




**АСТРОНОМИЯ.**

Формирование Земли и наших планет-соседей происходило не медленно, как раньше считали ученые, а стремительно, словно в фильме о столкновениях болидов на бешеных скоростях с их разрушением и воссозданием заново

**Линда Элкинс-Тантон**



Металлический мир: астероид  
Психея, возможно, представляет  
собой железо-никелевое ядро  
планеты-предшественницы

# ТЕОСОЛННЕЧНАЯ СИСТЕМА ВСМВСОМЯТКУ

## ОБ АВТОРЕ

Линда Элкинс-Тантон (Linda T. Elkins-Tanton) — геолог-планетолог, специализирующаяся на эволюции планет земного типа, директор Школы по изучению Земли и космоса Университета штата Аризона.



**Я** выходила из одной из аудиторий Массачусетского технологического института, где только что закончила беседу со студентами о том, как образуются планеты, когда меня остановил мой коллега Бен Вайс (Ben Weiss). Он занимается изучением магнитных свойств камней, прилетевших из космоса, и был очень возбужден. Вайс потащил меня вдоль коридора в свой кабинет, чтобы показать новые данные по одному из этих «пришельцев» — метеориту, получившему название Альенде. Информация эта, возможно, поставит с ног на голову представления планетологов о нашей Солнечной системе.

Это было в 2009 г., и именно той осенью научная группа Вайса показала, что в каменистом нутре Альенде, который в 1969 г. свалился на Землю в Мексике в виде огромного огненного шара и вещество которого представляет собой один из самых древних из известных строительных материалов Солнечной системы, сохранились признаки первозданного магнитного поля. Это открытие было большой неожиданностью. Такого рода магнитное поле, считали астрономы, образовывалось только магнитной динамо-машиной, представляющей собой чрезвычайно горячий поток жидкого металла внутри планеты, вроде того как магнитное поле Земли образуется жидким железом, вращающимся в ядре планеты. Но, как считалось, Альенде был фрагментом родительской планетезимали — нарождающейся планеты «подросткового» возраста, — которая была лишь чуть-чуть теплой. Ученые полагали, что она так и не разогрелась до температуры, достаточной, чтобы расплавить содержащийся в ней металл. Так как же тогда, задался вопросом Вайс, этот первобытный

кусочек нашей Солнечной системы мог нагреться настолько, чтобы образовалась магнитная динамо-машина?

Всего несколько минут назад мои студенты засыпали меня вопросами об эволюции планет, побуждая переосмыслить некоторые из прописных истин, и поэтому в голове моей уже сформировался костяк новой идеи, которая могла бы помочь ответить на вопрос Вайса. Я подошла к висящей на стене его кабинета доске и начала в общих чертах набрасывать ее суть.

С давних пор известно, что планетезимали содержат в своем составе короткоживущие нестабильные изотопы атомов алюминия, отдающих избыточную энергию в виде излучения. Эти радиоактивные изотопы —  $^{26}\text{Al}$ , и выделяющаяся при их распаде энергия, вероятно, разогревала эти малые планеты. По-видимому, количество тепла в результате распада атомов  $^{26}\text{Al}$  в небесном теле, породившем Альенде, было недостаточным, чтобы полностью его расплавить. Металл внутри него, вероятно, отделился от силикатов —

