

# Вулканизм планеты Венера: прошлое и настоящее

А.Т.Базилевский, В.Е.Маркевич

Данная статья представляет собой краткий обзор того, что мы знаем о вулканизме Венеры — ближайшей к Земле по положению в Солнечной системе планеты. Полуось ее орбиты вокруг Солнца (а она очень близка к круговой) составляет 0.72 астрономической единицы (которая равна среднему расстоянию от Земли до Солнца,  $\approx 150$  млн км). Венера близка к Земле и по таким важным характеристикам, как радиус — 6051 км (0.95 радиуса нашей планеты), масса —  $4.868 \cdot 10^{24}$  кг (0.81 земной массы), ускорение силы тяжести —  $8.87 \text{ м/с}^2$  (0.907g), средняя плотность —  $5.2 \text{ г/см}^3$  (0.94 плотности Земли) [1]. Схожесть плотностей предполагает и сходство валового химического состава обеих планет.

У Венеры есть атмосфера с видимым в хорошие телескопы облачным покровом. Ее существование открыл еще М.В.Ломоносов при наблюдении прохождения этой планеты по диску Солнца [2]. Считалось, что условия на поверхности Венеры близки к земным (рис.1). В частности, это отразилось в некоторых научно-фантастических публикациях середины XX в.\*

Однако космические полеты к Венере показали, что условия на ее поверхности разительно отличаются от земных: средняя



**Александр Тихонович Базилевский**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН. Специалист в области геологии планетных и малых тел Солнечной системы. Лауреат Государственной премии СССР и премии Фонда Александра фон Гумбольдта (Германия).



**Войцех Ежи Маркевич (Wojciech Jerzy Markiewicz)**, доктор физических наук, сотрудник Института исследования Солнечной системы Общества имени Макса Планка (Германия). Область научных интересов — исследования комет, полярных районов Марса и планетных атмосфер. Участник многих космических миссий, научный руководитель эксперимента ТВ-камеры VMC на космическом аппарате «Венера-Экспресс».

**Ключевые слова:** Венера, вулканизм, вулкан, равнины, рифт.  
**Key words:** Venus, volcanism, volcano, plains, rift.

температура  $\approx 470^\circ\text{C}$ , а давление существенно углекислой и очень сухой атмосферы — 95 бар [3, 4]. Такое сочетание похожести и непохожести на Землю делает Венеру интересным объектом сравнительного планетологического анализа, что выразилось в реализации 23 успешных миссий к этой планете [5]. Рассматриваются и новые миссии, в том числе российская «Венера-Д», в рамках которой планируются определения химического состава поверхности, атмосферы и аэрозоля облаков\*\*.

О том, что на Венере по крайней мере когда-то должен был быть вулканизм, говорит упомянутая близость ее и Земли по размерам и химическому составу. Вулканические процессы служат средством

\* См., например: Стругацкий А., Стругацкий Б. Страна Багровых Туч. М., 1959.

© Базилевский А.Т., Маркевич В.Е., 2016

\*\* Материалы по долговременной станции на поверхности Венеры, 2009 ([http://spec-trum.iki.rssi.ru/pfs/VEX/News/news\\_vex.htm](http://spec-trum.iki.rssi.ru/pfs/VEX/News/news_vex.htm)).

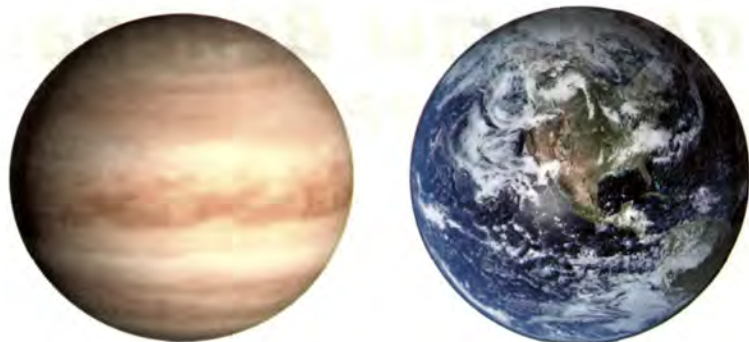


Рис.1. Венера (слева) и Земля, вид из космоса. Атмосфера Земли в тех местах, где нет сплошного облачного покрова, позволяет видеть детали поверхности. У Венеры сплошной облачный покров, и поверхность в оптическом диапазоне не видна. Диффузная полосчатость на снимке — детали облачного покрова.

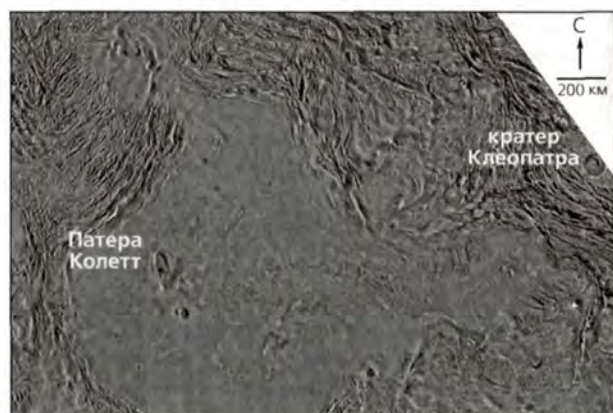


Рис.2. Вулканическое плато Лакши ( $69^{\circ}$ с.ш.,  $339^{\circ}$ в.д.), окруженное складчатыми горами. Патера Колетт — овальная в плане вулканическая структура с радиальной системой лавовых потоков. Кратер Клеопатра — ударный, с типичной для кратеров этого размера двухкольцевой внутренней структурой. Монтаж изображений, полученных радаром бокового обзора КА «Венера-15 и -16».

