

УДК 523

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО И ГЕОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СТРУКТУР КОРОН ВЕНЕРЫ

© 2020 г. Е. Н. Гусева<sup>а</sup>, \*, М. А. Иванов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

После доработки 15.07.2020 г.

Принята к публикации 21.07.2020 г.

Результаты анализа топографии и геологии корон Венеры позволили установить наиболее типичные топографические профили корон, определить их относительный возраст по характерному типу обрамления и соотношению с окружающими вулканотектоническими комплексами, а также определить стадии эволюции корон согласующиеся с результатами численного моделирования эволюции мантийных диапиров на Венере. Установлено, что большинство корон – это проявления поздней регрессивной стадии эволюции мантийных диапиров. Такие короны пространственно связаны с поясами борозд и характеризуют поздние эпизоды тектонического режима обновления поверхности. Количество корон, которые могут проявляться на ранних и поздних этапах регрессивной стадии, по нашим данным примерно одинаково. Это позволяет предположить, что материнские корнообразующие диапиры преимущественно формировались в конце тектонического режима, но эта активность прекратилась до становления обширных лавовых равнин (щитовых и региональных равнин) во время вулканического режима. Меньшая часть всей популяции корон (18%) представляет проявления начальной, прогрессивной, стадии эволюции диапиров, характеризующейся ростом куполообразной структуры над диапиром.

**Ключевые слова:** Венера, структуры корон, кольцевое обрамление (венцы), топографический профиль, геологическое строение, проявления мантийных диапиров, этапы эволюции

**DOI:** 10.31857/S0320930X20060031

### ВВЕДЕНИЕ

Геологическая история Венеры делится на два периода с разными режимами эндогенной активности. Более древний – Гиневрийский период охватывал примерно первую треть видимой геологической истории Венеры, а более молодой – Атлийский оставшую ее часть. В начале Гиневрийского периода формировались тектонизированные подразделения и основные детали длинноволновой топографии Венеры. В конце этого периода формировались вулканические равнины, занимающие основную часть поверхности планеты (Ivanov, Head, 2013; 2015). На протяжении Гиневрийского периода было обновлено около 85% поверхности Венеры. Атлийский период характеризовался и тектоникой, и вулканизмом, главным образом в крупных регионах. Тектоническая активность проявлена в формировании протяженных зон растяжения, вулканизм сконцентрирован в относительно немногочисленных крупных вулканических центрах. На протяжении Атлийского периода было обновлено около 15% поверхности планеты. Темп обновления поверхности в течение Гиневрийского периода был при-

мерно на порядок выше, чем в течение Атлийского периода (Ivanov, Head, 2013; 2015). При этом, короны, вероятно, представляют собой долгоживущие вулканотектонические структуры, существовавшие на протяжении всей геологической истории Венеры (Basilevsky, Head, 1995a; 2000b; Stofan, Smrekar, 2005; Ivanov, Head, 2010) и зарождавшиеся на разных стадиях эволюции планеты (Smrekar, Stofan, 1997).

Короны (ранее назывались “овоиды” и “венцы”) впервые обнаружены на поверхности Венеры по радарным изображениям, полученным с КА Венера-15/16 (Барсуков и др., 1984; Барсуков, Волков, 1989; Pronin, Stofan, 1990). Это крупные кольцевые и часто асимметричные формы рельефа, достигающие 2500 км в поперечнике, и не имеющие морфологических или топографических аналогов на других планетах (Барсуков, Волков, 1989; Head и др., 1992). Определяющим элементом корон является наличие кольцевого обрамления – венца, состоящего из плотно упакованных борозд, и в некоторых случаях, гряд (Barsukov и др., 1986; Nikishin, 1989; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Stofan и др., 1992). Кольцевое обрамление окру-

