

УДК 523.42

КОРОНЫ-ИСТОЧНИКИ МОЛОДОГО ВУЛКАНИЗМА НА ВЕНЕРЕ: ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ

© 2024 г. Е. Н. Гусева^{а,*}, М. А. Иванов^а

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

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

Поступила в редакцию 28.06.2023 г.

После доработки 14.07.2023 г.

Принята к публикации 10.08.2023 г.

Выполненное нами исследование пространственной и генетической связи корон и лопастных равнин позволяет сделать два важных вывода. 1) Около 17% всех вулканических корон Венеры являются источниками молодых лав, образующих лопастные равнины Атлийского периода (короны-источники). Малая доля корон-источников в общей популяции корон отражает снижение темпа формирования мантийных диапиров. 2) Площадь лопастных равнин, связанных с той или иной короной, и площадь самой короны связаны отрицательной корреляцией. Такие соотношения допускают существование только двух моделей завершающих стадий эволюции мантийных диапиров. Проанализировав обе эти модели, мы предполагаем, что в течение Атлийского периода геологической истории Венеры либо существовала единая зона нейтральной плавучести, либо подошва литосферы располагалась примерно на одном уровне.

Ключевые слова: Венера, короны, новы, кольцевое обрамление (вал), топография, вулканизм, лопастные равнины, рифтовые зоны, эволюция родительских диапиров, литосфера

DOI: 10.31857/S0320930X24010061, EDN: OHODPQ

ВВЕДЕНИЕ

Вулкано-тектонические комплексы Венеры, короны, представляют собой крупные (диаметром до 2500 км) кольцевые формы рельефа Венеры с обрамлением-валом, состоящим из плотно упакованных борозд и гряд (Barsukov и др., 1986; Campbell и др., 1992; Stofan и др., 1992; Basilevsky, Head, 1995; 2000; Stofan, Smrekar, 2005; Grindrod, Hoogenboom, 2006; Ivanov, Head, 2010). Вал образует тектонический компонент корон. Большинство корон выражены на поверхности именно своими тектоническими комплексами. Округлая форма корон, их вулканическая активность и неслучайное пространственное распределение на поверхности (Stofan и др., 1992; Phillips и др., 1992) указывают на то, что короны представляют собой поверхностные проявления мантийных диапиров и, следовательно, отражают процессы мантийной конвекции на Венере (Nikishin, 1986; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Janes и др., 1992; Squyres и др., 1992; Stofan и др., 1992; Koch, Manga, 1996; Smrekar, Parmentier, 1996; Smrekar, Stofan, 1997; Jellinek и др., 2002; Johnson, Richards, 2003; Davaille и др., 2017).

В некоторых случаях с коронами связаны морфологически различимые вулканические комплексы, образующие вулканический компонент корон. Эти комплексы представлены лавовыми потоками, скоплениями малых вулканов и иногда крутосклонными куполами. Эти образования, вероятно, связаны с формированием корон (Stofan и др., 1992). Лавовые потоки, как правило, представляют собой наиболее распространенные вулканические формы рельефа, занимающие значительную площадь. В подавляющем большинстве случаев лавовые потоки, сливаясь, образуют лопастные равнины, относящиеся к наиболее молодым вулканическим комплексам Венеры (Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2011; 2013). Лопастные равнины распространены как внутри обрамления корон, так и протягиваются далеко за его пределы, образуя обширные лавовые фартуки вокруг корон — все поля лопастных равнин, пространственно связанные с короной (Ivanov, Head, 2001).

Лопастные равнины занимают наиболее высокое стратиграфическое положение в локальном, региональном и глобальном масштабе (Ivanov, Head, 2011; 2015) и являются характерным атри-

бутом наиболее позднего, Атлийского, периода геологической истории Венеры (Basilevsky, Head, 1998), длительность которого составляет примерно 2/3 всей геологической истории планеты (Ivanov, Head, 2011; 2015). Во всех случаях лопастные равнины, пространственно ассоциирующиеся с коронами, подтапливают их тектонические компоненты и, следовательно, представляют собой результат поздних этапов эволюции некоторых мантийных диапиров. Стратиграфическое положение лопастных равнин говорит о том, что они представляют собой проявления поздней вулканической активности, вероятно, продолжающейся на поверхности Венеры (Shalygin и др., 2015; Herrick, Hensley, 2023).

Распространенность лопастных равнин и, в частности, пространственная и генетическая связь с коронами позволяют подойти к проблеме эволюции картины мантийной конвекции и связанного с ней стиля вулканической активности на протяжении геологической истории Венеры.

Первый вопрос, к решению которого мы обращаемся в нашем исследовании, можно сформулировать так: как часто проявлена связь корон и лопастных равнин? Ответ на этот вопрос позволил бы оценить (по крайней мере на качественном уровне) изменения темпа вулканической активности на Венере. Так как Атлийский период составляет наибольшую часть геологической истории Венеры, а лопастные равнины формировались на протяжении этого периода, то при неизменном или возрастающем темпе формирования мантийных диапиров следовало бы ожидать, что основная часть корон будет связана с лопастными равнинами. При затухающем темпе и/или формировании реологического барьера, препятствовавшего подъему диапиров, доля корон с лопастными равнинами будет уменьшаться.

Каковы вариации площади лопастных равнин, окружающих корону-источник? Это другой важный вопрос, который мы рассматриваем в нашем исследовании. Изменения площади равнин могут отражать эффузивную продуктивность родительского диапира. Здесь мы исходим из предположения, что более крупный диапир приводит к формированию более крупной короны, что представляется естественным. Сравнение эффузивной активности разных корон основано на допущении примерно одинаковой мощности покровов лопастных равнин, окружающих короны. Это допущение основано на двух наблюдательных фактах: (1) потоки лопастных равнин не имеют выраженного фронтального уступа и, следовательно, имеют незначительную мощность (толщину); (2) подавляющее большинство корон – топографически плоские структуры в отличие от крупных вулканов, основное тело кото-

рых, сложенное покровами лав, может достигать нескольких километров в высоту.

