

УДК 523.42-834-5

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПОЯСОВ БОРОЗД, СТРУКТУР КОРОН И РИФТОВЫХ ЗОН ВЕНЕРЫ

© 2019 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 17.10.2018 г.

После доработки 04.03.2019 г.

Принята к публикации 13.06.2019 г.

Проанализированы пространственные и возрастные соотношения вулканотектонических комплексов развитых на поверхности Венеры: поясов борозд, корон и рифтовых зон. Большинство (60%) корон пространственно и стратиграфически связаны с поясами борозд. В основном, это кольцевые и кальдероподобные короны. Часть корон (20%) связана с рифтовыми зонами. Такие короны относятся к категории сводовых и сконцентрированы в области Бета–Атла–Фетида (БАФ). Пространственная ассоциация структур корон с региональными зонами растяжения и преобладание структур растяжения (борозд) в обрамлении корон позволяет предполагать, что эти комплексы также формировались в обстановке растяжения. Спейсинг трещин (расстояние между соседними трещинами) в обрамлении корон имеет типичное значение 1.1 ± 0.4 км, как более древних, так и более молодых, что примерно в два раза меньше характерного спейсинга структур молодых рифтовых зон (1.8 ± 0.4 км) и практически совпадает со значениями спейсинга трещин в древних поясах борозд (1.2 ± 0.3 км). Мы интерпретируем совпадение величины характерного спейсинга трещин в обрамлении корон и в поясах борозд как возможное указание на более древний возраст корон, совпадающий с возрастом формирования поясов борозд.

Ключевые слова: Венера, рифтовые зоны, венцы (обрамления) корон, морфология трещиноватости, мантийный диапиризм, сводообразование и тектоника

DOI: 10.1134/S0320930X19060033

ВВЕДЕНИЕ

Три основных вещественно-структурных комплекса Венеры отражают региональную обстановку растяжения, действовавшую на разных этапах геологической истории планеты. Пояса борозд сформировались на более ранних стадиях видимой геологической истории планеты (Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2013). Короны, вероятно, представляют собой долгоживущие комплексы (Basilevsky, Head, 1995; 2000b; Smrekar, Stofan, 1997; Stofan, Smrekar, 2005; Ivanov, Head, 2010), а рифтовые структуры являются проявлением позднего тектонизма планеты (Basilevsky, Head, 2000a; Ivanov, Head, 2013; 2015a).

Пояса борозд (gb) образованы сериями сближенных прямолинейных, дугообразных, или слегка извилистых трещин и грабенов, локализованных в протяженных зонах, достигающих первых тысяч километров в длину. Пояса борозд деформируют более древние подразделения, такие как тессера (t), густотрещиноватые (pdl) и грядовые равнины (rg), и перекрываются материалом более молодых щитовых (psh) и региональных

равнин (rp) (Head, Basilevsky, 1998). Пояса борозд распространены во многих областях Венеры и занимают около ~8.7% площади поверхности планеты (Ivanov, Head, 2011).

На Венере насчитывается несколько сотен корон (Stofan и др., 1992; Crumpler, Aubele, 2000). Короны представляют собой крупные кольцевые вулканотектонические структуры диаметром от 75 до 2500 км, впервые обнаруженные на поверхности Венеры по данным экспедиции Венера-15, -16 (Барсуков и др., 1984; Pronin, Stofan, 1990). Они не имеют морфологических и топографических аналогов на других планетах (Барсуков, Волков, 1989; Head и др., 1992; Stofan и др., 1992; Johnson, Richards, 2003). Определяющим элементом корон является наличие кольцевой зоны деформаций – венца. Обрамление подавляющего большинства корон составляют скопления плотно упакованных борозд (Stofan и др., 1992), хотя в некоторых случаях в венцах корон видны структуры сжатия (гряды) (Barsukov и др., 1986).

Рифтовые зоны (rz), как и пояса борозд, представлены скоплениями структур растяжения (трещины и грабены), чередующихся с горстами,

которые являются останцами более древней местности. Рифты пересекают большинство структурно-вещественных комплексов Венеры и расположены преимущественно в экваториальной области планеты, где образуют глобальную систему протяженностью около 50000 км (Marsursky и др., 1980; McGill и др., 1981; Schaber, 1982; Jurdy, Stefanick, 1999). Общая площадь рифтовых зон составляет примерно 5% поверхности Венеры (Ivanov, Head, 2011).

Короны часто встречаются в ассоциации с поясами борозд и рифтовыми зонами (Ivanov, Head, 2015a), что, вероятно, указывает на генетическую связь корон с линейными зонами растяжения. Такая связь предполагалась многими авторами (Solomon и др., 1992; Baer и др., 1994; Stefanick, Jurdy, 1996; Hamilton, Stofan, 1996; Stofan и др., 1997; Roberts, Head, 1993; Condi, 2001; Krassilnikov, Head, 2003; Krassilnikov и др., 2012).

Целью исследования было выявление возрастных соотношений корон с поясами борозд и рифтовыми зонами Венеры. Характер таких соотношений позволил бы ввести важные ограничения на модели предполагаемой генетической связи корон с эпизодами регионального растяжения на Венере.

Методы исследований. Главным методом исследования был традиционный и многократно опробованный фотогеологический анализ изображений поверхности. Такой анализ позволяет выявлять специфические морфологические единицы, устанавливая характер их пространственного распределения и соотношения относительно возраста с окружающими типами местности. В качестве фотогеологической основы мы использовали радарные изображения поверхности Венеры, полученные экспедицией Magellan (Saunders и др., 1990). Пространственное разрешение изображений составляет 106 м/э.и.; они практически полностью покрывают поверхность Венеры.

В качестве дополнительных источников информации мы использовали каталог корон, где указаны их координаты, размер и тип структур (Stofan и др., 1992), а также глобальную геологическую карту Венеры, на которой показано распределение поясов борозд и рифтовых зон (Ivanov, Head, 2011).

Эти данные позволяют детально охарактеризовать ассоциацию корон с определенными структурными трендами, морфологию трещиноватости обрамления и пространственно-временные соотношения с региональными зонами растяжения — поясами борозд и рифтовыми зонами. Основываясь на каталоге структур корон (Stofan и др., 1992) и геологической карте Венеры (Ivanov, Head, 2011), нами были составлены карты распределения корон, ассоциирующихся с рифтовыми зонами и поясами борозд. Эти карты были разде-

лены на области размером $5^\circ \times 5^\circ$, из которых методом случайных чисел было отобрано около 10% для детального фотогеологического анализа. Изображения областей были получены с сайта USGS Map-a-Planet (<https://www.mapaplanet.org/explorer/venus.html>). В этих областях изучались возрастные соотношения корон с другими вещественно-структурными комплексами, и измерялся спейсинг трещин (расстояние между соседними трещинами) в обрамлении корон для сопоставления со спейсингом структур рифтовых зон и поясов борозд.

НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Количественное соотношение корон, пространственно связанных с поясами борозд и рифтовыми зонами

В каталогах корон Венеры, составленных с использованием разных критериев, насчитывается от 200 до 400 корон (Stofan и др., 1992; Crumpler, Aubele, 2000). Несмотря на значительную разницу в количестве структур, оба каталога показывают примерно одинаковые пропорции корон, пространственно связанных с поясами борозд и рифтами. Из всего количества корон около 60% расположено в пределах поясов борозд (gb), приблизительно 20% — в рифтовых зонах (rz) и оставшиеся 20% не имеют пространственной ассоциации с этими зонами растяжения (Stofan и др., 1992; Crumpler, Aubele, 2000).

Отчетливая пространственная ассоциация структур корон с региональными зонами растяжения и преобладание структур растяжения (борозд) в обрамлении корон позволяет предполагать, что эти комплексы также формировались в обстановке растяжения. Короны распространены по всей поверхности Венеры, но наибольшей концентрацией характеризуется область Бета—Атла—Фемида (БАФ) расположенная в пределах от 30° с.ш. и до 30° ю.ш. и от 180° до 300° в.д. Эта область ограничена мощными рифтовыми ветвями (Squyres и др., 1992; Stofan и др., 1992) и характеризуется множественными зонами поясов борозд.

По характерному рельефу короны разделяются на три основных класса: сводовые, кольцевые и кальдероподобные, которые, вероятно, характеризуют разные стадии их эволюции (Smrekar, Stofan, 1997; DeLaughter, Jurdy, 1999). “Сводовые” короны выражены в рельефе возвышенностями, “кольцевые” характеризуются возвышающимся над срединной частью концентрическим валом, а “кальдероподобные” представляют собой круговые низменности — топографические депрессии.

Сводовые короны, вероятно, представляют собой более ранний этап эволюции корон, а кальдероподобные — завершающий этап (Smrekar,

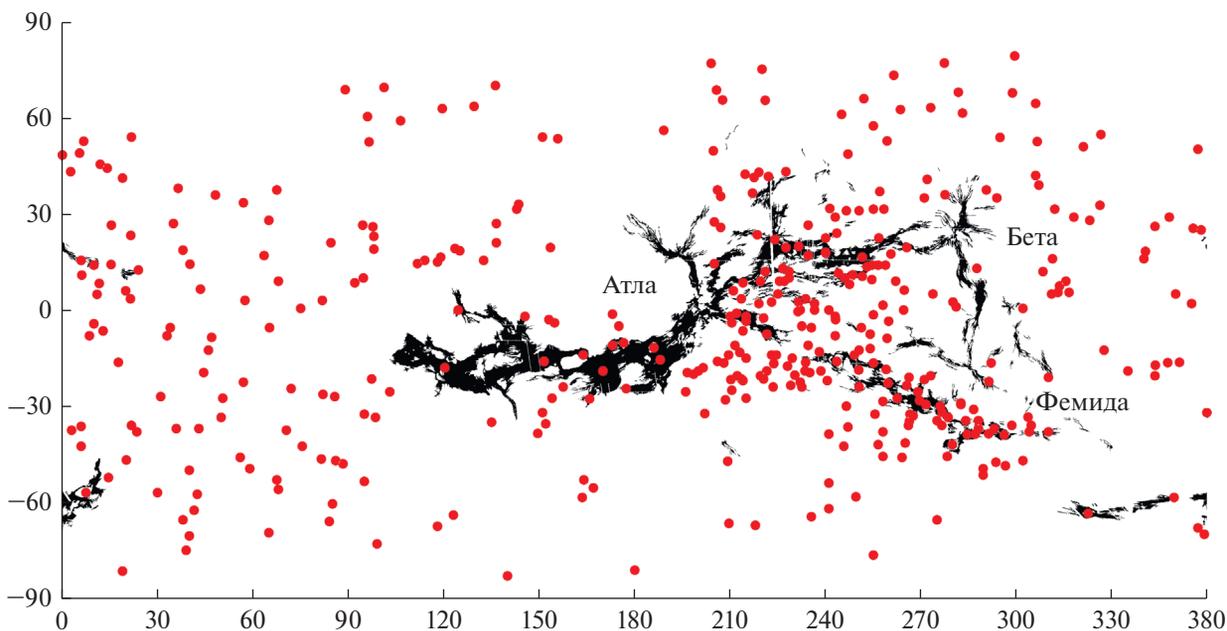


Рис. 1. Распределение корон и рифтовых зон: рифты показаны черным цветом (Ivanov, Head, 2011), структуры корон – красные точки (Stofan и др., 1992).

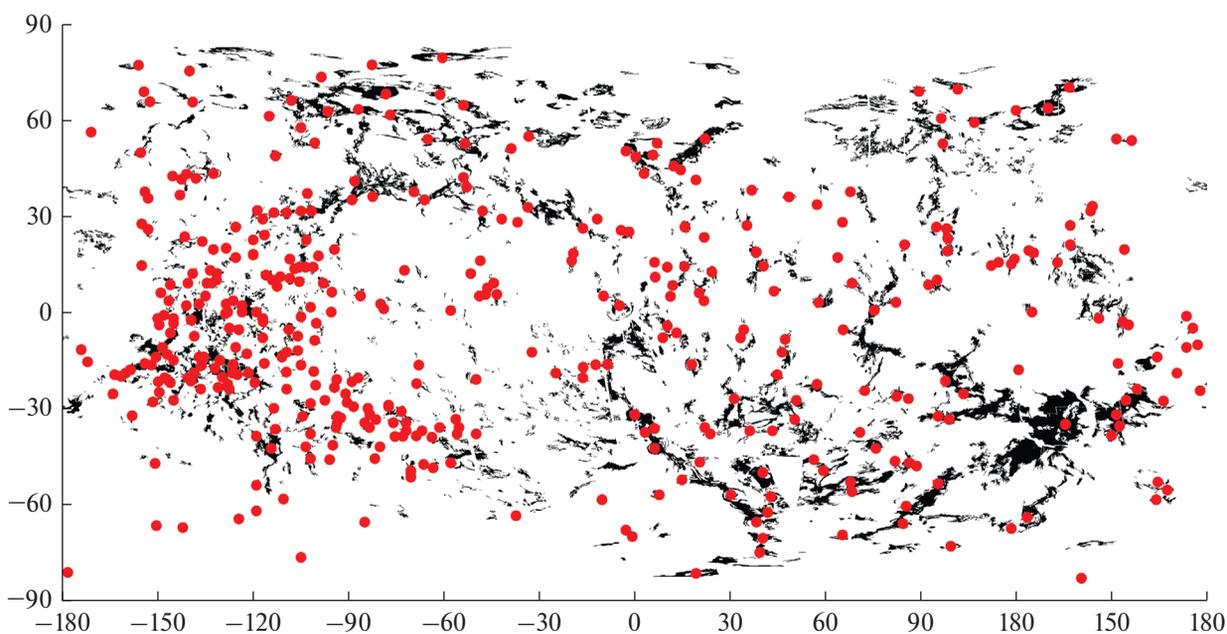


Рис. 2. Распределение корон и поясов борозд на поверхности: пояса борозд показаны черным цветом (Ivanov, Head, 2011), структуры корон – красные точки (Stofan и др., 1992).

Stofan, 1997). Сводные короны сконцентрированы в пределах области БАФ (Suyres и др., 1992; Stofan и др., 1992; Stefanick, Jurdy, 1996; Nagasawa и др., 1998; DeLaughter, Jurdy, 1999), здесь они находятся в ассоциации с рифтовыми зонами (рис. 1). Кольцевые и кальдероподобные короны в основном находятся в ассоциации с поясами борозд (рис. 2).

