

УДК 523.42

КОРОНЫ ВЕНЕРЫ: ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ, ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2022 г. Е. Н. Гусева^а*, М. А. Иванов^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*E-mail: guseva-evgeniya@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.08.2021 г.

После доработки 25.10.2021 г.

Принята к публикации 10.11.2021 г.

Короны – это крупные (до 2500 км в диаметре) кольцевые формы рельефа Венеры, определяющим структурным элементом которых является кольцевое обрамление, состоящее из плотно упакованных борозд/гряд. Мы провели детальный фотогеологический и топографический анализ 550 корон и установили следующее: (1) для корон с более молодым обрамлением из рифтовых трещин характерен топографический профиль с доминирующим центральным куполом (класс D). Такой профиль, вероятно, характеризует прогрессивную стадию эволюции родительского диапира. (2) Короны переходного типа с обрамлением, состоящим из поясов борозд и рифтовых трещин, чаще имеют профиль с центральным поднятием, окруженным одной или несколькими концентрическими депрессиями (класс W). Такой профиль может соответствовать переходу от прогрессивной к регрессивной стадии эволюции диапира. (3) Короны, обрамленные более древними поясами борозд или морфологически слабо выраженные в рельефе. Они имеют профиль в виде топографической депрессии (класс U), днище которой может быть осложнено одним или несколькими кольцевыми поднятиями. Такой профиль, возможно, относится к регрессивной стадии эволюции диапира. По-видимому, характерные топографические профили корон соответствуют разным стадиям их формирования и эволюции родительских диапиров. Значительно меньшее количество D-образных корон по сравнению с коронами классов W и U свидетельствует о существенном снижении темпов мантийного диапиризма на поздних стадиях геологической истории Венеры.

Ключевые слова: Венера, короны, геологические особенности, стратиграфические характеристики, топографические профили, эволюция диапира

DOI: 10.31857/S0320930X22020049

ВВЕДЕНИЕ

Видимая геологическая история Венеры состоит из Фортунийского, Гиневрийского и Атлийского периодов, характеризующихся разными режимами эндогенной активности (Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2013; 2015). На протяжении Фортунийского и Гиневрийского периодов формировались тектонизированные комплексы, основные детали длинноволновой топографии и вулканические равнины, занимающие основную часть поверхности планеты (Ivanov, Head, 2011; 2013; 2015; Иванов и др., 2015).

Темп обновления поверхности в течение Фортунийского и Гиневрийского периодов был примерно на порядок выше, чем в течение Атлийского периода (Ivanov, Head, 2013; 2015), когда формировались отчетливо выраженные и весьма протяженные (сотни-тысячи километров) зоны растяжения (рифтовые зоны) и крупные (сотни километров в диаметре) вулканические центры (Crumpler, Aubele, 2000).

На протяжении Гиневрийского и, отчасти, Атлийского периодов формировались специфические вулканотектонические образования – короны (Barsukov и др., 1986; Campbell и др., 1992; Stofan и др., 1992; Basilevsky, Head, 1995; 2000; Stofan, Smrekar, 2005; Ivanov, Head, 2010), которые, возможно, зарождались на разных стадиях геологической истории планеты. На Венере насчитывается несколько сотен корон (Stofan и др., 1992; Crumpler, Aubele, 2000). Они впервые были обнаружены по радарным изображениям, полученным с КА Венера-15/-16 (Барсуков и др., 1984; Barsukov и др., 1986; Барсуков, Волков, 1989; Proin, Stofan, 1990).

Структуры корон – это крупные (до 2500 км в диаметре) кольцевые формы рельефа, которые не имеют морфологических или топографических аналогов на других планетах (Барсуков, Волков, 1989; Head и др., 1992). Характерным структурным элементом корон является их кольцевое обрамление (венец), состоящее из плотно упакованных борозд/гряд.

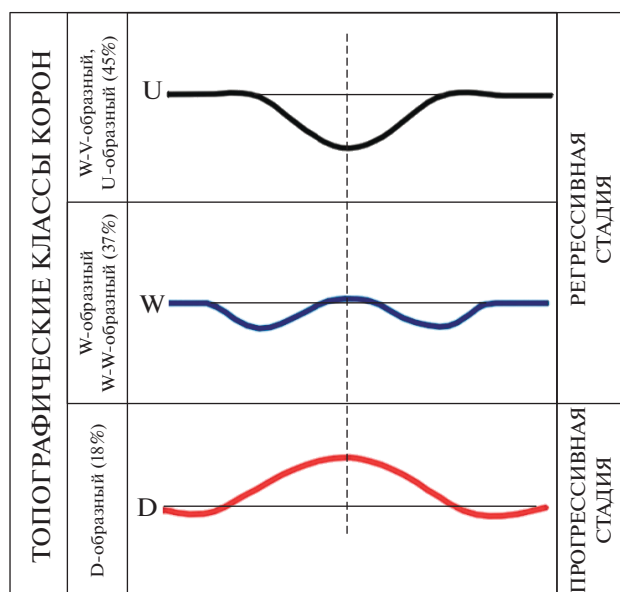


Рис. 1. Модельные топографические профили, которые соответствуют различным стадиям эволюции диапиров (по Smrekar, Stofan, 1997 с изменениями).