ДАнные И МЕТОды

В нашей работе мы использовали традиционный метод фотогеологического анализа, позволяющий реконструировать последовательность основных геологических событий и, следовательно, процессов как в локальном, так и в глобальном масштабе. Для фотогеологического анализа корон мы использовали их известные каталоги (Stofan и др., 1992; 2001; Crumpler, Aubele, 2000) в сопоставлении с глобальной геологической картой Венеры, на которой показаны поля лопастных равнин (Ivanov, Head, 2011).

Для каждой каталогизированной короны мы отмечали наличие или отсутствие лопастных равнин и отмечали признаки, указывающие на то, что данная корона является либо источником лопастных равнин, либо пассивно подтапливается ими. Таким образом, нами была выделена субпопуляция корон-источников лопастных равнин. Определение тех полей равнин, которые генетически связаны с конкретной короной, однако, бывает затруднено, так как лопастные равнины могут быть образованы лавовыми потоками из разных источников. Поэтому в нашем исследовании мы сформировали еще одну субпопуляцию, состоящую из тех корон, с которыми можно однозначно связать поля лопастных равнин. Для корон этой субпопуляции были определены площадь самой короны в пределах ее вала и общая площадь окружающих лопастных равнин с помощью равноплощадной проекции Моллвейде.

ПРИМЕРы ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ КОРОН И ЛОПАСТНЫХ РАВНИН

В качестве примеров рассмотрим две короны, являющиеся источниками лопастных равнин.

Корона Nahas-tsan Mons (14.4° ю. ш., 204.9° в. д., рис. 1а) имеет в диаметре около 167 км. Эта корона проявляется на поверхности в виде купольного поднятия и относится к топографическому классу D (Гусева, Иванов, 2022; 2023). Она расположена в области Atla и обрамлена трещинами рифтовой зоны Tkashi-mara Chasma (рис. 1а). Из этих трещин растекаются потоки лопастных равнин, покрывающие три крупные области суммарной площадью около 84420 км².

Корона Ereshkigal (21° с. ш., 84.3° в. д., рис. 1б) имеет в диаметре около 334 км. В рельефе она представляет собой сложную депрессию с центральным поднятием и относится к топографическому классу W (Гусева, Иванов, 2022; 2023). Эта корона расположена в Akhtamar Planitia