Возрастные соотношения структур корон с другими вещественно-структурными подразделениями

Наиболее распространенным и практически повсеместным вещественным комплексом Венеры являются региональные равнины (Ivanov, Head, 2011). Эти равнины повсюду имеют одина-

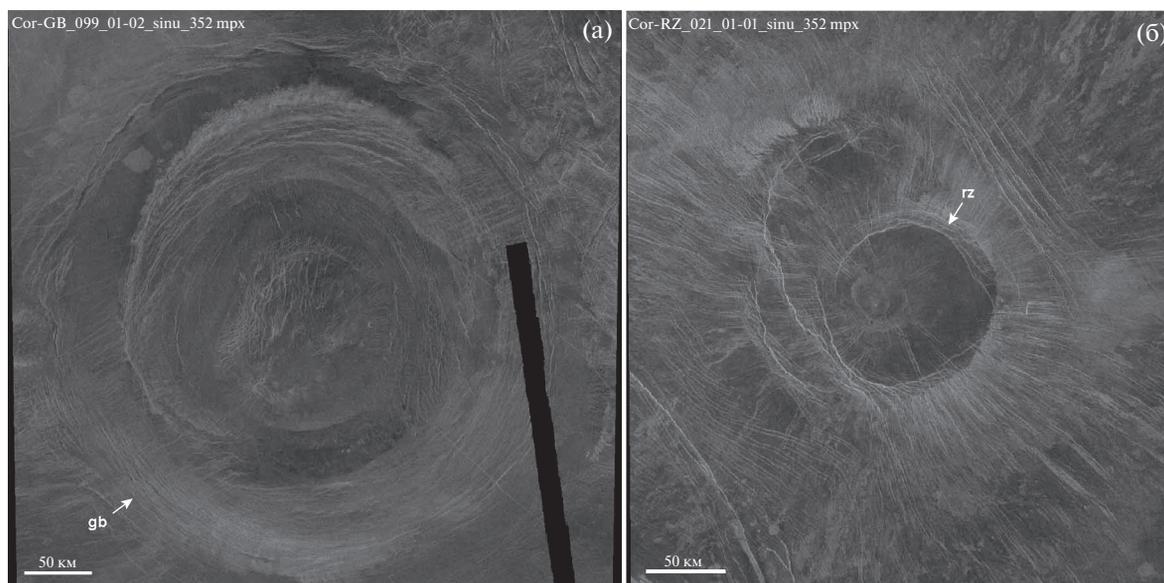


Рис. 3. Примеры структур корон: (а) – более древняя корона (до региональных равнин), изображение Cor-GB_099_01-02_sinu_352mpx и (б) – более молодая, рифтовая корона, изображение Cor-RZ_021_01-02_sinu_352mpx; стрелками показана трещиноватость венца корон: gb – поясов борозд и rz – рифтовых зон.

ковую морфологию, что указывает на однотипность их процесса формирования, по-видимому, в результате лавового затопления поверхности (Ivanov, Head, 2013). Малое количество ударных кратеров, явно подтопленных материалом региональных равнин, указывает на сравнительно короткое время их формирования (Basilevsky, Head, 1998; 2002; Ivanov, Head, 2011; 2015b). Однотипность механизма формирования и короткий временной интервал становления придают региональным равнинам уникальный характер глобального стратиграфического маркера (Basilevsky, Head, 1998; 2002b; Ivanov, Head, 2011; 2015b). Практически все вещественные и структурно-вещественные комплексы Венеры можно разделить на две категории, сформировавшиеся до становления региональных равнин и позднее их.

Результаты детального фотогеологического анализа возрастных соотношений структур корон с региональными равнинами показывают, что и короны могут быть разделены на две популяции: (1) короны, у которых трещинное обрамление подтоплено материалом региональных равнин; (2) короны, у которых в обрамлении доминирует рифтовая трещиноватость, которая пересекает региональные равнины. По этим типичным соотношениям короны можно классифицировать по времени формирования как относительно ранние, образованные до становления региональных равнин, и относительно поздние “рифтовые” короны, формировавшиеся синхронно с рифтовыми зонами (рис. 3).

Более древние короны, образованные до региональных равнин, составляют 79% (29 корон) от

общего числа проанализированных структур. Структурные обрамления этих корон “подтоплены” региональными равнинами (гр), часто деформированы структурами извилистых гряд, а в тех случаях, когда пространственно ассоциируются с рифтами, дополнительно деформированы рифтовой трещиноватостью. В этих случаях более древние короны пересечены рифтовыми структурами, которые накладываются на трещиноватость поясов борозд и наследуют их структурный тренд. К таким коронам относится, например, Dilga Corona (около 220 км в диаметре). Она представляет собой структуру, у которой часть сохранившегося юго-западного обрамления образована трещинами пояса борозд (рис. 4).

С восточной стороны от основной структуры расположена корона меньшего размера, внутренний диаметр которой составляет около 100 км, ее венец тоже образован трещинами пояса борозд. Обе короны подтоплены лопастными равнинами двух разновозрастных подразделений (p_1 и p_2) и пересекаются рифтовой трещиноватостью в направлении с с.з. на ю.в.

Структуры древних корон могут быть одиночными, двоячными и чаще, чем “рифтовые” короны, могут образовывать кластеры (рис. 5).

Структура Ulgen-ekhe Corona представляет собой один из таких кластеров (внутренний диаметр 300 км), состоящий из трех корон: западной, северо-восточной и юго-восточной. Внутренний диаметр каждой из них около 100 км. Юго-восточная корона очерчена молодой рифтовой трещиноватостью и является источником лопастных

