bright zone west of the crater



Fig. 36. Part of Leda Planitia. Center at  $43^\circ$  N,  $59^\circ$  E, area 920 w 920 km. Notice the variegated appearance



Fig. 37. Transitional zone between Bell Regio and Leda Planitia. Center at  $32^{\circ}$  N,  $57^{\circ}$  E, area 860 w 880 km. Notice two circular craters

**Tellus Regio.** The upland of Tellus Regio is located southeast of Leda Planitia (Figures 38, 39). Elevations here reach 6054 km. The area is characterized by diagonal and chevron-like systems of short ridges and grooves that gently and sometimes sharply change orientation. In the southern part, several wide (20–30 km) and long (hundreds of km) trough-like arcuate valleys occur, forming in total a complex, doubly-elliptical pattern. In association with these valleys there are several irregular flat-bottomed depressions 80 to  $120 \times 100$  to 150 km in size. The depressions and valleys are conformable with the ridge-and-groove system, so that the grooves form a «moat» around the ridges that define the valleys and depressions.

A plain is present in the northern part of the Tellus Regio, surrounding an upland area  $300 \times 400$  km in size. The morphology of the upland area is similar to the previous ridge-and-groove type, but seems to be more sinuous.

**Niobe Planitia.** Niobe Planitia, with an elevation of 6050,0–6051,5 km, is located east of Tellus Regio and south of Tethus Regio (Figure 40). The plain displays numerous dome-like hills that are more abundant than in other plains. Patches of ridge belts and chaotic ridge-and-groove upland terrains are also visible.



Fig. 38. Tellus Regio. Center at 35° N, 78° E, area 1000 w 1600 km. Notice the complicated ridge-and-groove patterns and depressions

### Discussion

The described diversity of terrains can be reduced with some generalization to the limited set of terrain types used for the construction of the included geological-morphological map (Figure 41). The plains can be subdivided into five morphological types.

Ridge-and-band plains are plains that are complicated by areal systems of numerous narrow ridges and radar-bright bands. Ridge belts and impact craters are common. Elevation of ridge-and-band plains is usually lower than 6050,5 km. Plains belonging to this type are characteristic of the northern polar region, the central part of Atalanta Planitia, and some parts of Mnemosyne Regio.

Band-and-ring plains are plains that are complicated by systems of ring features and linear ridges and narrow bands, often combining into «spider-and-cobweb» patterns. Elevations are generally between 6050,5–6051 km.



Fig. 39. Detail of Figure 38. Center at 33 $^{\circ}$  N, 78 $^{\circ}$  E, area 840 w 550 km. Notice the flat-bottomed depression and, on center left, the «moat» effect described in the text

Plains belonging to this type are present northwest and northeast of Bell Regio.

Patchy rolling plains are characterized by varying radio-albedo and gently rolling topography. Some of the patches have the shape of lava flows. Elevations are between 6051–6051,5 km. Plains of this type occupy most of Bell Regio, the land that borders to the north with the Ishtar Terra, and some intermountain depressions of Ishtar Terra. Large shield-like volcanos are locally present within this terrain, e.g., the volcano with the «train» feature at Bell Regio, and the volcano in Tethus Regio.

Dome-and-butte plains are complicated by buttes of the ridge-andgroove type (see below), fragments of ridge belts, and numerous domes. Summit craters are visible on some domes. Elevation of the dome-and-



Fig. 40. Niobe Planitia. Center at 43° N, 127° E, area 920 w 1360 km. Notice the dome-like hills and the patches of ridge-and-groove terrain

butte plains is usually 6051,5–6052 km. Plains belonging to this type are present within the Niobe Planitia, Guinevere Planitia, and Sedna Planitia.

Smooth plains are smooth topographically, some featureless and some with prominent radar-bright features resembling lava flows in shape. Smooth plains are widely distributed, occupying large areas within Guinevere Planitia, Sedna Planitia, and Atalanta Planitia at an elevation of 6050,5–6051 km. Morphologically similar to the described smooth plain is the high plain of the Lakshmi Planum, which is at an elevation of 6053,5–6055,5 km and is referred to as high smooth plain, a subtype of smooth plains.

The plains are similar in general morphology, including the presence of furrow-like features, to the mare-type basaltic plains on the moon, Mercury, and Mars. Soviet landers Venera 9, 10, 13, and 14 descended to the surface of Venusian plains and determined that the surface material was of basaltic composition [*Surkov et al.*, 1977; *Barsukov et al.*, 1984]. It seems reasonable to conclude that the essential topography of the plains is a result of flooding with basaltic lava. Contributions from weathering, erosion, and sedimentation are either insignificant or are limited to minor features (see below).



Fig. 41. Geographical distribution of the terrain described in the text

The law of superposition gives the following age relationships: The most ancient plains are the ridge-and-band plains (consistent with their relatively high density of impact craters), and the youngest are the smooth and the high smooth plains. The others are intermediate and their relative positions are yet to be determined.

Other terrains are in obvious contrast with the plains. ,In; general they are combinations of ridges and grooves in various patterns: linearparallel as found in Akna, Freyja, and Maxwell; orthogonal as found in Ishtar Terra adjacent to Leda Planitia and in Tethus Regio; diagonal or chevron-like as found in Ishtar Terra, in the land 1000–3000 km east of Maxwell, and in some areas of Tellus Regio; and chaotic as found in isolated areas centered at  $50^{\circ}$  N,  $130^{\circ}$  E and  $50^{\circ}$  N,  $80^{\circ}$  E. Transitions between these types also occur. For more details about these terrains the reader is referred to a companion paper [*Basilevsky et al.*, 1986]. Where the terrain is cut by two or more sets of ridges and grooves it has been informally called «parquet», and is named for its obvious appearance. This type of terrain is the result of deformation, and evidence of both compression and extension can be found. Also, the parquet appears to be the result of several periods of deformation.

The relative age relationships between these terrains is not fully known. The linear-parallel systems of Akna, Freyja, and Maxwell are locally even younger than the plain-forming material of the Lakshmi Plateau. The parquet is embayed in many places by various types of plain-forming material. The ridge-and-band plain material has a direct stratigraphic relationship with the parquet only at the NE termination of Ishtar Terra where the plains seem to be older than the parquet.

As more fully described in the companion paper [Basilevsky et al., 1986], belts of ridges and grooves are widespread. They are older than the youngest plain-forming material, as stratigraphic overlapping can often be seen. They are also younger than the oldest plain-forming material, as in many cases it is possible to see that the belts are the result of deformation of such material.

The coronae or ovoids are located mainly near the eastern and western boundaries of Ishtar Terra. They are the result of deformation, but since they are also associated with volcanism, they are likely to be the result of some volcano-tectonic process.

The terrain of Beta Regio seems to be distinct. It does not seem to be a shield volcano [*Saunders and Malin*, 1977; *Masursky et al.*, 1980]. Uplifting of plain-type terrain in combination with rifting and volcanism may be factors in its formation [*McGill et al.*, 1981; *Campbell et al.*, 1984].

A second companion paper [*Ivanov et al.*, 1986] discusses the problem of impacts of Venus. The following considerations will suffice here. All types of terrain are sparsely peppered with craters of clear impact morphology (139 discovered). The clear impact craters range in size from 8 km (although a few possible ones are as small as 4 km) to 140 km. The smaller ones are sometimes bowl-shaped, and the larger ones have a double-ring morphology. Most of the craters have a central peark and a distinct rim. A sequence of crater type exists, from morphologically sharp with a radar-bright halo to more subdued forms. A plot of the crater density versus crater diameter shows a considerable deficiency of smaller craters with respect to a lunar distribution. A comparison with Hartmann's graph [*Hartmann*, 1983] of planetary ages versus crater density gives an age range of 0,5 to  $1,0 \times 10^9$  years.

An additional 500 circular features of unclear origin have been counted on the plains alone. Figure 42 shows the distribution of these features on part of the surveyed area. Some examples of these features can be seen on Figures 24, 29, 30, and 34. These features range in size from 10 km to 600 km. The analysis of these features is in progress. Their size distribution is different from that of the craters of clear impact origin but can be made consistent by making allowance for the probable more common obliteration of smaller craters than larger craters. If they are impact craters, then their plotting on Hartmann's graph [1983] results in an age of 4,0 to  $4,5 \times 10^9$  years. A possible interpretation of these results is that the plains of Venus have an average age of 0,5 to  $1,0 \times 10^9$  years. However, previous structures have not been completely obliterated and still show through.



Fig. 42. Geographical distribution of the circular features (excluding impact craters) described in the text

A few considerations about atmospheric effects must be included. The images give two pieces of evidence — one direct, the other indirect — of weathering/erosion-deposition. As mentioned before, the craters that show an obvious impact morphology also show a range of morphologic age. Volcanism can cause some filling, but chemical and aeolian processes must be the cause of the smoothing of the rims and the disappearance of

the radar-bright haloes. In general, however, the kilometer-scale effects of aeolian processes in the last one-half to one billion years are very small. Data for centimenter-scale effects have been discussed from the panoramas obtained by the Venera landers [*Florensky et al.*, 1977*a,b*, 1983; *Basilevsky et al.*, 1986].

The second indirect evidence comes from radar-dark patches that are found in depressions or near many positive features (Figure 43). In both cases the location suggests a control by the wind. The size of these spots ranges from 10-20 km but some are as big as 200 km. Some boundaries are sharp, while others are gradual. Work is planned to determine the character of their locations.



Fig. 43. Example of the radar-dark pattern described in the text. Center at 73  $^\circ$  N,  $103^\circ$  E, area 520 w 520 km

### Conclusions

Radar images obtained by Veneras 15 and 16 give evidence for the geological structures and processes on Venus — the Earth-sized planet with a developed atmosphere but without a hydrosphere. The position of Venus in a sequence of terrestrial planetology bodies from the moon to the Earth is a question of great planetological significance.

The intensity of exogenic processes on Venus is much lower than on Earth and is rather close to the intensity characteristic of small planetary bodies such as the moon, Mercury, and Mars, On the Earth impact craters lose their morphology after several million years [*Masaitis et*] *al.*, 1980]; on Venus such craters preserve a prominent morphology for 0.5 to  $1.0 \times 10^9$  years. No evidence for water erosion or other processes involving liquid water was discovered on the images. Aeolian redistribution of matter seems to operate on the Venusian surface but its intensity has been very small for at least the last billion years. The intensity of exogenic activity in earlier periods is unknown. A reason for the low rate of exogenic reworking of the Venusian surface could be the stability of the Venusian environment; i. e., the absence of seasonal and daily changes of temperature and a stable wind regime.

The low rate of exogenic reworking means that many of the volcanic and tectonic features are still close to their pristine state, allowing a look at tectonics unavailable on Earth [see companion paper, *Basilevsky et al.*, 1986]. In general, the tectonic activity of Venus is different from that of the moon, Mercury, and even Mars, and can be compared only to that of Earth. Intensive horizontal tectonic deformations, previously known only on Earth, are also now seen on Venus. However, a basic difference between the Earth and the studied portion of Venus is the absence on the latter of trenches, large transform faults, and «mid-oceanic» ridges, features that are the basis for the theory of plate tectonics.

On Venus, more intensively than on Mars, basaltic volcanism has manifested itself in areal volcanism, large shield volcanos, and smaller volcanic domes. Basaltic volcanism is a universal mechanism of differentiation for the internal matter of the terrestrial planets [Florensky et al., 1981]. Moreover, the larger the body, the more prominent the role of basaltic volcanism. On Venus, the presence and composition of nonbasaltic rocks is still a matter of conjecture, but K, U, and Th abundances measured at the Venera 8 landing site [Vinogradov et al., 1973] suggest a possible nonbasaltic (syenitic) composition of the surface rock [Barsukov et al., 1981]. Unfortunately, the geology at that site is still unknown. A comparison of geochemical data from all five landing sites suggests that differentiation on Venus may be toward alkali enrichment rather than silica enrichment as on Earth. Metamorphic rocks are even more conjectural, but the tectonic stresses and the elevated temperatures offer the possibility of the existence of such rocks on Venus. However, the absolute predominance of  $CO_2$  over  $H_2O$  could suggest the presence of different suites of metamorphic facies.

On Venus, as on Earth, terrains typical of the ancient highlands of the moon, Mercury, and Mars have not been discovered. Either the Earth and Venus had such terrains that were later obliterated, or the environments on Earth and Venus were such that these terrains developed differently.

The properties of the circular features of unclear origin counted on Venus and previously described suggest that traces of the ancient terrains, whatever they were, may still exist on Venus. The unusual circular features referred to as coronae or ovoids could be the result of endogenic reworking of large impact basins, in accord with some ideas about the origin of some very old terrestrial structures [*Salisbury and Ronca*, 1966; *Ronca*, 1966; *Goodwin*, 1974; *Frey*, 1980; *Grieve*, 1980; *Florensky et al.*, 1981]. It is in the Early Precambrian of the Earth that corona-like features have been discovered, although as a rule they are much smaller [*Saul*, 1978; *Gintov*, 1978; *Eggers*, 1979; *Salop*, 1982; *Ilyin et al.*, 1983; and others]. Perhaps Venus will lead us to an understanding of the early unobservable Earth. The geological work on Venus has just begun.

#### References

- 1. Barsukov V. L., Florensky C. P., and Nikolaeva O. V. On the rock types on Venus, Paper presented to *An International Conference on the Venus Environment*, Palo Alto, CA, 1981.
- Barsukov V. L., Basilevsky A. T., Kuzmin R. O., Pronin A. A., Kryuchkov V. P., Nikolaeva O. V., Chernaya I. M., Burba G. A., Bobina N. N., Shashkina V. P., Markov M. S., and Sukhanov A. L. The geology of Venus as revealed by radar images obtained by Venera 15 and Venera 16 (Preliminary data) (in Russian), *Geokhimiya*, 12, 1811-1820, 1984a.
- 3. Barsukov V. L., Basilevsky A. T., Pronin A. A., Kuzmin R. O., Kryuchkov V. P., Nikolaeva O. V., Chernaya I. M., Burba G. A., Bobina N. N., Shashkina V. P., Kotelnikov V. A., Rzhiga O. N., Petrov G. M., Alexandrov Yu. N., Sidorenko Yu. I., Kovtunenko V. M., Kremnjev R. S., Bogomolov A. F., Menshikov M. M., Zjerikhin N. V., Tyuflin Yu. S., Akim E. L., Markov M. S., and Sukhanov A. L. The first results of geological-geomorphological analysis of the radar images of the surface of Venus obtained by spacecrafts Venera 15 and 16 (in Russian), Akad. Nauk SSR Doklady, 279, 946–950, 1984b.
- 4. Barsukov V. L., Surkov Yu. A., Moscalyeva L. P., Kharyukova V. P., and Kemurdzjan A. L. Studies of the composition, texture and properties of the rocks on Venus by Venera 13 and Venera 14, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 14th, in *J. Geophys. Res.*, 89, 393–402, 1984c.
- Basilevsky A. T., Kuzmin R. O., Nikolaeva O. V., Pronin A. A., Ronca L. B., Avduevsky V. S., Uspensky G. R., Cheremukhina Z. P., and Semenchenko V. V. The surface of Venus as revealed by the Venera landings: Part II, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 96, 137–144, 1985.
- Basilevsky A. T., Pronin A. A., Ronca L. B., Kryuchkov V. P., Sukhanov A. L., and Markov M.S. Styles of tectonic deformations on Venus: Analysis of Veneras 15 and 16 data, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 16th, this volume, 1986.
- 7. Campbell D. B., Head J. W., Harmon J. K., and Hine A. A. Venus volcanism and rift formation in Beta Regio, *Science*, 226, 167–170, 1984.
- Eggers A. J. Large-scale circular features in North Westland and West Nelson, New Zealand: Possible structural control for porphyry molybdenium-copper mineralization, *Econ. Geol.*, 74, 1490–1494, 1979.
- 9. Frey H. Crustal evolution of the early Earth: the role of major impacts, *Precamb. Res.*, 10, 195–216, 1980.
- Florensky C. P., Ronca L. B., Basilevsky A. T., Burba G. A., Nikolaeva O. V., Pronin A. A., Thachtman A. M., Volkov V. P., and Zasetsky V. V. The surface of Venus as revealed by Soviet Venera 9 and 10, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 1537–1545, 1977a.

- Florensky C. P., Ronca L. B., and Basilevsky A. T. Geomorphic degradation on the surface of Venus: An analysis of Venera 9 and 10 data, *Science*, 196, 869–871, 1977b.
- 12. Florensky C. P., Basilevsky A. T., Burba G. A., Volkov V. P., Ivanov A. V., Kuzmin R. P., Nazarov M. A., Nikolaeva O. V., Pronin A. A., Rode O. D., Yakovlev O. I., and Yaroshevsky A. A. Sketches of Comparative Planetology (in Russian), Nauka, Moscow.
- Florensky C. P., Basilevsky A. T., Kryuchkov V. P., Nikoleva O. V., Pronin A. A., Chernaya I. M., Tyuflin Yu. S., Selivanov A. S., Naraeva M. K., and Ronca L. B. Venera 13 and 14: Sedimentary rocks on Venus?, *Science*, 221, 57–59, 1983.
- 14. Gintov O.B. The Structures of Terrestrial Continental Crust on the Early Stages of Its Development (in Russian), Naukova Dumka, Kiev, 1978.
- 15. Goodwin A. M. Precambrian belts, plumes, and shield development. Am. J. Sci., 274, 987-1028, 1974.
- 16. Green J., and Short N. M. Volcanic Landforms and Surface Features: A photographic Atlas and Glossary, 517 pp., Springer-Verlag, New York, 1971.
- 17. Grieve R. A. F. Impact bombardment and its role in protocoritinental growth on the early Earth, *Precamb. Res.*, 10, 217–247, 1980.
- 18. Hartmann W. K., Moon and Planets, 509 pp., Wadsworth, Belmont, CA, 1983.
- Ilyin A. V., Glukhovsky M. Z., Kozlov V. V., Moralev V. M., and Stavtzev A. L. The application of space imagery to geology and mineral exploration in the USSR – a case history, *Adv. Space Res.*, 5, 19–26, 1983.
- Ivanov B. A., Basilevsky A. T., Kryuchkov V. P., and Chernaya I. M. Impact craters of Venus: Analysis of Venera 15/16, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 16th, this volume, 1986.
- Masaitis V. L., Danilin A. N., Natchak M. C., Raikhlin A. I., Selivanovsky T. V., and Shadenkov E. M. *The Geology of Astroblemes* (in Russian), Nedra, Leningrad, 1980.
- Masursky H., Eliason E., Ford P.G., McGill G.E., Pettengill G.H., Schaber G.G., and Schubert G. Pioneer-Venus radar results: Geology from images and altimetry, J. Geophys. Res., 85, 8232–8260, 1980.
- 23. McGill G. E., Steenstrup S. J., Barton C., and Ford P. G. Continental rifting and the origin of Beta Regio, Venus, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 737–740, 1981.
- 24. Mutch T. A. Geology of the Moon. A Stratigraphic View, 391 pp., Princeton University, NJ, 1970.
- Mutch T. A., Arvidson R. E., Head J. W., Jones K. L., and Saunders R. S. *The Geology of Mars*, 400 pp., Princeton University, NJ, 1976.
- Pettengill G. H., Eliason E., Ford P. G., Loriot G. B., Masursky H., and McGill G. E. Pioneer Venus radar results: altimetry and surface properties, J. Geophys. Res., 85, 8261–8270, 1980.
- 27. Ronca L. B. Meteoritic impact and volcanism, Icarus, 5, 515-520, 1966.
- 28. Salisbury J. W., and Ronca L. B. The origin of continents, *Nature*, 210, 669-690, 1966.
- 29. Salop L. I. The Geological Development of the Earth in Precambrian Time (in Russian), Nedra, Leningrad, 1982.
- Saul J. M. Circular structures of large scale and great age of the Earth's surface, *Nature*, 271, 345–349, 1978.

- 31. Saunders R. S., and Malin M. C. Geologic interpretation of new observations of the surface of Venus, *Geophys. Res. Lett.*, 4, 547–550, 1977.
- 32. Schaber G.G. The geology of Io, in *Satellites of Jupiter*, edited by D. Morrison, pp. 556-597, University of Arizona, Tucson, 1982.
- Shoemaker E. M., Lucchitta B. K., Wilhelms D. E., Plescia J. B., and Squyres S. W. The geology of Ganymede, in *Satellites of Jupiter*, edited by D. Morrison, pp. 435-520, University of Arizona, Tucson, 1982.
- Strom R. G., Trask N. J., and Guest J. E. Tectonism and volcanism on Mercury, J. Geophys. Res., 80, 2479–2507, 1975.
- 35. Surkov Yu. A., Kirnozov F. F., Glazov V. N., and Fedoseyev G. A. Investigations of venusian gamma-radiation by Venera 9 and Venera 10, *COSPAR Space Research*, XVII, 659–662.
- 36. U.S. Geological Survey, Altimetric and shaded relief map of Venus, 1:50 000 000, U.S. Geol. Survey Misc. Inv. Map 1–1324, 1981.
- Vinogradov A. P., Surkov Yu. A., and Kirnozov F. F. The content of uranium, thorium and potassium in the rocks of Venus as measured by Venera 8, *Icarus*, 20, 253–259, 1973.
- Weiblen P. W, and Schulz K. J. Is there any record of meteorite impace in the Archean rocks of North America? *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 9th, 2749–2771, 1978.

V. L. Barsukov, A. T. Basilevsky, G. A. Burba, N. N. Bobina, V. P. Kryuchkov, R. O. Kuzmin, O. V. Nikolaeva, A. A. Pronin, L. B. Ronca, I. M. Chernaya, V. P. Shashkina, A. V. Caranin, and E. R. Kushky, V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR.

M. S. Markov and A. L. Sukhanov, Geologic Institute, USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR.

V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. M. Petrov, Yu. N. Alexandrov, and A. I. Sidorenko, Institute of Radiotechnics and Electronics, USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR.

A. F. Bogomolov, G. L Skrypnik, M. Yu. Bergman, and L. V. Kudrin, Moscow Energy Institute, Moscow, USSR.

I. M. Bokshtein, M. A. Kronrod, and P. A. Chochia, Institute of Problems of Transmission of Information, USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR.

Yu. S. Tyuflin and S. A. Kadnichansky, F. N. Krasovsky Central Scientific-Research Institute of Geodesy, Aerial Survey and Cartography, Moscow, USSR.

E. L. Akim, M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR.

Received March 15, 1985; revised August 6, 1985; accepted August 14, 1985.

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

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

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

# 1. Введение

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

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

Еще в 60-х годах при анализе спектра отраженного Венерой сигнала как в США [9], так и в Советском Союзе [1] были обнаружены обширные области ее поверхности, рассеивающие радиоволны более интенсивно, чем окружающая местность, и выглядящие «радиояркими» на окружающем фоне. Впоследствии с помощью крупнейших радиолокационных установок в Аресибо и Голдстоуне (США) были получены изображения отдельных участков поверхности Венеры с пространственным разрешением 10–20 км [14, 6]. В последнее время для некоторых снимков горных районов разрешение было несколько улучшено [7]. Однако на этих снимках окружающие пространства с более гладкой поверхностью не различимы вследствие низкого уровня отраженного сигнала. Полярные районы вообще недоступны для наблюдения с Земли.

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

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

### 2. Принципы радиолокационной съемки поверхности Венеры

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

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

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



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

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

Радиовысотомер служит для измерения профиля высот поверхности планеты по трассе полета. Непосредственно измеряется высота космического аппарата SO относительно некоторого среднего уровня поверхности в освещаемом пятне 2 под аппаратом (рис. 1). Величина местного радиуса планеты вычисляется как разность расстояния аппарата от центра планеты и измеренной высоты.

