

# Венера

## Участники:

Александр Тихонович Базилевский - доктор геолого-минералогических наук

Борис Александрович Иванов - доктор физико-математических наук

## Обзор темы:

Венера - соседка Земли в Солнечной системе - 0.72 а.е. от Солнца (1 а.е. – расстояние от Солнца до Земли). Радиус (6052 км = 0.95R Земли), масса ( $4.87 \times 10^{24}$  кг = 0.814 земной), средняя плотность ( $5.24 \text{ г/см}^3 = 0.95$  земной) и ускорение силы тяжести ( $8.87 \text{ м/с}^2 = 0.907$  земной) близки к таковым у Земли. В результате 20 космических миссий к этой планете (15 советских, 5 американских) и наблюдений с трех КА, направлявшихся к другим планетам, мы знаем основные характеристики геологии этой планеты и можем сформулировать, что надо узнать в будущих исследованиях.

Сравнительный анализ геологии и развития Венеры и Земли помогает, в частности, лучше понять, как работает тепловая машина нашей планеты. Несмотря на отсутствие тектоники плит, многие локальные тектонические постройки аналогичны земным. Но, так как на Венере нет эрозии, там мы их "видим" в целостности и сохранности. Как одно из тел Солнечной системы, Венера тоже бомбардируется астероидами и кометами. Плотная атмосфера отсекает малые тела, но астероиды больше примерно 1 км в диаметры оставляют на поверхности Венеры зримые следы - ударные кратеры. Поскольку и кратеры не стираются эрозией, как на Земле, их изучение помогает лучше понять темп бомбардировки Земли в последние 500 млн. лет - как раз в период бурного расцвета жизни на Земле. В какой-то мере данные о кратерах Венеры (наряду с астрономическими наблюдениями астероидов, кратеров на Луне, метеоритных наблюдений и т.п.) позволяют уточнить масштабы грозящей Земле "астероидной опасности" - строго говоря, эти данные позволяют не переоценивать эту опасность.

Источники информации - наблюдения и измерения:

на спускаемых аппаратах Венера 4-14, Вега 1-2, Пионер-Венера 13;

на аэростатах Вега 1-2;

на пролетных аппаратах Маринер 2, 5, 10, Галилео;

на искусственных спутниках Венеры Пионер-Венера 12, Венера 15-16, Магеллан.

## **О миссии Магеллан (на основании: [Jet Propulsion Laboratory, Magellan home page](#))**

Магеллан был запущен 4 мая 1989 г., прилетел к Венере 10 августа 1990 г. Твердотопливный двигатель перевел станцию на полярную венерианскую орбиту. За начальный 8-месячный цикл картографирования Магеллан получил локационные карты 84 процентов поверхности планеты с разрешением в 10 раз лучше, чем предшествующие советские станции Венера 15 и Венера 16. Были получены альтиметрические и радиометрические данные, отражающие топографию поверхности и ее электрические свойства.

В продолжение миссии два других цикла картографирования с 15 мая 1991 г. до 14 сентября 1992 г. довели съемку до 98 процентов поверхности Венеры с разрешением около 100 м.

Прецизионное радиоизмерение траектории корабля позволило измерить гравитационное поле Венеры и получить распределение массы внутри нее. Это проясняет глобальную геологию Венеры, планеты, наиболее похожей на Землю.

Итак, что известно науке на сегодняшний день о планете Венера и что продолжает оставаться загадкой?

#### **Что мы знаем о Венере:**

*Условия на поверхности.* Очень жарко ( $470^{\circ}\text{C}$ ), очень сухо (сод. пара  $\text{H}_2\text{O}$  в воздухе всего 30 частей на млн.), очень высокое атмосферное давление ( $93\text{ кг/см}^2$ ), состав воздуха:  $\text{CO}_2$  - 96.5,  $\text{N}_2$  - 3.5 мол. %, ветер у поверхности 0.3-1 м/с, казалось бы слабый, но при плотности воздуха  $65\text{ кг/м}^3$  (на Земле  $1\text{ кг/м}^3$ ) это совсем немало.

*Экзогенные (поверхностные) процессы.* Эоловые образования (довольно много ветровых полос – “хвостов” надувания или раздувания за ветровыми препятствиями, мало дюн и ярдангов – борозд раздувания). На крутых склонах изредка видны следы обвалов и оползней. Предполагается химическое выветривание с участием  $\text{CO}_2$  и серосодержащих газов атмосферы. Суммарная интенсивность экзогенных процессов очень низка: формы рельефа возрастом 500 млн. лет выглядят морфологически юными (при разрешении изображений 100-200 м).

