

ПЛАНЕТОЛОГИЯ

Дэвид Джуитт  
и Эдвард Янг

# Океаны с небес

Новые данные возродили дискуссию по поводу того, были ли кометы, астероиды или другие космические тела единственными источниками воды на нашей планете



## ОБ АВТОРАХ

**Дэвид Джуитт** (David Jewitt) заинтересовался астрономией в возрасте семи лет под впечатлением увиденного им завораживающего зрелища — метеорного дождя над Лондоном. Ныне он член Национальной академии наук США, профессор Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе.



**Эдвард Янг** (Edward D. Young) — профессор геохимии и космохимии, работает в Институте планет и экзопланет Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Занимается историей Солнечной системы, изучая химию метеоритов, межзвездной среды и других звезд с помощью сложных лабораторных приборов и самого большого в мире телескопа.



**С**тоя на берегу океана и любуясь бегущими откуда-то из-за горизонта волнами, невольно задумываешься о том, что эта стихия неподвластна времени. Наши древние предки именно такой ее и представляли. Многочисленные легенды и мифы повествуют, что водная пучина существовала до появления суши и даже света. Теперь мы знаем, что Землю не всегда покрывал Мировой океан. Его воды — так же как каждая капля дождя, каждый порыв влажного воздуха и каждый глоток из чашки — это напоминание о давно минувших эпохах, когда океаны буквально падали с небес.

Вся вода в Солнечной системе берет начало от гигантского первичного облака из газа и пыли, которое более 4 млрд лет назад резко сжалось, образовав Солнце и планеты. В этом облаке в избытке присутствовали водород и кислород — два химических элемента, из которых состоит вода,  $H_2O$ . В обогащенности газопылевого облака именно этими составляющими нет ничего удивительного, поскольку водород и кислород — это первый и третий среди самых распространенных химических элементов во Вселенной (второе место занимает химически инертный гелий). Большую часть газа вобрали в себя Солнце и газовые

планеты-гиганты, которые сформировались раньше, чем твердые планеты. Значительное количество оставшегося кислорода образовало химические связи с атомами других элементов, таких как углерод и магний, но даже после этого из свободных водорода и кислорода могло образоваться в несколько раз больше воды, чем твердой породы.

Однако результат оказался совсем не таким, какой следует из сказанного. Земля и ее соседи, Меркурий, Марс и Венера, — это твердые планеты, а не водные миры. Их относительно скудные запасы воды — результат того, где и как они сформировались. Когда газопылевое облако — колыбель Солнечной системы — резко сжалось, составляющее его вещество сплющилось во вращающийся диск, где и родились все планеты. Формирование твердых планет было, по видимому, медленным долгим процессом, в ходе которого малые объекты сталкивались и соединялись, образуя более крупные: микроскопические песчинки становились гравием, который затем превращался в булыжники, а те, в свою очередь, — в километровые каменные глыбы, называемые планетезималями, — строительный материал для планет. Многие планетезимали, оставшиеся со времен формирования планет, стали космическими объектами, которые известны сегодня как астероиды и кометы.

## ! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Под действием тепла и света вблизи молодого Солнца в период формирования планет вода оказалась на периферии Солнечной системы, что привело к образованию относительно сухих внутренних планет.
- Возможно, вода попала на Землю позднее в составе метеоритов и комет. Однако имеющиеся сегодня данные допускают множество других сценариев.
- Вопрос об источнике воды на нашей планете останется без ответа до тех пор, пока не будут исследованы другие области Солнечной системы.
- Возможно, однако, окончательное решение этого вопроса не будет найдено никогда.