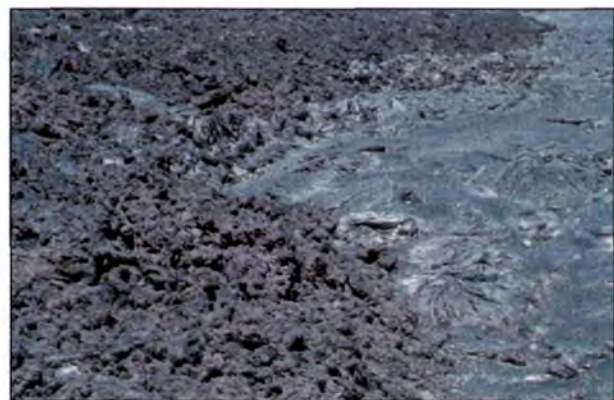


Рис.3. Гавайская вулканическая лава. Слева — сильно шероховатая поверхность лавы типа аа, справа — более гладкая типа пахоэхоз. Снимок Геологической службы США.

избавления планеты от излишков тепла. А оно на ранних стадиях геологической истории планетных тел обеспечивалось энергией соударений при аккреции планеты из допланетного вещества, и чем больше растущее тело, тем сильнее оно бьет себя вновь поступающими порциями допланетного вещества и тем больше на планете запасается тепла. Вот почему важно, что Венера по размерам близка к Земле. На более поздних этапах тепло для вулканизма обеспечивает энергия распада радиоактивных калия, тория и урана. Вот почему важно, что по валовому химическому составу Венера близка к Земле. Этот вывод получил прямое подтверждение, когда советские космические аппараты (КА) «Венера-15 и -16» в 1983–1984 гг. передали радарные изображения поверхности нашей космической соседки (атмосфера и облака Венеры прозрачны для радиоволн), на которых видны типичные вулканические формы (рис.2).

### Венерианские вулканические образования

Наиболее распространенный тип вулканических образований на Венере — различные вулканические равнины. Кстати, значительные области дна земных океанов — также вулканические (лавовые) равнины, в различной степени перекрытые океаническими осадками. Судя по результатам глобального геологического картирования Венеры, которое выполнили М.А.Иванов и Дж.У.Хэд по данным анализа изображений, полученных радаром КА «Магеллан» в 1990–1994 гг. в режиме бокового обзора, вулканические равнины занимают около 70% поверхности планеты [6]. Гораздо меньшую долю поверхности (несколько процентов) занимают вулканические постройки. Ниже мы будем говорить о более радиоярких и менее радиоярких вулканических образованиях. Яркость поверхности на изображениях, полученных радаром, при прочих равных условиях сильно зависит от степени шероховатости поверхности в масштабе длины используемых радиоволн (в данном случае 12.6 см). Более шероховатые поверхности лучше отражают назад приходящие сбоку радиоволны (а это радар бокового обзора) и потому выглядят более яркими, чем относительно гладкие поверхности, которые скорее похожи на зеркало и отражают приходящие сбоку радиоволны вперед, туда где они не регистрируются. На рис.3 показаны две типичные разновидности поверхности базальтовых лав — аа и пахоэхоз (термины взяты из гавайского языка).

**Вулканические равнины.** Иванов и Хэд [6] выделяют на Венере несколько типов вулканических равнин, из которых мы охарактеризуем три наиболее распространенных: лопастные, региональные с извилистыми грядами и щитовые.

*Лопастные равнины* называются так потому, что состоят из переналожённых друг на друга «лопастей» лавовых потоков, которые достигают в ширину десятков, а в длину — сотен километров (рис.4). Большая протяженность потоков свидетельствует о значительном расходе лавы в каждом эпизоде извержения и о сравнительно низкой ее вязкости. Последнее косвенно указывает на их базальтовый состав.

Лопастные равнины занимают около 8% поверхности Венеры [6]. Они тяготеют к молодым рифтовым зонам и, как правило, не нарушены тектоническими структурами, а если и нарушены, то разломами рифтовых зон, с которыми эти лавы ассоциируют. Повышенная радиояркость потоков указывает на относительно высокую шероховатость (в дециметровом диапазоне размеров) их поверхности.

*Региональные равнины с извилистыми грядами* — наиболее распространенный тип венерианских лавовых равнин, в которых выделяются нижнее (более древнее) и верхнее подразделения (рис.5). Поверхность нижнего характеризуется умеренной радиояркостью, а поверхность верхнего — повышенной. Радиояркие поверхности верхнего подразделения часто имеют потоковидную в плане форму. Оба подразделения деформированы сетью извилистых тектонических гряд, очевидно, образованных в обстановке умеренного сжатия. Деформированность извилистыми грядами отличает верхнее подразделение региональных равнин от описанных выше лопастных, образованных после глобального эпизода умеренного тектонического сжатия, в результате которого и возникла сеть гряд.

Нижнее подразделение занимает около 30% поверхности Венеры, а верхнее — около 9% [6]. Региональные равнины характе-

ризуются малыми уклонами поверхности. Для верхнего подразделения типично сочетание малых уклонов поверхности с большой протяженностью лавовых потоков, что указывает на значительный расход лавы и сравнительно низкую вязкость, а это согласуется с базальтовым составом лав. В пределах региональных равнин совершили по-

