

УДК 523.42

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ КОРОН, ЛОПАСТНЫХ РАВНИН И РИФТОВЫХ ЗОН ВЕНЕРЫ

© 2023 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 05.10.2022 г.

После доработки 30.11.2022 г.

Принята к публикации 04.12.2022 г.

По результатам фотогеологического и стратиграфического анализа корон Венеры, мы установили, что: (1) поздние проявления вулканической активности на Венере, лопастные равнины, слабо связаны с формированием корон. Малое количество корон — источников лопастных равнин (~17% всей популяции корон) — говорит о том, что вулканическая активность корон угасла, в основном, в до-Атлийское время. Таким образом, короны, с которыми связаны проявления позднего вулканизма в виде лопастных равнин, — это либо долгоживущие вулканотектонические комплексы, либо структуры завершающих фаз вулканической активности, их местоположение отмечает регионы длительного вулканизма; (2) малое количество корон, образованных рифтовыми структурами (~14% всей популяции), говорит о том, что рифтогенез в Атлийский период не приводил к массовому формированию корон. Основная часть корон Венеры, вероятно, была сформирована в Фортунийский–Гиневрийский периоды геологической истории Венеры. Резкое уменьшение количества корон, образованных в Атлийский период, может быть связано с увеличением мощности литосферы и усилением ее роли как реологического барьера.

Ключевые слова: Венера, короны, пространственное распределение, топографические особенности, стратиграфический анализ, рифтовые зоны, лопастные равнины, рифтогенез, вулканизм, эндогенная активность

DOI: 10.31857/S0320930X23020032, **EDN:** NVKETU

ВВЕДЕНИЕ

Видимая геологическая история Венеры включает три основных периода с разными режимами эндогенной активности: Фортунийский, Гиневрийский и Атлийский (рис. 1, Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2013; 2015). На протяжении Фортунийского и Гиневрийского периодов формировались тектонизированные комплексы и вулканические равнины, занимающие основную часть (около 85%) поверхности планеты (Ivanov, Head, 2013; 2015; Иванов и др., 2015), а темп обновления поверхности был примерно на порядок выше, чем в течение Атлийского периода (Ivanov, Head, 2013; 2015).

По некоторым оценкам (Ivanov, Head, 2015), переход от Фортунийского к Гиневрийскому периоду характеризовался массовым формированием особых вулканотектонических комплексов, корон, которые представляют собой структуры, обрамленные округлым валом (Barsukov и др., 1986; Campbell и др., 1992; Stofan и др., 1992; Basilevsky, Head, 1995; 2000b; Stofan, Smrekar, 2005; Grindrod, Hoogenboom, 2006; Ivanov, Head, 2010).

Частотно-размерное и пространственное распределение корон, а также их морфология и топография свидетельствуют о том, что они могут представлять собой поверхностные выражения мантийных диапиров (Nikishin, 1986; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Stofan и др., 1992; Squyres и др., 1992; Janes и др., 1992; Koch, Manga, 1996; Smrekar, Parmentier, 1996; Smrekar и др., 1997; Jellinek и др., 2002; Johnson, Richards, 2003; Davaille и др., 2017).

На поверхности Венеры насчитывается несколько сотен корон, диаметр обрамления которых достигает 2500 км (Stofan и др., 1992; 2001; Crumpler, Aubele, 2000). В строении корон можно выделить две компоненты — тектоническую, в основном, обрамление этих структур, и вулканическую — главным образом, их заполнение. Обрамление корон состоит из плотно расположенных борозд, реже, гряд и окружает внутреннюю часть корон, где преобладают вулканические образования (Barsukov и др., 1986; Nikishin, 1986; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Stofan и др., 1992). В некоторых случаях, однако, лавовые потоки протягиваются за пределы кольцевого обрамления и выходят на