Вероятно, во внутренних областях диска, ближе к Солнцу, тепло от сильно разогретого трением газа и интенсивное излучение звезды выпарили водород и другие легкие химические элементы, оставив почти безводные вещества, из которых и сформировались планеты. В то время как вблизи Солнца росли каменные безводные громады, вдали от него, примерно там, где сейчас находятся пояс астероидов и орбита Юпитера, температура диска была достаточно низкой, чтобы вода и другие летучие вещества превратились в лед. Астрономы называют границу между этими областями снеговой линией, и, согласно общепринятому мнению, большая часть воды на Земле попала к нам из тех краев. Она пролилась на нашу планету в виде ливней из ледяных астероидов и комет, которые обрушивались на внутренние области Солнечной системы на последних стадиях формирования планет.

Недавние наблюдения других звезд, окруженных формирующимися планетами, также свидетельствуют о существовании снеговых линий и столкновении «поздних» планетезималей. Всматриваясь в глубины межзвездного пространства, можно увидеть, что там протекают такие же процессы, какие давным-давно имели место в Солнечной системе. Но все равно многие стороны долгой истории образования океанов на Земле остаются загадкой и по-прежнему составляют предмет напряженных исследований. Хотя океаны казались нам вечными и неизменными, новые факты приближают нас к ответу на вопрос, как и где океаны сформировались и произошло ли это в основном при участии комет и астероидов или же иным путем.

### Планета-океан суше, чем старая кость

Из космоса Земля кажется «планетой-океаном». Вода покрывает более двух третей ее поверхности; кроме того, на ее долю приходится более 2/3 массы тела типичного землянина. Океаны, средняя глубина которых равна 4 км, вмещают достаточно воды для заполнения ею сферы диаметром 1,3 тыс. км. Однако, к удивлению многих, масса Мирового океана составляет лишь 0,02% массы Земли. Другими словами, если бы наша планета была 300-тонным «Боингом-777», вся вода Мирового океана весила бы столько же, сколько один-единственный пассажир. А пресная вода, которая содержится в полярных шапках, облаках, реках, озерах, почве, флоре и фауне планеты, составляет лишь крошечную часть ее общего количества.

Много воды скрыто глубоко под земной поверхностью, в твердой мантии планеты, которая простирается более чем на 3 тыс. км вглубь от уровня коры до верхней границы жидкого металлического ядра. Вода там находится не в свободном состоянии. Она связана с горными породами и минералами, которые когда-то погрузились под земную кору в ходе тектонических процессов. Некоторая часть этой связанной влаги вырывается на поверхность при извержении вулканов, но основная ее масса остается в мантии. Еще глубже находится массивное железоникелевое ядро Земли. На его долю приходится 30% массы планеты, и, возможно, в нем содержится даже больше воды, чем в мантии. Дело в том, что присутствующий в ядре водород мог бы связаться с кислородом, не будь там огромного давления и высокой температуры.

Сколько воды содержится в недрах нашей планеты, в точности не знает никто. Эта неопределенность связана с отсутствием образцов и слабым пониманием того, насколько активно вода перемещается к поверхности и от нее. Разумно

**Если представить, что Земля — это «Боинг-777» при полной загрузке, то масса Мирового океана не превысит массы одного пассажира. Как ни странно, но наша планета в 100 раз суше, чем какая-нибудь старая кость**

предположить, что одна только мантия содержит по меньшей мере еще целый океан воды, что вдвое увеличивает водные ресурсы Земли. Но даже при таких условиях на долю воды приходится лишь 0,04% массы планеты, что эквивалентно массе двух пассажиров «Боинга-777» при полной загрузке. Как это ни странно, на самом деле Земля в 100 раз суше, чем старая-престарая кость, содержащая минимальное количество влаги. Тем не менее вопрос о том, как вода, о существовании которой нам доподлинно известно, попала на нашу планету, остается открытым.