жает внутреннюю часть короны, где преобладают вулканические образования (Stofan и др., 1992). В некоторых коронах отдельные лавовые потоки протягиваются за пределы кольцевого обрамления (Ivanov, Head, 2001). Концентрическая форма корон, их неслучайное пространственное распределение (Phillips и др., 1992), а также ярко выраженные вулканические и тектонические компоненты указывают на то, что комплексы корон являются поверхностными проявлениями мантийных диапиров (Nikishin, 1989; 1990; Janes и др., 1992; Jelinek и др., 2002; Johnson, Richards, 2003). При такой интерпретации корон их топографическая конфигурация имеет важное значение, поскольку она может отражать различные этапы эволюции корон (Smrekar, Stofan, 1997). Krelavsky и Vdovichenko (1996) показали, что выделенные ими различные топографические классы корон коррелируют с размером структур корон. Размер корон, вероятно, определяется параметрами корообразующих диапиров. Численное моделирование эволюции мантийного диапира на Венере указывает на последовательную смену характерных топографических профилей, соответствующим разным фазам эволюции корон. Профили варьируют от куполообразного поднятия на прогрессивной стадии развития диапира, когда диапир останавливается у подошвы литосферы и за счет положительной плавучести выгибает ее вверх, до топографической депрессии на заключительной стадии эволюции диапира, когда из-за потери тепла диапир приобретает отрицательную плавучесть и погружается.

В нашей работе мы исследовали топографическое строение всех каталогизированных корон и короноподобных структур, чтобы классифицировать их по характерным топографическим профилям и оценить возможные стадии эволюции мантийных диапиров, которым эти профили могут соответствовать. Кроме того, мы проанализировали геологическую ситуацию, в которой находится каждая из исследованных корон, чтобы установить стратиграфическую принадлежность корон разных топографических классов.

## МЕТОДЫ

В данном исследовании мы использовали опубликованные каталоги корон Венеры (Stofan и др., 1992; Crumpler, Aubele, 2000). Мы проверили эти каталоги, чтобы исключить повторения, и объединили их вместе в один список структур (<http://www.planetology.ru/coronalist.php?language=english>). Мы изучили морфологию каждой короны их этого списка, чтобы определить их внешние границы, различные на мозаиках изображений формата C1-MIDR (разрешение 225 м/пкс), оконтурить каждую из корон в виде полигона в среде ArcGIS и определить их площадь с исполь-

зованием равноплощадной картографической проекции (Mollweide). Площадь корон ( $A$ ) была ключевым параметром для вычисления эффективного радиуса ( $r$ ) каждого объекта ( $r = \sqrt{A/\pi}$ ) и определения центра корон как центра тяжести полигона.

Когда координаты центров корон были определены, мы построили усредненные топографические профили корон (длина профиля составляла  $2r$  во всех случаях). Для этого мы использовали топографическую карту, построенную по данным КА Магеллан, с пространственным разрешением  $\sim 5$  км/пкс. Каждая точка усредненного профиля представляет собой среднее значение высоты в зонах шириной один пиксель топографической карты, концентрических относительно географического центра короны.

Короны представляют собой округлые структуры, но их форма в плане часто отклоняется от идеального круга и обычно выглядит в некоторой степени вытянутой. Мы оценивали степень удлиненности корон по величине отношения их длинных и коротких осей ( $A = L/W$ ). Среднее значение этого отношения составляет  $1.27 (\pm 0.23, 1\sigma)$ . В интервал  $\pm 1$  сигма попадает примерно 75% всех корон, а количество корон, у которых отношение  $A$  меньше значения 1.50 составляет примерно 85% всей популяции. Верхняя граница интервала  $\pm 1$  сигма, 1.50, соответствует удлинению короны в 23% (эквивалентно эллипсу с осями 1 и 0.66 ед.). Таким образом, преимущественно низкие значения отношения  $A$  дают основание аппроксимировать форму корон кругом с площадью равной площади короны и конструировать усредненный топографический профиль с помощью средних значений высот в зонах, концентричных центральному кругу.

