

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 вулcano-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/см³ 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, грабенвидные 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. км² 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. (Интен-

сивность 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 увлажнения 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 K–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 нулевому. 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 долготе. 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, -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° ю.ш. начинается пологое поднятие Земли Лады (неизвестно, охватывает ли оно всю южную полярную область, где не было съемки).

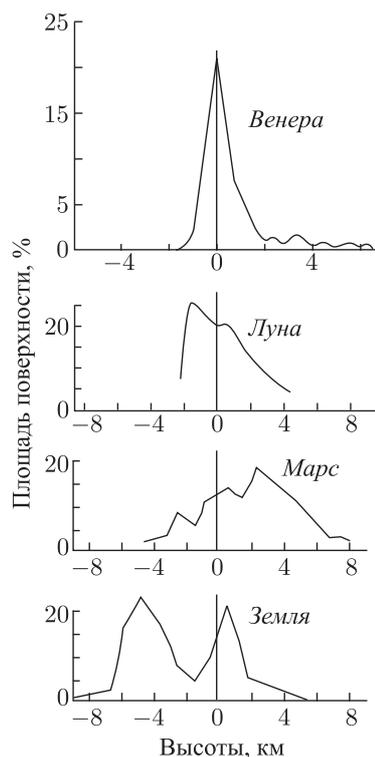


Рис. 1. Гистограммы распределения высот рельефа на Венере, Луне, Марсе и Земле [21]. Все кривые так или иначе бимодальны. На Луне охвачена площадь в пределах $\pm 45^\circ$ по широте

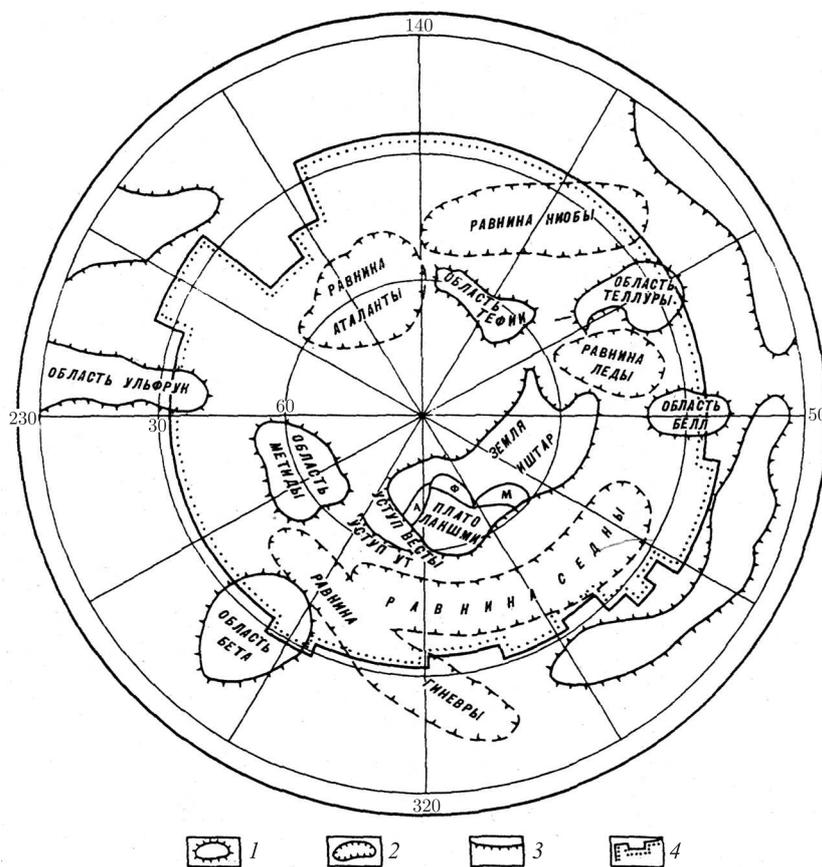


Рис. 2. Схема северного полушария Венеры. 1 — возвышенности; 2 — низменности; 3 — уступы; 4 — граница съемки «Венеры-15, -16». Буквы на схеме — горы: А — Акны, Ф — Фрейи, М — Максвелла

