

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 550.2:551.21:551.5

ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТ. ВЕНЕРА КАК ВОЗМОЖНОЕ БУДУЩЕЕ ЗЕМЛИ

Н.Л. Добрецов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Рассмотрены общая эволюция планет Солнечной системы, особенности строения и эволюции Венеры в сравнении с Землей. Сформулирована проблема синхронизации шести этапов эволюции разных планет земной группы. Сопоставление ранних и поздних этапов эволюции этих планет позволяет сделать вывод о заметных признаках их сходства, обусловленных общим происхождением из единого протопланетного облака и широким проявлением плюмового магматизма на всех планетах земной группы.

Особенности строения и эволюции Венеры наиболее проявлены в специфике ее атмосферы и плюмового магматизма. Атмосфера Венеры плотная и горячая (температура поверхности около 450 °С, давление вблизи поверхности 92—93 кг/см²). Масса атмосферы в 93 раза больше Земли, из них 99 % сосредоточено в тропосфере толщиной 65 км, состоящей из CO₂ (96.5 %) и N₂ (3.5 %). Специфическая особенность атмосферы Венеры — облачный слой мощностью 25—30 км в верхней части тропосферы, состоящий из мелких капель концентрированного раствора H₂SO₄, паров воды и сернистого газа. В интервале 49.5—58.0 км от поверхности Венеры в облачном слое условия сходны с земными и здесь возможна бактериальная форма жизни.

Непрерывное выделение SO₂ связано с особенностями вулканизма, который представляет главный процесс на Венере. Среди разнообразных вулканических построек на Венере преобладают крупные формы, большинство из которых сходны с плюмовыми магматическими системами на Земле. Наиболее дискуссионными вопросами остаются эволюция Венеры на этапах древнее 1 млрд лет, доля щелочных пород, карбонатитов и их влияние на состояние и эволюцию Венеры. Венера, находясь ближе к Солнцу, остывала медленнее и в меньшей степени, чем Земля. Нагревание Венеры началось в протерозое и достигло современного состояния к рубежу 1 или 2 млрд лет назад.

Обсуждены возможная будущая эволюция Земли, ее нагревание при превращении Солнца в красного гиганта и вероятное состояние Земли через 1.5 млрд лет, сходное с современной Венерой.

Вулканизм, нагревание планеты, будущее Земли, Венера.

THE EVOLUTION OF PLANETS. VENUS AS THE EARTH'S PROBABLE FUTURE

N.L. Dobretsov

The general evolution of planets in the Solar System is discussed with a focus on the structure and history of Venus compared with the Earth. The history of the planets of the terrestrial group has been similar and included at least six correlated stages. Many common features the terrestrial planets shared in their early and late evolution have been due to their common origin from the protoplanetary gas-and-dust nebula and plume magmatism widespread on all the planets of the terrestrial group. The characteristic features of the structure and evolution of Venus are most brightly manifested in the specific composition of its atmosphere and of plume magmatism. Venus, with its surface as hot as 450 °C and the near-surface pressure of 92–93 bars, has a hot and dense atmosphere 93 times that of the Earth in mass. Most of its atmospheric mass (99%) belongs to the 65 km thick troposphere consisting of CO₂ (96.5%) and N₂ (3.5%). The upper troposphere includes a 25–30 km thick cloud layer composed mainly of sulfuric acid droplets, water vapor, and SO₂. At the height of 49.58 km, the clouds approach the conditions of the terrestrial surface and might be hospitable to bacterial life. Volcanism, the most active and widespread process of Venusian geology, maintains continuous SO₂ emission. There are diverse volcanic edifices on Venus, which are most often large and are similar to the Earth's plume-related volcanoes. The evolution before 1 Ga, as well as the share and the role of alkaline rocks and carbonatites among its volcanics, are among the most debatable issues about Venus. Being located closer to the Sun, Venus cooled down more slowly and less intensely than the Earth after the primary accretion. In the Proterozoic, it began heating and reached its present state at ~1 or 2 Ga. In the future, as the Sun becomes a red giant, the Earth is predicted to begin heating up in 500–600 Myr to reach the temperature of present Venus in about 1.5 Gyr.

Volcanism, planet heating, Earth's future, Venus

ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ

Непосредственным толчком для написания статьи послужила дискуссия, возникшая в аудитории Московского университета при чтении заключительной лекции об эволюции Земли и планет.

Я продолжил думать об идее будущего нагрева Земли до состояния, близкого к современному на Венере, высказанной экспромтом, и нашел дополнительные аргументы, а также возможный сценарий такого развития событий, что и постараюсь изложить в настоящей статье.

СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ ПЛАНЕТ

Единое происхождение планет солнечной системы из гигантской протопланетной газопылевой туманности дает основание полагать одно время формирования всех планет, включая Венеру, в пределах точности измерения 4.60 ± 0.03 млрд лет назад (рис. 1) [Витязев, 1983; Витязев, Печерникова, 2009; Мухин, 2009; Ernst, 2014].

Длительность аккреции Земли, согласно моделям [Витязев, Печерникова, 2009] и по изотопным данным [Kleine et al., 2002], 100—120 млн лет (рис. 2), такую же или близкую длительность быстрой аккреции мы можем предположить и для Венеры, Марса, Меркурия [Head, 2014; Ernst, 2014]. Образование Луны другое — она отделилась от Земли в результате мегаимпакта или перестройки двойной планеты, что, вероятно, было на порядок быстрее (см. рис. 2, событие 3). На стадии I сформировались первичные атмосферы планет земной группы (кроме Луны), но в дальнейшем все атмосферы заметно эволюционировали. На Земле первичная тяжелая и плотная атмосфера была безкислородной, обогащена H_2 и CH_4 и постепенно эволюционировала параллельно с формированием и эволюцией океана в современную малоплотную атмосферу, состоящую из N_2 и O_2 [Holliday, 2000; Адушкин и др., 2007; Жарков, 2013]. На Венере ничего о первичной атмосфере неизвестно, современная плотная и тяжелая атмосфера сформировалась на поздних стадиях (после 1 млрд лет, см. рис. 1) вместе с активным вулканизмом, продукты которого и тяжелая плотная облачность скрывают полностью информацию о более ранних стадиях. Конец первой стадии на всех планетах (кроме Венеры) наступил около 3.8 млрд л. н., что подтверждается для Земли и Луны изотопными данными (рис. 3) и маркируется также окончанием тяжелой метеоритной бомбардировки на Луне, Земле и, вероятно, Марсе, по данным астрономических наблюдений и теоретических расчетов [Bottke et al., 2012].

Примерная синхронность стадий I—III для Меркурия, Марса, Луны и Земли видна на рис. 1 и подтверждается изотопными данными для Земли и Луны (рис. 3, 4). На стадии II завершилась тяжелая метеоритная бомбардировка на Луне, Земле, Марсе. Наиболее отчетливо это фиксируется на Луне (см. рис. 3), где главный максимум метеоритной бомбардировки 4.0—3.3 млрд л. н., дополнительный — 3.3—2.8 млрд л. н., далее наблюдались отдельные спорадические падения метеоритов до 1.3 млрд л. н. [Hiesinger et al., 2011]. Стадия III (2.8—2.0 млрд л. н.) в полном виде фиксируется только на Земле и Марсе.

Содержание II и III стадий на Земле иллюстрируется рис. 4, из которого видно, что на стадии II происходила тектоника малых плит, на стадии III — палеоплит-тектоника [Stern, 2008; Добрецов, 2009; Добрецов, Туркина, 2015], что отражает эволюцию океана и океанических структур, связанных с формированием и изменением структуры течений в астеносфере. Ничего подобного на других планетах не установлено. На Марсе на стадии II могла быть тектоника, похожая на тектонику малых плит [Holliday, 2000; Ernst, 2014], на стадии III завершился плюмовый магматизм, на Луне и Меркурии всякая активность исчезла еще на стадии II.