Количество корон с величиной отношения  $A \geq 2$  (удлинение примерно 41%), форма которых может оказывать существенное влияние на конфигурацию усредненного профиля, невелико и составляет менее 1% всей популяции корон. Хотя такое малое количество явно удлиненных корон не может заметно влиять на частотное распределение типов усредненных топографических профилей, в нашем исследовании мы исключили удлиненные короны из рассмотрения.

Стратиграфическое положение изучаемых корон оценивалось с помощью геологической карты Венеры (Ivanov, Head, 2011) в масштабе 1 : 10000000.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В нашей работе было исследовано 550 корон и короноподобных структур. По особенностям рельефа все изучаемые короны были разделены на пять топографических классов: (1) куполообразные короны (D-образные), внутренняя часть ко-

**Таблица 1.** Геологические особенности корон различных топографических классов

Топографический класс	Всего структур	% структур	группа 1	группа 2	группа 3	группа 4	Вулканизм
Куполообразные	99	18	44	6	37	12	26
W-образные	188	34	130	13	17	28	12
W-W-образные	18	3	9	2	6	1	1
W-V-образные	59	11	45	1	9	4	8
U-образные	186	34	118	3	12	53	10
<b>Общее количество</b>	<b>550</b>	<b>100</b>	<b>346</b>	<b>25</b>	<b>81</b>	<b>98</b>	<b>57</b>
<b>% структур от общего количества</b>			<b>63</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>10</b>

Примечание: 1 группа – короны с кольцевым обрамлением, представленным поясами борозд; 2 группа – короны с обрамлением, частично состоящим из трещин поясов борозд и частично из трещин рифтовых зон; 3 группа – короны с обрамлением, состоящим из рифтовых трещин; 4 группа – короны с морфологически слабо выраженным обрамлением. Вулканизм – для каждого класса корон нами подсчитано количество структур пространственно связанных с лопастными равнинами.

торых приподнята и находится на более высоком топографическом уровне, чем окружающая местность за пределами вала короны (рис. 1а). Мы насчитали 99 таких корон (~18% от всей анализируемой популяции структур). (2) W-образные короны. Эти структуры характеризуются наличием центрального пика и окружены круглой впадиной похожей на ров (рис. 1б). Мы выявили 188 таких корон (~34% популяции). (3) W-W-образные короны, которые в основном соответствуют коронам с двойным концентрическим обрамлением (Stofan и др., 1992). Внутренняя часть таких структур представляет собой широкое углубление, окруженное дополнительным внутренним обрамлением (рис. 1в). В нашем исследовании было обнаружено только 18 таких структур (~3% популяции). (4) W-V-образные короны, внутренняя часть которых представляет собой топографические углубления, окруженные топографическим выступающим обрамлением (рис. 1г); таких корон насчитывается 59 (~11% популяции). (5) U-образные короны, внутренняя часть которых представляет собой широкую топографическую впадину (рис. 1д). Кольцевое обрамление таких корон является топографически неразличимой особенностью и не выражено в рельефе относительно окружающей местности. Этих корон насчитывается 186 (~34% популяции) (табл. 1).

Используя геологическую карту Венеры (Ivanov, Head, 2011), мы проанализировали геологическое строение изучаемых корон и поделили их на четыре группы по типу обрамления корон. (1) Структуры с обрамлением, представленным поясами борозд, во всех случаях подтопленным материалом региональных равнин и/или деформированным извилистыми грядами (рис. 2). Таких структур мы насчитали большую часть (346 из 550 или 63%). (2) Структуры переходного типа, обрамление которых частично состоит из более древних трещин поясов борозд и частично из более молодых рифтовых трещин (25 структур или