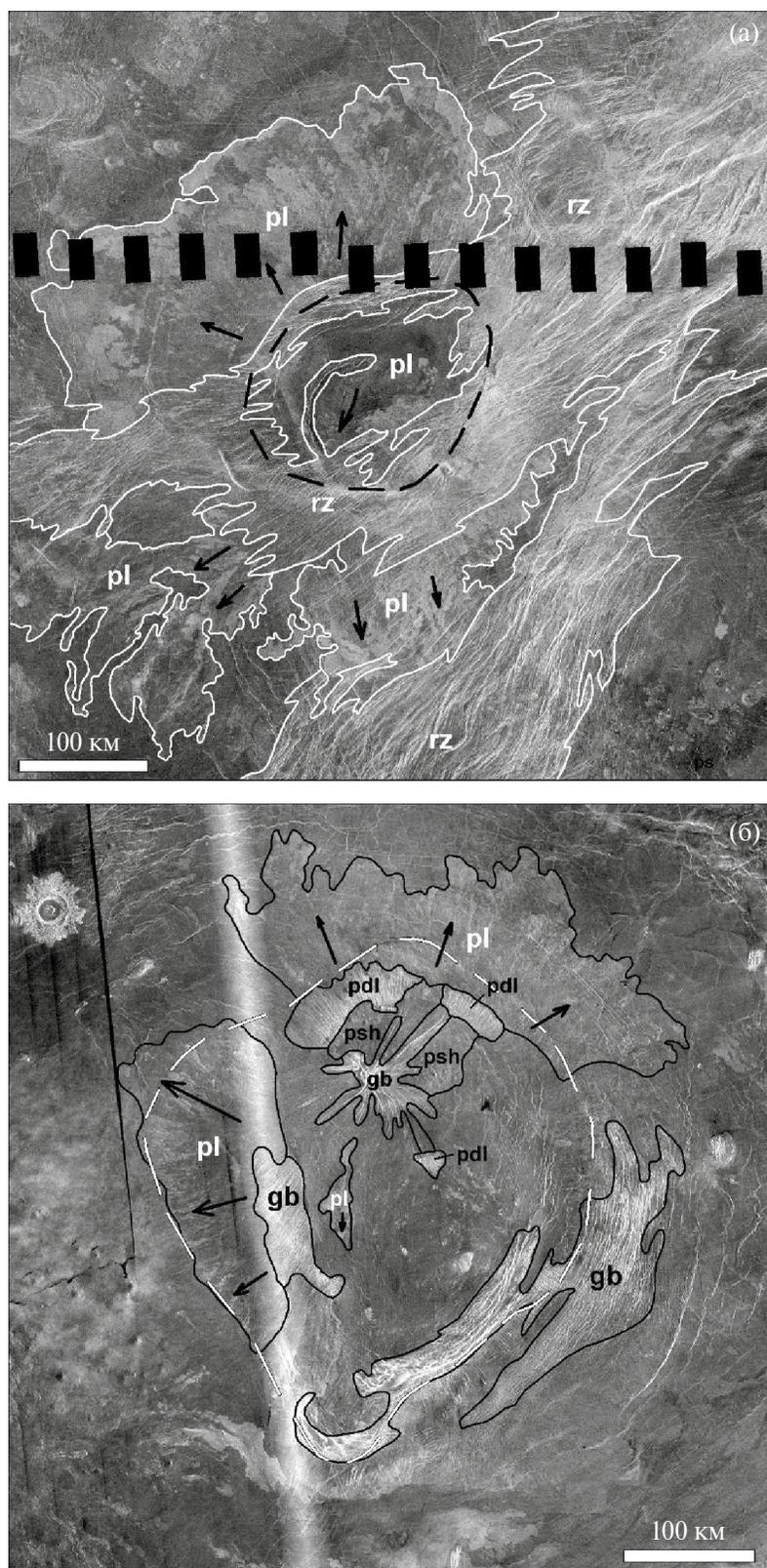


Рис. 1. Примеры корон-источников лопастных равнин: (а) – Nahas-tsan Mons обрамлена трещинами рифтовой зоны, rz, из которых растекаются потоки лопастных равнин, pl – черные стрелки; (б) – корона Ereshkigal обрамлена трещинами поясов борозд, gb, в центральной части короны – радиальная система грабенов (нова), которая является источником лопастных равнин, pl – черные стрелки. Обрамление корон – пунктирные линии, границы подразделений – сплошные линии; изображения в синусоидальной проекции, пространственное разрешение ~225 м/э.и.

и обрамлена трещинами поясов борозд. В ее центральной части расположена радиальная система грабен — нова. Формирование нов связывают с образованием приповерхностных магматических резервуаров, которые служили источниками систем радиальных даек (Aittola, Kostama, 2001; Basilevsky, Raitala, 2002; Krassilnikov, Head, 2003; Aittola, Raitala, 2007; Basilevsky и др., 2009). Нова в короне Ereshkigal представляет собой источник потоков лопастных равнин, которые составляют три полигона: два крупных в обрамлении короны и один малый — в ее центральной части. Суммарная площадь этих потоков лопастных равнин составляет около 59433 км².

ЧАСТОТНО-РАЗМЕРНОЕ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОРОН-ИСТОЧНИКОВ ЛОПАСТНЫХ РАВНИН

Фотогеологический анализ каталогизированных корон позволил выявить среди них 90, которые являются источниками лопастных равнин. Такие короны составляют примерно 17% всей популяции и по своим размерам (~100–650 км) перекрывают значительную часть размерного диапазона всех корон Венеры, за исключением наименьших из них (рис. 2а). В диапазоне от 82 до 650 км сосредоточено примерно 75% всей популяции корон, следовательно, проявления молодого вулканизма не характерны только для примерно четверти самых малых корон и коронообразных структур.

Субпопуляция корон, которые представляют собой чистые случаи источников лопастных равнин, насчитывает 41 корону, частотно-размерное распределение которых явно бимодально (рис. 2а). Такая бимодальность, однако, является следствием неслучайного характера отбора корон и, очевидно, не имеет физического смысла.

Примерно половина всех корон-источников (40 из 90 или ~44%) расположена в регионе между сводовыми поднятиями Beta-Atla-Themis (ВАТ), связанными мощными зонами растяжения (рифтовыми зонами Венеры, рис. 3).

Сводовые поднятия (Stofan и др., 1995, Smrekar и др., 1997) характеризуются ярко выраженными гравитационными особенностями (Sjogren и др., 1983; Koppliv, 1999): очень крупными положительными аномалиями геоида (до 155 м) и гравитационными аномалиями (до 200–300 мГал), а также значительными отрицательными аномалиями Буге (до 400 мГал). Такие значения гравитационного сигнала свидетельствуют о современной активности и поддержке рельефа поднятий как за счет избыточной плавучести (тепловое разуплотнение), так и, возможно, динамически. Вероятно, поднятия связаны с крупными мантийными диапирами, возможно, активными в настоящее время (McGill и др., 1981; Senske и др., 1991; 1992; Phillips, Hansen, 1994; Stofan и др., 1995; Smrekar и др., 1997; Rathbun и др., 1999; Stofan, Smrekar, 2005; Vezolainen и др., 2004; Basilevsky, Head, 2007).

Короны-источники лопастных равнин, как в области БАФ, так и за ее пределами, относятся к топографическим классам D, W и U. Короны класса D (~44% популяции корон-источников)

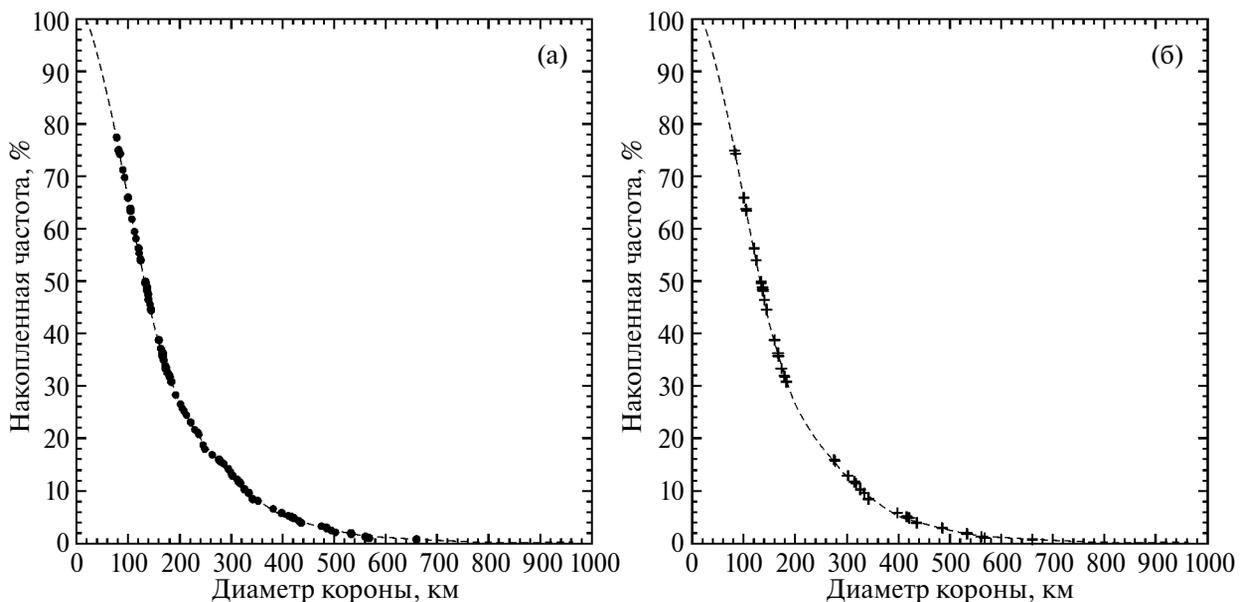


Рис. 2. Частотно-размерное распределение корон-источников лопастных равнин: (а) — все короны-источники (точки); (б) — только те короны, которые представляют чистые случаи источников (крестики). В обоих случаях пунктиром показана непрерывная аппроксимация частотно-размерного распределения всех корон Венеры.