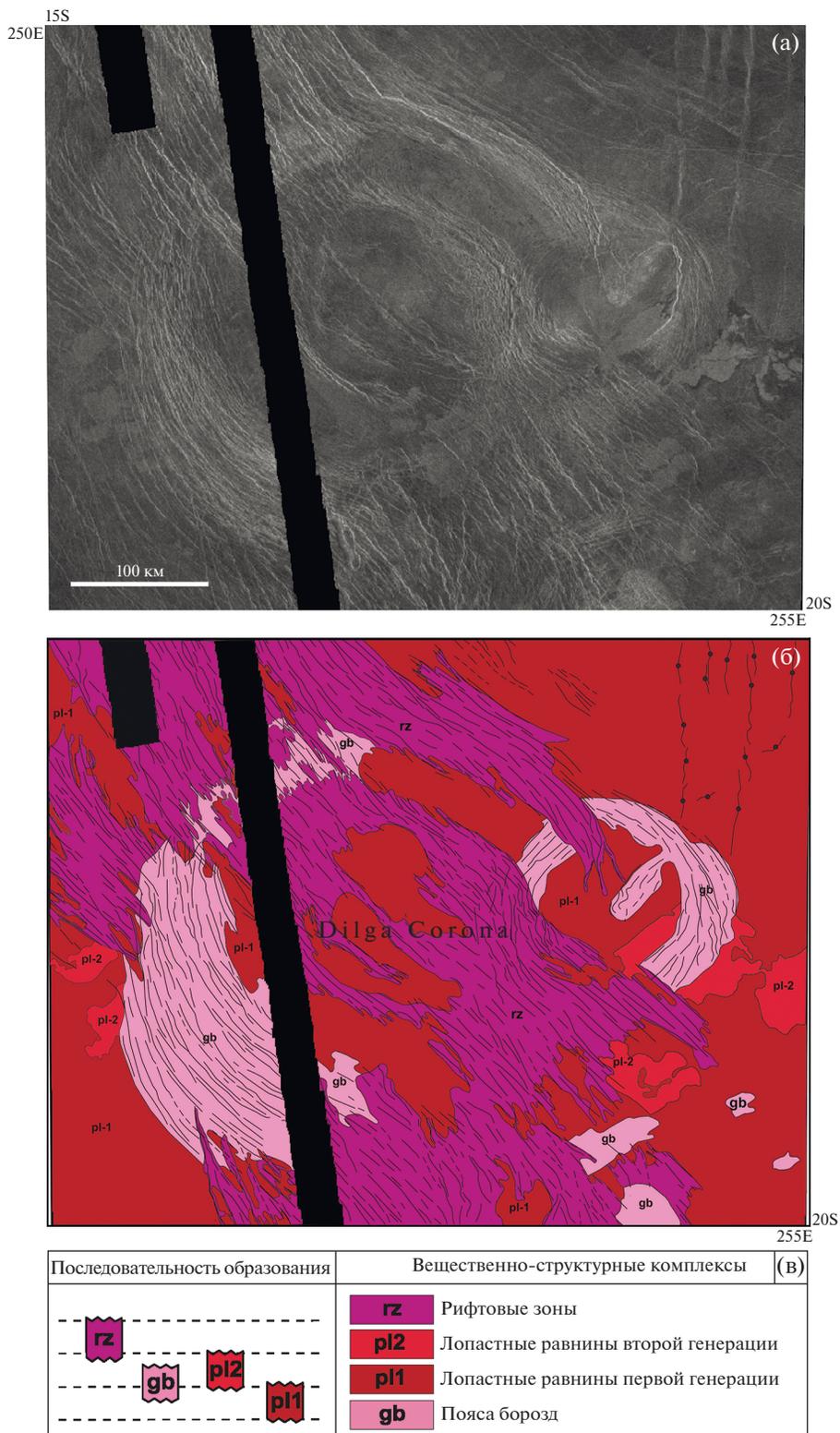
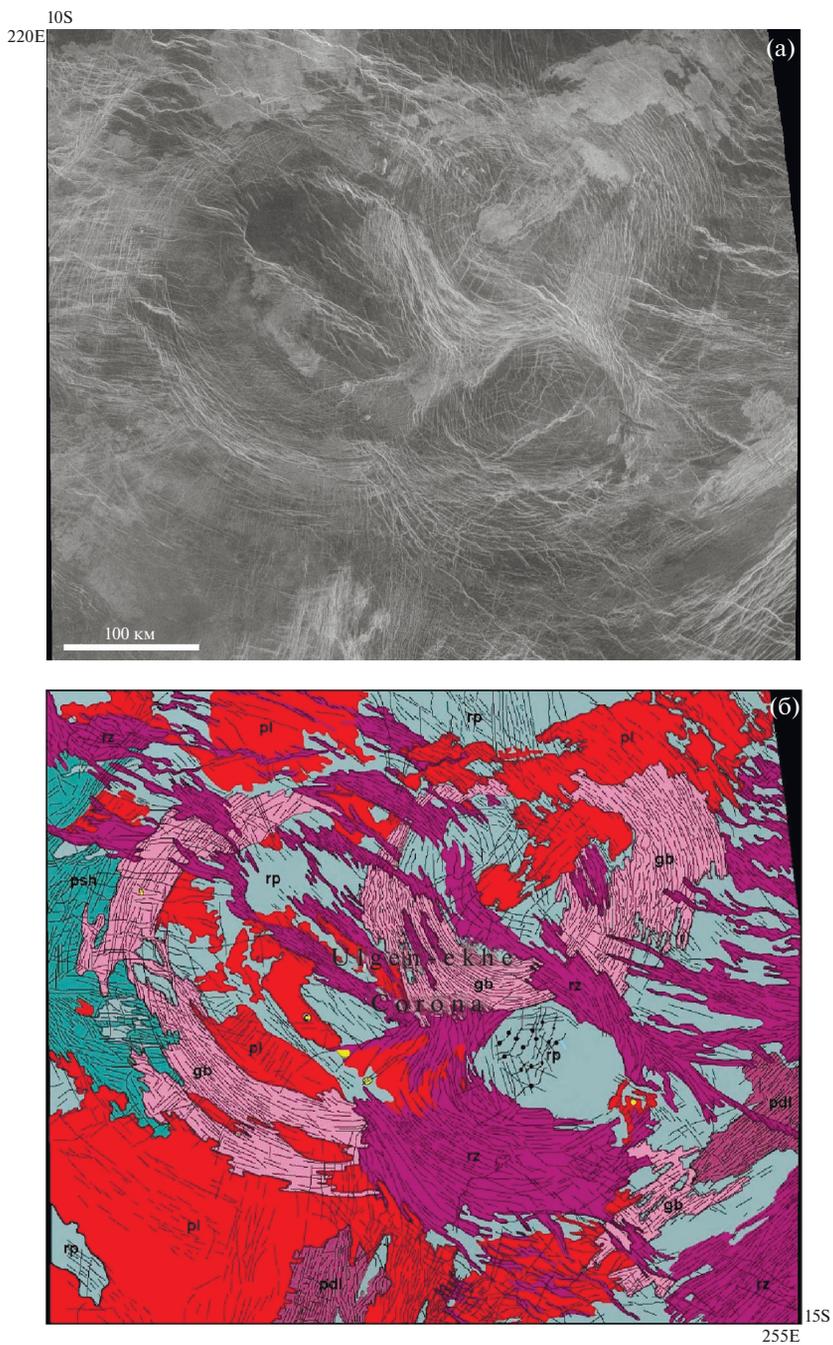


Рис. 4. Древние короны (Cor_016_01_02): (а) – радиолокационное изображение КА Magellan, синусоидальная проекция, пространственное разрешение 352 м/э.и.; (б) – геологическая карта этой области; (в) – схема возрастных соотношений вещественно-структурных комплексов области.



Последовательность образования	Вещественно-структурные комплексы (в)
	с Материал ударных кратеров
	rz Рифтовые зоны
	pl Лопастные равнины
	rp Региональные равнины
	psh Щитовые равнины
	gb Пояса борозд
	pdl Густотрещиноватые равнины

Рис. 5. Кластер древних корон (Cor_070_01_02): (а) – изображение КА Magellan, синусоидальная проекция, разрешение 352 м/э.и.; (б) – геологическая карта области; (в) – схема возрастных соотношений вещественно-структурных комплексов области.