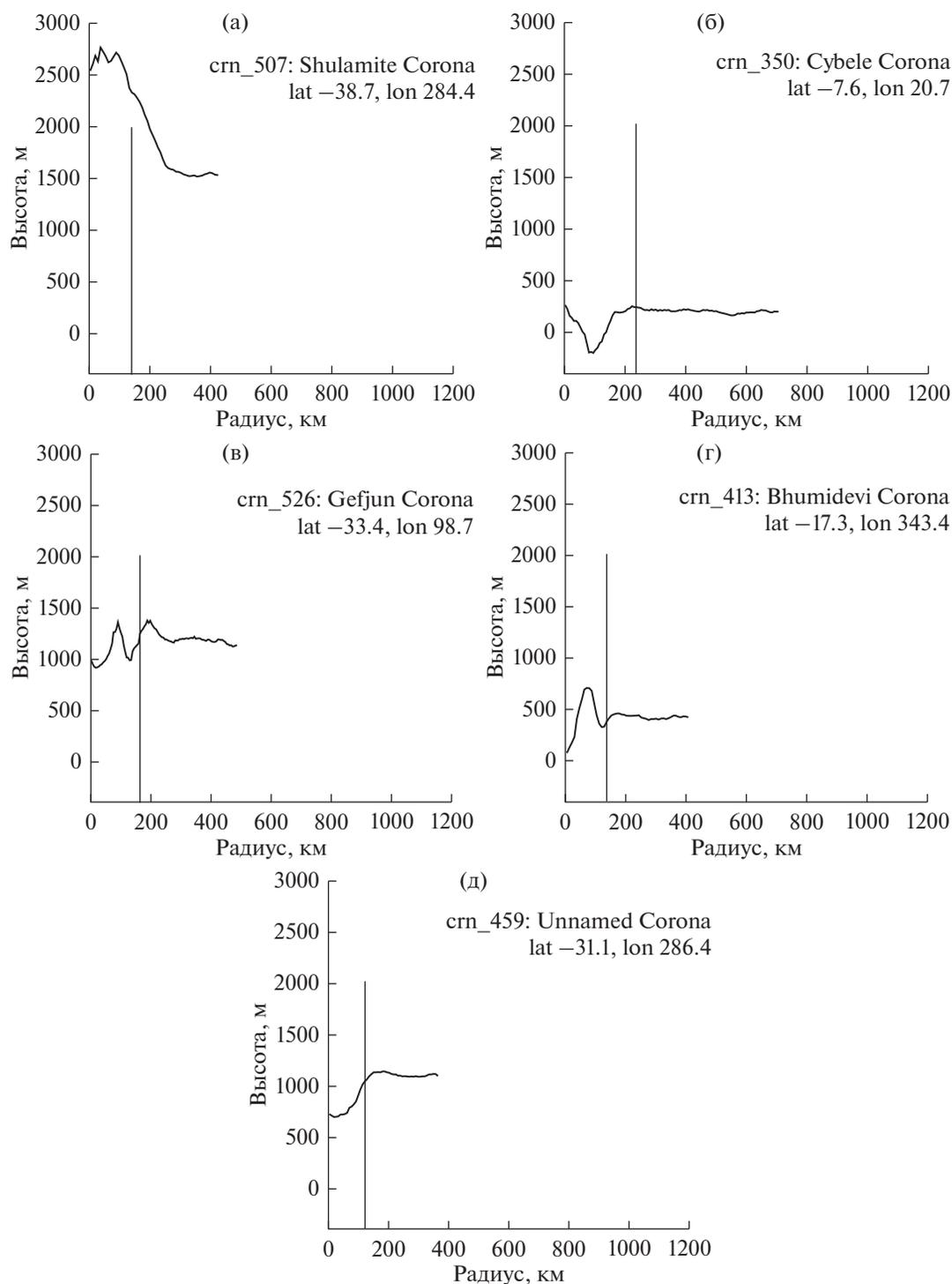
5%). (3) Структуры с обрамлением, состоящим из рифтовых трещин, которые деформируют региональные равнины, но в некоторых случаях затоплены лопастными равнинами (81 или 15%) (рис. 3). (4) Структуры, с морфологически слабо выраженным обрамлением или затопленные материялом щитовых и/или региональных равнин (98 структур или 18%).

“До-рифтовые” короны (группа 1) с обрамлением, представленным поясами борозд наиболее часто имеют W-образный (130 структур) и U-образный (118 структур) топографические профили (рис. 1б, 1д), которые соответствуют поздним модельным фазам эволюции корон (рис. 4д–4ж). До-рифтовые короны, вероятно, представляют собой более древние структуры, находящиеся на регрессивной стадии эволюции.