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

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

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

### 3. Контрастность радиолокационного изображения

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



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

У радиолокационной станции с синтезированной апертурой космических аппаратов Венера 15 и Венера 16 угол  $\alpha_0$ , составляемый электрической осью диаграммы направленности антенны и местной вертикалью (см. рис. 1), выбран в 10°. При отклонении падающего луча от вертикали на 10° мощность отраженных сигналов уменьшается на 10 дБ (в 10 раз). Эта величина определяет среднее значение яркости изображения, относительно которого выделяются детали изображаемой поверхности. При этом некоторые элементы поверхности, такие как склоны горных хребтов, кратеров и долин, обращенные к космическому аппарату, могут занять более удачное положение по отношению к падающему лучу. Мощность отраженных сигналов для них будет иметь превышение над средним значением до 10 дБ. Другие элементы оказываются ориентированными к падающему лучу менее удачно: для них значение угла  $\varphi$  больше  $10^\circ$  и мощность отраженных сигналов ниже среднего значения до -8 дБ (в 6,3 раза) при  $\varphi = 20^{\circ}$ . Следовательно, контрасты между отдельными элементами поверхности могут достигать 18 дБ (63 раз), подчеркивая форму геологических структур.

Обычно при картографировании земных горных районов величину угла  $\alpha_0$  рекомендуется брать в пределах 35°-55° [11], чтобы сохранить

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

# 4. Погрешность измерения мощности отраженных сигналов

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

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

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

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

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

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

# 5. Влияние венерианской атмосферы

При ограниченном времени  $\nu$  синтеза апертуры пространственное разрешение  $\Delta$  в направлении трассы космического аппарата тем выше, чем короче рабочая волна  $\lambda$ :

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

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

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

Ослабление радиолокационного сигнала в атмосфере Венеры при вертикальном прохождении

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

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

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

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

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

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

### 6. Принцип работы радиолокационной системы

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



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

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

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

<sup>&</sup>lt;sup>1)</sup> В режиме радиовысотомера период кодовой последовательности может быть установлен равным также 127 элементам, что облегчает раскрытие неоднозначности в измеренном расстоянии.



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

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



Рис. 5. Модуляция фазы сигнала передатчика

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

Мгновенное напряжение отраженных сигналов, преобразованных к нулевой частоте в двух каналах, сдвинутых по фазе на 90° друг относительно друга, усредняется на интервале, равном длительности элементарного импульса (1,54 мкс) и представляется 4-разрядным двоичным кодом (см. рис. 5). Согласование уровня отраженных сигналов с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП) обеспечивается цифровой системой автоматического регулирования усиления (АРУ). Через каждые 0,3 с 2540 отсчетов отраженных сигналов в режиме радиолокационной станции с синтезированной апертурой (20 периодов 127-элементной последовательности максимальной длины — 3,9 мс) и 434 отсчета отраженных сигналов в режиме радиовысотомера (14 периодов 31-элементной последовательности максимальной длины — 0,67 мс, см. рис. 4, *a*) поступают двумя 4-разрядными словами в буферное запоминающее устройство совместно с данными об усилении, установленном системой АРУ, а затем записываются на бортовых цифровых накопителях информации. За 16 мин., в течение которых проводится радиолокационная съемка, получается около 3200 таких массивов общим объемом 100 миллионов бит.

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



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

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

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

Искусственные спутники Венера 15 и Венера 16 созданы на базе орбитальных аппаратов автоматических межпланетных станций Венера 9 — Венера 14, доставивших к Венере спускаемые аппараты. Новое назначение внесло серьезные изменения в их конструкцию (рис. 7). Вместо спускаемого аппарата установлен герметичный контейнер с аппаратурой радиолокационной системы и увеличены баки с топливом для торможения при выходе на орбиту искусственного спутника Венеры и осуществления ее коррекции. Увеличена на 70% площадь панелей солнечной батареи для обеспечения энергопитанием радиолокационной системы и радиотелеметрической аппаратуры при ежедневной работе.



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

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

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

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

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

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





Рис. 8. Общий вид антенны Центра Рис. 9. Общий вид антенны в Медведальней космической связи под Ев- жьих Озерах под Москвой паторией

## 8. Орбиты космических аппаратов Венера 15 и Венера 16

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



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

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

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

За 8 месяцев, в течение которых пелась 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. км<sup>2</sup> или 25% от



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

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

Аппараты Венера 15 и Венера 16 функционировали как единая космическая система. При выводе плоскости их орбит были смещены друг относительно друга на угол около 4°, что обеспепечивало при необходимости возможность повторной съемки одной и той же области, не прерывая регулярности съемки, ведущейся одним из аппаратов. За счет воздействия на аппараты солнечного притяжения высота в 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. Перед сеансами коррекции съемка велась также двумя аппаратами.

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

# 9. Цифровой комплекс аппаратуры обработки радиолокационной информации

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



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

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

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

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

# 10. Обработка отраженных сигналов

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

За 0,3 с, через которые регистрируются массивы отсчетов отраженных сигналов, космический аппарат смещается по орбите на часть ширины участка поверхности, попадающей в диаграмму направленности антенны (см. рис. 1, где пунктиром отмечено положение следа диаграммы направленности антенны в момент регистрации предыдущего массива данных). Это обеспечивает взаимное перекрытие кадров и возможность усреднения мгновенных измерений мощности отраженных сигналов для уменьшения флуктуационной погрешности, вызываемой интерференцией радиоволн, отраженных отдельными точками поверхности в пределах разрешаемого элемента. При объединении отдельных кадров в сплошную полосу для каждой из точек изображаемой поверхности, попадающих в диаграмму направленности антенны, вычисляется наклонная дальность и радиальная составляющая скорости относительно космического аппарата, для чего используются данные о его расстоянии и скорости по отношению к центру масс Венеры. Шаг разложения 0,8 км, что меньше фактического разрешения 1–2 км). Методика учитывает изменение высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, и возможные (как правило, в пределах  $\pm 0,5^{\circ}$ ) отклонения электрической оси антенны от требуемого положения.

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

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

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

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

#### 11. Полученные результаты

Радиолокационные изображения поверхности Венеры, полученные космическим аппаратом Венера 16 20 октября 1983 г. и 3 июля 1984 года, спустя 8 месяцев, когда Венера совершила оборот вокруг своей оси и под орбитой оказался тот же самый район <sup>2</sup>), приведены на рис. 13.

По горизонтальной оси отложено угловое расстояние относительно перицентра орбиты, по вертикальной оси — угловое расстояние относительно плоскости орбиты, измеренные в градусах из центра планеты (один градус на поверхности Венеры занимает 105,6 км). Положению трассы соответствует 0° по вертикальной шкале. Несовпадение горизонтальных шкал связано с изменением широты перицентра аппарата. Длина приведенных фрагментов 1100 км при полной ширине изображенной полосы 156 км (195 элементов по 0,8 км). Полезная часть изображения зависит от высоты космического аппарата. Изображение построено в предположении, что поверхность Венеры — сфера радиуса 6051 км<sup>3</sup>). Отклонения местного радиуса от этой величины проявляются в нерегулярном смещении границ по вертикали, видимом на изображении. Плавное смещение границ вызвано изменением высоты аппарата при его движении по эллиптической орбите.

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

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

<sup>&</sup>lt;sup>3)</sup> Рекомендация Международного астрономического союза.


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

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

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

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

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

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

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

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

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

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





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

# 12. Построение фотокарт и топографических карт Венеры

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

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

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

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

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



Рис. 16. Смещение точек изображения при вариации местного радиуса планеты: *а* — в случае возвышенности; *б* — в случае низменности

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

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

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

В случае низменности (точка B лежит ниже точки 0, рис. 16, б), когда наклонная дальность увеличивается, засечка дает на средней поверхности точку O'' вместо O. Точка O'' расположена дальше от плоскости орбиты, чем точка O, и центральный угол  $\Phi''$  больше  $\Phi$ .

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

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

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

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

Общая площадь территории, представленной на фотокарте, составляет 3,75 · 10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>. Фотокарта содержит 5,85 · 10<sup>6</sup> точек. Это наиболее детальное изображение Гор Максвелла из всех существующих.

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



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

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

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



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

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

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

15 В.А. Котельников

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

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

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

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

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

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>) По данным радиовысотомера космического аппарата «Пионер-Венера» наивысшая точка Гор Максвелла находится на 220 км южнее (долгота 2,2°, широта 63,8°) и имеет высоту 11,1 км (также над уровнем сферы радиуса 6051 км) [12].

#### 13. Особенности геологического строения поверхности Венеры

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

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

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

С удалением от Плато Лакшми системы параллельных хребтов и долин постепенно, а в ряде случаев резко, переходят в системы пересекающихся хребтов и долин (см. район к востоку от кратера Клеопатры на рис. 17). Они обычно обладают диагональным или шевронным, хаотическим и ортогональным структурным рисунком. Из-за внешнего сходства рисунка с черепицей в системе планетной номенклатуры эти образования получили наименование «tessera» (греч. черепица). Черепица с диагональным структурным рисунком образована системами многочисленных сопряженных разломов, сформированных, по-видимому, в обстановке преимущественно горизонтального тектонического сжатия. Черепица с ортогональным рисунком похожа на структурно-морфологический рисунок срединно-океанических хребтов Земли и, видимо, образована горизонтальными тектоническими деформациями в обстановке растяжения. Ориентировка тектонических напряжений, которые явились причиной образования черепицы Земли Иштар, обнаруживает закономерную связь с ориентировкой напряжений, сформировавших системы параллельных хребтов и долин горного обрамления Лакшми. Местность типа черепицы распространена еще в двух довольно крупных горных сооружениях областей Тефии и Теллуры (см. рис. 19), а также в виде небольших останцевых возвышенностей на равнинах.

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

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

**Равнины** по распространенности преобладают — 83 из 115 млн. км<sup>2</sup> снятой территории. По своему положению их поверхность близка к среднему уровню планеты (6051 км над центром масс) или на 0,5–1,5 км ниже его. По характеру строения поверхности к ним можно отнести и Плато Лакшми. На полученных изображениях поверхность равнин в некоторых случаях кажется гладкой и почти не несет на себе никаких осложняющих ее элементов рельефа. В других случаях она в различной степени осложнена куполовидными возвышенностями, иногда с вершинными кратерами, и протяженными грядами, часто группирующимися в пояса.

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

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



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

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

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



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

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

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





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

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

#### 14. Заключение

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

На полученных изображениях видны горные хребты, кратеры, плоскогорья, складки и разломы венерианской коры. Обнаружены многочисленные результаты тектонической активности Венеры. По результатам съемки построены фотокарты и топографические карты северного полушария Венеры. Закрытая сплошным облачным слоем Венера стала доступной геологическому изучению подобно Марсу и Меркурию.

#### Литература

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

# СОЗДАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КАРТЫ ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА

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

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

Опыт наблюдения планет с помощью радиолокационной установки Центра дальней космической связи [1] был использован для разработки космического эксперимента по картографированию поверхности планеты Венера. С этой целью в начале июня 1983 г. к Венере стартовали космические аппараты «Венера-15 и -16» с радиолокационной аппаратурой, созданной ОКБ Московского энергетического института. В середине октября 1983 г. оба космических аппарата были выведены на орбиту спутников планеты Венера. С 11 ноября 1983 г. по 10 июля 1984 г. была проведена съемка всего северного полушария планеты выше 30° общей площадью 115 млн. км<sup>2</sup>.

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

### Роль радиолокационных методов в исследовании Венеры

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

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

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

Радиолокация Венеры позволила существенно уточнить значение астрономической единицы — среднего расстояния от Земли до Солнца, которая, как оказалось, была известна с ошибкой около 100000 км. Уточнение астрономической единицы сделало возможным вывод искусственных спутников к планетам и доставку спускаемых аппаратов в заданные районы их поверхности.

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

Еще в 60-х годах при анализе спектра отраженного Венерой сигнала как в США, так и в СССР [6] были обнаружены обширные области ее поверхности, рассеивающие радиоволны более интенсивно, чем окружающая местность, т.е. выглядящие «радиояркими» на окружающем фоне. Впоследствии с помощью крупнейших радиолокационных установок в Аресибо и Голдстоуне были получены с пространственным разрешением 10–20 км изображения отдельных участков полушария Венеры, обращенного к Земле в период сближения <sup>1</sup>). В последнее время для отдельных снимков горных районов разрешение было улучшено до 3 км [7]. Однако окружающие пространства с более гладкой поверхностью на этих снимках не различимы вследствие низкого уровня отраженного сигнала. Полярные районы вообще недоступны для наблюдения с Земли. Ввиду ограниченности области картографирования, разрозненности и невысокого качества изображений данные, полученные при радиолокации с Земли, оказались недостаточны для построения карты Венеры.

В 1980 г. с помощью радиовысотометра-профилографа, установленного на американской межпланетной станции «Пионер-Венера», была построена карта высот (гипсометрическая карта), охватывающая поверхность Венеры между 60° южной широты и 75° северной [8]. На этой карте видны детали континентального масштаба, такие, как Земля Иштар с Горами Максвелла, Земля Афродиты, Область Бета. Измерения высоты шли через 50–150 км. Более мелкие детали — горные хребты, кратеры, рифтовые долины — оказались неразличимы. Между тем, именно эти детали поверхности в совокупности могли бы дать ответ на многие вопросы и, в частности, на такой: в настоящее время Венера геологически активна подобно Земле, или так же безжизненна, как Луна или Меркурий?



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

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



Рис. 2. Орбита искусственных спутников Венеры. 1 — перицентр; 2 — трасса орбиты; 3 — экватор Венеры; 4 — апоцентр; 5 — полоса лоцирования

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

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

### Принцип радиолокационной съемки

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

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

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



Рис. 3. Схема радиолокационной съемки с космического аппарата

Элементы поверхности в пределах этого участка находятся на разном расстоянии и движутся с разными радиальными скоростями относительно космического аппарата. Поэтому отраженные ими принятые на космическом аппарате сигналы не одинаково запаздывают друг относительно друга и имеют разную частоту вследствие эффекта Доплера. Например, точка A находится ближе к космическому аппарату, чем точка B, и отраженные ею сигнал приходят раньше. С другой стороны, точка C приближается к аппарату и отраженные ею сигналы имеют более высокую частоту чем сигналы, отраженные точкой D, которая удаляется. Это и используется для разделения сигналов, отраженных отдельными элементами поверхности, при обработке и построении изображения. В проекции на плоскость линии равного запаздывания представляют концентрические окружности с центром в точке O под космическим аппаратом, линии равного доплеровского смещения — конические сечения.

В одном прохождении космического аппарата около планеты снимается полоса поверхности  $\Pi_1$ , вытянутая вдоль трассы  $T_1$  (рис. 4). К следующему прохождению через 24 ч планета поворачивается на угол около 1,5° и снимается новая полоса  $\Pi_2$ .

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

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

#### Пространственное разрешение

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

$$\tau = 2r/c,\tag{1}$$

$$\nu = -2v_r/\lambda,\tag{2}$$

где  $\lambda$  — длина волны зондирующего сигнала, а c — скорость света.

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

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

$$v_{r} = -\frac{1}{r} \left\{ v_{r} R \sin(i - i_{n}) \cos \Phi - v_{B} \left[ \rho - R \cos(i - i_{n}) \cos \Phi \right] \right\}.$$
(4)

Здесь R — радиус поверхности планеты в данной точке;  $\rho$  — планетоцентрическое расстояние,  $i_n$  — истинная аномалия (угловое расстояние аппарата относительно перицентра, измеренное из центра планеты),  $v_{\Gamma}$ ,  $v_{B}$  — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите.

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

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

в направлении трассы:

$$\Delta_x = R \Delta_\tau \cos \Phi = \lambda r / 2L_a, \quad L_a = \vartheta v_{\rm r},\tag{5}$$

- в направлении, перпендикулярном трассе:

$$\Delta_y = R \Delta_\Phi = \frac{cr\Delta_\tau}{2\rho\sin\Phi},\tag{6}$$

где  $\vartheta$  — время синтеза апертуры (или время когерентного накопления отраженных сигналов — величина, обратная частотному разрешению  $\Delta_{\nu}$  при спектральном анализе),  $\Delta_{\tau}$  — разрешающая способность по запаздыванию (определяется полосой частот зондирующего сигнала),  $L_a$  — размер синтезированной апертуры.



Рис. 4. Последовательность радиолокационной съемки поверхности Венеры:  $T_1$ ,  $\Pi_1$  — трасса космического аппарата при его прохождении вблизи Венеры и снимаемая полоса;  $T_2$ ,  $\Pi_2$  — трасса и полоса в следующем прохождении спустя сутки;  $T_i$ ,  $\Pi_i$  — трасса и полоса спустя четверть оборота Венеры

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

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

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



Рис. 5. Изменение высоты h и горизонтальной составляющей скорости  $v_{\rm r}$  космического аппарата, а также пространственного разрешения вдоль трассы  $\Delta_x$  и ширины полезной части снимаемой полосы  $L_y$  в зависимости от истинной аномалии

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

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

При заданном значении угла  $\alpha$   $\Delta_y$  изменяется обратно пропорционально  $\rho=R+h.$ 

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

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



Рис. 6. Геометрические соотношения между наклонной дальностью r, планетоцентрическим расстоянием космического аппарата  $\rho$ , радиусом планеты R и углом  $\alpha$ 



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

щей способностью по высоте  $\Delta h$  и зависит от высоты:

$$2a = 2\sqrt{2\frac{R}{\rho}h\Delta h}\,,\tag{8}$$

причем

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

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

#### Контрастность радиолокационного изображения

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

У РЛС СА космических аппаратов «Венера-15 и -16» угол  $\alpha_0$ , составляемый электрической осью диаграммы направленности антенны и местной вертикалью, выбран в 10°, что много меньше, чем у обычных станций бокового обзора, устанавливаемых на самолете [9]. При малом угле обзора не возникает затенений.

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



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

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

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

# Погрешность измерения мощности отраженного сигнала

Качество радиолокационного изображения, помимо разрешающей способности и контрастности, определяется также погрешностью измерения мощности отраженных сигналов. Эта погрешность зависит от величины отношения средних значений мощности отраженных сигналов и шума приемной аппаратуры  $P_{\rm c}/P_{\rm m}$ , определяемого параметрами РЛС, а также от числа  $N_{\rm H}$  независимо усредняемых измерений мощности отраженного сигнала. Усреднение необходимо для снижения влияния интерференции сигналов, отраженных отдельными точками в пределах разрешаемого элемента.

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

$$\frac{\sigma_P}{P_{\rm c}} = \frac{1}{\sqrt{N_{\rm H}}} \left( 1 + \frac{P_{\rm III}}{P_{\rm c}} \right)$$

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

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

### Влияние венерианской атмосферы

При ограниченном времени синтеза апертуры пространственное разрешение в направлении трассы космического аппарата тем выше, чем короче рабочая волна (см. (5)). С другой стороны, на волнах короче 10–20 см резко падает мощность отраженных сигналов вследствие нерезонансного поглощения электромагнитного излучения в газовых составляющих атмосферы Венеры и, прежде всего, в углекислом газе, из которого она почти целиком состоит [1]. Это ослабление отраженных сигналов при вертикальном прохождении в зависимости от длины волны показано ниже:

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

На волне 8 см, которая была выбрана для радиолокационной системы космических аппаратов «Венера-15 и 16», поглощение составляет 2,2 дБ, что было учтено при расчете энергетического потенциала системы. Под углом 10° относительно вертикали, под которым излучается сигнал РЛС СА, поглощение возрастает всего на 1,5%.

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

Вследствие рефракции траектория радиолуча РЛС СА в атмосфере несколько искривляется и приближается к вертикали. Это вызывает смещение точки, в которой происходит отражение, по поверхности планеты. Однако из-за небольшой величины угла, составляемого радиолучом с вертикалью, это смещение не превышает 100 м и им можно пренебречь.

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

Косвенно это подтверждается анализом сигналов, передававшихся спускаемыми аппаратами AMC «Венера» с поверхности планеты. Например, фактическая ширина спектральной линии сигналов AMC «Венера-7» не превышала 1-2 Гц [4], что было вызвано манипуляцией сигнала передававшимся сообщением.

### Обеспечение однозначного выделения отраженных сигналов

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

$$\tau_B - \tau_A < T_{\rm M}, \quad \nu_C - \nu_D < 1/T_{\rm M},$$
 (10)

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

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

$$(\nu_C - \nu_D) \simeq (2\nu_{\rm r}/\lambda)\theta_{\rm r}.$$
 (11)

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

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

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

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

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

### Принцип работы радиолокационной системы

Упрощенная блок-схема радиолокационной системы представлена на рис. 9. Это полностью когерентная система, все сигналы которой получаются от общего задающего генератора. Передатчик непрерывного излучения работает высокочастотными импульсами длительностью около 15 мс, разделенными паузами длительностью около 5 мс для приема отраженных сигналов (рис. 10, *a*). Внутри импульсов фаза сигнала изменяется на 180° в моменты, определяемые кодом периодически повторяемой М-последовательности (последовательности максимальной длины [11]) (рис. 11). Длительность элементарного импульса, определяющего разрешающую способность радиолокационной системы по наклонной дальности и высоте, 1,54 мкс. В режиме РЛС СА период кодовой последовательности содержит 127 элементарных импульсов (195,4 мкс), в режиме РБП — 31-элементарный <sup>2</sup>) импульс (47,7 мкс). Импульсы передатчика следуют как через антенну РЛС СА, так и антенну РВП с интервалами около 0,3 с (см. рис. 10, *б*).

Прием и регистрация отраженных сигналов производятся в паузе по окончании импульса передатчика. Мгновенное напряжение отраженных сигналов, преобразованных к нулевой частоте в двух каналах, сдвинутых по фазе на 90° друг относительно друга, усредняется на интервале, равном длительности элементарного импульса (1,54 мкс), и представляется 4-разрядным двоичным кодом (см. рис. 9). Согласование уровня отраженных сигналов с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП) обеспечивается цифровой системой автоматического регулирования усиления (АРУ). Через каждые 0,3 с 2540 отсчетов отраженных сигналов в режиме РЛС СА

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>) В режиме РВП период кодовой последовательности может быть установлен равным также 127 элементам, что облегчает раскрытие неоднозначности в измеренном расстоянии.



Рис. 9. Упрощенная блок-схема радиолокационной системы



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

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

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



Рис. 11. Модуляция фазы сигнала передатчика

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



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

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

# Принципы синтезирования радиолокационных изображений и профилей высот поверхности Венеры

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

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

дованный злектронными вычислительными машинами и устройствами отображения и вывода изображений.

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

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

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

При усреднении для каждой из точек изображаемой поверхности, попадающих в диаграмму направленности антенны, вычислялись наклонная дальность и радиальная составляющая скорости относительно космического аппарата, для чего использовались данные об удаленности и скорости аппарата относительно центра масс Венеры (см. (3), (4)), Шаг разложения по координатам i и  $\Phi - 0.8$  км, что меньше фактического разрешения. Методика учитывает изменение высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, и возможные (как правило, в пределах  $0.5^{\circ}$ ) отклонения электрической оси антенны от среднего положения.

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

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

Измерения, следующие через 0,3 с, усреднялись по 7 отсчетам скользящим окном. Величина радиуса поверхности планеты в данной точке, вычисленная как разность расстояния космического аппарата от центра планеты и измеренной высоты, наносилась по трассе аппарата с шагом 8 км с учетом отклонения электрической оси антенны от местной вертикали. Среднеквадратическое значение погрешности измерений высоты, определенное по разбросу измерений над ровной местностью, составляло 30 м.

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


### Полученные результаты

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

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

По горизонтальной оси отложено угловое расстояние относительно перицентра орбиты (i), по вертикальной оси — угловое расстояние относительно плоскости орбиты  $(\Phi)$ , измеренные в градусах из центра планеты (один градус на поверхности Венеры занимает 105,6 км). Несовпадение шкал связано с тем, что при построении нижнего фрагмента использовались более точные параметры орбиты. Длина фрагментов — 1100 км при полной ширине изображенной полосы 156 км (195 элементов по 0,8 км). Полезная часть изображения зависит от высоты космического аппарата над поверхностью планеты (см. рис. 5). Изображение построено в предположении, что поверхность Венеры сфера радиуса 6051 км. Отклонения местного радиуса от этой величины проявляются в нерегулярном смещении границ по вертикали, видимом на изображении. Плавное смещение границ вызвано изменением высоты аппарата при его движении по эллиптической орбите.