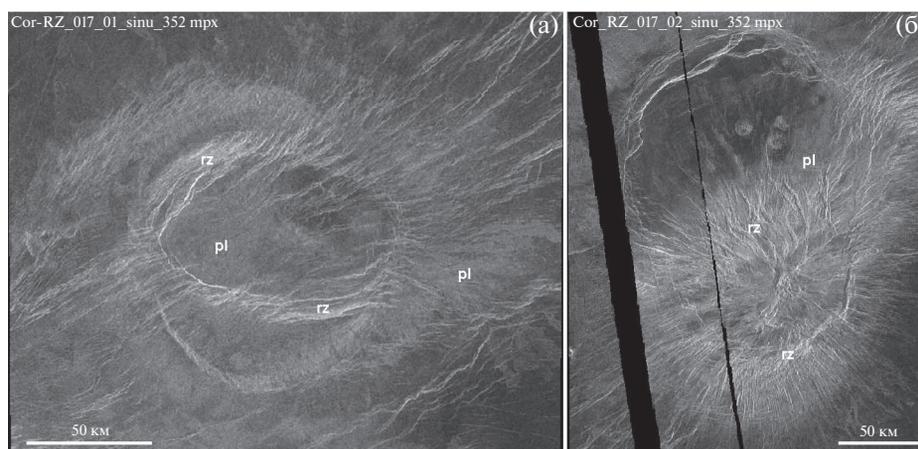


Рис. 6. “Рифтовые” короны: (а) — изображение Cor-RZ_017_01_sinu_352 mpx; (б) — изображение Cor-RZ_017_02_sinu_352 mpx, синусоидальная проекция, пространственное разрешение 352 м/э.и. Венец короны состоит из рифтовых трещин (rz), которые ассоциируют с потоками лопастных равнин (pl) на обоих изображениях.

равнин, которые перекрывают примыкающие региональные равнины (рис. 5). Эта корона наиболее молодая структура кластера. Северо-восточная корона пересекается рифтовой трещиноватостью венца юго-восточной короны, и, следовательно, древнее. Западная корона наиболее древняя по отношению к другим коронам; она пересекается трещиноватостью других структур кластера. Наблюдаемые возрастные соотношения корон кластера с окружающими их комплексами суммированы на рис. 5в.

“Рифтовые” короны составляют 21% (6 корон) от общего числа проанализированных структур. К рифтовым относятся только те короны, в обрамлении которых явно доминируют рифтообразующие структуры. Рифтовые трещины обрамления иногда подтоплены лопастными равнинами и сопровождаются локальными лавовыми излияниями из рифтообразующих грабен/трещин (рис. 6). Некоторые короны характеризуются мощными радиальными трещинами, расходящимися из центра, секущими венц и сопровождающимися лавовыми излияниями. Системы радиальных трещин известны как “новы” — структуры, по-видимому, сформированные в результате подъема небольших магматических тел, которые являются источником радиальных дайковых комплексов (Aittola, Kostama, 2001; Basilevsky, Raitala, 2002; Krassilnikov, Head, 2003; Аиттола, Раитала, 2007; Basilevsky и др., 2009).

Nagavonyi Corona представляет пример рифтовой короны. Ее внутренний диаметр составляет 190 км. Эта корона расположена вблизи рифтовой ветви Parga Chasma: ее венц состоит из трещин, пересекающих почти все остальные примыкающие типы местности (рис. 7а–7б). Некоторые трещины служат источником молодых лавовых потоков.

Северо-восточная часть венца пересечена отдельными наиболее поздними рифтовыми трещинами. Возрастные соотношения этой короны с окружающими комплексами суммированы на рис. 7в.

Сопоставление морфометрических характеристик трещиноватости в пределах венцов корон, рифтовых зон и поясов грабенов

Анализ возрастных соотношений трещиноватости обрамления корон показал, что она может быть как более молодой (рифтовой), так и более древней. Например, Dilga Corona пространственно ассоциируется с рифтовой зоной, но ее обрамление составляет частая, трещиноватость, типичная для поясов борозд (рис. 4, 8). Морфологический анализ трещиноватости обрамления корон, в частности, измерение спейсинга структур позволяет получить дополнительную характеристику для определения возрастной популяции корон. Измерения спейсинга, проводившиеся для большого количества участков в разновозрастных зонах поясов борозд (более древние) и рифтов (более молодые), показали, что рифтовая трещиноватость, как правило, характеризуется большими значениями спейсинга (Mastrapa, 1997; Guseva, 2008). Характерные расстояния между однородными структурными элементами находятся в зависимости от мощности деформированного слоя (Ladeira, Price, 1981; Wu, Pollard, 1995; Ji, Saruwatari, 1998; Brown, Grimm, 1999).

Поэтому систематическое увеличение спейсинга в более молодых зонах растяжения может указывать на увеличение мощности деформируемого слоя (литосферы) с течением времени (Ladeira, Price, 1981; Wu, Pollard, 1995; Ji, Saruwatari, 1998). В этом случае популяция корон, относящихся к