*Вулканизм.* Преобладали площадные базальтовые излияния. Именно они сформировали большую часть равнин Венеры, которые на этой планете занимают около 80% поверхности. Часто встречаются базальтовые щитовые вулканы (диаметром километры – сотни км). Самые крупные вулканы Венеры крупнее самых крупных вулканов Земли. Изредка встречаются крутосклонные вулканические купола, похожие на лепешки. Возможно, их крутосклонность есть свидетельство того, что они небазальтовые.

*Тектоника.* Деформированность пород, видимых на поверхности, – от интенсивной до слабой. Есть признаки и растяжения, и сжатия. Наиболее древние из сильно деформированных образований – массивы т.н. тессер со структурами сжатия и растяжения, наиболее молодые – рифтовые зоны со структурами растяжения, похожие на континентальные рифты Земли (напр., Байкальский рифт или африканские рифты).

*Глобальный стиль эндогенной (определяемой процессами в недрах планеты) активности.* Присущей Земле тектоники плит на Венере нет. Не наблюдается типичных для нее образований: срединно-океанических хребтов и комплементарных им островных дуг и субдукционных впадин. Нет дивергентно-конвергентной комплементарности в распределении наблюдаемых вулканических и тектонических образований. Распределение ударных кратеров по площади неотлично от случайного.

*Эволюция.* Возраст поверхности 0.5-1 млрд. лет (определен по количеству ударных кратеров), что есть лишь последние 10-20% истории планеты. Геологическая история этого последнего периода реконструируется через выявление возрастной последовательности геологических подразделений – т.н. стратиграфической колонки. Такая колонка была составлена для разных областей Венеры и оказалась довольно простой и примерно одинаковой для разных мест. Анализируя отношения ударных кратеров с геологическими подразделениями (наложен на лавы или подтапливается ими) удалось показать, что в начале рассматриваемого периода интенсивность эндогенных процессов на Венере была примерно такая же, как на современной Земле. Но вскоре она снизилась и до настоящего времени сильно не менялась. Современные вулканизм и тектоника пока не наблюдались, но весьма возможны.

### **Чего мы не знаем о Венере:**

*Внутреннее строение и современная эндогенная активность.* Это область гипотез, наблюдательных фактов нет. Чтобы узнать что-то конкретное, нужны долговременные сейсмические наблюдения, измерения теплового потока из недр и поиск современных активных вулканов. Это требует спускаемых аппаратов, способных работать на поверхности Венеры месяцы и годы, и орбитальную радиометрию поверхности с пространственным высоким разрешением, орбитальный мониторинг "вулканических" газов.

*Присутствие геохимически продвинутых пород (граниты и т.п.) в коре Венеры.* Хотя большинство наблюдаемых вулканических образований явно базальтовые, присутствия геохимически более продвинутых пород исключать нельзя. Перспективны для анализа – тессеры и крутосклонные купола. Нужны посадки с высокоточными геохимическими измерениями на борту КА.

*Дотессерная история, или Что происходило в течение первых 3.5-4 млрд. лет эволюции планеты?* Методами морфологического анализа, с помощью которого разбирались с тем, что происходило на Венере последние 0.5-1 млрд. лет, в этой проблеме не продвинешься - рельеф тех времен не сохранился. Может помочь изотопный анализ вещества Венеры. Есть прецедент – обнаружено, что отношение дейтерий/водород в атмосфере Венеры в 150 раз выше, чем в воде океанов Земли. Считается, что это свидетельствует о том, что на Венере когда-то было больше воды, не обязательно жидкой. Для прогресса в этом направлении нужен высококачественный изотопный анализ на борту КА (трудно осуществимо) или доставка образцов на Землю (осуществимо?).

### **Из статьи Ю.А. Насимовича «Современные представления о солнечной системе»:**

Атмосферу Венеры открыл ещё Ломоносов в 1761 г., когда Венера проходила в точности между Солнцем и Землёй. В момент схождения планеты с диска Солнца вокруг неё появился светящийся ободок, что позволило Ломоносову заключить, что "планета Венера окружена знатною воздушною атмосферою, таковой (лишь бы не большею), каковая обливается около нашего шара земного..." Естественно было ожидать найти на Венере условия, сходные с земными, и жизнь. Густая атмосфера скрывала от земных наблюдателей какие-либо детали на поверхности, и астрономы называли Венеру "планетой загадок". Поэтому Венера была первой планетой, к которой устремились многочисленные советские межпланетные станции (их было 16). Но вблизи Венера оказалась не похожа на Землю.