Стадия IV проявлена только на Земле, хотя была возможна и на Венере, стадии V_a , V_b , VI_a и VI_b — на Земле и Венере. На Венере фиксируются только эти две поздние стадии, более древние возможны, но не обнаружены

хотя была возможна и на Венере, стадии V_a , V_b , VI_a и VI_b — на Земле и Венере. На Венере фиксируются только эти две поздние стадии, более древние возможны, но не обнаружены

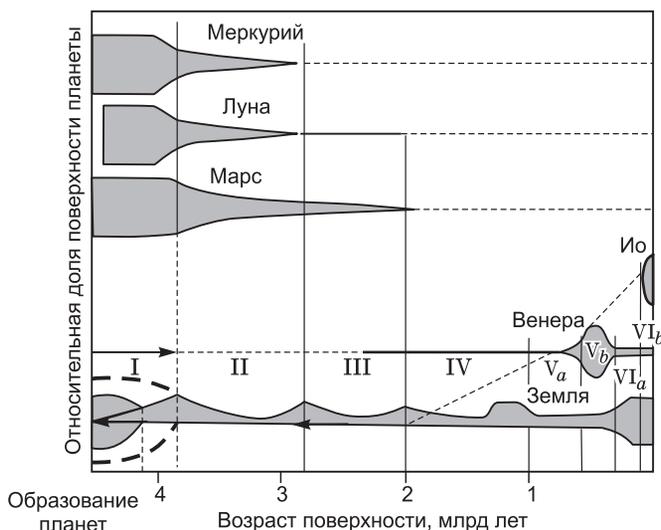
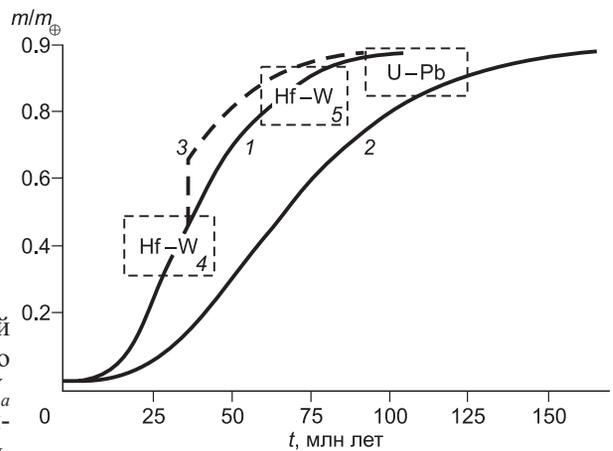


Рис. 1. Геологическая история планет земной группы.

Обобщенный процент поверхности и приповерхностных структур, образовавшихся в разное время в истории планет [Head, Coffin, 1997], с добавлением планеты Ио [Ernst, 2014], с добавлением по Земле и стадий эволюции I—VI (автор).

Рис. 2. Оценка времени и стадий аккреции Земли [Витязев, Печерникова, 2009].

Кривые 1–3 отражают разные модели: 1 — модель, учитывающая роль крупных тел, 2 — модель расширяющихся зон питания, 3 — модель с мегаимпактом; 4 — вероятное формирование ядра по изотопам; 5 — то же для позднего формирования Луны. По вертикальной оси — отношение массы Земли к современной (в долях).



из-за перекрытия молодыми вулканитами и плохой изученности поверхности Венеры из-за плотного слоя облаков [Head, 2014; Ernst, 2014]. Подстадия V_a (1.0–1.8 млрд л. н.) на Венере — это начало формирования современной тяжелой и плотной атмосферы, на Земле — стадия относительного покоя. Подстадия V_b (0.8–0.5 млрд л. н.) на Венере — главная стадия формирования атмосферы и активного плюмового магматизма, V_b (фанерозой) на Земле — образование современных океанов, континентов и биосферы [Добрецов, 2010, 2011]. Стадия VI на Венере — продолжение функционирования относительно стабильных циркулирующей атмосферы и плюмового вулканизма [Ernst, 2014]. Подстадия VI_b (последние 200 млн лет) фиксирует время развития современных океанов на Земле и проявление активности в Ио (крупнейшем спутнике Юпитера, см. рис. 1), где смогли сформироваться специфические магматизм и конвекция, связанные с высокой концентрацией серы и периодическими сжатиями-растяжениями Ио при изменении расстояния от Юпитера [Ernst, 2014].

Речь идет скорее об эволюции всей планетной системы, когда прекращается эндогенная активность на одной планете и появляется (или усиливается) на другой (см. рис. 1). Но есть и определенное сходство стадий на разных планетах (например, на Марсе, Земле и Венере). Наличие сходных стадий на рис. 1 связано с тремя причинами: 1) единое происхождение планет; 2) интенсивное проявление метеоритной бомбардировки на ранней стадии, которую можно считать завершением двухэтапной аккреции; 3) интенсивное функционирование плюмового магматизма, который на Земле проявлен в течение всей ее истории, на Марсе — 2 млрд лет. Новая стадия плюмового магматизма на Земле и главная стадия на Венере — последний 1 млрд лет. Это отражено на рис. 1 как ступенчатое ослабление активности на стадиях I–II на Меркурии и Марсе, I–III — на Марсе, некоторое «затухание» на Земле в течение IV стадии, возрастание активности в V и VI стадиях на Венере и Земле.

Полезно отметить, что суперплюмовые события на Земле сопровождались ростом суперконтинентов [Condie, 2004] и крупными кризисами в атмосфере и биосфере [Wignall, 2005; Ernst, 2014]. Поэтому плюмовые события наряду со сходством аккреционных и постаккреционных событий могут служить

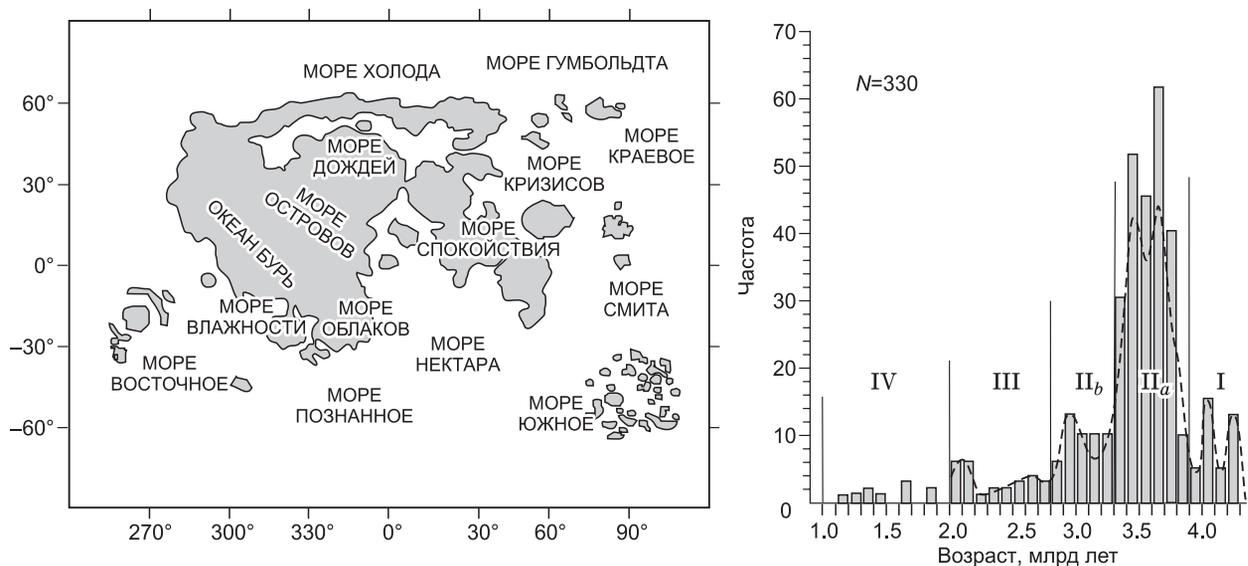


Рис. 3. Распределение и возраст главных базальтовых «морей» на Луне [Hiesinger et al., 2011].

Стадии I–IV в соответствии с гистограммой и сопоставлением с рис. 4 добавлены автором.