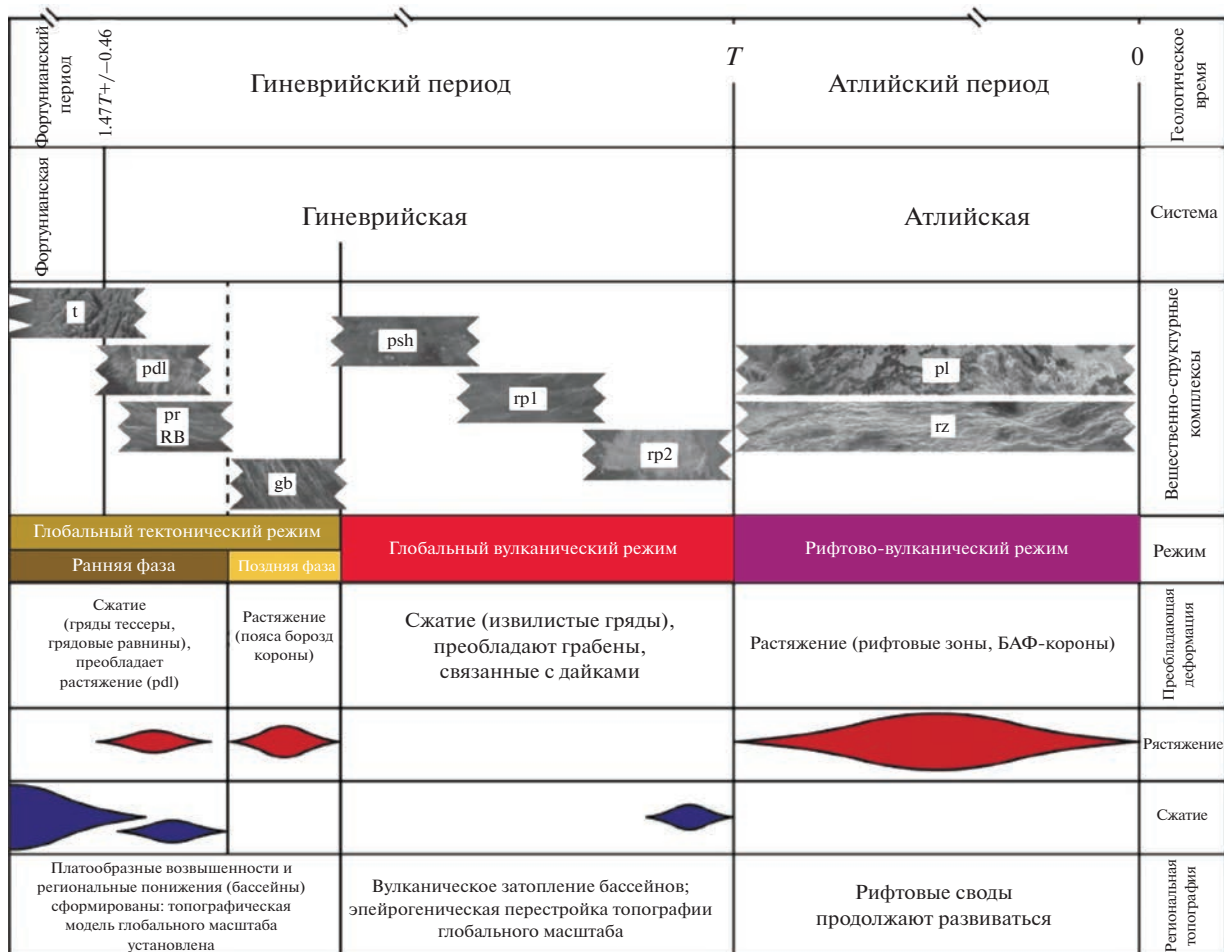


Рис. 1. Модель распределения геологических комплексов во времени, где T – средний модельный абсолютный возраст поверхности, который оценивается по общему количеству наблюдаемых на Венере ударных кратеров (около тысячи) в пределах от 750 млн до 1 млрд лет по (Ivanov, Head, 2015) с изменениями.

окружающую равнину, что позволяет проанализировать их стратиграфические соотношения с окружающими типами местности (Ivanov, Head, 2001).

Так как эрозионные процессы на поверхности Венеры проявлены слабо (Arvidson и др., 1992), топографические особенности корон могут иллюстрировать различные этапы эволюции их родительских диапиров (Smrekar, Stofan, 1997). Мы изучили все каталогизированные короны Венеры (Stofan и др., 1992; Crumpler, Aubele, 2000) и установили, что они характеризуются тремя основными топографическими классами: D, W, и U (Гусева, Иванов, 2019; 2020; 2022). Короны класса D имеют доминирующее центральное поднятие и, вероятно, относятся к прогрессивной стадии эволюции диапира. Короны класса W характеризуются центральным поднятием, окруженным одной или несколькими концентрическими депрессиями и, по-видимому, отражают переход от

прогрессивной к регрессивной стадии эволюции, когда сводовое поднятие прогрессивного этапа утрачивает тепловую поддержку со стороны диапира и начинает проседать. Короны класса U это топографические депрессии, которые могут отражать финальные стадии эволюции диапиров. Короны всех трех топографических классов широко распространены на поверхности Венеры и некоторые из них могут представлять собой долгоживущие вулканотектонические комплексы (Basilevsky, Head, 1995; 2000b; Smrekar, Stofan, 1997; Stofan, Smrekar, 2005; Ivanov, Head, 2010).

Атлийский период геологической истории Венеры характеризовался формированием протяженных (сотни–тысячи километров) зон растяжения, рифтовых зон (rz), и крупных (до нескольких сотен километров в поперечнике) вулканов (Crumpler, Aubele, 2000). Их склоны образованы множеством радарно-темных и радарно-ярких лавовых потоков, образующих в совокупности

лопастные равнины, pl (Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2011; 2013; 2015).

Рифтовые зоны расположены преимущественно в экваториальной области Венеры, где образуют системы зон растяжения общей протяженностью около 50 тыс. км (Masursky и др., 1980; McGill и др., 1981; Schaber, 1982; Jurdy, Stefanick, 1999; Basilevsky, Head, 2000a). Отдельные ветви рифтовых зон очерчивают гигантский, протяженностью около 10–12 тыс. км, треугольник между областями Beta–Atla–Themis (BAT), в вершинах которого располагаются крупные сводовые поднятия (Masursky и др., 1980; Schaber, 1982; Head и др., 1992; Airey и др., 2017). Наиболее значительны своды областей Atla и Beta, которые классифицируются как рифтовые (Stofan и др., 1995; Smrekar, Stofan, 1997; Smrekar и др., 1997) и характеризуются крупными проявлениями лопастных равнин и значительными положительными гравитационными аномалиями (Sjogren и др., 1997; Koporliv и др., 1999). В тех местах, где одновременно развиты рифты и лопастные равнины, можно наблюдать, как потоки лопастных равнин либо подтапливают структуры рифтовых зон, либо пересекаются ими. Такие соотношения свидетельствуют, в целом, о синхронности формирования рифтовых зон и лопастных равнин (Ivanov, Head, 2013). Площадь рифтовых зон составляет примерно 5% поверхности Венеры, а лопастных равнин – примерно 8% (Ivanov, Head, 2011). Рифтовые зоны и лопастные равнины представляют собой доминирующие проявления эндогенной активности Атлийского периода (Ivanov, Head, 2013; 2015).

В пространственной ассоциации с рифтовыми зонами и лопастными равнинами встречаются некоторые короны, что может указывать и на их генетическую связь (Solomon и др., 1992; Baer и др., 1994; Stefanick, Jurdy, 1996; Hamilton, Stofan, 1996; Stofan и др., 1997; Roberts, Head, 1993; Krassilnikov, Head, 2003; Martin и др., 2007; Krassilnikov и др., 2012; Piskorz и др., 2014), и некоторые авторы (например, Romeo, 2013) полагают, что короны, наряду с крупными вулканами, представляют собой один из главных источников лопастных равнин.

Вопрос о генетической связи корон с лопастными равнинами и рифтовыми зонами очень важен для понимания геологической истории Венеры. Рифты и равнины занимают вполне определенное стратиграфическое положение (Ivanov, Head, 2011) и характеризуют вулканотектонический режим обновления поверхности в течение Атлийского периода (Ivanov, Head, 2015). Видимое начало массового формирования корон относится к более древним эпизодам: переход от Фортунийского к

Гиневрийскому периоду. Являлись ли короны долгоживущими вулканотектоническими комплексами? Или их формирование происходило в течение нескольких импульсов? Или же количество образующихся корон менялось с течением времени (уменьшалось или увеличивалось)? Ответы на эти вопросы позволили бы ввести важные качественные и количественные ограничения на наши представления о динамике мантийной конвекции на Венере.

