

Н. Л. ДОБРЕЦОВ, Е. В. КУКАРИНА

ВЕНЕРА КАК ВОЗМОЖНОЕ БУДУЩЕЕ ЗЕМЛИ

В апреле 2016 г. я прочитал краткий курс геодинамики в Московском государственном университете. Заключительная лекция была посвящена эволюции Земли и планет Солнечной системы. На ней один из слушателей спросил, может ли в будущем у Земли появиться атмосфера, подобная современной атмосфере Венеры. Как известно, эта планета имеет наиболее специфическую атмосферу – очень горячую (до 450 °С) и плотную, состоящую в основном из CO₂.

Я сразу ответил: «А почему нет? Вполне возможно, так как на Земле накоплено в поверхностных слоях огромное количество карбонатных пород, и если предстоящий нагрев поверхности Земли (за счет превращения Солнца в красного гиганта) достигнет достаточной величины, возможна декарбонатизация и быстрый рост содержания CO₂ в атмосфере, как и ее плотности. Так что Венера может быть моделью для будущего Земли».

После этого я продолжил думать об этой идее, высказанной экспромтом, и нашел дополнительные аргументы и возможный сценарий такого развития событий, что и постарался изложить в настоящей статье

Чтобы ответить на вопрос о будущем нашей планеты, в первую очередь следует взглянуть на эволюцию Солнечной системы в целом, так как все ее планеты имеют общее происхождение, и их внешние оболочки сильно зависят от активности Солнца.

Считается, что планеты нашей системы сформировались из гигантской протопланетной газопылевой туманности примерно в одно и то же время, около 4,6 млрд лет назад (Витязев, 1983; Витязев, Печерникова, 2009; Ernst, 2014).

Дальнейшую эволюцию планет условно делят на шесть стадий, причем первые три стадии характерны только для планет земной группы – Меркурия, Марса и Земли, а также, частично, Луны, на которых они проходили во многом синхронно.

Что касается Венеры, то о ранних стадиях ее эволюции мы знаем пока недостаточно, потому что на этой планете древние геологические структуры перекрыты молодыми вулканическими породами, а из-за плотной облачности изучение ее поверхности очень затруднено (Head, 2014; Ernst, 2014).



ДОБРЕЦОВ Николай Леонтьевич – действительный член РАН, профессор, председатель Объединенного ученого совета наук о Земле РАН, главный научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск), заведующий кафедрой минералогии и петрографии геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета, главный редактор журнала «НАУКА из первых рук». Лауреат Ленинской (1976), Государственной (1997), Демидовской (1999) премий, премии им. А. Н. Косыгина (2003), ордена Трудового Красного Знамени и др. Автор и соавтор более 700 научных работ

Credit: NASA; NASA/JPL

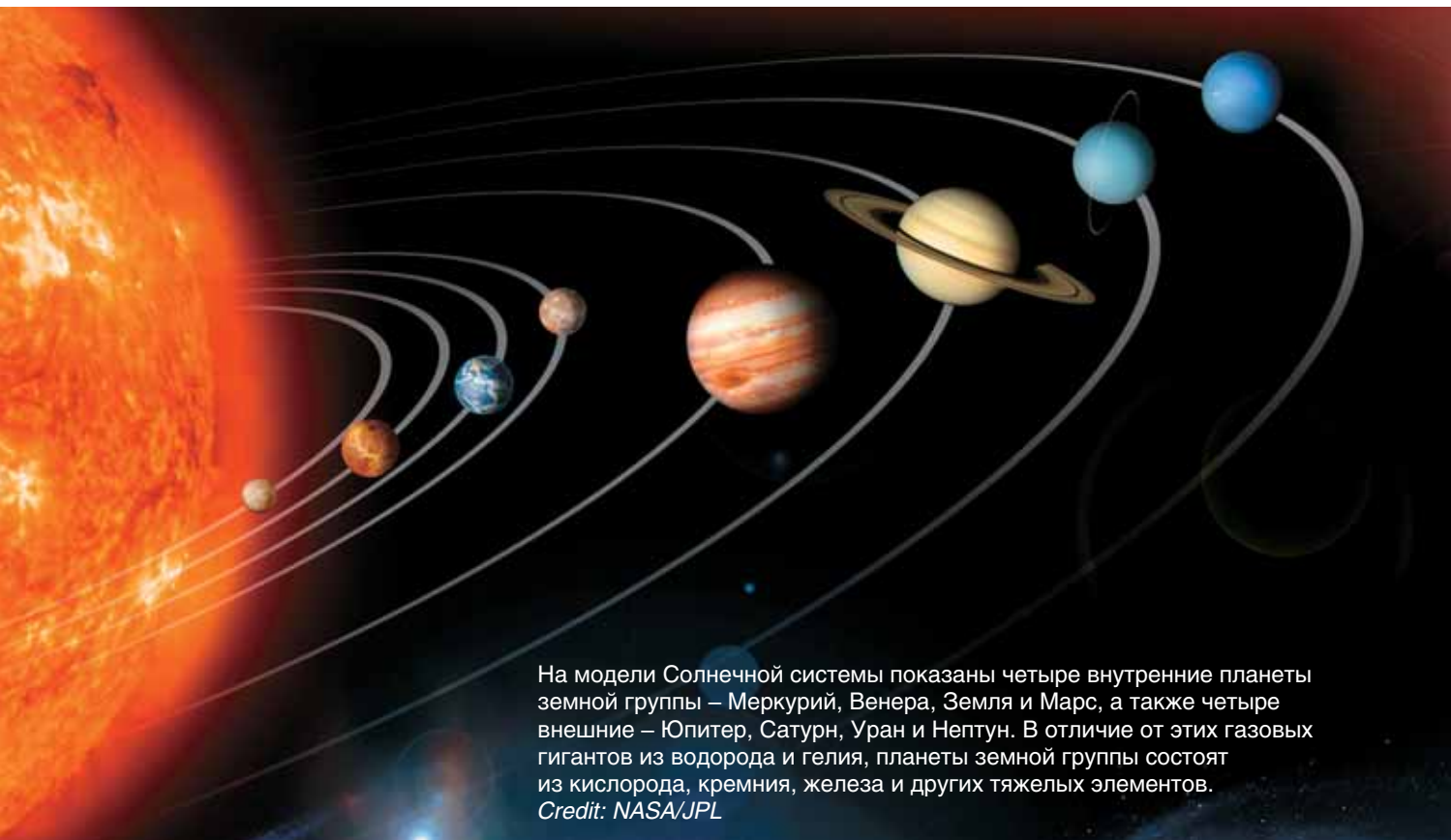


КУКАРИНА Екатерина Васильевна – младший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск) и Новосибирского государственного университета. Автор и соавтор 5 научных работ

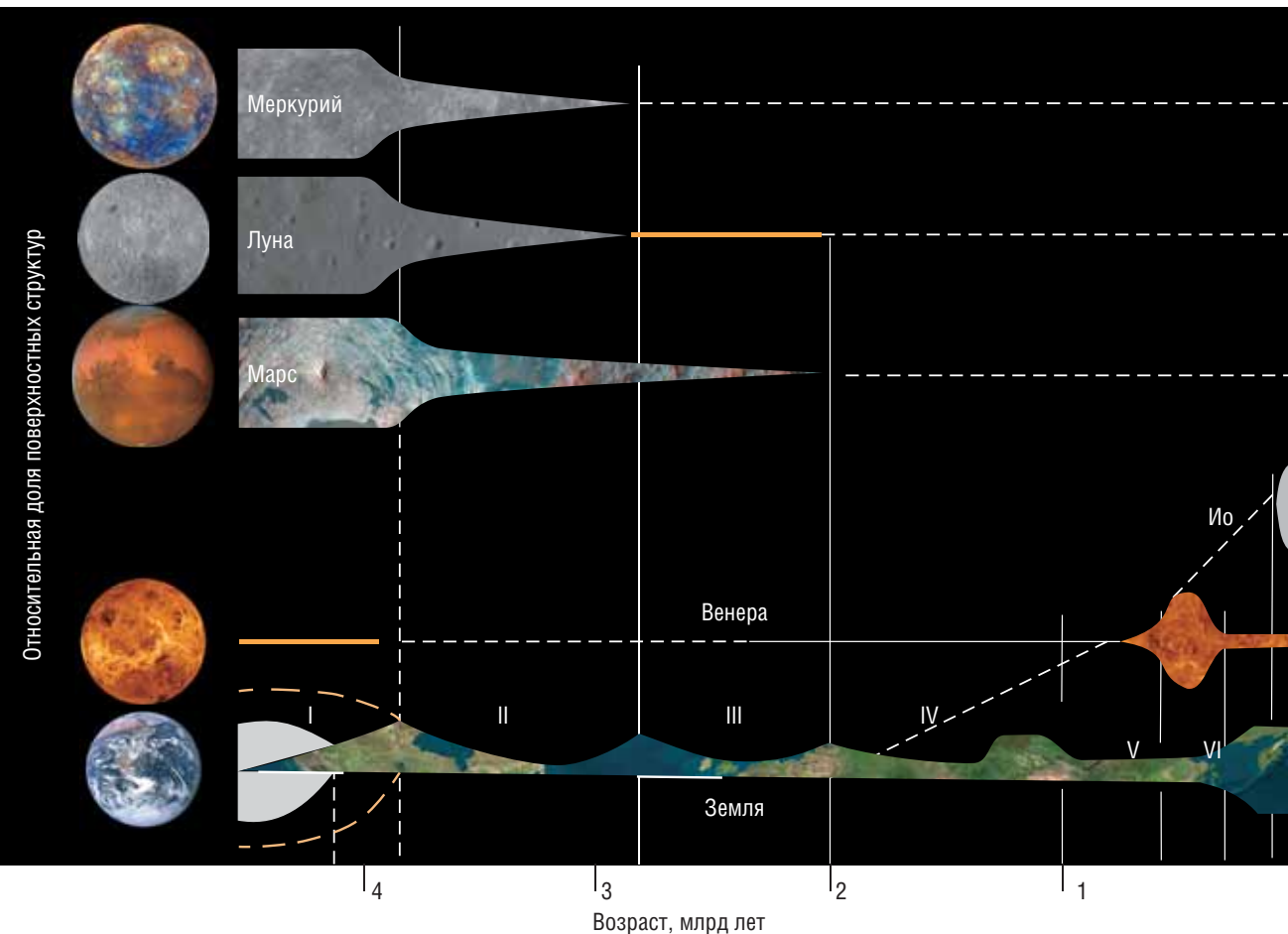
Ключевые слова: Венера, Земля, эволюция планеты, эволюция жизни, бактерии, климат, атмосфера, вулканизм.