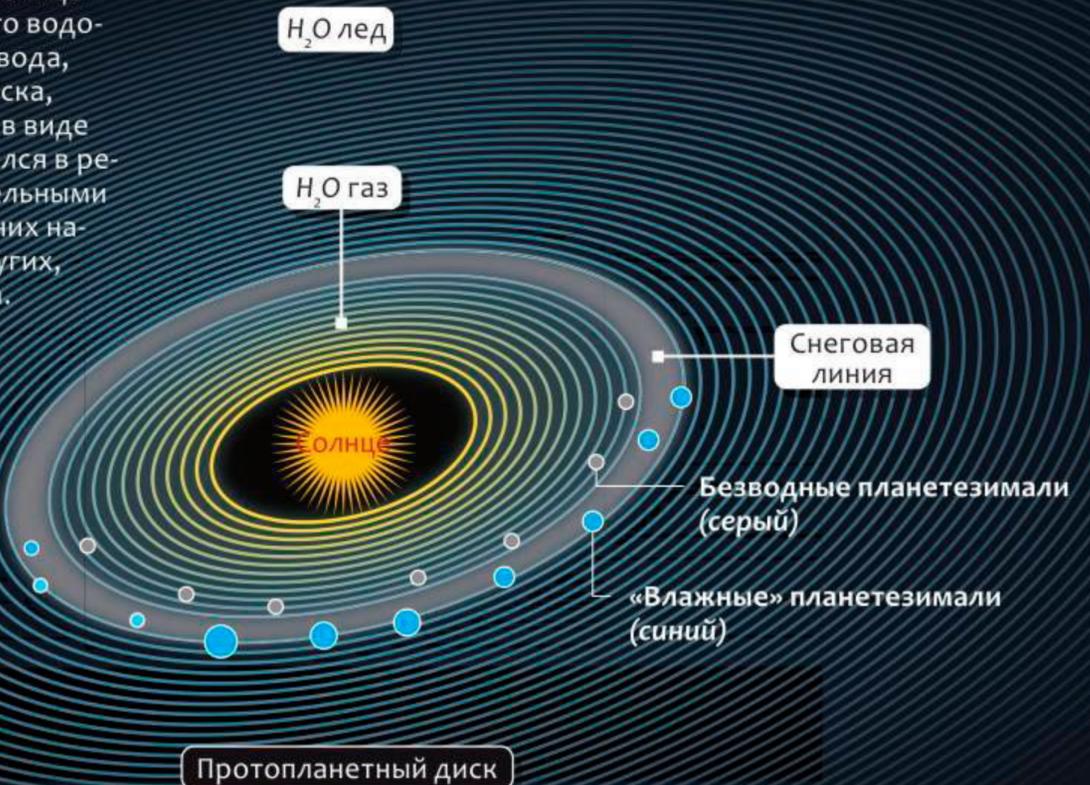
### Кометы или астероиды?

Считается, что вначале Земля была даже суше, чем сегодня. Что же могло стать источником воды на относительно поздней стадии формирования Земли, когда уже образовалась Луна?

У молодой Земли, как и у других твердых планет Солнечной системы, поверхность была в частично расплавленном состоянии на протяжении как минимум десятков миллионов лет после рождения. Связано это с тем, что в те времена на нашу