Космический аппарат двигался слева направо, его трасса проходит выше снятой полосы. Чем больше мощность отраженных сигналов, тем светлее образования на изображении. Склоны, обращенные к падающему лучу, выглядят светлыми, склоны, отвернутые от него темные. От начала изображения до  $-30^{\circ}$  от перицентра занимает древняя складчатая область с полуразрушенными кратерами ударного происхождения. Остатки этих кратеров диаметром около 30 км видны на  $-32,7^{\circ}$  и  $-31,84^{\circ}$  (по рис. 14, б). Складчатый образования имеют, вероятно, более молодой возраст. Участки с более гладкой поверхностью меньше отражают назад к космическому аппарату и выглядят темными на окружающем фоне. Они видны на  $-35,5^{\circ}$ ;  $-35,0^{\circ}$ ;  $-33,0^{\circ}$ .

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











17 В.А. Котельников

Радиолокационные изображения поверхности Венеры, полученные космическим аппаратом «Венера-16» 20 октября 1983 г. и 3 июля 1984 г., т. е. спустя 8 месяцев, когда Венера совершила оборот вокруг своей оси и под орбитой оказалась та же самая область <sup>4</sup>), приведены на рис. 15. От начала снимка до  $-24^{\circ}$  на верхнем фото (соответственно до  $-23^{\circ}$  на нижнем) продолжается та же самая равнина, которой закончился рис. 14. Затем она прерывается молодой складчатой областью протяженностью около 500 км. Множество параллельных горных хребтов пересекают трассу под углом около  $45^{\circ}$ , затем меняют направление и тянутся вдоль трассы на сотни километров, медленно расходясь. В конце под углом  $45^{\circ}$  примыкает вторая горная область. Как можно заметить, горные складки не носят заметных следов водной эрозии, создающей поперечные овраги и долины, проявляющиеся на земных снимках в виде характерной «елочки».

Затем рельеф становится более спокойным. Наиболее примечательной деталью в этой области являются два горных образования на  $-18,2^{\circ} \div -17,4^{\circ} (-17,2^{\circ} \div -16,4^{\circ})$ , вытянутые вдоль трассы на 80 км. Ширина их у основания 15–20 км. На  $-18,8^{\circ} (-17,8^{\circ})$  находятся полуразрушенный кратер диаметром 15–20 км. Заметных изменений на поверхности Венеры за 8 месяцев, судя по этим снимкам, не наблюдается.

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

На рис. 18 изображен район Гор Максвелла с кратером Патера Клеопатра диаметром около 100 км. С радиолокационным изображением совмещен профиль высот, полученный тремя днями раньше вдоль трассы, которая показана белой линией. Максимальная высота горного массива для данного профиля составляет 11 км над средним радиусом Венеры, в качестве которого Международный астрономический союз принял значение 6051 км. Кратер, который пересекла трасса измерений высоты, расположен на склоне горного массива и имеет сложную форму. Из сопоставления изображения с профилем следует, что внутри большего кратера глубиной около 1,5 км находится второй, меньшего диаметра, дно которого опущено еще на 1 км.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>) В середине июня 1984 г., когда Венера проходила за Солнцем, связь с аппаратами прекратилась на несколько дней. Чтобы снять пропущенную в этот период область, плоскость орбиты космического аппарата «Венера-16» была повернута назад на некоторый угол. Вследствие этого та же самая область оказалась под орбитой на 2 недели позже полного оборота Венеры (243 сут.).



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

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

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

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



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

# Построение фотокарты области Гор Максвелла

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



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



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

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



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

на сферу радиуса 6051 км в венерографической системе координат <sup>5)</sup>, а затем проектировались на коническую поверхность, проведенную через две стандартные параллели. Проектирование велось цифровыми методами с шагом 0,8 км на плоскости фотоплана. Использовалась линейная интерполяция мощности отраженного сигнала по трем ближайшим точкам. В местах перекрытия соседних полос ее величина бралась с весом, убывающим линейно к краю изображения.

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

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

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

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

С запада область Патеры Клеопатра окаймлена почти параллельными хребтами, тянущимися на сотни километров. Друг от друга они отстоят на 5–15 км. Здесь находится самая высокая область Венеры, где в овале протяженностью 400 км с севера на юг и 200 км с востока на запад высо́ты превышают уровень 10 км. Примерно в середине овала в 200 км к западу от Патеры Клеопатра (долгота 3°, широта 66°) находится наивысшая точка — 11,5 км, зафиксированная радиовысотометром-профилографом космического аппарата «Венера-16» 14 января 1984 г. (рис. 21). Как показывают уровни высот, северная часть возвышенности продолжается на запад, где высоты еще превышают 9 км.

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

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

С юга Горы Максвелла четко ограничены равниной высотой около 3 км. С севера складки собираются в «жгут», который извиваясь и теряя высоту до 2 км, тянется в меридиональном направлении более чем на 500 км, а затем переходит в равнину. Это южная часть обширной приполярной равнины «Снегурочка».

### Заключение

Космические аппараты «Венера-15 и -16» за 8 месяцев произвели радиолокационную съемку всего северного полушария Венеры выше 30° общей площадью 115 млн. км<sup>2</sup>, что составляет 25% всей поверхности планеты. Комплекс аппаратуры, созданный в ИРЭ АН СССР, позволил обеспечить непрерывную обработку поступающей информации и получение радиолокационных изображений и профилей высот поверхности Венеры. На этих изображениях видны горные хребты, кратеры, плоскогорья, складки и разломы венерианской коры. В некоторых районах обнаружен аномальный характер отражения радиоволн. Полученный материал используется для создания карт снятой части поверхности Венеры. Эти карты позволяют изучить процессы, протекающие на поверхности Венеры, и судить об истории развития планеты.

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

#### Литература

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

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ГРЯД ТОМЭМ И ГЕРЫ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-22)

А. Л. Суханов, Г. А. Бурба, В. П. Шашкина, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, А. А. Крымов, А. И. Захаров

Астрономический вестник, 1987, т. XXI, № 1, с. 5-15

Район между равниной Седны и поднятием Белл покрыт обширными полями магматических даек, образующих невысокие гряды на поверхности. Они образовались в зонах трещиноватости вдоль крупных разрывов и, вероятно, над участками погребенного паркета. Вулканические формы представлены экструзивно-эффузивными куполами, образующими крупные скопления в центре территории, и вулкано-тектоническими комплексами центрального типа.

Лист фотокарты B-22 построен по материалам AMC «Венера-15» и «Венера-16» в нормальной равноугольной конической проекции Ламберта–Гаусса [1]. В его пределы входит площадь от 0 до 30° в. д. и от 40° с. ш. до границ заснятой территории на юге — максимально до 23° с. ш. (рис. 1). Геолого-морфологическое картирование этого листа выполнено в масштабе 1:10 000 000, по фотоизображениям масштаба 1:4 000 000, а здесь приведен генерализованный вариант этой карты (рис. 2). На рис. 3 даны основные наименования, положение участков, приводимых ниже в увеличенном виде, схема деления листа на районы, согласно которой ведется дальнейшее его описание. Высотные отметки в пределах листа колеблются около 1–2 км на востоке и -0,5-+0,5 км на западе; вся область может быть названа равниной, полого опускающейся к западу.

## А. Гряды Геры

Эта область относится к холмистым равнинам, но кроме пологих холмов, валов и западин она покрыта многочисленными структурами, в основном двух типов: 1) узкими длинными частыми грядами, смыкающимися, пересекающимися и местами образующими сплошные сети; 2) «пауками» — концентрическими структурами, от которых иногда отходят пучки субрадиальных даек.







Рис. 3. Схема структурного районирования описываемой территории. Прямоугольниками показаны границы кадров, приведенных в увеличенном виде

Подобные равнины можно выделить в самостоятельный тип и называть их сетчатыми, грядовыми или пауковыми равнинами. Но этот принцип, пригодный для одного листа карты или для мелкомасштабной схемы, трудно выдерживать последовательно по всей территории: местами границы грядовых равнин с обычными холмистыми равнинами пришлось бы проводить довольно условно, поскольку есть участки, где гряды постепенно становятся все мельче и реже, пока не исчезают совсем, и эта переходная зона может иметь ширину 100–300 км. Точно так же и пауки иногда образуют скопления, а иногда встречаются поодиночке. Тем более нет оснований приписывать комплексу такой сетчатой равнины какой-то определенный возраст, отличный от возраста остальных холмистых равнин: наличие гряд и пауков — это показатель скорее типа тектонического режима, а не принадлежность к временному периоду.

1. Гряды ориентированы преимущественно в северо-западных направлениях. Если двигаться дальше на северо-запад, эти направления структур прослеживаются по равнине Седны [2] и, вероятно, они могут быть продолжением траектории уступа Ут. Типичные гряды имеют «освещенный» и «затененный» склоны, ширину 5–10 км, длину от нескольких десятков до 100 и даже 200 км, высота их неизвестна, и в случае самой «тесной упаковки» их насчитывается 10–12 штук на 100 км вкрест простирания. Часто видно, что они рассекают структуры, встречающиеся на пути. Ширина их, как правило, не меняется на большом протяжении. Обычно они субпараллельны, разделены относительно большими промежутками выровненной поверхности, иногда смыкаются, реже пересекаются.

Судя по их рисунку, выдержанности и, главное, по секущим контактам, они могут быть только дайками, вышедшими на поверхность. На Земле дайки в виде «стенок» встречаются там, где их отпрепарировала эрозия, удалившая окружающие породы. На Венере эрозии таких масштабов нет, и то, что мы видим, — это первичные выходы магматического материала даек на поверхность. Но то, что мы видим, — это не «стенки», это гряды шириной по несколько километров, а высотой, видимо, не более десятков метров, т. е. по сути дела пологие формы со склонами порядка 1°. Почему это вещество не растекалось дальше, неизвестно; но можно вспомнить, что похожие узкие линейные зоны выдавливания магм есть на осях лунных морских валов.

Иногда гряда выражена нерезко, и лишь вдоль ее гребня видны отдельные острые выступы; а иногда рельеф гряд почти исчезает, и видны только светлые размытые полосы с теми же простираниями: вероятно, это дайки, не вышедшие на поверхность и выраженные подъемом и изменениями пород над ними.

2. Пауки в зоне А являются частью группировки этих структур, охватывающей территорию листов 12, 22 и 23. Их особенности были описаны в предыдущем выпуске журнала [2], где говорилось, что пауки — это вулкано-тектонические кольцевые комплексы, образованные в ходе чередующихся: а) излияний с накоплением вулканических продуктов в виде невысокой постройки и б) проседаний центральных частей этой постройки с последующими новыми излияниями и т. д. Особенности пауков на описываемой территории полностью подтверждают это мнение; но надо отметить, что в ходе такого процесса каждый паук приобретает индивидуальные особенности: нет двух одинаковых одноразмерных пауков, тогда как ударные кратеры одного размера и возраста очень похожи.

Например, в патере Ярославны (рис. 4, *a*) видны потоки не менее четырех этапов, образующие как бы вложенные одна в другую уплощенные воронки; видны дайки, секущие на юго-западе пьедестал структуры, но перекрытые позднейшими излияниями внутренних частей; центральный купол смещен к югу.

На том же рисунке на северо-востоке различается вытянутая неправильная структура, на валах которой полностью сохранена текстура окружающей местности, и дайки не перекрыты: видимо, эти валы не аккумулятивные, а созданные при вилообразном вздутии поверхности.

На рис. 4, б только в одном секторе паука видны признаки пирамиды трех этапов излияний, а в остальных секторах они перекрыты смещенным центром и отдельными обширными потоками. Здесь также есть дайки и борозды, секущие центральный купол, но все они перекрыты последним лавовым языком, растекшимся к северо-западу. (Надо подчеркнуть, что, как правило, «разрывы» концентрических структур пауков обусловлены именно перекрытием их лавами позднейших излияний, а не реальным физическим разрывом.)

Более примитивно построена пара на 35-36° с.ш., 21° в.д., или структура на 32,5° с.ш., 29° в.д.: это простые лавовые платформы в небольших депрессиях и с прогнутыми центральными частями. Возможно, самая первая фаза формирования кольцевого комплекса пред-



Рис. 4. Характерные детали на описываемой территории: *а* — патера Ярославны, размер кадра 200 × 300 км; *б* — безымянный паук на 34° с. ш., 25° в.д.; *в* — система даек в грядах Томэм; *е* — группа экструзий на холмистой равнине

ставлена вулканом поперечником 30 км в 80-километровой депрессии на 34° с.ш., 22° в.д.

Интересно отметить, что вообще на заснятой территории очень мало среднеразмерных вулканов земного типа. Вулканы Венеры это или гигантские сооружения типа Беты и Белл, поддерживаемые динамически, или россыпи бесчисленных мелких куполов на лавовых полях. А на месте вулканов поперечниками в десятки километров мы находим либо единичные очень низкие сооружения (при поперечниках до 200-300 км их высоты не более 0,5-1,5 км), либо структуры типа пауков, которые состоят из ряда прогнутых слоев и в целом расположены в депрессиях.

Вероятно, при формировании вулканических построек литосфера под ними была слишком тонкой и непрочной и проседала сразу после того, как постройка превышала какой-то критический вес, и дальнейшее наращивание массы вулканического сооружения приводило только к дальнейшим погружениям. Можно сказать, что эти вулканы росли не вверх, а в глубину.

В восточной части зоны А различается несколько небольших выходов типичного паркета, что позволяет предполагать почти непрерывное его распространение в области между тессерой Лаймы и поднятием Белл.

В подзонах, обозначенных A<sub>1</sub>, гряды и кольцевые формы в той или иной мере перекрыты позднейшими вулканическими накоплениями.

# Б. Гряды Томэм

Здесь необходимо отметить, что термином «гряды» в номенклатуре Венеры обозначаются все системы субпараллельных гряд: и крупные валообразные формы с мелкогофрированной поверхностью; и ленты пересеченного рельефа, где широкие гряды и борозды сменяют друг друга непрерывно, как при полной складчатости; и такие зоны, где узкие резкие гребни (3–5 км ширины) разделены гладкими полосами равнины (по 20–30 км ширины) — как в грядах Томэм.

Они сходны по морфологии с грядами Геры, но более четко выражены, более выдержаны по простиранию, лучше читаются на бесструктурной равнине (рис. 4, в). В нескольких случаях видно, что одна гряда пересекает другую под острым углом (уже одно это исключает возможность складчатого происхождения гряд); часть гряд фактически оказывается односторонними уступами (т.е. они образованы при активных подвижках блоков фундамента).

На северном продолжении гряд, с приближением к выступам долавового паркета, они постепенно изменяют направления, соединяются перемычками и прекращаются в системы полигонов с размерностью от 15–20 до 40 км, что похоже на упрощенную систему паркета. Отдельные гряды служат продолжением структурных линий паркета. Возможно, этот рисунок обусловлен тем, что здесь маломощные лавы перекрыли еще активный паркет.

## В. Центральная холмистая область

В этом районе развиты структуры, почти не встречавшиеся на территориях, описанных раньше. Это многочисленные тесно расположенные холмы по 20–30 км в поперечнике с относительно светлой и «шероховатой», бугристой поверхностью (рис. 4, *г*). По сравнению с обычными пологими лавовыми куполами на равнинах у этих холмов относительно крутые склоны. Иногда на них видны вершинные кратеры, а их края перекрывают тонкие трещины прилегающей местности; в нескольких случаях от них отходят отдельные потоки, или они окружены пятнами сглаженной поверхности, — т.е. это обычные вулканы. У других холмов не видно четкой границы или перекрытий по подножью — они могли быть образованы воздыманиями под напором магмы снизу. Это, а также угловатые, «разбитые» очертания холмов позволяют предположить, что частью эти холмы — вулканические, а частью — экструзивные, т.е. образованные при застывании крупных объемов вязкой магмы, выжатой на поверхность, или в приповерхностных камерах.

На участке зоны B, «зажатом» между зонами  $\Gamma_2$  и A, видна тонкая диагонально-перекрестная трещиноватость: этот участок может оказаться аналогом «хрупкого» рельефа плато Лакшми.

# Г. Центральная равнина

На этой территории развит лавовый плащ, перекрывающий все соседние структуры. В северо-западной части равнины ( $\Gamma_1$ ) вал с зияющими трещинами, отдельные трещины, гряды и полосы бесструктурных равнин образуют неправильное кольцо вокруг центрального блока поперечником около 300 км, образованного молодыми лавами, мелкими вулканическими конусами и пологими валами и куполами. Краевые части этой структуры несколько приподняты над центральным блоком. Не исключено, что здесь под лавами может скрываться овоид.

В юго-западной части структуры намечается крупный, погребенный плащом лав паук, который возобновил свою активность после формирования этого лавового плаща, создав тройную кальдеру с диаметром внешнего кольца 50 км.

#### Д. Северо-восточная зона

На фотокарте эта зона образована светлыми и темными размытыми полосами, лентами и линзовидными формами, вытянутыми с северо-запада на юго-восток. На северо-западе они исчезают в скоплении пауков с их сетью даек, а на юго-востоке их продолжение проектируется на центр поднятия Белл (рис. 5, *a*).

Структурно эта зона состоит из нескольких узких блоков северозападного простирания, помещающихся на разной высоте и перекошенных, т. е. это сочетание грабенов и горстов (но разность высот грабенов и горстов невелика, порядка нескольких сотен метров). Темные пятна и полосы занимают преимущественно депрессии. На высоких блоках видны светлые гряды (дайки), а в грабенах они исчезают, очевидно, под молодыми накоплениями. Кроме того, в грабенах видны очертания каких-то кольцевых структур до 100 км в поперечнике. Контуры этих



Рис. 5. Пояс разрывов в северо-восточной части территории (a), 300 × 400 км и овоидная структура — вал, обрамляющий вулканическую платформу ( $\delta$ ), 400 × 400 км

колец не искажены разрывами, образующими грабены, т.е. горизонтальных смещений здесь не было. Остается не ясным, за счет чего образуются альбедные пятна, формирующие кольца, так как рельефно кольца практически не выражены. Это или эффузивные накопления вдоль кольцевых трещин, или эоловые наносы возле мелких неровностей, образующих кольцо. Не ясен также генезис темных пятен и полос: похоже, что они перекрывают участки между дайками, но таким тонким слоем, что не могут перекрыть невысокие гряды даек. В сочетании с тяготением темного вещества к депрессиям это ставит вопрос о возможности его эолового происхождения.

## Е. Равнина Седны

Восточная окраина равнины Седны примечательна лишь тем, что здесь на нулевом высотном уровне из-под лав выступают останцы паркета (тессера Манзан-Гурмэ), а также тем, что здесь в северозападной части территории (большей частью в пределах номенклатурных границ соседнего листа B-21) расположена необычная структура размером 200–400 км, похожая по форме на человеческое ухо (рис. 5,  $\delta$ ). Это извилистый гладкий вал, который обрамляет эллипсовидную платформу, покрытую низкими сливающимися вулканическими постройками от 5 до 50 км в поперечнике. Сам вал перекрывает подходящие к нему с востока дайки, т.е. является (по крайней мере частично) вулканическим. Вероятно, расположение магматических центров, создавших эту структуру, определялось положением погребенного под лавами овоида (аналогичные формы есть и севернее, на северо-восточной окраине равнины Седны).

О южной равнине (Ж), только частично захваченной съемкой, сказать практически нечего. Единственная структура здесь — это кольцевой очень пологий вал с поперечником 250 км с кольцевыми же трещинами: или это регенерированная структура древнего овоида, или новообразование молодого, послелавового возраста.

#### Выводы

1. Преобладающие на описанной территории сетчатые или полосчатые рисунки поверхности обусловлены развитием здесь обширных полей магматических даек. Системы субпараллельных даек маркируют региональные зоны трещиноватости северо-западных и меридиональных направлений, а поля полигональных даек, возможно, образовались над участками паркета, перекрытого лавами.

2. Кольцевые и концентрические структуры с поперечниками 40– 100 км являются вулкано-тектоническими комплексами центрального типа, которые образовались в несколько этапов, когда извержения и накопление магматических продуктов чередовались с проседаниями центральных частей вулканической постройки.

3. Скопления холмов с грубой поверхностью в центре описываемой территории, вероятно, представляют собой область экструзивного магматизма, отличного от вулканизма равнин, кольцевых комплексов и немногочисленных центральных вулканов.  «Просвечивание» круговых структур в зоне грабенов в северовосточной части района, возможно, говорит о наличии неглубокого захороненного фундамента, подвергшегося интенсивной метеоритной бомбардировке.

#### Литература

- 1. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В-4). Астрон. вестн., 1986, т. 20, № 2, с. 83–98.
- 2. Суханов А. Л., Пронин А. А., Тюфлин Ю. С. Геолого-морфологическое описание области тессеры Лаймы и равнины Берегини (фотокарта поверхности Венеры, лист В-12). — Астрон. вестн., 1980, т. 20, № 4, с. 259–271.

Поступила в редакцию

28.VIII.1986

Геологический институт АН СССР Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. В. Н. Красовского Институт радиотехники и электроники АН СССР

### Geological-morphological Description of Ridges Tomem and Hera Area (Photomap of the Venusian Surface, Sheet B-22)

A. L. Sukhanov, G. A. Burba, V. P. Shashkina, Yu. S. Tyuflin, M. V. Ostrovskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. M. Petrov, A. I. Sidorenko, Yu. N. Alexandrov, A. A. Krimov, A. I. Zakharov

The area between Sedna Planitia and Bell Regio is covered with vast systems of magmatic dikes which form low ridges on the surface. They were created in fissure zones along major faults and, perhaps, above buried parquet. Volcanical features art represented by effusive-extrusive domes in big clusters in the middle of the area and by volcano-tectonical ring complexes.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ОБЛАСТИ БЕЛЛ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-23)

М. С. Марков, Ю. С. Тюфлин, С. А. Кадмичанский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, Н. В. Родионова, В. М. Дубровин, Г. А. Бурба, В. П. Шашкина

Астрономический вестник, 1987, т. XXI, № 1, с. 16-25

В пределах листа выделены четыре геолого-морфологические единицы: 1) реликты доравнинных комплексов; 2) полосчатые равнины; 3) гладкие равнины; 4) вулкано-тектонические комплексы. Поднятие Белл включает несколько отдельных крупных вулканических построек. Кроме того, дешифрированы разломы разных направлений и метеоритные кратеры. Кратко рассмотрена история геологического развития района.

Рассматриваемый район расположен между 25 и 65° в.д. и 40 и 25° с.ш. (рис. 1). Он занимает восточную часть равнины Седны (равнина Берегини) и западную часть равнины Леды. В центральной его части развито вытянутое субмеридиональное поднятие Белл, которое естественно ограничивает две вышеупомянутые равнины. В целом особенности геоморфологии и геологии этого района характерны для областей северного пояса равнин Венеры. Высоты в среднем здесь колеблются от 0,5 до 2,0 км (рис. 2). Исключение составляет лишь область Белл (в состав области входит общее поднятие, состоящее из горы Тепев и северной безымянной вершины), в пределах которой в районе горы Тепев высоты превышают 5,5 км. Северо-восточнее области Белл в районе 55° в.д. и 38° с.ш. расположена отдельная округлая вершина Апи с высотами свыше 3,5 км, структурно не связанная с поднятием Белл.

В пределах равнины Берегини, примерно в средней части ее прослеживаются пологие гряды Безлеи, протягивающиеся с юга в субмеридиональном направлении, а затем она как бы раздваивается к югу от патеры Хросвиты, и одна ее часть уходит к северо-западному углу листа 23, а другая поворачивает на северо-восток, простираясь по азимуту примерно 45°. Аналогичные гряды (Мардеж-авы) прослеживаются и в пределах равнины Леды, у восточного края планшета. Простирание их субмеридиональное, или северо-северо-восточное. Гряды возвышаются над окружающей местностью на 0,5–1 км и представляют собой по-



логие вытянутые валы. Таковы в общих чертах особенности рельефа рассматриваемого района (рис. 1).