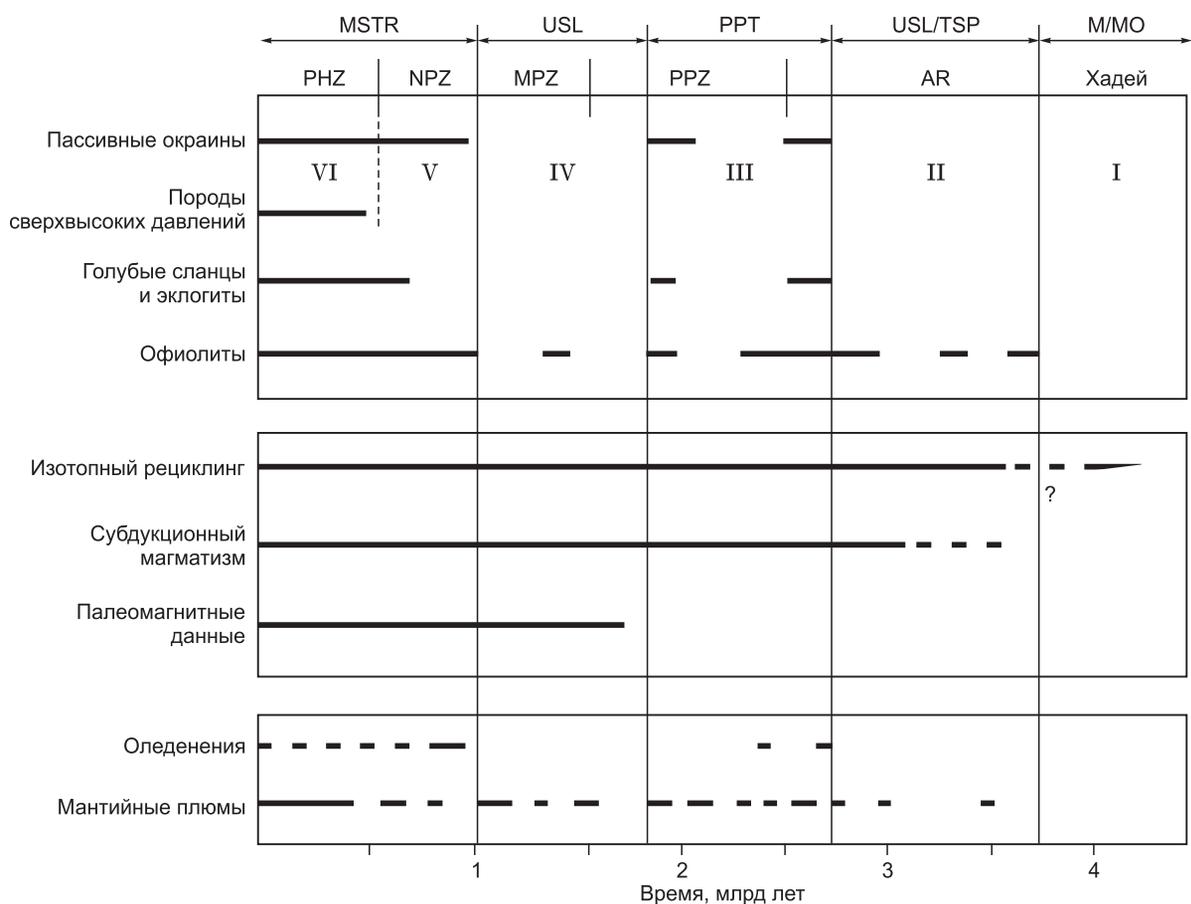


Рис. 4. Эволюция важнейших геологических процессов и стадии тектоники плит, по [Stern, 2008] с изменениями и добавлениями автора.

MSTR — современный стиль тектоники плит в фанерозое (PHZ) и неопротерозое (NPZ), USL — тектоника нестабильной стагнирующей покрывки (L-Lead lithosphere), PPT — протоплейт-тектоника, TSP — тектоника малых плит, MPZ — мезопротерозой, PPZ — палеопротерозой, AR — архей, M/MO — метеоритное перемешивание магматического океана.

главными причинами названных аналогий. Рис. 1, 3 и 4 построены на основе разных знаний и критериев. Однако границы в них очень сходны, что может определяться одинаковыми причинами — доминированием плюмовой активности, критериями сходства и различия поздних стадий.

В дальнейшем мы остановимся на Венере, а именно условиях формирования ее специфической атмосферы и магматизма, а также возможности аналогичных явлений на Земле на поздних стадиях ее эволюции.

АТМОСФЕРА ВЕНЕРЫ И ВОЗМОЖНЫЕ УСЛОВИЯ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

Венера очень похожа на Землю. Ее радиус 6050 км (0.95 от земного), средняя плотность 5.24 г/см³ (5.52 г/см³ на Земле). Отношение масс Венера/Земля равно 0.81. Но она ближе к Солнцу: радиус круговой орбиты Венеры 108.1 млн км (0.723 астр. ед.). Время обращения Венеры вокруг Солнца 225 сут (вместо 360 для Земли). Поэтому поверхность Венеры через 2 млрд лет после образования планеты или намного позднее быстро нагрелась и сформировалась горячая и плотная атмосфера [Кондратьев и др., 1987; Kasting, 1988].

Физическая структура атмосферы Венеры показана на рис. 5 (по данным [Basilevsky, Head, 2003; Svedhem et al., 2007]), но она продолжает уточняться. Температура поверхности Венеры 730—750 К (около 450 °С или 467 °С [Кораблев, 2016]), давление «флюидной» атмосферы 92—93 кг/см² (МПа). Масса атмосферы 4.8 · 10²⁰ кг, что в 93 раза больше атмосферы Земли, состоит она на Венере из углекислого газа CO₂ (96.5 %) и азота N₂ (3.5 %) [Basilevsky, Head, 2003; Засова и др., 2006; Bertaux et al., 2007]. Допускаются примеси O₂ до 0.1 % и H₂O (вблизи облачного слоя до 1 %) [Кондратьев и др., 1987], но сейчас установлены только следовые количества (г/т): SO₂—150, Ar—70, H₂O—20, CO—17, He—12,

Рис. 5. Физическая структура атмосферы Венеры, согласно модели [Basilevsky, Head, 2003].

Показаны кривые изменения T и P границы оболочек.

Ne—7 [Bertaux et al., 2007]. Доля N_2 в атмосфере Земли выше (78 % вместо 3.5 % на Венере), но масса азота в атмосфере Венеры в 4 раза выше, так как атмосфера последней плотная и большая, а на Земле часть нитратов присутствует в осадках.

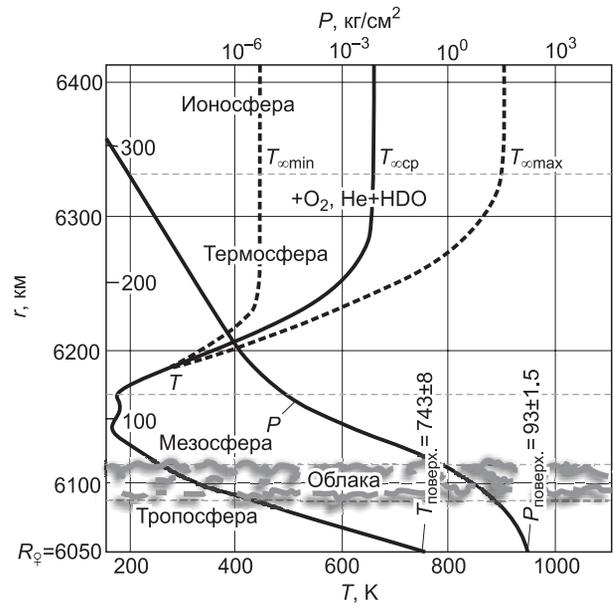
На высоте между 40 и 65 км (на дневной стороне) и 50 и 80 км (на ночной) формируется облачный слой, состоящий из мелких капель диаметром около 2—10 мкм концентрированного раствора H_2SO_4 , паров воды и сернистого газа. Предполагается, что сера выделяется при вулканических извержениях в виде SO_2 . В результате фотохимического воздействия происходят реакции с участием активного атомарного кислорода и образуется серная кислота:



В земной атмосфере тоже происходят подобные процессы, но в гораздо меньших масштабах. В частности, в зоне полярных стратосферных облаков происходят гетерогенные фазовые реакции с участием SO_2 , Cl , HCl , CH_4 [Solomon, 1999]. При экстремально низкой температуре (ниже $80^\circ C$) ключевую роль играет аэрозоль H_2SO_4 , микрокапли которой служат ядрами конденсации [Solomon et al., 2005]. Главным источником SO_2 и HCl служат вулканы, в частности, влк. Эребус в Антарктиде, определяющий там озоновые «дырки» [Zuev et al., 2015].

Плотная часть атмосферы — тропосфера Венеры от поверхности простирается до 65 км (верхней части облачного слоя) и содержит 99 % всей массы атмосферы. 90 % атмосферы Земли находится до высоты 10 км, Венеры — до высоты 28 км от поверхности. Наиболее сходна с земной атмосферой верхняя часть тропосферы или тропопауза — зона между 49.5 и 58 км. На высоте 49.5 км давление становится таким же, как на Земле на уровне моря. Между 49.5 и 58 км температура меняется от 82 до $0^\circ C$, между 52.5 и 54.0 км — от 37 до $21^\circ C$, как на поверхности Земли [Patzold et al., 2007] (см. рис. 5, таблицу). В этом слое, где есть водяные пары и PT -условия, близкие к земным, могла существовать (или существовать) жизнь в бактериальной форме [Bortman, 2004; и др.].

Между 65 и 120 км находится мезосфера Венеры, подразделяемая на два слоя: а) 62—73 км — совпадает с верхним слоем облаков, поддерживается постоянная температура $-43^\circ C$ (230 K); б) верхний уровень 73—95 км — самый холодный на дневной стороне Венеры до $-108^\circ C$ (165 K) на высоте 95 км. Выше начинается термосфера (120—350 км).



Параметры атмосферы Венеры

Высота, км	Температура, °C	Давление, атм	Высота, км	Температура, °C	Давление, атм
0	462	92.1	49.5	82	1.0
5	424	66.65	50	77	1.066
10	385	47.39	55	29	0.358
15	348	33.04	58	0	0.3518
20	308	22.52	60	-10	0.2557
25	266	14.93	65	-30	0.09765
30	224	9.851	70	-43	0.03699
35	182	5.917	75	-59	0.04401
40	145	3.501	80	-76	0.04476
45	112	1.979	90	-104	0.0037
			100	-98	0.00026

В тропосфере в ее верхней части формируется сложная конвекция с возникновением сильных полярных вихрей [Svedhem et al., 2007].