ванных борозды/или гряд (Barsukov и др., 1986; Nikishin, 1986; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Stofan и др., 1992). Это обрамление окружает внутреннюю часть короны, где преобладают вулканические образования (Stofan и др., 1992). В некоторых коронах лавовые потоки протягиваются за пределы кольцевого обрамления и выходят на окружающую равнину (Ivanov, Head, 2001). Округлая форма корон и связанная с ними вулканическая и тектоническая активность и их неслучайное пространственное распределение (Phillips и др., 1992) согласованно указывают на то, что короны представляют поверхностные проявления мантийных диапиров (Nikishin, 1986; 1990; Squyres и др., 1992; Janes и др., 1992; Jellinek и др., 2002; Johnson, Richards, 2003; Davaille и др., 2017). Из-за практического отсутствия эрозии на Венере топографическая конфигурация корон может отражать различные этапы эволюции их родительских диапиров, проявленные в последовательной смене характерных топографических профилей (Smrekar, Stofan, 1997).

В предыдущих работах (Гусева, Иванов, 2019; 2020) мы изучили все каталогизированные короны Венеры (Stofan и др., 1992; Crumpler, Aubele, 2000), 550 корон и короноподобных структур и разделили всю популяцию корон на следующие три стратиграфические группы. (1) Короны с обрамлением, состоящим из рифтовых трещин, которые деформируют региональные равнины (81 или 15%). (2) Структуры переходного типа, обрамление которых состоит как из более древних трещин поясов борозд, так и более молодых риф-

товых трещин (25 корон, 4%). (3) Короны с обрамлением во всех случаях подтопленным материалом щитовых и/или региональных равнин и деформированным извилистыми грядами (444 короны или 81%) (Гусева, Иванов, 2020).

По особенностям рельефа все изучаемые короны были разделены нами на пять топографических классов: (1) куполообразные (D-образные) короны, внутренняя часть которых приподнята и находится на более высоком топографическом уровне, чем окружающая местность за пределами вала короны (99 корон или ~18%); (2) W-образные короны характеризуются наличием центрального поднятия и окружены кольцевой впадиной, похожей на ров (188 корон или ~34%); (3) W-W-образные короны в основном соответствуют коронам с двойным концентрическим обрамлением (Stofan и др., 1992), их внутренняя часть представляет собой широкое углубление, окруженное дополнительным внутренним обрамлением (18 корон или ~3%); (4) W-V-образные короны, внутренняя часть которых представляет собой топографические углубления, окруженные топографическим выступающим обрамлением (59 корон или ~11%); (5) U-образные короны, внутренняя часть которых представляет собой широкую топографическую впадину, их кольцевое обрамление – топографически неразличимая особенность, не выраженная в рельефе относительно окружающей местности (186 корон или ~34% популяции).

В данной работе мы объединили пять ранее выделенных топографических классов корон в три наиболее характерных основных класса, – D, W и U (рис. 1) – объединив классы WW и W в класс W, а классы WV и U в класс U. Это было сделано исходя из того, что короны класса WW (3% популяции) и класса WV (11% популяции) представляют собой более топографически контрастные, частные случаи W- и U-образных корон, соответственно.

Профиль класса D имеет доминирующий центральный свод и, вероятно, относится к прогрессивной стадии эволюции, связанной с ростом сводового поднятия под действием восходящего диапира. Профиль класса W характеризуется центральным поднятием, окруженным одной или несколькими концентрическими депрессиями и, по-видимому, отражает переход от прогрессивной к регрессивной стадии эволюции – сводовое поднятие утрачивает тепловую поддержку со стороны диапира и проседает. Профиль класса U, топографическая депрессия, может отражать финальные стадии эволюции диапира. В этой работе мы представляем геологические, топографические и морфометрические особенности корон объединенных топографических классов.

Соотношение количества корон разных стратиграфических групп и топографических классов

Стратиграфические группы	Общее кол-во корон в группе	Топографические классы*		
		D	W	U
Группа 1. Структуры с обрамлением из трещин рифтовых зон	81	37 (46%)	23 (28%)	21 (26%)
Группа 2. Структуры переходного типа	25	6 (24)	15 (60)	4 (16)
Группа 3. Структуры с обрамлением из трещин поясов борозд	444	56 (13)	168 (38)	220 (49)
Всего	550	99 (18)	206 (37)	245 (45)

* Примечание. Числа вне скобок – количество корон. В скобках указан процент корон от общего количества корон в стратиграфической группе.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Группа 1. Короны, обрамление которых состоит из рифтовых трещин. Трещины обрамления деформируют региональные равнины, но иногда подтоплены лопастными равнинами. Эта группа включает 81 структуру (15%) всей популяции корон. Проанализировав топографию корон этой группы, мы установили, что они представлены, в основном, D-образным классом (37 корон или 46% корон этой стратиграфической группы). Реже короны данной группы представлены W- и U-образными структурами (23 или 28% и 21 или 26%, соответственно) (табл.). Таким образом, основная часть корон группы 1, относится к прогрессивной стадии эволюции диапиров (рис. 1).