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

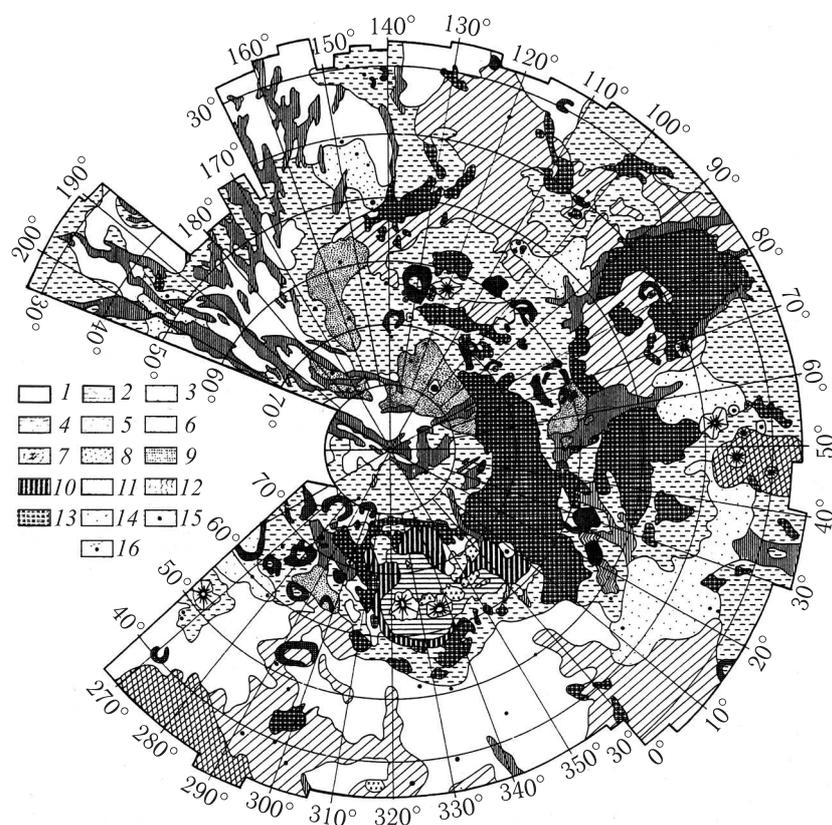


Рис. 3. Геолого-морфологическая карта северного полушария Венеры. Составлена в Лаборатории сравнительной планетологии ГЕОХИ АН СССР в 1985 г. 1-6 — равнины: 1 — гладкие, 2 — плато Лакшми, 3 — холмисто-останцовые, 4 — пологоувалистые, 5 — «пауковые», 6 — полосчатые, 7 — вулканы; 8 — вулcano-тектонические 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 Атланты 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.

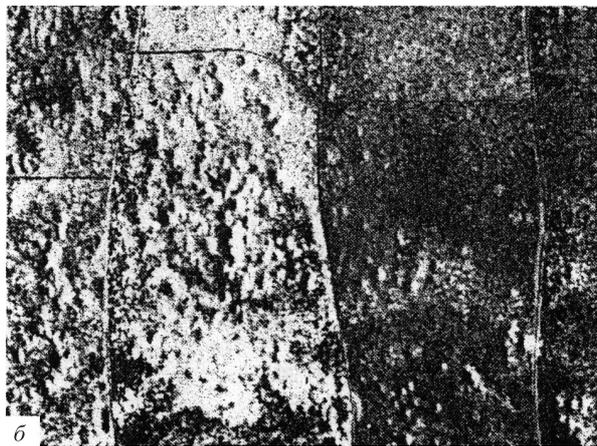
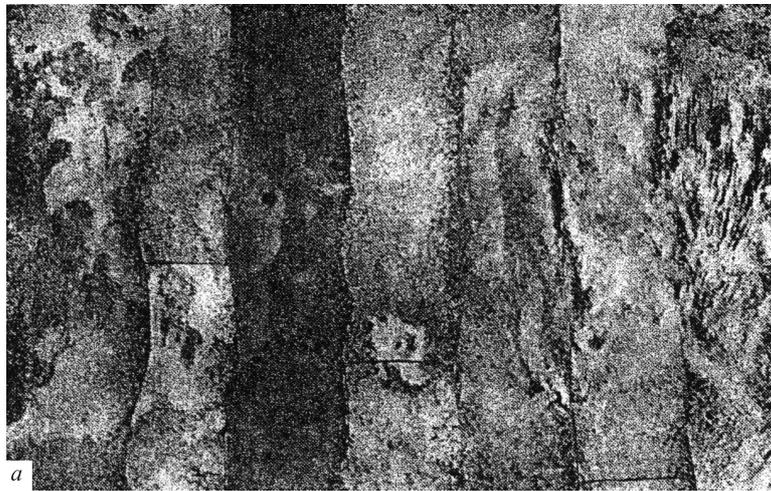