Key words: Venus, Earth, planet evolution, life evolution, bacteria, climate, atmosphere, volcanism

© Н. Л. Добрецов, Е. В. Кукарина, 2016



На модели Солнечной системы показаны четыре внутренние планеты земной группы – Меркурий, Венера, Земля и Марс, а также четыре внешние – Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. В отличие от этих газовых гигантов из водорода и гелия, планеты земной группы состоят из кислорода, кремния, железа и других тяжелых элементов.
Credit: NASA/JPL



Рождение планет

Итак, первая стадия формирования планет – это *аккреция*, сгущение газопылевой туманности. Для Земли длительность этого процесса по данным моделирования и изотопного анализа составила около 100–120 млн лет (Витязев, Печерникова, 2009; Kleine *et al.*, 2002). Примерно столько же длилась эта фаза у Марса, Меркурия и, по-видимому, у Венеры (Head, 2014; Ernst, 2014). Формирование Луны шло другим путем и на порядок быстрее: она отделилась от Земли в результате столкновения с гипотетической планетой размером с Марс либо перестройки двойной планеты.

На стадии аккреции сформировалась и первичная атмосфера планет земной группы, которая в дальнейшем заметно эволюционировала. В тяжелой и плотной атмосфере юной Земли отсутствовал кислород, но было много свободного водорода и простейшего углеводорода – метана. Постепенно, параллельно с образованием океана она трансформировалась в современную мало-плотную атмосферу, состоящую из свободного азота и кислорода (Адушкин и др., 2007; Жарков, 2013). О пер-

вичной атмосфере Венеры мы ничего не знаем, кроме того, что свой современный облик она обрела около 1 млрд лет назад в результате активных вулканических процессов.

Стадия аккреции и последующего раннего развития, сопровождавшегося метеоритными бомбардировками на всех планетах земной группы, кроме Венеры, и Луне, завершилась около 3,8 млрд лет назад, что подтверждается изотопными данными для Земли и Луны. На следующей, II стадии закончилась и тяжелая метеоритная бомбардировка Луны, Земли и, вероятно, Марса (Bottke *et al.*, 2012). Наиболее отчетливые следы этого грандиозного явления обнаружены на «безатмосферной» Луне: судя по ним, максимум падения крупных метеоритов пришелся на период 4,0–3,3 млрд лет назад, а последние из них упали на лунную поверхность не позднее 1 млрд лет назад (Hiesinger *et al.*, 2011).

Итак, первые 2,6 млрд лет на Меркурии, Марсе, Земле и Луне шли примерно схожие процессы формирования. К концу III стадии завершился плюмовый магматизм на Марсе, связанный с подъемом из глубин планеты горячих расплавов магмы, а на Меркурии

и Луне все признаки какой-либо магматической активности исчезли много ранее. Но не так обстояла ситуация на Земле и Венере. Эволюция земного океана и океанических структур, связанных с формированием и изменением структуры течений в верхнем слое мантии (астеносфере), нашли отражение в так называемой *тектонике плит* – движении гигантских базальтовых плит, которые, как кусочки мозаики, составляют литосферу Земли (Stern, 2008; Добрецов, 2009, 2010). Ничего подобного этому явлению на других планетах не было обнаружено, за исключением Марса, где на ранних этапах могли происходить явления, схожие с тектоникой малых плит, характерной для Земли в раннем протерозое (Halliday *et al.*, 2001; Ernst, 2014).

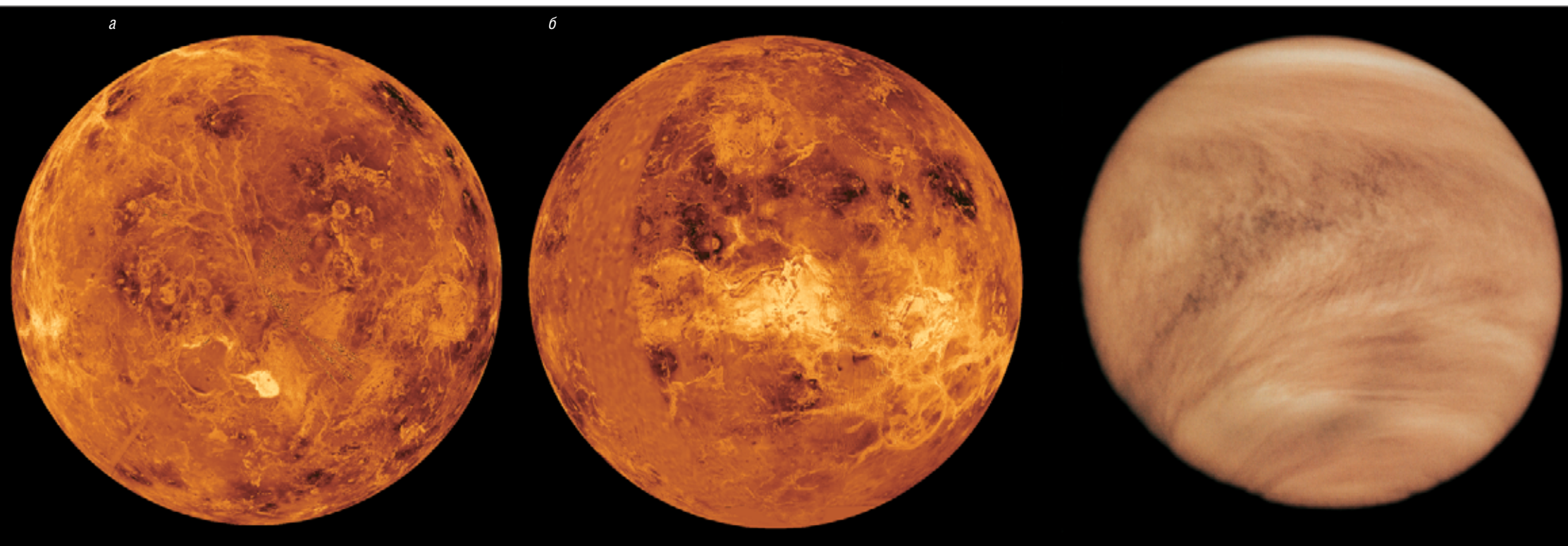
В отличие от Земли, магматическая активность и связанные с ней преобразования поверхностных структур отчетливо фиксируются на Венере только на поздних стадиях формирования планеты, как уже упоминалось выше.

Если рассмотреть ход параллельных процессов на двух этих планетах, то 1,8–1,0 млрд лет назад

Геологическую историю планет земной группы можно проследить по динамике формирования их поверхности и приповерхностных структур. Эволюцию планет земной группы можно условно поделить на шесть стадий. На I стадии происходило формирование планет за счет аккреции, лишь Луна имеет другое происхождение. На II стадии постепенно закончилась тяжелая метеоритная бомбардировка на Марсе, Земле и Луне, а также начались процессы тектоники плит, наиболее ярко выраженные на Земле.

На III стадии завершился плюмовый магматизм на Марсе, а на Луне и Меркурии всякая тектоническая активность исчезла ранее.