В данной работе мы проанализировали области, где пространственно ассоциируются короны, рифтовые зоны и лопастные равнины для того, чтобы определить их стратиграфические соотношения и на этом основании установить, как часто (редко) пространственные ассоциации корон, рифтовых зон и лопастных равнин генетически обоснованы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственные и генетические соотношения корон с лопастными равнинами

В результате фотогеологического анализа каталогизированных корон трех различных топографических классов (D, W и U) мы выявили те из них, компоненты которых непосредственно контактируют с лопастными равнинами, и рассматривали их как короны, пространственно ассоциирующие с равнинами (рис. 2а). В случае, когда таких контактов не наблюдалось, корона относилась к альтернативной категории (рис. 2б).

Из всей изучаемой популяции корон Венеры, 532 структуры, примерно треть, ~32% (169 корон), пространственно ассоциируется с лопастными равнинами. Из этих корон примерно половина (~53%, 90 корон, субпопуляция 1, рис. 3, табл. 1) является источником лопастных равнин. Короны субпопуляции 2 (79 корон или 47%) подтоплены материалом лопастных равнин.

Короны, являющиеся источниками лопастных равнин (субпопуляция 1), представлены, в основном, топографическим классом D (40 корон, ~44% всей субпопуляции 1). Реже короны-источники лопастных равнин представлены топографическими классами W и U примерно в равном количестве случаев (по 25 корон, ~28%) (табл. 1).

Обрамление корон субпопуляции 1 чаще образовано структурами более древних поясов борозд (42 короны, 47%, рис. 4а), реже – структурами молодых рифтовых зон (32 короны, 36%, рис. 4б); в более редких случаях обрамление корон представлено структурами и поясов борозд и рифтовых зон (12 корон, 13%). Во всех случаях структуры растяжения (грабены поясов борозд и рифтовых

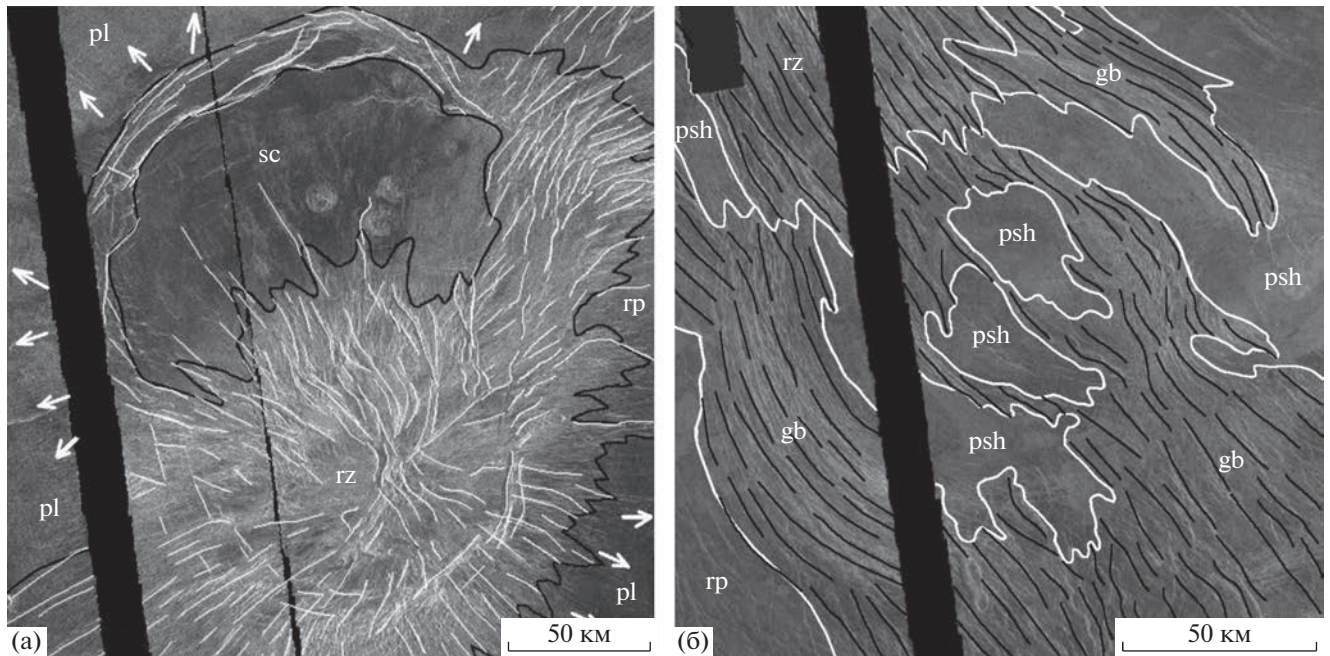


Рис. 2. Короны Венеры. (а) Каренпорфу, пространственно ассоциируется с лопастными равнинами; расположена в области Phoebe (21.7° ю.ш., 270.9° в.д., диаметр 176 км) и обрамлена трещинами рифтовых зон, rz, из которых растекается материал лопастных равнин, pl – белые стрелки. (б) Dilga, не ассоциирована с лопастными равнинами; расположена в области Gunda (18.7° ю.ш., 250.5° в.д., диаметр 166 км) и обрамлена структурами поясов борозд, gb, подтопленных щитовыми равнинами, psh, и частично тектонически нарушенных трещинами рифтовых зон, rz; границы подразделений – сплошные линии; изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение ~ 225 м/э.и.

зон) являются источниками лопастных равнин. В крайне редких случаях, короны, подтопленные региональными равнинами и не имеющие какого-либо структурного обрамления, являются источниками лопастных равнин (4 короны, 4%).

Типичными примерами субпопуляции 1 являются короны Ereshkigal и Nahas-tsan Mons. Корона Ereshkigal (рис. 4а) расположена западнее равнины Akhtamar, ее координаты 21° с.ш., 84.3° в.д., диаметр 334 км. Она характеризуется топографи-

ческим профилем класса W и обрамлением, состоящим из древних поясов борозд. Во внутренней части короны располагается центр расходящихся грабен. Такая структура получила название “нова”. Элементы такой структуры считаются источниками лопастных равнин. Формирование нов на Венере связывают с подъемом небольших магматических тел, которые являются источником радиальных дайковых комплексов (Aittola, Kostama, 2001; Basilevsky, Raitala, 2002;

Таблица 1. Топографические и морфологические характеристики корон, пространственно ассоциированных с лопастными равнинами

Популяции корон, пространственно связанные с лопастными равнинами, ед., %	Субпопуляция 1, ед., %	Субпопуляция 2, ед., %
Всего 169 корон:	90	79
D класс	40 (44)	7 (9)
W класс	25 (28)	37 (47)
U класс	25 (28)	35 (44)
Обрамление корон:		
пояса борозд	42 (47)	53 (67)
рифтовые трещины	32 (36)	11 (14)
пояса борозд и рифтовые трещины	12 (13)	6 (8)
Короны, подтопленные региональными равнинами:	4 (4)	9 (11)