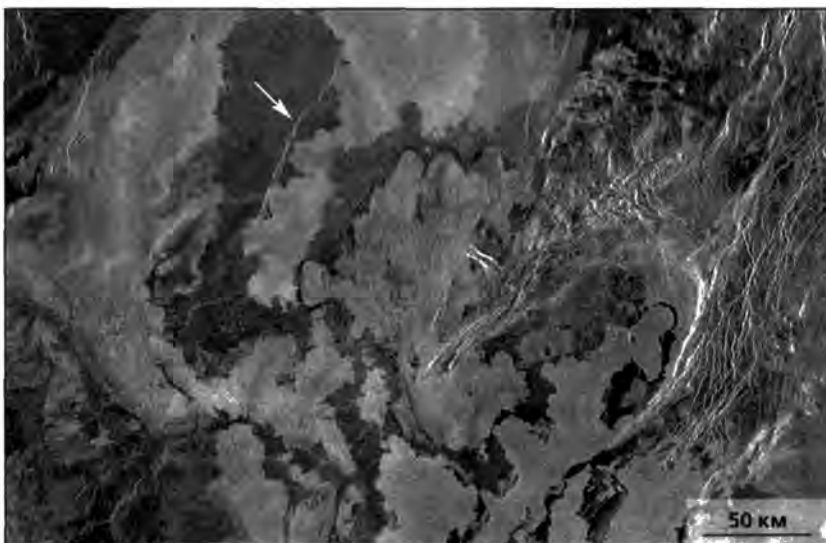


Рис.4. Лопастная равнина потока Милитты (353.0°в.д., 51.2°ю.ш.). В левой и средней частях изображения видно, что радиояркие лавовые потоки наложены на менее яркую поверхность более древней равнины с извилистыми грядами (стрелка указывает на гряду). В правой части изображения видны также относительно древние тектонические гряды и небольшие вулканические купола. Изображение получено радаром КА «Магеллан» (НАСА).

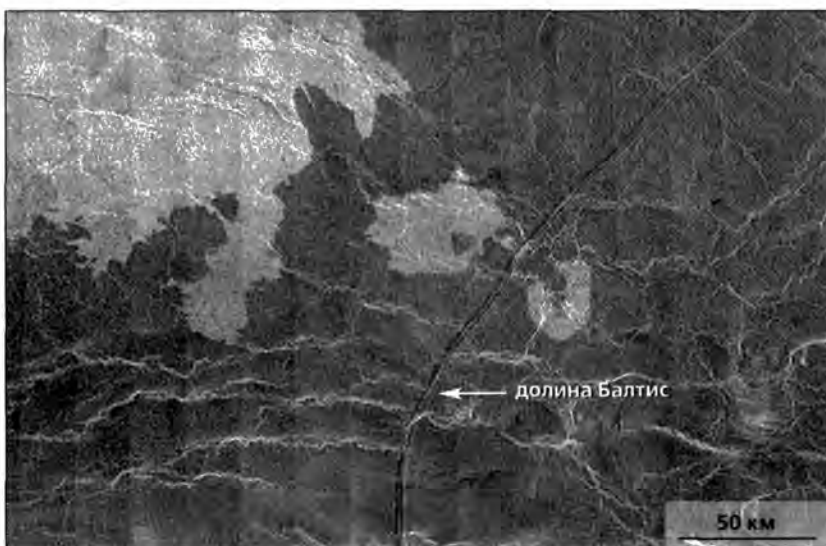


Рис.5. Региональные равнины с извилистыми грядами. Часть равнины Велламо (47°с.ш., 160°в.д.). Радиояркие участки в левой верхней части изображения представляют верхнее подразделение комплекса, а поверхность с умеренной радиояркостью в остальной части изображения — нижнее. Стрелка указывает на долину Балтис. Изображение получено радаром КА «Магеллан».



Рис.6. Содовая лава в Ол-Доиньо-Ленгаи (Танзания) 24 июля 2001 г. Толщина на фронте потока 5 см.

www.swisseduc.ch

садку КА «Венера-9, -10, -13», «Вега-1 и -2», которые с помощью гамма-спектрометрического и рентгено-флуоресцентного анализов определили близкий к базальтам состав материала поверхности [7].

На рис.5 видна необычная структура — долина Балтис. Это врезанный в нижнее подразделение региональных равнин сравнительно узкий (2 км), слегка извилистый желоб глубиной около 50 м. Удивляет его общая длина, достигающая почти 7 тыс. км. Недалеко от северного конца желоба находится образование, напоминающее полого-склонный вулкан поперечником около 150 км [8]. Возможно, это источник жидкости (лавы?), которая прорезала желоб. Но характерная для большинства вулканических образований Венеры базальтовая ла-

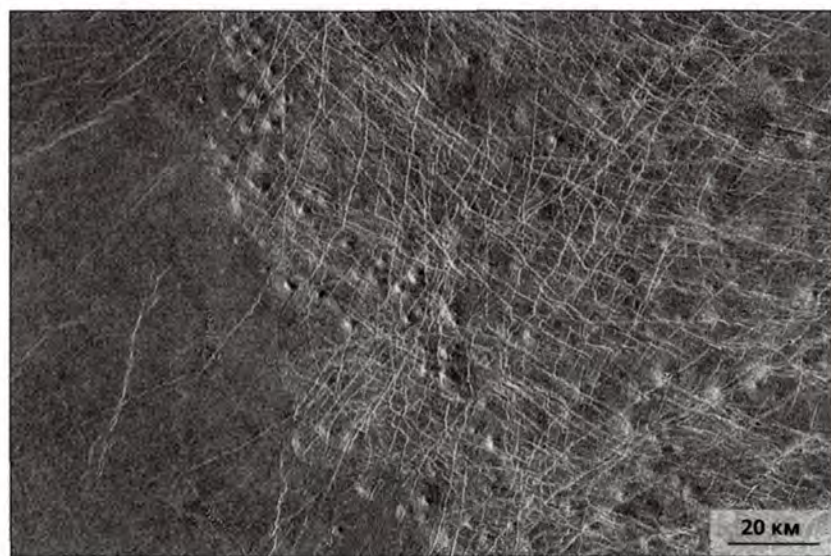


Рис.7. Щитовые равнины (в центре и в правой части изображения) и региональные равнины с извилистыми грядами (в левой). В пределах щитовых много трещин, которые не заходят в региональные, что указывает на относительную молодость последних. Участок равнины Аино (51° ю.ш., 75° в.д.). Изображение получено радаром КА «Магеллан».

