

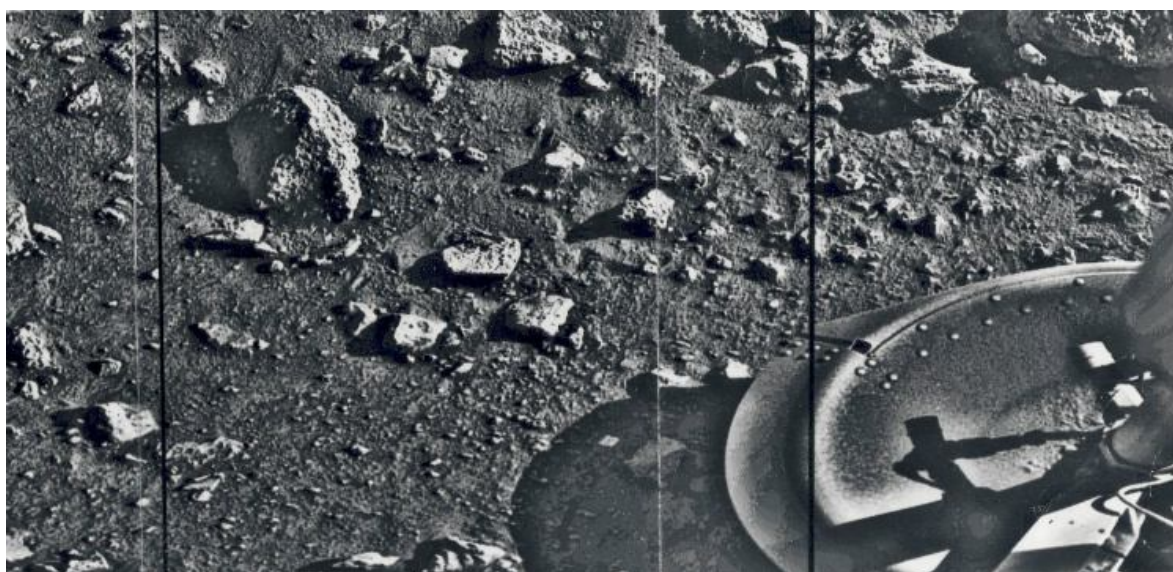


[\\_HELLMAUS\\_](#)

21:00, ВЧЕРА

12

## Атмосфера, вода и климат Земли, Марса и Венеры



Первая фотография Марса, сделанная космическим аппаратом, приземлившимся на его поверхность

[NASA](#), 1976 год

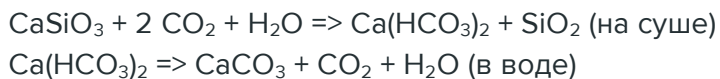
Три сестры, три соседних планеты земного типа образовались из материала примерно одинакового состава. Плотность и химия их атмосфер в древности были более похожи друг на друга, но сейчас они очень разные. Плотность атмосферы Венеры примерно в 5000 раз выше, чем атмосферы Марса, а атмосфера Земли выделяется своим химическим составом с высоким содержанием кислорода. Биолог [\\_HELLMAUS\\_](#) объясняет, почему же за 4,5 миллиарда лет планеты и их атмосферы стали такими разными.

Основной источник пополнения атмосферы — газы, которые выделяются из расплавленных минералов. В наше время эти газы выделяются при вулканических извержениях, а в древности также при падениях астероидов и прямо из океана магмы в те периоды, когда планета была достаточно горяча для этого. Усредненный состав газов из современных вулканов Земли выглядит следующим образом: 80-85% водяной пар, 10-12% CO<sub>2</sub>, 5% SO<sub>2</sub>, 1-2% HCl, малые

примеси водорода, сероводорода, метана и угарного газа.

Безвозвратные потери атмосферы в космос происходят двумя путями. Во-первых, при тепловом движении молекул некоторые из них могут получить скорость выше второй космической и улететь от планеты. Во-вторых, молекула атмосферы может получить высокую скорость и улететь от планеты при столкновении с заряженной частицей солнечного ветра. В обоих случаях легкие молекулы теряются чаще. Так, Земля и Венера (вторые космические скорости 11,2 и 10,4 км/с) легко теряют водород и гелий по тепловому механизму, но удерживают все остальные газы. Марс (вторая космическая скорость 5 км/с) так же будет заметно терять воду, метан и аммиак, но удержит азот, кислород и углекислый газ. «Сдувание» атмосферы солнечным ветром зависит больше не от массы планеты, а от наличия магнитного поля: молекулы атмосферы при столкновениях с частицами солнечного ветра обычно получают скорость намного выше второй космической, но ионизируются, оказываются захвачены магнитным полем, постепенно теряют в нем энергию и возвращаются в атмосферу. Магнитное поле Земли практически полностью защищает атмосферу от разрушения солнечным ветром, а для Марса с его слабым полем и Венеры вовсе без магнитного поля этот механизм потери атмосферы вносит основной вклад.

Кроме того, атмосферные газы могут вступать в химические реакции между собой и с поверхностью планеты. Например, при химическом выветривании горных пород углекислый газ переходит из атмосферы в карбонатные осадки:



Если карбонатные осадки попадают в горячие недра планеты, например, при поддвижении (субдукции) океанского дна под материк, карбонаты разрушаются и  $\text{CO}_2$  выделяется вновь в составе вулканических газов. Так даже на безжизненной планете происходит круговорот углерода.

Другие газы вступают в химические реакции прямо в атмосфере под действием ультрафиолетовых лучей. Широко известно, что из кислорода таким образом образуется озон, защищающий поверхность Земли от жесткого ультрафиолета. В геологических масштабах времени, впрочем, кислород и озон находятся в равновесии и глобального превращения всего кислорода в озон можно не опасаться. Для других газов это не так. Например, метан под действием ультрафиолета теряет водород. Если в атмосфере нет других химически активных газов, то образуются сложные углеводороды — производные ацетилена. Они придают оранжевый цвет атмосфере Титана, спутника Сатурна. Аммиак похожим образом разлагается на водород и азот, сероводород — на водород и пылинки элементарной серы. При том потоке ультрафиолета, который достигает атмосферы Земли и Марса, время жизни метана, аммиака и сероводорода в атмосфере не превышает миллиона лет. Вода тоже подвержена фотолизу на водород и кислород, но скорость этого процесса в сотни раз ниже, чем для

метана и аммиака. Азот и углекислый газ устойчивы к ультрафиолетовому излучению.

Если в атмосфере есть метан и малые количества кислорода, то основным продуктом фотолиза метана будут не ацетиленовые углеводороды, а формальдегид, который будет конденсироваться и выпадать с дождями. При одновременном фотолизе метана и аммиака одним из основных продуктов будет синильная кислота, тоже выпадающая с дождями.

Сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ) тоже подвержен фотолизу. В отсутствие кислорода он разрушается на серную кислоту ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и элементарную серу, в кислородной атмосфере — весь превращается в серную кислоту.

Таким образом, чтобы изначальная атмосфера сохранялась миллиарды лет, планета должна быть достаточно тяжелой и обладать значительным магнитным полем. Но даже в этих условиях устойчивы в течение миллиардов лет будут только азот, кислород, углекислый газ, водяной пар и инертные газы. Метан, аммиак и соединения серы в атмосфере неустойчивы и их запасы должны постоянно пополняться из недр планеты.

При образовании планет компоненты атмосферы могли попасть на них тремя путями. Во-первых, планета могла притянуть к себе какое-то количество газа из газового диска, пока он еще не рассеялся — в первые 10 млн лет Солнечной системы. Во-вторых, инертные газы, вода и азот в заметных количествах содержатся в хондритных метеоритах — остатках планетезималей, основных строительных блоков планет. В-третьих, как при образовании планет, так и в эпоху поздней метеоритной бомбардировки на них попало какое-то количество ледяных комет из внешних областей Солнечной системы. Помимо смешивания газов из этих трех источников, на состав атмосферы повлияли химические реакции, связавшие какую-то (возможно, большую) часть водорода и азота в недрах Земли. Однако, изотопный состав газов и соотношение количества разных инертных газов (не затронутое химией) поможет нам раскрыть происхождение атмосферы. Если метеориты доступны нам для прямого изучения на Земле, а к кометам летали космические зонды, то газ протопланетного диска давно рассеялся. Ближе всего к нему по составу, видимо, Солнце, но прямое его изучение невозможно, а дистанционные спектроскопические методы измеряют не все элементы и изотопы. Также хорошим приближением является атмосфера Юпитера, которую анализировал в 1995 году спускаемый аппарат зонда «Галилео».

(Изотопный состав метеоритов, атмосфер планет и возможные сценарии образования атмосферы излагаются по обзорам: Marty, 2012. «Earth and Planetary Science Letters» 313, doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.040; Halliday, 2013. «Geochimica et Cosmochimica Acta» 105, doi: 10.1016/j.gca.2012.11.015; и спецвыпуску журнала "Geochemical Perspectives" (номер 2 от 2013 года, автор всего номера Manuel Moreira)

По изотопному составу азота и водорода Земля и Марс очень близки к основному подтипу хондритных метеоритов — CI. Содержание тяжелых изотопов ( $^{15}\text{N}$  и дейтерий) в них выше, чем в атмосфере Юпитера, но ниже, чем в кометном льду. Одна из комет (103P/Hartley2) имеет содержание дейтерия такое же, как планеты и хондриты, но по изотопам азота все равно сильно отличается от них. Следовательно, вклад комет в запасы воды и азота на Земле и Марсе не превышает 10%. Это хорошо согласуется с оценкой массы комет, упавших на Землю в период поздней метеоритной бомбардировки, по количеству и размеру кратеров на Луне. Атмосфера Марса обогащена тяжелыми изотопами азота и водорода по сравнению с твердыми породами планеты, что проще всего объясняется сортировкой изотопов при потере атмосферы под действием солнечного ветра с тех пор, как на Марсе практически исчезло магнитное поле.

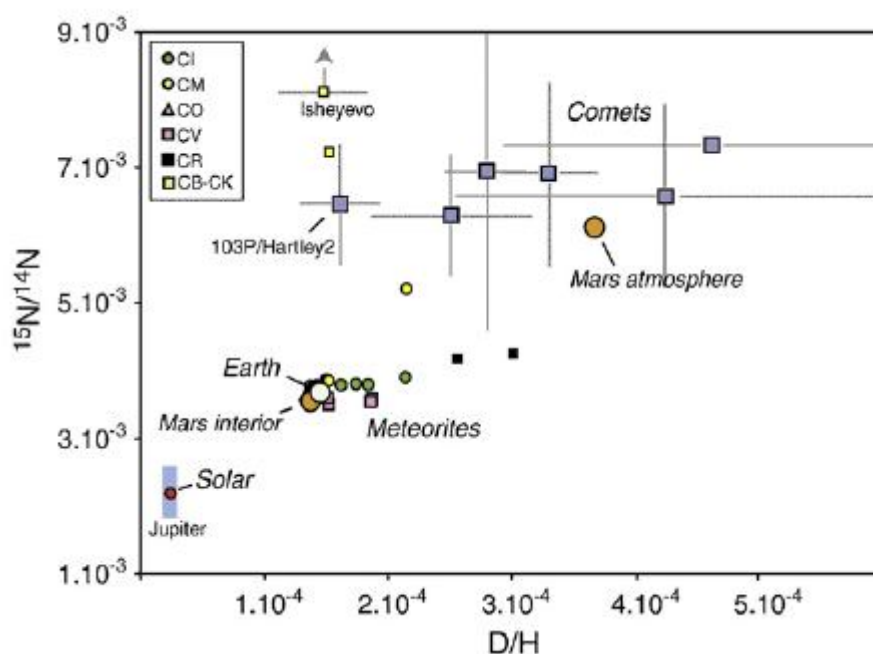
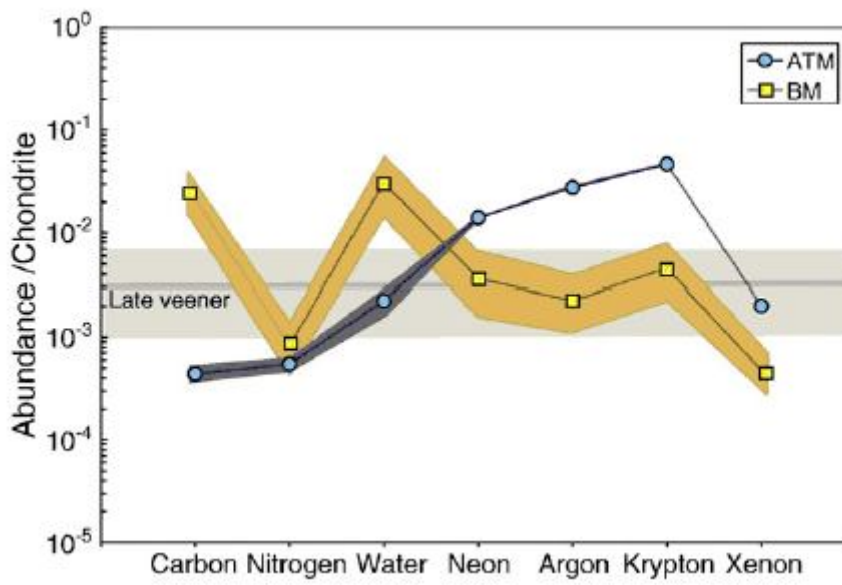
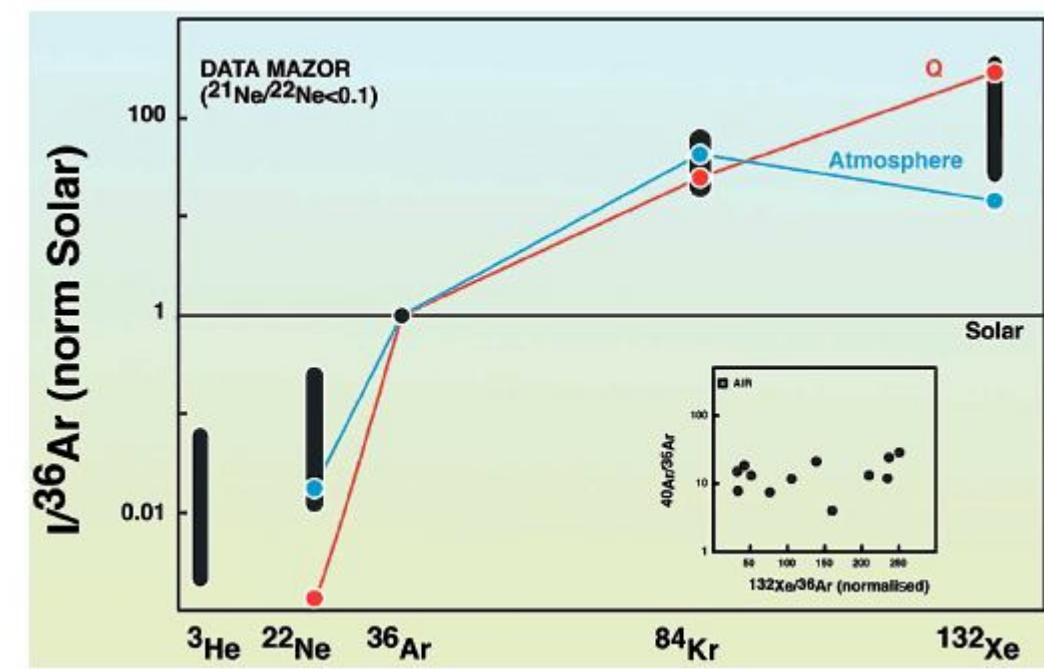


