

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. Вышков, В. М. Дубровин,
Н. В. Жерихин, А. И. Захаров, В. Е. Зимов, В. И. Каевитсер, 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. Скнар, 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. Kovtunencko, 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. Tyufflin, 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. км². 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 перигентре, приходящемся примерно на 60° северной широты, около 1000 км, в апоцентре — 65 000 км.

Во время радиолокационной съемки, проводящейся в районе перигентра, 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 $1,5^\circ$ и снимается новая полоса.

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

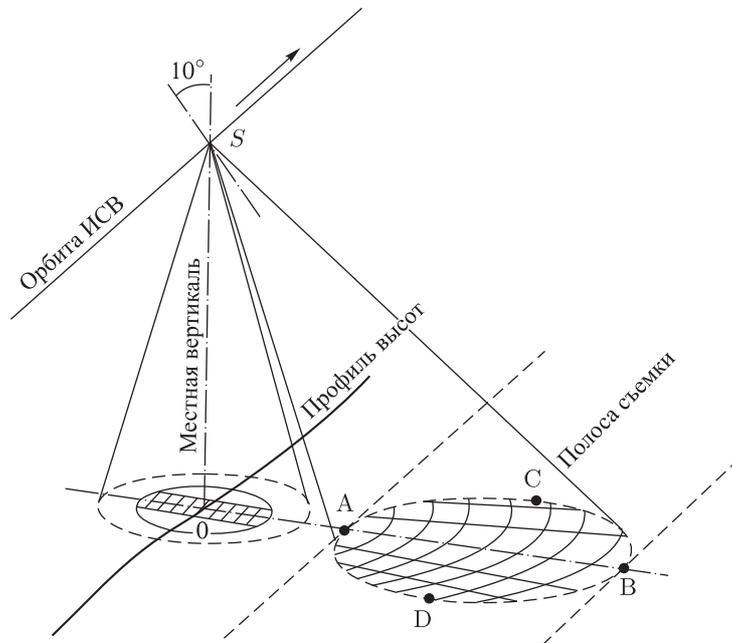


Рис. 1. Схема радиолокационной съемки

лучом и нормалью к данному элементу поверхности, изменение угла φ в пределах $\pm 10^\circ$ относительно среднего значения 10° , определяемого ориентацией электрической оси антенны, приводит к изменению мощности отраженного сигнала в пределах $(+10 \text{ div } -8)$ 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

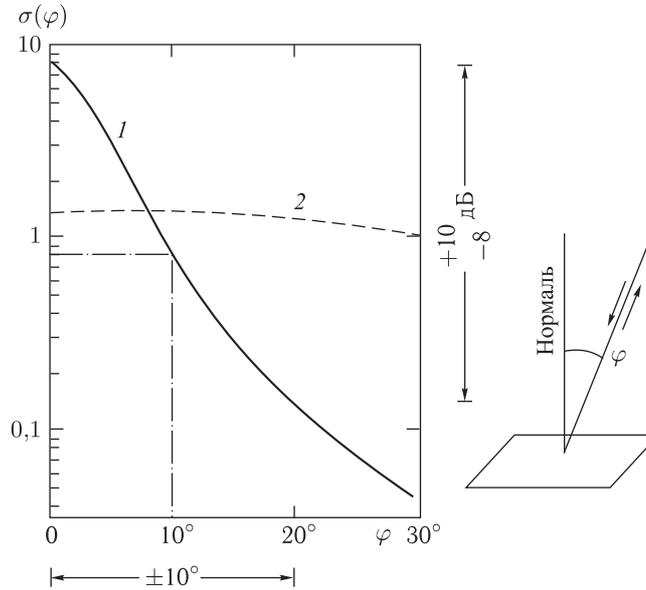


Рис. 2. Коэффициент обратного рассеяния $\sigma(\varphi)$ элемента поверхности (изображен справа), характеризующий мощность отраженных сигналов в зависимости от угла падения: 1 — поверхность Венеры в 8-см диапазоне волн (по данным, полученным ранее при радиолокации с Земли); 2 — диффузное рассеяние (оптические 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. 3 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 уже).

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 нанесении 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 координат¹⁾, а затем проектировались на коническую поверхность, проведенную через две стандартные параллели. Проектирование велось

¹⁾ В соответствии с рекомендацией Международного астрономического союза прямое восхождение северного полюса Венеры принято $272^{\circ},8$, склонение $67^{\circ},2$; период вращения 243,01 сут. Венорографическая долгота определя-