Стадии V–VI отчетливо фиксируются лишь на Земле и Венере. На Венере это период активного плюмового магматизма, а на Земле – образования современных океанов и континентов. В последние 200 млн лет специфическая тектоническая активность проявлялась на Ио – крупнейшем спутнике Юпитера, магматизм и конвекция на котором обусловлены высоким содержанием серы и его периодическими сжатиями-растяжениями при изменении расстояния от Юпитера. По: (Head, Coffin, 1997; Ernst, 2013; 2014), с добавлениями Н.Л. Добрецова



Облака в атмосфере Венеры состоят из мельчайших капель высококонцентрированной серной кислоты. Их V-образная форма – следствие сильных ветров, дующих вблизи экватора. Из-за плотного облачного слоя поверхность Венеры можно наблюдать лишь в радио- и микроволновом диапазонах, а также в отдельных участках ближней инфракрасной области. Этот снимок поверхности Венеры сделан зондом «Пионер-Венера-1» в ультрафиолетовых лучах в 1979 г. *Credit: NASA*

В центре Венеры находится расплавленное железоникелевое ядро (1), окруженное мантией (2) и корой (3). Над поверхностью простирается плотная облачная атмосфера (4), где верхняя граница облаков проходит на высоте 65—70 км от поверхности (5). Еще выше располагается видимая с Земли внешняя «поверхность» атмосферы, характеризующаяся наиболее резкими температурными колебаниями (6).
По: (Dinwiddie et al., 2014)

на Венере началось формирование современной плотной атмосферы на фоне роста активности плюмового магматизма, завершившееся 0,8–0,5 млрд лет назад, а на Земле в этот период шло образование современных океанов, континентов и биосферы (Добрецов, 2010, 2014). За последние 200 млн лет поверхность Земли приобрела свой окончательный облик, в то время как атмосфера и вулканизм Венеры продолжали функционировать на том же самом относительно стабильном уровне.

Таким образом, эволюция всей Солнечной системы представляет собой сложнейшее явление, когда прекращение активности на одной планете сопровождается появлением или усилением активности на другой. Хотя, как отмечено выше, есть и определенное сходство стадий на разных планетах земной группы. Причиной такого сходства является, во-первых, единое происхождение планет. Во-вторых, интенсивная метеоритная бомбардировка, которой завершился процесс аккреции. И, наконец, плюмовый магматизм, яркие проявления которого периодически фиксируются на Земле в течение всей ее истории, на Марсе – первые 2 млрд лет, а на Венере – в последний 1 млрд лет.

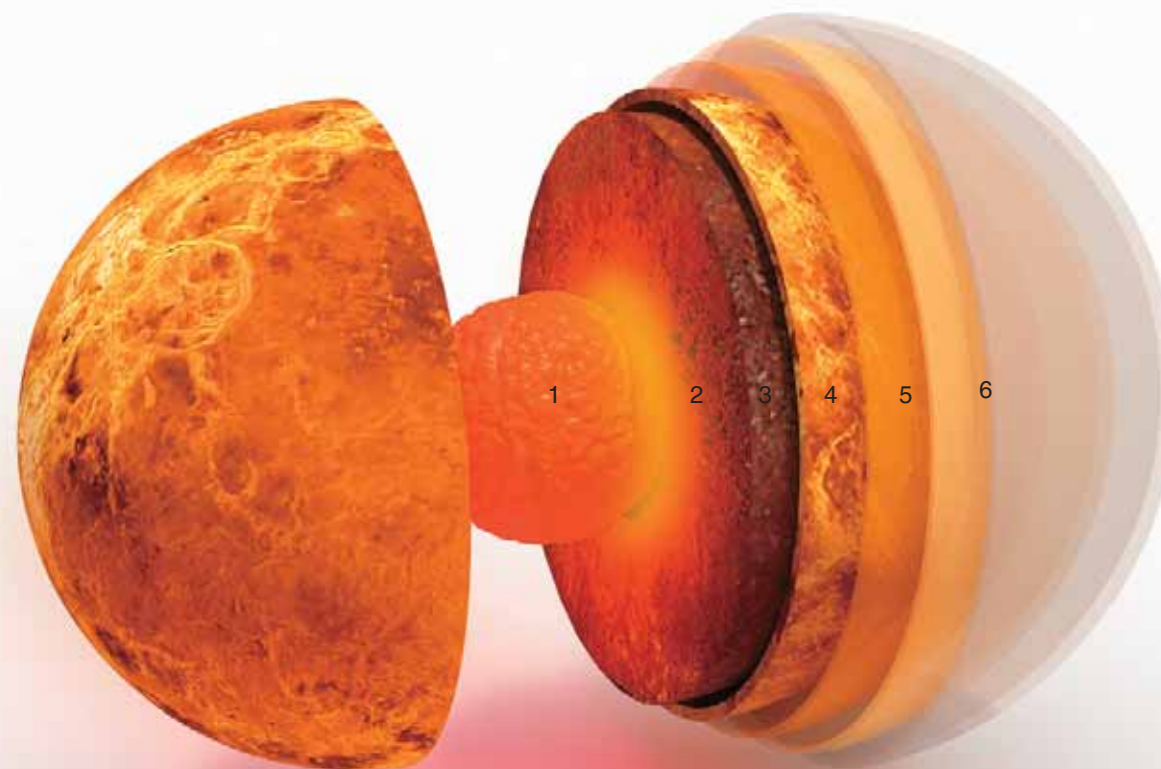
Ниже мы подробнее остановимся на условиях формирования специфической атмосферы и магматизма Венеры, а также возможности появления аналогичных явлений на поздних стадиях эволюции нашей планеты.

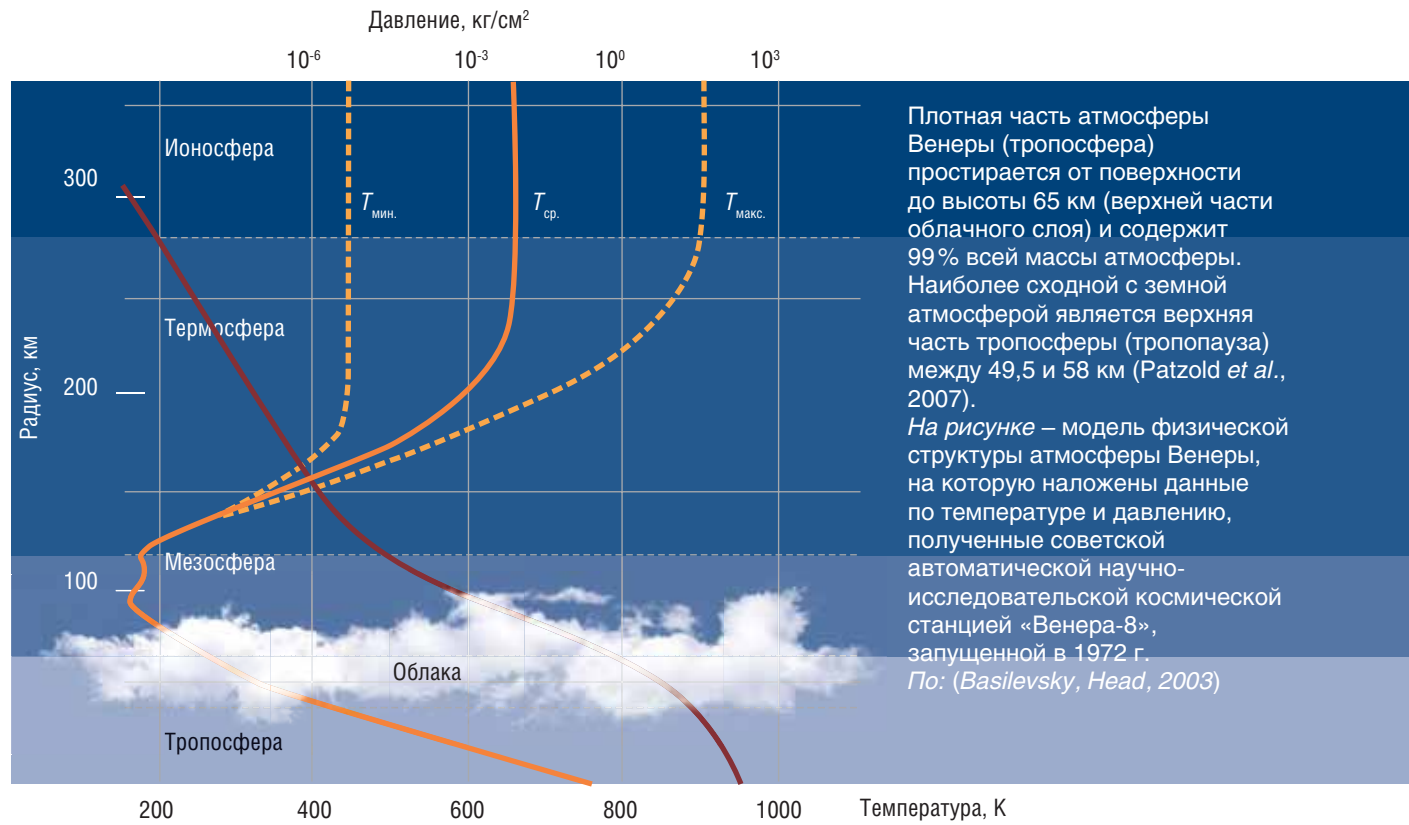
Эти изображения поверхности Венеры были получены в результате визуализации данных межпланетной станции «Магеллан», дополненных данными других космических экспедиций и наземных радиолокационных наблюдений: а – северное полушарие (яркое пятно в нижней части – горы Максвелла высотой 11 км), б – восточное полушарие (темные области – следы падения крупных метеоритов на равнинах). *Credit: NASA/JPL*

На планете с облаками из серной кислоты

С одной стороны, Венера очень похожа на Землю. Ее радиус составляет 0,95 от земного при практически одинаковой средней плотности вещества, из-за чего масса Венеры равна 0,8 от массы Земли. Однако Венера расположена ближе к Солнцу и вращается настолько медленно, что венерианский день составляет 225 земных суток. Неудивительно, что ее поверхность за 4 млрд лет нагрелась, и на ней сформировалась атмосфера, совсем не похожая на земную.