В его пределах четко выделяются следующие типы геологических образований: 1) реликты доравнинных комплексов, 2) полосчатые равнины, 3) гладкие равнины, 4) вулканические поднятия и вулканы центрального типа (рис. 3) [1]. В пределах некоторых из них выделяются еще более мелкие частные структуры, которые будут рассмотрены ниже.



Рис. 2. Орографическая схема листа В-23. Прямоугольниками показаны границы кадров, приведенных далее в увеличенном виде

Реликты доравнинных комплексов. В пределах района развито несколько относительно крупных участков развития таких форм. Один из них расположен к северу от 30° с.ш. у 35° в.д. Размеры его достигают 200 × 100 км. Второй развит к северу от Тепев. Его размеры примерно такие же. С юга он ограничен достаточно четко выраженной зоной разлома северо-восточного простирания. Еще один небольшой участок распространения этих образований расположен у северной рамки планшета между 52 и 53° в. д. Наконец, достаточно крупный выход таких комплексов встречается у южной части гряды Мардеж-авы. Для этих комплексов характерна их сильная нарушенность разнообразно ориентированными зонами разломов, которые не прослеживаются в смежных участках равнин (полосчатых и гладких). В связи с этим можно думать, что эти участки представляют собой доравнинные структуры, часть из которых вздернута (приподнята) вблизи зон разломов. Не исключено, что часть этих останцов является образованиями типа паркета, особенно это касается участка, расположенного в южной части гряды Мардеж-авы.

**Полосчатые (сетчатые) равнины.** Они расположены на западе и востоке планшета, занимая более приподнятые участки равнинных областей. Средние высоты в их пределах колеблются от 1 до 2,0 км.



На западе района полосчатая равнина носит название гряд Безлеи, простирающихся от южной кромки листа (25° с.ш.) в субмеридиональном направлении. Примерно у 35° с.ш. гряды раздваиваются и одна их ветвь уходит к северо-западному углу планшета, а другая — на северо-восток к патерам Коттауэр и Деборы.

Вторая область развития полосчатых равнин расположена на востоке планшета — гряды Мардеж-авы, которые простираются от южной кромки листа на север в район к востоку от горы Апи. Характерной особенностью строения этих областей является наличие систем радиоярких полос, по существу заполняющих почти все пространство этих районов. Эти радиояркие полосы, вероятно, представляют собой системы даек [2], и в этом случае полосчатые равнины могут представлять собой области с трещинными излияниями лав. Часть из них слабо выражена в рельефе, тогда как другие находят отражение в рельефе в масштабе радарной съемки. Максимальная протяженность таких полос достигает 200–250 км. Они часто продолжают друг друга по простиранию, иногда образуя кулисообразные построенные полосы.

В южной части гряды Безлеи эти дайки простираются в меридиональном направлении, а затем примерно у 32° с.ш. эта система даек разветвляется и одна ее часть уходит на северо-запад к северо-западному углу планшета, а другая — на северо-восток к 45° в. д. В месте разветвления образуются участки, где эти системы даек пересекаются и образуют очень сложный петельчатый узор, в чем-то напоминающий системы деформаций на вершинах соляных куполов (рис. 4). При этом видно, что дайки одних направлений смещают дайки других, но каких-либо закономерностей, свидетельствующих об их разновозрастном формировании, установить не удается. Иногда параллельно дайкам или продолжая их, развиты трещины растяжения. Другая отчетливо выраженная система даек (дайковый пояс) развита в районе гряд Мардеж-авы, где распространены системы даек субмеридионального и северо-восточного направлений. Кроме этих двух обширных участков распространения полосчатых равнин в пределах листа 23 встречаются и более мелкие области их развития. Часть из них распространена к северо-западу от г. Тепев, у северной кромки листа и в ряде других мест.

На юге гряд Безлеи у 36° в. д. видно, как системы даек, сближаясь и сливаясь друг с другом, переходят в зону отчетливо выраженных гребней (гряд) и разделяющих их небольших долин и образуют структуру, напоминающую линейные пояса, широко распространенные в пределах равнин северного полушария Венеры. Ширина отдельных гряд достигает 10–15 км, протяженность — 150–200 км. Длина этого пояса в пределах южной части гряд Безлеи около 450 км, максимальная ширина 50–60 км. Он, слабо изгибаясь, в основном простирается в меридиональном направлении. Иногда положительные формы рельефа образуют отдельные невысокие монолитные гряды.



Рис. 4

Рис. 5



Рис. 5. Безымянная патера к юго-востоку от патеры Хросваты, размеры кадра 200 × 300 км. Видна система полукольцевых гряд; внешняя система нарушена дайками северо-северо-западного простирания; в центре внутреннего кольца видна вулканическая постройка с кальдерой

Характерной особенностью строения полосчатых равнин является присутствие здесь очень своеобразных кольцевых структур (пауков), внешне напоминающих по своему строению некоторые кольцевые магматические структуры Земли [3]. К их числу относятся выделяемые здесь патеры Хросвиты, Коттаузр, Деборы и еще большее количество безымянных кольцевых форм. Часть из этих структур слабо выражена в рельефе в виде невысоких (несколько сот метров) округлых гребней с относительно опущенной центральной частью.

На радиолокационных снимках видно, что эти структуры состоят из системы вложенных друг в друга «колец» (рис. 5). Часто такое «кольцо» не образует замкнутого круга, а представлено системами дуговых валов. Видно также, что отдельные системы даек, как это установлено А. Л. Сухановым, разрывают сплошность наружного кольца, не проходя внутрь следующего. Другие дайки секут более внутреннее кольцо и т. д. Часть даек также образует кольца, подчеркивая форму этих структур. Создается впечатление, что при образовании этих структур участвовали процессы растяжения, при этом внешние кольца разрывались в ходе образования даек и растягивались. В пределах таких колец в их внутренней опущенной части иногда встречаются отдельные горки, представляющие собой, по всей видимости, небольшие вулканы центрального типа. Вулканы центрального типа, диаметром в несколько десятков километров и более, мелкие вулканические постройки, кроме того, распространены на территории листа 23 не только в пределах полосчатых, но и в пределах гладких равнин.

Наконец, в полосчатых равнинах встречается еще один тип структур. Это грабенообразные впадины. Они распространены в северозападной ветви гряд Безлеи и в южной части гряд Мардеж-авы. Эти структуры выглядят на радиолокационных изображениях как более темные полосы или пятна, днища которых опущены по отношению к ограничивающим валам. Видно (особенно хорошо в северо-западной ветви гряд Безлеи), что они ограничены более светлыми валообразными поднятиями, расположенными вдоль разломов северо-западного простирания. Ширина грабенообразных впадин местами достигает 100 и более километров, длина — несколько сот. В наиболее крупных из таких структур также видны системы радиоярких полос (даек), вытянутых по их простиранию.

Гладкие равнины занимают наиболее низкие участки района. Они распространены, как правило, на высотах 0,5–1,0 км. Исключение составляет лишь часть гладкой равнины, расположенной в пределах поднятия Белл к северу от горы Тепев, которая залегает на высотах 2,0 км и более. Наиболее крупные выходы комплексов гладких равнин встречаются к юго-западу, востоку и северу от поднятия Белл. Гладкие равнины выделяются своим однородным серым фоном. В отдельных местах гладких равнин видны немногочисленные радиояркие полосы (дайки). Однако здесь их значительно меньше, чем в пределах полосчатых равнин. Встречаются здесь также и вулканические аппараты, которые иногда придают равнинам «прыщеватый» облик.

**Тектоно-вулканическое поднятие Белл.** В центральной части района, между 45 и 50° в. д. располагается меридионально вытянутое поднятие Белл. Средние высоты в его пределах достигают 2–2,5 км. В южной части располагается гора Тепев с максимальными высотами, превышающими 5,5 км. В северной части поднятия располагается более пологая безымянная вершина, возвышающаяся на 1 км над общим поднятым пьедесталом зоны Белл. К северо-востоку от поднятия располагается округлая гора Апи, где высоты превышают 2,5 км.

Особенности строения каждой из рассматриваемых вершин позволяют предполагать, что они представляют собой крупные вулканические постройки, из которых наиболее четко сохранился (а следовательно, и является наиболее молодым) вулкан Тепев. На его склонах отчетливо дешифрируются отдельные разновозрастные лавовые потоки. При этом наиболее молодыми являются потоки, располагающиеся ближе к вершине. В западной части вершины горы Тепев расположена кальдера ( $D \approx 40$  км). На восточном склоне расположены два крупных

вулканических аппарата, наиболее крупный из которых имеет диаметр в своем основании около 50 км. Лавовые потоки горы Тепен отчетливо накладываются на отложения полосчатых и гладких равнин, перекрывая отдельные структуры, развитые в их пределах. Менее сохранился вулкан Безымянный, расположенный в северной части поднятии Белл (рис. 6). Его высота значительно меньше и не превышают 3 км. В центральной части вулкана также наблюдается кальдера диаметром около 30 км. Вблизи нее дешифрируются отдельные лавовые потоки. На юго-восточном склоне вулкана расположена еще одна небольшая вулканическая постройка, а в пределах равнин вблизи вулкана отчетливо распознаются мелкие и более крупные вулканические аппараты. С северной части вулкан Безымянный ограничен зоной разломов северо-западного — юго-восточного простирания. С восточной и юго-восточной стороны вдоль пьедестала вулкана распространена система параллельных, отчетливо выраженных в рельефе систем гряд и разделяющих их долин. Не исключено, что эта структура представляет собой образование, напоминающее овоид и находящееся на начальном этапе образования. На западном склоне вулкана Безымянного и на восточном склоне вулкана Тепев дешифрируются меридиональная система трещин растяжения более молодых, чем системы лавовых покровов склонов вулкана. Возможно, что их образование связано со сводовым воздыманием поднятия Белл.



Рис. 6. Крупный безымянный вулкан с овоидными структурами у подножья восточного склона, размеры кадра 300 × 500 км

Расположенная к северо-востоку гора Апи, вероятно, также представляет собой вулкан, хотя элементы вулканического рельефа выражены здесь значительно слабее.

Таким образом, центральная часть района представляет собой область относительно молодого вулканизма, видимо, причинно связанного со сводовым воздыманием области Белл в целом. Поднятие формировалось достаточно длительно, о чем свидетельствует разная сохранность развитых здесь крупных вулканов. Со сводовым поднятием области Белл, вероятно, связано и формирование относительно молодой меридиональной системы трещин растяжения.

**Разломы** на территории листа имеют ограниченное распространение. Наиболее четко здесь развита система северо-западных южно-восточных разрывов. Одна из таких систем разломов приурочена к северо-западной ветви гряд Бсзлеи, и с ней связаны отдельные грабенообразные впадины. Затем она прерывается в пределах меридионального отрезка гряд и вновь прослеживается к юго-востоку от нее, затем вновь появляется у восточной границы гряд и продолжается вплоть до западного подножья вулкана Тенев. Другой разлом такого простирания, как уже отмечалось, прослеживается по северному краю вулкана Безымянного.

Менее отчетливо выражена другая система разломов юго-западного — северо-восточного простирания. Они выделяются к северу от вулкана Тепев и в южной части гряд Мардеж-авы. С первыми из них связаны выходы доравнинных комплексов.

Ударные кратеры распространены в пределах района достаточно ограничено. Наиболее крупные из них — Потанина и Войнич. Кратер Потанина имеет диаметр свыше 90 км. В его пределах видна центральная горка, а в восточной части намечается двойное кольцо. Кратер Войнич имеет диаметр около 50 км. В нем также отчетливо видна центральная горка, а вблизи него — широкая полоса выбросов, отчетливо различающихся в виде радиояркого пятна.

**Кратеры-фантомы** (слабо выраженные кольцевые структуры) часто различаются в виде отдельных, очень нечетко выраженных кольцевых форм в пределах полосчатых и гладких равнин. Их природа не ясна из-за отсутствия морфологических деталей строения.

История геологического развития рассматриваемого района, исходя из приведенных выше данных, может быть представлена следующим образом. До образования пород полосчатых равнин здесь, по всей видимости, были распространены комплексы пород, сильно нарушенные многочисленными мелкими разломами. Такие образования достаточно часто встречаются среди вулканических равнин северного полушария Венеры в виде отдельных останцов. Они получили условное наименование «хрупкий» рельеф. Однако ограниченность выходов этих комплексов не позволяет выяснить их природу и условия образования. Следующие по возрасту образования, развитые в районе, представлены отложениями полосчатых равнин, которые, по всей видимости, являются областями трещинных вулканических излияний, формирования дайковых поясов и своеобразных вулканических кольцевых структур («пауков»). Образование этих структур, вероятно, происходило в условиях растяжения, о чем свидетельствует развитие здесь дайковых поясов и параллельных им трещин растяжения, разрывы кольцевых структур (пауков) (см. рис. 5), развитие здесь грабенообразных впадин и другие данные. Этот процесс не был одноактным, что подтверждается наличием нескольких разновозрастных поколений даек.

Более молодыми являются гладкие равнины, что отчетливо видно из перекрытия их отложениями подавляющего числа даек полосчатых равнин (хотя отдельные дайки прослеживаются и на гладких равнинах). По наличию на поверхности этих зон многочисленных вулканических аппаратов центрального типа можно предполагать, что гладкие равнины также выполнены вулканическими породами.

Завершается история развития района образованием в его пределах поднятия области Белл и развитием здесь отложений крупных центральных вулканов Тепев и Безымянного. Эта структура, видимо, формировалась как общее поднятие, с чем связано поднятие здесь на высоту до 1 км отложений гладких равнин. Затем на общем поднятом пьедестале возникли две крупные вулканические постройки — вулканы Безымянный и Тепев, которые существовали достаточно длительно, так как в их пределах распознаются разновозрастные лавовые комплексы. На восточном склоне вулкана Тепев, кроме того, располагаются достаточно крупные ( $D \approx 50$  км) вулканические конусы. Формирование общего сводового поднятия области Белл, видимо, продолжалось и в дальнейшем, и с ним связано образование трещин растяжения, наиболее отчетливо видимых на западном склоне вулкана Безымянного.

Таким образом, формирование северного пояса равнин Венеры несомненно тесно связано с процессами вулканизма и является достаточно длительным и неодноактным процессом.

#### Литература

- 1. Барсуков В. Л., Суханов А. Л., Аким Э. Л. к др. Геолого-морфологическая характеристика северного полушария Венеры. Геотектоника, 1986, №4, с. 4–25.
- 2. Суханов А. Л., Бурба Г. А., Шишкина В. П. и др. Геолого-морфологическое описание области гряд Томэм и Геры (фотокарта поверхности Венеры, лист В-22. Астрон. вестн., 1987, т. 21. № 1, с. 5–15.
- 3. Свешникова Е.В. Магматические комплексы центрального типа. М.: Недра, 1973. 184 с.

Геологический институт АН СССР Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского Институт радиотехники и электроники АН СССР Поступила в редакцию 28.VIII.1986

## Geological-morphological Description of the Bell Regio (Photomap of the Venusian Surface, Sheet B-23)

M. S. Markov, Yu. S. Tyuflin, S. A. Kadnictianskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. P. Petrov, A. I. Sidorenko, Yu. N. Alexandrov, N. V. Rodionova, V. M. Dubravin, G. A. Burba, V. P. Shashkina

Four geological-morphological units are distinguished on the map: 1) remnants of pre-plain complexes, 2) striped plains, 3) smooth plains, 4) volcano-tectonical complexes. The Bell dome comprises several individual large volcanic constructions. Faults of different oriental ions and impact craters are recognised. Brief description of local geologic history is given.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕССЕРЫ ЛАЙМЫ, ОБЛАСТИ ТЕЛЛУРЫ И РАВНИНЫ ЛЕДЫ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-13)

А. Л. Суханов, Н. Н. Бобина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, Л. С. Ледовская, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко, Ю. Н. Александров, Г. М. Петров, А. И. Захаров, А. П. Кривцов

Астрономический вестник, 1987, т. XXI, №3, с. 295–205

Центральную часть района занимает равнина Леды. Ее формирование можно объяснить подъемом вещества из недр планеты и его горизонтальным растеканием. Системы площадных дислокаций нескольких направлений («паркет») вокруг равнины Леды образованы материалом, двигавшимся вниз под уклон в виде пластических потоков (тессеры Лаймы и Деклы, область Теллуры). Грядово-бороздчатые пояса (гряды Камари и др.) образовались вдоль краев участков «паркета» над погружающимися астеносферными потоками.

Фотокарта листа В-13 (рис. 1), как и предыдущие, составлена в нормальной равноугольной конической проекции Ламберта-Гаусса в масштабе 1:4 000 000 по радиолокационным снимкам, полученным станциями «Венера-15, -16» [1]. Рельеф района показан на рис. 2. Геологическое дешифрирование выполнено А. Л. Сухановым в масштабе 1:5 000 000, генерализацию составленной им карты до масштаба 1:16 000 000 провели Н. Н. Бобина и Г. А. Бурба (рис. 3). На рис. 4 дана схема районирования территории, согласно которой ведется дальнейшее описание. Сразу же необходимо отметить, что этот район можно считать одним из самых сложных на заснятой территории Венеры, и сделанные на этом материале выводы остаются во многом дискуссионными.

## А. Тессера Лаймы

Западная часть тессеры Лаймы находится в пределах листа B-12 и описана ранее [2, 3]. Ее северная половина, смыкающаяся с областью A<sub>1</sub> на рис. 4, представляет собой гипсометрически повышенную (до 2,5–3 км) область растяжения, откуда материал двигался на ЮВ под уклон 2:1000 в виде глетчеровидных потоков. В пределах листа


290 Геолого-морфологическое описание тессеры Лаймы и области Теллуры



Рис. 2. Гипсометрическая схема листа В-13. Высоты указаны над сферой радиусом 6051 км

В-13 эти потоки несколько сужаются, а поперечные трещины становятся не зияющими, как на западе, а закрытыми, и частота их нарастает до 30 на 100 км длины потока. По общему структурному рисунку эти потоки похожи на подпруженные сливающиеся ледники: как и в последних, поперечные трещины могут прослеживаться с одного потока на другой. На стыке с грядами Камари потоки заканчиваются более или менее крутыми откосами, иногда перекрывая эти гряды (рис. 5, *a*); высота откосов достигает 0,5–1 км. На первый взгляд создается впечатление, что именно гряды Камари являются горным барьером, который блокирует распространение потоков тессеры Лаймы; однако эти гряды лежат на 0,5–1 км ниже тессеры Лаймы. Вероятно, «скученная», сжатая структура потоков А<sub>1</sub> связана с увеличением вязкости (остыванием?) материала при движении в восточном направлении.

Паркет района  $A_2$  смыкается на  $45^{\circ}$  в. д. с хаотическим «стоячим» паркетом листа B-12. Его структура менее упорядоченна, чем в районах  $A_1$  и  $A_3$ , хотя заметно преобладание извилистых северо-восточных трещин растяжения и слабее выраженных C3-линеаментов. Кроме того, на этом участке видно несколько кратеровидных или эллиптических депрессий с поперечниками до 60-90 км. От некоторых из них на ЮВ тянутся «тени» или «хвосты» слабо деформированного материала: это говорит о том, что материал  $A_2$  двигался к ЮВ, и его вряд ли можно строго называть «стоячим» паркетом, но он не разбивался на дифференцированные потоки. Движение материала  $A_2$  к ЮВ также косвенно следует из того, что в районе  $A_1$ , судя по структурам, дальше





Рис. 4. Схема структурного районирования листа В-13. Условные обозначения: 1 — разные блоки паркета; 2 — ямчатая равнина; 3 — холмистая равнина; 4 — грядово-бороздчатые пояса линейных дислокаций; 5 — структуры типа овоидов; 6 — вулкан Апи; 7 — направления перемещений

всего продвинуты южные потоки, примыкающие к A<sub>2</sub>. Граница районов A<sub>1</sub> и A<sub>2</sub> проходит по каньону Бабы-яги.

Участок  $A_3$  характеризуется такой же потоковидной структурой, как и  $A_1$ , но здесь наибольшие амплитуды перемещения связаны с СВ-потоками, также примыкающими к  $A_2$ . Создается впечатление, что материал  $A_2$  представляет собой центральную часть некоего мегапотока, направленного на ЮВ, а материал  $A_1$  и  $A_3$  — его краевые части с более дифференцированными движениями.

Блок A<sub>4</sub> образован беспорядочным паркетом, почти целиком перекрытым лавами с многочисленными вулканическими куполами. Вероятно, его следует объединять не с тессерой Лаймы, а с обрывками паркета, окружающими (и подстилающими) поднятие Белл.

## Б. Северная часть области Теллуры

В пределы листа В-13 входит лишь северная часть (Б<sub>1</sub>) монолитного массива паркета в области Теллуры с высотами до 2,5 км. Основная часть массива находится южнее листа В-13. Паркет в северной части области Теллуры делится на несколько блоков по 150–250 км в поперечнике с более или менее индивидуальными структурными рисунками на поверхности; для них характерна «округло-полигональная

отдельность» с размерностью 30–50 км. Ведущими в структуре паркета являются борозды, а гряды обычно оказываются останцами между соседними бороздами. В целом борозды северо-западных и северо-восточных направлений образуют общую для всех блоков ромбическую сеть, так что вряд ли эти блоки перемещались относительно друг друга.

Восточная часть основного массива отделена от него несколькими субмеридиональными грабенами шириной 10-30 км с «сухими», не залитыми лавой днищами. Отсюда, от юго-восточного угла листа B-13, тянется к северо-западу огромная дуговидная полоса паркета (Б<sub>2</sub>), окаймляющая депрессию B<sub>1</sub>. Высота этой полосы над окружающей местностью в среднем около 1 км. Структурный рисунок полосы образован протяженными продольными грабенами и уступами и короткими трещинами растяжения, в целом поперечным простиранию полосы. Кроме того, местами эта полоса сужается, понижается и разбивается поперечными разрывами, разделяясь на отдельные блоки, которые как бы «разбегаются» в стороны от депрессии B<sub>1</sub>. Это впечатление подтверждается структурой в юго-восточной части листа B-13: здесь полоса паркета Б<sub>2</sub> явно отодвинута от массива Б<sub>1</sub> так, что образовалась «щель» шириной до 150 км.

В этой полосе паркета видны несколько линзовидных впадин с размерами от  $30 \times 60$  км до  $80 \times 180$  км. Края этих впадин образованы приподнятыми валами, и характерно разделение вала продольными бороздами так, что он оказывается двойным (рис. 5, *б*). Это похоже на лавовые ванны в южной части области Теллуры (лист B-24) и отдаленно напоминает структуру «пауков», но во впадинах паркета Б<sub>2</sub> не видно следов излияний и извержений; создается впечатление, что на их месте некогда вздувались купола, которые затем почему-то обрушивались, оставляя валы по краям.

Несколько мелких блоков паркета, отделенных от массивов Б1 и Б<sub>2</sub>, расположено в депрессии В<sub>1</sub>. Самый крупный из них блок Б<sub>3</sub> (тессера Мени), вероятно, подвергся значительным деформациям; во всяком случае на нем нет следов древних ортогональных или ромбических структур (если они были), извилистые борозды образуют хаотический рисунок, депрессии залиты лавами. Западная часть блока Б<sub>3</sub> (примерно на 73-75° в.д.) окаймляется серией крупных трещин растяжения в окружающих лавах, как если бы блок Б<sub>3</sub> двигался на восток; с этим предположением согласуются и широтные разрывы блока, по которым предполагаются широтные смещения. Как и полоса Б<sub>2</sub>, этот блок приподнят на 1 км над окружающими лавами. Если полоса паркета Б<sub>2</sub> теоретически могла бы иметь динамическую поддержку (например, как современная островная дуга), то такой небольшой блок, как Б<sub>3</sub> (300–350 км), очевидно, должен поддерживаться изостатически: например, при  $\Delta \sigma = 0.3$  г/см<sup>3</sup> под ним должен быть легкий корень мошностью около 10 км.