В мезопаузе (зоне между мезосферой и термосферой (95—120 км) на дневной стороне температура возрастает до 300—400 К (27—127 °С), преобладающих в термосфере [Bertaux et al., 2007]. Ночная сторона термосферы является самым холодным уровнем атмосферы с температурой до 100 К (–173 °С), ее называют криосферой [Bertaux et al., 2007].

Циркуляция в верхней мезосфере и термосфере Венеры сильно отличается от циркуляции в нижней части атмосферы. На высотах 90—150 км воздушные массы перемещаются с дневной на ночную сторону с апвеллингом над освещенным полушарием и даунвеллингом над темной стороной полушария. Ночной даунвеллинг вызывает адиабатический нагрев и формирует теплый слой на ночной стороне мезосферы на высоте 90—120 км с температурой около 230 К (–43 °С) при средней температуре ночной термосферы 100 К (–173 °С) [Bertaux et al., 2007].

Венера имеет вытянутую ионосферу на высоте 120—300 км, почти совпадающую с термосферой [Patzold et al., 2007], и подразделяется на три слоя: 120—130, 140—160 и 200—250 км. Максимальная плотность электронов достигается во втором слое. Основные ионы в первом и втором слоях O^{2+} , в третьем O^+ . Верхняя граница ионосферы (ионопауза) расположена на высоте 250—375 км. Несмотря на развитую ионосферу, Венера имеет очень слабое магнитное поле, возможно, из-за отсутствия конвекции в ядре, хотя интенсивный плюмовый магматизм как будто противоречит этому [Russel et al., 2007]. Насколько связано слабое магнитное поле со специфической атмосферой и как могут повлиять будущие кардинальные изменения на Земле на ее магнитное поле, покажут начавшиеся и будущие исследования [Knudsen, Rilsader, 2009].

Нерешенных проблем в строении и эволюции Венеры много. Важнейшие из них — полное исчезновение воды и кислорода из нижней атмосферы. Океан, вероятно, существовал на Венере в интервале около 4—3 млрд л. н. (см. ниже). Сценарий перехода должен быть связан с эволюцией магматизма, где также много нерешенных проблем.

ВУЛКАНИЗМ НА ВЕНЕРЕ

Вулканизм плюмового типа на Венере — главный процесс, по крайней мере, последний миллиард лет. Мы дадим краткую характеристику этого вулканизма, основываясь на обзоре [Ernst, 2014, гл. 7]. На рис. 6 показана обзорная карта вулканизма на Венере. Три возрастные группы вулканитов примерно соответствуют следующим интервалам: 1) молодые — 0—500 млн лет (преимущественно 200—300 млн лет); 2) промежуточные и главная масса вулканитов — 500—800 млн лет (с максимумом 700—750 млн лет); 3) древние с возрастом более 800 млн лет, возможно, до 1300 млн лет (см. рис. 1) или до 2 млрд лет [Basilevsky, Head, 2000, 2002, 2007; Bjonnes et al., 2012; Ernst, 2014]. Современный и молодой вулканизм подтверждается в районах с высоким тепловым излучением [Smrekar et al., 2010].

Древнейшими структурами являются реликты фундамента и кристаллических плато, названные на рис. 6 «риббон-тессера террейны» [Head et al., 1992; Hansen et al., 2000]. Глобальный обзор поверхности Венеры [Crumpler, Aubele, 2000; Magee, Head, 2011] позволил выделить 168 больших вулканов с диаметром > 100 км, 289 промежуточных вулканов ($d = 20—100$ км) и 208 вулканических полей, по площади превышающих 50 тыс. км². Наиболее крупные 68 полей имеют площадь более 200 тыс. км² (до 1.6 млн км²) и покрывают 11 % площади венерианских равнин. Эти равнины составляют 80 % поверхности Венеры. Остальные 140 полей с площадью около 100 тыс. км² включают 61 промежуточное по величине поле длиной более 500 км [Davey et al., 2013].

Все они имеют свою структуру — рифтоподобную или центрального типа (в центре большой вулкан или корона). Из 140 полей 37 % связаны со структурами типа «корона», 25 % — с большими вулканами, около 36 % — с радиальными трещинно-грабеновыми системами (в том числе 20 % — с рифтами и дайково-трещинными поясами). Примеры полей и лавовых потоков показаны на рис. 7, б, д, е, большие вулканы и корона на рис. 7, а, г, радиальные системы — на рис. 7, в.

Большинство (около 75 % больших лавовых полей) связаны со структурами растяжения (рифты, рифтоподобные структуры, дайково-трещинные поля) и формировались на поздних стадиях растяжения. В частности, многие из них деформированы вдоль ассоциирующих рифтов [Magee, Head, 2011], что подтверждает рифтогенную модель плавления [White, McKenzie, 1989; Ernst, 2014].

Но наибольший интерес представляют радиальные трещинно-грабеновые системы (см. рис. 7, в), которые очень напоминают радиальные дайковые системы на Земле, связанные с мантийными плюмами [Ernst, 2014] и диагностированные давно на стадии проекта «Магеллан» [Grosfils, Head, 1994]. Были найдены такие системы радиусом до 2500 км [Ernst et al., 2003], а недавно была предположена еще более крупная система с радиусом 6000 км в центре структуры Артемида (см. рис. 6), которая предполагается быть древней деформированной короной. Реже выделяются линейные трещинно-грабеновые системы, как правило, между крупными магматическими центрами [Krassilnikov, Head, 2003].

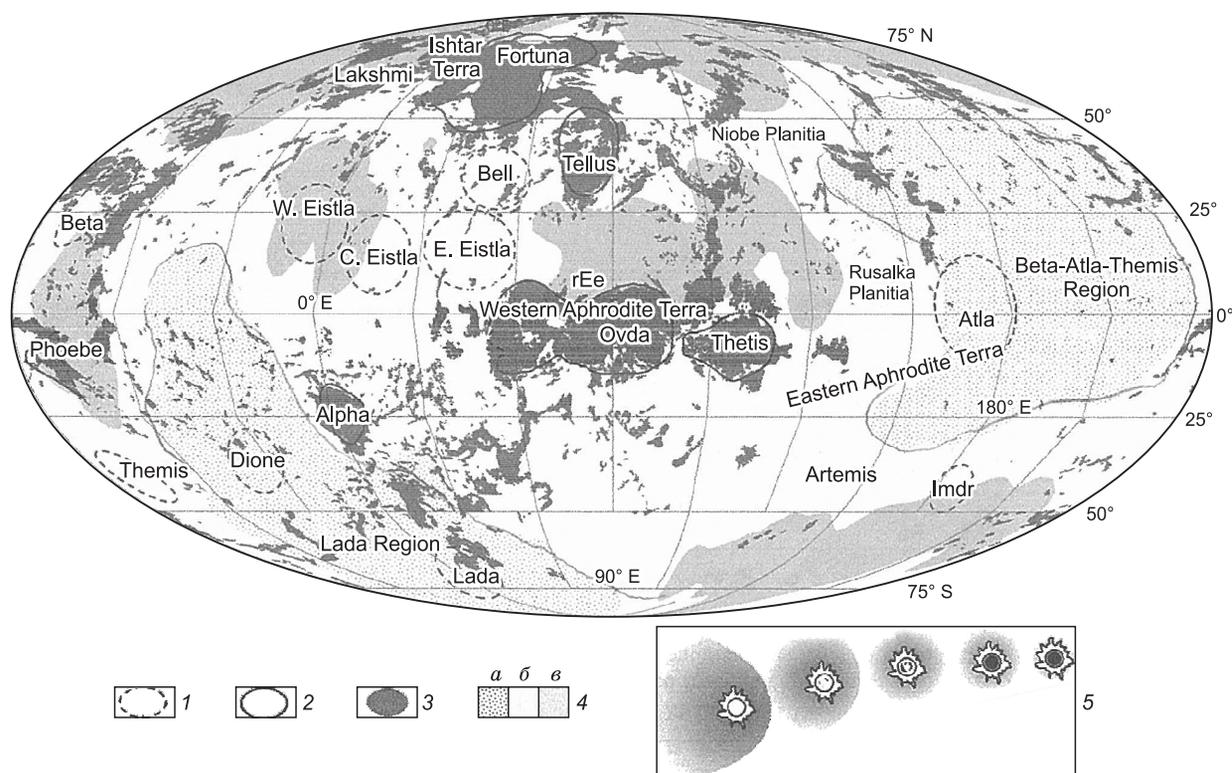


Рис. 6. Большие вулканы и вулканические структуры на Венере, включая крупные.

1 — вулканы и вулканические поднятия (группы вулканов); 2 — древние плато; 3 — структуры типа риббон-тессера; 4 — возрастное подразделение вулканитов: *a* — молодые, *б* — промежуточные, *в* — древние; 5 — эволюции кратеров во времени [Ernst, 2014].

Большинство крупных вулканов (в том числе 60 крупных вулканов диаметром > 500 км), структуры типа корон, радиальные трещинно-дайковые системы и крупные лавовые поля представляют с большой вероятностью аналоги соответствующих плюмовых систем на Земле с преобладанием более крупных систем (по сравнению с земными). Большие вулканы, как правило, высотой до 1.5 км группируются в округлые поднятия диаметром от 1000 до 2500 км, соответствующие крупным базальтовым ЛПР на Земле. 10 из них показаны на рис. 6, причем 8 из них локализованы в областях молодого возраста.