Диаграмма изотопного состава водорода и азота разных объектов Солнечной системы (Marty, 2012). CI, CM, CO, CV, CR, CB-CK — разновидности хондритных метеоритов



Содержание углерода, азота, воды и инертных газов на Земле относительно хондритных метеоритов. (Marty, 2012). Синие точки — атмосфера, желтые — мантия. Серая полоса — количество газов, которое могло быть получено с хондритными метеоритами во время поздней бомбардировки, рассчитано по содержанию платиновых металлов в хондритах и земной коре

По соотношению летучих элементов Земля отличается от хондритных метеоритов. Самое заметное отличие — это примерно десятикратная недостача азота и ксенона. Кроме того, количество криптона на Земле несколько больше, чем можно было бы ожидать по метеоритным соотношениям газов. Скорее всего, недостающий азот в процессе дифференциации Земли на ядро и мантию оказался в ядре: в экспериментах по растворимости азота в расплавленных базальтах и металлах с повышением давления азот все сильнее переходит в металлическую фазу, и в условиях нижней мантии его растворимость в железе в 10-20 раз выше, чем в магме. С ксеноном история сложнее, и мы вернемся к ней, после того как обсудим изотопные соотношения других инертных газов.



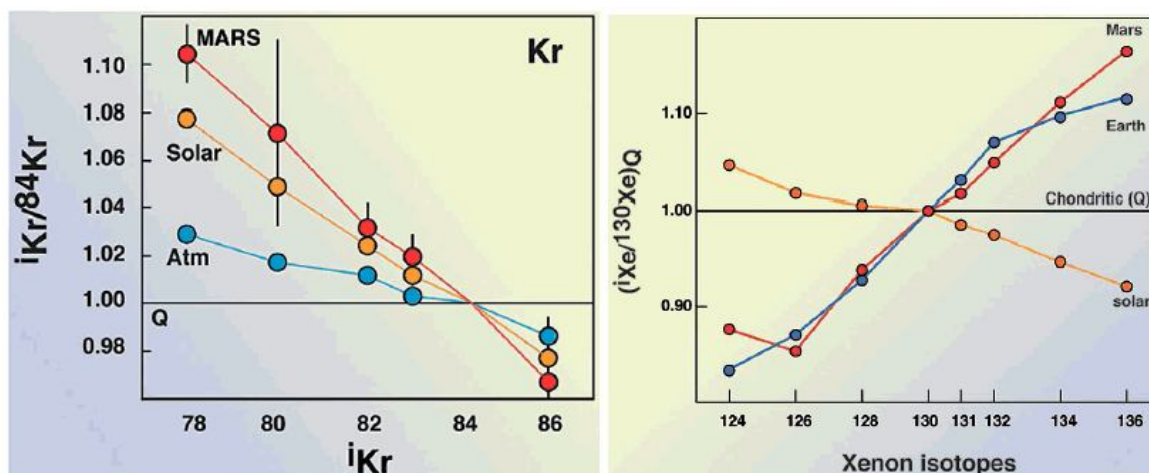
Содержание инертных газов в атмосфере Земли и хондритных метеоритах относительно солнечного состава (Moreira, 2013). Красные точки — фаза Q, черные полосы — суммарное содержание во всем метеорите для разных метеоритов.

Хондритные метеориты по относительному содержанию инертных газов, в свою очередь, сильно отличаются от газа протопланетного диска. Они обогащены тяжелыми газами, особенно криптоном, и бедны гелием и неоном. Кроме того, разные газы по-разному связаны в хондритах. Большая часть тяжелых инертных газов в них находится в составе «фазы Q». Так назван твердый остаток после растворения метеоритного вещества смесью соляной и плавиковой кислот. Такая обработка растворяет все силикаты, соли и малые органические молекулы, и фаза Q состоит в основном из аморфного углерода, похожего на сажу или активированный уголь. Инертные газы выходят из нее лишь при значительном нагревании (до 300-500 градусов) и связываются ею просто при контакте с газом. Гелий и неон содержатся в основном в силикатных зернах, причем только в их поверхностном слое, и выходят из твердого вещества легче. Они попали в метеоритное вещество из солнечного ветра, в виде ионов со значительной энергией, проникших под поверхность пылинки при столкновении.