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

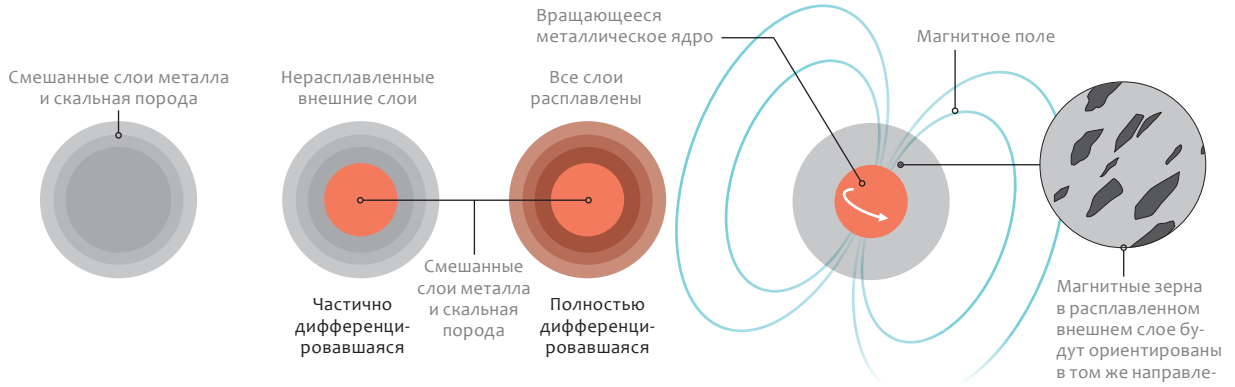
- Медленный постепенный рост от крошечных частиц до крупных планет — такую картину эволюции Солнечной системы ученые рисовали в своем воображении еще пять лет назад.
- Недавний анализ метеоритов, свидетелей зарождения Солнечной системы, говорит нам, что на самом деле она появилась в результате хаотических столкновений, плавления и воссоздания заново.
- Чтобы проверить эту идею, ученые собираются послать космический зонд к Психее, странному цельнометаллическому астероиду, который, возможно, не что иное, как оголенный обломок ядра одной из ранних планет.

КАК СОЗДАТЬ ПЛАНЕТУ

## Строительные кирпичики Солнечной системы

Планеты, такие как Земля и ее соседи, начали образовываться, когда газовой-пылевое облако, окружавшее наше Солнце, породило глыбы, называемые планетезималиями (вверху). Когда-то считалось, что эти небесные тела — ничем не тревожимые зародыши планет. Но сегодня ученые полагают, что они разрушались при столкновениях и запускали тем самым каскад процессов, идущих с высокими энергиями, которые способствовали росту настоящих планет (внизу).

### Внутри планетезималии



#### Недифференцировавшаяся планетезималия

Эти глыбы были диаметром от десяти до нескольких сотен километров и содержали радиоактивные элементы, которые нагревали их внутренние области. Они имели слоистую, как у лука, структуру.

#### Дифференцировавшаяся планетезималия

Радиоактивные элементы выделяли много тепла, и небесное тело постепенно плавилось от середины к периферии. Более плотные металлы, железо и никель, стекали к центру. Иногда наружная скальная порода оставалась в неизменном виде. Все дифференцировавшиеся планетезималии имели жидкометаллическое ядро.

#### Образование магнитного поля

Металл в движении может превратиться в магнитную динамо-машину, образующуюся, когда планетезималии и их металлические ядра начинают вращаться. Эти ядра генерируют магнитные поля, ориентированные в определенную сторону, как, например, поле Земли указывает направление на север.

### От планетезималей к планетам

#### Аккреция

Когда Солнечная система начинала формироваться, частицы пыли, сталкиваясь друг с другом, собирались в планетезималии, некоторые размером до нескольких сотен километров в поперечнике. В течение каких-то 500 тыс. лет многие из них сформировали частично или полностью дифференцировавшееся внутреннее пространство.

#### Столкнулись и разлетелись

В тот начальный период формирования Солнечной системы, густо населенной планетезималиями, эти небесные тела часто сталкивались, чтобы образовать более крупные, однако некоторые из них при новых сильных ударах разваливались на куски.

#### Эмбрионы

После множества столкновений некоторые планетезималии выросли достаточно большими — несколько тысяч километров в поперечнике — и образовали более крупные эмбрионы размером с Марс. Их внутренний состав неоднократно дифференцировался при столкновениях, как и у планетезималей. Поверхность планет-эмбрионов, возможно, была усеяна образованиями с чертами, характерными для настоящих планет, такими как водоемы или озера горячей магмы.