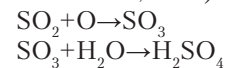
Данные по Венере продолжают уточняться, но на сегодня известно, что температура у ее поверхности составляет около 450 °С, а давление – 93(!) земные атмосферы. Основная часть атмосферы Венеры – это





углекислый газ (96,5%) с примесью азота (3,5%) и следовыми количествами молекулярного кислорода, воды, аргона, сероводорода и других соединений (Кондратьев и др., 1987; Авдучевский и др., 1995; Basilevsky, Head, 2003; Bertaux *et al.*, 2007; Svedham *et al.*, 2007). Интересно, что хотя доля азота в атмосфере Земли значительно выше, общая масса азота в венерианской атмосфере в 4 раза больше из-за ее большей плотности и размеров.

На высоте 40–65 км на дневной стороне Венеры и 50–80 км – на ночной формируется облачный слой из мелких (диаметром около 2 мкм) капель раствора серной кислоты H_2SO_4 высокой концентрации. Откуда она берется? Предположительно, серная кислота образуется благодаря фотохимическому воздействию из сернистого газа SO_2 , выбрасываемого в атмосферу с извержениями, который вступает в реакцию с активным атомарным кислородом (Basilevsky, Head, 2003; Bertaux *et al.*, 2007):



В земной атмосфере тоже происходят подобные процессы, но в гораздо меньших масштабах.

Атмосферу Венеры можно поделить на тропосферу, мезосферу, термосферу и ионосферу. Плотная ее часть – тропосфера, простирается от поверхности до 65 км

(верхней части облачного слоя) и содержит 99% всей массы атмосферы. Большая часть (90%) атмосферы Земли находится до высоты 10 км, Венеры – до высоты 28 км от поверхности. И лишь на высоте 49,5 км давление здесь становится таким же, как на Земле на уровне моря, а на высоте 54 км опускается до земных значений температура (21 °C) (Patzold *et al.*, 2007). Именно здесь, где есть водяные пары и условия среды близки к земным, может существовать жизнь, пусть и в простейшей форме (Bortman, 2004; и др.). В верхней части тропосферы благодаря сложной конвекции возникают сильные полярные вихри (Svedhem *et al.*, 2007).

Еще выше, до высоты 120 км, простирается мезосфера. Ее нижняя часть (на высоте 62–73 км) совпадает с верхним слоем облаков, а температура здесь опускается до –43 °C. Самый холодный (до –108 °C) на дневной стороне слой атмосферы располагается на высоте 73–95 км. Выше мезосферы начинается термосфера, которая характеризуется наиболее сильными температурными контрастами: на дневной стороне температура может возрастать до 127 °C, а на ночной – падать до –173 °C (Bertaux *et al.*, 2007).

Такие температурные колебания связаны с особенностями циркуляции в верхней мезосфере и термосфере. На высотах 90–150 км воздушные массы перемещаются

с дневной стороны на ночную, что сопровождается авеллингом (подъемом) над освещенным полушарием и даунвеллингом – над темным. Ночной даунвеллинг вызывает адиабатический нагрев, что формирует относительно теплый (–40 °C) слой на ночной стороне мезосферы на высоте 90–120 км.

С термосферой практически совпадает ионосфера, которая располагается на высоте 120–300 км и имеет вытянутую форму. В двух ее нижних слоях ионы представлены преимущественно O^{2+} , в верхнем – O^+ , а электроны достигают максимальной плотности в среднем слое (Patzold *et al.*, 2007). Несмотря на развитую ионосферу, Венера имеет очень слабое магнитное поле, возможно, из-за отсутствия конвекции в ядре, хотя наличие на Венере интенсивного плюмового магматизма как будто противоречит этому факту (Russel, Zhong *et al.*, 2007).

Одной из важнейших нерешенных научных проблем, связанных с Венерой и ее атмосферой, является практически полное отсутствие атмосферного кислорода и воды, хотя 4–3 млрд лет назад на этой планете, вероятно, существовал океан. Сценарий перехода к современной Венере должен быть связан с эволюцией ее магматизма. По крайней мере, в последний миллиард лет именно вулканизм плюмового типа являлся на этой планете главным формообразующим процессом (Ernst, 2014).

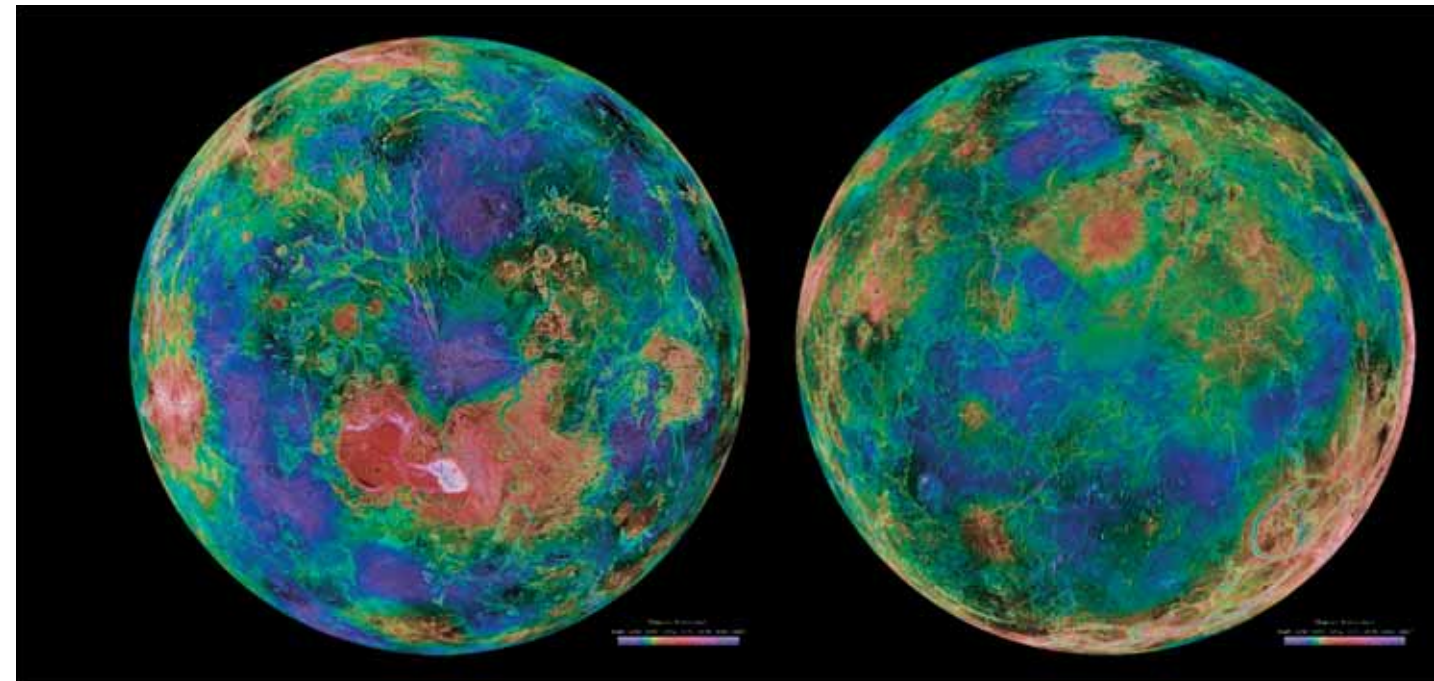
Планета вулканов

Возраст самых древних вулканических пород на Венере, представляющих собой остатки древнего фундамента и кристаллических плато, равен 0,8–2,0 млрд лет, а возраст большинства вулканитов оценивается в 500–800 млн лет (Ernst, 2014; Bjonnes *et al.*, 2012; Basilevsky, Head, 2001, 2002).

Тщательное изучение снимков поверхности Венеры позволило выделить 168 отдельных больших вулканов с диаметром более 100 км и 289 более мелких, а также 208 вулканических полей, по площади превышающих 50 тыс. км². Наиболее грандиозные вулканические поля площадью 0,2–1,6 млн км² занимают более одной десятой от площади всех венерианских равнин – преобладающей формы местного рельефа (Crumpler, Aubell, 2000; Magee, Head, 2011; Davey *et al.*, 2013).