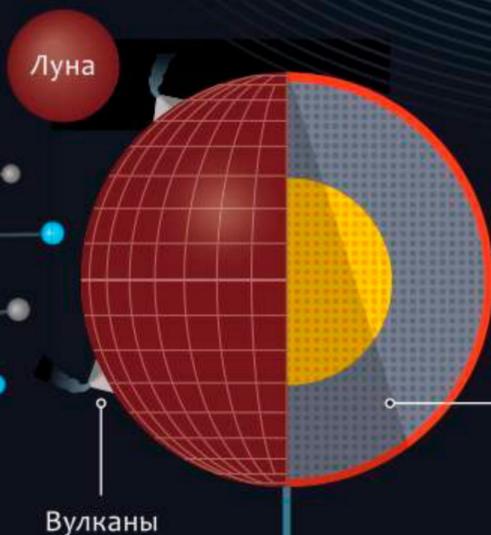
## ЗАПУТАННАЯ ИСТОРИЯ

На Земле не всегда были океаны. 4,5 млрд лет назад самой нашей планеты вообще могло не существовать, она только формировалась в огромном, вращающемся вокруг Солнца диске из газа и пыли. В этом диске содержалось много водорода и кислорода — элементов, из которых состоит вода, но сама она находилась в основном на периферии диска, за так называемой снеговой линией, и существовала в виде льда. Наш мир, каким мы его знаем теперь, образовался в результате бесчисленных столкновений между строительными блоками планет — планетезималиями. Некоторые из них находились близко к Солнцу и были безводными, на других, располагающихся за снеговой линией, имелась влага. Эти последние и снабжали водой нашу юную планету. Однако до появления океанов в их нынешнем виде было далеко. Большинство ученых склоняются именно к такому развитию событий, но расходятся по поводу того, действительно ли кометы или астероиды доставили основную массу воды на Землю.



### 4 Последствия

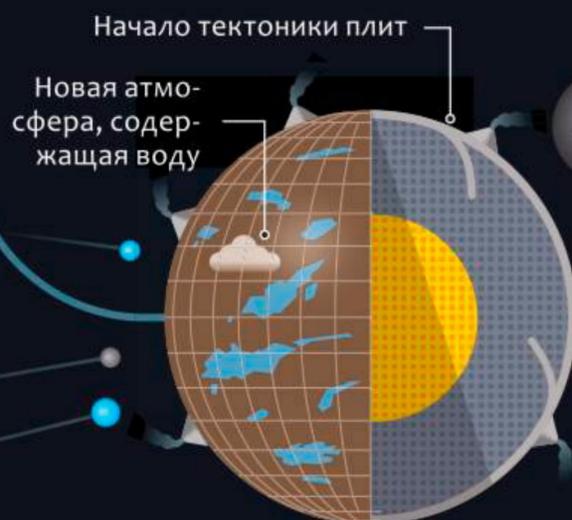
Безводная Земля медленно восстанавливается после породившего Луну столкновения. В результате вулканической деятельности и падения космических тел постепенно образуется атмосфера.



Мантия с относительно малым содержанием воды

### 5 Остывание

Вода, доставленная упавшими космическими телами и поднимавшаяся из недр при извержении вулканов, образует на остывающей поверхности земли небольшие моря.



### 6 Пополнение водных запасов

Планету бомбардируют оставшиеся планетезимали (смесь астероидов и комет) из внешних, богатых водой, областей Солнечной системы. Из насыщенных парами воды облаков на Землю проливаются океаны воды.



3,9 млрд лет назад

### 1 Горячее начало

Во время формирования наша планета находилась в расплавленном состоянии, но в мантии удерживалось некоторое количество воды.

### 2 Протоземля

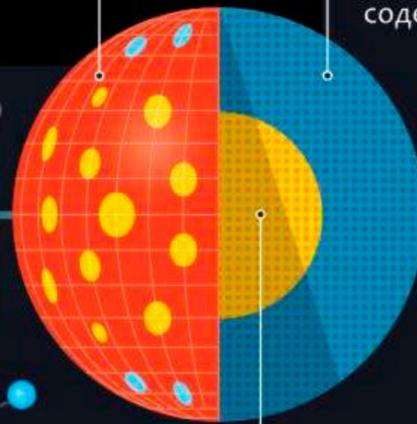
В результате падения планетезималей будущая Земля наращивала массу. Из опускающихся к центру тяжелых элементов формировалось ядро. Большая часть воды в составе гидратированных минералов сосредоточена в мантии, но некоторое ее количество находится на остывающей поверхности.