Один из астероидов, Психея, возможно, не что иное, как осколок металлического ядра планетезималии. Сегодня Психея — цель с нетерпением ожидаемой космической экспедиции.

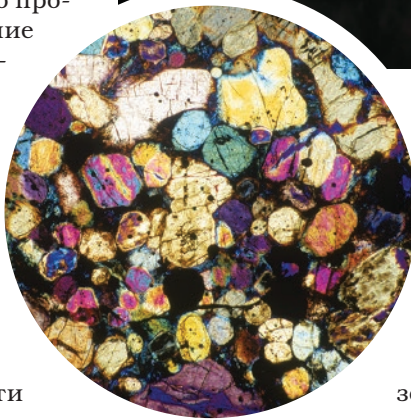
#### Планеты

Когда планеты-эмбрионы становятся достаточно большими, их гравитация начинает возмущать орбиты окружающих небесных тел. Время от времени это вызывает падение обломков на планеты, а гигантские столкновения образуют большие океаны магмы и провоцируют выбросы газов, которые формируют первичную атмосферу. В других случаях увеличившаяся гравитация отбрасывает находящиеся близко небесные тела далеко прочь. Эти большие небесные тела с траекториями, очищенными от всего прочего вещества, заслужили титул «планета».

минералов, составлявших остальную часть тела малой планеты, и образовал жидкое ядро, которое начало вращаться вместе со всей космической скалой, образуя космическую динамо-машину. Тем временем внешние слои планетезимали, по-видимому, смерзлись под воздействием космического холода, а холодные камни и космическая пыль первобытного диска нашей Солнечной системы продолжали осаждаться на эту застывшую корку.

Идея о том, что внутри строительных кирпичей нашей Солнечной системы содержится столько энергии, не была вынесена мною из средней школы. Школьные учебники часто по сей день утверждают, что Солнечная система сформировалась в ходе неспешного величественного процесса. Считалось, что ее рождение 4,567 млрд лет назад было упорядоченным цивилизованным процессом, чем-то вроде космического менюэта: газ и пыль молекулярного облака закручивались в форме диска вокруг растущей молодой звезды и слипались во множество небольших глыб, каждая из которых постепенно вырастала до размеров от нескольких десятков до нескольких сотен километров в диаметре. Эти планетезимали затем сами налетали друг на друга, образуя более крупные тела, получившие название «планетные эмбрионы», каждый, вероятно, размером с Марс. Только после этого температура в этом космическом инкубаторе наконец поднялась. Эмбрионы, которые в процессе роста приобрели достаточно большую массу, чтобы своей гравитацией начать расчищать свои орбиты от окружающего их «строительного мусора», затем сталкивались друг с другом и вырастали в планеты. В конце концов, как всем известно, вещество в недрах этих планет разделилось на бурлящее металлическое ядро и мантию из силикатов — горячие, пышущие вулканической активностью области, несовместимые с жизнью.

Это старые представления. К тому времени, когда Вайс и я начали размышлять об Альенде, многие другие данные уже указывали на то, что Солнечная система на раннем этапе действительно была местом яростных и быстротечных событий. Сегодня эта монотонная последовательность превращения пыли в глыбы, затем в малые планеты, далее в планетные эмбрионы и, наконец, в планеты пересматривается. Формирование планетезималей, происходившее, как когда-то предполагалось, на протяжении сотен миллионов лет, фактически заняло всего лишь около 3 млн лет.



*Древний магнит: фрагмент метеорита Альенде (на микрофотографии представлен срез) несет в себе следы магнитного поля, созданного одним из предвестников будущей планеты*

Если возраст нашей Солнечной системы в масштабе человеческой жизни представить как один день, то это взросление произошло в течение самой первой минуты. Наличие большой энергии, заключенной в мелких объектах ранней Солнечной системы (например, энергии распада атомов алюминия и энергии столкновений), означает, что им не нужно было долго ждать и расти, прежде чем перейти в другое качество. По всей видимости, на относительно небольших планетезималях шли процессы, которые, как считалось ранее, могли иметь место лишь в небесных телах масштаба планеты — от плавления и дегазации до образования магнитных динамо-машин и вулканической деятельности.