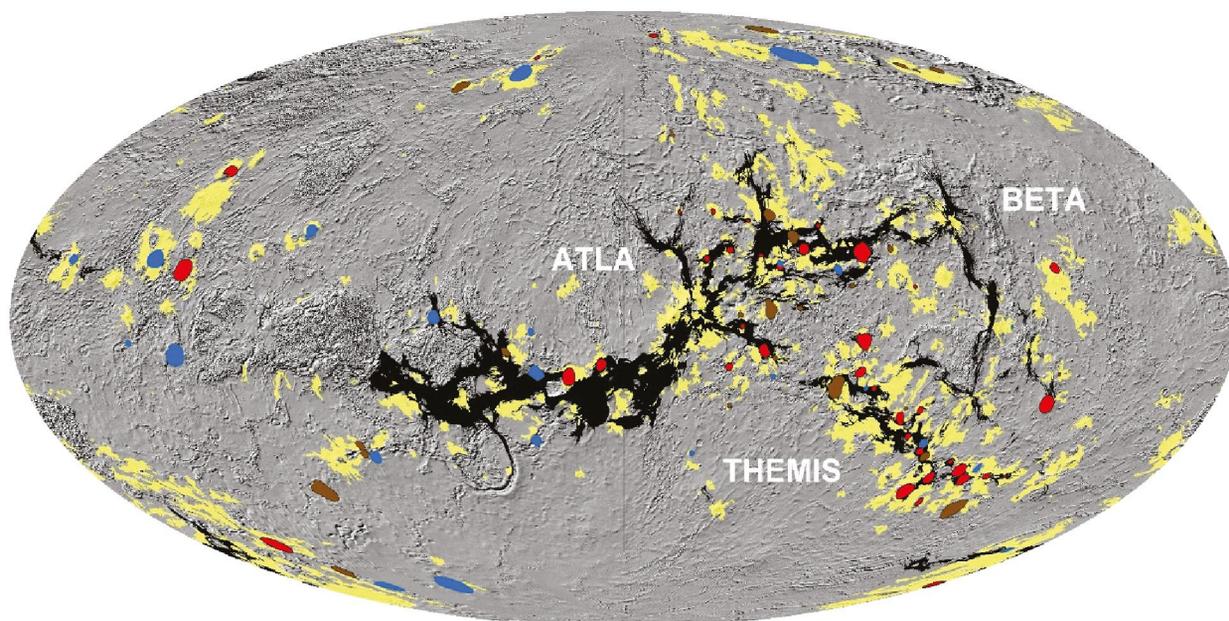


Рис. 3. Coronae-источники лопастных равнин. Цветом на карте отмечены их специфические топографические классы: D (красные точки), W (синие точки) и U (коричневые точки), лопастные равнины показаны желтым, рифтовые зоны – черным цветом, геологические границы по (Ivanov, Head, 2011). Изображения в равноплоскостной проекции Моллвейде, центральный меридиан 180°.

представляют собой куполообразные поднятия, вероятно, отражающие прогрессивную стадию эволюции родительского диапира, когда поверхность над головной частью диапира воздымается за счет тепловой и динамической поддержки (Smrekar, Stofan, 1997). Лопастные равнины, связанные с этими коронами, по-видимому, характеризуют современный этап эволюции диапира. Coronae классов W и U представлены в равных пропорциях (по 28%) и характеризуются наличием сложной (W) или простой (U) центральной топографической депрессии, которая, вероятно, формируется после распада и исчезновения тепловой аномалии родительского диапира и, следовательно, характеризует поздние этапы его эволюции.

ОЦЕНКА ЭФФУЗИВНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ РОДИТЕЛЬСКИХ ДИАПИРОВ ДЛЯ КОРОН-ИСТОЧНИКОВ ЛОПАСТНЫХ РАВНИН

Вполне естественно предположить, что размер (диаметр) короны зависит от размера родительского диапира и над более крупным диапиром формируется более крупная корона, хотя могут быть отклонения от этой тенденции и крупный диапир может приводить к формированию скопления малых корон вместо одной крупной. Так как лопастные равнины относятся к наиболее молодым стратиграфическим подразделениям, их формирование вокруг корон-источников связано

с поздними этапами эволюции родительских диапиров. При этом ожидается, что чем крупнее корона, тем больше площадь связанных с ней полей лопастных равнин.

Возможная тенденция увеличения площади лопастных равнин по мере роста диаметра короны (и, предположительно, родительского диапира) скрывает, однако, потенциальную магматическую активность диапира на поздних стадиях его эволюции. Например, корона меньшего размера может быть окружена полями лопастных равнин, суммарная мощность которых больше (или равна) площади равнин, связанных с более крупной короной. В этом случае, очевидно, что эффузивная продуктивность меньшего диапира выше. Для учета возможных вариаций продуктивности мы в нашей работе пользовались безразмерным параметром P , который представляет собой отношение S_a/S_c , где S_a – площадь лопастных равнин, связанных с короной, а S_c – площадь самой короны-источника.