4,55 млрд лет назад



Кратеры

Мантия, содержащая воду



4,47 млрд лет назад

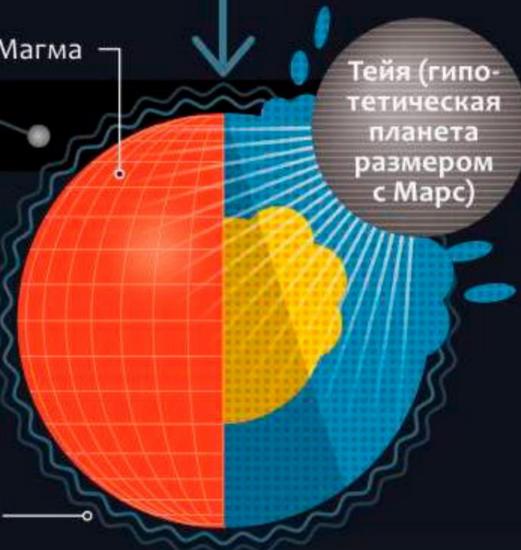
### 3 Рождение Луны

Колоссальный удар потряс планету до самого ядра, уничтожив атмосферу, разрушив мантию и выбросив большую часть воды в космическое пространство. Из собравшихся вместе обломков горной породы образовался естественный спутник нашей планеты — Луна.

Магма

Тейя (гипотетическая планета размером с Марс)

Дегазация



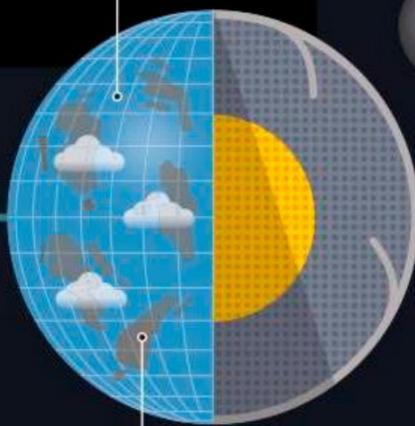
### 7 От планеты-океана...

Планета охлаждается, континенты продолжают расти в результате извержений подводных вулканов.

### 8 ...к планете Земля

Земля принимает привычный для нас облик.

Океаны



Сегодня



Illustration by John Grimwade, VISIBLE EARTH AND NASA (Earth)

планету обрушивалось бесчисленное множество планетезималей размером с огромные горы, которые «накачивали» ее энергией. Геохимические данные свидетельствуют о том, что в магме Земли тоже содержится некоторое количество воды, но расплавленная горная порода — не лучшая субстанция для ее удержания; большая часть влаги на молодой Земле и планетезималях высвобождалась в виде ионизированного газа и пара. Частично эти вещества улетучивались в космическое пространство, но какое-то их количество возвращалось на Землю, чтобы снова быть включенными в горные породы, прежде чем оказаться в мантии.

К дальнейшим изменениям водных запасов на самой Земле и вблизи ее поверхности привели столкновения с гигантскими объектами. В частности, считается, что примерно 4,5 млрд лет назад в Землю врезалось космическое тело размером с Марс, и это сопровождалось выбросом огромного количества вещества нашей планеты; из него, по одной из гипотез, образовалась Луна. Вероятно, под действием энергии, выделившейся при этом столкновении поистине глобального масштаба, была сметена почти вся атмосфера, вода в океанах мгновенно испарилась и образовался океан из магмы глубиной в сотни километров. Независимо от того, была вода на только что сформировавшейся Земле или нет, этот колоссальный взрыв скорее всего практически всю ее уничтожил.

Откуда же могла взяться вода в период после образования и охлаждения системы «Земля — Луна»? Уже с 1950-х гг. было известно, что кометы — это по сути глыбы льда с вкраплениями камней и что они проникают во внутренние области Солнечной системы из двух обширных «хранилищ», расположенных на ее периферии, — пояса Койпера (его внутренняя граница находится на уровне нынешней орбиты Плутона) и облака Оорта (которое лежит далеко за пределами пояса Койпера и, вероятно, простирается на половину расстояния до ближайшей к нам звезды). Многие астрономы придерживались мнения, что основным источником воды для Мирового океана на Земле послужили именно кометы.