Остальные 140 полей с меньшей площадью (около 100 тыс. км²) имеют особую радиальную структуру, в центре которой расположен большой вулкан или корона (крупное валлообразное поднятие, окруженное трогом – рвом с плоской, иногда слегка выпуклой или вогнутой центральной частью). Большинство крупных лавовых полей связаны со структурами растяжения (рифтами, рифтоподобными структурами и т. п.) и сформировались, очевидно, в результате горизонтального растяжения литосферы. Для нас же особый

Эти виды северного и южного полушарий Венеры представляют собой «мозаику» из изображений, полученных в результате десяти лет радиолокационных космических и наземных исследований. Credit: NASA/JPL/USGS



интерес представляют радиальные трещинно-грабеновые системы, очень напоминающие радиальные дайковые системы Земли, связанные с мантийными плюмами – узкими горячими потоками вещества, устремляющимися к поверхности из мантии.

Первые такие поля были обнаружены на Венере еще во время проекта «Магеллан», когда межпланетная станция НАСА впервые провела полномасштабное радиолокационное картографирование поверхности планеты (Grosfils, Head, 1994). Оказалось, что радиус таких систем на Венере гораздо больше, чем на Земле, и может достигать 2,5 тыс. км. А недавно ученые предположили существование на южной окраине венерианской Земли Афродиты еще более масштабной радиальной трещинно-грабеновой системы, в центре которой расположена уникальная структура Артемиды (Ernst *et al.*, 2003; Krasilnikov, Head, 2003).

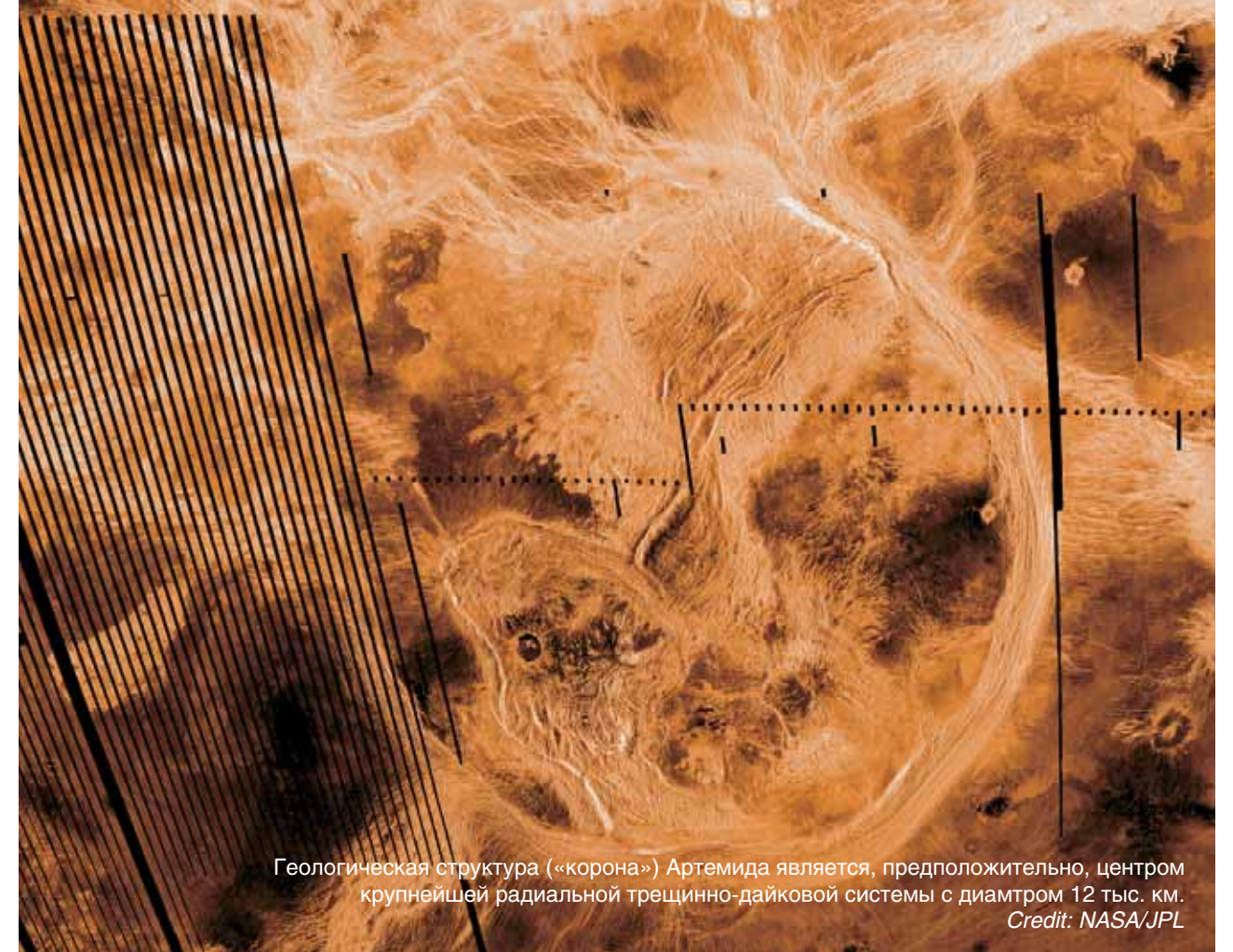
Артемиды – это деформированная корона, в которой внешний трог имеет диаметр более 5 тыс. км, при этом диаметр самой радиальной трещинно-дайковой системы составляет 12 тыс. км (Hansen *et al.*, 2000). Предполагается, что она сформировалась на тонкой литосфере и в этом смысле могла быть аналогом земных океанических мантийных суперплюмов в Индийском и Тихом океанах, где реконструируемый диаметр суперплюма близок к 10 тыс. км (Добрецов, 2010, 2011; Ernst, 2014).

Система Артемиды и некоторые крупные вулканические скопления могут также представлять собой

кластеры плюмов (Ernst, 2014). Наиболее вероятным кандидатом на эту роль является регион ВАТ, занимающий 20% поверхности Венеры, где выделяются три скопления вулканов, более 60 крупных вулканов и сотни корон, а также множество рифтов разных размеров (Basilevsky, Head, 2000; Ernst, 2014).

Считается, что почти все вулканы на Венере являются базальтовыми с примесью щелочных и кислых пород, но щелочные и карбонатные породы могут составлять и более значительную их часть (Ernst, 2014). Об этом свидетельствуют анализы поверхности Венеры, полученные с космических станций, и данные наблюдений с помощью телескопов. Р. Эрнст в своих лекциях в НГУ в марте 2016 г. привел данные, из которых можно сделать вывод, что очень жидкие потоки и озера Венеры сложены главным образом карбонатными породами, однако прямых доказательств их значительной доли в продуктах вулканизма Венеры пока нет. Эти породы могут служить главным и стабильным источником поступающего в атмосферу CO_2 и обеспечивать постоянство его содержания на протяжении миллиарда лет, несмотря на реакции диссоциации и интенсивную конвекцию.

На трехмерной модели западной части области Эйстлы в экваториальной области Венеры видны простирающиеся на сотни километров застывшие лавовые потоки, среди которых выделяются вулканы Гула и Сиф. *Credit: NASA/JPL*



Геологическая структура («корона») Артемиды является, предположительно, центром крупнейшей радиальной трещинно-дайковой системы с диаметром 12 тыс. км. *Credit: NASA/JPL*

На Земле в любой крупной плюмовой провинции обязательно присутствуют щелочные породы или карбонатиты (Buchan, Ernst, 2001; Ernst, 2014). На Венере их доля может быть значительно выше благодаря более высокой температуре не только на поверхности, но и в недрах, а также с учетом некоторых отличий по составу во внутренних оболочках этих планет. Активность плюмов на протяжении всей истории Земли оказывала сильное влияние на состав Мирового океана и биосферы. Аналогичное влияние на атмосферу и возникновение жизни на Венере могли оказать и венерианские плюмы, но этот вопрос требует дополнительных исследований.