Рис. 5. Отдельные структуры на листе В-13, размер кадров 220 × 280 км: а — фронтальная часть тессеры Лаймы (слева), перекрывающая меридиональные гряды Камари; б — линзовидные впадины с двойными бортами; в — «зародыш» грядово-бороздчатого пояса; г — пауковидные формы на пересечениях грядово-бороздчатых поясов

## В. Равнины

Равнина Леды ( $B_1$ ) занимает обширную котловину со средними высотами  $\pm 0,5$  км. По принятой терминологии, она относится к холмистым равнинам, по местами ее следует скорее называть «ямчатой», поскольку она покрыта пологими расплывчатыми западинами с характерными размерами 30-60 км без валов. С несколькими такими депрессиями в северной части котловины связаны вулканические отложения, перекрывающие окружающую местность, и они условно интерпретируются как вулкано-тектонические центральные комплексы.

На этой равнине встречаются также отдельные блоки паркета, иногда еле просвечивающие из-под лав. В лавах широко распространены системы трещин растяжения, и почти всюду присутствуют многочисленные ветвистые дайки без определенной ориентировки [4, 5]. В северо-восточной части котловины вдоль полосы паркета Б<sub>2</sub> прослеживается система полигональных даек, похожих рисунком на соседний паркет; видимо, они образовались по трещинам в лавах, перекрывших часть этого паркета. Некоторые дайки продолжают в лавах разрывы, секущие паркет, или располагаются на продолжении поясов линейных дислокаций. Очень интересны переходы даек и трещин растяжения в раздвоенные валы (или валы с ложбиной вдоль гребня), например 48° с. ш., 72,5° в. д. или 48,5° с. ш., 61,5° в. д.; такие валы, видимо, являются первой стадией, зародышем поясов линейных дислокаций (рис. 5, e).

На равнине Леды различается, по крайней мере, пять размытых структур типа овоидов. Гипсометрически они почти не выражены и дешифрируются по концентрическим системам даек, темных и светлых полос, трещин, полос паркета и по вулканическим сооружениям вдоль кольцевых трещин. Структура с центром на 46° с.ш., 58,5° в.д. поперечником около 500 км образована двумя размытыми концентрическими кольцами; похоже, что ее центральная часть перекрыта сильнее, чем периферические. В двух случаях структурные взаимоотношения свидетельствуют о наложении овоидов на паркет Теллуры, т.е. они образовались в этой котловине *после* формирования паркета, как и заполняющие котловину лавы.

В целом преобладание структур растяжения па равнине Леды (трещин, даек, грабеновидных и изометричных депрессий) свидетельствует о том, что борта этой котловины, видимо, расходились в центробежном направлении. Южнее, на листе 24, мы видим паркетный купол Теллуры, который только начал раскалываться на куски с образованием лавовых ванн на своде и узких поясов на периферии купола; на плато Лакшми подобный процесс дошел до образования лавового плато в его горном обрамлении. Здесь же, на листе 13, мы, видимо, имеем дело с промежуточной стадией, и равнина Леды представляет собой растянутый и обрушенный паркетный купол с лавовым заполнением его апикальной части.

Судя по тому, что все участки паркета занимают приподнятое положение (на 0,5–1,5 км относительно лав), они представляют собой фрагменты легкой коры, однако неизвестно, смыкались ли эти фрагменты в сплошную корку перед образованием купола и затем «расползлись» до современного положения или между ними были другие блоки, ныне перекрытые лавами.

**Равниеа Берегини (В**<sub>2</sub>) в пределах листа В-13 представляет собой обрамление поднятия Белл. Она сложена относительно гладкими лавами, на которых неоднородностями фототона выделяются, по-видимому, отдельные крупные потоки лав; только в ЮЗ-углу листа виден изогнутый вал, состоящий, по-видимому, из нескольких экструзивно-эффузивных тел. Часть лав равнины связана с вулканом Апи, двухкальдерная вершина которого (с относительным превышением 1,5 км) расположена на 39° с. ш., 54,5° в. д.

Безымянная **равнина В**<sub>3</sub> образована паркетом, перекрытым маломощными вулканическими накоплениями. На ней различается несколько крупных пологих куполов, оконтуренных узкими депрессиями.

Западная часть **равнины**  $B_4$  относится к слабо деформированному блоку, разделяющему тессеры Деклы и Фортуны. Восточная часть этой равнины примечательна перекрестными поясами линейных дислокации (о которых будет говориться ниже) и цепью куполов и «пауков» — вулкано-тектонических центральных комплексов с оперяющими их дайками. Вся цепь находится в пологой депрессии (глубиной в первые сотни метров). Любопытен «паук» на 57° с.ш., 82° в.д.: здесь не видно признаков излияний лав из центра, как если бы вытянутое тело паука 140 × 320 км образовано вздутием над обширным лакколитом.

### Г. Пояса линейных дислокаций

Пояса линейных дислокаций охватывают огромной дугой все паркетные участки, относящиеся к области Теллуры, прерываясь только на западе, со стороны поднятия Белл. Собственно говоря, эти пояса образуют границу области Теллуры.

В северо-восточном секторе листа В-13, на равнине В<sub>4</sub>, пояса северо-западного и северо-восточного направлений образуют перекрестную систему; северо-западные пояса следуют контурам тессер Деклы и Теллуры. Эти пояса состоят из резко очерченных грабеновидных борозд, субпараллельных или кулисных, и из подчиненных им гряд, часто оказывающихся останцами между бороздами. Системы гряд и борозд расположены на очень слабо выраженных валах, по крайней мере частично имеющих аккумулятивное (вулканическое) происхождение.

Какие из этих перекрестных валов образовались раньше, а какие позже, остается неясным, поскольку места пересечении перекрыты либо массивными лавовыми щитами с множественными мелкими вулканами, либо пауковидными структурами (рис. 5, *г*), так что перекрестные системы гряд и борозд образуют радиальные «лапки» этих структур.

Ведущая роль растяжений в образовании этих поясов представляется несомненной, но региональными горизонтальными напряжениями трудно объяснить сосуществование поясов, окаймляющих тессеру Деклы, и таких же поясов, перпендикулярных к ним. Скорее всего растягивающие усилия возникали на сводах пологих вздымающихся валов; это объясняет и появление пауков на их пересечениях. Гряды Аллат, судя по их структуре, также образованы за счет подъема цепи диапировидных тел примерно по  $40 \times 60$  км в поперечнике.

Наиболее сложно построены гряды Камари, где сходятся три пояса линейных дислокаций: восточный, западный н секущий их на севере субширотный пояс (рис. 6, а). С одной стороны, здесь широко распространены признаки интрузивно-эффузивной деятельности: дайки, секущие соседние структуры, вулканические сооружения и массивные покровы, перекрывающие эти структуры (рис. 6, б), пологие купола, окруженные «воротничками» узких гребней (диапиры?), вытянутые кратеры. Например, на 59° с. ш., 56,5° в. д. вулкан  $40 \times 60$  км расколот пополам и пересечен по этому расколу массивной дайкой (рис. 6, в). Все это говорит о повышенной проницаемости коры. Кроме того, гряды Камари явно пересекают западную часть тессеры Деклы, и южный уступ этой тессеры примерно на 150 км прослеживается под материалом гряд, очевидно, вулканическим. Наконец, центральная часть пояса примерно по меридиану 61-62° в. д. опущена на 1 км относительно соседних тессер. Все перечисленное указывает на растяжение в пределах гряд.



Рис. 6. Северо-западная часть гряд Камари (300 × 450 км). Пояснения буквенных обозначений даны в тексте

Однако с другой стороны, в СЗ части пояса видны флексуровидные кулисные гряды (рис. 6, a), которые сформировались скорее всего при движении материала тессеры Лаймы на восток, так что гряды Камари сжались. Выше уже говорилось, что материал тессеры Лаймы местами перекрывает гряды Камари (надвинут?). Примерно на 57–58° с. ш. и 50° в. д. видна любопытная структура: два параллельных уступа на расстоянии  $\sim 20$  км, повторяющих изгибы один другого и перекрытых двумя одинаковыми вулканами на одном и том же отрезке (рис. 6, d). Эта структура возникла скорее всего при надвигании литосферной пластины, перекрывшей магмоподводящий разлом; надвигание происходило, видимо, под уклон, т. е. на восток, в сторону гряд Камари.

Общее положение гряд Камари между тессерой Лаймы, двигавшейся на юго-восток, и тессерой Деклы, двигавшейся на север и северо-запад, указывает на обстановку сжатия в грядах.

Таким образом, для истолкования структуры грядово-бороздчатых поясов на территории листа B-13 остается, по-видимому, одно объяснение: эти пояса сформировались за счет скучивания литосферного (корового?) материала, расплавления погруженных «корней» скученного материала и поднятия и внедрения магм в виде линейных диапиров. Скучивание материала происходит по краям паркетных куполов, где растекающиеся от центра астеносферные потоки начинают погружаться. По-видимому, изогнутые пояса вокруг паркетных куполов отличаются по механизму образования от субпараллельных поясов в секторе между равниной Аталанты и областью Метиды: первые в какой-то мере соответствуют земным островным дугам, вторые срединно-океаническим хребтам.

Изучение территории листа П-13 позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Восточная часть тессеры Лаймы представляет собой терминальную часть области гравитационного пластического движения разогретого корового материала в юго-восточном направлении по очень пологому склону, с небольшими надвиганиями восточного фронта тессеры па прилегающую территорию.

2. Равнина Леды образовалась в обрушенной апикальной части паркетного купола, легкий коровый материал которого растаскивался к краям купола растекающимся радиально астеносферным потоком. Овоидные структуры в обрушенной части купола, возможно, являются новообразованиями.

3. Грядово-бюроздчатые пояса этого района образовались по краям паркетных поднятий и между ними в результате скучивания литосферного или корового материала, сопровождавшегося его плавлением и линейным магматическим диапиризмом.

#### Литература

- 1. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В-4) // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. № 2. С. 83–98.
- 2. Суханов А. Л., Пронин А. А., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание области тессоры Лаймы и равнины Берегини (фотокарта поверхности Венеры, лист В-12) // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. № 4. С. 272–286.
- 3. *Суханов А. Л*. Паркет: области площадных пластических дислокаций // Геотектоника. 1986. № 4. С. 60–76.
- 4. *Суханов А. Л., Бурба Г. А., Шишкина В. П.* и др. Геолого-морфологическое описание области гряд Томэм и Геры (фотокарта поверхности Венеры, лист В-22) // Астрон. вестн. 1987. Т. 21. № 1. С. 5–15.

5. *Марков М. С., Суханов А. Л.* Дайковые зоны на Венере // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. № 1. С. 172–175.

Геологический институт АН СССР Поступила в редакцию Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского ГУГК при СМ СССР Институт радиотехники и электроники АН СССР

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ТЕЛЛУРЫ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-24)

М. С. Марков, В. П. Шашкина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Г. М. Петров, Ю. Н. Александров, А. И. Сидоренко, В. П. Синило, Н. В. Родионова

Астрономический вестник, 1987, т. XXI, №4, с. 286-297

Системы площадных дислокаций нескольких направлений («паркет») в возвышенности области Теллуры занимают центральную и восточную части листа. Восточная граница области занята равниной Ниобы, а ее западная часть — равниной Леды, на которой распространены линейные поднятия северо-восточного простирания (гряды Мардеж-авы).

Фотокарта Венеры масштаба 1:5000000 составлена по материалам радиолокационной съемки, выполненной в 1983–1984 гг. станциями «Венера-15, -16» с помощью радиолокаторов бокового обзора (рис. 1). Лист карты В-24 охватывает область Теллуры (без ее крайней северной части), южную часть равнины Леды и западную часть равнины Ниобы (рис. 2).

Через южную часть равнины Леды в северо-восточном направлении простираются гряды Мардеж-авы, приподнятые относительно окружающей равнины на 0,5–1 км. В целом равнинные области характеризуются относительно пологим рельефом и высотами от 0 до 1,5 км. Возвышенность Теллура поднята относительно равнинных областей на 1,5–2 км. Максимальные высоты здесь достигают 3,5 км.

Район сложен геологически весьма разнообразными структурами (рис. 3). Здесь выделяются гладкие равнины, занимающие наиболее пониженные участки рельефа [1]. Они характеризуются однотонной радиояркостью. Иногда в пределах равнин дешифрируются радиояркие извилистые уступы, которые скорее всего маркируют края лавовых потоков. В пределах района такие структуры наиболее четко выражены в северной части у восточной рамки листа. В пределах гладких равнин часто встречаются скопления мелких вулканов диаметром 2–10 км. Изредка гладкие равнины рассечены радиояркими полосами (дайками) и, кроме того, в их пределах встречаются отдельные трещины растяжения [2].







Рис. 2. Гипсометрическая схема листа В-24. Высоты указаны над сферой радиусом 6051 км

В пределах равнины Леды впадины, представляющие собой гладкие равнины, вытянуты в направлении с юго-запада на северо-восток параллельно общей ориентировке структур. На равнине Ниобы их ориентировка более хаотична. Гладкие равнины представляют собой впадины, выполненные продуктами вулканизма скорее всего базальтового состава.

Центральную часть района занимает возвышенность Теллуры. Она состоит из двух типов структур: поясов линейных деформаций и зон хаотических структур (паркет).

Возвышенность Теллуры с запада и востока окружена поясами линейных деформаций. Вблизи них существуют довольно широкие зоны взаимодействия поясов и паркета. В пределах поясов отчетливо дешифрируются системы линейных хребтов и долин, простирающихся, как правило, параллельно простиранию всей структуры в целом. Длина хребтов достигает 100-150 км. Параллельно им развиты разломы, которые часто являются трещинами растяжения. Это отчетливо выявляется по их симметричному строению: наличию впадины в центральной части и окружающих ее с двух сторон хребтиков. В пределах поясов и непосредственной близости от них распространены грабенообразные впадины — узкие радиотемные полосы, простирающиеся параллельно общему направлению пояса. Длина таких впадин местами превышает 200 км, ширина — 30 км. Например, грабен, развитый в южной части пояса, ограничивающего с запада область Теллуры. Они являются характерной особенностью строения поясов линейных деформаций. Наиболее широкие грабены выполнены вулканическими образованиями.

На их днищах видны отдельные вулканические конусы, а в ряде случаев в их пределах отчетливо различаются отдельные радиояркие полосы (дайки). Наиболее отчетливо такие структуры видны в грабенах, развитых в поясе, распространенном вдоль восточной окраины области Теллуры. К их числу принадлежит и каньон Коттравей, расположенный в южной части западного пояса (рис. 4, *a*).

Пояса возвышаются над уровнем области Теллуры на 0,5–1 км. В некоторых поясах можно обнаружить осевую симметрию их строения вкрест простирания.

Как уже отмечалось, пояса линейных деформаций наиболее отчетливо выявляются вдоль западной и восточной окраин области Теллуры. Западный пояс начинается у северной рамки листа (около 40° с.ш.) и, постепенно расширяясь, прослеживается к югу, где ширина его достигает 550 км. Более узкий (около 180–100 км) пояс ограничивает область Теллуры с востока. В южной части этого пояса прослеживается отчетливое вилообразное поднятие.

Несколько иной тип поясов линейных деформаций прослеживается в западной части района на равнине Леды. Эти структуры представляют собой линейно вытянутые пилообразные поднятия или системы валообразных поднятий, местами осложненных грабенами, трещинами растяжения и радиояркими полосами (дайками). Эти пояса простираются с юго-запада на северо-восток. Они вытянуты параллельно грядам Мардеж-авы. С этими поясами часто связаны своеобразные кольцевые структуры — пауки (рис. 4, б). К их числу на территории листа относится патера Хатшепсут и целый ряд таких же структур, как привило, сложенных более радиояркими комплексами пород. Центральная часть такой кольцевой структуры опущена и выполнена менее радиояркими комплексами пород. В пределах днища такой кольцевой структуры часто бывают распространены вулканы центрального типа диаметром 7-10 км. Эти структуры очень напоминают земные кольцевые магматические структуры [3]. Иногда в пределах вала развиты системы кольцевых или полукольцевых радиоярких полос (даек). На валах часто бывают распространены отдельные мелкие вулканические постройки диаметром 2-4 км.

Таким образом, пояса линейных деформации выступают как самостоятельный тип структурных форм на поверхности Венеры. Как показал А. Л. Суханов [4, 5], сопряженность с поясами грабенов, трещин растяжения и даек позволяет рассматривать эти структуры как зоны растяжения в венерианской коре.

Однако можно думать, что формирование этих структур было связано не только с простым раздвигом. Скорее всего в их образовании принимали участие и сдвиговые составляющие. Об этом свидетельствует наличие оперяющих трещин растяжения и даек, располагающихся вблизи них под 40–45° к общему простиранию поясов. Такие структуры отчетливо видны на западе и на востоке в северной части области Теллуры (рис. 4, s).



Следующим типом структур, развитым в основном в центральной части района, является **паркет**. Этим термином условно называется область развития хаотических деформации. Она состоит из мелких, часто извилистых хребтиков и разделяющих их долин. Длина этих частных структур не превышает нескольких десятков километров. Рисунок их настолько хаотичен, что местами не удается выявить хотя бы приблизительной закономерности в их ориентировке. На отдельных небольших участках ориентировка хребтиков и долин может быть выдержанной, но через 50–70 км она резко меняется. Область паркета рассечена, кроме того, разрывами, часть которых определенно дешифрируется как трещины растяжения. Часть разрывов изгибается по простиранию и имеет дугообразные формы.



Рис. 3. Геолого-морфологическая карта Венеры, лист В-24: 1 — гладкие равнины; 2 — полосчатые равнины; 3 — структурные линии паркета; 4 — пояса линейных деформаций; 5 — зоны взаимодействия структур паркета и поясов; 6 — кольцевые магматические комплексы («пауки»); 7 — грабенообразные депрессии; 8 — крупные вулканические постройки; 9 — скопления мелких вулканов; 10 — кальдеры; 11 — лавовые покровы; 12 — ударные кратеры и зоны выброса; 13 — разломы; 14 — трещины растяжения; 15 — уступы; 16 — гряды; 17 — радиояркие полосы (дайки)

В области Теллуры встречаются участки равнинного рельефа, выполненные таким же материалом, как и гладкие равнины (рис. 4, *г*). Здесь также в изобилии встречаются мелкие вулканические купола. Происхождение таких равнинных участков среди областей паркета



Рис. 4. Отдельные структуры на листе В-24, размер кадров 220 × 280 км: *а* — каньон Коттравей; *б* — патера Хатшепсут — кольцевая магматическая структура («паук») и идущие от него к северо-востоку валообразное поднятие и трещины растяжения; *в* — восточный край области Теллуры: структуры паркета, осложненный грабенами; к востоку от них — субмеридиональный пояс линейных деформаций с окаймляющими его трещинами северо-западного простирания; *г* — паркет в южной части области Теллуры с отдельными впадинами, выполненными вулканическим материалом

может быть разным. Во-первых, это могут быть реликты равнинной поверхности, не затронутые процессами деформации при образовании паркета. Во-вторых, они могут представлять собой грабены, аналогичные структурам, развитым в пределах и вблизи поясов линейных деформаций. И, наконец, в-третьих, это могут быть тыловые зоны перемешанных блоков паркета. На фотокарте видно, что к северу и к востоку от каньона Коттравей большой блок паркета ограничен от остальной части области Теллуры системой таких грабенов. Возможно, что краевые зоны паркета несколько смещены к югу. При этом их движение происходило вниз по склону и, видимо, было связано с гравитационной тектоникой.

В зонах стыка поясов линейных деформаций и областей паркета происходит их взаимодействие. На востоке области Теллуры паркет разбивается на серию разломов, вытянутых параллельно поясу. К этим разломам приурочена система грабенов. Таким, образом, область паркета оказывается разбита на отдельные клинья, внутри которых породы сохраняют простирания структур, свойственные соседним участкам паркета. Система грабенов, приуроченных к разломам, прослеживается не на всем их простирании. Это отдельные грабены шириной до 70 км. Днища их выполнены образованиями, внешне похожими на породы равнин. В наиболее крупных из грабенов отчетливо дешифрируются мелкие вулканы. Другой тип взаимодействия поясов с паркетом характерен для западной части области Теллуры. Здесь зона взаимодействия представлена поясом линейных деформаций, выклинивающимся близ северной рамки листа, а с востока ограничен зоной косых трещин растяжения. Это, возможно, свидетельствует о существенной роли сдвиговых деформаций в образовании этого пояса.

Кроме того, почти повсеместно вблизи поясов хаотичные структуры области паркета существенно перерабатываются. Структуры в них приобретают простирания, субпараллельные простиранию поясов. Иногда в паркете возникают зоны разломов, параллельные простиранию поясов.

Следующим типом структур, имеющих широкое распространение на территории листа, являются полосчатые равнины. Это равнинные области, приподнятые на 1-1,5 км по отношению к впадинам гладких равнин. Для них характерен очень пестрый рисунок поверхности, обусловленный обилием радиоярких полос (даек). Последние образуют отдельные пояса с отчетливо выраженными простираниями. Так, в западной половине района дайковые пояса простираются с юго-запада на северо-восток, хотя и здесь встречаются участки с меридиональными простираниями. Иногда дайки очень сложно сочетаются друг с другом, образуя полигональные системы. В восточной части района радиоярких полос меньше, и они простираются преимущественно в субмеридиональном направлении. Длина отдельных радиоярких полос достигает 70 км. Часто они ветвятся или кулисообразно подставляют друг друга. Ширина этих полос находится вблизи разрешения снимков. Характерной особенностью полосчатых равнин являются трещины — растяжения, приуроченные к дайковым поясам и простирающиеся параллельно с радиояркими полосами.

На территории листа достаточно широко развиты разнообразные вулканы центрального типа. Во-первых, это мелкие вулканические аппараты, группирующиеся в отдельные вулканические поля. Такие поля мелких вулканических конусов известны и в пределах гладких равнин, и в грабенах среди поясов линейных деформаций, и среди участков равнинного материала в области Теллуры, но максимальное количество их встречается в пределах полосчатых равнин.

Кроме этих мелких вулканов в пределах листа встречаются **крупные вулканические постройки**. Так, на западе района, в северной части гряд Мардеж-авы развиты три относительно крупных вулкана (диаметром около 10 км), которые расположены на общем вулканическом пьедестале поперечником около 100 км. Сходные вулканические постройки встречаются и у северной рамки листа. В центральной части области Теллуры (40° с. ш., 78–79° в. д.) в пределах зоны паркета развит крупный вулкан, который состоит из вала и окружающей его зоны излиянии. В центре этой постройки у внутреннего края вала находится сдвоенная кальдера, в которой на севере развиты более молодые вулканы центрального типа.

Наконец, в пределах района имеются **метеоритные кратеры**: Хатуп, Ирина, Бернар, Цераская, Кристи и др. Мелкие кратеры типа Ирины представляют собой наиболее просто устроенные структуры чашеобразной формы. У более крупных (диаметром 35–40 км), таких, как Бернар, Цераская, Кристи, в центре кратера появляются центральные горки.

Интерес представляет четырехугольная, нечетко выраженная и почти квадратная депрессия, расположенная среди структур паркета в северной части листа (39° с. ш., 81° в. д.), которая, возможно, представляет собой деформированный метеоритный кратер.

Разломы довольно многочисленны в пределах листа, и можно лишь выделить несколько систем. В пределах западной части листа отчетливо выделяется система разрывов, направленных с юго-запада на северовосток, параллельная общему простиранию гряд Мардеж-авы. Отдельные частные разрывы этой системы имеют длину около 100–150 км. Они часто выглядят как трещины растяжения, имеющие узкую щель в центральной части, ограниченную с двух боков узкими грядами.

Другая система разрывов значительно большей протяженности прослеживается вдоль западного и восточного обрамления области Теллуры. Это крупные зоны разрывов, простирающиеся в субмеридиональном направлении, и оперяющие их трещины северо-западного направления. Эти разломы и создают характерные структурные парагенезисы поясов линейных деформаций. По всей видимости, здесь распространены как трещины растяжения, так и сдвиги с надвигами. Последние представляют собой извилистые в плане разрывы, местами обрезающие (перекрывающие) подходящие к ним структуры. Скорее всего общей причиной возникновения этих структур являлись процессы растяжения.