Но в 1980-х и 1990-х гг., когда впервые было определено соотношение дейтерий/водород ( $D/H$ ) в кометах из облака Оорта, уверенность в правильности этой гипотезы несколько поколебалась. Дейтерий — это тяжелый изотоп водорода, и его распространенность по сравнению с водородом служит ценным ориентиром при отслеживании истории объекта. Если Мировой океан на Земле образовался из воды растаявших комет, то соотношение  $D/H$  в нем должно быть близко к таковому у нынешних комет. Однако в кометах из облака Оорта  $D/H$  вдвое выше, чем в обычной морской воде, из чего следует, что большая часть воды на Земле имеет какое-то другое происхождение.

В то же время соотношения  $D/H$  в кометах из пояса Койпера, измеренные в последние несколько лет, сходны с таковыми для морской воды, что согласуется с идеей «кометного» происхождения воды на Земле. Впрочем, сегодня этот «маятник мнений» вновь качнулся в сторону от комет. Согласно данным, полученным в конце 2014 г. с помощью космического аппарата «Розетта» Европейского космического агентства, соотношение  $D/H$  у кометы 67P / Чурюмова — Герасименко из пояса Койпера в три раза выше, чем в водах океана. Этот результат вместе с данными о динамике орбит космических тел, попадающих на Землю из богатых кометами областей космического пространства, наводит на мысль, что, хотя некоторое количество воды попало к нам вместе с кометами, вряд ли последние были основным ее источником.

Очевидную альтернативу кометам представляют астероиды, и сегодня им единодушно отдают предпочтение в вопросе о том, откуда взялась большая часть воды на Земле. Как и кометы, астероиды — это обломки мелких планетезималей, из которых образовались планеты. Астероиды «главного пояса» обращаются вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера, что гораздо ближе к Земле, чем пояс Койпера, следовательно, по сравнению с кометами вероятность их падения на Землю существенно выше. Прекрасным подтверждением этому служит не что иное, как Луна, вся поверхность которой изрыта кратерами от древних астероидов. Метеориты — куски горной породы, оставшиеся от долетевших до земной поверхности астероидов, — напоминают нам о том, что Земля до сих пор постоянно подвергается бомбардировке межпланетными каменными обломками. Изучение этих редких космических пришельцев дает возможность заглянуть в их давнее прошлое и выяснить, могли ли они наполнить водой Мировой океан Земли. Исследования отдельных семейств метеоритов показали, что  $D/H$  у них близко к таковому у морской воды.

Метеориты, как и их прародители астероиды, состоят из самых разных веществ, в том числе и воды. Астероиды из внутренней части Главного пояса, находящейся от нас на расстоянии около двух астрономических единиц, порождают множество каменных практически безводных метеоритов. Астероиды же из областей, удаленных более чем на половину расстояния от Земли до Юпитера, можно назвать «влажными». От большинства из них остаются метеориты, относящиеся к группе углеродсодержащих, или углистых хондритов. Это конгломераты гидратированных минералов и карбонатов, в которых содержание воды может достигать нескольких процентов от массы породы. История воды в подобных горных породах стало основным предметом исследований одного из нас (Эдварда Янга), занявшегося выяснением судьбы воды в горных породах здесь, на Земле.



**Неиссякаемый источник воды:** сведения о комете 67P / Чурюмова — Герасименко (вверху) позволяют предположить, что основная часть воды попала на Землю благодаря астероидам (слева)

Богатые водой минералы, входящие в состав углистых хондритов, образуются в ходе химических реакций между веществами горной породы и находящейся в жидком или газообразном состоянии водой, которые протекают при относительно низких температурах в несколько сотен градусов Цельсия. На Земле такие минералы образуются, когда вода просачивается сквозь пористые горные породы. Находясь внутри метеоритов, они указывают время, когда лед растаял и проник сквозь пылевую матрицу, составляющую породу метеорита.