Какое-то время (уже в середине XX века) считалось, что период вращения Венеры вокруг своей оси составляет 250 земных суток, но он оказался чуть меньше - 243 суток. Всё равно это удивительно - сутки на Венере длятся чуть больше года! Притом Венера вращается по часовой стрелке (не так, как остальные планеты). Обратное вращение. Если бы при такой длине суток Венера вращалась против часовой стрелки, то была бы повернута к Солнцу почти одной и той же стороной (день бы длился много-много лет). Она же поворачивает к Солнцу то один, то другой "бок" и меняет "бока" каждые 117 земных суток. Интересно, что вращение Венеры таково, что к Земле она повернута одной и той же стороной. Это резонанс второго рода (связь вращения планеты с орбитой другой планеты).

Атмосфера состоит из почти чистого углекислого газа, к которому лишь в незначительной степени примешаны азот и другие газы (преобладание углекислого газа было известно и ранее). В этой густой атмосфере плавают облака из концентрированной серной кислоты (80%). Воды на Венере практически нет, так как пары воды, попадая в верхние слои атмосферы, под

действием яркого солнечного света разлагались на водород и кислород (фотодиссоциация), и лёгкий водород покидал планету. Так как нет воды, углекислый газ, выделяемый при извержениях вулканов, не вымывается из атмосферы с дождями в моря (как на Земле) и накапливается в атмосфере. Поэтому атмосфера Венеры такая густая и состоит, в основном, из углекислого газа. Углекислый газ частично (на 20%) пропускает к поверхности Венеры солнечный свет, а тепло не выпускает назад (парниковый эффект). Из-за парникового эффекта Венера и разогрелась почти до 500 градусов Цельсия. На её поверхности - раскалённые базальтовые плиты вулканического происхождения. Открытие жизни на Венере не состоялось...

Тем не менее, Венера - это до какой-то степени живая планета, но не в биологическом, а в геологическом отношении. На ней происходят различные геологические события. Поверхность разнообразна, сложно устроена и меняется не только от ударов метеоритов.

На Венере есть равнины и горы. На равнинах видны потоки застывшей базальтовой лавы (длиной до 200 - 300 км), которые тянутся от кратеров, кальдер и разломов (трещин); отдельные купола с вулканическими кратерами; метеоритные кратеры; пояса не вполне понятных невысоких гряд и борозд, а также "венцы" - странные кольцевые структуры, которые не похожи на кратеры.

Горы на Венере бывают иногда в виде плато (общего поднятия с гладким ровным верхом), иногда в виде "паркета" (складки в двух разных направлениях), а иногда в виде параллельных хребтов. Такие параллельные хребты есть только на Земле, а на Луне и Марсе их нет.

Самое большое горное образование - Земля Иштар, или Страна Иштар. В центре его - обширное вулканическое плато Лакшми. По краям - три горных массива (горы Максвелла, горы Акны и горы Фрейи). Плато Лакшми образовано лавой, излившейся из кратера Сакаджавей, расположенного на краю этого плато. Горы Максвелла имеют высоту 3 - 4 км, а отдельные вершины лишь немногим уступают Джомолунгме (по другим данным превосходят Джомолунгму - 11 км над средним уровнем). Это самые большие горы Венеры. Есть на Земле Иштар и огромные метеоритные кратеры (кратер Клеопатры диаметром около 100 км, почти столь же большой кратер Колетт). Между горами Акны и горами Максвелла край Земли Иштар образует уступ Весты. В целом Земля Иштар по размеру соответствует Австралии, а вместе с примыкающими к ней приподнятыми пространствами - Евразии. Кстати, наша земная Евразия тоже обладает самыми высокими горами - Гималаями. Страна Иштар находится близ северного полюса Венеры и этим тоже напоминает Евразию. Некоторые из примыкающих к Стране Иштар поднятий - Страна Метис (на западе, вроде Скандинавии), Страна Белл (на юге, вроде Аравии) и Страна Тетус (на востоке, вроде Камчатки, но гораздо больше). Пример ровного поднятия - Область Бета, или Страна Бета. Это молодое вулканическое образование, так как на нём мало метеоритных кратеров. Его высота - 4 км. Рядом находятся Рея и Тея - два самых больших венерианских вулкана, неоднократно извергавшиеся в относительно недавнее время. Вблизи Страны Бета расположена Страна Феба с горами Феба, а также Страна Темис. Весь этот комплекс поднятий можно поставить в соответствие с Америкой, особенно с Южной, так как он находится юго-западнее Страны Иштар близ экватора. Крупнейшая тектоническая область - Область Артемиды поперечником 2600 км. В Стране Альфа имеются мощные купола, которые выдавлены движущейся под поверхностью вязкой лавой. Есть и трещины. Здесь же находится кратер Ева, через который проходит нулевой меридиан Венеры. Эта область находится в Южном полушарии и соприкасается с огромной Страной Лады - аналогом Антарктиды. Самое большое по площади (с