Короны “переходного” типа (группа 2) чаще характеризуются W-образным топографическим профилем (13 структур) (рис. 1б), так же, как и “до-рифтовые” короны, структуру которых они “наследуют”.

Большая часть корон с “рифтовым” обрамлением (группа 3) – это куполообразные структуры (37 структур) (рис. 1а). Такой топографический профиль соответствует начальным модельным фазам эволюции (рис. 4а–4в) и, следовательно, рифтовые короны представляют прогрессивную стадию эволюции диапира. Среди корон куполообразного типа насчитывается большое количество структур пространственно связанных с лопастными равнинами (26 структур), что является признаками проявления относительно молодой вулканической активности (Ivanov, Head, 2013).

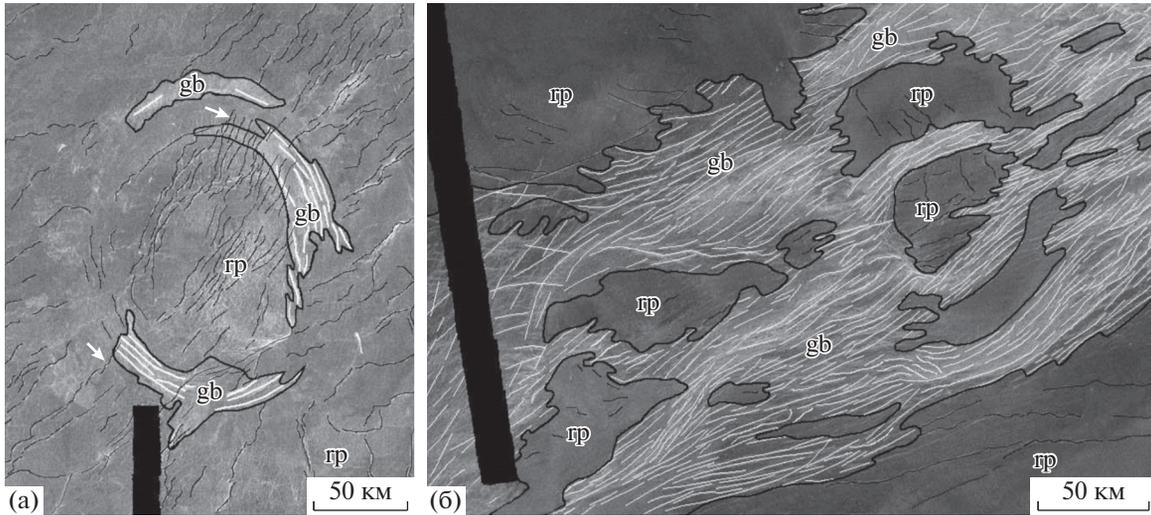
Стадии эволюции коронообразующих родительских диапиров, их прогрессивные и регрессивные фазы, иллюстрирует серия модельных топографических профилей (рис. 4, Smrekar, Stofan, 1997). Начальные фазы прогрессирующей стадии характеризуются ростом куполообразной структу-