Источником тепла, расплавившим этот лед, почти наверняка был распад радиоактивного изотопа алюминия,  $^{26}\text{Al}$ , который в изобилии присутствовал в ранней Солнечной системе. Превращаясь в изотоп магния,  $^{26}\text{Mg}$ , он несколько миллионов лет выделял огромное количество энергии. В скованной холодом молодой Солнечной системе тепло, выделяемое при распаде  $^{26}\text{Al}$ , было мощной, но непродолжительной силой, повлиявшей на геологические и гидрологические свойства астероидов, богатых летучими веществами. По-видимому, в течение нескольких миллионов лет после образования Солнца вода внутри многих из них находилась в жидком состоянии, поддерживая процесс гидротермальной циркуляции, подобный тем, которые протекают в жерлах вулканов, расположенных вдоль срединно-океанических хребтов на Земле. Гидратированные минералы и карбонаты, по-видимому, образовались, когда горячий соляной раствор просачивался через трещины и щели в астероиде, разогретом теплом, которое высвобождалось при распаде  $^{26}\text{Al}$ . На самых поздних

стадиях формирования планет сила гравитации внешних планет-гигантов рассеивала вещество по всему пространству молодой Солнечной системы, выталкивая насыщенные влагой астероиды за пределы «снеговой линии», где они бомбардировали Землю и другие твердые планеты.

Свидетельства этого позднего перетасовывания вещества мы видим в особенностях химического состава Земли и Марса. Например, элементы платиновой группы обладают более высоким сродством к железу и другим металлам, чем к горным породам. На раскаленной формирующейся Земле эти элементы должны были бы опускаться вместе с железом и никелем, образуя ее ядро. Однако, как это ни удивительно, сегодня в мантии и даже в коре элементы платиновой группы присутствуют в количестве, сравнимом с количеством элементов, обладающим высоким сродством к хондритам, составляя приблизительно 1% массы Земли. Этот налет, образовавшийся в результате падения космических тел на уже сформировавшуюся Землю, служит сегодня материалом, из которого изготавливают платиновые обрубчатые кольца и каталитические преобразователи для автомобилей. Это также дает объяснение тому, откуда на Земле столько воды. По-видимому, не только Земля и Марс, но и все каменные планеты на поздних стадиях формирования подвергались бомбардировке космическими телами, происходящими из пояса астероидов.

Однако в этой стройной картине есть один серьезный изъян. Он становится очевидным, когда речь заходит о газообразных элементах, например ксеноне и аргоне, инертных газах, не вступающих ни в какие химические реакции. Эта инертность позволяет использовать их в качестве индикатора различных физических процессов, поскольку

они не подвержены влиянию искажающих картину химических факторов. Если твердые планеты и астероиды — это своего рода сообщающиеся сосуды, значит, большинство инертных газов должны содержаться в них в сходных пропорциях. Однако, как показали исследования, содержание ксенона и аргона в метеоритах гораздо выше, чем на планетах, куда они упали. Это касается как Земли, так и Марса.

За последние годы появилось множество гипотез относительно причин малого содержания ксенона, в том числе и таких, которые возвращают нас к идее о роли комет в «поставке» на Землю воды и других летучих веществ. Пока пишутся эти строки, исследователи с нетерпением ждут результатов измерений содержания инертных газов в кометах, которые должен передать космический зонд «Розетта», исследующий комету 67P / Чурюмова — Герасименко. Возможно, эти измерения помогут, наконец, приблизиться к окончательному ответу на вопрос о происхождении воды Мирового океана на Земле. Но если результаты будут неопределенными, то породят более сложные вопросы, которые повлекут за собой дискуссии еще на десятилетия.