Короны, как видно из рис. 7, *в*, представляют крупные валообразные поднятия, окруженные трогом или рвом и включают плоскую центральную часть, часто слегка выпуклую или вогнутую. Диаметр от 60 до 2400 км, преимущественно 200—400 км. Явные земные аналоги отсутствуют. Но судя по тому, что многие короны находятся в центре радиальных дайково-трещинных систем, они также являются плюмовыми центрами. Наиболее крупной, деформированной короной является поднятие Артемиды (см. рис. 6), в которой внешний трог диаметром > 5000 км, радиальная трещинно-дайковая система диаметром 12 000 км [Hansen et al., 2000]. Предполагается, что она сформировалась на тонкой литосфере и в этом смысле могла быть аналогом океанических мантийных суперплюмов, таких как система Кергулен-Кано и Крозет в Индийском океане, система Онтонг-Джава, Науру, Восточный Мариана и Манихики в Тихом океане, где реконструируемый диаметр суперплюма близок к 10 000 км [Добрецов, 2010, 2011; Ernst, 2014].

Артемиды и некоторые крупные скопления вулканов на Венере могут представлять также кластеры плюмов [Ernst et al., 2007]. Но наиболее вероятным кандидатом на такой кластер является регион ВАТ (Beta-Atla-Themis Region, см. рис. 6), который представляет значительную часть площади молодых вулканитов (92 млн км или 20 % поверхности Венеры). На этой площади выделяются три вулканических поднятия (скопления вулканов): Атлы, Бета, Фемида, более 60 крупных вулканов, более 100 корон и множество рифтов разных размеров, протягивающихся между В-Т-А-В и к юго-западу от А [Basilevsky, Head, 2000, 2007; Ernst, 2014].

Большинство вулканов на Венере считаются базальтовыми с примесью щелочных—кислых пород, но щелочные породы и карбонатиты могут составлять более значительную их часть [Ernst, 2014]. Об этом свидетельствуют анализы поверхности Венеры, полученные со станций, исследующих плане-

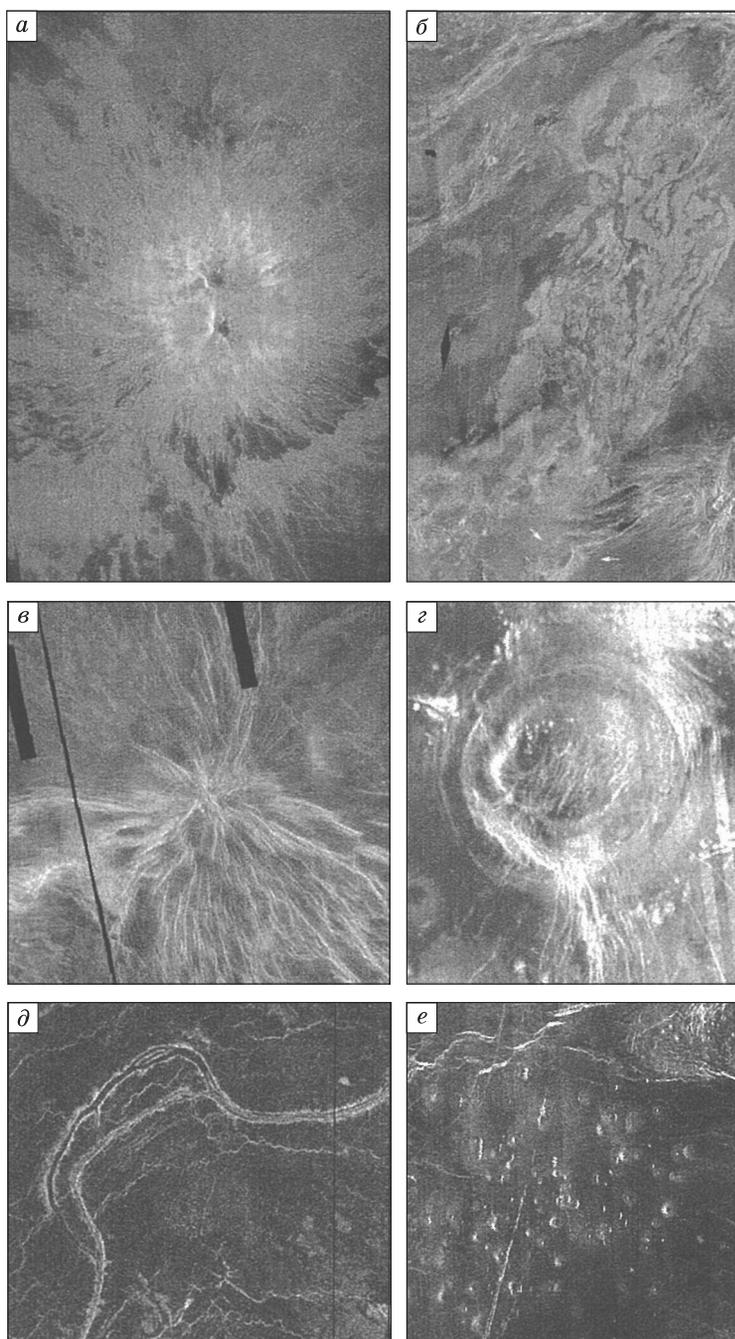


Рис. 7. Примеры магматических структур на поверхности Венеры [Ernst et al., 2003; Ernst, 2014].

a — большой влк. Сапас, 400 км в поперечнике и 1.5 км высотой; *б* — лавовое поле 1000×460 км; *в* — радиальные дайки; *г* — корона 400 км в поперечнике; *д* — извилистые каналы, подобные рекам; *е* — щитовые поля.

ту, и телескопов, с постоянно высокими содержаниями $K_2O = 4-5\%$ [Жарков, 2013] и другие показатели наличия щелочных пород. Р. Эрнст в лекциях в НГУ (март, 2016 г.) привел свидетельства, что очень жидкие потоки и озера (см. рис. 7, б, д, е) сложены главным образом карбонатитами. Именно карбонатиты и связанные с ними породы должны служить главным и стабильным источником CO_2 , поступающим в атмосферу и обеспечивающим ее постоянство на протяжении около миллиарда лет (или дольше) в условиях интенсивной конвекции, удаления водорода, наличия реакций диссоциации в верхней атмосфере Венеры (см. предыдущий раздел). Но это вопрос дискуссионный, так как прямых доказательств наличия значительной доли карбонатитов в продуктах вулканизма Венеры еще не получено.

На Земле в любой крупной магматической провинции плюмового типа обязательно присутствуют щелочные породы и карбонатиты [Mantle plumes..., 2001; Ernst, 2014]. На Венере их доля может быть значительно выше благодаря более высокой температуре не только на поверхности, но и в недрах Венеры, а также с учетом некоторых отличий по составу во внутренних оболочках Венеры. В работах [Condie, 2014; Wignall, 2005; Sobolev et al., 2011; Ernst, 2014] даны примеры сильного влияния

плюмов на состав Мирового океана и биосферы Земли на примере плюмовых максимумов (24—20, 94—90 и 250—245 млн лет). Аналогичное влияние на атмосферу и возникновение жизни на Венере могли оказать и венерианские плюмы, но этот вопрос требует дополнительных исследований.

Таким образом, наиболее дискуссионными вопросами в отношении Венеры являются: 1) ее эволюция на этапах древнее 1 млрд лет и возможный переход от условий, близких к земным, к современному состоянию поверхности атмосферы Венеры; 2) доля щелочных пород и карбонатитов в составе вулкаников Венеры и их влияние на состояние и эволюцию Венеры.

БУДУЩАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ И ВОЗМОЖНОСТЬ СУДЬБЫ, СХОДНОЙ С ВЕНЕРОЙ

В последний раздел мы вынесли наиболее дискуссионные и интригующие вопросы: 1) какова дальнейшая эволюция Земли и ее биосферы; 2) возможен ли переход на Земле к состоянию, близкому к современной Венере; 3) судьба биосферы — возможна ли ее эволюция и приспособление к новым условиям на Земле или с неизбежностью через 1—2 млрд лет биосфера и всякая жизнь на Земле исчезнут?

Эти вопросы уже частично обсуждаются [Voynata et al., 2004]. Их результаты представлены на рис. 8 и показывают эволюцию поверхности Земли и биосферы с 2.5 млрд лет до современного состояния и на последующие 1.5 млрд лет. Главным регулятором приповерхностных условий на Земле и эволюции биосферы была и будет на ближайшие 1.5 млрд лет средняя температура поверхности Земли (черная жирная линия, см. рис. 8). 2.5 млрд л. н. назад температура поверхности Земли составляла 48—50 °С, и вся биосфера была представлена прокариотами (одноклеточными бактериями) общей массой 400—500 Гт углерода.