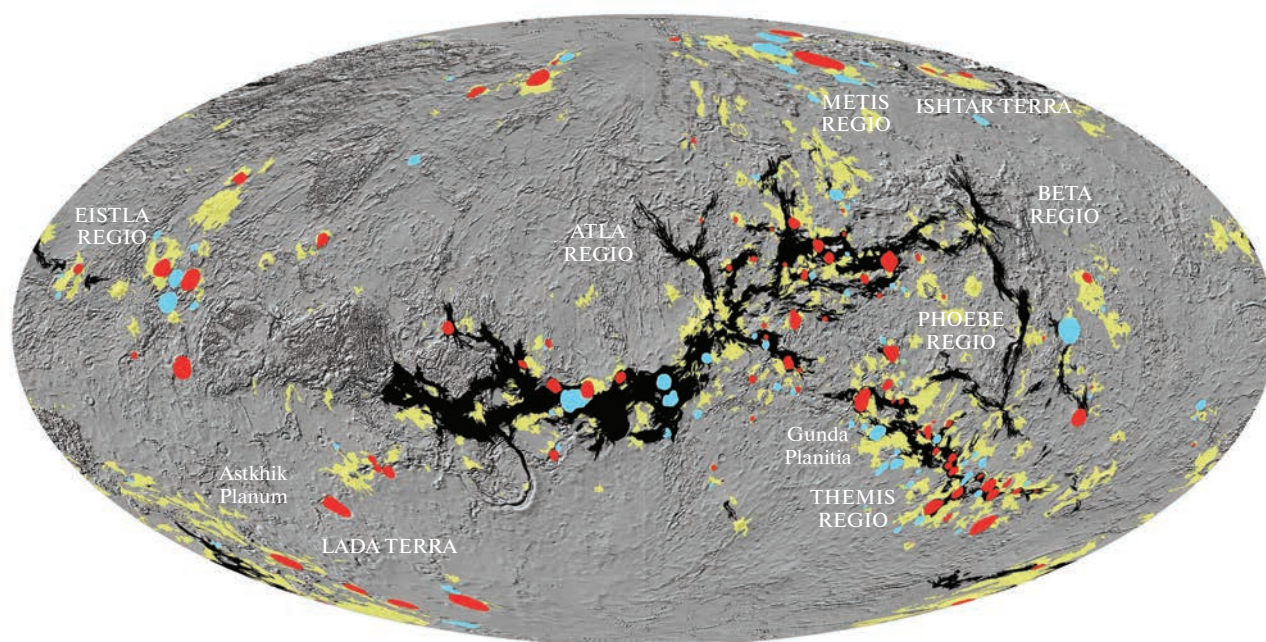


Рис. 3. Короны Венеры, пространственно ассоциирующиеся с лопастными равнинами. Субпопуляция 1: короны-источники лопастных равнин (красные точки) и субпопуляция 2: короны, подтопленные лопастными равнинами (голубые точки); лопастные равнины — желтые точки; геологические границы по (Ivanov, Head, 2011). Изображения в равноплощадной проекции Моллвейде, центральный меридиан 180°.

Krassilnikov, Head, 2003; Aittola, Raitala, 2007; Basilevsky и др., 2009).

Корона Nahas-tsan Mons (рис. 4б) расположена в области Atla, в рифтовой долине Tkashi-mara, ее координаты 14.4° ю.ш., 204.9° в.д., диаметр 167 км. Эта корона характеризуется топографическим профилем класса D, а ее обрамление состоит из молодых рифтовых трещин, часть которых является источниками лопастных равнин.

Короны, подтопленные лопастными равнинами (субпопуляция 2, табл. 1), представлены, главным образом, топографическими классами W (37 корон, 47% всей субпопуляции 2) и U (35 корон, 44%). Лишь малая их часть представлена коронами топографического класса D (7 корон, 9%).

Обрамление корон субпопуляции 2 образуют, в основном, структуры поясов борозд (53 короны, 67%), подтопленные материалом как региональных, так и лопастных равнин (рис. 5а). В более редких случаях обрамление корон представлено структурами рифтовых зон (11 корон, 14%), которые подтоплены лопастными равнинами, но не являются их источниками (рис. 5б). Еще реже (9 корон, 11%) лопастные равнины подтапливают короны без какого-либо структурного обрамления. В самых редких случаях (6 корон, 8%) лопастные равнины подтапливают обрамление корон, состоящее из структур как поясов борозд, так и рифтовых зон.

Типичными примерами субпопуляции 2 являются короны Durga и Zywie. Корона Durga (рис. 5а) расположена в области Themis, севернее рифтовой долины Parga. Эта корона характеризуется топографическим профилем класса U и обрамлением из древних поясов борозд, подтопленных лопастными и гладкими равнинами. Корона Zywie (рис. 5б) тоже расположена в области Themis, но уже в самой рифтовой долине Parga. Эта корона характеризуется топографическим профилем класса W. Ее обрамление состоит из молодых рифтовых трещин, подтопленных материалом лопастных равнин (рис. 5б).

Пространственные и генетические соотношения корон с рифтовыми зонами

Пространственное распределение корон показывает, что около 19% всей популяции корон (102 короны из 532) пространственно ассоциируются с рифтовыми зонами. Это те короны, которые либо полностью, либо частично расположены в рифтах. При этом структуры рифтов либо формируют тектонические компоненты корон (рифтовые короны), либо пересекают их (дорифтовые короны).