Примером корон группы 1 служит Shulamite Corona (38.7° ю.ш., 284.4° в.д., 285 км в диаметре, рис. 2). Ее обрамление образовано трещинами рифтовой зоны (rz), которые пересекают поверхность щитовых (psh) и лопастных (pl) равнин. Рифтовая трещиноватость деформирует также обрамление более древней короны, которое образовано трещинами поясов борозд (gb). На востоке они подтоплены материалом щитовых равнин (рис. 2). Более молодые кластеры щитов (sc) и ударные кратеры (с) деформируют рифтовую трещиноватость. Усредненный топографический профиль изучаемой короны относится к D-образному классу и характеризуется центральной куполообразной структурой (рис. 2). Длина профиля составляла $2r$ во всех случаях, где r – это радиус круга, равный по площади (A) той или иной короны, внутри кольцевого обрамления, $r = \sqrt{A/\pi}$. Близость корон по форме к кругу (отношение их длинной и короткой осей, как правило, менее 1.1) обосновывает допустимость такой аппроксимации. Внутренняя часть Shulamite Corona находится на более высоком топографическом уровне, чем окружающая местность за пределами кольцевого обрамления. Вероятно, эта корона, как и основная часть корон этой группы, относится к прогрессивной стадии эволюции диапиров (рис. 1).

Группа 2. Структуры переходного типа, обрамление которых состоит из трещин более древних поясов борозд и более молодых рифтовых зон. Эта

группа включает 25 структур (4%) всей изучаемой популяции корон Венеры (см. таблицу). Их обрамление образовано поясами борозд (gb), которые позднее были деформированы более молодыми рифтовыми трещинами (rz).

Короны данной группы чаще относятся к W-образному классу (15 корон или 60%) и реже имеют D- или U-образные профили (6 или 24%, и 4 или 16%, соответственно, см. табл.). Таким образом, основная часть корон группы 2, вероятно, маркирует переход от прогрессивной к регрессивной стадии эволюции диапиров или/и связана с реактивацией более древних корон при позднем рифтогенезе.

Libera Corona, располагающаяся на 12.9° с.ш., 24.3° в.д., с диаметром 330 км, представляет пример корон группы 2 (рис. 3). Ее обрамление состоит из трещин поясов борозд (gb), подтопленных материалом региональных (tr) и щитовых (psh) равнин. Пояса борозд и подтапливающие их равнины частично переработаны трещинами рифтовых зон (rz), которые образуют обрамление южной части короны (рис. 3). Усредненный топографический профиль изучаемой короны относится к W-образному классу (рис. 3) и корона имеет центральное поднятие, окруженное концентрической впадиной.

Группа 3. Короны, обрамление которых подтоплено региональными и/или щитовыми равнинами. Это наиболее многочисленная группа, включающая 444 структуры (81% всей популяции) изучаемых корон Венеры (таблица).

Эти короны характеризуются, главным образом, U- (220 корон или 49% от всей группы) и W-образными (168 корон или 38%) топографическими профилями (таблица). Короны с D-образным профилем представлены 56 структурами (13%).

Durga Corona (31.1° ю.ш., 286.4° в.д., с диаметром 245 км) представляет пример корон группы 3 (рис. 4). Обрамление короны состоит из трещин поясов борозд (gb), подтопленных материалом региональных (tr) и щитовых (psh) равнин. Усредненный топографический профиль этой короны относится к U-образному классу (рис. 4) и, вероятно, представляет регрессивную стадию эволюции диапиров.