Обильные разрывы разной степени протяженности распространены в пределах области Теллуры. Большинство из них, вероятно, представляют собой трещины растяжения, для которых характерна самая различная ориентировка, которая и создает своеобразие структуры паркета. Геологическая история района представляется весьма сложной. Здесь развиты весьма разнообразные структурные формы, возрастные соотношения которых во многом не ясны. Из анализа геологоморфологической карты вытекает, что наиболее древними структурами в южной части области Теллуры являются полосчатые равнины, так как на них наложен ряд более молодых структур. Так, например, вытянутые с юго-запада на северо-восток структуры гряд Мардеж-авы совершенно отчетливо прерываются, подходя к западной границе области Теллуры. Однако примерно в средней части листа западный пояс оказывается частично переработанным разрывами, простирающимися с юго-запада на северо-восток.

По всей вероятности, ряд структур листа B-24 образовался на месте существования полосчатых равнин. Некоторые гладкие равнины образовались в наиболее погруженных частях областей полосчатых равнин. Это отчетливо видно на равнине Леды, где участки развития гладких равнин вытянуты согласно общему простиранию структур и связанные с ними площадные базальтовые излияния выполняют наиболее погруженные в рельефе депрессии.

Часть полосчатых равнин, несомненно, формировалась в условиях растяжения. Об этом свидетельствуют пояса валообразных поднятий и сопряженных с ними грабенов и трещин растяжения, а также более сложно построенные дайковые пояса. Все эти структуры, вероятно, формировались в условиях растяжения. Однако локализация отдельных частных зон растяжения была настолько хаотичной, что здесь нельзя выделить какие-либо узкие зоны. Скорее этот процесс напоминал тот рассеянный спрединг, который предполагается для отдельных регионов Земли (окраинные моря, зоны траппового вулканизма на платформах).

Более крупные и локализованные зоны растяжения, видимо, приурочены к отчетливо выраженным в рельефе поясам линейных деформаций. При этом в области Теллуры и части Земли Иштар улавливается пространственная связь поясов с областями развития паркета. Если рассматривать такие пояса как крупные зоны растяжения, то их существование, как и на Земле, скорее всего связано с конвективными движениями в астеносфере. Однако на Венере литосфера, залегающая на конвектирующей астеносфере, устроена реологически иначе, чем на Земле, благодаря высоким температурам поверхности. Как показали расчеты Я.Б.Смирнова, на Венере верхняя граница зоны крипа в литосфере может располагаться на глубине 10-30 км и поэтому литосфера не будет передвигаться как единая жесткая плита над верхними частями конвективных ячеек. По всей видимости, эти движения будут раскладываться на движения отдельных маломощных пластин внутри литосферы. В этом, очевидно, и есть сходство структурных обстановок современной Венеры и ранней Земли, когда ее литосфера была значительно более прогрета, чем сейчас, благодаря более высокому тепловому потоку.



Рис. 5. Схема образования и развития структур типа паркета: 1 — астепосфера; 2 — зона пониженной вязкости и пластических деформаций; 3 — пояс линейных деформаций; 4 — гравитационное оползание

Области паркета, видимо, выступают как зоны сгруживания корового материала, представленного в основном породами равнин. За счет этого и происходит поднятие областей паркета, которые приподняты относительно равнин на 1,5–2,0 км. Таким образом, области паркета представляли собой первоначально куполовидные поднятия, которые по мере роста разбивались системами трещин-разломов. В дальнейшем благодаря малой вязкости нижних частей венерианской коры отдельные блоки паркета начинают оползать вниз по рельефу, создавая тем самым очень сложные парагенезы структур паркет, как внутри паркета, так и особенно в зонах его взаимодействия с поясами. Схематически этот процесс изображен на рис. 5. Конечно, это очень грубая схема, которая и реальных ситуациях на Венере осложняется региональными особенностями строения отдельных районов.

#### Литература

- 1. Барсуков В. Л., Суханов А. Л., Аким Э. Л. и др. Геолого-морфологическая характеристика северного полушария Венеры // Геотектоника. 1980. № 4. С. 4-25.
- 2. *Марков М. С., Суханов А. Л.* Дайковые зоны на Венере // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. № 1. С. 172–175.

- 3. *Тихомиров В. Г.* Структурная геология вулканических массивов. М.: Изд-во МГУ, 1985. 184 с.
- Суханов А. Л., Бобина Н. Н., Бурба Г. А. и др. Геолого-морфологическое описание тессеры Лаймы, области Теллуры и равнины Леды (фотокарта поверхности Венеры, лист В-13) // Астрон. вестн. 1987. Т. 21. № 3. С. 195–206.
- Sukhanov A. L. Ridged belts on Venus compression on extension // Lunar Planet. Sci. Conf. XVIII, abstr. 1987. P. 974–975.

Геологический институт АН СССР Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского АН СССР Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф.Н.Красовского ГУГК при СМ СССР Институт радиотехники и электроники АН СССР

## Geological-Morphological Description of Tellus Regio (Photomap of the Venusian Surface, Sheet B-24)

M. S. Markov, V. P. Shashkina, G. A. Burba, Yu. S. Tyuflin, M. V. Ostrovskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, G. M. Petrov, Yu. N. Alexanorov, A. I. Sidorenko, V. P. Sinilo, N. V. Rodionova

The systems of areal dislocations of several directions («parqeut») at the highland of Tellus Regio are located in the central and eastern parts of the area. The eastern border of the area is occupied with Niobe Planitia, and western part of the area contains Leda Planitia, which have a number of linear topographic prominencies, elongated in NE direction (Mardezhava Dorsa).

Поступила в редакцию

23.VII.1987

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ГРЯД ЛУКЕЛОНГ-ОКИПЕТЫ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-2)

А. Л. Суханов, А. А. Пронин, Н. Н. Бобина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. И. Кабешкина, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Ю. Н. Александров, А. И. Сидоренко, Г. М. Петров, Н. В. Родионова, О. С. Зайцева

Астрономический вестник, 1988, т. XXII, № 1, с. 3-12

Меридиональные грядовые пояса на 175–245° в.д. образованы за счет растяжения литосферы и внедрения линейных магматических тел, образующих на поверхности гряды и валы. В ячеях между поясами наблюдаются широтные (нормальные к поясам) системы разрывов. Вся система поясов симметрична относительно оси 200–210° в.д., на которой расположено несколько горячих точек.

Лист фотокарты B-2 (рис. 1) входит в серию карт, составленных по материалам радиолокационной съемки со станций «Венера-15» и «Венера-16» [1]. Геологическое дешифрирование выполнено в масштабе 1:4 000 000, и эта карта генерализована до масштаба 1:10 000 000 (рис. 2, 3). Южная часть листа B-2 непосредственно смыкается с листом B-8, описанным в следующей статье этого же номера журнала, и геологические структуры, продолжаясь с одного листа на другой, образуют единый комплекс, так что выводы, полученные на материале отдельных участков, могут быть в той или иной мере интерполированы на всю территорию листов B-2 и B-8. Гипсометрически эта область относится к равнинам нулевого уровня с отдельными возвышенностями и понижениями в пределах обычно  $\pm 1$  км, редко повышаясь до 2,5 км.

# Грядовые пояса

Грядовые пояса, впервые открытые на Венере по радиолокационным изображениям, полученным со станций «Венера-15» и «Венера-16», являются доминирующими структурами листов В-2, В-8 и В-10. Они образуют сложный комплекс, напоминающий гигантский раскрытый к югу веер, «пластинки» которого образованы отдельными поясами, а промежутки между ними заполнены монотонными на первый взгляд равнинами, сложенными, очевидно, лавовыми толщами.







Рис. 3. Наименования структур и положение фрагментов, показанных на рис. 4,5

Пояса, имеющие ширину от 20 до 250 км, обычно состоят из чередующихся субпараллельных гряд и борозд с характерными поперечниками 10–15 км и длиной от 20–30 до 300 км и более. Пятно осреднения высотомера до 40–50 км обычно не позволяет установить высоту отдельных гряд: можно лишь сказать, что она не превышает первых сотен метров. В целом пояса как правило несколько выше, чем непосредственно прилегающая равнина (хотя есть исключения) и характеризуются повышенной шероховатостью поверхности [2].

Типичный пояс с относительно равномерным чередованием гряд и борозд представляется похожим на неэродированную складчатую систему, хотя отношение длины «складок» к их ширине обычно более 10:1, что выглядит необычным для монолитных базальтовых толщ. Плавные изгибы поясов как бы приспосабливаются к очертаниям «жестких» блоков между ними, а коленообразные флексуры, похоже, маркируют крупные поперечные разрывы со сдвиговыми смещениями.

Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что многие особенности строения поясов и их взаимные соотношения не укладываются в эту схему и требуют иного объяснения [3].

1. По крайней мере в двух случаях (62-63° с.ш., 220-222° в.д. и 66° с.ш., 215° в.д., рис. 4, *a*) один грядовой пояс отчетливо пересекает другой и никаких следов прежнего пояса не сохраняется в пределах нового, как было бы в случае складчатых деформаций.

Такие соотношения были бы естественными, если бы пояса состояли из линейных магматических тел, насыщающих зоны растяжения. Иногда одни линейные элементы пояса пересекают другие элементы того же пояса (75–78° с.ш., 178° в.д.), что во всяком случае свидетельствует об их дизъюнктивной природе.

2. Значительные отрезки поясов, несомненно, образованы массивными вулканическими накоплениями, перекрывающими смежные участки (гряды Окипеты) или состоят из отдельных вулканических куполов и крупных кратеров (гряды Денницы, Лаумы, рис. 4, б), так что для «складок» фактически не остается места: образование таких массивных вулканических накоплений предпочтительнее объяснять обстановкой растяжения. Гряды Лаумы, почти целиком состоящие из вулканических тел разной формы, протягиваются по дну крупной меридиональной депрессии глубиной 0,5–1,0 км, что также говорит о растяжении.

3. Некоторые пояса или их отрезки образованы массивными валами с узкими депрессиями на вершинах. Самый поразительный пример этого — вал пояса Лукелонг (рис. 4, *в*), который также тянется по дну долины около 0,5 км глубиной. Вдоль его гребня видны несколько грабеновидных депрессий; на севере и на юге он расщепляется на отдельные «жилы». Эту структуру объяснить сжатием крайне затруднительно, скорее это вздутие над линейным интрузивом с частично обрушенной кровлей, а интрузив локализован в долине, т.е. в зоне растяжения.

Другой пример такого рода — отрезок гряд Лаумы на 67–70° с. ш. (рис. 4, *г*). Здесь четко видно, что массивный вал (опять-таки на дне ложбины глубиной 0,5 км) сечет полудуговую структуру, а южнее этого пересечения на валу расположена эллиптическая кальдеровидная депрессия; к северу он также расщепляется на серию параллельных гребней. Еще одна одиночная массивная гряда продолжает пояс Ахсоннутли на 67–70° с. ш., заканчиваясь вулканом поперечником 20 км. (К сожалению, на приводимой фотокарте изображение этой полосы сдвоено и одиночная гряда кажется двойной.)

Некоторые такие массивные интрузивные валы обрамляются по подножью узкими гребнями, образующими как бы «воротничек», из которого выпирает вал; иногда эти гребни срезают и уничтожают параллельные гряды и борозды пояса, среди которых возвышается вал. Создается впечатление, что такие обрамляющие гребни созданы или за счет оползания кровли интрузива к его краям, или путем «расталкивания» интрузивом вмещающих пород с появлением складок нагнетания (комрессионные гребни в легенде). Особенно интересно, что центральный вал может быть выражен очень слабо, но его оконтуривает четкий «воротничек»; возможно, это означает проседание некогда приподнятого вала.

Возможно, такими же линейными интрузиями или экструзиями образованы гряды Пандросы, показанные на рис. 4, *a*; эти гряды могли



Рис. 4. Детали строения грядовых поясов: *a* — сечение одного пояса другим; *б* — цепь удлиненных вулканогенных депрессий вверху справа и вулканический купол внизу слева; *в* — вал Лукелонг с вершинной депрессией; *г* секущий вал в грядах Лаумы; часть дуговой структуры вверху образована крупной расщелиной. Размеры кадров 230 × 320 км

образоваться как нагромождения вязкой магмы вдоль крупных магмоподводящих трещин, т.е. представлять собой поверхностное выражение даек, истинная мощность которых будет, видимо, меньше, чем ширина вала на поверхности.

4. Местами видно, что линейная структура пояса образована за счет того, что приподнятая поверхность рассечена бороздами и трещинами, а гряды представляют собой лишь останцы между ними (рис. 5, *a*). В других случаях участки поясов состоят из сближенных линзовидных

депрессий и расщелин, обычно расположенных на едва заметном валообразном поднятии (рис. 5,  $\delta$ ). То и другое, конечно, проще объяснять растяжением, а не сжатием.

5. На окончаниях некоторых поясов составляющие их тесно сближенные гребни начинают расходиться веером по равнине, разделяясь широкими гладкими промежутками. При этом гребни явно пересекают какие-то более древние структуры (63–67° с. ш., 186–195° в. д.). Эти особенности трудно объяснить складчатостью, но можно предполагать, что гребни образованы в местах выхода на поверхность даек. (Такие структуры более развиты южнее, где расходятся и сами пояса.) Но если расходящиеся гребни маркируют вздутия поверхности или экструзивные накопления над приповерхностными дайками, то и собранные в пучок они формируют грядовый пояс, образованный в основном за счет магматического материала, поступавшего по параллельным дайкам.

6. С поясами тесно связаны крупные кольцевые и незамкнутые полудуговые структуры типа пауков и овоидов. Особенно интересны эти структуры в осевой части системы поясов, в меридиональной полосе 200–210°: две самые крупные из них как бы растянуты в широтном направлении, а в 300–500 км к западу и востоку от каждой из них видны хуже выраженные, «теневые» кольцевые структуры, симметричные им. Возможно, эти формы возникли при растяжении литосферы в стороны от центральной оси, где расположены горячие точки.

7. В целом вся система поясов построена симметрично относительно отмеченной оси 200–210°, хотя, конечно, картина далека от зеркальной. Кроме того, встречаются любопытные примеры сдвоенных по долготе структур внутри отдельных поясов (рис. 5, *в*, *г*).

#### Равнины между поясами

Равнины, несомненно, сложены продуктами площадного вулканизма, т.е. лавами и туфами, поскольку в большинстве случаев их материал перекрывает линейные структуры поясов (хотя ряд линейных структур, наоборот, по-видимому, рассекает равнины). В плане эти равнинные участки имеют форму полос или крупных линзовидных ячей. Дешифровка тонкой структуры поверхности этих ячей показывает, что она образована смыкающимися и перекрывающимися потоками лав, различающимися текстурой и фототоном. Кроме того, видны серии многочисленных разрывов, которые рассекают все потоки вплоть до самых молодых, и иногда прослеживаются через пояса, служащие границами ячей. Чаще, однако, эти разрывы исчезают в пределах поясов: это означает либо относительную молодость поясов по сравнению с равнинами, либо то, что напряжения в пределах поясов разрешались как-то по другому, чем в ячеях между поясами. Например, растяжение может реализоваться в крупномасштабных раздвиганиях краев поясов, но в разделяющих их блоках оно может проявляться лишь дифференциальными подвижками по разрывам, перпендикулярным по-



Рис. 5. Детали строения грядовых поясов: *a* — *U*-образное соединение двух поясов: перемычка образована серией крупных расщелин (темные), в поясе слева преобладают грабеновидные борозды: 400 × 240 км: *б* — в центре, внизу слева и вверху справа серии линзовидных депрессий и борозд на пологих сводах в грядах Окипеты; 200 × 300 км: *в* — сдвоенная *X*-образная структура; *г* — повторяющаяся через 50 км Г-образная структура: 120 × 300 км

ясам. В целом системы разрывов ориентированы субширотно, но при этом намечаются два преобладающие направления: северо-западное и юго-западное с углом около 30° между ними, что позволяет предположить сколовый (сдвиговый) характер таких сопряженных разрывов с широтным максимумом ориентировки напряжений.

О структуре долавового основания трудно сказать что-либо определенное; несомненно лишь, что часть потоков скрывает под собой продолжения поясов, которые проявляются на поверхности в виде пучков даек, кольцевыми структурами и системами темных полос, которые видимо, возникают над трещинами растяжения.

Интересно, что в одной из ячей на 63-64° с.ш., 190-200° в. д. вулканическая активность связана с пятью последовательно перекрывающимися центрами, что напоминает цепи вулканов в земных океанах, которые формируются при движении плиты над мантийными горячими точками.

Любопытна «пятнистая» равнина на крайнем северо-западе листа B-2: она покрыта круглыми светлыми ореолами, каждый из которых окружает мелкий вулканический купол. Все остальные купола на изученной территории лишены таких ореолов; видимо, они обусловлены какими-то специфическими особенностями вулканизма в этой провинции «пятнистой» равнины.

# Паркет

Мелкие разобщенные участки паркета встречаются в юго-восточной части территории. Их соотношения с поясами не вполне ясны. В целом ветви поясов обходят выступы паркета, но есть случаи постепенных переходов между ними: либо это результат «паркетизации» поясов, либо процессы формирования поясов по-разному проявляются на равнинах и в пределах паркета. На основании постоянно повышенного гипсометрического положения любых участков паркета можно думать, что он образован на относительно легком веществе и тогда предпочтительнее второй вариант, т.е. изменение морфологии пояса при его вхождении в паркет.

Еще одна узкая полоса паркета выделяется предположительно вдоль меридиана 200° (блок Ахсоннутли): сомнения в ее характере основаны на слабой выраженности перекрестных систем дислокаций; однако эта полоса явно отличается от всех известных поясов. Эта полоса возвышается над равнинами, и ее восточная граница имеет характер «рваного» уступа, секущего структуры полосы и напоминающего эрозионные формы.

Интересно, что она находится на том же широтном уровне, что и останцы паркета в юго-восточном углу листа, и ближайшие выходы паркета к западу отсюда (тессера Ананке) — это наводит на мысль, что некогда эти паркеты объединялись, а теперь разобщены поясами.

# Периферия земли Иштар

Гряды Окипеты служат границей юго-западной периферии земли Иштар. Здесь расположено несколько крупных вулканов высотой до 1,5–2,5 км. Их кальдеры (20–50 км) сопоставимы с марсианскими; а поперечники оснований гораздо больше, чем у земных вулканов соответствующей высоты. Их отложения, а также самостоятельные потоки перекрывают почти всю местность; лишь на некоторых участках из-под них просвечивают системы северо-западных дислокаций: трещины раскрытия и более древние короткие низкие субпараллельные гряды. Несмотря на то что эта местность имеет небольшую высоту, она все же отличается повышенной пересеченностью от гладких равнин между поясами.

#### Выводы

Детальный анализ изображений показал, что преобладающие на этой территории грядовые пояса возникли преимущественно за счет растяжения и раздвигания литосферы с образованием серий субмеридиональных трещин и с последующим заполнением их магматическим материалом. В результате сформировались системы линейных субпараллельных магматических тел и сопровождающие их экструзивные накопления, дайки и валообразные вздутия на поверхности, группирующиеся в грядовые пояса. Нельзя полностью отрицать действия сжимающих напряжений при формировании поясов, но они, по-видимому, играли небольшую роль.

В равнинных ячеях, разделяющих пояса, есть признаки как растяжений с подъемом больших масс магматического материала, так и дифференциальных сдвиговых смещений по субширотным разрывам. Однако эти ячеи в основном перекрыты обширными разновозрастными потоками, скрывающими следы более ранних дислокаций.

Система поясов разделяет «материковые» блоки земли Иштар на востоке и тессер Ананке и Мешкенет на западе. Внутри системы поясов встречаются лишь небольшие разобщенные блоки паркета. Вся система поясов в целом симметрична относительно меридиональной оси 200–210°, где располагаются «растянутые» широтно кольцевые магматические комплексы, очевидно, связанные с горячими точками.

### Литература

- 1. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В-4) // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. № 2. С. 83–98.
- Davis P.A., Kozak R.C., Schaber G.G. Global radar units on Venus derived from statistical analysis of Pioneer Venus Orbiter data // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. № B5. P. 4979-4992.
- 3. *Sukhanov A. L.* Ridged bells on Venus: compression or extension? // Lunar a. Planet. Sci. Conf. XVIII. Abstracts of papers. 1987. P. 974–975.

Геологический институт АН СССР Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского Институт радиотехники и электроники АН СССР Поступила в редакцию 28.Х.1987

21 В.А. Котельников

# Geological-morphological Description of Lukelong-Okipeta Dorsa Area (Venus Surface Ppotomap, Sheet B-2)

A. L. Sukhanov, A. A. Pronin, N. N. Bobina, G. A. Burba, Yu. S. Tyuflin, M. V. Ostrovskij, V. I. Kabeshkina, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, Yu. N. Alexandrov, A. I. Sidorenko, G. M. Petrov, N. V. Rodionova, O. S. Zaytseva

Submeridional ridge belts on  $175-245^{\circ}$  E were produced by extension of lithosphere and intrusion of linear magmatic bodies, expressed on the surface as ridges and banks. Latitudional (normal to the belts) fault systems can be seen on plain stripes between the bells. The belt system in the whole is symmetrical to the axis along 200–210° E where several hot spots are situated.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА РАВНИН ВИНМАРЫ И ГАНИКИ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-8)

А. А. Пронин, А. Л. Суханов, В. П. Шашкина, Г. А. Бурба, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Ю. Н. Александров, А. И. Сидоренко, Г. М. Петров, Г. А. Крылов, А. А. Крымов, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский

Астрономический вестник, 1988, т. XXII, № 1, с. 13-22

Основные структуры в пределах листа В-8 представлены вулканическими равнинами и поясами гряд, которые сформировались как результат поступления магматического материала по трещинам вдоль ослабленных зон в условиях растяжения литосферы.

Геолого-морфологическая карта листа В-8 является одной из серии карт, составляемых по материалам съемок станциями «Венера-15» и «Венера-16» [1] (рис. 1). Приводимый в работе вариант карты масштаба 1:16 000 000 (рис. 2) представляет собой результат генерализации оригинала, построенного на основе дешифровок в масштабе 1:5 000 000. На севере лист В-8 смыкается с листом В-2, а вместе они почти полностью покрывают геологически единую область развития поясов гряд в пределах равнин Лоухи, Винмары и Ганики (см. карту названий на рис. 3), так что оба листа карты составлены в единой легенде и увязаны концептуально. (См. [4].)

Основные типы местности описываемого района представлены поясами гряд меридионального простирания и полосами равнин между ними. Помимо этих главных типов местности, здесь приведены описания венцов, арахноидов и вулканических форм, которые, взаимодействуя с другими структурами, позволяют пролить свет на их природу.

Вдоль восточной кромки листа (восточнее 215° в.д.) радарные изображения изобилуют помехами, но тем не менее наиболее контрастные структуры читаются и здесь достаточно отчетливо.

## Пояса гряд

В более ранних работах пояса гряд па равнинах были выделены в самостоятельный тип структур, сделаны их описания и интерпре-



тации их генезиса с позиций растяжения (см., например, [3, 5]). Несмотря на выявленные различия в их строении и в степени выраженности, постоянное присутствие протяженных (от десятков до сотен км) возвышающихся над окружающей местностью гряд либо систем сопряженных гряд и борозд заставляет их относить к одному классу структур. Эти системы гряд организованы в протяженные (от сотен до тысяч км) жгуты или пучки, где собственно гряды прочитываются по «освещенному» и «затененному» склонам (надо помнить, что анализируется радарное изображение). Как пояса, так и гряды в них почти постоянно ориентированы меридионально, контуры области их распространения сходятся к северному полюсу за пределами листа, а пространство между поясами представлено равниной, как правило, гипсометрически ниже на 0,5–1,0 км. Таким образом, пояса образуют сеть с вытянутыми меридионально ячеями.