Проведенный нами фотогеологический анализ позволил установить, что из всего числа корон, пространственно связанных с рифтовыми

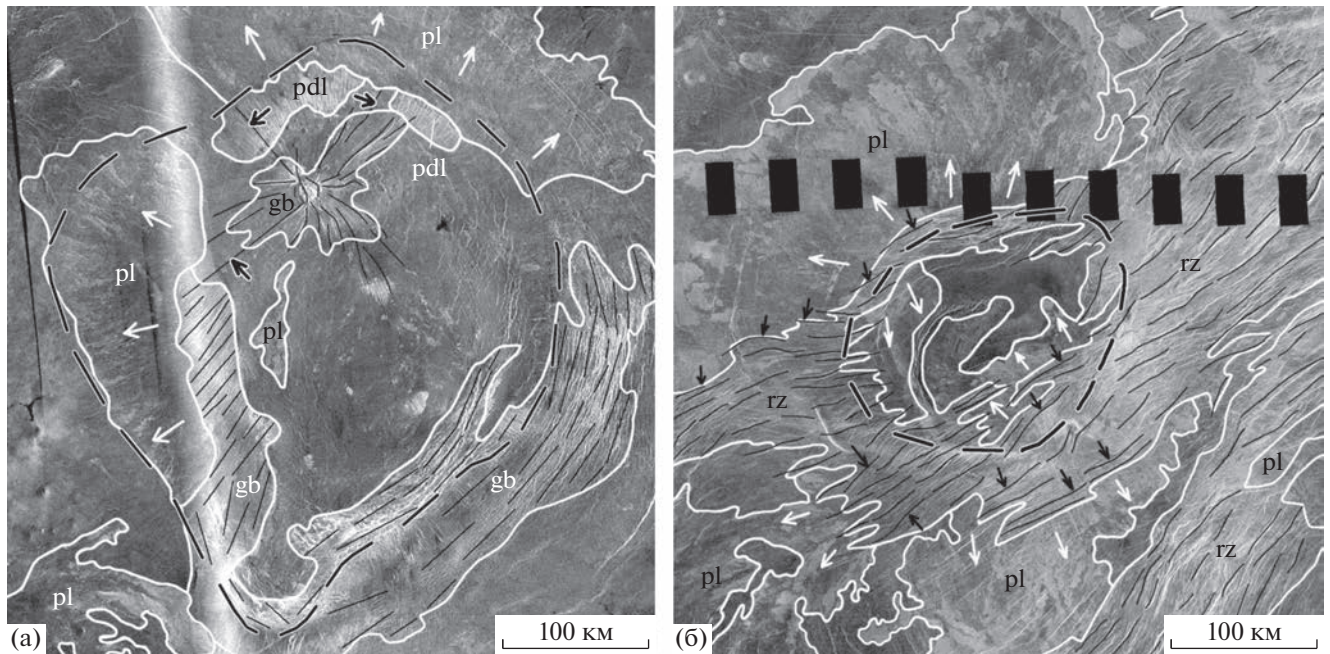


Рис. 4. Короны субпопуляции 1. (а) Корона Ereshkigal (21° с.ш., 84.3° в.д., диаметр 334 км) обрамлена трещинами поясов борозд, gb; в центральной части короны – радиальная система грабен–нова – черные стрелки, которая является источником лопастных равнин, pl – белые стрелки. (б) Корона Nahas-tsan Mons (14.4° ю.ш., 204.9° в.д., диаметр 167 км) обрамлена трещинами рифтовой зоны, rz – черные стрелки, некоторые из них являются источниками лопастных равнин, pl – белые стрелки. Обрамление корон – пунктирные линии, границы подразделений – сплошные линии; изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение ~ 225 м/э.и.

зонами, примерно три четверти составляют рифтовые короны (74 короны, $\sim 73\%$ корон, ассоциирующихся с рифтами, рис. 6а) и примерно одну четверть – дорифтовые (28 корон, $\sim 27\%$, рис. 6б).

Рифтовые короны сосредоточены преимущественно в осевых частях рифтовых зон, соединяющих области Atla и Beta (Каньоны Necate и Zverine, северная сторона треугольника BAT, рис. 7) и области Atla и Themis (Каньоны Parga, юго-западная сторона треугольника BAT, рис. 7). Рифтовая зона между областями Beta и Themis (Каньон Devana, восточная сторона треугольника BAT, рис. 7) лишена как рифтовых, так и дорифтовых корон. Диаметры корон с рифтовым обрамлением составляют от 77 до 648 км.

Дорифтовые короны пространственно приурочены, в основном, к фланговым частям рифтовых зон и сконцентрированы в тех же областях, что и рифтовые короны, кроме области Kalaipahoa Linea (рис. 7), где дорифтовые короны не встречаются. Напротив, в области Eistla отмечены только дорифтовые короны (рис. 7). Диаметры изучаемых корон варьируют в том же размерном диапазоне, что и у рифтовых корон, от 90 до 669 км.

Рифтовые короны представлены преимущественно топографическим классом D (30 корон, 41% всей группы рифтовых корон). Реже, такие короны представлены классами W и U (23 короны, 31% и 21 корона, 28%, соответственно, табл. 2).

Дорифтовые короны чаще относятся к топографическому классу W (15 корон, 54% всей изу-

Таблица 2. Распространенность топографических классов корон, пространственно ассоциированных с рифтовыми зонами

Топографический класс	Рифтовые короны, ед., %	Дорифтовые короны, ед., %
Всего корон:	74	28
D класс	30 (41)	9 (32)
W класс	23 (31)	15 (54)
U класс	21 (28)	4 (14)