Африку), но не самое высокое нагорье - это Страна Афродиты. Она прорезается трещиной Диана - рифтовой долиной шириной до 250 км. Диана сравнима по размеру только с Долиной Мореплавателей на Марсе. Рядом - Страна Овда, где скалистый панцирь расколот, сжат и вытянут какими-то геологическими силами, которых мы не знаем на Земле. Здесь же - кратер Меад поперечником 250 км, самый большой метеоритный кратер Венеры, а также Страна Тетис и Страна Эйсилья. Весь этот комплекс поднятий сходен с Африкой по масштабу (наверное, даже больше её), по экваториальному положению и по средней степени приподнятости, но отличается от Африки вытянутостью вдоль экватора и положением на юго-востоке от "венерианской Евразии", т.е. это как бы объединённые Африка и Австралия. Кроме того, эта "Африкоавстралия" соприкасается с "Южной Америкой", то есть на Венере есть три грандиозных поднятия - северное, южное и экваториальное, опоясывающее планету кольцом, которое не замкнуто лишь на одну четверть. Самая низкая часть Венеры - Равнина Аталанты. По положению на планете она сходна с Тихим океаном, но гораздо меньше его. Индийскому океану аналогичны Равнина Леды и Равнина Ниобеи, разделённые сравнительно небольшой Страной Теллус. Страна Теллус - это как бы Индия, ещё не соприкоснувшаяся с Евразией. Атлантическому океану аналогичен вытянутый с севера на юг комплекс из равнин Седны, Гиневры и Лавинии. Это и есть та область, где "порвано" экваториальное кольцо. Есть и "океаны", которым нет аналогов на Земле, если не брать в расчёт так называемый Южный Ледовитый океан. Это комплекс понижений, примыкающих к "венерианской Антарктиде" - Стране Лады: Равнины Айно и Тинатин (южнее Страны Афродиты), Равнина Элен (южнее Страны Тетис). Из всех этих аналогий, которые даны для удобства запоминания частей венерианской поверхности, можно сделать только один принципиальный вывод: относительный масштаб поднятий и понижений на Земле и Венере сходен. Средний возраст поверхности Венеры составляет 1 миллиард лет или 500 - 300 миллионов лет. И в том, и в другом случае она значительно старше земной поверхности, так как Земля - это гораздо более живая и бурная в геологическом отношении планета, постоянно меняющая свой лик, где непрерывно тонут одни материки и возникают другие. Но поверхность Венеры значительно моложе меркурианской, лунной и марсианской, которым по 3 - 4 миллиарда лет. Поэтому метеоритных кратеров на Венере значительно меньше, чем на Меркурии, Луне и Марсе. Есть на Венере почти разрушенные, заплывшие и еле видные древние метеоритные кратеры. Темп разрушения на Венере говорит о том, что 3 последних миллиарда лет там господствует раскалённая пустыня, а что до этого - не ясно. Ещё быстрее кратеры разрушаются на Земле, где их смывают дожди, реки, моря и океаны, сдувают ветры и уничтожают другие поверхностные и глубинные силы.

На Венере известен особый способ движения вещества, какого нет на Земле: вещество стекает крупными блоками и потоками с возвышений. Впрочем, на Земле, хоть и медленно, но движутся целые материки, а на Венере подобные тектонические области не велики (не более 2600 км), и крупнейшая из них - Страна Артемиды.