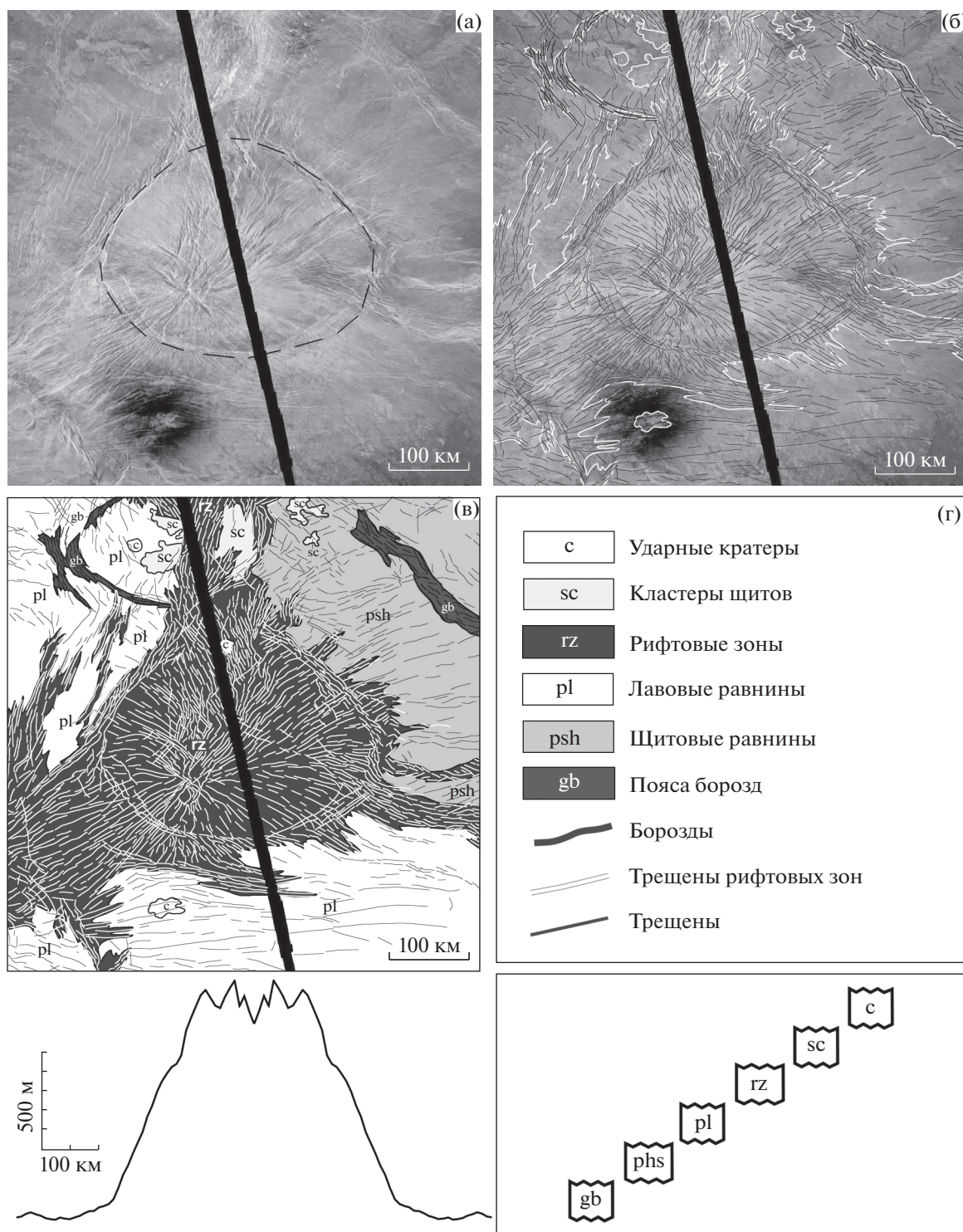


Рис. 2. Корона группы 1, относящаяся к топографическому классу D, – Shulamite Corona (38.7° ю.ш., 284.4° в.д.; диаметр 285 км), изображение в синусоидальной проекции, пространственное разрешение около 352 м/э.и. (а) – обрaмление короны (пунктирная линия) состоит из трещин рифтовых зон, гз; (б) – геологические границы вещественно-структурных комплексов показаны белым цветом, структуры борозд и трещин показаны черным цветом; (в) – геологическая карта и ниже – усредненный топографический профиль короны; (г) – условные обозначения к геологической карте и ниже последовательность формирования вещественно-структурных комплексов.