ва обладает температурой 1000–1200°C. На таком долгом пути в контакте с атмосферой, плотность которой около поверхности составляет 67 кг/м<sup>3</sup>, а температура — около 500°C, лава должна быстро остывать и затвердевать, а не прорезать такое «правильное» русло. Возможно, здесь происходил процесс, аналогичный содовому вулканизму Ол-Доиньо-Ленгаи на севере Танзании, где температура «лавы» составляет всего 500–600°C [9], и поэтому расплавленный поток выглядит черным или темно-коричневым, а не огненно-красным, как большинство лав (рис.6). Может быть, долина Балтис была прорезана лавой экзотического состава с температурой плавления более низкой, чем температура поверхности и приповерхностной атмосферы. Но это не более чем предположение.

*Щитовые равнины* называются так потому, что в них много сравнительно небольших (1–5 км в диаметре) вулканов щитообразной формы (рис.7). Их склоны пологие, что указывает на низкую вязкость лавы, а это опять предполагает базальтовый состав. КА «Венера-8», совершивший посадку в пределах участка щитовых равнин, гамма-спектрометрическим методом определил содержания калия, урана и тория в материале поверхности в концентрациях, несколько превышающих типичные для базальтов. Возможно, данные измерения характеризуют не материал щитовых равнин, а нередко ассоциирующие с ними так называемые крутосклонные купола, для которых предполагается небазальтовый состав.

Щитовые равнины занимают около 17% поверхности Венеры. Для них характерна умеренная радиояркость поверхности, что предполагает ее относительную (в дециметровом диапазоне размеров) гладкость [6]. Небольшие расстояния между соседними вулканами и их сравнительно малые размеры, возможно, указывают на то, что их источники находились близко к поверхности и каждый из них был сравнительно маломощным. Возрастные соотношения между щитовыми (более древними) и региональными равнинами выдерживаются и в других районах планеты (рис.7). Однако в некоторых местах наблюдаются скопления небольших щитовых вулканов, более молодых, чем региональные равнины.

**Вулканические постройки.** На Венере известны их два главных типа: пологосклонные щитовые вулканы и крутосклонные купола.

*Пологосклонные щитовые вулканы* широко распространены

ны на поверхности планеты. Среди них выделяются крупные (167 построек) — диаметром  $>100$  км, промежуточного размера (их около 1000) — диаметром от 20 до 100 км, а также множество малых — диаметром менее 20 км [10]. Вулкан Маат (рис.8) — один из самых крупных (диаметром  $\sim 400$  км) и самый высокий ( $\sim 9$  км над средним уровнем поверхности) на Венере.

Вулкан Маат, как и большинство венерианских вулканов, очень пологосклонный. Нередко в популярной литературе его показывают с сильным преувеличением по вертикальной оси (рис.9). Земными аналогами Маата могут служить гавайские вулканы Мауна-Кеа и Мауна-Лоа (рис.10). Пологосклонность гавайских вулканов (и их венерианских аналогов) связана с низкой вязкостью лавы, что согла-

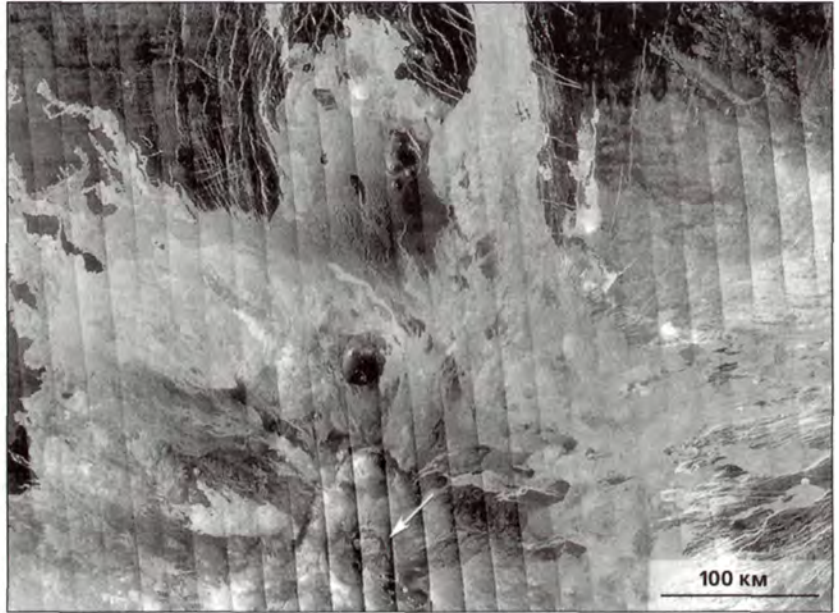


Рис.8. Северная часть вулкана Маат. Стрелка указывает на вершину вулканического сооружения. Видны многочисленные радиояркие лавовые потоки. Вертикальные полосы — результат недостаточно хорошего монтажа изображения, полученного радаром КА «Магеллан».



Рис.9. Перспективное изображение вулкана Маат (вид с севера на юг). Вверху — изображение вулкана, у которого вертикальный масштаб увеличен в 22.5 раза (wikipedia.org). Полоска внизу — то же изображение с «правильным» соотношением вертикального и горизонтального масштабов. Оранжевый цвет поверхности — условный, и выбран он потому, что коротковолновая часть солнечного света сильно поглощается в атмосфере планеты и до поверхности доходит оранжевый свет. И еще одна условность: днем небо на Венере не черное, а ярко-оранжевое.



Рис.10. Гавайский вулкан Мауна-Лоа.

imgkid.com

суется с ее базальтовым составом. КА «Венера-14» совершил посадку вблизи вулканической структуры патеры Панина (в определенной степени родственной щитовым вулканам) и определил базальтовый состав материала поверхности. Впрочем, наблюдаемый здесь на ТВ-панорамах тонкослойный материал поверхности может быть местным, а привнесенным ветром издалека [11].

Пологосклонные щитовые вулканы в большинстве своем не деформированы извилистыми грядами, что говорит об их образовании после региональных равнин — в то же время, когда формировались лопастные равнины. Но некоторые вулканы такого типа извилистыми грядами деформированы и, очевидно, одновозрастны с региональными равнинами.

*Крутосклонные вулканические купола* встречаются на Венере не очень часто. Их всего около 150.