Рис. 4. Равнины: *a* — гладкая равнина в центре и пологоувалистая справа, слева видны темные и светлые потоки, в центре ударный кратер, ширина кадра 350 км; *б* — холмисто-останцовая равнина, ширина кадра 300 км

Пологоувалистые равнины (см. рис. 4) в наиболее типичном виде представлены вдоль южных краин 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.

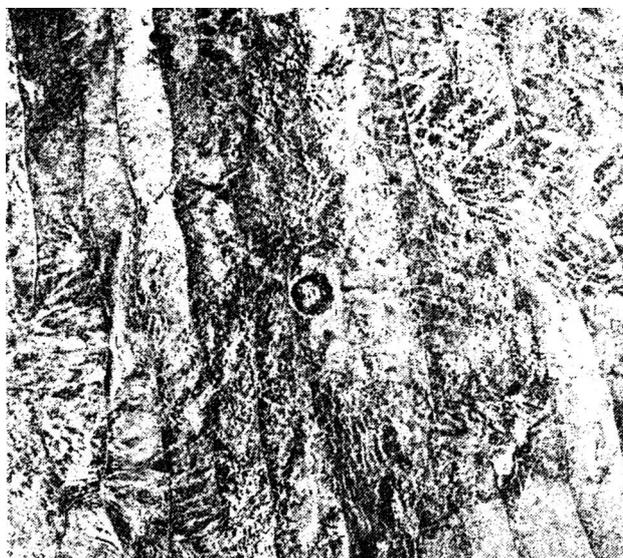


Рис. 5. Холмисто-останцовая равнина в центре и полосчатые равнины слева и справа сверху. В центре ударный кратер. Ширина кадра 820 км

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 несколько 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 большими 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.

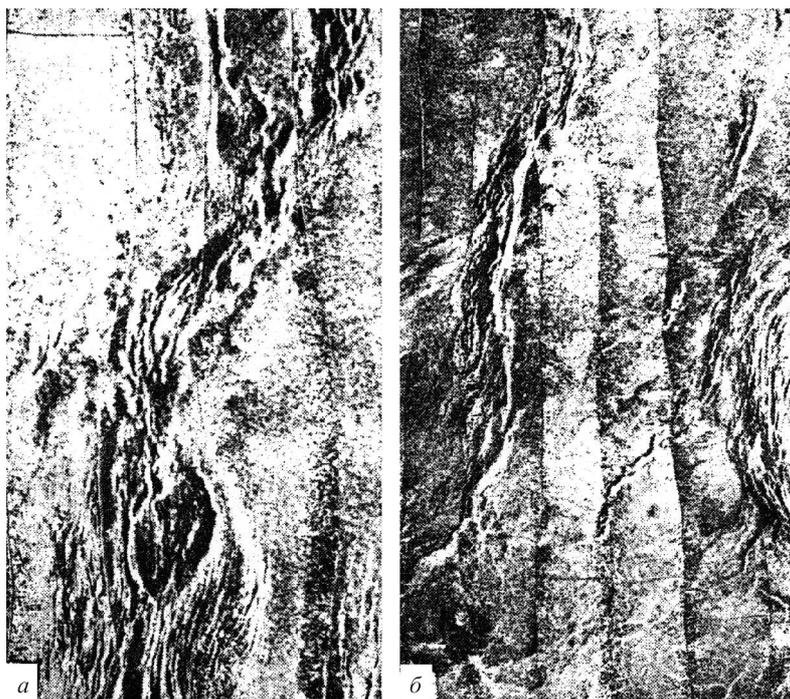


Рис. 7. Пояса линейных дислокаций на равнине Аталанты. Ширина кадров 460 и 500 км