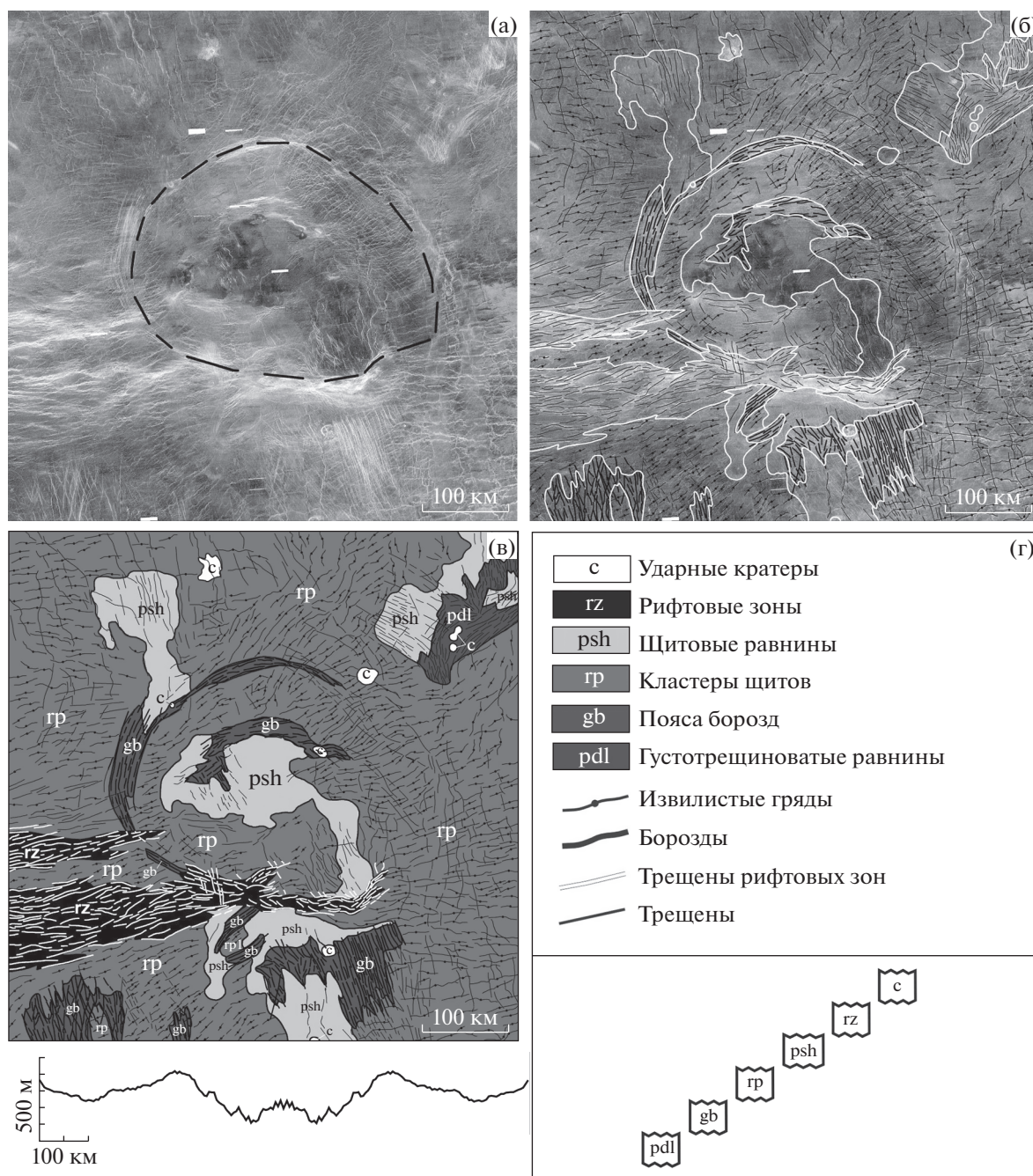


Рис. 3. Корона группы 2, относящаяся к топографическому классу W, – Libera Corona (12.9° с.ш., 24.3° в.д., диаметр 330 км), изображение в синусоидальной проекции, пространственное разрешение около 352 м/э.и. (а) – обрамление короны (пунктирная линия) состоит из трещин поясов борозд (gb) и рифтовых зон (rz); (б) – геологические границы вещественно-структурных комплексов показаны белым цветом, структуры гряд, борозд и трещин показаны черным цветом; (в) – геологическая карта и ниже – усредненный топографический профиль короны W-образного класса; (г) – условные обозначения к геологической карте (в) и ниже последовательность формирования вещественно-структурных комплексов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Мы проанализировали каждую стратиграфическую группу корон и соответствующие им топографические классы, изучили их количественное распределение и установили, что структуры с более молодым обрамлением из рифтовых тре-

щин чаще представлены D-классом, структуры переходного типа чаще характеризуются W-классом и структуры, обрамленные более древними поясами борозд или морфологически слабо выраженные, чаще относятся к U-классу. Если процесс формирования корон на Венере можно оха-