На историю поверхности Венеры есть две точки зрения:

1. 500 - 300 миллионов лет назад лава полностью обновила поверхность, а потом тектоническая и вулканическая активность почти угасли, что доказывается равномерным и случайным распределением ударных кратеров по всей поверхности, а также подтоплением молодыми лавами лишь отдельных немногочисленных кратеров - модель глобального обновления (Шабар, Стром);

2. активность была и остаётся на одном и том же незначительном уровне, причём концентрируется то в одной, то в другой части планеты на площади не более  $400 \text{ км}^2$  - модель равновесного обновления (Филлипс).

Магнитное поле у Венеры отсутствует, но планета столь плотна, что, конечно, у неё есть железное ядро, сходное с земным. Есть также мантия и кора, причём мантия относительно велика по сравнению с мантией Меркурия (толщиной около 3000 км). Магнитного поля нет из-за медленного вращения вокруг оси.

Толщина коры на Венере, как на Земле: 40 - 50 км; есть мантийные струи.

С ноября 1990 г. по июль 1991 г. станция "Магеллан" при повторной радиолокации Венеры обнаружила, что свалился утёс и вызвал каменную лавину, раскидавшую обломки на площади 7,5 x 2 км. Видны были также вспышки в облаках. Грозы? Извержения вулканов? До этого, как уже говорилось, мощные грозы на Венере были обнаружены советскими аппаратами.

На Венере на высотах порядка 65 - 70 км постоянно дуют восточные ветры. Ветры гонят грязно-желтоватые облака из концентрированной серной кислоты, за счёт чего планета слегка полосата: бывает, например, заметна тёмная полоса в средних широтах и светлая - в полярных. Кроме того, иногда выделяются "полярные шапки", состоящие из чуть более светлых облаков.

В атмосфере снизу вверх выделяются:

1. прозрачный слой из углекислого газа;
2. пылевая дымка с примесью очень мелких капелек серной кислоты;
3. толстый слой облаков из капель серной кислоты (эти три слоя составляют тропосферу);
4. дымка из капелек серной кислоты (термосфера).

Недавно у Венеры был открыт почти кометный "хвост". Ещё в конце 1970-х годов американский аппарат "Pioneer Venus Orbiter" (орбитальный отсек "Пионер-Венера") обнаружил в 70 000 км от Венеры плазменный "хвост", возникший вследствие бомбардировки венерианской атмосферы солнечным ветром. Ведь Венера медленно вращается вокруг оси и потому не имеет магнитного поля, а поэтому частички солнечного ветра могут беспрепятственно вторгаться в её атмосферу, вызывая фотодиссоциацию воды и т.п. (возможно, из-за этого нет воды и жизни). Поток ионизированных частиц движется от Венеры в сторону, противоположную Солнцу. Но оказалось, что "хвост" в 600 раз длиннее, узок, имеет три ветви, как многие кометные хвосты. Его размер уточнила солнечно-гелиосферная обсерватория "SOHO", пересекая это образование в 45 миллионах километров от Венеры.

**Из статьи А.Т.Базилевского «Первая схема глобальной стратиграфии Венеры» (А.Т.Базилевский совместно с Джеймсом Хэдом (Университет Браун, Провиденс) и американо-советской группой ученых разработали первую схему стратиграфии Венеры)**

Работа, о которой пойдет речь в этой статье, началась в 1993 г. несколько неожиданно для меня. В это время я был гостем-исследователем в американской программе исследования Венеры с помощью радиолокатора, установленного на космическом аппарате "Магеллан". Я изучал изображения, полученные этим аппаратом, пытаюсь понять геологию тех районов, где советские космические аппараты "Венера-8, -9, -10, -13, -14" и "Вега-1, -2" провели измерения химического состава поверхности планеты. В команде "Магеллана" шли горячие споры о характере геологической истории этой планеты. Горячность споров понятна: изучение Венеры - один из путей к пониманию геологической истории ранней Земли.

Высказывались две противоположные точки зрения. Согласно одной из них, около 300-500 млн. лет назад на Венере происходили столь обширные излияния вулканических лав и интенсивные тектонические деформации, что в течение сравнительно короткого промежутка времени это привело к почти полному обновлению поверхности планеты. Затем вулканическая и тектоническая активность резко снизилась, хотя и не угасла полностью. На то указывали два обстоятельства:

1) распределение ударных кратеров по поверхности Венеры не отличается от случайного;

2) подавляющее большинство кратеров явно наложено на равнины, составляющие 80-90% поверхности планеты, и лишь очень небольшая часть кратеров подтоплена более молодыми лавами.