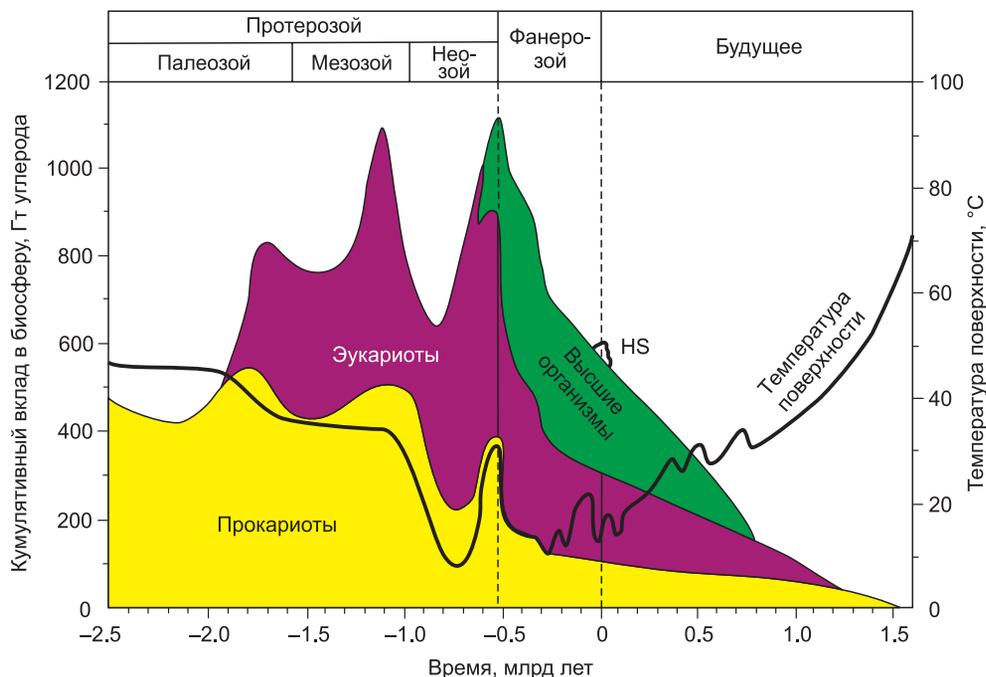


Рис. 8. Эволюция биосферы Земли с 2.5 млрд лет до современного состояния и прогноз на последующие 1.5 млн лет, по [Voynata et al., 2004] с добавлением автора [Добрецов, 2009].

HS — Homo sapiens. Цветом показан кумулятивный вклад в биосферу разных групп организмов (в гигатоннах углерода).

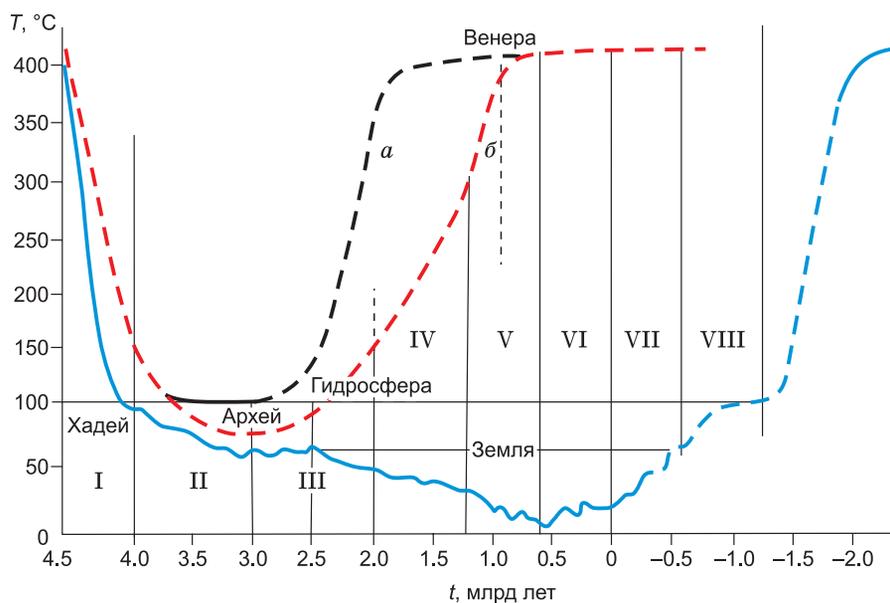


Рис. 9. Реконструкция в прошлом и ожидаемая в будущем температура поверхности Земли (синяя линия) и Венеры (с учетом рис. 5, 8 и работ [Voynata et al., 2004; Розанов, 2009; Добрецов, 2009]).

По разным оценкам современного значения температуры поверхности Венеры достигла к рубежу 1.0 млрд лет (красная линия) или 2.0 млрд лет (черная). Показано существование гидросферы на Земле и, возможно, на Венере при T ниже 100 °С. Римские цифры обозначают стадии эволюции планет.

Когда около 1.8 млрд л. н. температура поверхности опустилась ниже 30 °С, возникли эвкариоты, масса которых к 1 млрд л. н. достигла 600 Гт, и прокариаты массой 400 Гт. После этого началось быстрое похолодание Земли до 10 °С на поверхности к рубежу 800—750 млн л. н., когда стали происходить сильнейшие оледенения на Земле, продолжавшиеся до 550—600 млн л. н. [Добрецов, Чумаков, 2001; Добрецов, 2009]. Естественно, в эпоху оледенений масса биосферы упала почти в 2 раза, но после этого начался ее быстрый рост, к рубежу 540 млн. л. н. был достигнут второй максимум массы биосферы и, что более существенно, появились и быстро нарастали количеством и массой высшие организмы — многоклеточные и сильно дифференцированные по тканям и органам. Есть замечания к этой части кривой эволюции на рис. 8. По мнению А.Ю. Розанова [2009], эвкариоты появились раньше, около 2.4 млн л. н., похолодание за 700—750 млн л. н. было меньше (до 15—20 °С), оценки биомассы разных групп организмов также требуют корректировки.

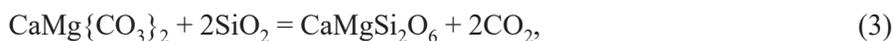
От 550 млн л. н. (венда) до современной эпохи и еще 550 млн лет вперед будет продолжаться колебание температуры поверхности от 30—25 до 15—10 °С с уменьшением массы биосферы через 400—500 млн лет до того же уровня, что и 2.0—2.5 млрд лет назад.

Дальше температура поверхности будет быстро расти вследствие превращения Солнца в красный гигант с большим увеличением размеров Солнца и солнечной инсоляции. Когда температура заметно превысит 30 °С, исчезнут высшие организмы, при 40 °С на поверхности через 750 млн лет будет достигнут другой рубеж, как и 1.8 млрд л. н. — исчезнут эвкариоты. Когда температура превысит 70 °С на поверхности, исчезнут прокариоты, близкие к современным, а затем и всякая жизнь, основанная на углеводородных цепях РНК и ДНК [Vounama et al., 2014].

Рост температуры на поверхности Земли, скорее всего, не ограничится 70 °С и достигнет 100 °С через 1.5—1.7 млрд лет (в зависимости от реальных темпов нагревания). Тогда начнется заключительный этап перехода к состоянию, близкому к современному на Венере (рис. 9). При $T \geq 100$ °С начнется кипение и быстрое испарение океана. Сформируется мощный слой облаков, состоящих в основном из капелек H_2O , как и современные облака. Многократно возрастет парниковый эффект и начнется быстрое дальнейшее нагревание поверхности Земли. Реакции (1), (2) и исчезновение углерода и углеводородов [Добрецов, Шацкий, 2012] начнутся и закончатся, вероятно, до 100 °С. Колебания O_2 и CO_2 были частично связаны с появлением и исчезновением оледенений и вечной мерзлотой, но они не выходили за пределы колебаний около 20 °С, показанным на рис. 8, 9. Поэтому лавинообразное развитие процесса деградации мерзлоты [Gentsch et al., 2015] не должно выйти за пределы этих колебаний. Когда температура достигнет 300—350 °С при давлении 50—60 атм., начнется декарбатизация по реакциям типа (3), (4):



----- (100 °С)



В результате кора обогащается силикатами Ca и Mg, а в атмосфере быстро нарастает содержание CO_2 . Одновременно или чуть раньше произойдет окисление керогена (по реакциям (1), (2)), будет исчезать кислород, возникать дополнительные CO_2 и H_2O , которые будут переноситься во внешнюю оболочку Земли и быстро (при горячей атмосфере) диффундировать в космос.

Эта эволюция напоминает эволюцию атмосферы Земли на ранней стадии в хадее [Добрецов, 2010, 2011], когда первоначальная атмосфера, обогащенная H_2 , CH_4 с долей H_2O и CO_2 , потеряла водород, окислилась, обогатилась CO_2 и H_2O , которые при остывании ниже 100 °С обособятся в виде гидросферы и карбонатных осадков. Другими словами, при остывании будет происходить потеря плотности и окисление атмосферы, при нагревании — увеличение плотности, рост CO_2 , потеря кислорода и воды в атмосфере.