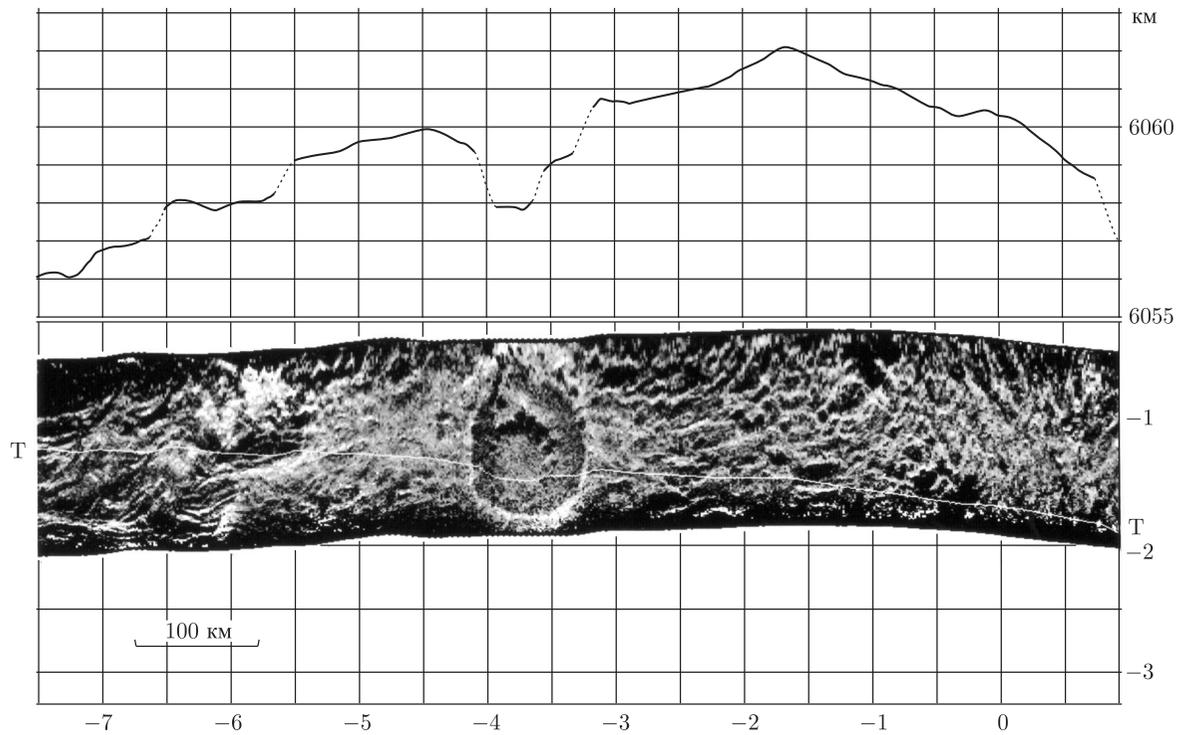


Рис. 3. Радиолокационное изображение района гор Максвелла, полученное космическим аппаратом «Венера-16» 20 января 1984 г. Вверху приведен профиль поверхности по трассе полета космического аппарата 17 января 1984 г., отмеченной белой линией на изображении. Пояснение координатной сетки см. в тексте

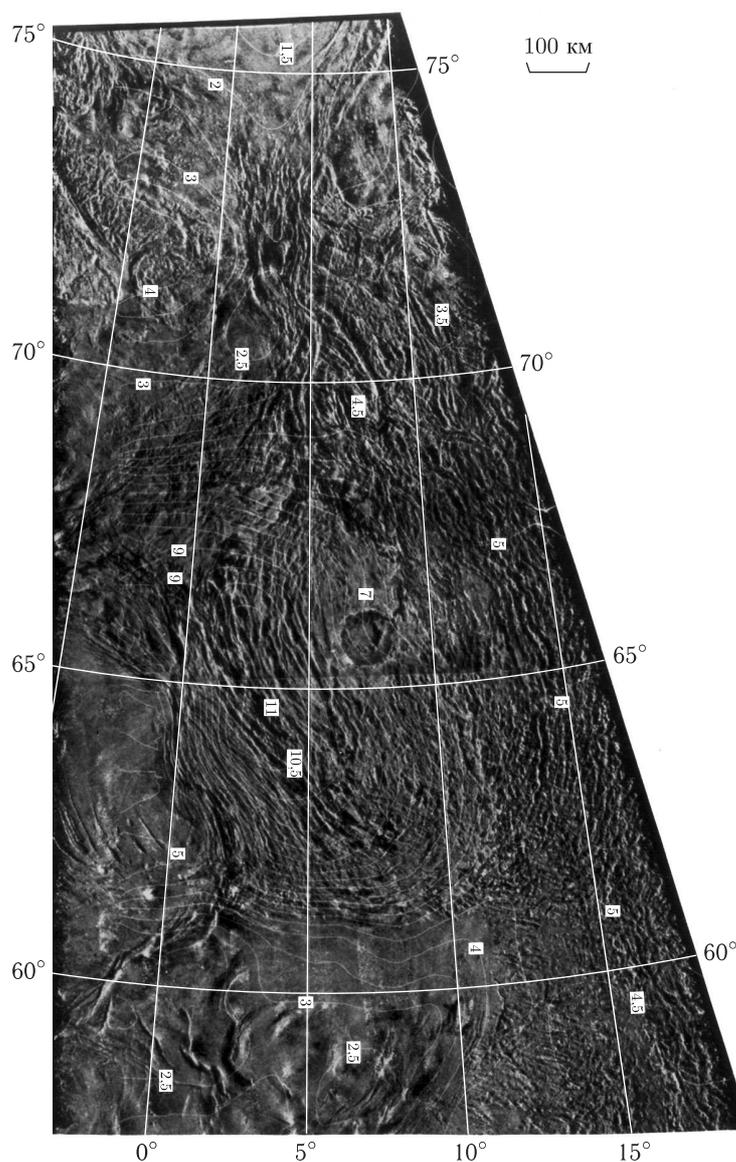


Рис. 4. Фотокарта области гор Максвелла, построенная по результатам радиолокационной съемки космического аппарата «Венера-16» с 12 по 25 января 1984 г. Проекция — нормальная равноугольная коническая Ламберта-Гаусса. Стандартные параллели: $58^{\circ},3$ и $72^{\circ},4$. Линии равных высот следуют с 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. км². 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 юго-востоку от них образованы нагромождением множества тектонических чешуй, выражающихся в рельефе в виде асимметричных (восточный склон круче западного) хребтов с простираем, 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 взброснадвиговая 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 простираения 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 взброснадвигов и тектонических блоков второго порядка. Ориентировка их на большей части каждого блока примерно перпендикулярна его простираению, 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 мере 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.