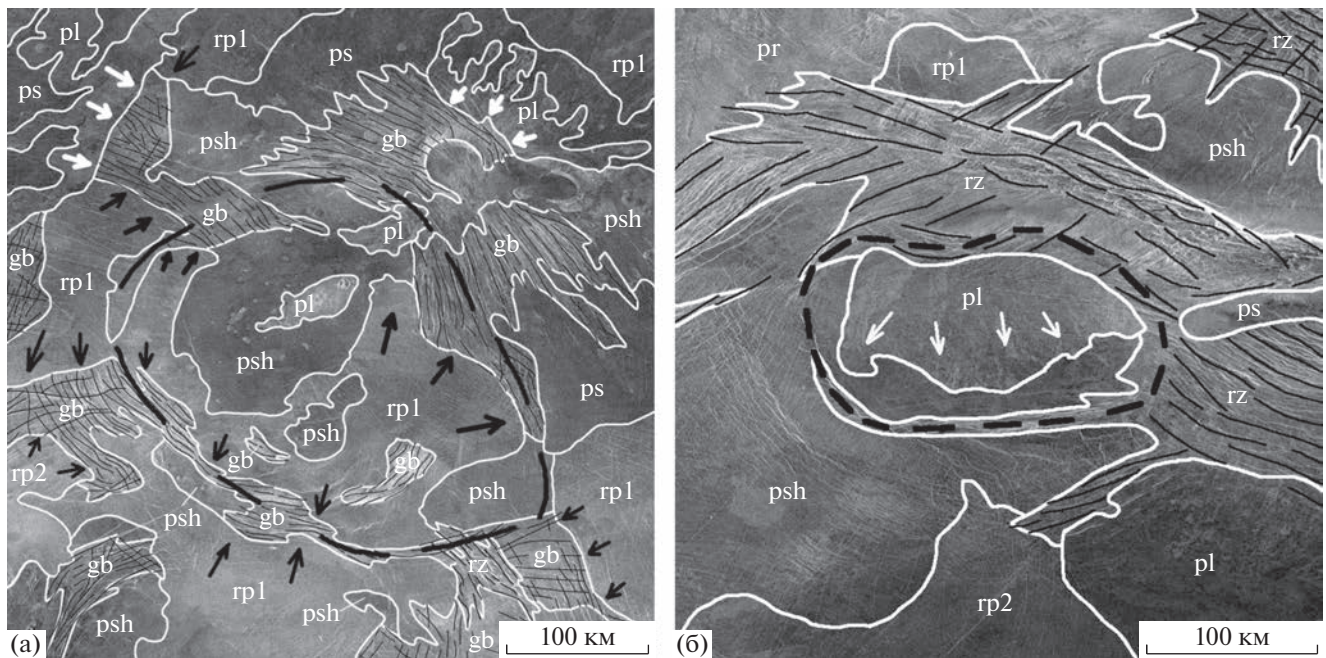


Рис. 5. Короны субпопуляции 2. (а) Корона Durga (31.1° ю.ш., 286.4° в.д., диаметр 245 км) обрамлена структурами поясов борозд, gb, и подтоплена материалом региональных, гр — черные стрелки, и лопастных равнин, pl — белые стрелки. (б) Корона Zywie (38.7° ю.ш., 291.3° в.д., диаметр 204 км) обрамлена трещинами рифтовых зон, rz, и подтоплена материалом лопастных равнин, pl — белые стрелки. Обрамление корон — пунктир, границы подразделений — сплошные линии; изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение ~ 225 м/э.и.

чаемой группы) и реже к классам D и U (9 корон, 32% и 4 короны, 14%, табл. 2).

Рифтовые зоны и лопастные равнины часто встречаются вместе и представляют тектонические и вулканические компоненты режима обновления поверхности, действовавшего на протяжении Атлийского периода (Ivanov, Head, 2011; 2013; 2015). Мы проанализировали стратиграфические соотношения рифтовых и дорифтовых корон с лопастными равнинами и установили, что только 32 рифтовые короны являются, кроме того, еще и источниками лопастных равнин. Среди таких корон преобладают те, в которых развиты радиально-лучистые комплексы грабенов (новы), которые были отмечены во внутренних частях 21 короны; грабены нов являются источниками лопастных равнин. В остальных 11 случаях источниками равнин служат рифтовые структуры (трещины и грабены) обрамления корон. Как правило, центральная часть нов представляет собой купол (Krasilnikov, Head, 2003) и короны с новами относятся к топографическому классу D. Среди дорифтовых корон, лишь 12 могут считаться источниками лопастных равнин и, таким образом, менее половины (44 короны или $\sim 43\%$) корон, пространственно ассоциирующих с рифтовыми зонами, проявляют признаки поздней вулканической активности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного нами фотогеологического и стратиграфического анализа корон показывают, что примерно одна треть всей их популяции (169 корон) контактирует с лопастными равнинами, сформировавшимися в течение завершающего, Атлийского периода геологической истории Венеры. Такое пространственное распределение корон относительно лопастных равнин однозначно свидетельствует, что поздние проявления вулканической активности на Венере слабо связаны с формированием корон. Этот вывод еще более усиливается тем фактом, что только 90 корон (около 17% всей популяции) являются источниками лопастных равнин. Из этих корон, меньше половины (40 корон или примерно 7.5% всей популяции) относятся к топографическому классу D и имеют центральное поднятие, которое может свидетельствовать о продолжающейся тепловой поддержке рельефа короны со стороны магматического очага. Остальные короны — источники лопастных равнин относятся к топографическим классам W и U, которые, возможно, отвечают начальной и продолжающейся стадиям тепловой деградации родительского мантийного диапира корон (Smrekar, Stofan, 1997).

Малое количество корон-источников лопастных равнин говорит о том, что вулканическая ак-