Мы рассчитали площади лопастных равнин, которые связаны с конкретными коронами, чтобы оценить вулканическую продуктивность корон. Для расчетов мы использовали субпопуляцию корон, которые представляют собой чистые случаи корон-источников, и глобальную геологическую карту Венеры (Ivanov, Head, 2011) в равноплоскостной проекции Моллвейде.

Для того чтобы охарактеризовать возможные изменения значений отношения P в зависимости от диаметра короны, мы рассмотрели четыре

модели. (1) Площадь лавового фартука (все поля лопастных равнин, пространственно связанные с короной) возрастает строго пропорционально увеличению диаметра короны. (2) Увеличение площади лавового фартука по мере роста диаметра короны происходит случайным образом. (3) По мере увеличения диаметра короны площадь лавового фартука прогрессивно увеличивается. (4) По мере увеличения диаметра короны площадь лавового фартука уменьшается. Во всех случаях модельная корона представляла собой круг заданного диаметра, а лавовый фартук – кольцо вокруг короны. Внутренний диаметр кольца был равен диаметру короны, а внешний диаметр увеличивался по мере роста диаметра короны в зависимости от рассматриваемой модели.

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Во всех случаях площадь лопастных равнин, окружающих корону, увеличивалась по мере роста диаметра короны (рис. 4а). Такой результат тривиален и представляет собой следствие того, как была сформулирована модель. Однако следует отметить, что ожидаемое увеличение фартука может происходить либо строго функционально (модели 1, 2 и 4; см. рис. 4а, 4б и 4г), или демонстрировать некоторую степень рассеяния относительно общего тренда (модель 2; см. рис. 4б).

Важные и диагностические изменения наблюдаются, когда мы сравниваем изменения величины отношения P в зависимости от диаметра короны D . В этом случае существуют три типа зависимости P и D .

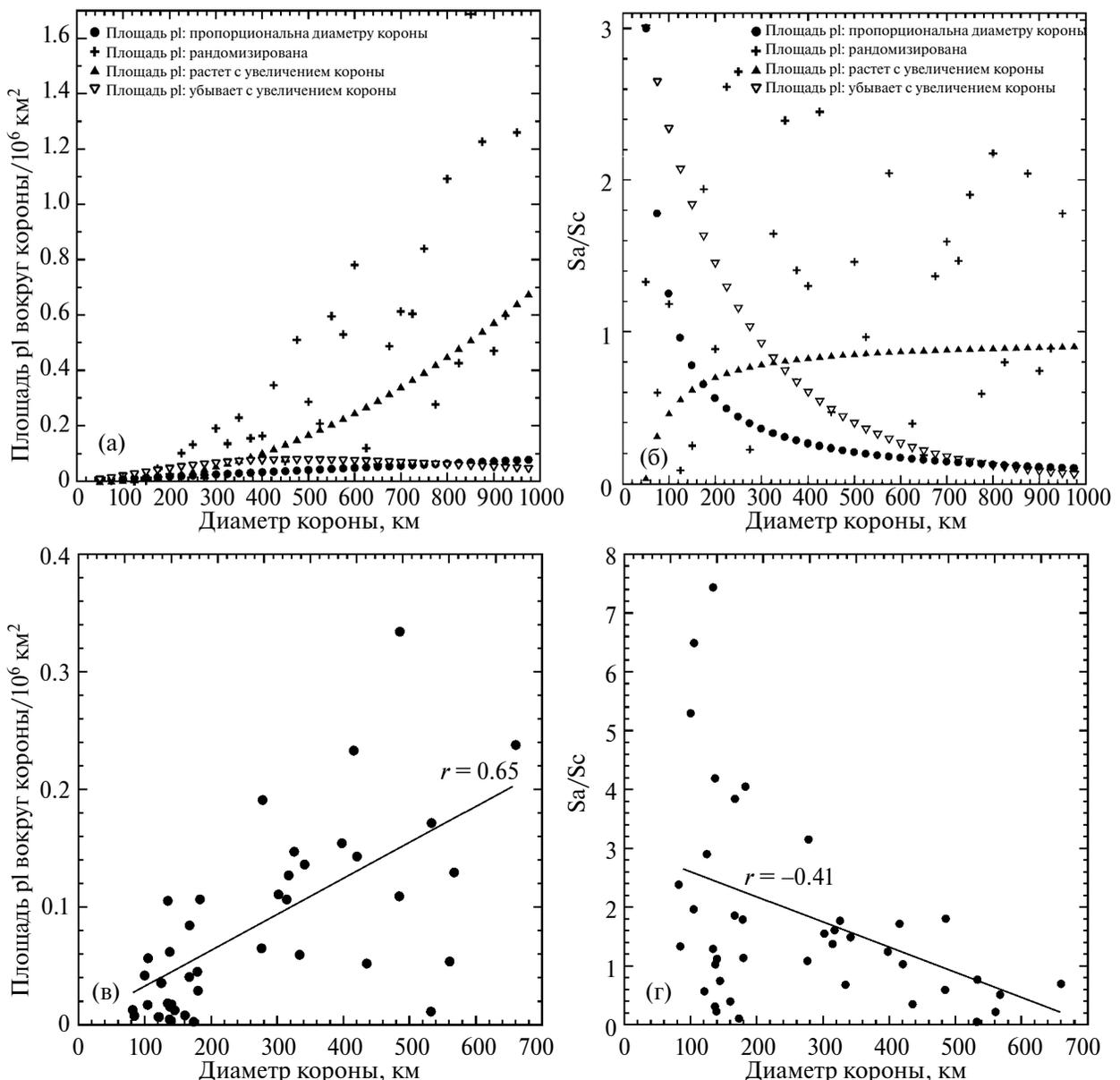


Рис. 4. Модели, показывающие возможные соотношения лопастных равнин и диаметра короны-источника. Обсуждение в тексте.