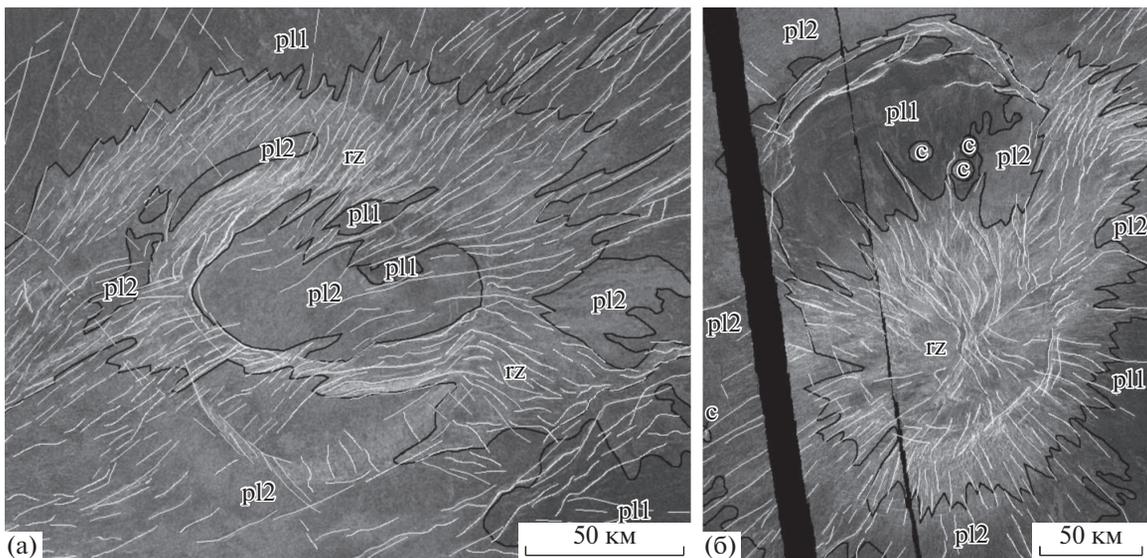
**Рис. 1.** Топографические профили, характерные для пяти различных классов корон Венеры: (а) – куполообразные; (б) – W-образные; (в) – W-W-образные; (г) – W-V-образные; (д) – U-образные короны.

ры над диапиром, который упирается в подошву литосферного реологического барьера (рис. 4а–4в). Этот характерный топографический профиль соответствует куполообразным коронам (рис. 1а). Согласно результатам численного моделирова-

ния (Smrekar, Stofan, 1997), эти короны представляют собой стадию эволюции, когда материнский диапир все еще обладает достаточной положительной плавучестью, чтобы иметь возможность смещать литосферный барьер вверх. К этому топо-



**Рис. 2.** “До-рифтовые” короны. Обрамление структур корон состоит из трещин поясов борозд (gb) и подтоплено материалом региональных равнин (rp) на обоих изображениях. Стрелками показаны извилистые гряды – характерные структуры региональных равнин, пересекающие трещиноватость обрамления короны. Изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение около 352 м/пкс.



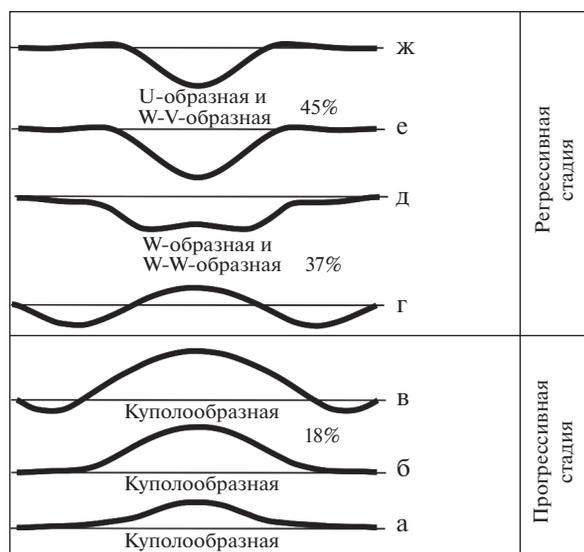
**Рис. 3.** “Рифтовые” короны. Обрамление структур корон состоит из рифтовых трещин (rz), которые пространственно связаны с потоками лопастных равнин (первой генерации – p11 и второй генерации – p12) на обоих изображениях. На изображении (б) показаны ударные кратеры (c). Изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение 352 м/пкс.

графическому классу относится примерно пятая часть всей популяции корон и короноподобных структур.