Гелий в атмосфере Земли содержится в малых количествах и в основном в виде изотопа  $^4\text{He}$ , образовавшегося при распаде урана и тория. Из-за малой атомной массы атмосферный гелий относительно быстро (первые миллионы лет) улетучивается в космос. Так как уран и торий находятся в мантии и коре, можно ожидать, что в газовых пузырьках вулканических лав и шахтных газах содержание гелия будет выше, чем в атмосфере. Содержание гелия в подземных газах действительно больше, но и доля «изначального» изотопа  $^3\text{He}$  тоже выше! В газовых пузырьках лавы срединно-океанических хребтов отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в

5-8 раз выше атмосферного, а в лавах океанических островов — в 10-20 и в некоторых образцах даже в 70 раз. Извержения рифтовой зоны питаются из верхних 50-100 км мантии, тогда как вулканы океанических островов (Гавайи, Исландия, Галапагосы, Таити, Реюньон, Канары и другие) питаются из глубинных мантийных очагов. Точная их глубина неизвестна, но может превышать 1000 км. Таким образом, в глубинах Земли существует запас растворенного в магме первичного гелия, который продолжает выходить на поверхность и заметно примешивается к радиогенному  $^4\text{He}$ .

Неон в хондритах обогащен тяжелым изотопом  $^{22}\text{Ne}$  по сравнению с солнечным неоном. В атмосфере Земли обогащение  $^{22}\text{Ne}$  еще сильнее, а в базальтах океанических островов изотопный состав неона очень близок к хондритному. В породах срединно-океанических хребтов изотопный состав неона отражает смешивание в разных пропорциях «глубинного» и атмосферного неона и, кроме того, загрязнен изотопом  $^{21}\text{Ne}$ . Этот изотоп неона очень редок в космических источниках, но образуется в земной коре и мантии при ядерных реакциях альфа-частиц и нейтронов (испускаемых ураном) с атомами  $^{18}\text{O}$  и  $^{24}\text{Mg}$ . Аргон и в атмосфере, и в мантии имеет практически одинаковое соотношение первичных изотопов  $^{36}\text{Ar}$  и  $^{38}\text{Ar}$ , такое же, как в метеоритах, и слегка отличается от солнечного. Обогащение метеоритов тяжелым изотопом неона, как показали эксперименты, связано с сортировкой изотопов при проникновении ионов солнечного ветра в кристаллы.



Изотопный состав криптона и ксенона в атмосферах Земли, Марса и Солнца относительно состава хондритных метеоритов (Moreira, 2013)

Ксенон в атмосферах Земли и Марса имеет уникальный изотопный состав. Он сильно обогащен тяжелыми изотопами по сравнению как с метеоритным, так и с солнечным ксеноном. Такое изотопное обогащение проще всего объяснить сортировкой при потере атмосферы в космос, но атомная масса ксенона велика, и такая степень сортировки означает, что все более легкие газы должны быть потеряны в очень большой степени. Однако, и по соотношениям элементов, и по соотношениям изотопов аргона и криптона видно, что ничего подобного не происходило. Изотопные соотношения криптона в атмосфере Земли очень точно

соответствуют смешиванию метеоритного и солнечного криптона. В мантии же изотопный состав как криптона, так и ксенона несколько отличается от атмосферного в сторону метеоритных соотношений изотопов.

Для объяснения загадки ксенона (недостача и необычный изотопный состав) было создано множество гипотез. Например, предполагалось, что сортировка изотопов ксенона произошла при потере Землей первичной атмосферы, имевшей приблизительно солнечный состав. Потеря могла быть вызвана жестким ультрафиолетовым излучением или солнечным ветром молодого Солнца, либо гигантскими столкновениями на поздних этапах образования Земли, при этом все более легкие газы были потеряны практически полностью, а от первичного ксенона сохранилось около 10%. В дальнейшем Земля приобрела вторичную атмосферу, газы которой выделялись из океана магмы и из комет в период поздней бомбардировки. Эта гипотеза, к сожалению, противоречит данным об относительном обилии разных инертных газов: в магме лучше всего растворяются неон и гелий, и если бы газы сначала впитывались в океан магмы из плотной первичной атмосферы, а потом выделялись обратно, то на Земле было бы гораздо больше неона, чем аргона и тяжелых газов. На самом деле количество неона и в атмосфере, и в мантии, гораздо ниже, чем аргона, и хорошо соответствует соотношению этих газов в метеоритах. Один из возможных аргументов в пользу первичной атмосферы солнечного состава — изотопный состав водорода в лавах гавайских вулканов. В некоторых их образцах обнаруживается обеднение дейтерием на 10-15% по сравнению с океанской водой. Если это не вызвано каким-то неучтенным механизмом сортировки изотопов в глубинах Земли, то вполне возможно, что 10-15% воды на Земле происходит из водорода «солнечного» изотопного состава, и эта вода сконцентрирована в основном в нижней мантии. Можно было бы думать, что «метеоритный» изотопный состав океанов отражает смешивание примерно равных пропорций «солнечной» и «кометной» воды, а не ее метеоритное происхождение, но данные по изотопам азота сильно ограничивают вклад комет в водный бюджет Земли.

Чтобы первичная атмосфера заметной плотности могла существовать, необходимо, чтобы Земля набрала половину современной массы в первые 10 млн лет Солнечной системы, пока не рассеялся межпланетный газ. Модели формирования планет показывают, что это маловероятно. Скорее, межпланетный водород попадал в планетезимали и планетарные зародыши путем химических реакций с расплавленными минералами после столкновений — таким способом из межпланетного газа поглощается только водород, но не инертные газы.

Привлечение почти полностью потерянной первичной атмосферы для объяснения «ксеноновой загадки» противоречит и данным по Марсу. В атмосфере Марса ксенон показывает точно такую же изотопную сортировку, что и на Земле, хотя Марс в десять раз легче. Из-за массы Марс никогда не мог иметь первичную атмосферу, да и история его сильно отличается от земной. В марсианской мантии ксенон имеет вполне хондритный изотопный состав, в отличие от земной мантии и



атмосфер обеих планет. То есть можно сделать вывод, что сортировка изотопов, во-первых, происходила в атмосфере планет, а во-вторых, не зависела от их массы. Еще более интересные данные существуют по ксенону в пузырьках древних горных пород Земли. Оказывается, что 3,5 млрд лет назад земной ксенон был по изотопному составу довольно близок к метеоритному, а значит, изотопный состав менялся плавно на протяжении всей истории Земли (и, видимо, Марса). Мы так и не знаем, какой процесс разделил изотопы ксенона в атмосфере, не влияя на изотопы других газов, но основные предположения связаны с низкой энергией ионизации ксенона — ниже, чем у других инертных газов, а так же молекул азота и  $\text{CO}_2$ . Возможно, какие-то процессы с ионизированным ксеноном в верхних слоях атмосферы приводят к его медленному утеканию с планеты и сортировке изотопов. Различие мантий Земли и Марса, видимо, связано с тем, что тектоника плит есть только на Земле, и она заносит в мантию атмосферные газы вместе с осадками на океанском дне через зоны субдукции.