Несмотря на отмеченное выше общее сходство, пояса обладают и различиями. Так, гряды Лаумы в северо-западном углу листа представляют собой цепочку депрессий, соединенных жгутами линейных структур. Днища депрессий часто ниже окружающих равнин (патера Аспасии — на 0,5 км). В 200 км севернее — депрессия ромбовидной формы глубиной около 0,5 км. Обе депрессии соединены сегментом пояса с желобом в центре, симметричным относительно продольной оси. По строению он напоминает известные на Земле комплексы «дайка в дайке» (рис. 4, *a*).

Наиболее распространенный тип поясов представлен жгутами субпараллельных сближенных гряд. Подстраиваясь кулисообразно, они образуют протяженные полосы грядового рельефа шириной до 250 км и длиной в тысячи километров. Порой они расщепляются и тогда возникают *U*-образные структуры, описанные для гряд Пандросы и Ириды [4].

В юго-западном углу листа между грядами Ведьмы и Лаумы ветви поясов образуют полигональную систему с характерным размером полигона около 300 км. Элементы поясов на сторонах полигонов выражены не отчетливо, как если бы они были перекрыты равнинообразующим материалом. Здесь же одна из сторон полигона равнинообразующего материала представлена полосой тессеры Немесиды.

В юго-восточном углу трапеции облик поясов также меняется: расстояние между отдельными грядами в поясах увеличивается до 30-40 км, сами гряды становятся уже, но выдержаннее по простиранию. Здесь пояса также организованы в полигональную сеть, но с более крупными (до 500-600 км) ячеями; в узлах сети располагаются структуры арахноидов, которые иногда занимают выраженные в гипсометрии депрессии глубиной 0,5 км. В самом юго-восточном углу листа (область Ульфруи) гряды в системе поясов заменяются бороздами аналогичных размеров.

На севере центральной части листа вдоль 200° в.д. протягивается область грядового рельефа (гряды Ахсоннутли), отличающегося от
рельефа «классического» пояса и носящего черты строения тессер, что дало основания выделить этот массив в самостоятельный комплекс в легенде. Этот приподнятый над уровнем равнин массив размером 300 × 1000 км имеет «рваную» восточную границу с заливами равнинного материала. В его центральной части располагается похожий на область проседания или на гигантский (100 × 500 км) раздвиг участок равнины, расчленяющий весь массив на несколько отдельных блоков, в пределах которых прослеживается единый план простираний гряд и борозд, но без характерных для тессер поперечных структур. Гряды этого массива представляют собой по форме в плане правильные дуги длиной до 300 км, обращенные выпуклостью на восток. Соотношения на границах массива показывают, что в целом он является структурой, секущей по отношению к соседним. Так, его юго-восточная граница сечет линейные структуры северо-западнее кратера Долорес: западная граница проходит по уступу или желобу и является, очевидно, тектонической, поскольку в нее утыкаются линейные структуры пояса; по восточной окраине и в центре массив залит относительно более молодым равнинным материалом.

Далее следует остановиться на формах, которые в какой-то мере позволяют выявить генетические соотношения. Во-первых, о линейных элементах пояса — грядах. В случае изолированных гряд к ним иногда примыкают участки равнины с фестончатыми границами, которые выглядят как излияния вокруг вулканического хребта (безымянная гряда на 57° с.ш. и 185° в.д.). Порой с грядами в пределах одной системы (участок между патерами Аспасии и Идзуми) чередуются расселины и уступы, напоминающие трещины растяжения. Похоже, что здесь гряды образовались как результат излияний по трещинам. На юго-востоке листа в пределах области Ульфруи аналогичная поясу гряд система линеаментов представлена расселинами, также похожими на трещины растяжения. На юго-восточном окончании гряд Пандросы элементы пояса замещаются по простиранию уступами и расселинами, образующими систему грабенов. Внутри поясов можно видеть и U-образные структуры, которые здесь в масштабе элементов пояса повторяют упоминавшиеся выше более крупные аналогичные формы (рис. 4, б). Внутри поясов встречаются клиновидные или линзовидные депрессии; жгуты гряд облекают их как если бы это были раздвиги в поясах (рис. 4, в, г). И наконец, следует отметить такое явление, как расщепление пояса, когда от основной структуры под острыми углами отщепляются ветви, что иногда сопровождается образованием в месте расщепления купола, по-видимому, вулканического происхождения (рис. 5, *a*). Наиболее крупной структурой такого типа, очевидно, следует считать раздвиг, расщепляющий пояс гряд Ахсоннутли на две ветви севернее патеры Разии.

Перечисленные особенности строения — тесная связь поясов с трещинами и с поступлением по ним магматического материала, а также





Рис. 3. Наименования структур и положении фрагментов, показанных на рис. 4 и 5

структуры типа раздвигов и расщепление поясов — свидетельствуют об обстановке растяжения, сопутствующей их образованию.

## Равнины

Равнинами занята значительная часть площади листа, где они занимают пространство внутри ячей, обрамленных поясами гряд. Поверхность равнин соответствует гипсометрическому уровню 0–0,5 км. Иногда эта поверхность представлена монотонным бесструктурным фототоном, иногда на ней прочитываются структуры, выраженные лишь вариациями альбедо или очень невысоким рельефом, что дало основания выделить в легенде к карте два основных типа равнин: гладкие и холмистые.

Типичным примером гладкой равнины можно считать полосу бесструктурной поверхности, разделяющую пояса гряд Ахсоннутли и Пандросы севернее 53° с. ш. Однако в иных случаях на равнине удается прочитывать на пределе разрешения такие структуры, как границы потоков, округлые депрессии кальдер, купола вулканических аппаратов, отдельные гряды и линеаменты неясного генезиса, расселины трещин. Примером округлой депрессии около 70 км в поперечнике на поверхности равнины может служить структура на 51° с. ш. и 179° в. д. Судя по группе куполов в центре она может иметь вулканическое происхождение. Купол Вурунсему (41° с. ш., 210° в. д.) около 70 км в поперечнике — крупнейшее среди подобных образований в пределах трапеции имеет округлые в плане очертания, отчетливые границы и выраженные в альбедо «освещенный» и «затененный» склоны. Одиночные купола меньшего размера и их группы присутствуют во многих местах на равнинах. Пятнистый участок равнины восточнее гряд Пандросы  $(50-55^\circ \text{ с. ш.})$ , очевидно, образован серией излияний с поверхностью различной шероховатости, о чем свидетельствуют различия в альбедо. Как уже упоминалось выше, здесь гряды пояса переходят по простиранию в трещины, которые и могли быть источниками потоков. Примером проявления разрывных нарушений может служить участок равнины между патерами Аспасии и Идзуми, где эшелонированная система уступов и расселин обусловлена, очевидно, трещинами растяжения, причем в ряде случаев они явились источниками магматического материала, образовавшего структуры типа экструзивных валов (рис. 5,  $\delta$ ).

Наличие кальдер, куполов, трещин, потоков в структуре поверхности равнин свидетельствует об их вулканической природе. Возможно, именно затоплением лавовыми излияниями объясняется местами «стертый» облик участков поясов гряд и наличие относительно гладких и холмистых равнин.

Иногда на поверхности равнин близ границы с поясами гряд прочитываются участки глыбового рельефа, которые наводят на мысль о блоковом строении равнины, причем разломы — границы между блоками прослеживаются и в прилежащем поясе (рис. 5, e). Это позволяет говорить об относительно поздней тектонической активности, продолжавшейся после формирования равнины, и о подвижности границы равнина-пояс (см. также рис. 4, e).

Наличие на равнинах трещин растяжения и обширных излияний, «подвижность» границы равнина-пояс, а также присутствие систем субширотных разломов позволяет аргументировать вывод о происхождении равнин в условиях растяжения.

# Другие типы структур

Венцы. Среди прочих наиболее выраженными и крупными структурами района являются венцы: кольцевые или близкие к кольцевой форме замкнутые валы поперечниками до первых сотен километров, прерывающие пояса гряд. К ним относятся патеры Аспасии и Идзуми на южном окончании пояса гряд Лаумы, три безымянных венца на южном окончании пояса гряд Пандросы и патера Разии.

Три безымянных венца, обрывающих гряды Пандросы, тесно сближены как звенья одной вытянутой субширотной цепи. Самый западный имеет форму ромба с меридионально вытянутой длинной диагональю. Основным элементом структуры является обрамляющий ее вал с крутым внутренним и пологим внешним склоном, что может быть следствием провального образования центральной депрессии, на поверхности которой располагаются один крупный и группа мелких



Рис. 4. Детали строения поясов гряд: *а* — ромбическая в плане депрессия в поясе гряд Лаумы с участком пояса, похожим на комплекс «дайка в дайке»; глубина депрессии 0,5 км, поперечник около 100 км; *б* — в центре фрагмента видно *U*-образное сочленение гряд, свидетельствующее о растяжении; размер структуры — первые десятки км; *в* — клиновидная депрессия в поясе гряд Пандросы, длина структуры около 100 км; *г* — линзовидная депрессия длиной около 100 км между двумя жгутами гряд Пандросы

куполов — скорее всего вулканических построек. На внешнем обрамлении западного участка вала система обращенных к западу крутых дугообразных уступов; возможно, они образовались как валы нагнетания при оползании вала (рис. 5, *г*).

**Арахноиды.** Это другой тип кольцевых структур, присутствующих на территории листа и распространенных в его юго-восточной части. Подобные структуры уже описывались ранее [3]. Их главный при-



Рис. 5. Детали строении гряд, равнин и венцов: a — место расшепления южной ветви гряд Лаумы (фрагмент  $100 \times 150$  км); б — расселины трещин растяжения и валы на равнине севернее патеры Идзуми (фрагмент  $120 \times 200$  км); s — участок блокового рельефа на границе пояса и равнины (фрагмент  $60 \times 100$  км); c — валы нагнетания на внешнем обрамлении вала венца, группа вулканических куполов в центральной депрессии (размер фрагмент  $120 \times 200$  км)

знак — наличие центрального часто сложного ядра с концентрическим строением и радиальной системы гряд. Здесь арахноиды располагаются в узлах сети поясов, а радиальные гряды одновременно являются и элементами пояса. С этими структурами часто связаны понижения глубиной около 0,5 км, выраженные в гипсометрии. Наиболее типичной формой этого вида является расположенный в депрессии арахноид непосредственно восточнее купола Вурунсему с отчетливо концентрическим строением ядра. **Тессеры.** В пределах описываемого листа тессеры представлены двумя небольшими участками в юго-западном углу. Один из них — тессера Немесиды, которая как бы заменяет собой отрезок пояса в обрамлении ячеи равнинной поверхности.

Выше обсуждалась возможность отнесения к тессере необычного массива в поясе гряд Ахсоннутли (см. [1]), но авторы сочли за лучшее выделить его в самостоятельный комплекс.

**Кратеры.** В пределах листа В-8 присутствуют три ударных кратера; крупнейший из них — кратер Яблочкина диаметром около 60 км имеет отчетливую зону выбросов. Здесь следует отметить, что в целом область развития гряд поясов характеризуется дефицитом ударных кратеров относительно остальной территории съемки, что может быть косвенным указанием на ее относительно молодой возраст.

## Заключение

Основными структурами описываемого листа В-8 являются равнины и пояса гряд, принадлежащие к единой системе, занимающей треугольную область с основанием вдоль южной границы съемки с вершиной близ северного полюса [2]. Равнины носят признаки вулканического происхождения и представлены обширными излияниями, возникшими в условиях растяжения. Пояса гряд сформированы вдоль ослабленных зон повышенной проницаемости и представлены структурами линейных вулканических хребтов над трещинами растяжения. Структуры венцов пространственно связаны с поясами и являются поверхностными проявлениями горячих точек. Позднейшая тектоническая активность связана с образованием субширотных систем разломов, секущих по отношению и к равнинам и к поясам.

## Литература

- 1. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В-4) // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. № 2. С. 83–98.
- 2. *Суханов А. Л., Пронин А. А.* Признаки спрединга на Венере // Докл. АН СССР. 1987. Т. 294. № 3. С. 661-665.
- 3. Суханов А. Л., Пронин А. А., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание области тессеры Лаймы и равнины Берегини (фотокарта поверхности Венеры, лист В-12) // Астрон. вестн. 1986. Т. 19. № 4. С. 272–286.
- 4. *Суханов А. Л., Пронин А. А., Бобина Н. Н.* и др. Геолого-морфологическое описание области гряд Лукелонг–Окипеты (фотокарта поверхности Венеры, лист В-2) // Астрон. вестн. 1988. Т. 22. № 1. С. 3–12.
- Sukhanov A. L. Ridged belts on Venus: compression or extension? // Lunar. and Planet. Sci. Conf. XVIII. Abstracts. 1987. P. 974–975.

Поступила в редакцию

28.X.1987

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР Геологический институт АН СССР Институт радиотехники и электроники АН СССР Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им.

Ф. Н. Красовского

## Geological-morphological Description of Vinmara and Ganiki Planitiae Area (Venus Surface Photomap, Sheet B-8)

A. A. Pronin, A. L. Sukhanov, V. P. Shashkina, G. A. Burba, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, Yu. N. Alexandrov, A. I. Sidorenko, G. M. Petrov, G. A. Krylov, A. A. Krimov, Yu. S. Tyuflin, M. V. Ostrovskij

Two main types of structures of the area described are volcanic plains and ridge belts, the latter being formed by magmatic material intrusions along the zones of lithospheric weakness under condition of extension.

# ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАВНИН ЛОУХИ И АТАЛАНТЫ (ФОТОКАРТА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ЛИСТ В-7)

А. Л. Суханов, Н. Н. Бобина, Г. А. Бурба, Ю. С. Тюфлин, М. В. Островский, В. А. Котельников, О. Н. Ржига, А. И. Сидоренко, Г. М. Петров, Ю. Н. Александров, В. П. Шубин, В. Е. Зимов, И. Л. Кучерявенкова

Астрономический вестник, 1988, т. XXII, №2

Полосчатые равнины Лоухи и Аталанты представляют собой переходную зону от древних приподнятых дислоцированных «материков» на западе к «океаническим» равнинам с поясами растяжения на востоке. Полосчатые равнины покрыты сетью даек и зон дробления; их можно сравнивать с областями рассредоточенного спрединга на Земле.

Лист фотокарты В-7 (рис. 1) входит в серию карт, составленных по материалам радиолокационной съемки со станций «Венера-15» и «Венера-16» [1]. Геологическое дешифрирование проведено в масштабе 1:4 000 000, и эта карта генерализована до масштаба 1:16 000 000 (рис. 2); на рис. 3 даны названия и схема районирования, по которой ведется дальнейшее описание. Области, примыкающие к территории листа В-7 с запада и востока, были описаны ранее [2, 3]. В целом равнины Лоухи и Аталанты, занимающие гипсометрические уровни  $\pm 1$  км, представляют собой область перехода от систем грядовых поясов на низких равнинах (рис. 3, *a*) к дислоцированным областям на западе (рис. 3, *б*) с превышениями до 2 км и более; в этом порядке и ведется описание.

# А. Грядовые пояса

Пояс Лукелонг был ранее описан [3] как гигантский линейный магматический диапир, образующий краевое звено системы субпараллельных грядовых поясов в секторе 150–250° в.д. Структура продолжения этого пояса на описываемой территории листа В-7 подтверждает это заключение, хотя характер проявления этого диапира на поверхности здесь несколько меняется. На отрезке 153–173° в.д. он представлен крупным весьма пологим сводом, центральная часть которого нарушена продольными грабенами и трещинами (рис. 4, *а*, внизу): очевидно, он создан при вздутии и раскалывании субстрата под напором вещества снизу. На отрезке 147–153° он сменяется гладким







336

сводом, отороченным по подножью «воротничком» материала, как бы отжатого в стороны от оси свода: здесь диапир, видимо, подходит совсем близко к поверхности, размягчая кровлю (рис. 4,  $\delta$ , вверху справа). Далее к северо-западу от этого свода протягиваются «усы» — крупные резкие гряды, расходящиеся под острым углом на 70–100 км; от этих гряд распространяются массивные лавовые покровы (рис. 4,  $\delta$ , слева внизу), а пространство между ними заполнено меньшими субпараллельными грядами со слабо намеченной осевой симметрией всей ячейки. Вероятно, все эти гряды образованы лавовыми валами над магмоподводящими трещинами, ячейка представляет собой полосу последовательного растяжения литосферы, а величина 100 км может быть истинной величиной раздвижения литосферы на данном участке.

В северном направлении от пояса Лукелонг отщепляется пояс Юмын-Удыр, который на этом отрезке состоит из таких же узких гряд или же односторонних уступов. При этом субмеридиональные пологие уступы пересечены под острыми углами серией северо-западных гряд и уступов, но по простиранию они сливаются в единый пояс: видимо, те и другие образованы практически одновременно сопряженными разрывами, и часть разрывов послужила магмоподводящими каналами. Между поясами Лукелонг и Юмын-Удыр серия мощных субпараллельных гряд образует оперяющую систему (рис. 4. а, вверху). Юго-западнее Лукелонга видно еще несколько дополнительных ответвлений пояса: в некоторых из них видны скопления куполовидных вулканов, от других расходятся крупные лавовые потоки.

Пояса с их ответвлениями и крупные гряды образуют систему, делящую местность на несколько крупных линзовидных ячей; система этих ячей продолжается и к северо-западу, на полярном листе В-1; две из них частично ограничены зияющими трещинами и разрывами. Однако только одна из этих ячей (с центром на 70° с. ш., 170° в. д.) является замкнутой, т.е. оконтурена со всех сторон поясами, как если бы здесь соединились с перехлестом две кулисные трещины. Остальные ячеи сохранили связь с соседними областями в виде перемычек; они находятся на той же высоте, что и окружающие равнины, они довольно асимметричны в плане, внутри их не видно следов последовательного раздвигания. В основном эти ячеи залиты лавами, и поэтому мы не можем уверенно судить об их истории, но скорее всего они представляют собой блоки, вырезанные в древней литосфере более молодыми дуговидными разрывами, по которым затем сформировались пояса как результат подъема магмы между раздвигающимися блоками; в самих же ячеях растяжение могло быть незначительным.

# Б. Полосчатые равнины

Полосчатые равнины протягиваются от района кратера Кленова на северо-западе (лист В-6) до южных окраин равнины Аталанты (лист В-15), занимая территорию около 700 × 3500 км. В центральной части

листа B-7 эта зона на протяжении 600 км перекрыта относительно молодыми лавами, связанными с овоидом Эрхат и со структурным поднятием, на котором он расположен, но очевидно, что полосчатые равнины продолжаются под лавами, не меняя своего характера.

Поверхность равнин покрыта бесчисленными светлыми полосами и невысокими грядами шириной до первых километров, редко до 15–25 км, и длиной от 20–40 до 100–200 км. Гряды имеют слабо выпуклый или платообразный профиль: в среднем они несколько уже, чем полосы. Те и другие чередуются между собой и часто переходят одни в другие, а все вместе образуют единые перекрестные (рис. 5, *a*), полигональные, перьевидные и чешуйчатые рисунки. Иногда одни гряды и полосы пересекают другие; гряды могут сменяться расщелинами; иногда они расплываются, превращаясь в плоский язык вещества, перекрывающего соседние структуры.

Асимметричные гряды можно интерпретировать как небольшие уступы по разрывам, однако двусторонние симметричные валы, объединяющиеся в сложные сети, очевидно, образованы выжимками магм над подводящими трещинами (дайками). В разрезе они должны быть похожими на грибы: тонкая ножка (дайка), накрытая плоским конусом лав на поверхности, высотой, видимо, в десятки метров и шириной в километры.

Светлые полосы без видимого рельефа, вероятно, образованы менее вязкими лавами вдоль трещин: возможно, при иных условиях съемки рельеф будет обнаружен и здесь. Но некоторые полосы шириной до 25 км имеют четкие субпараллельные ограничения, как грабены, на протяжении десятков километров (в районе кратера Кленова). Эти полосы могут представлять собой зоны вторичных изменений пород над слепыми дайками или «сухие» зоны дробления.

На участках полосчатой равнины, наиболее насыщенных грядами и полосами, их насчитывается до 10–12 на 100 км сечения с юго-запада на северо-восток. На северо-востоке вдоль системы грядовых поясов эти структуры тянутся преимущественно параллельно общему простиранию поясов или образуют оперяющие их системы. С удалением от поясов в юго-западной части зоны начинают преобладать решетчатые и чешуйчатые рисунки. Некоторые из них, очевидно, наследуют направления дислокаций погребенного фундамента: так, решетчатые рисунки на лавах вдоль южной границы листа напоминают структуру паркетных возвышенностей. Чешуйчатые и черепитчатые рисунки свойственны равнине Лоухи, и характер создавших их напряжений остается неясным.

На некоторых участках поступление лав было столь интенсивным, что все полосчатые структуры перекрываются скоплениями вулканических куполов и сливающихся потоков, образующих увалистые плато. Обычно же гряды и полосы, если и перекрыты, то незначительно, и их плотность на единицу площади меняется незначительно. Если в зоне грядовых поясов А растяжение локализовалось в собственно поясах, то в зоне полосчатых равнин Б оно, очевидно, было относительно равномерно распределено на обширных территориях, сравнимых по площади и по геометрии с тыловыми бассейнами земных островных дуг (где также обнаруживаются признаки региональных растяжений), и реализовывалось в появлении огромных сетей даек. Эти образования можно сравнивать с областями рассредоточенного спрединга на Земле. Суммарная амплитуда растяжения, конечно, должна быть меньше, чем общая ширина всех гряд и борозд на поверхности, так как мощность питающих даек меньше ширины расходящихся от них потоков, а с другой стороны, часть лаек перекрыта позднейшими потоками или не доходит до поверхности (как и в земных спредпиговых комплексах, где количество даек нарастает в более глубоких частях разреза). Поэтому оценить общую величину растяжения полосчатых равнин не представляется возможным.



Рис. 3. Схема районирования территории листа В-7 и границы кадров, приведенных в статье в увеличенном виде (цифрами указаны номера рисунков)

## В. Области площадных дислокаций

Площадные дислокации представлены относительно молодыми участками паркета в западной части территории (тессера Мешкенет), частично перекрытыми лавовыми толщами (зона В), и более древними системами нарушении на востоке, где они сложно сочетаются со структурами полосчатых равнин (В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub>).

339



Рис. 4. Грядовые пояса и отдельные гряды: *а* — диапировый пояс Лукелонг и оперяющие гряды к северо-востоку от него, 440 × 360 км; *б* — линейный диапир, окруженный компрессионными гребнями: от гряды слева внизу отходит мощный лавовый поток, 450 × 160 км

Паркет тессеры Мешкенет был описан ранее [2]: это крупные глетчеровидные языки материала, перемещавшегося в юго-восточном направлении, по-видимому, в пластичном (разогретом) состоянии, с частичным перекрытием прилегающей местности. На востоке эти языки «упираются» в субмеридиональный вал между овоидами Эрхат и Найтингейл, что подтверждает их поверхностную природу. Любопытны соотношения этого материала с 60-километровым кратером на 66,5° с. ш.,  $126^{\circ}$  в. д.: этот кратер врезан в краевую часть паркетного потока, однако паркетная структура сохраняется неперекрытой до самого гребня кратера, т.е. на этом участке нет никаких выбросов из кратера. Если бы такой кратер находился на равнине, его можно было бы счесть

метеоритным образованием, тогда как на деле он является кальдерой проседания, что подтверждается и небольшими вулканами, перекрывающими его южный и частично северный отрезки вала.

Возможно, часть паркетного материала скрыта под лавами в полосе 68–70° с.ш., где в лавах проявлена характерная ортогональная трещиноватость, а от типичных полосчатых равнин на севере вся эта система отделена мощной разломной зоной вдоль 70° с.ш.

К паркетным образованиям мы относим и материал, частично захватываемый юго-западным углом листа (паркет «Подкова»). Здесь потоковидные и лепешкообразные формы с грядово-бороздчатой поверхностью образовались, скорее всего, при поверхностном скольжении материала мощностью до 300–700 м по очень пологому региональному уклону от горы Мелии к югу, представляя собой по сути гигантский оползень.