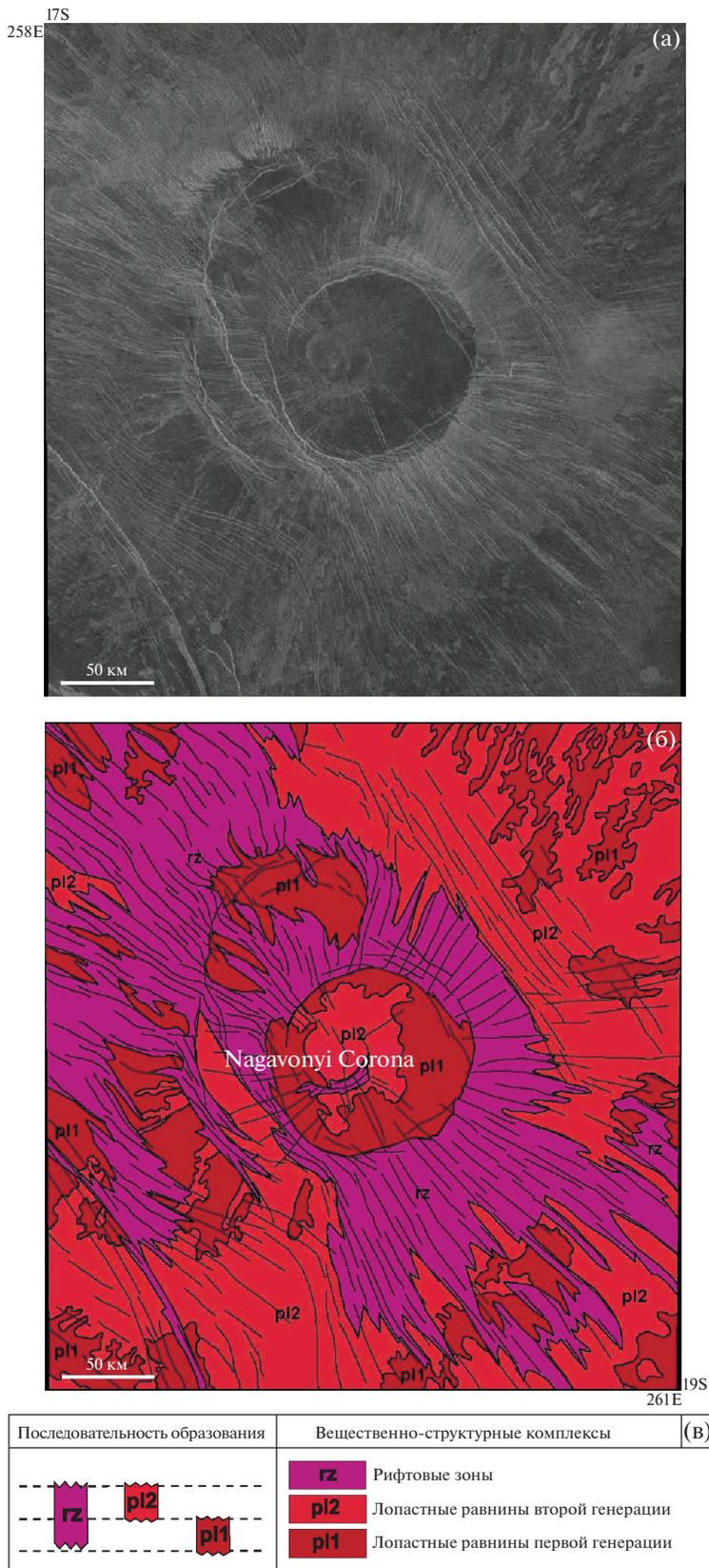


Рис. 7. “Рифтовая” корона (Cor-RZ_021_01_02): в центре изображения – Nagavonyi Corona. (а) – изображение КА Magellan, синусоидальная проекция, разрешение 352 м/э.и.; (б) – геологическая карта области; (в) – схема возрастных соотношений вещественно-структурных комплексов области.

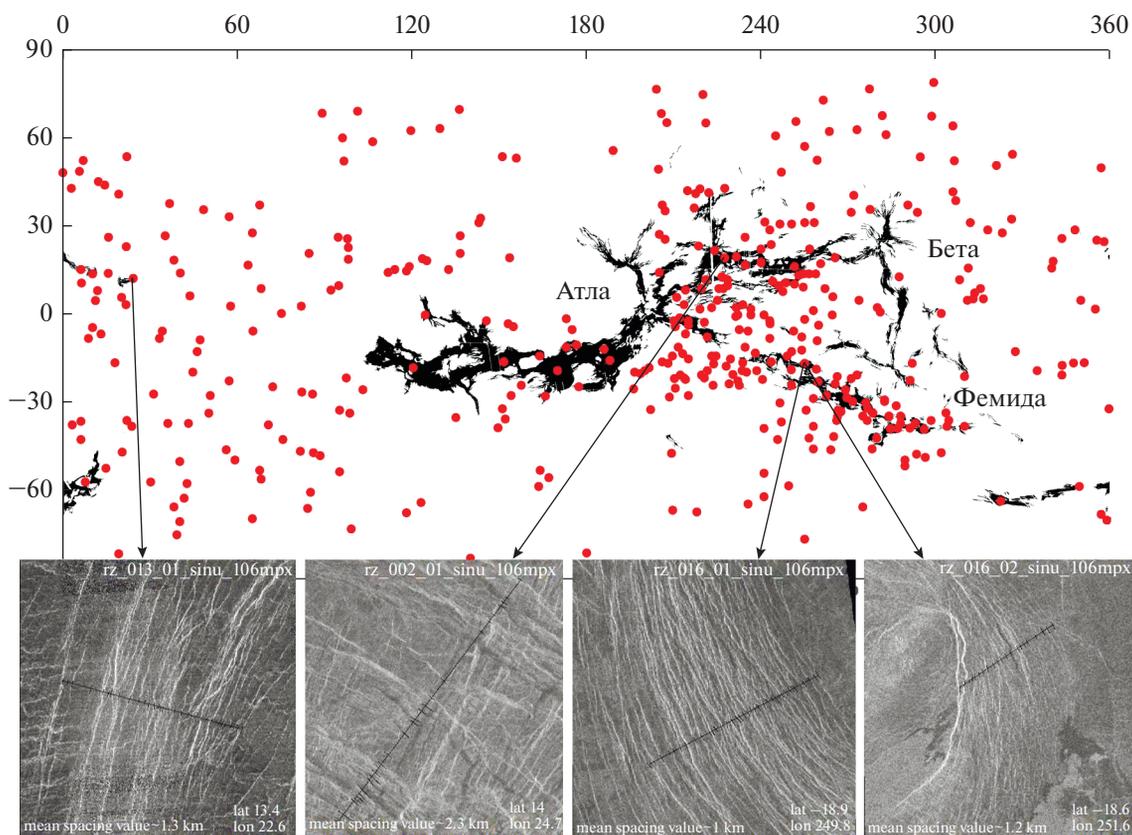


Рис. 8. Примеры областей выбранных для изучения морфологии трещиноватости и измерений расстояния между трещинами в обрамлении корон, ассоциирующихся с рифтами; с примерами изображений. Границы рифтовых зон по (Ivanov, Head, 2011), распределение корон по (Stofan и др., 1992).

рифтовым зонам, может характеризоваться, как и сами рифты, более высокими значениями спейсинга.

Мы измерили спейсинг в обрамлении всех изучаемых корон. Для этого через обрамления каждой из корон были отложены поперечные профили, расположение которых выбиралось случайным образом. Спейсинг трещин обрамления измерялся вдоль этих профилей как расстояние между срединной линией соседних трещин. Полученные значения спейсинга более древних и более молодых (рифтовых) корон составляют $\sim 1 \pm 0.3$ и $\sim 1.3 \pm 0.4$ км соответственно при общем размахе от 0.7 до 2.3 км. Эти короны мало различаются по характерным значениям спейсинга, который в среднем составляет $\sim 1.1 \pm 0.4$ км.

Далее мы сопоставляли значения спейсинга в обрамлении корон со значениями спейсинга структур растяжения, измеренными внутри рифтовых зон и поясов борозд по этой же методике (рис. 8, 9).

Среднее расстояние между трещинами внутри рифтовых зон составляет $\sim 1.8 \pm 0.4$ км, что приблизительно в два раза больше среднего расстояния между трещинами внутри структур корон

(рис. 10а). Спейсинг для поясов борозд составляет $\sim 1.2 \pm 0.3$ км, что практически совпадает со значениями спейсинга в обрамлении корон $\sim 1.1 \pm 0.4$ км (рис. 10б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Результаты анализа пространственных ассоциаций и возрастных соотношений корон указывают на то, что подавляющее большинство корон (80%) формируются в зонах регионального растяжения. При этом явно преобладают короны пространственно и стратиграфически связанные с более древними поясами борозд. В основном, это кольцевые и кальдероподобные короны, которые по модельным представлениям (Smrekar, Stofan, 1997) находятся на завершающих этапах эволюции.

Большинство (60%) комплексов корон пространственно связано с поясами борозд. Сравнительно небольшая часть корон (20%) связана с рифтовыми зонами. Эти короны относятся, главным образом, к категориям сводовых, вероятно, более молодых (Smrekar, Stofan, 1997) и сконцентрированы в области Бета–Атла–Фетида (БАФ).