На рис. 9 рассчитаны результаты моделирования изменения поверхностной температуры на Земле и Венере. Остывание Земли после аккреции продолжится в течение 5 млрд лет, а существенное нагревание через 500 млн лет после настоящего времени (см. рис. 9) с достижением состояния, близкого к Венере, через 1.5 млрд лет после начала нагревания.

Венера, находясь ближе к Солнцу, остывала гораздо медленнее и в меньшей степени. Океан в ней мог быть короткое время или его не было (во всяком случае нет доказательств), но возможны горячие «лужи» в архее. Нагревание началось в начале протерозоя с достижением современного состояния атмосферы к рубежу 1.0 или 2.0 млрд л. н. (см. рис. 9, а, б, см. выше) на основании оценки возраста вулканических структур на Венере и работы [Greenspoon, 1998; Bortman, 2004]. Условия на Земле и Венере вновь сблизятся через 6 млрд лет после их формирования. Ошибка (неопределенность) этой оценки максимальная, поскольку она суммирует оценки всех стадий (I—VIII, см. рис. 9) эволюции Земли и Венеры.

Отдельный вопрос об эволюции биосферы на Земле и возможной на стадиях II и III на Венере. Биосфера на Земле испытывала несколько переломных моментов, демонстрирующих исключительную живучесть биосферы. Жизнь на Земле окончательно закрепилась и стала развиваться около 3.9 млрд л. н. [Заварзин, 2003, 2009; Розанов, 2009]. До этого жизнь могла появляться на поверхности Земли несколько раз, но уничтожалась при интенсивной метеоритной бомбардировке. Значительную перестройку биосферы Земля претерпела во время больших оледенений [Hoffman, Schrad, 2002; Maruyama, Liou, 2005; Добрецов, 2009; Розанов, 2009] и после некоторых катастрофических плюмовых извержений, например, после сибирских траппов 250 млн л. н. [Wignall, 2005; Sobolev et al., 2011].

Эволюция поверхности и возможной жизни на Венере до 2 млрд л. н. (см. рис. 9) происходила долго и постепенно и бактерии могли мигрировать с поверхности в облачный слой, где есть вода и микрокомпоненты, причем бактерии могли концентрироваться в участках с пониженным уровнем H_2SO_4 и поддерживать этот уровень за счет биохимического обмена под влиянием солнечного облучения [Cockell, 1999; Landis et al., 2002; David, 2003; Landis, 2003].

На будущей Земле при неблагоприятном развитии сценария (см. рис. 8, 9) бактерии могут мигрировать в облачный слой, как это, вероятно, произошло на Венере. Присутствие некоторых форм жизни в облаках Венеры подобно бактериям, которые были обнаружены в облаках на Земле [Landis, 2003; David, 2003]. Одним из доказательств было обнаружение в облаках Венеры карбонильного сульфида $CO(S)$, образующегося на Земле под каталитическим воздействием бактерий [David, 2003]. Микроорганизмы в облаках могут поглощать ультрафиолетовое излучение. Совсем фантастической выглядит возможность возникновения углеродно-кислородной формы жизни при переходе углерода в четвертую координацию и появление углеродно-кислородных цепочек (типа силикатных в пироксенах и амфиболах, устойчивых при высокой температуре, с фрагментами, содержащими азот и фосфор). Четверная координация углерода теоретически предсказана при высоких давлениях, но в бактериальных формах может появиться и при низких давлениях. Пока это только предварительные идеи. Все больше развивается астробиология как новое научное направление, в том числе благодаря работам А.Ю. Розанова [Бочкарев, Гиндилис, 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Стадии эволюции планет земной группы определяются: а) одновременной и сходной аккрецией из газопылевого облака; б) тяжелой метеоритной бомбардировкой на рубеже хадея и архея (4.1—3.9 млрд л. н.), возможно, до 3.3 млрд л. н.; в) интенсивным пульсирующим проявлением плюмового магматизма. Тектоника плит проявлена только в Земле, в наиболее развитом виде последние 1 млрд лет; она возможна на ранней стадии эволюции Марса.

2. Венера сходна с Землей по размеру, массе и составу, но находится ближе к Солнцу, поэтому остывала медленнее, и нагревание наступило раньше Земли (2 или 3 млрд л. н.) с формированием плотной атмосферы, горячей тропосферы толщиной 60 км (до 450 °С на поверхности Венеры) и состоящей в основном из CO_2 , с полной потерей водорода, CH_4 и кислорода в тропосфере.

3. Земля остывала постепенно и дольше, Мировой океан сформировался еще в архее (через 600—700 лет после конца аккреции), минимум температуры поверхности (10—15 °С) достигнут 800 млн л. н. с развитием гигантских оледенений в интервале 750—550 млн л. н., после чего происходит медленное пульсирующее нагревание. Нагревание усилится через 500—600 млн лет по мере превращения Солнца в большую красную звезду, и на Земле возможно формирование атмосферы и поверхности, близких к венерианским.

4. Слой тропопаузы (50—60 км, вблизи верхней границы облаков на Венере, наиболее близок к земным условиям, здесь возможно наличие (миграция) сероредуцирующих бактерий, о чем свидетельствует присутствие в облаках карбонила $CO\{S\}$. Конец эволюции биосферы, как и атмосферы на Земле, может быть также венерианского типа.

Я благодарю академика А.Ю. Розанова и профессора И.Ю. Кулакова за конструктивные замечания в отзывах и Е.В. Кукарину за помощь в подготовке рукописи, в частности, рисунков.

ЛИТЕРАТУРА

Адушкин В.В., Витязев А.В. Происхождение и эволюция Земли, современный взгляд // Вестн. РАН, 2007, т. 77, № 5, с. 396—400.

Бочкарев Н.Г., Гиндилис А.М. Астробиология глазами астрономов // Палеонтология, стратиграфия, астробиология (к 80-летию А.Ю. Розанова). М., ПИН РАН, 2016, с. 103—123.

Витязев А.В. Модели образования и ранней эволюции планет земной группы // Геохимия радиогенных изотопов на ранних стадиях эволюции Земли. М., Наука, 1983, с. 42—60.

Витязев А.В., Печерникова Г.В. Ранняя Земля в окружении молодых звезд // Проблема происхождения жизни. М., ПИН РАН, 2009, с. 131—157.

- Добрецов Н.Л.** О ранних стадиях эволюции геосферы, биосферы и проблемах ранних оледенений // Проблемы происхождения жизни. М., ПИН РАН, 2009, с. 168—184.
- Добрецов Н.Л.** Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (6), с. 761—784.
- Добрецов Н.Л.** Основы тектоники и геодинамики. Учебн. пособие. Новосибирск, НГУ, 2011, 492 с.
- Добрецов Н.Л., Чумаков Н.М.** Глобальные периодичности в эволюции литосферы и биосферы // Глобальные изменения природной среды, 2001, Новосибирск, Изд-во «Гео», с. 11—27.
- Добрецов Н.Л., Шацкий А.Ф.** Глубинный цикл углерода и глубинная геодинамика: роль ядра и карбонатитовых расплавов в нижней мантии // Геология и геофизика, 2012, т. 52 (11), с. 1455—1475.
- Добрецов Н.Л., Туркина О.М.** Раннедокембрийская история Земли, роль плейт- и плюм-тектоники и космического фактора // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (7), с. 1250—1274.
- Жарков В.И.** Внутреннее строение Земли и планет. М., Наука и образование, 2013, 414 с.
- Заварзин Г.А.** Становление системы биологических циклов // Палеонтологический журнал, 2003, № 6, с. 16—24.
- Заварзин Г.А.** Первые экосистемы на Земле // Проблемы происхождения жизни. М., ПИН РАН, 2009, с. 230—244.
- Засова Л.В., Морозов В.И., Линкин В.М., Хатунцев И.В., Майоров Б.** Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км // Космические исследования, 2006, т. 44, № 4, с. 381—400.
- Кондратьев К.Я., Крупенко Н.И., Селиванов А.С.** Планета Венера. Л., Гидрометеиздат, 1987, 276 с.
- Кораблев О.И.** Марс и Венера: разные судьбы планет земной группы // Вестн. РАН, 2016, т. 86, № 7, с. 587—601.
- Мухин Л.М.** Условия на поверхности Земли 4—4.6 млрд лет назад. Первичные синтезы // Проблемы происхождения жизни. М., ПИН РАН, 2009, с. 120—130.
- Розанов А.Ю.** Условия жизни на ранней Земле после 4.0 млрд лет назад // Проблемы происхождения жизни. М., ПИН РАН, 2009, с. 185—201.
- Basilevsky A.T., Head J.W.** Rifts and large volcanoes on Venus: global assessment of their age relations with regional plains // J. Geophys. Res., 2000, v. 10, p. 24583—24611.
- Basilevsky A.T., Head J.W.** Venus timing and rates of geologic activity // Geology, 2002, v. 30, p. 1015—1018.
- Basilevsky A.T., Head J.W.** The surface of Venus // Rep. Prog. Phys., 2003, v. 66, № 10, p. 1699—1734.
- 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.
- Bertaux J.L., Vandaale A.C., Korablev O., Villard E., Fedorova A., Fussen D., Quémerais E., Belyaev D., Mahieux A., Montmessin F., Muller C., Neefs E., Nevejans D., Wilquet V., Dubois J.P., Hauchecorne A., Stepanov A., Vinogradov I., Rodin A. and the SPICAV/SOIR team.** A warm layer in Venus' cryosphere and high-altitude measurement of H₂O, HDO, HF, HCl // Nature, 2007, v. 450, p. 646—649.
- Bjornes E.E., Hansen V.L., James B., Svenson J.B.** Equilibrium resurfacing of Venus is possible: result from new Monte Carlo modeling and implications for Venus surface histories // Icarus, 2012, v. 217, p. 451—461.
- Bortman H.** Was Venus alive ? The signs are probably there // Space.com, August 26, 2004, <http://www.space.com/283-venus-alive-signs.html>.
- Bottke W.F., Vokrouhlicky D., Minton D., Nesvornyy D., Morbidelli A., Brasse R., Simonson B., Levison H.F.** An Archean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt // Nature, 2012, v. 485, p. 78—81.
- Bounama C., Blok W., von Franck S.** Das Ende des Raumschiffs Erde // Spectrum der Wissenschaft., 2004, October, p. 100—104.
- Cockell Ch.S.** Life on Venus // Planet. Space Sci., 1999, v. 47, p. 1487—1501.
- Condie K.C.** Super continents and super plume events: distinguishing signals in the geologic record // Phys. Earth Planet. Int., 2004, v. 146, p. 319—332.
- Crumpler L.S., Aubele J.C.** Volcanism on Venus // Encyclopedia of volcanoes / Ed. H. Sigurdsson. San Diego, CA, Acad. Press., 2000, p. 707—719.
- Davey S.C., Ernst R.E., Samson C., Grosfils E.B.** Hierarchical clustering of pit crater chains on Venus // Can. J. Earth Sci., 2013, v. 50, p. 109—126.
- David L.** Life zone on Venus possible // Space. com., February 11, 2003.
- Ernst R.E.** Large igneous provinces. Cambridge, Cambridge Univ. Press., 2014, 653 p.