1. По мере увеличения диаметра короны величина отношения P снижается. Этот тип зависимости соответствует первой и четвертой из рассматриваемых моделей. В первой площадь лавового фартука увеличивается пропорционально росту диаметра короны, а в четвертой – уменьшается. Корреляция между значениями параметров P и D отрицательная (коэффициенты корреляции для моделей 1 и 4: $r = -0.67$ и $r = -0.64$ соответственно, хотя зависимость между параметрами нелинейная).

2. Значения отношения P хаотично меняются по мере увеличения диаметра короны (рис. 4б). Этот случай соответствует модели, в которой площадь лавового фартука растет по мере роста диаметра короны, но случайным образом. Корреляция между значениями параметров P и D в этом случае отсутствует ($r = 0.05$).

3. Значения отношения P увеличиваются по мере роста диаметра короны, (рис. 4б). Этот случай соответствует модели 3, в которой площадь лавового фартука прогрессивно увеличивается по мере роста диаметра короны. В этом случае корреляция между параметрами P и D положительная ($r = 0.75$, хотя зависимости между этими параметрами нелинейные).

ОБСУЖДЕНИЕ

Короны-источники лопастных равнин составляют около 17% от всей популяции корон. По определению, лопастные равнины формировались в течение Атлийского периода, длительность которого составляет примерно 2/3 всей геологической истории Венеры (Basilevsky, Head, 1998; Ivanov, Head, 2011; 2015). Если формирование корон действительно связано с подъемом мантийных диапиров, на что указывают характерные особенности корон (Nikishin, 1986; 1990; Pronin, Stofan, 1990; Janes и др., 1992; Squyres и др., 1992; Stofan и др., 1992; Koch, Manga, 1996; Smrekar, Parmentier, 1996; Smrekar, Stofan, 1997; Jellinek и др., 2002; Johnson, Richards, 2003; Davaille и др., 2017), то эффузивный вулканизм корон может отражать ту часть картины мантийной конвекции, которая связана с диапирами. Отсутствие признаков тектоники плит в течение геологической истории Венеры (Barsukov и др., 1986; Basilevsky и др., 1986), вероятно, указывает на то, что в этот промежуток времени мантийный диапиризм доминировал как стиль мантийной конвекции, ключом к расшифровке которого является вулканизм корон.

Рассмотрим три возможных сценария изменения темпа мантийного диапиризма с течением времени.

1. Мантийные диапиры могли формироваться примерно в одном темпе на протяжении геологической истории Венеры. В этом случае из-за

длительности Атлийского периода количество корон-источников лопастных равнин должно доминировать в составе всей популяции корон.

2. Темп мантийного диапиризма возрастал с течением времени и, следовательно, частота формирования корон и связанных с ними тектонических и вулканических комплексов тоже возрастала в более молодом геологическом времени. В этом сценарии, как и в предыдущем, следовало бы ожидать доминирования в общей популяции корон-источников лопастных равнин.

3. Темп формирования мантийных диапиров замедлялся с течением времени и/или увеличение мощности (толщины) литосферы препятствовало проникновению диапиров ближе к поверхности и, соответственно, формированию тектонических и вулканических компонентов корон. В рамках такого сценария следует ожидать уменьшения доли корон-источников лопастных равнин в общей популяции. Хотя более древние короны были многочисленнее, они сохранились преимущественно как тектонические комплексы, не полностью затопленные более поздними региональными равнинами. Более молодые короны демонстрируют оба компонента (вулканический и тектонический), но представляют собой более редкие образования.

Полученные нами результаты противоречат первым двум сценариями изменений характера мантийной конвекции и полностью согласуются с предсказаниями третьего сценария. Таким образом, можно сделать вывод, что на протяжении геологической истории Венеры либо темп формирования мантийных диапиров убывал с течением времени, либо реологический литосферный фильтр становился более эффективным, либо оба эти фактора совместно оказывали влияние на характер мантийной конвекции мантии. Частотно-размерное распределение корон-источников показывает, что малые короны доминируют в их популяции (рис. 2). Следовательно, фильтрующий эффект литосферы не оказывал существенного влияния на проявления мантийного диапиризма на поверхности, малая доля корон-источников в общей популяции корон отражает снижение темпа формирования мантийных диапиров.

Площадь лопастных равнин, потоки которых можно однозначно связать с той или иной короной, позволяют высветить еще один аспект формирования и эволюции мантийных диапиров на Венере, а именно соотношение их эффузивной и интрузивной активности. Мы рассмотрели четыре возможных модели изменения площади лопастных равнин, связанных с коронами. Первая из них представляет возможный природный

случай, когда магмогенерирующая способность диапиров увеличивается пропорционально увеличению их размера. Такой пропорциональности можно было бы достичь, если головная часть всех диапиров, генерирующих лопастные равнины, располагалась бы на одной глубине, соответствующей либо зоне нейтральной плавучести (ЗНП), либо подошве литосферы, которая может играть роль реологической ловушки для диапиров. В этом случае декомпрессионное плавление в головной части диапира приводило бы к формированию магматических резервуаров, объем которых контролировался бы в первую очередь размером диапира. Для таких диапиров, при прочих равных условиях, соотношение между интрузивной и эффузивной активностью сохранялось бы неизменным и увеличение размеров магматического резервуара в головной части диапира приводило бы к пропорциональному увеличению объемов как эффузивных тел (лавовых потоков), так и интрузивных тел, например, роев даек (Head, Wilson, 1992; Grosfils, Head, 1994; Lopez и др., 1999; Herrick, 1999; Ernst и др., 2001).

Вторая модель может представлять такой сценарий эволюции родительских диапиров, в котором глубина головной части диапира меняется случайным образом в зависимости от вариаций плотностных и реологических свойств литосферы, объема и тепловой истории родительского диапира. В этом сценарии случайная, закономерно меняющаяся глубина головной части диапира

приводит к тому, что баланс между интрузивной и эффузивной активностью может сохраняться только применительно к каждому конкретному случаю. Следовательно, объем эффузивных тел закономерно меняется от одной короны к другой, хотя общее увеличение площади лавовых потоков увеличивается по мере роста потенциального магматического резервуара.