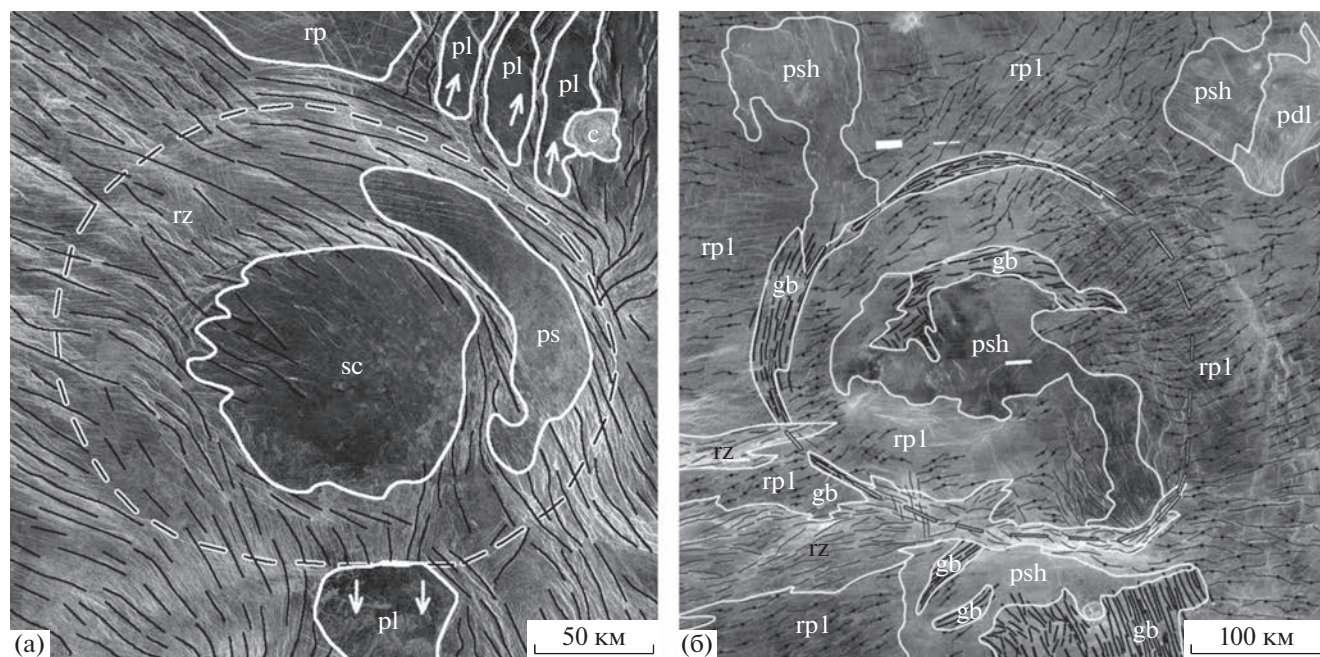


Рис. 6. Примеры рифтовых и дорифтовых корон. (а) Рифтовая корона Gertjon (29.9° ю.ш., 276.1° в.д., диаметр 229 км) обрамлена структурами рифтовых зон, rz. В некоторых случаях эти структуры являются источниками лопастных равнин, pl – белые стрелки. (б) Дорифтовая корона Libera (12.9° с.ш., 24.3° в.д., диаметр 330 км) обрамлена структурами поясов борозд, gb, подтопленных региональными равнинами, rp1, и частично нарушенных трещинами рифтовых зон, rz. Обрамление корон – пунктирные линии, границы подразделений – сплошные линии; изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение ~ 225 м/э.и.

тивность корон угасла, в основном, в доАтлийское время. Этот вывод полностью согласуется с тем, что тектонические элементы подавляющего большинства корон подтоплены материалом нижнего подразделения региональных равнин (rp1), являющимся главным компонентом вулканического режима обновления поверхности в течение Гиневрийского периода.

Таким образом, короны, с которыми связаны проявления позднего вулканизма (лопастные равнины) представляют собой либо долгоживущие вулканотектонические комплексы, либо структуры завершающих фаз вулканической активности. В любом случае местоположение этих корон отмечает регионы проявления длительного вулканизма. Карта пространственного распределения корон-источников лопастных равнин (рис. 3) показывает, что такие регионы бывают трех типов: (1) изолированные и компактные области, такие как область Eistla; (2) периферийные области крупных возвышенностей, например, область Metis к западу от Ishtar Terra или Astkhik Planum к северо-востоку от Lada Terra; (3) протяженные рифтовые зоны, образующие восточную часть треугольника BAT и соединяющие области Atla–Beta и Atla–Themis. В этих зонах сконцентрирована основная часть корон-источников лопастных равнин (рис. 3). Очевидно, что разные типы реги-

онов, где наблюдаются короны с молодой вулканической активностью, отражают разные режимы мантийной конвекции. Мы планируем провести сравнительный анализ этих областей в наших дальнейших исследованиях.

Примерно такое же количество ($\sim 14\%$ всей популяции корон), вероятно, связаны с формированием рифтовых зон. По определению, эти короны находятся в рифтах Венеры, основная часть которых пересекает западную часть Aphrodite Terga и протягивается от области Atla к области Beta (северо-западная сторона треугольника BAT) и Themis (юго-западная сторона треугольника BAT, рис. 7).

Рифты, как и лопастные равнины, характеризуют Атлийский период геологической истории Венеры и представляют мощные зоны растяжения. В этом отношении они подобны более древним зонам растяжения, образующим пояса борозд.

Малое количество рифтовых корон говорит о том, что рифтогенез в Атлийский период не приводил к массовому формированию корон. Это резко контрастирует с условиями, существовавшими в конце Фортунийского и начале Гиневрийского периодов (тектонический режим обновления поверхности), когда, по-видимому, была сформирована основная часть корон Венеры, генетически связанных с поясами борозд (Ivanov,

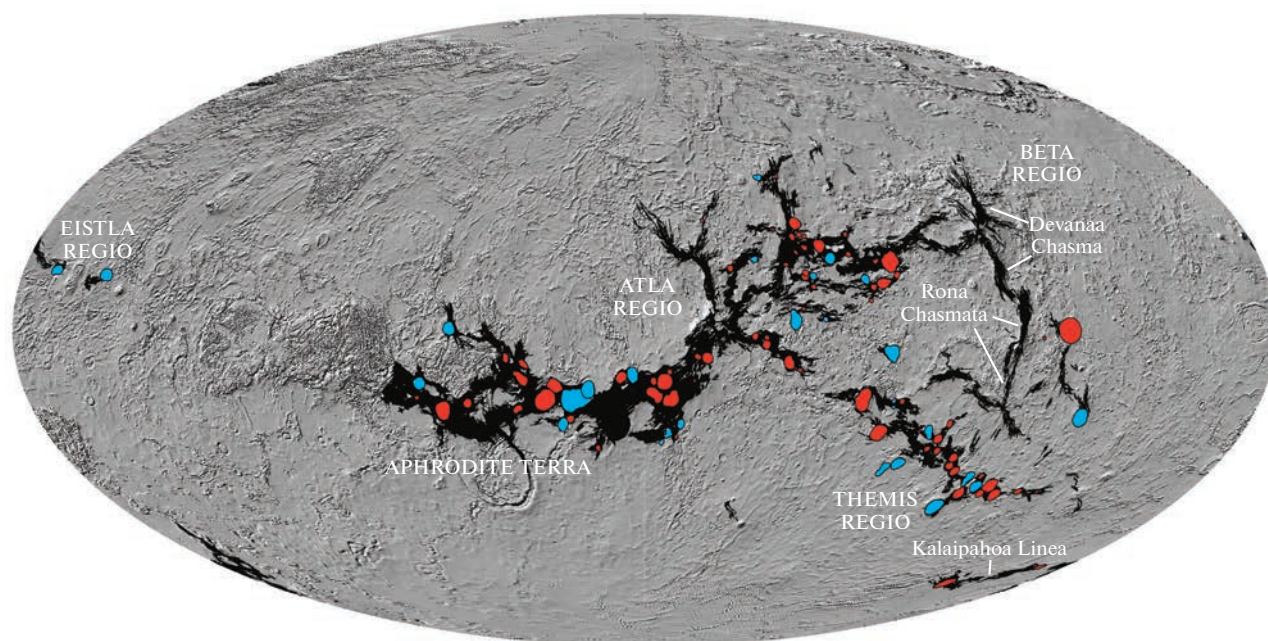


Рис. 7. Рифтовые короны — красные точки; дорифтовые короны — голубые точки; черным цветом показаны рифтовые зоны и геологические границы по (Ivanov, Head, 2011). Изображения в равноплощадной проекции Моллвейде, центральный меридиан 180°.