Сторонники противоположной точки зрения, опираясь на те же наблюдения, рисовали совершенно иную картину. Они полагали, что вулканическая и тектоническая активность планеты в целом оставалась примерно одинаковой, но в разное время концентрировалась в разных областях. Математическое моделирование показывало, что если каждая из таких областей была не более 400 км в поперечнике и они распределялись по поверхности Венеры случайным образом, то получалось и случайное распределение кратеров, и малое число кратеров, подтопленных молодыми лавами.

Первую точку зрения ее авторы, Дж. Шабер из Геологической службы США и Р. Стром из Аризонского университета, назвали моделью глобального обновления поверхности. Вторую точку зрения, в развитии которой ведущую роль сыграл Р. Филлипс из Университета им. Вашингтона, штат Миссури, стали называть моделью равновесного обновления поверхности. Мне чисто интуитивно больше нравилась модель глобального обновления поверхности, но я в эти споры не вмешивался, полагая, что таким лакомым кусочком, как характер геологической истории Венеры, должны заниматься хозяева эксперимента.

Однако, изучая геологию мест посадки аппаратов "Венера" и "Вега", я не удержался от вовлечения в этот спор. К югу и востоку от мест посадки аппаратов "Вега-1, 2", находится протяженная зона глубоких тектонических впадин, очень похожих на рифтовые зоны континентов Земли. С ними, как и на Земле, связаны лавовые излияния. По соотношениям с окружающими их равнинами уже было ясно, что эти рифтовые зоны Венеры и связанный с ними вулканизм моложе равнин. Но если средний возраст равнин Венеры к тому времени был определен (300-500 млн. лет), то время рифтогенеза оставалось неизвестным.

Изучая радарные изображения рифтовых зон и их окрестностей, я обратил внимание на то, что с тремя из примерно десяти ударных кратеров, расположенных в этой рифтовой зоне, ассоциируют радиотемные зоны параболической в плане формы, что, как уже было установлено коллегами по команде, есть признак того, что кратеры образовались совсем недавно. Один из таких кратеров был пересечен рифтообразующими трещинами, а трещины перекрывались лавами близлежащего вулкана горы Маат. Кратеры с темными параболами составляют не более 10% общей популяции кратеров Венеры и, если они - наиболее молодые кратеры популяции, для накопления которой понадобилось 300-500 млн. лет, то кратеры с параболами должны быть не древнее 30-50 млн. лет. Это значит, что по крайней мере в этом месте рифтообразование и вулканизм происходили всего 30-50 млн. лет назад, а может быть, и позже.

Такой результат представлял собой прямое вмешательство в спор моих коллег по команде, и я решил проверить, есть ли аналогичные очень молодые тектоника и вулканизм и в других районах Венеры. С этой целью был проведен фотogeологический анализ изображений в окрестностях 36 кратеров с

параболами, расположенных (в силу случайности метеоритных ударов) случайным образом на поверхности планеты, что делало результаты моего исследования представительными. Вместо того, чтобы быстро посмотреть, есть ли молодая активность или ее нет, я проявил определенное занудство и систематически описал геологию всех 36 районов. По мере описания одного района за другим неожиданно стала вырисовываться определенная возрастная последовательность геологических образований - то, что в земной геологии называется стратиграфической схемой. Это было уже слишком серьезно, чтобы доверять лишь своим наблюдениям, и я привлек к этой работе Дж. Хэда из Университета Брауна (США), с которым мы давно сотрудничаем в изучении планет. Вскоре пришла пора моего возвращения в Россию, где в это время Международный научный фонд объявил конкурс исследовательских проектов.

Что удалось сделать?