Третья модель может описывать ситуацию, когда более крупные диапиры поднимаются ближе к поверхности. В этом случае эффективность декомпрессионного плавления увеличивается, а объем магматического резервуара возрастает непропорционально размеру диапира. Более мелкое положение головной части диапира может приводить к тому, что дайки вокруг главного магматического резервуара, будут чаще пересекать поверхность и, таким образом, усиливать эффузивную активность короны и уменьшать общий объем интрузивных тел, связанных с диапиром.

Четвертая модель – антипод третьей и описывает ситуацию, когда глубина головной части увеличивается для более крупных диапиров. В этом случае их магматическая активность может смещаться в сторону преимущественного формирования интрузивных тел, а объем эффузивного материала может уменьшаться.

Мы сравнили предсказания моделей с результатами измерений площадей лопастных равнин, которые однозначно связаны с той или иной короной (рис. 4в). Между площадью лопаст-

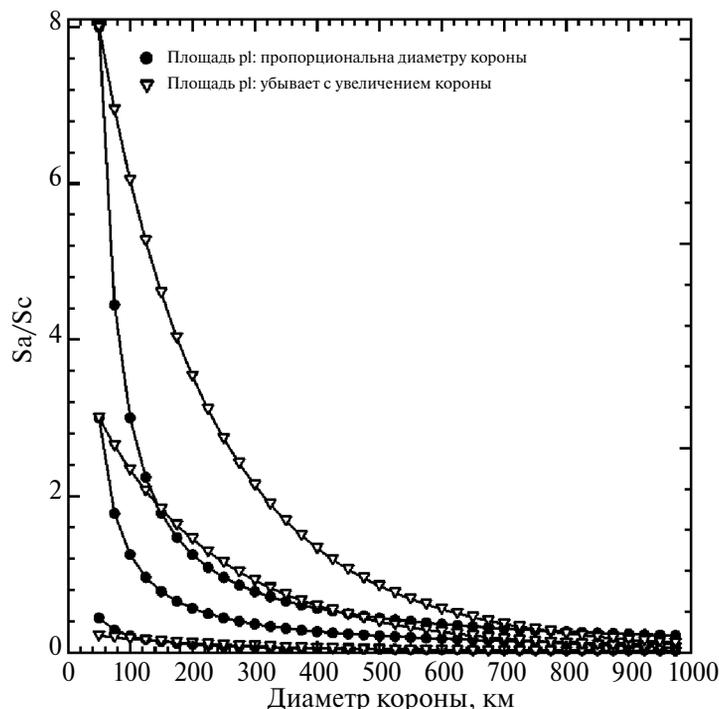


Рис. 5. Вариации значений параметра P в зависимости от модели: линии с точками соответствуют модели 1 (рис. 4б); линии с треугольниками соответствуют модели 4 (рис. 4б).

ных равнин и площадью короны-источника наблюдается заметная положительная корреляция ($r = 0.65$), хотя разброс значений площади равнин велик. Такая корреляция свидетельствует, тем не менее, что увеличение размера родительского диапира, действительно ведет к повышению эффузивной активности корон и увеличению площади лавового фартука. Полученный результат, однако, не позволяет оценить достоверность той или иной из рассматриваемых моделей, так как для всех них увеличение диаметра короны сопровождается ростом площади окружающих лопастных равнин (рис. 4а).

Сопоставление параметров P и D для реальных корон (рис. 4г) показывает, что между их значениями существует отрицательная корреляция, хотя и довольно слабая ($r = -0.41$). Тем не менее наблюдаемые соотношения P и D позволяют отвергнуть модели 2 (случайные изменения площади лавового фартука вокруг корон) и 3 (прогрессивное увеличение площади лопастных равнин). Следовательно, нет оснований считать, что глубина зоны нейтральной плавучести была разной для разных корон (модель 2) или уменьшалась для более крупных корон (модель 3).

Отрицательная корреляция параметров P и D (рис. 4в) не противоречит первой (увеличение лавового фартука пропорционально росту диаметра короны, рис. 4г) и четвертой (прогрессивное уменьшение площади лопастных равнин по мере роста диаметра короны, рис. 4г) модели. Однако предсказания этих моделей полностью перекрываются в отношении изменений значений P и D (рис. 5), и поэтому мы не можем оценить правдоподобность моделей на основании полученных нами результатов. Можно только отметить, что нет очевидных природных факторов, приводящих к систематическому увеличению глубины зоны нейтральной плавучести более крупных диапиров. Поэтому четвертая модель представляется менее реалистичной, и мы склонны рассматривать первую модель, предсказывающую примерно одинаковую глубину ЗНП для всех корон-источников лопастных равнин, как модель, в большей мере характеризующую реальную ситуацию на Венере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное нами исследование пространственной и, вероятно, генетической связи корон и лопастных равнин позволяет сделать два важных вывода, касающихся изменения картины мантийной конвекции на Венере.

1. Только 17% всей популяции корон Венеры являются источниками молодых лав, образующих лопастные равнины Атлийского периода. Такая малая доля вулканических корон-источников го-

ворит о том, что либо темп формирования мантийных диапиров убывал с течением времени на протяжении геологической истории Венеры, либо утолщающаяся литосфера все более эффективно отфильтровывала поднимающиеся диапиры, либо оба эти фактора совместно оказывали влияние на характер мантийной конвекции. Частотно-размерное распределение корон-источников показывает, что малые короны доминируют в их популяции (рис. 2). Следовательно, фильтрующий эффект литосферы не оказывал существенного влияния на проявления мантийного диапиризма на поверхности, малая доля корон-источников в общей популяции корон отражает снижение темпа формирования мантийных диапиров.