Они имеют в плане округлую форму, уплощенную вершинную часть и относительно крутые склоны (рис.11). В целом они напоминают лепешки, и одно из их неофициальных названий — *pancakes*. Диаметры таких куполов варьируют от 10 до 70 км, но в большинстве своем находятся в промежутке от 20 до 30 км.

Крутосклонность куполов указывает на высокую вязкость образовавшей их лавы, а это, как правило, типично для земных небазальтовых составов: андезитов, дацитов, риолитов. Купол Новарупта на Аляске внешне похож на купола Венеры, хотя существенно меньше их (рис.12). Возможный небазальтовый состав подобных куполов Венеры согласуется с измерениями излучательной способности поверхности купола на вершине крупного щитового вулкана Тууликки (10.3°с.ш., 274.7°в.д.) на длине волны около 1 мкм [12]. Впрочем,

обсуждаются и другие возможные причины повышенной вязкости лавы, сформировавшей крутосклонные купола. Например, ее насыщенность газовыми пузырьками, чему может способствовать высокое давление атмосферы у поверхности Венеры [13]. Как упоминалось, крутосклонные купола нередко ассоциируются с щитовыми равнинами; по-видимому, они образовались примерно в то же время.

Анализ возрастных соотношений между вулканическими образованиями различных типов и другими геологическими подразделениями Венеры позволил выявить характер эволю-



Рис.11. Крутосклонные купола к востоку от области Альфа (30°ю.ш., 14°в.д.). Изображение получено радаром КА «Магеллан».

ции вулканизма в течение последнего миллиарда лет ее геологической истории. Вещественные комплексы, соответствующие более ранним этапам истории планеты, либо перекрыты лавами, либо очень сильно нарушены тектоническими деформациями, и определить их первичную природу с помощью дистанционного зондирования практически невозможно. Эволюцию вулканизма Венеры в течение последнего примерно одного миллиарда лет можно проследить не только качественно (щитовые равнины + крутосклонные купола → региональные равнины + некоторые щитовые вулканы → лопастные равнины + большинство пологосклонных щитовых вулканов), но и внести в нее элемент абсолютного времени. Делается это с помощью подсчетов количества ударных кратеров, наложенных на те или иные геологические подразделения.

Мы примерно знаем темп образования ударных кратеров в разных областях Солнечной системы. Соответственно, количество таких кратеров на единице площади поверхности есть мера времени. Таким образом, было установлено, что формирование щитовых и региональных равнин и ассоциирующихся с ними вулканических построек происходило в течение первых 20% времени, а в течение остальных 80% шло образование лопастных равнин и большинства щитовых вулканов [14]. Вспомним, что вулканические постройки, сформировавшиеся в первые 20% этого времени, занимают около 55% поверхности планеты, а сформировавшиеся в последующие 80% — около 10%. Теперь становится ясно, что интенсивность вулканизма на Венере в рассматриваемый период сильно уменьшилась. А может быть, вулканическая активность на этой планете и вовсе прекратилась?

### Поиски современной вулканической активности

Как мы уже говорили, Венера почти такая же по массе, размерам и валовому химическому составу, как и Земля, и потому логично ожидать, что современная вулканическая активность на Венере есть. Но это ожидания, а нужны надежные подтверждения — либо она есть, либо ее нет. Последнее означало бы, что мы плохо понимаем тепловую историю планетных тел земного типа.

Указания на возможную современную активность на Венере появились в период наблюдений с 1978 по 1986 г. с американского искусственного



Рис. 12. Риолитовый купол Новарупта на Аляске диаметром 360 м и высотой 90 м. [science.nasa.gov/science-news](http://science.nasa.gov/science-news)

спутника «Пионер-Венера». Л.Эспозито с коллегами показали, что за это время содержание  $\text{SO}_2$  в атмосфере над облачным слоем уменьшилось в 10 раз [15]. Исследователи предположили, что в какое-то время перед началом наблюдений случилось мощное вулканическое извержение, при котором произошел массивный выброс  $\text{SO}_2$  в атмосферу, а затем его избыток в результате фотохимических реакций постепенно уничтожился. Такую возможность исключить нельзя, но появились работы, объясняющие сильные вариации содержания  $\text{SO}_2$  в надоблачной атмосфере чисто «метеорологическими» факторами [16].

Другое указание на возможность современного вулканизма на Венере пришло из анализа результатов радиометрических наблюдений КА «Магеллан», выполненных в 1990–1994 гг. Было показано, что в одном из районов равнины Берегини наблюдался избыток радиоизлучения с поверхности, предполагающий повышенную (на десятки градусов) температуру на глубине нескольких метров [17]. Правда, наблюдаемый эффект мог быть связан с неадекватной калибровкой данных [17]. Таким образом, надежного решения вопроса не было.

Однако в 2010 г. в престижнейшем естественнонаучном журнале «Science» появилась статья, в которой анализировались результаты измерений излучательной способности поверхности Венеры в ИК-диапазоне прибором VIRTIS, установленном на КА «Венера-Экспресс» [18]. Оказалось, лавовые поля, окружающие четыре вулкана (Идунн, Миликки, Хатор и Иннин), обладают повышенной излучательной способностью, что логично интерпретировать как указание на невыветренность лав, а значит — на их молодой возраст. Затем, измерив площади этих полей и допустив некие разумные значения толщины лавовых покровов, авторы обсуждаемой работы получили

оценки их объемов, а разделив эти оценки на предполагаемые темпы вулканизма (объемы лав, излившихся в единицу времени), они получили значения от 2.5 млн до 25 тыс. лет (что есть геологическое сегодня), которые и сочли за возраст лав. Здесь, однако, была допущена грубая ошибка, и рецензенты статьи ее не заметили. Дело в том, что деление объема на темп его накопления дает не возраст, а длительность накопления. И на вопрос, когда же происходило данное извержение, ответа опять нет.