История геологического развития какого-либо района или планеты в целом читается по возрастной последовательности геологических образований. Характерная последовательность вещественных, преимущественно лавовых комплексов и разного рода тектонических деформаций, которую мне и профессору Хэду удалось установить в 36 районах поверхности Венеры, и явилась основой для работы по гранту. Намечающуюся схему стратиграфии Венеры надо было проверить, уточнить и дополнить в новых районах, и наилучший метод для этого - геологическое картирование. Ведь когда составляется геологическая карта, на ней не должно быть белых пятен, и приходится изучать, классифицировать и картировать - конечно, с учетом масштаба карты - каждое образование, каждый участок поверхности. За время работы по гранту наша группа, анализируя радарные изображения поверхности Венеры с разрешением 120-220 м, полученные космическим аппаратом "Магеллан", смогла закартировать в масштабе 1 к 10 000 000 (в 1 см 100 км) около 20% поверхности Венеры, проверив наш первый вариант стратиграфической схемы и существенно уточнив его.

Среди наблюдаемых на снимках "Магеллана" образований выявляется пять различающихся по относительному возрасту вещественных комплексов и несколько типов тектонических деформаций.

Комплекс 1, самый древний и являющийся фундаментом для других, представлен веществом так называемых тессер - участков поверхности, рельеф которых образован пересечениями систем тектонических хребтов и ложбин. Тессеры занимают около 10% поверхности Венеры, образуя "острова" и "континенты" среди вулканических равнин. Природа их вещества неизвестна. Среди тектонических деформаций, которые, собственно, и образуют эту сложнопереесеченную местность, которую мы называем тессерой, некоторые исследователи выделяют более ранние структуры сжатия (хребты) и более поздние структуры растяжения (расщелины).

Комплекс 2 представлен веществом равнин, наверное, базальтовых, деформированных плотно прилегающими друг к другу параллельными разломами, по-видимому, образующими системы так называемых грабен, формирующихся в обстановке растяжения. Останцы этих густотрещиноватых равнин обычно наблюдаются в виде небольших островов, слегка возвышающихся над более молодыми равнинами и занимающих около 3% поверхности планеты.

Комплекс 3 представлен веществом базальтовых (судя по морфологии) равнин, характерный признак которых - присутствие относительно широких (5-10 км) протяженных гряд, вероятно, складок сжатия. Иногда эти гряды образуют пояса, возвышающиеся над более молодыми равнинами и протягивающиеся на



тысячи километров. Выходы комплекса 3 занимают около 3% поверхности планеты.

Комплекс 4 представлен веществом базальтовых равнин (состав определялся космическими аппаратами "Венера-9, -10" и "Вега-1, -2"), покрытых характерными узкими (около 1 км) грядами, очевидно, тоже складками сжатия. Именно этими равнинами занято 70-75% поверхности Венеры. Подавляющее их большинство на изображениях "Магеллана" выглядит монотонно серыми. Но местами видны и явно более молодые лавовые потоки с повышенным радиоотражением (на изображениях светло-серые). Оба типа равнин как бы накрыты сеткой деформирующих их извилистых гряд.

Под сеткой этих гряд находится и совсем недавно выделенная нами разновидность равнин комплекса 4 - холмистые равнины, образованные скоплениями небольших вулканов. В зоне развития таких равнин находится место посадки космического аппарата "Венера-8", который обнаружил в материале поверхности высокие содержания калия, урана и тория, не характерные для обычных базальтов.

Комплекс 5 представлен веществом вулканических лав, образующих равнинные участки, тяготеющие к рифтовым зонам или кольцевым вулканотектоническим структурам. К этому же типу отнесены лавы крупных (сотни километров в поперечнике) вулканов, тоже связанных с рифтовыми зонами. Обе разновидности лав занимают 10-15% поверхности планеты. Они накладываются на все перечисленные выше комплексы и не нарушаются характерными для других комплексов деформациями. Судя по морфологии потоков, лавы комплекса 5 тоже базальтовые, что подтверждается измерениями аппарата "Венера-14".

Что это значит?

Описанная выше последовательность вещественных, в основном лавовых, комплексов и нарушающих их тектонических деформаций и есть впервые созданная схема, или модель стратиграфии Венеры. На первый взгляд ей могут соответствовать два совершенно различных сценария геологической истории планеты. Первый из них предполагает, что такая последовательность вещественных комплексов и деформаций образовывалась более или менее одновременно (синхронно) по всей планете - сначала тессеры, потом комплексы деформированных равнин, потом недеформированные равнины и крупные вулканы. Второй сценарий предполагает, что выявленная последовательность не была глобально синхронной, а представляет собой типичный тектономагматический цикл, реализующийся в разных районах планеты в разное время.