Роль комет в доставке газов на Землю оценить сложно. Прямых измерений содержания инертных газов в кометном льду до сих пор нет — первое бурение кометы с анализом льда будет проведено зондом «Розетта» в 2015 году. О содержании газов в кометах мы можем судить из экспериментов по росту льда из газовых смесей при низких температурах и давлениях. В этих экспериментах во льду больше всего накапливается криптон, в меньшей степени — ксенон и аргон и практически отсутствуют неон и гелий. Разделения изотопов не обнаружено. Некоторая примесь кометного льда хорошо объясняет изотопный состав земного криптона, промежуточный между метеоритным и солнечным, а так же избыток криптона по сравнению с метеоритным соотношением элементов. Однако, для других инертных газов вклад комет не превышает 10%.

Временную последовательность событий, происходивших с атмосферой, можно установить по радиогенным изотомам инертных газов. Так, большая часть земного ксенона находится в атмосфере, но изотоп  $^{129}\text{Xe}$  — продукт распада радиоактивного йода — распределен примерно поровну между атмосферой и мантией. Это означает, что на ранних этапах эволюции Земли почти весь ксенон вышел из мантии в атмосферу, а затем, пока  $^{129}\text{I}$  еще оставался, выход газов сильно замедлился. Период полураспада  $^{129}\text{I}$  составляет 17 млн лет, и следовательно, закрытие мантии произошло через 50-60 млн лет после образования Солнечной системы. Тяжелые изотопы ксенона — продукты деления  $^{244}\text{Pu}$  — дают почти такую же оценку времени закрытия мантии. Эта датировка хорошо согласуется с гафний-вольфрамовой датировкой образования Луны и подтверждает, что гигантский удар, породивший Луну, был последним в истории Земли. Эпизоды океана магмы, следовавшие после каждого такого удара, приводили к массивному выходу газов из мантии в атмосферу. С переходом от океана магмы к тектонике плит выход газов сильно замедлился, но продолжается. Судя по содержанию калия в горных породах, 30-40% изотопа  $^{40}\text{Ar}$ , возникшего при распаде калия, остается в глубинах Земли, но остальная часть вышла в атмосферу.

Потери атмосферы Земли в космос, по-видимому, были невелики. Почти полностью улетучились легкие газы — гелий и водород. Изотопное обогащение неона и ксенона соответствует потере примерно 30% исходного содержания неона и 80% ксенона, аргон и криптон практически не потерялись.

Атмосфера сильнее всего влияет на климат планеты. Тепловой баланс планеты складывается из нескольких источников: излучения Солнца и выделения тепла в недрах планеты благодаря радиоактивному распаду, гравитационной дифференциации и приливному трению. Тепло уходит в космос путем инфракрасного излучения через атмосферу. Поэтому прозрачность атмосферы для видимого света (основной путь энергии к планете) и инфракрасного излучения может очень сильно влиять на температуру планеты. Например, Венера получает в 3 раза меньше энергии на квадратный метр, чем Меркурий, однако температура ее поверхности почти на 200 градусов выше — благодаря парниковому эффекту от плотной углекислотной атмосферы. Кроме того, атмосфера распределяет тепло по поверхности планеты, поэтому перепады температур между дневным и ночным полушарием Венеры не превышают долей градуса, а на безатмосферном Меркурии — порядка 300 градусов.

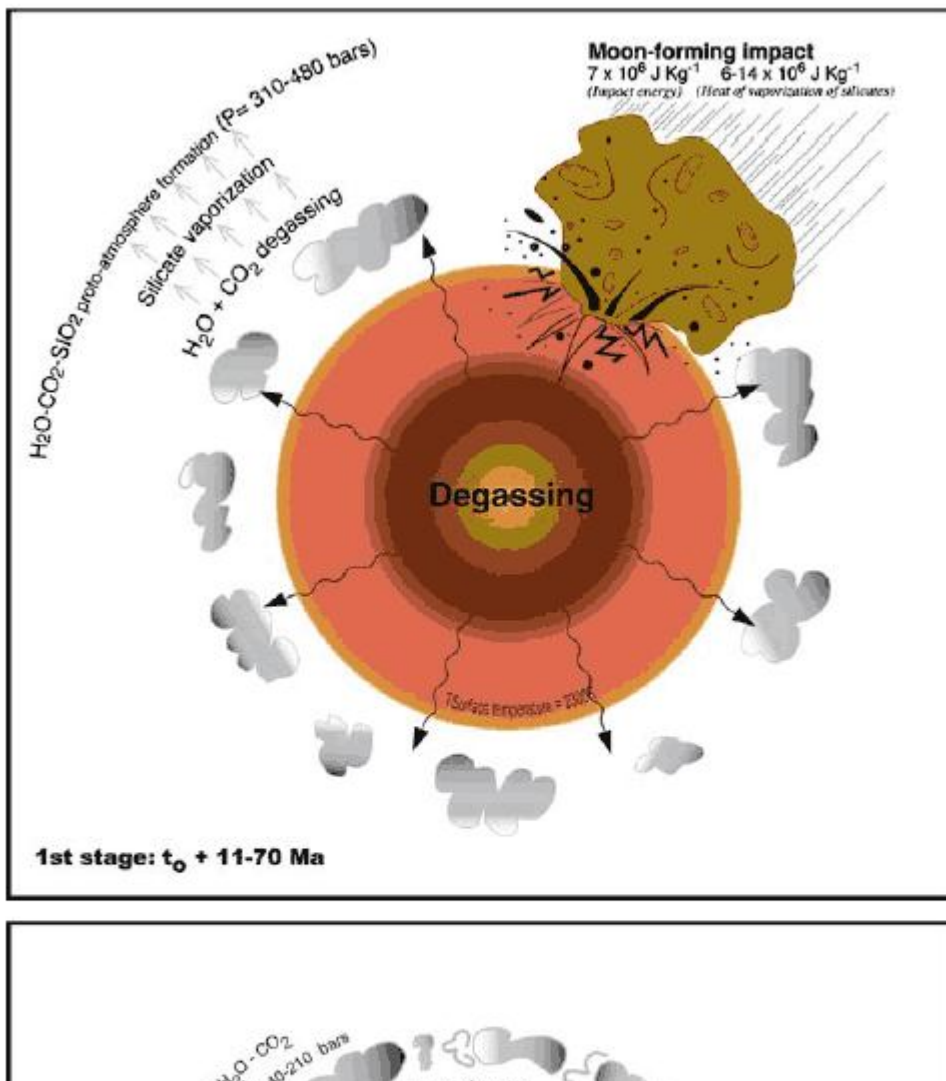
Парниковый эффект (избирательное поглощение инфракрасных лучей) обеспечивают три газа: углекислый газ, водяной пар и метан. Вклад углекислого газа прост и очевиден: чем его больше, тем сильнее поглощение инфракрасных лучей и больше парниковый эффект. Водяной пар же является парниковым газом, пока он пар; но конденсируясь в облака, он напротив, отражает в космос свет Солнца и охлаждает планету. Баланс между облаками и прозрачным водяным паром в атмосфере зависит от множества факторов и рассчитать его для древней Земли пока нереально. Наконец, вклад метана тоже неоднозначен. Сам по себе метан является очень активным парниковым газом. Однако, продукты его фотолиза — ацетиленовые углеводороды — образуют дымку, поглощающую видимый свет. На Титане с его атмосферой из азота и 1% метана из-за антипарникового эффекта этой дымки температура поверхности примерно на 10 градусов ниже, чем была бы при чисто азотной атмосфере. Чтобы метан в атмосфере увеличивал температуру планеты, его концентрация должна быть достаточно низкой, до 0,1%, чтобы фотолиз шел в сторону быстро выпадающих с дождями формальдегида и синильной кислоты.