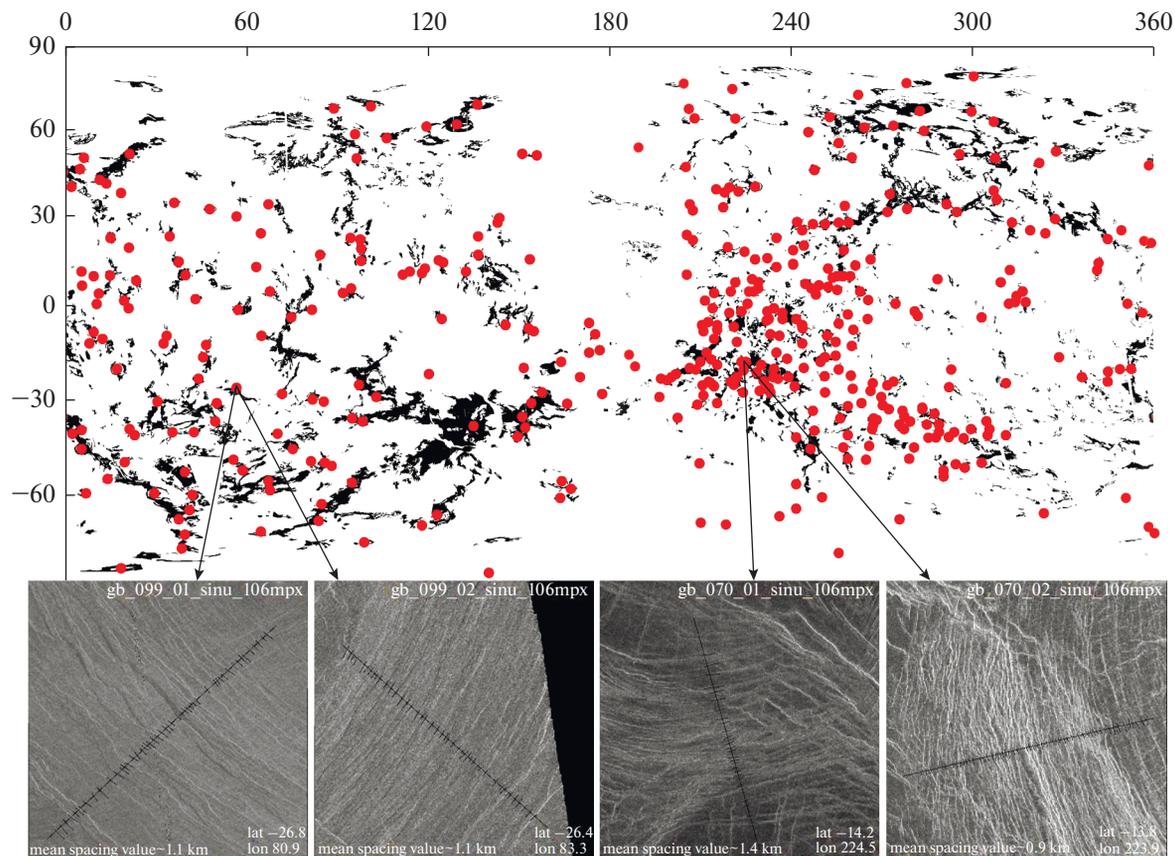


Рис. 9. Примеры областей выбранных для изучения морфологии трещиноватости и измерений расстояния между трещинами корон, ассоциирующихся с поясами борозд; с примерами изображений. Границы поясов борозд по (Ivanov, Head, 2011), распределение корон по (Stofan и др., 1992).

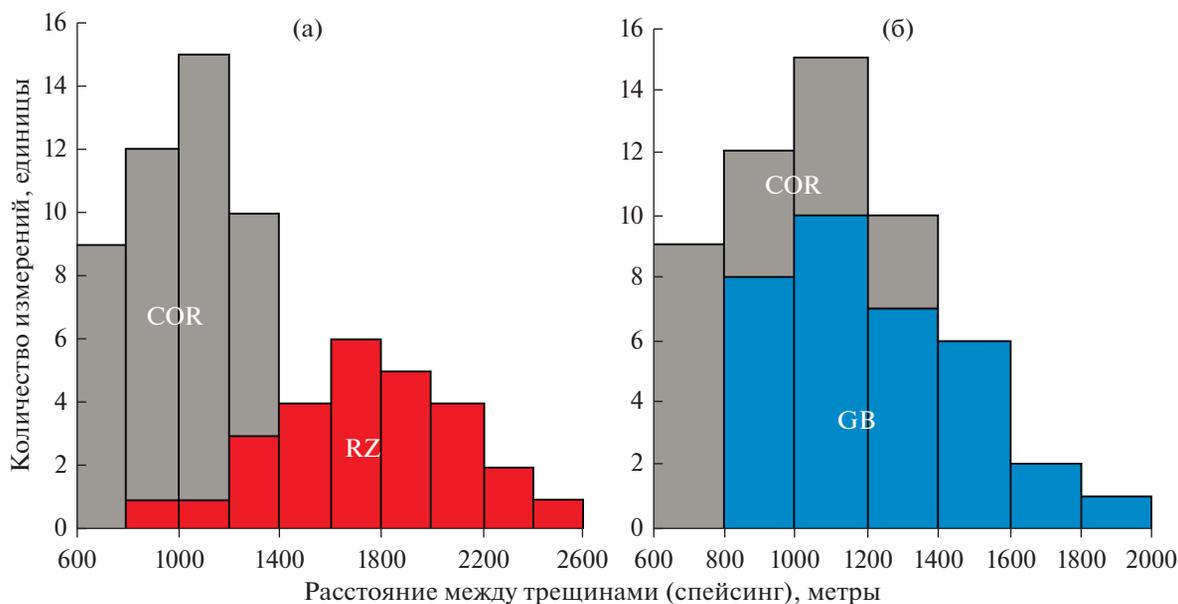


Рис. 10. Распределение средних значений спейсинга: (а) – для корон (COR) и отдельно для рифтов (RZ); (б) – для корон (COR) и отдельно для поясов борозд (GB).

Таким образом, комплексы корон Венеры можно отнести по крайней мере к двум главным популяциям: более древние короны, тесно связанные с поясами борозд и короны, пространственно связанные с рифтовыми зонами, которые могут представлять собой более молодую популяцию структур.

С таким выводом, однако, плохо согласуется тот факт, что спейсинг структур в обрамлении, как более древних, так и более молодых корон, практически не отличим от спейсинга трещин в поясах борозд и примерно в два раза меньше спейсинга трещин и грабенов в рифтовых зонах (рис. 10).

Этому факту можно найти по крайней мере два объяснения. Во-первых, короны, которые пространственно связаны с рифтовыми зонами, могут представлять собой более древние комплексы, зародившиеся в условиях более тонкой коры/литосферы и реактивированные при формировании рифтовых зон. В этом случае обрамление корон может представлять собой комплекс более древних и более молодых структур и величина спейсинга в этом случае будет определяться более частыми древними структурами. Во-вторых, головная часть родительских диапиров при формировании корон могла прогреть перепокрывающий литосферный/коровый слой и тем самым уменьшать его эффективную мощность. Возможное изменение реологических свойств литосферы из-за теплового эффекта диапиров, однако, применимо к коронам всех возрастных категорий, а не только к более молодым (рифтовым). Поэтому мы считаем, что первое объяснение, связанное с формированием корон, главным образом, в эпоху до становления региональных равнин в условиях более тонкого литосферного слоя представляется более правильным.