Земной сценарий

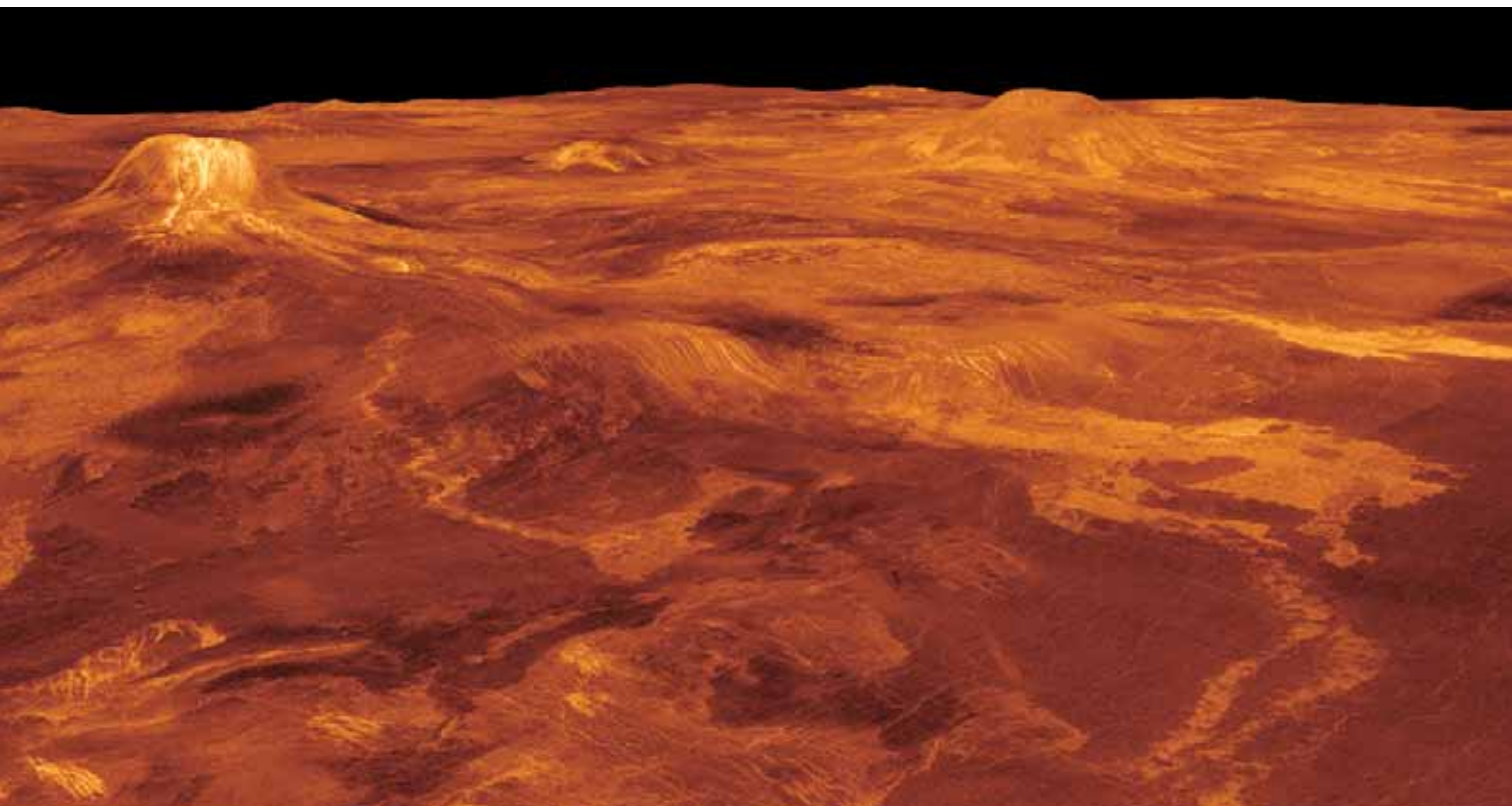
Возвращаясь к вопросу о будущем Земли, обратимся к очень интересным результатам исследований группы европейских астрономов и геологов, посвященных эволюции Земли и ее биосферы за последние 2,5 и на последующие 1,5 млрд лет, которые я уже неоднократно цитировал (Вопнова *et al.*, 2004; Добрецов, 2009, 2013).

Согласно этим работам, главным регулятором приповерхностных условий на Земле и эволюции биосферы

была и будет средняя температура ее поверхности. Когда 2,5 млрд лет назад она составляла 48–50 °С, вся биосфера была представлена простейшими одноклеточными организмами – прокариотами (бактериями и археями) общей биомассой в 400–500 Гт (гигатонн) углерода. Когда спустя 700 млн лет температура поверхности опустилась ниже 30 °С, возникли эукариоты – организмы с оформленным клеточным ядром. Примерно 1 млрд лет назад масса биосферы достигла более 1 тыс. Гт углерода, из которых 600 Гт приходилось на долю эукариотов.

Затем на Земле началось быстрое похолодание до 0–10 °С, результатом которого стали сильнейшие в истории планеты оледенения, закончившиеся 550–600 млн лет назад (Добрецов, Чумаков, 2001; Добрецов, 2009). Естественно, в эту эпоху биомасса снизилась почти вдвое, но падение сменилось быстрым ростом, завершившимся на рубеже 540 млн лет назад вторым максимумом. Главное, что в это время появились и быстро стали развиваться высшие организмы – многоклеточные эукариоты с хорошо дифференцированными тканями и органами.

В последующий период вплоть до наших дней средняя температура не опускалась ниже 10 °С и не поднималась выше 20–25 °С. Можно предположить,

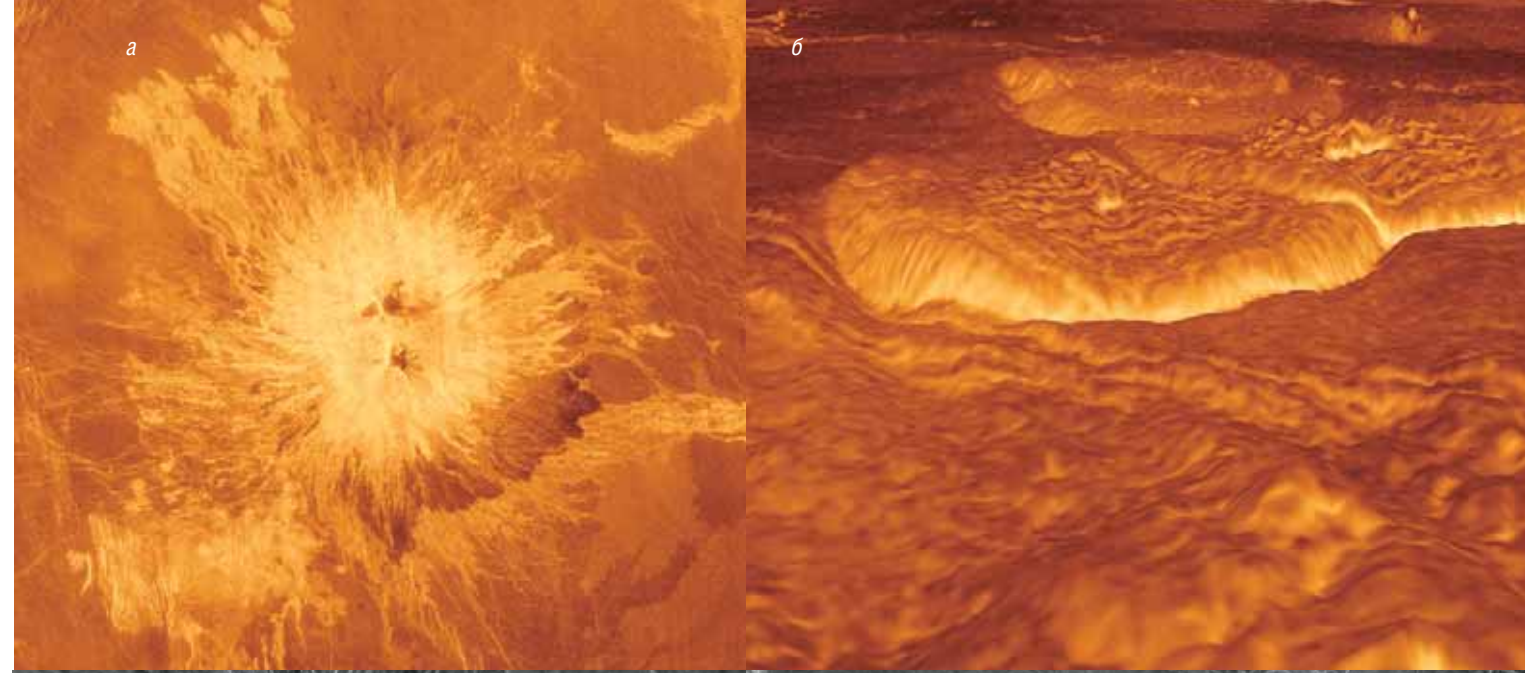
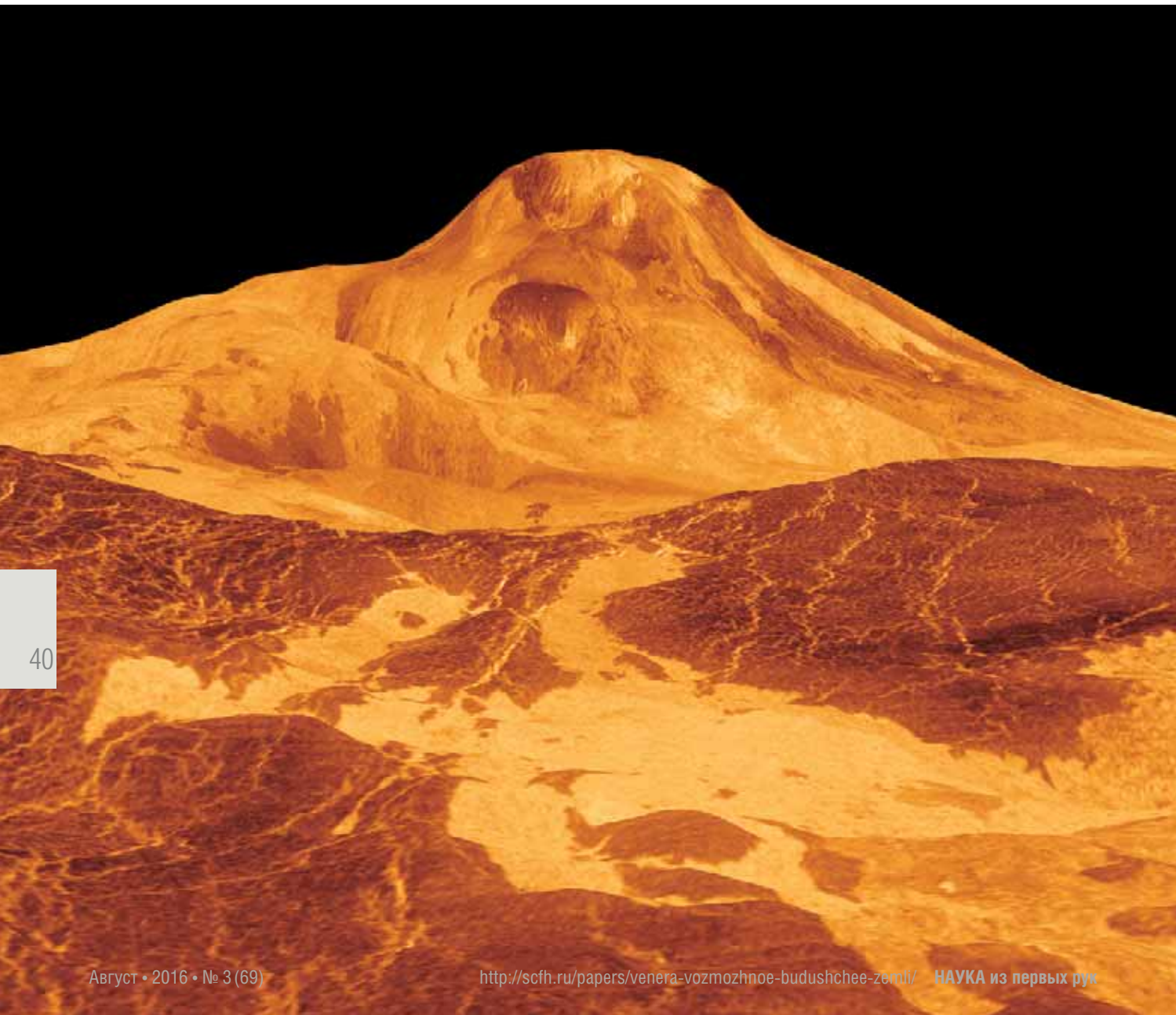