Большая часть куполообразных корон (их характерный диаметр 175–225 км) сконцентрирована в области Бета–Агла–Фемида, БАФ (рис. 5 – 51 корона в пределах БАФ и 48 корон за пределами этой области, 52 и 48% соответственно). Эта область ограничена мощными ветвями рифтовых зон и характеризуется обильными полями ло-

пастных равнин (Squyres и др., 1992; Stofan и др., 1992; Гусева, Иванов, 2019; Guseva, Ivanov, 2019). Как рифты, так и лопастные равнины являются характерными особенностями позднего вулканотектонического режима обновления поверхности (Ivanov, Head, 2013; 2015).

Таким образом, около 18% куполообразных корон на Венере сформировались в поздний вулканотектонический период и пространственно ассоциируют с областью БАФ.



**Рис. 4.** Топографические профили корон на разных этапах их эволюции (модифицированные из (Smrekar, Stofan, 1997)).

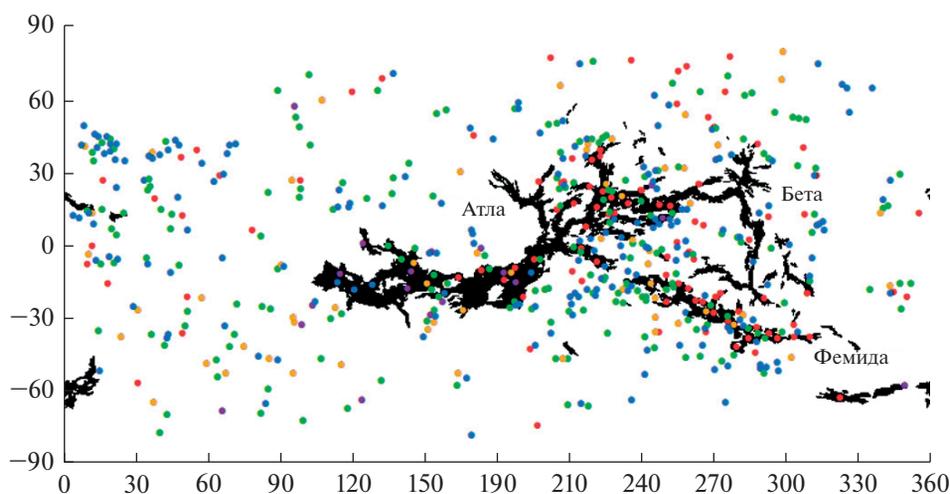
Для всех остальных корон основной особенностью их топографической конфигурации (рис. 1б–1д) является более длинноволновая депрессия внутри срединной части короны, которая осложняется более коротковолновыми положительными топографическими деталями. Согласно модельным результатам (Smrekar, Stofan, 1997), наличие просевшей внутренней части указывает на то, что такие короны находятся на регрессивной стадии эволюции, когда родительский диапир потерял положительную плавучесть из-за сброса тепла. W-W и W-образные короны, которые составляют ~37% всей популяции корон и могут соответствовать

более ранним фазам регрессивной стадии (рис. 4г, 4д). Около половины (45%) анализируемых корон представляют собой либо кольцевые структуры, либо топографические впадины без обрамления (категории W-V и U, рис. 4е, 4ж), что может соответствовать поздним фазам регрессивного этапа эволюции диапиров (Smrekar, Stofan, 1997). Наши результаты показывают, что большинство корон на Венере – это проявления более поздней стадии эволюции мантийных диапиров, когда они приобрели отрицательную плавучесть. Абсолютное большинство этих корон пространственно связаны с поясами борозд и характеризуют более поздние эпизоды тектонического режима обновления поверхности (Ivanov, Head, 2015). Количество корон, которые могут проявляться на ранних и поздних этапах регрессивной стадии, примерно одинаково (37 и 45% соответственно). Это позволяет предположить, что материнские коронообразующие диапиры сформировались в более широком временном интервале к концу тектонического режима, но эта активность прекратилась до появления обширных лавовых равнин вулканического режима обновления поверхности (щитовых и региональных равнин), которые впитали тектонические компоненты большинства корон.

## ВЫВОДЫ

Детальное топографическое и стратиграфическое исследование корон, проведенное нами, дает основания сделать нижеследующие выводы.