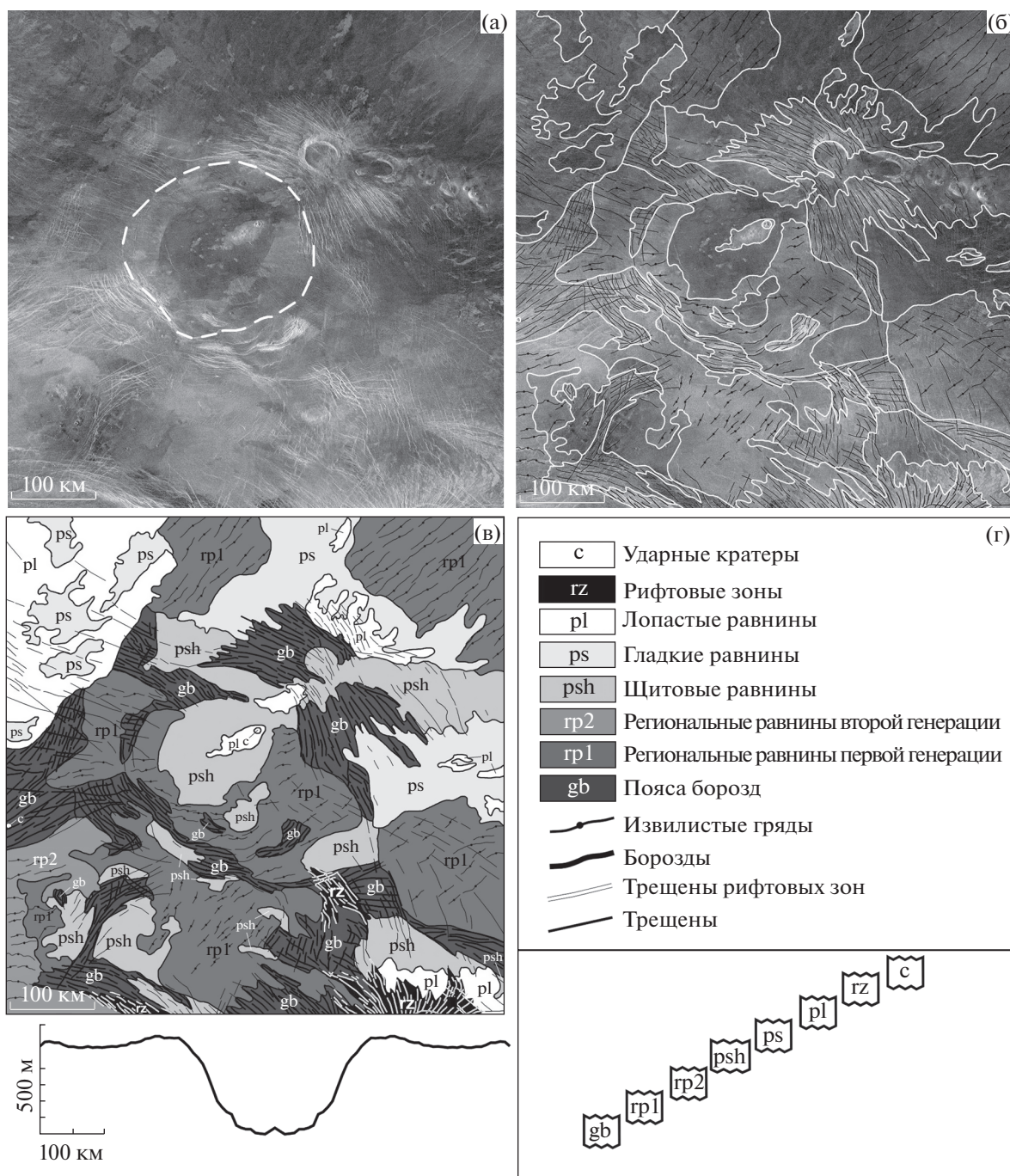


Рис. 4. Корона группы 3, относящаяся к топографическому классу U, – Durga Corona (31.1° ю.ш., 286.4° в.д., диаметр 245 км); изображение в синусоидальной проекции, пространственное разрешение около 352 м/э.и. (а) – обрамление короны (пунктирная линия) состоит из трещин поясов борозд (gb) и подтоплено материалом региональных (gp) и щитовых (psh) равнин; (б) – геологические границы вещественно-структурных комплексов показаны белым цветом, структуры гряд, борозд и трещин показаны черным цветом; (в) – геологическая карта и ниже – усредненный топографический профиль короны; (г) – условные обозначения к геологической карте (в) и ниже последовательность формирования вещественно-структурных комплексов.

характеризовать тремя основными этапами: (1) начальный (сводовобразование), (2) переходный (проседание свода) и (3) завершающий (формирование топографической впадины) (Smrekar,

Stofan, 1997) (рис. 1), то характерные топографические профили корон могут отображать разные стадии их формирования и эволюции родительских диапиров.

Профиль класса D отражает прогрессивную стадию эволюции, связанную с ростом сводового поднятия под действием восходящего горячего диапира.

Профиль класса W, вероятно, отражает переход от прогрессивной к регрессивной стадии эволюции, когда сводовое поднятие утрачивает тепловую и, возможно, динамическую поддержку и начинает проседать из-за растекания и утонения головной части диапира и сброса тепла изголовной части, например, за счет вулканических излияний. Положительные формы рельефа – центральное поднятие и концентрические валы – представляют собой более устойчивые к релаксации коротковолновые (десятки–первые сотни километров) детали рельефа, в большей степени сохраняющие свою топографическую конфигурацию на фоне общего проседания более длинноволнового (сотни километров) топографического региона, находящегося над головной частью диапира.