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 вулcano-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-

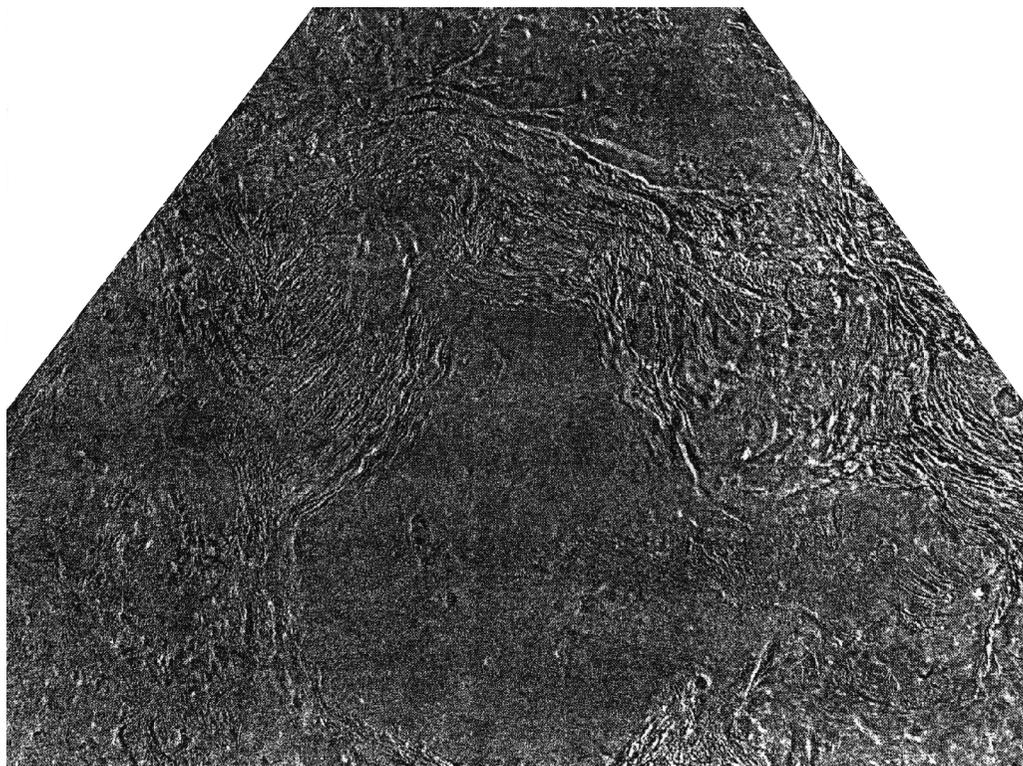


Рис. 8. Фотокарта плато Лакшми и его горного обрамления. Ширина изображения 3200 км. (Север — слева)

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.