Ernst R.E., Desnoyers D.W., Head J.W., Grosfils E.B. Graben-fissure systems in Guinevere Planitia and Beta Regio, Venus, and implications for regional stratigraphy and mantle plume diapirs // *Icarus*, 2003, v. 164, p. 282—316.

Ernst R.E., Buchan K.L., Desnoyers D.W. Plume and plume clusters on Earth and Venus: evidence from large igneous provinces (LIPs) // *Superplumes: beyond plate tectonics* / Eds. D.A. Yuen, S. Maruyama, B.F. Windley. Berlin, Springer-Verlag, 2007, p. 537—562.

Gentsch N., Mikutta R., Alves R.J.E., Barta J., Capek P., Gittel A., Hugelius G., Kuhry P., Lashchinskiy N., Palmtag J., Richter A., Šantrůčková H., Schnecker J., Shibistova O., Urich T., Wild B., Guggenberger G. Storage and transformation of organic matter fraction in cryoturbated permafrost soil across the Siberian Arctic // *Biogeosciences*, 2015, s. 4525—4542.

Greenspoon D. Venus revealed: A new look below the clouds of our mysterious twin planet // Reading MA., USA, Perseus Book Group, 1998, ISBN 978—0201328394.

Grosfils E.B., Head J.W. Emplacement of a radiating dike swarm in western Vinmara Planatia, Venus interpretation of the regional stress and subsurface magmatic configuration // *Earth, Moon and Planets*, 1994, v. 66, p. 153—171.

Halliday A.N., Wänke H., Birck J.L., Clayton R.N. The accretion, composition and early differentiation of Mars // *Chronology and evolution of Mars*. Springer, Netherlands, 2001, p. 197—230.

Hansen V.L., Phillips R.J., Willis J.J., Ghent R.R. Structures in tessera terrain, Venus: issues and answers // *J. Geophys. Res.*, 2000, v. 105, p. 4135—4152.

Head J.W. The geologic evolution of Venus: insights into Earth history // *Geology*, 2014, v. 42, p. 95—96.

Head J.W., Coffin M.F. Large igneous provinces: a planetary perspective // *Large Igneous Provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism*, 1997, AGU, Geophysical Monograph 100, p. 411—438.

Head J.W., Crumpler L.S., Aubele J.C., Guest J.E., Saunders R.S. Venus volcanism: classification of volcanic features and structures, associations, and global distribution from Magellan data // *J. Geophys. Res.*, 1992, v. 97, p. 13153—13197.

Hiesinger H., Head J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: a synthesis // *Recent advances and current research issues of Lunar stratigraphy* / Eds. N.A. Ambrose, D.A. Williams. Boulder, Geol. Soc. Am. Spec. Paper 477, 2011, p. 1—51.

Hoffman P.F., Schrag D.B. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change // *Terra Nova*, 2002, v. 14, p. 129—155.

Kasting J.F. Runaway and moist greenhouse atmospheres and evolution of Earth and Venus // *Icarus*, 1988, v. 74, p. 472—494.

Knudsen M.F., Riisager P. Is there a link between Earth's magnetic field and low-latitude precipitation? // *Geology*, 2009, v. 37, № 1, p. 71—74.

Kleine T., Munker C., Mezger K., Palme H. Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry // *Nature*, 2002, v. 418, p. 952—955.

Krassilnikov A.S., Head J.W. Novae on Venus: geology, classification and evolution // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, p. 5108.

Landis G. Astrobiology: the case for Venus // *J. British Interplanetary Sci.*, 2003, v. 56, № 7, p. 250—254.

Landis G., Celozza A., La Marre C. Atmospheric flight on Venus // *Proc. 40 Aerospace sci. meeting, Am. Inst. Aeronautics and Astronautics*, 2002, p. 819.

Magee K.P., Head J.W. Large flow fields on Venus: implications for plumes, rift associations and resurfacing // *Mantle plumes their identification through time* / Eds. R.E. Ernst, K.L. Buchan. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper 352*, Boulder, 2011, p. 81—101.

Mantle plumes: their identification through time / Eds. R.E. Ernst, K.L. Buchan. *Geol. Soc. Am., Spec. Publ. 352*, Boulder, 2001.

Maruyama Sh., Liou J.G. From snowball to Phanerozoic Earth // *Int. Geol. Rev.*, 2005, v. 47, p. 775—791.

Patzold M., Häusler B., Bird M.K., Tellman S., Mettei R., Asmar S.W., Dehant V., Eidel W., Imamura T., Simpson R.A., Tyler G.L. The structure of Venus middle atmosphere and ionosphere // *Nature*, 2007, v. 450, p. 657—660.

Russel C.T., Zhang T.L., Delva M., Magnes W., Strangeway R.J., Wei H.Y. Lightning on Venus inferred from whistler-mode waves in the ionosphere // *Nature*, 2007, v. 450, № 7170, p. 661—662.

Smrekar S.E., Stofan E.R., Mueller N., Treiman A., Elkins-Tanton L., Helbert J., Piccione G., Dossart P. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data // *Science*, 2010, v. 328, p. 605—608.

Sobolev S.V., Sobolev A.V., Kuzmin D.V., Krivolutskaya N.A., Petrunin A.G., Arndt N.T., Radko V.A., Vasiliev Y.R. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // *Nature*, 2011, v. 477, p. 312—316.

Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // Rev. Geophys, 1999, v. 37, p. 275—316.

Solomon S., Portmann R.W., Sasaki T., Hofmann D.J., Thompson D.W. Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica // J. Geophys. Res.: Atmospheres, 2005, v. 110, № D21811, doi: 10.1029/2005JD005917.

Stern R.J. Modern-style plate tectonics began in Meoproterozoic time: an alternative interpretation of Earth's tectonic history / Eds. K. Condie, V. Pease. GSA Spec. Paper 440, 2008, p. 265—280.

Svedhem H., Titov D.V., Taylor F.C., Witasse O. Venus as a more Earth like planet // Nature, 2007, v. 450, p. 629—632.

White R.S., McKenzie D. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts // J. Geophys. Res.: Solid Earth, 1989, v. 94, № B6, p. 7685—7729.

Wignall P.B. The link between large igneous province eruptions and mass extinction // Elements, 2005, v. 1, p. 293—297.

Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S., Gerasimov V.V. The Antarctic ozone depletion caused by Erebus volcano gas emissions // Atmos. Environ., 2015, <http://dx.org/10.1016/g.atmosenv.>, 2015, 10. 005.

*Рекомендована к печати 6 июля 2016 г.
Д.В. Метелкиным*

*Поступила в редакцию
6 июля 2016 г.*