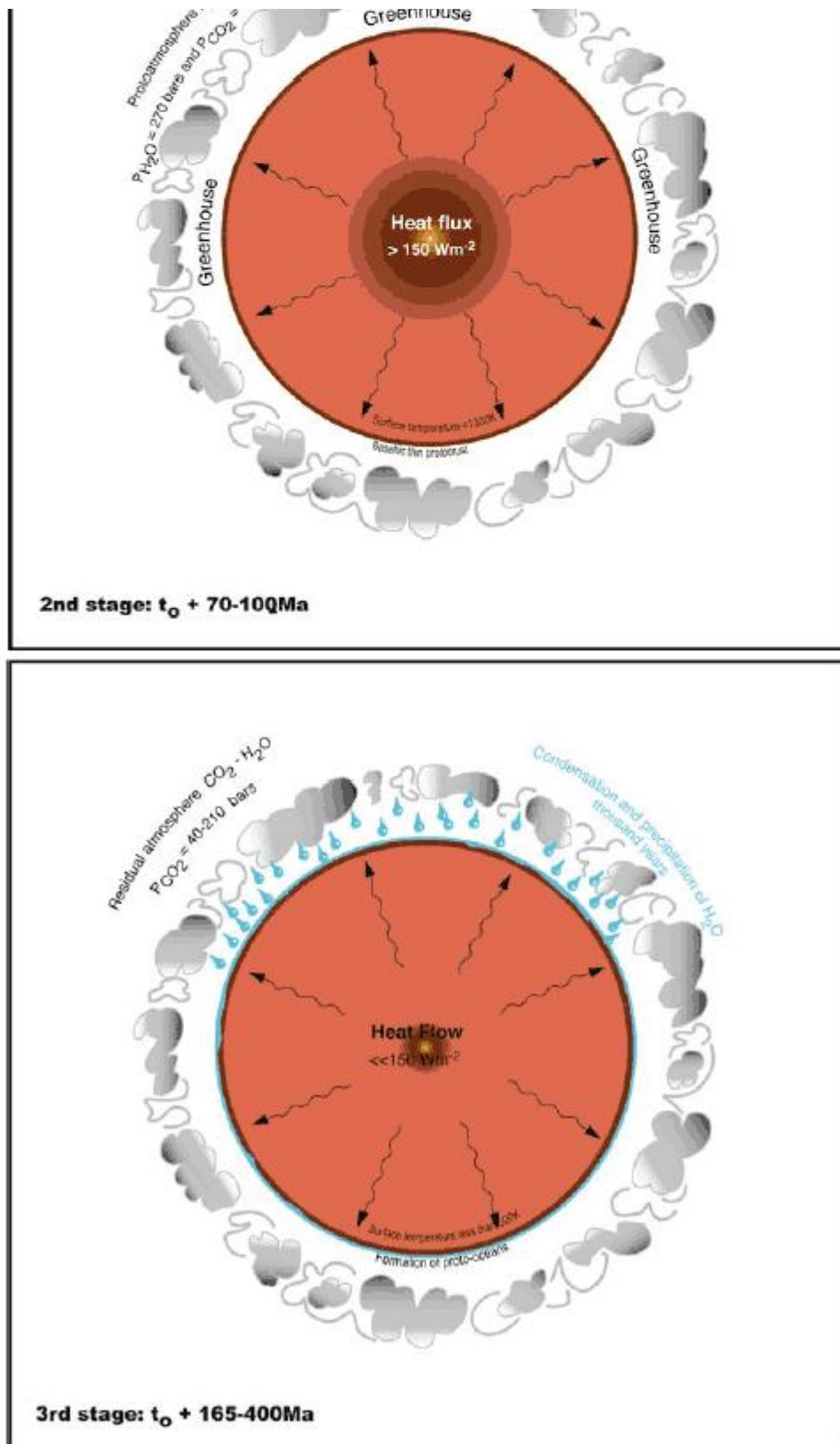
Совместное действие парникового эффекта и химического выветривания может стабилизировать климат планеты. При повышении температуры и влажности химическое выветривание ускоряется,  $\text{CO}_2$  изымается из атмосферы, приводя к ослаблению парникового эффекта и падению температуры. Оледенение блокирует доступ  $\text{CO}_2$  к горным породам, в результате  $\text{CO}_2$  накапливается в атмосфере, усиливает парниковый эффект и приводит к таянию льдов.

Тепловой баланс планет в прошлом можно рассчитать. Радиоактивное тепло и гравитационная дифференциация вносили сколько-нибудь заметный вклад лишь в первые 50-100 млн лет истории планеты. Выделение тепла за счет приливного

трения тоже было велико лишь в первые 10-20 млн лет после образования Луны и с тех пор неуклонно снижалось. Основным источником тепла для планет практически всегда было Солнце. Светимость молодого Солнца, после того как оно прошло стадию Т Tauri с мощными ультрафиолетовыми вспышками и вышло на устойчивый режим термоядерных реакций, была примерно на 30% ниже современного уровня. Если бы Земля тогда имела такую же атмосферу, как сейчас, она бы полностью покрылась льдами. Однако, следы оледенений в геологической летописи архейского периода ограничены одним эпизодом 2,9 млрд лет назад, а из более древних времен известны только океанские и озерные осадки. Следовательно, древняя атмосфера Земли создавала сильный парниковый эффект.