Но, по-видимому, решение вопроса в пользу наличия современной вулканической активности все-таки состоялось, о чем свидетельствует публикация в 2015 г. статьи в журнале «Geophysical research letters» [19]. Это работа международного коллектива, опирающаяся на анализ результатов измерений излучательной способности поверхности камерой VMC, установленной на КА «Венера-Экспресс» [20]. Один из каналов камеры видел поверхность Венеры в так называемом окне прозрачности: излучение с длиной волны около 1 мкм

проходит через атмосферу и облачный слой почти без поглощения. При съемке ночью солнечный свет не мешает регистрации такого излучения. В итоге получается изображение, на котором яркость различных элементов поверхности пропорциональна их температуре и излучательной способности. Температура поверхности Венеры — известная функция высоты поверхности, распределение которой мы знаем по результатам радиовысотомера КА «Магеллан». Если из полученного камерой VMC изображения вычесть модельное (определяемое высотой) распределение температуры поверхности, то получается «остаточное» распределение температуры, которое определяется другими факторами, в частности подогревом вулканическим теплом.

При анализе результатов измерений камерой VMC в одной из рифтовых зон Венеры (каньон Ганис, 18°с.ш., 189°в.д.) были обнаружены появляющиеся и через некоторое время исчезающие «горячие» пятна, которые, очевидно, вызваны извержениями вулканической лавы (рис.13, 14).

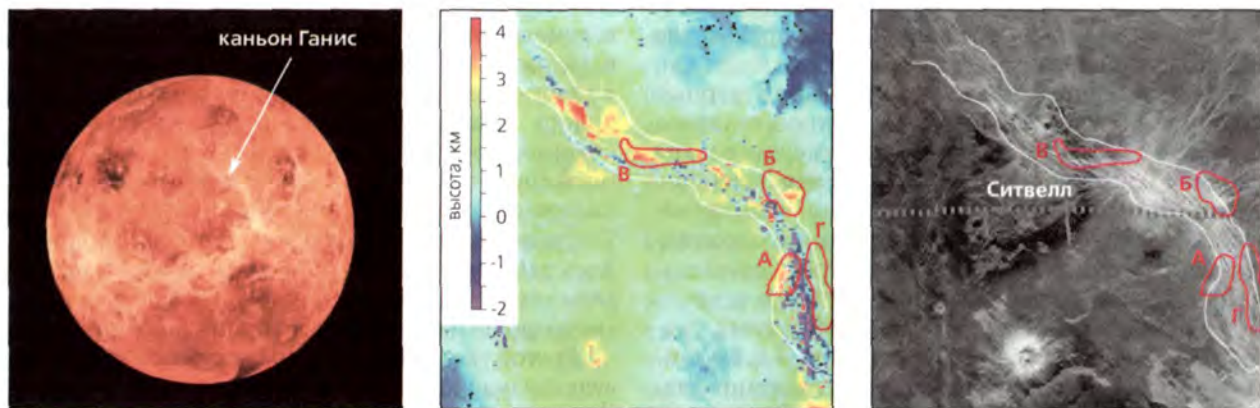


Рис.13. Четыре участка поверхности Венеры (объекты А–Г) в пределах каньона Ганис, для которых было найдено появление «горячих» пятен и их последующее исчезновение (см. рис.14). Слева направо: радарное изображение соответствующего полушария Венеры с хорошо различимыми светлыми полосами рифтовых зон; карта высот района размером 2000×2000 км и изображение этого района, полученное радаром бокового обзора КА «Магеллан».

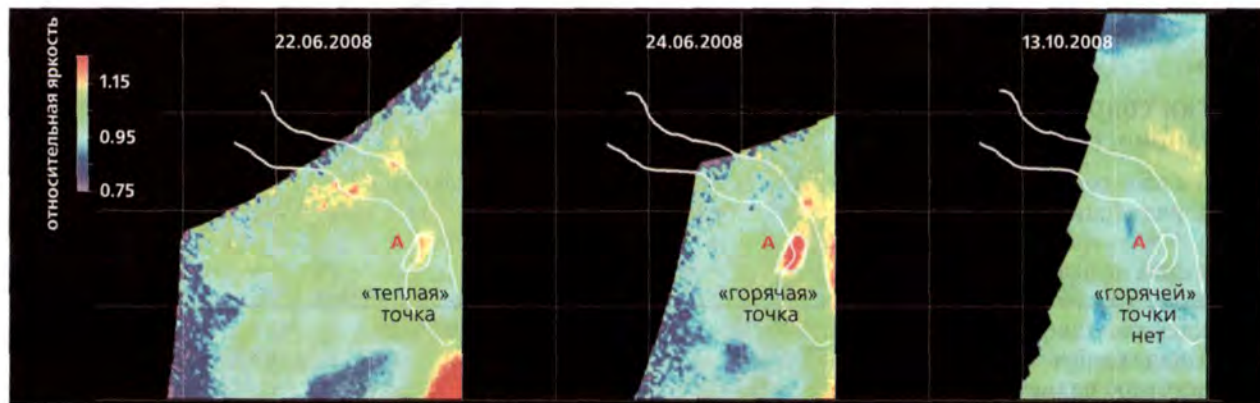


Рис.14. Три изображения объекта А, на которых видно, как с течением времени меняется яркость поверхности в его пределах. Координатная сетка на изображениях проведена через 5°×5°, что примерно соответствует 500×500 км.



Мы плохо понимаем размеры этих горячих точек, вероятно, представляющих собой лавовые потоки или озера. Дело в том, что при съемке с высот 2000–8000 км формальное разрешение получаемых VMC-камерой изображений составляет 1–5 км на элемент изображения. Но, хотя приходящее с поверхности излучение в атмосфере и облачном слое поглощается слабо, оно сильно рассеивается в облаках, и фактическое разрешение составляет 50–100 км. Для оценки температуры поверхности в горячих точках были проведены расчеты по выбору комбинаций температуры и размеров источника излучения, соответствующих найденным горячим точкам [19]. Оказалось, что если наиболее мощная горячая точка А имеет площадь около 10 км<sup>2</sup> (3×3 км), то наблюдаемое излучение требует температуры около 1200°С. Это соответствует полностью расплавленной базальтовой лаве. Если же площадь около 10 тыс. км<sup>2</sup> (100×100 км), то наблюдаемое излучение требует температуры ~1000°С, что указывает на частично закристаллизованную лаву.