## Обманчивое различие

Кажется, что простого решения в поисках различий между астероидами и кометами как источниками воды на Земле не существует. Однако трудности могут быть связаны не с существом дела, а с тем, как мы ставим вопросы. Возможно, различия между астероидами и кометами не столь велики. Один из нас (Дэвид Джуитт) вместе с Генри Се (Henry Hsieh) из Тайваньского института астрономии и астрофизики недавно открыли кометы Главного пояса — космические объекты, движущиеся в пределах пояса астероидов, но выбрасывающие пыль на каждом витке орбиты, что характерно для обычных комет. Как ни странно, эти объекты содержат лед, хотя находятся в пределах ярко освещенной, бедной летучими веществами «снеговой линии». Кроме того, вероятно, правильнее ставить вопрос не о том, почему на Земле так много воды, а о том, почему ее так мало. Относительно небольшое ее количество могло оказаться на Земле разными путями, и все они тесно связаны с историей планеты, типом падавших на нее космических тел и условиями, в которых они образовались. Эти неопределенности дают широкий простор для появления других, более экзотических сценариев попадания воды на Землю, и какими бы невероятными они ни казались, их нельзя окончательно отбрасывать.

Так, теоретически большая часть воды могла существовать на Земле со времен ее рождения. Согласно новейшим данным, в аморфных периферических областях частичек межпланетной пыли, вероятно, скапливались ионы водорода, приносимые солнечным ветром, которые участвовали

в образовании гидратированных минералов и попадали на планеты или планетезимали на ранних стадиях их формирования. Но все равно трудно представить, как такой первичный запас воды мог существовать все это время в толще мантии и оказаться на поверхности только в результате сокрушительных ударов космических тел на завершающих этапах формирования Земли.

Не остались без внимания ученых и космические тела, более крупные, чем кометы и астероиды. Вспомним о карликовой планете Церера — самом крупном объекте пояса астероидов диаметром 900 км. По-видимому, до половины массы Цереры составляет вода. В начале 2014 г. астрономы наблюдали явление, очень похожее на выброс из недр планеты пара в количестве примерно 20 тыс кг в час. Это с неопровержимостью свидетельствует о том, что Церера — богатая водой планета. Земля по массе примерно в 6 тыс. раз больше, чем Церера. Если половину массы последней действительно составляет вода, значит суммарные запасы воды на Земле, находящейся как на поверхности, так и в недрах, равны количеству воды всего на пяти Церерах.

В молодой хаотичной Солнечной системе такие объекты были вполне обычны, и легко представить, что они проникали в ее внутренние области и падали на Землю. Лишь символической пригоршни подобных тел хватило бы, чтобы на нашей планете образовались моря и океаны, и никаких дождей из астероидов и комет не понадобилось бы. В марте этого года автоматическая межпланетная станция *Dawn* («Рассвет»), запущенная NASA 27 сентября 2007 г., приблизится к Церере и позволит взглянуть с близкого расстояния на ее льды и струи газа, что даст совершенно новые факты об истории появления воды как на нашей планете, так и за ее пределами. ■

Перевод: С.Э. Шафрановский

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Рубин А. Тайны первичных метеоритов // ВМН, № 4, 2013.
- Лемоник М. Плутон и то, что за ним // ВМН, № 1, 2015.
- A Population of Comets in the Main Asteroid Belt. Henry H. Hsieh and David Jewitt in *Science*, Vol. 312, pages 561–563; March 23, 2006.
- Water and Astrobiology. Michael J. Mottl, Brian T. Glazer, Ralf I. Kaiser and Karen J. Meech in *Chemie der Erde–Geochemistry*, Vol. 67, No. 4, pages 253–282; December 2007.
- Detection of Solar Wind-Produced Water in Irradiated Rims on Silicate Minerals. John P. Bardley et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 111, No. 5, pages 1732–1735; February 4, 2014.
- 67P/Churyumov — Gerasimenko, a Jupiter Family Comet with a High D/H Ratio. K. Altwegg et al. in *Science*. Published online December 10, 2014.