Профиль класса U может отражать финальные стадии эволюции диапира, когда на поверхности образуется топографическая депрессия. Преобладание W- и U-образных профилей, 82% всей популяции изученных корон (табл.), свидетельствует о том, что пик формирования корон приходился на более ранние эпохи видимой геологической истории Венеры (Ivanov, Head, 2015). Короны классов W и U характеризуются более древним, по отношению к региональным равнинам, обрамлением, состоящим, в основном, из поясов борозд. В большинстве случаев эти пояса борозд подтоплены региональными равнинами. Время формирования региональных равнин может рассматриваться в качестве возрастного стратиграфического маркера (Basilevsky, Head, 2002), возраст которого точно не известен, но может быть представлен как некая величина T , значение которой оценивается в 0.3 млрд лет (Strom и др., 1994), 0.5 млрд лет (Phillips и др., 1992; Schaber и др., 1992), 0.75 млрд лет (McKinnon и др., 1997). Основная часть корон W- и U-классов, которые формировались до становления региональных равнин древнее этих возрастных оценок и, вероятно, относятся к поздним фазам тектонического режима обновления поверхности Венеры (Ivanov, Head, 2015).

D-образные короны, вероятно, соответствуют прогрессивной стадии эволюции родительских мантийных диапиров. Количество таких корон составляет менее одной пятой всей популяции корон. Большинство D-образных корон пространственно и генетически связано с образованиями более поздними по сравнению с региональными равнинами (например, рифтовыми зонами). Из этого следует, что после формирования региональных равнин, в течение вулканотекто-

нического режима обновления поверхности Венеры (Ivanov, Head, 2015), темпы мантийного диапиризма и, как следствие, формирования корон на поверхности, существенно снизились.

ВЫВОДЫ

Представленные в статье результаты позволяют сделать два вывода, касающихся возрастных ограничений на формирование корон Венеры.

(1) Характерные топографические профили корон, вероятно, соответствуют разным стадиям их формирования и эволюции родительских диапиров. Для корон с более молодым обрамлением из рифтовых трещин характерен, главным образом, топографический профиль D-класса, который, вероятно, относится к прогрессивной стадии эволюции родительского диапира. Короны переходного типа с обрамлением, состоящим из поясов борозд и рифтовых трещин, чаще имеют профиль W-класса, который может соответствовать переходу от прогрессивной к регрессивной стадии эволюции диапира. Короны, обрамленные более древними поясами борозд или морфологически слабо выраженные в рельефе, имеют профиль U-класса, по-видимому, относятся к регрессивной стадии эволюции диапира.

(2) Значительно меньшее количество D-образных корон, по сравнению с коронами классов W и U, свидетельствует о существенном снижении темпов мантийного диапиризма на поздних стадиях геологической истории Венеры. Это может говорить о том, что поздний, вулканотектонический, режим обновления поверхности отражает смену характера мантийной конвекции на Венере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания № 0137-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсуков В.Л., Базилевский А.Т., Кузьмин Р.О., Пронин А.А., Крючков В.П., Николаева О.В., Черная И.М., Бурба Г.А., Бобина Н.Н., Шашкина В.П., Марков М.С., Суханов А.Л. Геология Венеры по результатам радиолокационных изображений, полученных АМС “Венера-15” и “Венера-16” (предварительные данные) // Геохимия. 1984. № 12. С. 1811–1820.
- Барсуков В.Л., Волков В.П. Планета Венера (атмосфера, поверхность, внутреннее строение). М.: Наука, 1989. 482 с.
- Гусева Е.Н., Иванов М.А. Пространственно-временные соотношения поясов борозд, структур корон и рифтовых зон Венеры // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 6. С. 403–414.
- (Guseva E.N., Ivanov M.A. Spatiotemporal relationships of the groove belts, coronal structures, and rift zones of Venus // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 6. P. 411–422.)
- Гусева Е.Н., Иванов М.А. Результаты топографического и геологического анализа структур корон Венеры //

- Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 6. С. 529–536.
(Guseva E.N., Ivanov M.A. Structures of coronae on Venus: Results of topographic and geologic analysis // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 6. P. 497–503.)
- Иванов М.А., Хэд Дж.У., Базилевский А.Т. История длинноволновой топографии Венеры // Астрон. вестн. 2015. Т. 49. № 1. С. 3–14.
(Ivanov M.A., Head J.W., Basilevsky A.T. History of the long-wavelength topography of Venus // Sol. Syst. Res. 2015. V. 49. № 1. P. 1–11.)
- Barsukov V.L., Basilevsky A.T., Burba G.A., Bobinna N.N., Kryuchkov V.P., Kuzmin R.O., Nikolaeva O.V., Pronin A.A., Ronca L.B., Chernaya I.M., Shashkina V.P., Garanin A.V., Kushky E.R., Markov M.S., Sukhanov A.L., Kotelnikov V.A., Rzhiga O.N., Petrov G.M., Alexandrov Yu.N., Sidorenko A.I., Bogomolov A.F., Skrypnik G.I., Bergman M.Yu., Kudrin L.V., Bokshstein I.M., Kronrod M.A., Chochia P.A., Tyufin Yu.S., Kadnichansky S.A., Akim E.L. The geology and geomorphology of the Venus surface as revealed by radar images obtained by Venera 15 and 16 // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. B 4. P. D378–D398.
- Basilevsky A.T., Head J.W. Global stratigraphy of Venus: analysis of a random sample of thirty-six test areas // Earth, Moon and Planets. 1995. V. 66. P. 285–336.
- Basilevsky A.T., Head J.W. The geologic history of Venus: a stratigraphic view // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 8531–8544.
- Basilevsky A.T., Head J.W. Geologic units on Venus: evidence for their global correlation // Planet and Space Sci. 2000. V. 48. P. 75–111.
- Basilevsky A.T., Head J.W. Venus: Timing and rates of geologic activity // Geology. 2002. V. 30. № 11. P. 1015–1018.
- Campbell D.B., Stacy N.J.S., Newman W.I., Arvidson R.E., Jones E.M., Musser G.S., Roper A.Y., Schaber C. Magellan observations of extended impact crater related features on the surface of Venus // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 16.249–16.277.
- Crumpler L.S., Aubele J. Volcanism on Venus // Encyclopedia of Volcanoes / Eds Houghton Bruce, Rymmer Hazel, Stix John, McNutt Steve, and Sigurdson Haraldur. San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Toronto: Acad. Press, 2000. P. 727–770.
- Davaille A., Smrekar S.E., Tomlinson S. Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus // Nature Geoscience. 2017. V. 10(5). P. 349–355.
- Head J.W., Crumpler L.S., Aubele J.C., Guest J., Saunders R.S. Venus Volcanism: Classification of volcanic features and structures, associations, and global distribution from Magellan data // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 13.153–13.197.
- Ivanov M.A., Head J.W. Geology of Venus: Mapping of a global geotraverse at 30N latitude // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № E8. P. 17515–17566.
- Ivanov M.A., Head J.W. The Lada Terra Rise and Quetzalpetlatl Corona: a region of long-lived mantle upwelling and recent volcanic activity on Venus // Planet. and Space Sci. 2010. V. 58. P. 1880–1894.
- Ivanov M.A., Head J.W. Global geological map of Venus // Planet. and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1559–1600.
- Ivanov M.A., Head J.W. The history of volcanism on Venus // Planet. and Space Sci. 2013. V. 84. P. 66–92.
- Ivanov M.A., Head J.W. The history of tectonism on Venus: A stratigraphic analysis // Planet. and Space Sci. 2015. V. 113–114. P. 10–32.
- Janes D.M., Squyres S.W., Bindschadler D.L., Baer G., Schubert G., Sharpton V.L., Stofan E.R. Geophysical models for the formation and evolution of coronae on Venus // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № E10. P. 16055–16068.
- Jellinek A.M., Lenardic A., Manga M. The influence of interior mantle temperature on the structure of plumes: Heads for Venus, tails for the Earth // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 11. P. 27–1–27–4.
- Johnson C.L., Richards M.A. A conceptual model for the relationship between coronae and large-scale mantle dynamics on Venus // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № E6. P. 12–1–12–18.
- McKinnon W.B., Zahnle K.J., Ivanov B.A., Melosh J.H. Cratering on Venus: Models and observations // Venus II – Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment / Eds Bougher S.W. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 1997. P. 969–1014.
- Nikishin A.M. Hot spot tectonics on Venus: implications for rifting and doming // Lunar and Planet. Sci. 1986. V. XVII. P. 615–616.
- Nikishin A.M. Tectonics of Venus: a review // Earth, Moon and Planets. 1990. V. 50/51. P. 101–125.
- Phillips R.J., Raubertas R.F., Arvidson R.E., Sarkar I.C., Herrick R.R., Izenberg N., Grimm R.E. Impact craters and Venus resurfacing history // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № E10. P. 15.923–15.948.
- Pronin A.A., Stofan E.R. Coronae on Venus: Morphology and distribution // Icarus. 1990. V. 87. P. 452–474.
- Schaber G.G., Strom R.G., Moore H.J., Soderblom L.A., Kirk R.L., Chadwick D.J., Dawson D.D., Gaddis L.R., Boyce J.M., Russell J. Geology and distribution of impact craters on Venus: What they are telling us? // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 13.257–13.301.
- Smrekar S.E., Stofan E.R. Corona formation and heat loss on Venus by coupled upwelling and delamination // Science. 1997. V. 277. P. 1289–1294.
- Stofan E.R., Sharpton V.L., Schubert G., Baer G., Bindschadler D.L., Janes D.M., Squyres S.W. Global distribution and characteristics of coronae and related features on Venus: Implications for origin and relation to mantle processes // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № E8. P. 13347–13378.
- Stofan E.R., Smrekar S.E. Large topographic rises, coronae, large flow field, and large volcanoes on Venus: Evidence for mantle plumes? // Geol. Soc. Am. Spec. Paper. 2005. V. 388. P. 841–861.
- Strom R.G., Schaber G.G., Dawson D.D. The global resurfacing of Venus // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 10.899–10.926.
- Squyres S.W., Janes D.M., Baer G., Bindschadler D.L., Schubert G., Sharpton V.L., Stofan E.R. The morphology and evolution of coronae on Venus // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 13.611–13.634.