На описываемой территории не встречено случаев деформации лавовых толщ вблизи блоков паркета, хотя в более западных районах такие случаи отмечались; здесь в зоне В молодые лавы перекрывают языки паркета. Однако в районах площадных дислокаций В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> лавы полосчатых равнин, перекрывающие древние блоки, частично наследуют рисунок этих блоков. Участок В1 похож на беспорядочный паркет с несколькими неясными кольцевыми структурами, перекрытый маломощными лавами. Участок В<sub>2</sub> представляет собой особый случай: внешне эти дислокации, на первый взгляд, похожи либо на залитый лавами грядово-бороздчатый пояс, либо на особый тип паркета (рис. 5, б). На самом деле, это протяженная зона интенсивного дробления, где на основную систему северо-западных разрывов наложено несколько дополнительных систем, так что над поверхностью лав остались только угловатые останцы. Здесь также видны разбитые реликты крупных кольцевых структур, возможно, сохранившиеся от периода интенсивной бомбардировки.

Примечательно, что такие же зоны дробления встречены на заснятой территории только в одном месте — на плато между горами Акны и областью Метиды. Это, а также распространение в обеих областях крупных овоидов и тессер позволяет предполагать, что некогда они объединялись в единый массив, впоследствии разобщенный системой грядово-бороздчатых поясов. Судя по высокой плотности ударных кратеров на листе В-7, эта область в целом относится к одной из древнейших из закартированных до сих пор. Этот древний дислоцированный массив, видимо, растащен на отдельные блоки (например, два блока разделены прогибом с небольшим грядовым поясом на 146–149° в. д. у южной границы листа).

# Г. Д. Овоиды

На схеме 3 буквами Г и Д обозначены Найтингейл и Эрхат, которые по внешнему виду представляются самыми молодыми из всех структур такого типа на заснятой территории. Они «насажены» на валообразное



Рис. 5. Отдельные участки поверхности: a — перекрестная система гряд и светлых полос на полосчатой равнине;  $\delta$  — система древних дислокаций и реликты кольцевых структур; s — юго-западная часть вала овоида Найтингейл; z — вулкано-тектоническая структура на раздробленном своде северо-восточного простирания. Все кадры  $300 \times 210$  км

поднятие, которое прослеживается примерно от 58 до 75° с.ш., свод этого поднятия рассечен продольными расщелинами.

Найтингейл представляет собой массивный кольцевой вал, у внешнего подножья которого тянется прерывистый ров, как если бы этот вал проседал под собственной тяжестью. Гребень вала рассечен серией коротких поперечных борозд (рис. 5, *в*); возможно, это апикальная часть магматического диапира по кольцевой трещине. Местами вал покрыт пологими вулканами и лавами, стекающими с гребня вала на соседние структуры. Внешний и внутренний склоны вала по большей части гофрированы в мелкие морщины, параллельные его простиранию, которые могли образоваться в результате оползания вещества вниз но склонам вала под уклон порядка  $1-1,5^{\circ}$ . В северной части вала рисунок его внутреннего склона, как и у некоторых других овоидов, создан оползанием масс вещества с хаотическим рельефом, что несколько напоминает отдельные участки паркета. Внутренняя платформа овоида частью находится на уровне окружающей местности, а частью опущена ниже ее; крутые уступы, отделяющие ее на значительном протяжении от внутренних склонов вала, позволяют предполагать, что раньше эта платформа была выше окружающей местности и лишь затем опущена по сбросам.

Овоид Эрхат — кольцевой гребень поперечником 170 км, окружающий лавовую платформу и находящийся на вершине вулканического сооружения поперечником около 400 км и высотой 1,5 км — что-то вроде огромного, но низкого вулкана с гигантской кальдерой. На склонах сооружения видны признаки неоднократных излияний и деформаций, преимущественно разрывных; от него в стороны расходятся субрадиальные разрывы протяженностью до многих сотен километров, а вся местность вокруг этого вулкана в радиусе сотен километров покрыта молодыми лавами, связанными если не с ним самим, то с этими радиальными разрывами. Надо заметить, что эти разрывы вряд ли были следствием возникновения овоида Эрхат, а скорее наоборот, они определили его положение, поскольку некоторые из этих разрывов могут быть прослежены на огромные расстояния и даже уходят за пределы описываемого листа.

Остается неизвестным, представляет ли Эрхат раннюю стадию развития овоида, не подвергшегося обрушению, или же Эрхат и Найтингейл с самого начала развивались разными способами: в пользу последнего предположения свидетельствуют признаки активного поднятия, вздувания кольцевого вала Найтингейла, тогда как у Эрхата вал является краем кальдеры.

Северо-восточный свод, соединяющий эти два овоида, очевидно, относится к тектоно-магматическим образованиям, и на нем располагается характерный вулкано-тектонический комплекс центрального типа поперечником 80 км (рис. 5, *г*).

# Е. Гора Мелии

Эта гора имеет высоту около 1,5 км, но опознается как возвышенность только по альтиметрии, поскольку попоречник ее подножия составляет 450–500 км; такие пропорции характерны для всех крупных вулканов Венеры. Нижние части склонов горы сложены пятнистыми лавовыми потоками, спускающимися к подножью вулкана. В средней части склон прерывается треугольной кальдерой, в которой размещается верхняя конусовидная часть этого вулкана, почти целиком заполняющая кальдеру. Апикальная часть конуса занята сложным сочетанием куполов и западин. Лавы, спускающиеся с восточного склона вулкана Мелии, незаметно сливаются с лавами, стекающими с гребня вала овоида Найтингейл: вероятно, они имеют близкий возраст, и в таком случае непонятно, почему две эти соседние вулкано-тектонические конструкции одинакового размера и возраста имеют такой разный облик.

# Кратеры и кальдеры

Около 10 кратеров на описываемой территории могут быть с той или иной степенью достоверности отнесены к метеоритным; три самых крупных из них имеют поперечники по 60 км. Молодые кратеры окружены довольно широкими плащами выбросов (или вулканических продуктов, извержение которых вызвано ударом?), но мощность их, видимо, невелика, так как у более древних кратеров выбросы практически неразличимы, хотя эрозия, насколько известно, развита слабо.

Несколько кольцевых или субконцентрических хорошо выраженных структур, очевидно, образованы вулканическими процессами, например на 64,5° с.ш., 147,5° в.д. или структура на 66° с.ш., 133° в.д., наполовину перекрытая материалом, стекающим с вала овоида Найтингейл. Но кроме них существует много структур, для которых неопределенными являются не только генезис, но и сами их очертания. В центре листа из-под лав просвечивают деформированные взаимно перекрывающиеся кольца поперечниками 100–300 км, маркируемые гребнями, трещинами, темными полосами и т.д. Возможно, это реликты древнейших ударных форм или же остатки разрушенных овоидов. А на относительно молодых лавах часто различаются очень низкие, размытые, с нечеткими контурами кольцевые формы с поперечниками по несколько десятков километров, похожие в плане на вулканы с кальдерами или на вулкано-тектонические центральные комплексы.

## Выводы

Область равнин Лоухи и Аталанты является обширной переходной зоной от возвышенных «материковых» структур на западе к «океаническим» лавовым равнинам с грядовыми поясами на востоке.

«Материковые» формы на западе представлены древнейшими областями площадных и линейных дислокаций, участками паркета и крупными вулкано-тектоническими сооружениями (похожие «материковые» структуры встречаются восточнее только за системой грядовых поясов, в области от Метиды до Лакшми). На листе В-7 при движении с запада на восток «материковый» массив, видимо, разбивается на отдельные блоки, которые несколько раздвигаются и постепенно все больше перекрываются лавами.

Центральная часть территории целиком залита лавами, на которых в результате регионального растяжения возникла зона шириной 700–900 км, густо насыщенная сетями даек и разрывов и скоплениями вулканических центров.

В восточной и северо-восточной части листа В-7 появляются грядовые пояса, представляющие собой линейные магматические диапиры и системы субпараллельных даек. Пояса проходят по зонам региональных разрывов, разрезающих более древний субстрат на линзовидные блоки, залитые лавами. Растяжение по отдельным поясам достигает величины 100 км, но величина растяжения между поясами в залитых лавой блоках остается неизвестной.

Региональные растяжения в пределах пояса Лоухи–Аталанты могли быть обусловлены двумя механизмами: 1) движение всего «материкового» массива (восточной части земли Иштар) к юго-западу с образованием «океанического» зияния между этим массивом и массивом восточнее Метиды; при этом краевая его область восточнее овоида Найтингейл «отстает» в этом движении и раскалывается; 2) поддвигание частей коры с востока на запад, под кору в области Лоухи и Аталанты, в результате спрединга, центр которого находится восточнее [3]; при таком поддвигании кора увеличивает мощность и начинает всплывать, меняется термический режим, и это может привести к растяжениям на поверхности, как в тыловых бассейнах островных дуг. Оба варианта остаются, конечно, не более чем предположениями.

# Литература

- 1. Пронин А. А., Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С. и др. Геолого-морфологическое описание плато Лакшми (фотокарта поверхности Венеры, лист В-4) // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. № 2. С. 83–98.
- 2. Суханов А. Л., Тюфлин Ю. С., Островский М. В. и др. Геолого-морфологическое описание тессер Фортуны и Мешкенет (фотокарта поверхности Венеры, лист В-6) // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. № 4. С. 259–271.
- 3. *Суханов А. Л., Пронин А. А., Бобина Н. П.* и др. Геолого-морфологическое описание гряд Лукелонг–Окипеты (фотокарта поверхности Венеры, лист В-2) // Астрон. вестн. 1988. Т. 22. № 1. С. 3–12.

Геологический институт АН СССР Поступила в редакцию Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского Институт радиотехники и электроники АН СССР

# Geological-morphological Description of Loukhy-Athalanta Area (Photomap of the Venusian Surface, Sheet B-7)

A. L. Sukhanov, N. N. Bobina, G. A. Burba, Yu. S. Tyuflin, M. V. Ostrovskij, V. A. Kotelnikov, O. N. Rzhiga, A. I. Sidorenko, C. M. Petrov, Yu. N. Alexandrov, V. P. Shubin, V. E. Zimov, I. L. Kucheryavenkova

Striped plains of Loukhy–Athalanta area represent transitional zone from the older dislocated elevated «continents» at the west to the younger «oceanic» plains with extensional belts at the east. Striped plains are covered with nets of dikes and fracture zones, and they can be compared with areas of dispersed spreading on the Earth.

# Приложение

# АТЛАС ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

# ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

Москва, 1989

# ОГЛАВЛЕНИЕ

- 5-7 ВВЕДЕНИЕ
- 7–9 ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ
  - 9 КАЧЕСТВО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
- 10 РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОСМИЧЕСКИХ АП-ПАРАТОВ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16»
- 11 КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16»
- 12 ПЕРЕДАЧА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЗЕМЛЮ
- 12–14 ЦЕНТР ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМА-ЦИИ
  - 14 ОБРАБОТКА ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ РАДИОЛОКА-ЦИОННОЙ СТАНЦИИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУ-РОЙ
  - 15 ОБРАБОТКА ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ РАДИОВЫСО-ТОМЕРА
  - 16 ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16»
- 17–19 РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ПАНОРАМЫ И ВЫСОТНЫЕ ПРОФИЛИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ
- 20–22 НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КООРДИНАТНАЯ ПРИВЯЗКА МАТЕРИАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ВЕНЕРЫ
- 22-26 ПОСТРОЕНИЕ ФОТОПЛАНОВ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

- 26–27 ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЖИМЕ ПОЛОСОВОЙ СЪЕМКИ
  - 28 КАРТЫ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ И ШЕРОХОВАТО-СТИ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ
- 28–31 ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНО-СТИ ВЕНЕРЫ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ
- 31–32 КАРТЫ ЛИНЕАМЕНТОВ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ПРО-СТИРАНИЯ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ВЕНЕРЫ

## ФОТОКАРТЫ И ГИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ КАРТЫ МАСШТАБ 1:10 000 000

34–35 ФОТОКАРТА НА ВЕСЬ УЧАСТОК СЪЕМКИ МАСШТАБА 1:35 000 000

36-37	Лист	B-1	64 - 65	Лист	B-15
38-39	Лист	B-2	66-67	Лист	B-16
40-41	Лист	B-3	68-69	Лист	B-17
42-43	Лист	B-4	70-71	Лист	B-18
44-45	Лист	B-5	72-73	Лист	B-19
46-47	Лист	B-6	74-75	Лист	B-20
48-49	Лист	B-7	76-77	Лист	B-21
50-51	Лист	B-8	78-79	Лист	B-22
52-53	Лист	B-9	80-81	Лист	B-23
54-55	Лист	B-10	82-83	Лист	B-24
56-57	Лист	B-11	84-85	Лист	B-25
58 - 59	Лист	B-12	86-87	Лист	B-26
60-61	Лист	B-13	88-89	Лист	B-27
62-63	Лист	B-14			

## ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ КАРТЫ МАСШТАБ 1:10 000 000

92	УСЛОВНЫЕ (	ЭБОЗНАЧЕНИ	1Я К ГЕОЈ	ΊΟΓΟ-ΜΟΡΦ	ОЛОГИ-		
	ЧЕСКИМ КАРТАМ ВЕНЕРЫ МАСШТАБА 1:10 000 000						
93	Лист	B-1	98	Лист	B-6		
94	Лист	B-2	99	Лист	B-7		
95	Лист	B-3	100	Лист	B-8		
96	Лист	B-4	101	Лист	B-9		
97	Лист	B-5	102	Лист	B-10		

Атлас поверхности Венеры				
Лист	B-11	112	Лист	B-20
Лист	B-12	113	Лист	B-21
Лист	B-13	114	Лист	B-22
Лист	B-14	115	Лист	B-23
Лист	B-15	116	Лист	B-24
Лист	B-16	117	Лист	B-25
Лист	B-17	118	Лист	B-26
Лист	B-18	119	Лист	B-27
Лист	B-19			
	Лист Лист Лист Лист Лист Лист Лист Лист	Атлас поверхно.   Лист B-11   Лист B-12   Лист B-13   Лист B-14   Лист B-15   Лист B-16   Лист B-17   Лист B-18   Лист B-19	Атлас поверхности ВенерыЛистВ-11112ЛистВ-12113ЛистВ-13114ЛистВ-13114ЛистВ-14115ЛистВ-15116ЛистВ-16117ЛистВ-17118ЛистВ-18119ЛистВ-19	Атлас поверхности Венеры   Лист B-11 112 Лист   Лист B-12 113 Лист   Лист B-13 114 Лист   Лист B-13 114 Лист   Лист B-13 114 Лист   Лист B-13 114 Лист   Лист B-14 115 Лист   Лист B-15 116 Лист   Лист B-16 117 Лист   Лист B-17 118 Лист   Лист B-18 119 Лист   Лист B-19

# КАРТЫ ЛИНЕАМЕНТОВ И РОЗЫ-ДИАГРАММЫ

122	Лист	B-1	128	Лист	B-10
123	Лист	B-3	129	Лист	B-11
124	Лист	B-4	130	Лист	B-1 2
125	Лист	B-5	131	Лист	B-18
126	Лист	B-7	132	Лист	B-19,20
127	Лист	B-8	133	Лист	B-23
134-135	РОЗЫ—,	ДИАГРАММЫ			

## ФРАГМЕНТЫ ФОТОПЛАНОВ МАСШТАБ 1:4000000

138-143	Лист	B-1	248 - 255	Лист	B-15
144-151	Лист	B-2	56 - 261	Лист	B-16
152-159	Лист	B-3	262 - 266	Лист	B-17
160-167	Лист	B-4	267 - 272	Лист	B-18
168-175	Лист	B-5	273 - 276	Лист	B-19
176-183	Лист	B-6	277 - 280	Лист	B-20
184-191	Лист	B-7	281-284	Лист	B-21
192-199	Лист	B-8	285 - 290	Лист	B-22
200-207	Лист	B-9	291-296	Лист	B-23
208-215	Лист	B-10	297-302	Лист	B-24
216-223	Лист	B-11	303-308	Лист	B-25
224-231	Лист	B-12	309-314	Лист	B-26
232-239	Лист	B-13	315-318	Лист	B-27
240-247	Лист	B-14			

319 СХЕМА РАЗБИВКИ ТРАПЕЦИЙ НА ФРАГМЕНТЫ ДЛЯ КАЖДОГО ШИРОТНОГО ПОЯСА

320 РАЗГРАФКА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ НА ОТДЕЛЬНЫЕ ЛИСТЫ И ИХ НОМЕНКЛАТУРА

## НАЗВАНИЯ И КООРДИНАТЫ ДЕТАЛЕЙ РЕЛЬЕФА

- 322 КРАТЕРЫ
- 323 КУПОЛА, ПАТЕРЫ
- 324 БОРОЗДЫ, ВЕНЦЫ, ГОРЫ, ГРЯДЫ
- 325 КАНЬОНЫ, ОБЛАСТИ, ПЛАТО, РАВНИНЫ, ТЕССЕРЫ, УСТУПЫ, ХОЛМЫ
- 326–327 УТОЧНЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ФОТОПЛАНОВ ТАБЛИЦЫ 1–4
  - 328 ЛИТЕРАТУРА



Обложка Атласа

#### РЕДАКЦИОННАЯ коллегия

Главный редактор В.А. КОТЕЛЬНИКОВ — академик АН СССР

Зам. главного редактора

В.Р. ЯЩЕНКО — кандидат географических наук

Ответственный редактор А.Ф. ЗОЛОТОВ

- Э.Л. АКИМ доктор физико-математических наук
- А.Т. БАЗИЛЕВСКИЙ доктор геолого-минералогических наук
  - В.Л. БАРСУКОВ академик АН СССР
  - А.Ф. БОГОМОЛОВ академик АН СССР
- Е.В. ГРОМОВ кандидат технических наук
- А.И. КАЛАЧНЮК
- A.B. KPABHEHKO
- В.М. КОВТУНЕНКО член-корреспондент АН СССР
- Н.Л. МАКАРЕНКО кандидат технических наук
- О.Н. РЖИГА доктор физико-математических наук
- А.С. СЕЛИВАНОВ доктор технических наук
- А.И. СИДОРЕНКО кандидат технических наук
- B.B. TOYEHOB
- Ю.С. ТЮФЛИН доктор технических наук

Chromen. Muepriz leasel

#### В РАБОТЕ НАД АТЛАСОМ ПРИНИМАЛИ УЧАСТИЕ:

от Института раднотехники и электроники (ИРЭ) Академин наук СССР: О.Н.РЖИГА (научный руководитель эксперимента по ранопохационному кароторафирозанное планети Венера-1 сложцых коскических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»). ЮН.АЛЕК-САНДРОВ, В. М.ДУБРОВИН С. Ф.ЗАГОРОДНИЯ, О.С.ЗАИЦЕВА, А.И.ЗАХАРОВ, Г.Н.КОСТЕНКО, А.П.КРИВЦОВ, А.А.КРЫМОВ, И.Л.КУ-ЧЕРЯВЕНКОВА, К.Ю.В.ОБУХОВ, Ю.О.НОРОВ, Г.М.ПЕТРОВ, Н.В.РО-ДИОНОВА, А.И.СИДОРЕНКО, В.П.СИНИЛО, Е.Б.ТЕРЕНТЬЕВ, В.А.ШУ-БИН:

БИН

от Центрального научно-исследовательского института гео-дезии, азросъемки и кертографии им. Ф.Н.Красовского (ЦНИИГАнК) ГУТК при Совете Министров ССССР: Ю.С.ТОФЛИН (научный руководитель по фотограмметрической и картографической обработие материалов радиологационной съемки), Л.С.ЛЕДОВСКАЯ, М.В.ОСТРОВСКИИ, Е.Г.БЕЛЕНЬКИИ, З.Н.ЖУКОВА, В.ИХАБЕШКИНА, Л.М.КАДНИЧАНСКАЯ, С.А.КАДНИЧАНСКИИ, Т.И.МУРУНОВА, С.Е.РЕШЕТОВА;

от Института прикладной математики им. М.В.Келдыша (ИПМ) Академии наух СССР: Э.Л.АКИМ, З.П.ВЛАСОВА, В.А.СТЕПАНЬЯНЦ, А.Г.ТУЧИН, Л.И.БОРО-ДУЛИНА;

от Особого конструкторского бюро Московского энерге-тического института (ОКБ МЭИ):

АВ.АБРАМОВ, М.Ю.БЕРГМАН, А.В.ГРЕЧИЩЕВ, И.А.ЖЕЛТИКОВ, Н.В.ЖЕРИХИН, В.Ф.ЗАРЦЕВ, Л.В.КУДРИН, Г.М.ЛЕВЧЕНКО, А.А.МО-РОЗОВ, О.И.ПОТИЕВСКИЙ, Г.И.СКРЫПНИК, Г.А.СОКОЛОВ;

от Института проблем передачи информации (ИППИ) Ака-демии наук СССР: И.М.БОКШТЕЙН, М.А.КРОНРОД, П.А.ЧОЧИА;

от Института геозимини и аналитической химини им. В.И.Вер-надского (ГЕОХИ) Академин наук СССР: А.Т.Б.З.ИЛЕВСКИЯ, Н.К.БОХИНА, Г.А.БУРБА, М.А.ИВАНОВ, В.П.КРОЧ-КОВ, Р.О.КУЗБМИН, А.А.ПРОНИН, Е.Н.СЛЮТА, И.М.ЧЕРНАЯ, В.П.ШАШКИНА:

от Геологического института (ГИН) Академии наук СССР: М.С.МАРКОВ, А.Я.ДАНИЛЬЧЕНКО, А.Л.СУХАНОВ;

от Московского государственного университета им. М.В.Ло-моносова (МГУ): А.М.НИКИШИН;

от предприятия № 7: Т.Г.САЛЬНИКОВА (редактор), Т.К.ДАНИЛИНА,

от ПКО «Картография»: Э.С.МАРКОВ (ст. редактор), Е.М. ВОЛКОВА (художник), А.В.ЧУРИ-ЛОВ (ответственный технический редактор);

от Вининцкой картографической фабрики: Л.К.ГЛЯВИНА (технический редактор); Н.И.ГУЦАЛЮК, Ю.В.АТАМАНЕНКО (печатники).



Фотокарта поверхности Венеры (весь участок радиолокационной съемки)











#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИМ КАРТАМ ВЕНЕРЫ МАСШТАБА 1:10 000 000

типы рельефы Тессеры — области пересеченного рельефа Равнины низменностей и предгорий имеющего различный структурный рисунок: гладкие холмистые ортогональный ромбический или параллельный Поверхности сводовых поднятий шевронный хаотический гладкие пересеченные Пояса гряд Горное обрамление плато Пологие склоны крупных вулканов Венцы - кольцевые образования из Равнины возвышенностей (гладкие) субконцентрических систем гряд РЕЛЬЕФА ФОРМЫ Арахноиды — кольцевые комплексы с пологими концентрическими валами и радиальной системой линеаментов Изолированные возвышенности наложенного типа (вулканы): а - крупные, б - малые Впадины предположительно провального происхождения (кальдеры) Круглые впадины с узким валом по краю, иногда с центральной поркой (ударные кратеры с выбросами и без выбросов): а - обрамленные радиоярким гало, б - не имеющие гало а – Возвышенности неясного происхождения б - Впадины неясного происхождения Валы Гряды Борозды Уступы: а – крупные, б – прочие ПРОЧИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ Линии смещения структур (разломы): а - основные, б - прочие



Линии различного происхождения

Светлые полосы (гряды?)



пинии различного происхождения

Границы резко отличающихся по радиояркости участков, очертания которых напоминают лавовые потоки

(точки – со сороны более светлого участка)

Границы типов и форм рельефа



Одна из наземных антенн (Подмосковье, Медвежьи Озера), принимавших информацию с космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» (фото О. Н. Ржиги)

КОТЕЛЬНИКОВ Владимир Александрович

### СОБРАНИЕ ТРУДОВ

Том З

### РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АСТРОНОМИЯ

Подписано в печать 14.12.09. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,5. Уч.-изд. л. 25. Тираж 200 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература» МАИК «Наука/Интерпериодика» 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90 E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru; http://www.fml.ru

> Отпечатано в ГУП «ИПК Чувашия», 428019 г. Чебоксары, пр-т И.Яковлева, 13