2. Площадь лопастных равнин, которые можно однозначно связать с той или иной короной, и площадь самой короны связаны отрицательной корреляцией (рис. 4в). Такие соотношения допускают существование только двух моделей завершающих стадий эволюции диапиров: (а) все родительские диапиры корон-источников лопастных равнин располагались примерно на одной глубине, соответствующей либо зоне нейтральной плавучести, либо подошве реологического барьера литосферы; (б) глубина, на которой останавливался подъем диапиров, была больше для более крупных диапиров. Так как для этой модели нет очевидных физических причин, мы предполагаем, что в течение Атлийского периода геологической истории Венеры либо существовала единая зона нейтральной плавучести, либо подошва литосферы располагалась примерно на одном уровне.

Работа выполнена по Госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гусева Е.Н., Иванов М.А.* Короны Венеры: геологические, топографические и морфометрические характеристики // *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).
- Гусева Е.Н., Иванов М.А.* Пространственные и генетические соотношения корон, лопастных равнин и рифтовых зон Венеры // *Астрон. вестн.* 2023. Т. 57. № 2. С. 113–123. (*Guseva E.N., Ivanov M.A.* Spatial and genetic relationships of coronae, lobate plains and rift zones of Venus // *Sol. Syst. Res.* 2023. V. 57. № 2. P. 112–121).
- 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.

- 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., and 20 co-authors.* 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.* Geologic units on Venus: Evidence for their global correlation // *Planet. and Space Sci.* 2000. V. 48. P. 75–111.
- Basilevsky A.T., Head J.W.* Beta Regio, Venus: Evidence for uplift, rifting, and volcanism due to a mantle plume // *Icarus*. 2007. V. 192. P. 167–186.
- Basilevsky A.T., Pronin A.A., Ronca L.B., Kryuchkov V.P., Sukhanov A.L., Markov M.S.* Styles of tectonic deformations on Venus: Analysis of Venera 15 and 16 data // *Proc. 16th Lunar and Planet. Sci. Conf. Part 2. J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № B4. P. D339–D411.
- 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. № E10. P. 16.249–16.277.
- Crumpler L.S., Aubele J.* Volcanism on Venus // *Encyclopedia of Volcanoes* / Eds: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. Academic Press, 2000. P. 727–770.
- Davaille A., Smrekar S.E., Tomlinson S.* Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus // *Nature Geosci.* 2017. V. 10. № 5. P. 349–355.
- Ernst R.E., Grosfils E.B., Mège D.* Giant dike swarms: Earth, Venus and Mars // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2001. V. 29. P. 489–534.
- Grindrod P.M., Hoogenboom T.* Coronae on Venus // *Astron. and Geophys.* 2006. V. 47. P. 3.16–3.21.
- Grosfils E., Head J.W.* The global distribution of giant radiating dike swarms on Venus: Implications for the global stress state // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 701–704.
- Head J.W., Wilson L.* Magma reservoirs and neutral buoyancy zones on Venus: Implications for the formation and evolution of volcanic landforms // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E3. P. 3877–3903.
- Herrick R.R.* Small mantle upwellings are pervasive on Venus and Earth // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. № 6. P. 803–806.
- Herrick R.R., Hensley S.* Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission // *Science*. 2023. V. 379. № 6638. P. 1205–1208.
- Ivanov M.A., Head J.W.* Geology of Venus: Mapping of a global geotraverse at 30° N 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. 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.
- 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.* 2003. V. 108. № E9. P. 5108.
- Lopez I., Marquez A., Oyarzun R.* Are coronae restricted to Venus?: Corona-like tectonovolcanic structures on Earth // *Earth, Moon and Planets*. 1999. V. 77. P. 125–137.
- 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. Conf.* 1986. V. XVII. P. 615–616.
- Nikishin A.M.* Tectonics of Venus: a review // *Earth, Moon and Planets*. 1990. V. 50/51. P. 101–125.
- Phillips R.J., Hansen V.L.* Tectonic and magmatic evolution of Venus // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 1994. V. 22. P. 597–654.
- Phillips R.J., Raubertas R.F., Arvidson R.E., Sarkar I.C., Herrick R.R., Izenberg N., Grimm R.E.* Venus impact

- craters and resurfacing history // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E10. P. 15923–15948.
- Pronin A.A., Stofan E.R.* Coronae on Venus: Morphology and distribution // *Icarus*. 1990. V. 87. P. 452–474.
- Rathbun J.A., Janes D.M., Squyres S.W.* Formation of Beta Regio, Venus: Results from measuring strain // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 1917–1927.
- Senske D.A., Head J.W., Stofan E.R., Campbell D.B.* Geology and structure of Beta Regio, Venus: Results from Arecibo radar imaging // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. № 6. P. 1159–1162.
- Senske D.A., Schaber G.G., Stofan E.R.* Regional topographic rises on Venus: Geology of western Eistla Regio and comparison to Atla Regio and Beta Regio // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 13395–13420.
- Shalygin E.V., Markiewicz W.J., Basilevsky A.T., Titov D.V., Ignatiev N.I., Head J.W.* Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma rift zone // *J. Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 4762–4769.
- Sjogren W.L., Bills B.G., Birkeland P.B., Esposito P.B., Konopliv A.R., Mottinger N.A., Ritke S.J., Phillips R.J.* Venus gravity anomalies and their correlations with topography // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № B2. P. 1119–1128.
- 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. № B3. P. 5397–5410.
- 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. № E8. P. 13611–13634.
- 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. № E8. P. 13347–13378.
- Stofan E.R., Smrekar S.E., Bindschadler D.L., Senske D.A.* Large topographic rises on Venus: Implications for mantle upwelling // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № E11. P. 23317–23327.
- 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.
- Vezolainen A.V., Solomatov V.S., Basilevsky A.T., Head J.W.* Uplift of Beta Regio: Three-dimensional model // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. id. E08007 (8 p.).