Интересно, что оба сценария (синхронного и несинхронного развития) возвращают нас к упомянутой в начале статьи дискуссии о характере геологической истории Венеры. Модель глобального обновления поверхности согласуется со сценарием синхронного развития, а модель равновесного обновления согласуется со сценарием несинхронного развития. Это, однако, не означает, что мы пришли к тому, с чего начинали. Выявленная нами последовательность вещественных комплексов и деформаций - не только конкретика событий геологической истории Венеры, но и способ решения спора о характере этой истории.

Действительно, если бы выявленная нами последовательность формировалась, как того требует модель равновесного обновления, в разных областях в разное время, то на границах двух соседних областей мы должны были бы видеть наложение одной последовательности на другую. Но мы нигде этого не увидели. Это означает, что по крайней мере в пределах изученных нами 20%

поверхности модель равновесного обновления не работает и сценарий несинхронного развития не подтверждается.

Что же получается в рамках сценария синхронного развития? Где-то 300-500 млн. лет назад, а может быть, на 100-200 млн. лет раньше, существенная часть поверхности Венеры подверглась интенсивным тектоническим деформациям, за которыми последовала серия практически глобальных эпизодов излияний базальтовых лав, перемежаемых менее интенсивными деформациями, сначала растяжения, а потом сжатия. Затем масштабы вулканической и тектонической активности сильно уменьшились, и она сосредоточилась, в основном, в рифтовых зонах или вблизи их.

Этот основанный на наблюдениях сценарий, как уже говорилось, согласуется с моделью глобального обновления поверхности, что, однако, не есть доказательство ее справедливости. Ведь суть модели в том, что значительная часть геологической активности Венеры была сконцентрирована в самом начале наблюдаемого отрезка истории планеты, а выявленная нами стратиграфическая последовательность и основанный на ней сценарий синхронного развития говорят лишь об относительных, а не об абсолютных возрастах.

Что же дальше?

Дальше, прежде всего, надо посмотреть, что делается на остальных 80% поверхности Венеры. Бегло мы, конечно, уже посмотрели. Вроде бы ничего неожиданного пока не увидели. Но надежный ответ можно будет дать только после систематического геологического картирования. Все необходимые материалы у нас есть.

Главное, что нужно сделать для серьезного продвижения в понимании истории Венеры, - определить абсолютный возраст выделенных нами вещественных комплексов. Если это сделать удастся, то станет абсолютно ясным, концентрировалась ли значительная часть вулканической и тектонической активности в начале изучаемого отрезка истории Венеры или она была более или менее равномерно растянута во времени. Первые оценки, сделанные по плотности ударных кратеров, наложенных на некоторые вещественные комплексы, и по результатам компьютерного моделирования конкуренции вулканизма и кратерообразования, как будто подтверждают модель глобального обновления. Но именно "как будто", так как точность их невелика. Нужно работать дальше.

Основа понимания геологической истории Венеры теперь заложена - глобальная схема стратиграфии Венеры создана. Плохая или хорошая, но первая. Стоит вспомнить, однако, Ю. М. Лотмана: «Слово "понимание" коварно. Невольно навязывается представление, что это однократный, исчерпывающий акт... В действительности это путь в бесконечность».

## **Библиография**

- Ксанфомалити Л. В. Планета Венера. М., 1985  
Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венера. М., 1974  
Первые панорамы поверхности Венеры/Под ред. М.В. Келдыша. М., 1979  
Сурков Ю. А. Космохимические исследования планет и спутников. М., 1985  
Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Бурба Г. А. и др. Очерки сравнительной планетологии. М., 1981  
Basilevsky A.T., Head J.W. The geology of Venus. Annual Review of Earth and Planetary//Science. 1988  
Basilevsky A.T., Head J.W. Venus: Timing and rates of geologic activity//Geology. 2002. V. 30. № 11  
Florensky C.P., Basilevsky A.T., Kryuchkov V.P. et al. Venera 13 and Venera 14: Sedimentary rocks on Venus?//Science. 1983. V. 221. № 4605

Phillips R.J., Hansen V.L. Geological evolution of Venus: Rises, plains, plumes, and plateaus//Science. 1998  
Price M., Suppe J. Young volcanism and rifting on Venus//Nature. 1994. V. 72  
Solomon S.C., Bullock M.A., Grinspoon D.H. Climate change as a regulator of tectonics on Venus//Science. 1999. V. 226.

**Тема № 295(83)**

**Эфир 16.09.03**

**Хронометраж 50:43**