что в ближайшие 550 млн лет колебания температуры поверхности Земли продолжатся при общем тренде ее роста до значений около 30 °С. В результате к концу этого периода масса биосферы уменьшится до значений достигнутых, 2,0–2,5 млрд лет назад.

В дальнейшем температура поверхности будет быстро расти из-за увеличения размеров Солнца и степени солнечной инсоляции в результате превращения Солнца в красного гиганта. Когда температура заметно превысит 30 °С, исчезнут высшие многоклеточные организмы, а при 40 °С – все остальные эукариоты. Большинство современных видов прокариот исчезнет после рубежа в 70 °С, а при более высоких температурах – вообще все формы жизни, основанной на углеводородных цепях РНК и ДНК (Bounama *et al.*, 2014).

Разнообразные магматические структуры на поверхности Венеры: необычный вулкан Сапас с двуглавой вершиной (а); лавовое поле в области Альфа (б); радиальные дайки (в); вулкан типа «корона» – крупное валообразное поднятие, окруженное рвом-троггом (г); извилистые лавовые каналы шириной 1–2 км и длиной десятки-сотни км (д); щитовые равнины с небольшими вулканами характерной формы (е). Credit: NASA/JPL

Трехмерная модель вулкана Маат – самого высокого вулкана на Венере, возвышающегося над поверхностью планеты более чем на 8 км. Credit: NASA/JPL



Скорее всего, рост температуры на поверхности Земли продолжится, и через 1,5–1,7 млрд лет она может превысить 100 °С. Тогда начнется заключительный этап перехода к состоянию, близкому к современному на Венере. Начнут кипеть и испаряться океаны, сформируется мощный слой облачности. Из-за многократного усиления парникового эффекта нагревание поверхности Земли пойдет еще быстрее. Когда температура достигнет 400–450 °С, а давление – 50–60 атмосфер, начнется окисление керогена – рассеянной и концентрированной органики, а также *декарбонатизация*, т.е. разложение таких минералов, как доломит и карбонат кальция ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2$). В результате взаимодействия с кремнеземом такие реакции происходят при более низких температурах, (около 450 °С) и давлении 60 атмосфер ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 2\text{CO}_2$).

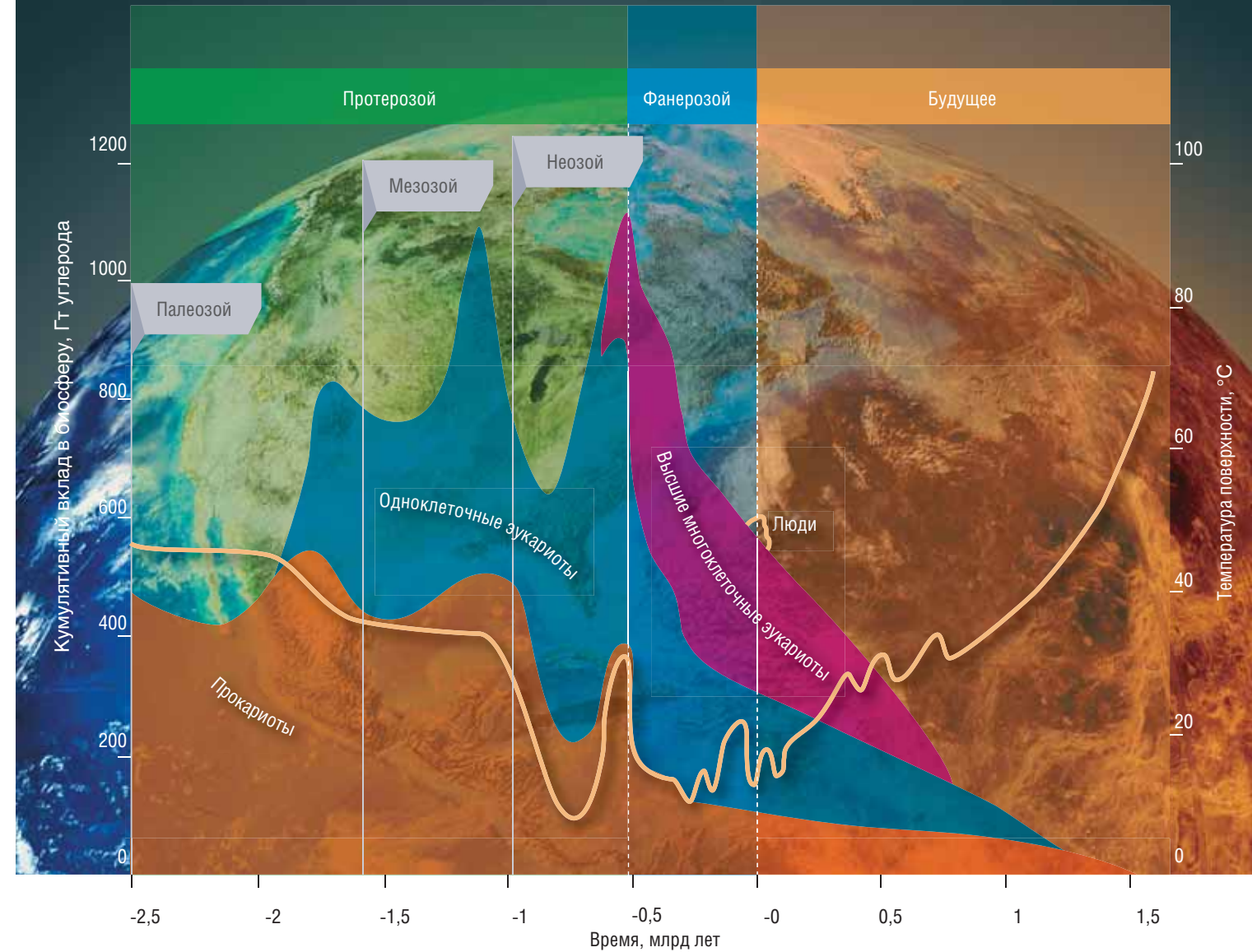
В результате кора обогатится силикатами кальция и магния, а в атмосфере будет падать содержание кислорода и нарастать содержание углекислого газа и воды, которая будет переноситься во внешнюю оболочку Земли и быстро диффундировать в космос.

Эти изменения напоминают эволюцию атмосферы Земли на ранней стадии, только «наоборот» (Добрецов, 2010, 2014). При остывании Земли ее первичная атмосфера теряла плотность, шли процессы окисления, а пары воды и углекислый газ обособлялись в виде гидросферы и карбонатных отложений. Нагревание планеты должно запустить обратные процессы, которые

приведут к росту плотности атмосферы благодаря росту концентрации углекислого газа, а также потерям свободного кислорода и воды. Что касается временных сроков, то после аккреции Земля остывала в течение 5 млрд лет, а с началом роста температуры она за 1,5 млрд лет может превратиться во вторую Венеру.