Авторы выражают благодарность за ценные замечания по данной публикации профессору, доктору геол.-мин. наук А.Т. Базилевскому.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 28 “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей” (№ 0137-2018-0037).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aittola M., Raitala J.* Новы (астры) на Венере: классификация и связь с геологическим окружением // *Астрон. вестн.* 2007. Т. 41(5). С. 427–445. (*Aittola M., Raitala J.* Venusian novae: Classification and associations to volcano-tectonic structures // *Sol. Syst. Res.* 2007. V. 41(5). P. 395–412.)
- 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 анализа 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.
- Aittola M., Kostama V.-P.* Venusian novae and arachnoids: Characteristics, differences and the effect of the geological environment // *Planet. and Space Sci.* 2001. V. 48. P. 1479–1489.
- Baer G., Shubert G., Bindschandler D.L., Stofan E.R.* Spatial and temporal relations between coronae and extensional belts, northern Lada Terra, Venus // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 8355–8369.
- 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., Tyuflyin 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. B4. P. D378–D398.
- Basilevsky A.T., Aittola M., Raitala J., Head J.W.* Venus astra/novae: Estimates of the absolute time duration of their activity // *Icarus.* 2009. V. 203. P. 337–351.
- 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.* Rifts and large volcanoes on Venus: Global assessment of their age relations with regional plains // *J. Geophys. Res.* 2000a. V. 105. P. 24.583–24.611.
- 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.
- Basilevsky A.T., Head J.W.* Venus: Analysis of the degree of impact crater deposit degradation and assessment of its use for dating geological units and features // *J. Geophys. Res.* 2002b. V. 107. P. 5-1-5-38.
- Basilevsky A.T., Raitala J.* Morphology of selected novae (astra) from the analysis of Magellan images at Venus // *Planet. and Space Sci.* 2002. V. 50. P. 21–39.
- Brown C.D., Grimm R.E.* Tectonics of Artemis Chasma: A Venusian “plate” boundary // *Icarus.* 1999. V. 117. P. 219–249.
- Condi K.C.* Mantle plumes and their record in Earth history // Cambridge Univ. Press, 2001. 306 p.
- Crumpler L.S., Aubele J.* Volcanism on Venus // *Encyclopedia of Volcanoes/ Eds Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J.* Acad. Press, 2000. P. 727–770.
- DeLaughter J.E., Jurdy D.M.* Corona classification by evolutionary stage // *Icarus.* 1999. V. 139. P. 81–92.
- Guseva E.N.* Morphological analysis the rift zones of Venus // 48th Vernadsky-Brown Microsymp. on Comparative Planetology. 2008. Abstract # m48_11.

- Hamilton V.E., Stofan E.R.* The geomorphology and evolution of Hecate Chasma, Venus // *Icarus*. 1996. V. 121. P. 171–194.
- Head J.W., Basilevsky A.T.* Sequence of tectonic deformation in the history of Venus: Evidence from global stratigraphic relations // *Geology*. 1998. V. 26. P. 35–38.
- 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. 13153–13197.
- 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.* 2015a. V. 113–114. P. 10–32.
- Ivanov M.A., Head J.W.* Volcanically embayed craters on Venus: Testing the catastrophic and equilibrium resurfacing models // *Planet. and Space Sci.* 2015b. V. 106. P. 116–121.
- Ji S., Saruwatari K.* A revised model for the relationship between joint spacing and layer thickness // *J. Structural Geology*. 1998. V. 20. № 11. P. 1495–1508.
- 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. P. 12-1–12-18.
- Jurdy D.M., Stefanick M.* Correlation of Venus surface features and geoid // *Icarus*. 1999. V. 139. P. 93–99.
- Krassilnikov A.S., Head J.W.* Novae on Venus: Geology, classification, and evolution // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. E9. P. 12-1–12-48.
- Krassilnikov A.S., Kostama V.-P., Aittola M., Guseva E.N., Cherkashina O.S.* Relationship of coronae, regional plains and rift zones on Venus // *Planet. and Space Sci.* 2012. V. 68. P. 56–75.
- Ladeira F.L., Price N.J.* Relationship between fracture spacing and bed thickness // *J. Structural Geology*. 1981. V. 3. № 2. P. 179–183.
- Mastrapa R.* Thermal evolution of Venus: A preliminary study based on tectonic feature spacing // 34th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1997. abs. 1756.
- Masursky H.E., Eliason E., Ford P.G., McGill G.E., Pettengill G.H., Schaber G.G., Schubert G.* Pioneer Venus radar results: Geology from images and altimetry // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. № A13. P. 8232–8260.
- McGill G.E., Steenstrup S.J., Barton C., Ford P.G.* Continental rifting and the origin of Beta Regio, Venus // *Geophys. Res. Lett.* 1981. V. 8. № 7. P. 737–740.
- Nagasawa C.M., Koyama M., Sasaki S.* Change of stress field in Beta-Atla-Themis regio, estimated from surface geometry of dike swarms, stratigraphy of lavas and crater density // *Geodynamics of Venus: Evolution and Current State / Eds Mackwell S.J., Phillips R.J.* 1998. abs. P. 10.
- Pronin A.A., Stofan E.R.* Coronae on Venus: Morphology, classification, and distribution // *Icarus*. 1990. V. 87. № 2. P. 452–474.
- Roberts K.M., Head J.W.* Large-scale volcanism associated with coronae on Venus: implications for formation and evolution // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 1111–1114.
- Saunders R.S., Pettengill G.H., Arvidson R.E., Sjogren W.L., Johnson W.T., Pieri L.* The Magellan Venus Radar Mapping Mission // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 8339–8355.
- Schaber G.G.* Venus: Limited extension and volcanism along zones of lithospheric weakness // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9. P. 499–502.
- Smrekar S.E., Stofan E.R., Kiefer W.S.* Large volcanic rises on Venus // *Venus II / Eds Bougher S.W., Hunten D.M., Phillips R.J.* Univ. Arizona Press, 1997. P. 845–878.
- Solomon S.C., Smrekar S.E., Bindshadler D.* Venus tectonics: An overview of Magellan observations // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 13199–13256.
- Stefanick M., Jurdy D.M.* Venus coronae, craters and chasmata // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 4637–4643.
- Stofan E.R., Hamilton V.E., Janes D.M., Smrekar S.E.* Coronae on Venus: Morphology and origin // *Venus II Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment / Eds Bougher S.W., Hunten D.M., Phillips R.J.* Tucson: Univ. Arizona Press, 1997. P. 931–965.
- Stofan E.R., Sharpton V.L., Shubert G., Baer G., Bindschandler D.L., Janes D.M., Squyres S.W.* Global distribution and characteristics of coronae and related features on Venus: Implication for origin and relation to mantle processes // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. 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? // *Geological Soc. Amer. Special Paper*. 2005. V. 388. P. 841–861.
- Squyres S.W., Janes D.M., Baer G., Bindschandler D.L., Shubert G., Sharpton V.L., Stofan E.R.* The morphology and evolution of coronae on Venus // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 13611–13634.
- Wu H., Pollard D.D.* An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness // *J. Structural Geology*. 1995. V. 17. № 6. P. 887–905.