Образование Земли должно было включать несколько десятков столкновений сравнимого масштаба. Выделение энергии при таких ударах приводило к расплавлению поверхности Земли до состояния «океана магмы». Эпизоды «океана магмы» после гигантских столкновений могли продолжаться по 1-2 млн лет благодаря парниковому эффекту от плотной атмосферы из CO<sub>2</sub> и паров воды, давление которой могло в 500 раз превышать современное (Martin и др, 2006. «Earth, Moon, and Planets» 98(1-4), doi: 10.1007/s11038-006-9088-4).





Основные стадии образования атмосферы и океанов Земли (Martin и др, 2006)

Для формирования океанов необходимо, чтобы поверхность Земли была покрыта земной корой, то есть, чтобы «океан магмы» покрывался твердыми породами. С учетом давления древней атмосферы жидкая вода могла существовать при

температурах до 300-350 градусов. Конденсация водяных паров из атмосферы в океан уменьшает парниковый эффект и температуру на поверхности Земли, поэтому переход от воды в атмосфере к океанам шел с ускорением и мог произойти очень быстро, в течение 10 000 лет. Расчеты показывают, что для затвердевания земной коры и конденсации океанов необходимо, чтобы тепловой поток из недр Земли упал ниже примерно 150 ватт/м<sup>2</sup>. Этот порог мог быть пройден первый раз еще до окончания формирования Земли и удара, породившего Луну. Однако, после каждого столкновения выделение тепла внутри Земли усиливалось за счет опускания железного ядра упавшего планетарного зародыша к центру Земли и поверхность опять превращалась в океан магмы. Водные океаны в последний раз начали конденсироваться через 10-20 млн лет после образования Луны и стали устойчивы, когда тепловой поток из недр Земли упал до 1 ватт/м<sup>2</sup> (современное значение — 0,2 ватт/м<sup>2</sup>). По расчетам, это значение теплового потока было достигнуто через 50-100 млн лет после образования Луны. Основным компонентом атмосферы остался углекислый газ.

Осадки карбонатов на Земле содержат около  $1,8 \cdot 10^{20}$  килограмм CO<sub>2</sub>, что хватило бы на три атмосферы Венеры. Если весь этот CO<sub>2</sub> был в атмосфере после стадии океана магмы (скорее всего так и было), то средняя температура Земли за счет парникового эффекта достигала 210 градусов. Изъятие CO<sub>2</sub> из атмосферы происходило за счет химического выветривания. Для эффективного захоронения углекислого газа в земной коре необходима была, во-первых, активная тектоника плит, убирающая в толщу коры карбонатные осадки со дна океанов, и во-вторых, достаточно толстая и не слишком горячая земная кора, в которой карбонаты могли бы захораниваться и не разлагаться. По моделям этого процесса, захоронение углекислого газа шло с ускорением, температура Земли долго держалась около 200-240 градусов, а потом падала все быстрее. Охлаждение со 100 градусов (температура, при которой могут жить гипертермофильные бактерии) до 40 градусов заняло, скорее всего, 1-2 млн лет, а с 200 до 100 градусов — 20-100 млн лет. Такой разброс связан с большими неточностями в оценке ранней тектоники плит. Соотношение изотопов кислорода в цирконах Джек Хилл, древнейшим из которых 4,4 млрд лет, может быть связано с их взаимодействием с жидкой водой при температуре 70-100 градусов. Это согласуется с моделями захоронения CO<sub>2</sub> из ранней атмосферы Земли.

Равновесный уровень CO<sub>2</sub>, достигаемый в процессе захоронения, оценить гораздо сложнее. Оценки равновесного парциального давления разнятся от 0,1 до 5 атмосфер, что соответствует средней температуре Земли от -50 до +50 градусов. В первом случае полного замерзания все равно не происходит — остаются теплые оазисы вокруг многочисленных активных вулканов. Кроме того, эти оценки не учитывают вклад метана в парниковый эффект. Хотя метан в атмосфере нестабилен, он постоянно образуется в процессе серпентинизации океанской коры. Это реакции горячей (300-500 градусов) воды с базальтами, в которых железо базальта окисляется до трехвалентного (магнетит), а вода восстанавливается до водорода. В присутствии CO<sub>2</sub> водород тут же реагирует с ним и основными продуктами становятся метан и муравьиная кислота. В воде

относительно прохладных (70 градусов) геотермальных источников Лост Сити (Срединно-Атлантический хребет) содержание метана и муравьиной кислоты достигает 50 мг/л, а в древности выход метана мог быть гораздо больше. Так что примесь метана в древней атмосфере могла составлять до 0,1%, а его вклад в парниковый эффект — 20-30 градусов температуры. Кроме того, появление фотосинтезирующей жизни должно было уменьшить концентрацию  $\text{CO}_2$  в атмосфере и температуру по сравнению с безжизненной Землей, а следы оледенений в архейском периоде ограничены одним эпизодом 2,9 млрд лет назад. Следовательно, в более ранних эпохах климат Земли был теплым, а оледенений не было. Оледенения, последовавшие в протерозойскую и фанерозойскую эры, были следствием работы фотосинтетических организмов, изымавших из атмосферы углекислый газ и выделявших кислород. Благодаря им температура Земли не слишком меняется, несмотря на 30% увеличение светимости Солнца с начала архея.

Марс, по сравнению с Землей, имеет примерно в 100 раз меньшую массу атмосферы и основные газы в ней обогащены тяжелыми изотопами. Это изотопное смещение наблюдается у водорода, азота, неона и аргона и свидетельствует о заметной потере атмосферы в космос. Криптон в атмосфере Марса имеет необычный состав, он обогащен легкими изотопами по сравнению как с солнечным, так и с метеоритным криптоном. Ксенон обогащен тяжелыми изотопами в атмосфере, подобно Земле, но мантийный ксенон Марса по составу совпадает с метеоритным. Все эти особенности, кроме изотопного состава криптона, хорошо объясняются сдуванием атмосферы солнечным ветром, которое происходит и сейчас.