Сама Венера, находясь ближе к Солнцу, остывала медленнее и в меньшей степени. Вновь нагреваться она начала уже в начале протерозоя, т.е. около 2,5 млрд лет назад, и через 0,5–1,5 млрд лет ее атмосфера приобрела современный облик. Примерно через 6 млрд лет после образования условия на Земле и Венере вновь станут похожи, хотя эти оценки, безусловно, очень приблизительны.

Отдельного внимания заслуживает вопрос о возможностях появления биосферы на Венере в условиях, на первый взгляд кажущихся несовместимыми с жизнью. Кстати говоря, и на Земле биосфере пришлось пройти через несколько переломных моментов, продемонстрировав свою исключительную «живучесть». Считается, что жизнь на Земле окончательно закрепилась и стала развиваться около 3,9 млрд лет назад, а до этого могла возникать неоднократно, но каждый раз гибнуть в результате интенсивной метеоритной бомбардировки (Заварзин, 2009; Розанов, 2009). Земной биосфере пришлось претерпеть значительные перестройки и во время больших оледенений, а также катастрофических плюмовых извержений, таких как сибирские траппы (Hoffman,



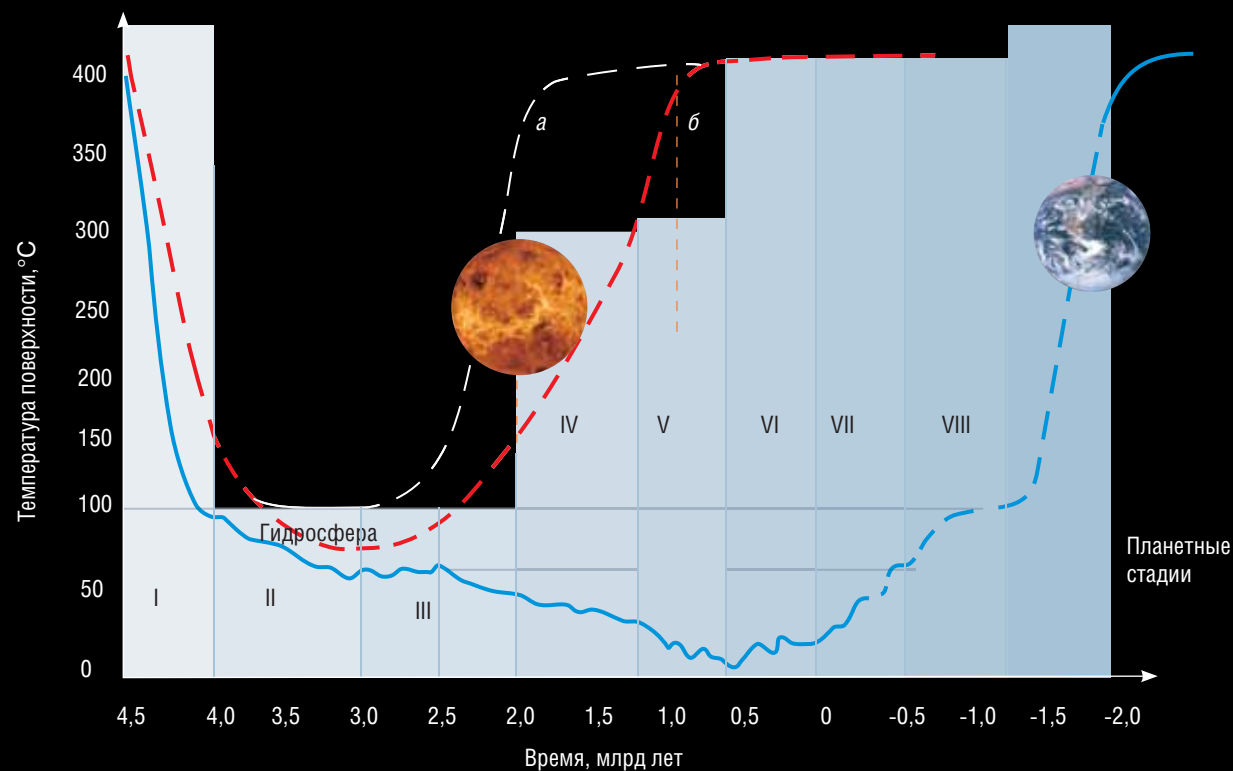
На основе знаний об эволюции биосферы Земли за последние 2,5 млрд лет, можно предположить, что разогревание планеты приведет к «обратному» ходу эволюционных процессов. Когда температура заметно превысит 30 °С, исчезнут все высшие многоклеточные организмы, а через 400–500 млн лет общая масса биосферы, выраженная в гигатоннах углерода, упадет примерно вдвое. Через 750 млн лет исчезнут все эукариотические организмы, а еще через 1,5 млрд лет – все существующие ныне прокариоты (бактерии и археи).
По: (Boynata et al., 2004), с добавлениями автора (Добрецов, 2009)

Монтаж из снимков планет Солнечной системы и четырех спутников Юпитера, сделанных американскими космическими аппаратами «Вояджер». Credit: NASA

Schred, 2002; Maruyama, Liou, 2005; Wignall, 2007; Добрецов, 2009; Sobolev et al., 2011).

На Венере же на ранних стадиях «параллельная» эволюция жизни и поверхности планеты могла идти долго и постепенно, и такие простейшие организмы, как бактерии, могли потом эмигрировать с поверхности в облачный слой, где есть вода и необходимые для жизни элементы. При этом бактерии могли концентрироваться на участках с пониженным уровнем H_2SO_4 и даже активно поддерживать этот уровень, используя энергию Солнца. Одним из косвенных доказательств существования на Венере живых организмов является обнаружение в ее облаках карбонильного сульфида $\text{CO}(\text{S})$, который образуется на Земле под каталитическим воздействием бактерий (David, 2003).

Что касается возможного будущего Земли, то при самом неблагоприятном развитии «венерианского» сценария люди могут заблаговременно переселиться на Луну



Современная атмосфера Венеры сформировалась, судя по разным оценкам, 1 или 2 млрд лет назад (а и б соответственно). На основе результатов моделирования изменений температуры поверхности Земли и Венеры в прошлом и будущем можно предположить, что остывание Земли после процесса аккреции продолжится в течение 5 млрд лет, а ее существенное нагревание начнется через 500 млн лет, считая от настоящего времени. В результате через 1,5 млрд лет после начала нагревания Земля может достигнуть состояния, близкого к современной Венере.

По: (Greenspoon, 1998; Bortman, 2004; Bounama et al., 2004; Розанов, 2009; Добрецов, 2009)

Двуглавая гора Сапас – один из самых зрелищных крупных вулканов Венеры с диаметром подножия около 400 км. Гора увенчана двумя кратерами, а ее склоны покрыты застывшими переплетающимися лавовыми потоками, некоторые из которых могли образоваться раньше вершин.
Credit: NASA/JPL

Когда Венера находится точно между Солнцем и Землей, можно наблюдать редкое астрономическое явление – «транзит Венеры», своего рода солнечное затмение, когда Венера перемещается по диску Солнца в виде маленького черного пятнышка.
Credit: NASA

или Марс, а бактерии – мигрировать в облачный слой, как это, вероятно, и произошло на Венере. Кстати сказать, и сейчас в земных облаках обнаруживаются вполне жизнеспособные специфические бактерии (Landis, 2003; David, 2003). Самым же фантастическим исходом можно считать возникновение на Земле альтернативной углеродно-кислородной формы жизни при переходе углерода в четверную координацию – «тетраэдрную», как у алмаза, и появление углеродно-кислородных цепочек, схожих с силикатными из пироксенов и амфиболов, которые содержат азот и фосфор и устойчивы при высокой температуре. Теоретически предсказано, что такая координация углерода может возникать при очень высоких давлениях, но не исключено, что в живых организмах она может существовать и в более мягких условиях. Но это, конечно, пока только предварительные идеи...

Литература

Адушкин В.В., Витязев А.В. Происхождение и эволюция Земли, современный взгляд // *Вестн. РАН*. 2007. Т. 77, № 5. С. 396–400.

Добрецов Н.Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 6. С. 761–784.

Жарков В.И. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука и образование, 2013. 414 с.

Засова Л.В., Морозов В.Н., Минкин В.И., Майоров Б.С. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км высоты // *Космические исследования*. 2006. № 44. С. 381–400.

Проблемы происхождения жизни. РАН, М.: ПИИ, 2009. С. 168–184.

Bortman H. Was Venus alive? The signs and probably there // *Astro-biology Mag.* 2004. N 8.

Bounama C., Blok W. von, Franck S. Das Ende des Raumschiffs Erde // *Spectrum der Wissenschaft*. October. 2004. P. 100–104.

Ernst R. E. Large igneous provinces. Cambridge Univ. Press. 2014. P. 653.

Grinspoon D. Venus Revealed: A new Look below the clouds // *Reading Mass.* 1998. ISBN 978 – 0201328394.

Head J. W. The geologic evolution of Venus: insights into Earth history // *Geology*. 2014. V. 42. P. 95–96.

Svedhem H., Titov D. V., Taylor F. C., Witasseo. Venus a more Earth like planet // *Nature*. 2007. V. 450. P. 629–632.

Wignall P. B. The link between large igneous province eruptions and mass extinction // *Elements*. 2005. V. 1. P. 293–297.