Форма горячей точки в плане тоже может быть разной: изометричной, как лавовое озеро земного вулкана Ньирагонго (рис.15), или сильно вытянутой, как в случае извержения вулкана Толбачик на Камчатке (рис.16).



Рис.15. Лавовое озеро диаметром около 250 м в кальдере вулкана Ньирагонго (Демократическая Республика Конго). 21 августа 1994 г. Лава высокощелочная, состава мелилитового нефелинита.

Фото Дж.Локвуда, Геологическая служба США [volcano.oregonstate.edu](http://volcano.oregonstate.edu)



Рис.16. Вулкан Толбачик (Камчатка). Апрель 2013 г. Лавовый поток базальтового состава шириной около 10 м.

Фото Е.Касперского ([kasperskycontenthub.com](http://kasperskycontenthub.com))

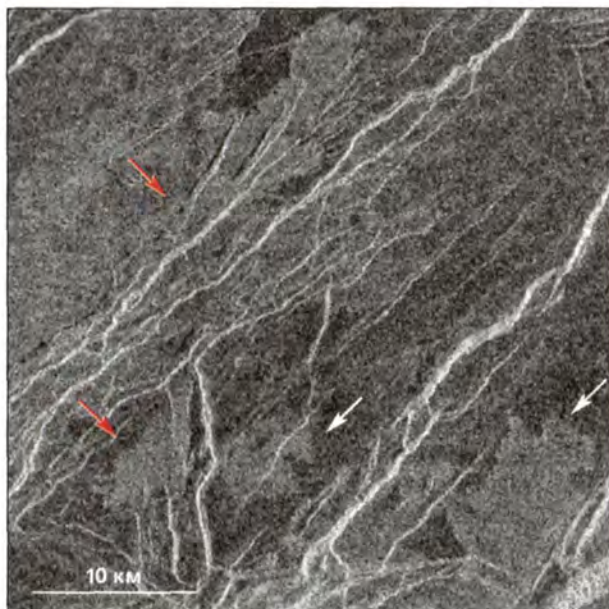
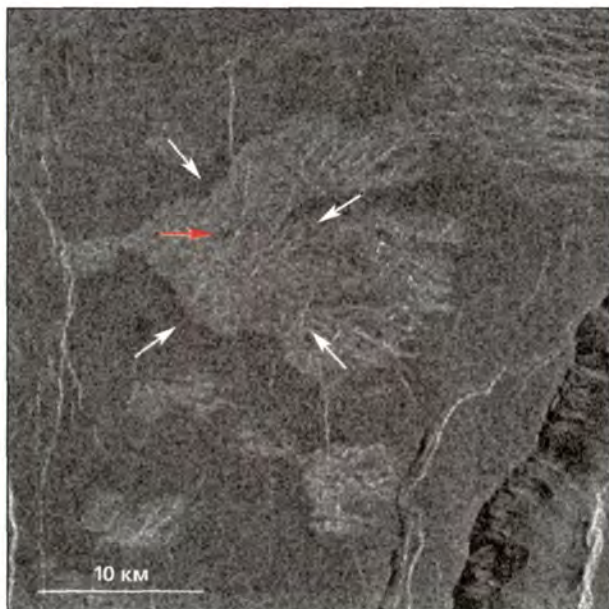


Рис.17. Лавовые потоки и тектонические разломы в рифтовой зоне Ганис. Слева — лавовый поток (показано белыми стрелками) с кратером (красная стрелка) в пределах объекта А; справа — относительно древние лавовые потоки (белые стрелки) секутся рифтовыми разломами, а более молодые потоки перекрывают разломы (красные стрелки) в пределах объекта Б. Изображение получено радаром КА «Магеллан».

На полученных радаром КА «Магеллан» изображениях молодые венерианские лавовые потоки в рифтовой зоне Ганис (рис.17) имеют в плане форму, близкую к изометричной, а их поперечник составляет несколько километров (и даже более). Следует отметить, что видимые на снимке потоки не могут быть источником описываемых горячих точек, так как активность последних была зарегистрирована в 2008–2009 гг., а миссия «Магеллан» завершилась в 1994 г.

\*\*\*

Итак, в течение последнего примерно одного миллиарда лет геологической истории Венеры (о котором у нас имеется довольно детальная фотogeологическая и отрывочная геохимическая информация) вулканические процессы играли важную роль. В первые 20% этого отрезка времени были образованы щитовые и региональные вулканические равнины и ассоциирующие с ними вулканические постройки (крутосклонные купола и некоторые пологосклонные щитовые вулканы), а в последующие 80% времени — лопастные равнины и большинство пологосклонных щитовых вулканов. За исключением крутосклонных куполов, остальные вулканические образования Венеры характеризуются базальтовым составом.

В течение упомянутых первых 20% времени средний глобальный темп вулканической активности на Венере был сравним с вулканизмом срединно-океанических хребтов Земли, а в течение последующих 80% снизился примерно на два порядка [14, 21]. Речь идет о темпах вулканизма, но никак

не о формах. Они на Венере и в срединно-океанических хребтах Земли совершенно разные.

Судя по появляющимся и исчезающим горячим пятнам, которые были обнаружены в рифтовой зоне каньона Ганис, на Венере есть современная вулканическая активность. А если это так, то, может быть, и упоминавшиеся выше изменения концентрации  $SO_2$  в надоблачном слое атмосферы Венеры, и «тепловое» радиоизлучение с глубины несколько метров в одном из районов равнины Берегини тоже вызваны вулканическими явлениями.