Содержание среднелетучих элементов (натрий, хлор, сера) в коре Марса в несколько раз выше, чем на Земле. Это скорее всего означает, что Марс избежал стадии океана магмы, что согласуется с его малой массой и, следовательно, меньшей энергией падающих планетезималей. Проблема тусклого молодого Солнца для Марса стоит еще острее, чем для Земли, потому что Марс находится дальше от Солнца. Следовательно, парниковый эффект древней атмосферы Марса был очень велик, увеличивая температуру примерно на 100 градусов. Многочисленные следы жидкой воды в виде речных долин и каньонов сохранились на Марсе с древних времен. Исходя из изотопного состава оставшейся на Марсе воды и содержания воды в метеоритах, можно заключить, что когда-то низины северного полушария — треть поверхности планеты — были покрыты океаном с глубинами до 5 км.

Поздняя метеоритная бомбардировка могла привести к значительным потерям атмосферы. Мгновенный нагрев заметной части атмосферы до 3000 градусов, ожидаемый при падении 200-километрового астероида, оставившего след в виде равнины Эллады, разгоняет молекулы атмосферы до таких скоростей, что слабое тяготение Марса не удерживает многие из них. Магнитные аномалии Марса, о которых говорилось в предыдущей главе, сохранили историю быстрого угасания магнитного поля планеты около 3,5 млрд лет назад, после чего потеря атмосферы продолжилась, а вместе с ней терялась вода и падала температура поверхности.

Так Марс, лишившись магнитного поля, стал холодным и сухим. С тех пор самые заметные перемены, происходившие на Марсе — это ледниковые периоды. Они вызваны изменениями наклона оси вращения планеты, которые, как упоминалось раньше, происходят хаотически из-за приливного взаимодействия с Солнцем, Юпитером и Землей. При увеличении наклона с современных 25 градусов до 35-40 полюса получают больше тепла, лед полярных шапок испаряется и выпадает снегом по всей поверхности планеты.

Одной из загадок Марса является отсутствие карбонатов. Нигде на планете не найдено мощных карбонатных отложений, характерных для Земли, хотя все условия для их образования были — легко выветриваемые базальтовые породы на поверхности, углекислотная атмосфера и жидкая вода. Тем не менее на Марсе найден только карбонат магния, и только в составе летучий пыли, а не в массивных отложениях. Одной из причин отсутствия карбонатных осадков могла быть высокая кислотность водоемов, связанная с высоким содержанием серы и хлора (Fairén и др, 2004. «Nature» 431, doi: 10.1038/nature02911) Такие кислые озера и океаны быстро возвращали бы углекислый газ в атмосферу. Однако, на Марсе так же сохранились филлосиликаты — легко выветриваемые породы, возраст самых древних из них достигает 4 млрд лет. В присутствии углекислого газа и тем более кислотных дождей с серной и соляной кислотой они должны были давно раствориться, однако этого почему-то не произошло.

Самое заметное отличие Венеры — сверхплотная углекислотная атмосфера — оказывается не единственным. Как мы видели, Земля в эпохи океана магмы тоже имела такую атмосферу. Ничтожное количество воды на Венере и сильнейшее изотопное обогащение ее дейтерием (в 200 раз по сравнению с Землей) указывают, что большая часть воды была потеряна в космос, а нынешние остатки — примерно одна десятиmillionная часть древних запасов, которые не уступали земным.

Однако, атмосфера Венеры отличается от земной и по инертным газам. Измерения количества и изотопного состава гелия, криптона и ксенона на Венере пока не удалось провести сколько-нибудь точно, но данные по неону и аргону есть и вызывают серьезные вопросы. Так, количество неона на Венере примерно в 10 раз выше, чем на Земле. Исходные изотопы аргона ( $^{36}\text{Ar}$  и  $^{38}\text{Ar}$ ) находятся в ее атмосфере в огромном количестве, в 200 раз больше, чем на Земле. Соотношение этих двух изотопов соответствует не метеоритному, как на Земле, а солнечному. Наконец, количество  $^{40}\text{Ar}$  на Венере почти втрое меньше земного. С учетом одинакового содержания калия в обеих планетах это означает, что лишь 25% этого изотопа вышли в атмосферу, по сравнению с 60-70% на Земле (Kaula, 1999. «Icarus» 139(1), doi: 10.1006/icar.1999.6082). Удержание аргона-40 в мантии означает, что большую часть истории Венеры она была геологически неактивна. Существуют гипотезы, что массовые извержения вулканов, залившие лавой почти всю поверхность планеты 600-800 млн лет назад, были катастрофой, оборвавшей эпоху тектоники плит, или напротив, что массовые извержения шли постоянно почти 4 миллиарда лет и 600 млн лет назад

резко прекратились. Однако в обоих этих случаях аргон-40 должен был эффективно выходить в атмосферу. То, что три четверти этого аргона осталось в мантии, можно объяснить, если периоды активного вулканизма происходят редко, 2-3 раза за миллиард лет, и выбрасывают на поверхность лишь верхний слой расслоенной, плохо перемешиваемой мантии. Для объяснения малого количества  $^{40}\text{Ar}$  в атмосфере Венера должна существовать в таком режиме уже 3,5 млрд лет.

Избыток неона и «солнечного» аргона объяснить труднее. Если лишний аргон был доставлен с кометами, то вместе с ним должен был добавиться и криптон. Если же Венера поглотила его из первичной атмосферы солнечного состава, то неона должно было быть захвачено еще больше. И то, и другое не подтверждается. Так что в происхождении атмосферы Венеры остаются серьезные тайны. Дальнейшая эволюция атмосферы Венеры по каким-то причинам пошла совершенно не так, как на Земле. Углекислый газ не был связан в карбонаты, а вода улетучилась в космос. Углекислый газ мог остаться в атмосфере из-за отсутствия тектоники плит, в силу слишком высокой температуры или из-за недостатка воды, необходимой для химического выветривания. Мы пока не знаем, какое из трех изначальных отличий Венеры от Земли привело к такому результату — отсутствие Луны, направляющей движения литосферных плит, меньшее расстояние до Солнца, ведущее к более высокой температуре, или неизвестное отличие в происхождении атмосферы, следами которого остались высокие концентрации аргона и неона.

РЕПОСТ

1

Я рекомендую

2

Твитнуть

0

g+1

1

<meta http-  
equiv="refresh"

ОБСУДИТЬ В БЛОГЕ АВТОРА

ЖУРНАЛ ЖЖ

ЖУРНАЛ ЖЖ

KIOWA\_MIKE 12

Атмосфера, вода и климат  
Земли, Марса и Венеры

\_HELLMAUS\_ 12

ORSA\_MAGGIORE 15



[MIKHAEL\\_MARK](#) 11

---

## СМОТРИТЕ ТАКЖЕ

[LENNIKOV](#)

[ZELENYIKOT](#)

[MECHANISMONE](#)