Head, 2015). Резкое уменьшение количества корон, образованных в Атлийский период, может быть связано с увеличением мощности литосферы и усилением ее роли как реологического барьера.

Формирование мощных зон растяжения могло нарушать этот барьер и приводить к преимущественной концентрации корон Атлийского возраста в рифтовых зонах (рис. 3 и 7). Здесь важно отметить, что восточная сторона треугольника BAT (каньоны Devana и Rona Chasmata), соединяющая области Atla и Themis (рис. 7), практически лишена рифтовых корон. Эта особенность восточной стороны треугольника BAT указывает на разные вулканотектонические режимы, действовавшие в пределах региона BAT, и он должен рассматриваться как гетерогенный.

ВЫВОДЫ

1. Стратиграфические ассоциации изучаемых корон (~1/3 всей популяции корон контактирует с лопастными равнинами) и их пространственное распределение свидетельствуют о том, что поздние проявления вулканической активности на Венере слабо связаны с формированием корон. Малое количество корон-источников лопастных равнин (~17% всей популяции) говорит о том, что вулканическая активность корон угасла, в основном, в доАтлийское время. Таким образом, короны, с которыми связаны проявления позднего

вулканизма в виде лопастных равнин — это либо долгоживущие вулканотектонические комплексы, либо структуры завершающих фаз вулканической активности, их местоположение отмечает регионы длительного вулканизма.

2. Малое количество рифтовых корон (~14% всей популяции) говорит о том, что рифтогенез в Атлийский период не приводил к массовому формированию корон. Резкое уменьшение количества корон, образованных в Атлийский период, по сравнению с Фортунийским, может быть связано с увеличением мощности литосферы и усилением ее роли как реологического барьера.

Работа выполнена по Госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.)
- 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.)
- Гусева Е.Н., Иванов М.А. Короны Венеры: геологические, топографические и морфометрические ха-

- рактеристики // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 2. С. 84–91. (*Guseva E. N., Ivanov M.A.* Coronae of Venus: geological, topographic and morphometric characteristics // *Sol. Syst. Res.* 2022. V. 56. № 2. P. 76–83.)
- 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.)
- Airey M.W., Mather T.A., Pyle D.M., Ghail R.C.* The distribution of volcanism in the Beta-Atla-Themis region of Venus: Its relationships to rifting and implications for global tectonic regimes // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 1626–1649.
- 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.
- Aittola M., Raitala J.* Venusian novae: Classification and associations to volcano-tectonic structures // *Sol. Syst. Res.* 2007. V. 41 (5). P. 395–412.
- Arvidson R.E., Greeley R., Malin M.C., Saunders R.S., Izenberg N., Plaut J.J., Stofan E.R., Shepard M.K.* Surface modification of Venus as inferred from Magellan observation of plains // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 13303–13317.
- Baer G., Shubert G., Bindshandler 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., Bokstein 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. 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., 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.
- 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 B., Rymer H., Stix J., McNutt S., Sigurdson H. 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.
- Grindrod P.M., Hoogenboom T.* Coronae on Venus // *Astron. and Geophys.* 2006. V. 47. P. 3.16–3.21.
- Hamilton V.E., Stofan E.R.* The geomorphology and evolution of Hecate Chasma, Venus // *Icarus.* 1996. V. 121. P. 171–194.
- 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., Bindshadler 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.
- Jurdy D.M., Stefanick M.* Correlation of Venus surface features and geoid // *Icarus.* 1999. V. 139. P. 93–99.
- Koch D.M., Manga M.* Neutrally buoyant diapirs: A model for Venus coronae // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 3. P. 225–228.
- Konopliv A.S., Banerdt W.B., Sjogren W.L.* Venus Gravity: 180th degree and order model // *Icarus.* 1999. V. 139. P. 3–18.
- Krassilnikov A.S., Head J.W.* Novae on Venus: Geology, classification, and evolution // *J. Geophys. Res.: Geology.* 2003. V. 108. № E9. id. 15222148.
- 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.
- Martin P., Stofan E.R., Glaze L.S., Smrekar S.E. Coronae of Parga Chasma, Venus // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № E4. P. 1–23.
- Masursky H., Eliason E., Ford P.G., McGill G.E., Pettengill G.H., Schaber G.G., Schubert G. Pioneer-Venus radar results: Geology from the 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.
- 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.
- Piskorz D., Elkins-Tanton L.T., Smrekar S.E. Coronae formation on Venus via extension and lithospheric instability // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2014. V. 119. P. 2568–2582.
- Pronin A.A., Stofan E.R. Coronae on Venus: Morphology and distribution // *Icarus.* 1990. V. 87. 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.
- Romeo I. Monte Carlo models of the interaction between impact cratering and volcanic resurfacing on Venus: The effect of the Beta-Atla-Themis anomaly // *Planet. and Space Sci.* 2013. V. 87. P. 157–172.
- Schaber G.G. Venus: limited extension and volcanism along zones of lithospheric weakness // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9. P. 499–502.
- Sjogren W.L., Banerdt W.B., Chodas P.W., Konopliv A.S., Balmino G., Barriot J.P., Arkani-Hamed J., Colvin T.R., Davies M.E. The Venus Gravity Field and Other Geodetic Parameters // *Venus II* / Eds Bougher S.W., Hunten D.M., Phillips R.J. Univ. Arizona Press, 1997. P. 1125–1161.
- 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.
- 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.
- Smrekar S.E., Parmentier E.M. The interaction of mantle plumes with surface thermal and chemical boundary layers: Applications to hotspots on Venus // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 5397–5410.
- 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. 4637–4644.
- Stofan E.R., Hamilton V.E., Janes D.M., Smrekar S.E. Coronae on Venus: Morphology and origin // *Venus II* / Eds Bougher S.W., Hunten D.M., Phillips R.J. Univ. Arizona Press, 1997. P. 931–965.
- Stofan E.R., Sharpton V.L., Schubert G., Baer G., Bindshadler 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. 13.347–13.378.
- Stofan E.R., Smrekar S.E., Bindshadler D.L., Senske D.A. Large topographic rises on Venus: Implications for mantle upwelling // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 23.317–23.327.
- Stofan E.R., Smrekar S.E., Tapper S.W., Guest J.E., Grindrod P.M. Preliminary analysis of an expanded corona database for Venus // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 4267–4270.
- 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., Bindshadler 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.