1) Характерная топографическая конфигурация позволяет разделить всю популяцию корон на пять классов: (1) куполообразные короны (D-образные, 99 структур или ~18% всей популяции изучаемых



**Рис. 5.** Распределение корон и рифтовых зон на поверхности Венеры. Рифты показаны черным цветом (Ivanov, Head, 2011). Структуры корон разных топографических категорий показаны разными цветами: куполообразные – красные точки; W-образные – зеленые; W-W-образные – фиолетовые; W-V-образные – оранжевые; U-образные – синие.

структур); (2) W-образные (188 структур или ~34%); (3) W-W-образные (18 структур или ~3%); (4) W-V-образные (59 структур или ~11%) и (5) U-образные (186 структур или ~34%).

2) Возрастные соотношения обрамления корон с окружающей местностью указывает на существование трех стратиграфических типов корон: (1) относительно более древние структуры, обрамление которых (как правило, это пояса борозд) подтоплено материалом щитовых и/или региональных равнин (группы 1 и 4); (2) структуры переходного типа, обрамление которых частично состоит из более древних поясов борозд и частично из более молодых рифтовых трещин (группа 2); (3) относительно более молодые структуры, обрамление которых образовано трещинами рифтовых зон (группа 3).

3) Более древние короны, сформированные до становления региональных и щитовых равнин, резко преобладают и составляют примерно 80% всей популяции корон. Наиболее часто они имеют W- (158 корон) и U-образный (171 корон) топографические профили и представляют собой структуры, находящиеся на регрессивной стадии эволюции родительских диапиров.

4) Короны переходного типа редки (25 корон или 4.5% популяции), что свидетельствует о разделении во времени процессов формирования более древних и более молодых корон. Короны переходного типа чаще всего характеризуются W-образным топографическим профилем (13 корон), унаследованным от более древних, до-рифтовых, корон, на месте которых формируются короны переходного типа.

5) Короны, образованные после становления региональных и щитовых равнин (третья стратиграфическая группа), составляют примерно 15% всей популяции корон. Основная часть таких корон (46%), имеет куполообразный профиль, свидетельствующий о прогрессивной стадии развития родительских диапиров.

(6) Количественное распределение корон разных стратиграфических типов свидетельствует, что эти вулканотектонические комплексы преимущественно формировались в течение более раннего, тектонического режима обновления поверхности (Ivanov, Head, 2015).

Авторы выражают благодарность за ценные замечания по данной публикации профессору, доктору геол.-минерал. наук А.Т. Базилевскому, канд. физ.-мат. наук М.А. Креславскому и профессору, доктору геол.-минерал. наук А.М. Никишину.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барсуков В.Л., Базилевский А.Т., Кузьмин Р.О., Пронин А.А., Крючков В.П., Николаевна О.В., Черная И.М., Бурба Г.А.,

Бобина Н.Н., Шапкина 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. С. 482.

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. Spatio-temporal Relationships of the Groove Belts, Coronal Structures, and Rift Zones of Venus // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 6. P. 411–422.)

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., Tyufilin 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. 1995a. V. 66. P. 285–336.

Basilevsky A.T., Head J.W. Geologic units on Venus: evidence for their global correlation // Planet and Space Sci. 2000b. V. 48. P. 75–111.

Crumpler L.S., Aubele J. Volcanism on Venus // Encyclopedia of Volcanoes / Eds Bruce Houghton, Hazel Rymer, John Stix, Steve McNutt, and Haraldur Sigurdson. Acad. Press. San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Toronto. 2000. P. 727–770.

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.
- Kreslavsky M., Vdovichenko R.* Topography of Small Coronae on Venus: Preliminary Overview // *Lunar and Planet. Sci.* XXVII. 1996. P. 699–700.
- Nikishin A.M.* Hot spot tectonics on Venus: implications for rifting and doming // *Lunar and Planet. Sci.* XVII. 1986. 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.
- 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.
- Squyres S.W., Janes D.M., Baer G., Bindschandler 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.