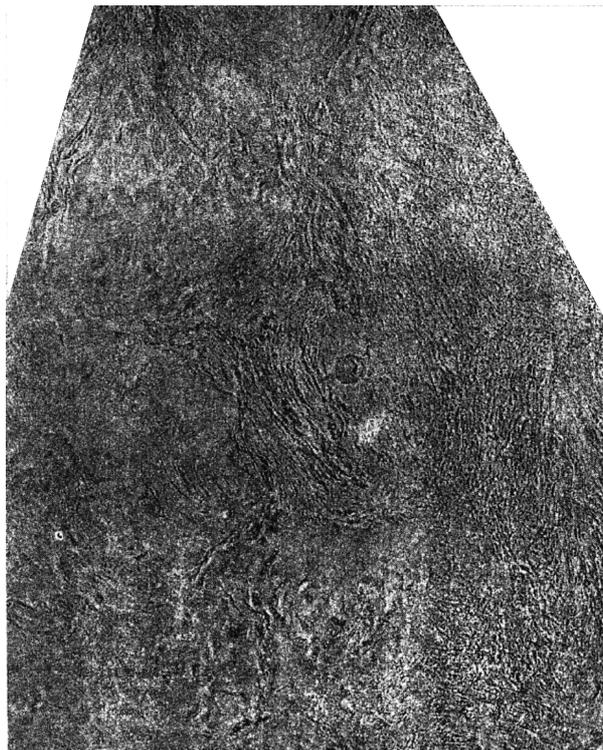


Рис. 9. Фотокарта гор Максвелла и прилегающих территорий. Ширина изображения 1900 км

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

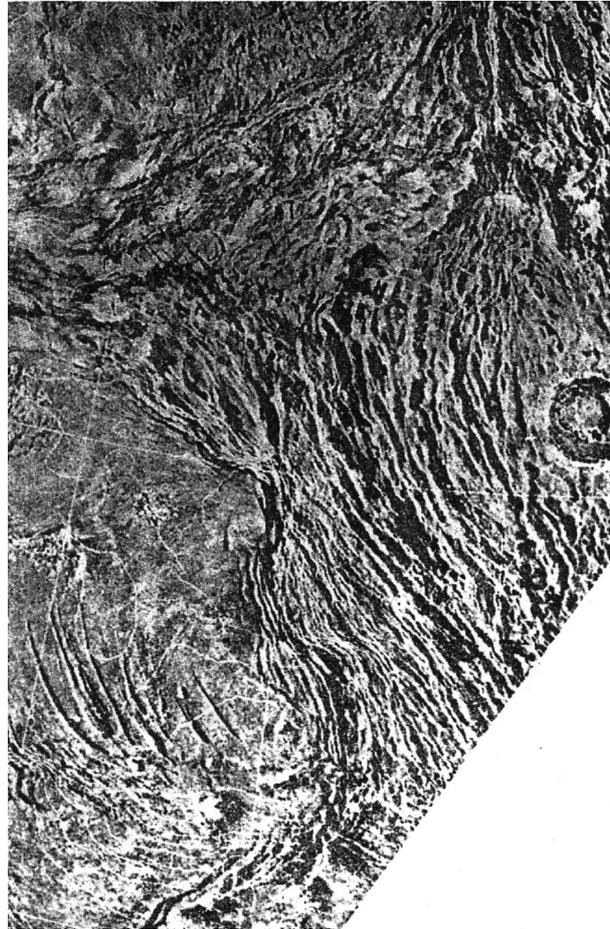


Рис. 11. Горы Максвелла — восточное обрамление плато Лакшми. В нижней части кадра — субширотный сдвиг с оперяющими разрывами. Ширина кадра 620 км

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: *a* — 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 грабеобразные 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 мутьды 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 γ -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, небольшим валам и уступам 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.

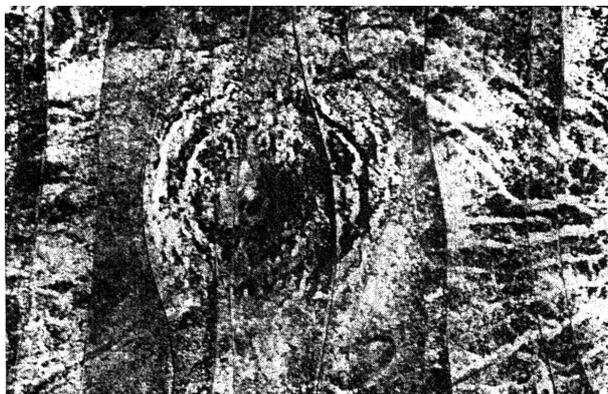


Рис. 20. Крупный ударный кратер на полосчатой равнине. Ширина кадра 400 км

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 вулcano-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.
10. 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.
19. 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: geology 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 В. И. Вернадского АН СССР
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

Поступила в редакцию
10.XI.1985