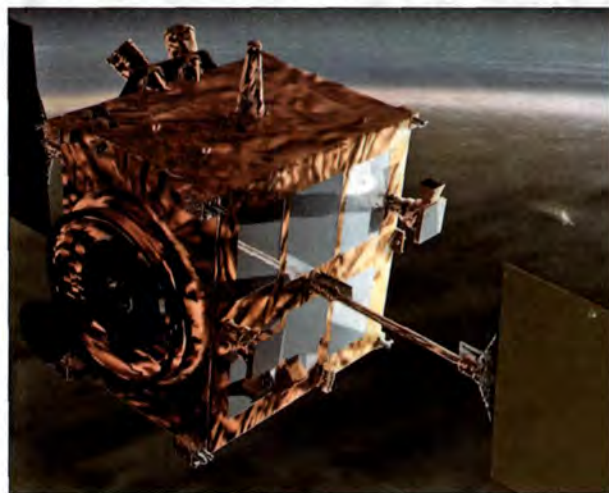


Рис.18. Японский КА «Акацуки» («Рассвет»).

spaceflightnow.com

В будущих исследованиях вулканизма Венеры необходимо получить более детальные радарные изображения вулканических образований. Сейчас максимальное разрешение изображений составляет 100–200 м, а для характеристики уже выделенных типов вулканических образований и поиска новых необходимо улучшить разрешение как минимум на порядок. Нужно провести достаточно точные прямые измерения элементного и фазового состава разных типов вулканических образований.

И конечно, необходимо продолжить поиск проявлений современной вулканической активности на Венере. Все перечисленные пожелания требуют новых полетов к этой планете, и остается надеяться на сравнительно скорую реализацию миссии «Венера-Д» и на то, что за ней последуют и другие миссии. В декабре 2015 г. на орбиту спутника Венеры выведен японский КА «Акацуки» (рис.18), который должен принести новые данные о стратификации и динамике атмосферы, а также о физике облаков. ■

## Литература

1. Weissman P.R. The Solar system and its place in the galaxy // Encyclopedia of the Solar System / Eds P.Weissman, L.-A.McFadden, T.V.Johnson. San Diego, 1999. P.1–33.
2. Ломоносов М.В. Явление Венеры на Солнце, наблюденное в Санкт-Петербургской императорской Академии наук Мая 26 дня 1761 года. СПб., 1761.
3. Кузьмин А.Д., Маров М.Я. Физика планеты Венера. М., 1974.
4. Donabue T.M., Russell C.T. The Venus atmosphere and ionosphere and their interaction with solar wind: an overview // Venus II. Geology, Geophysics, Atmosphere and Solar Wind Environment / Eds S.W.Bougher, D.M.Hunten, R.J.Phillips. Tucson, 1997. P.3–31.
5. Moroz V.I., Basilevsky A.T. Venus missions // Encyclopedia of Space Science and Technology / Ed. H.Mark. 2003. P.841–857.
6. Ivanov M.A., Head J.W. Global geological map of Venus // Planetary and Space Science. 2011. V.59, №13. P.1559–1600.
7. Сурков Ю.А. Космохимические исследования планет и спутников. М., 1985.
8. Basilevsky A.T., Head J.W. Evidence for rapid and widespread emplacement of volcanic plains on Venus: Stratigraphic studies in the Baltis Vallis region // Geophysical Research Letters. 1996. V.23, №12. P.1497–1500.
9. Bell K., Dawson J.B. Nd and Sr isotope systematics of the active carbonatite volcano, Ol Doinyo Lengai // Carbonatite Volcanism, Oldoinyo Lengai and the Petrogenesis of Nairocarbonatites / Eds K.Bell, J.Keller. Berlin. 1995. P.100–112.
10. Crumpler L.S., Aubele J.C., Senske D.A. et al. Volcanoes and centers of volcanism on Venus // Venus II. Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment / Ed. S.W. Bougher. Tucson, 1997. P. 697–756.
11. Basilevsky A.T., Head J.W., Abdurakhimov A.M. Impact crater air fall deposits on the surface of Venus: Areal distribution, estimated thickness, recognition in surface panoramas, and implications for provenance of sampled surface materials // Journal of Geophysical Research. 2004. V.109. E12003.
12. Basilevsky A.T., Sbalygina E.V., Titov D.V. et al. Geologic interpretation of the near-infrared images of the surface taken by the Venus Monitoring Camera, Venus Express // Icarus. 2012. V.217. P.434–450.
13. Pavri B., Head J., Klose K., Wilson L. Steep-sided domes on Venus: Characteristics, geologic setting, and eruption conditions from Magellan data // Journal of Geophysical Research. 1992. V.97. P.13445–13478.
14. Ivanov M.A., Head J.W. The history of tectonism on Venus: A stratigraphic analysis // Planetary and Space Science. 2015. V.113–114. P.10–32.
15. Esposito L.W., Copley M., Eckert R. et al. Sulfur dioxide at the Venus cloud tops, 1978–1986 // Journal of Geophysical Research. 1988. V.93 (D5). P.5267–5276.
16. Krasnopolsky V.A. A photochemical model for the Venus atmosphere at 47–112 km // Icarus. 2012. V.218. P.230–246.
17. Bondarenko N.V., Head J.W., Ivanov M.A. Present-day volcanism on Venus: Evidence from microwave radiometry // Geophysical Research Letters. 2010. V.37. L23202.
18. Smrekar S.E., Stofan E.R., Mueller N. et al. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data // Science. 2010. V.328, №5978. P.605–608.
19. Sbalygina E.V., Markiewicz W.J., Basilevsky A.T. et al. Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma rift zone // Geophysical Research Letters. 2015. V.42. P.4762–4769.
20. Markiewicz W., Titov D., Ignatiev N. et al. Venus monitoring camera for Venus Express // Planetary and Space Science. 2007. V.55. P.1701–1711.
21. Basilevsky A.T., Head J.W. Venus: Timing and rates of geologic activity // Geology. 2002. V. 30, №11. P.1015–1018.