И не всегда в этих системах происходил рост от малого к большому. Зачастую крупные объекты снова разваливались на более мелкие. Если небесные тела размером с планету образовались в тот самый ранний период посредством соударений этих более мелких, обладающих высокой энергией тел, последующие отскоки и молниеносные соударения малых планет зачастую отрывали от них значительные куски или даже полностью их разрушали. Их обломки, по-видимому, сталкивались с другими телами, увеличивая их размеры до размера планеты. Планеты, вероятно, формировались, раскалывались на куски и возрождались вновь на протяжении всего лишь каких-то 10 млн лет или даже меньше.

### Исчезающий диск

Планетологам, таким как я, удалось сложить вместе разрозненные куски этого нового мозаичного, рисующего активную молодую Солнечную систему полотна, не в последнюю очередь с помощью новых методов вычисления возраста метеоритов, а также протопланетных пылевых облаков — вроде того, что когда-то сформировало нашу Солнечную систему, — в других областях Вселенной.

За прошедшие 10–15 лет ученые разработали методики, способные обнаруживать элементы, из которых состоят космические обломки, с разрешением один атом на миллион и даже выше. Поскольку у нас есть достаточно точные данные о том, как быстро распадаются те или иные радиоактивные элементы, такие измерения позволяют установить дату, когда именно образовались и претерпели изменения планеты и планетезимали, разбросавшие эти фрагменты. Научные коллективы во всем мире — особенно отмечу Алекса Халлидея (Alex Halliday), ранее работавшего в Швейцарской высшей технической школе в Цюрихе, а сейчас — в Оксфордском университете, Торстена Кляйне (Thorsten Kleine) из Вестфальского университета им. Вильгельма, Штайна Якобсена (Stein Jacobsen) из Гарвардского университета, Мэри Горан (Mary Hogan) и Рика Карлсона (Rick Carlson), обоим из Института науки Карнеги, и Ричарда Уокера (Richard Walker) из Мэрилендского университета — начали проводить исследования коллекций метеоритов. В результате этой работы стало ясно, что планетезимали возникли в течение нескольких первых миллионов лет после того, как пылевой диск начал охлаждаться, что многие из наших планет земной группы образовались, должно быть, в течение первых 10 млн лет и что даже основная масса Земли, вероятно, сформировалась и разделилась на ядро и мантию в течение нескольких десятков миллионов лет.

Другое направление исследований дало аналогичные результаты. Используя все более мощные телескопы, мы можем наблюдать молодые звезды, растущие в других частях нашей Галактики. В ряде случаев мы даже различаем газово-пылевой диск, из которого растут звезда и ее планеты. Оценивая возраст звезд, вокруг которых обращаются планеты, и сравнивая результаты этих измерений с оценками для звезд, окруженных только газово-пылевыми дисками, ученые примерно десять лет назад определили, что продолжительность жизни этих дисков в среднем составляет всего 3 млн лет.

Следовательно, чтобы вырасти, в распоряжении малой планеты есть примерно 3 млн лет. Все

пыль и газ, не успевшие к этому времени осесть на космические глыбы, либо захватываются звездой, либо рассеиваются по просторам Вселенной, и строительного материала для планет не остается. Если учесть, что когда-то теоретики полагали, что аккреция (*процесс приращивания массы небесного тела за счет гравитационного притяжения вещества из окружающего пространства, в данном случае из газово-пылевого облака.* — Примеч. пер.) продолжается сотни миллионов лет, это действительно настоящее ускорение!

Еще одно доказательство справедливости такой оценки продолжительности процесса аккреции дает использование распада радиоактивных элементов в качестве часов, которые тикают с неизменной скоростью, когда один элемент превращается в другой.

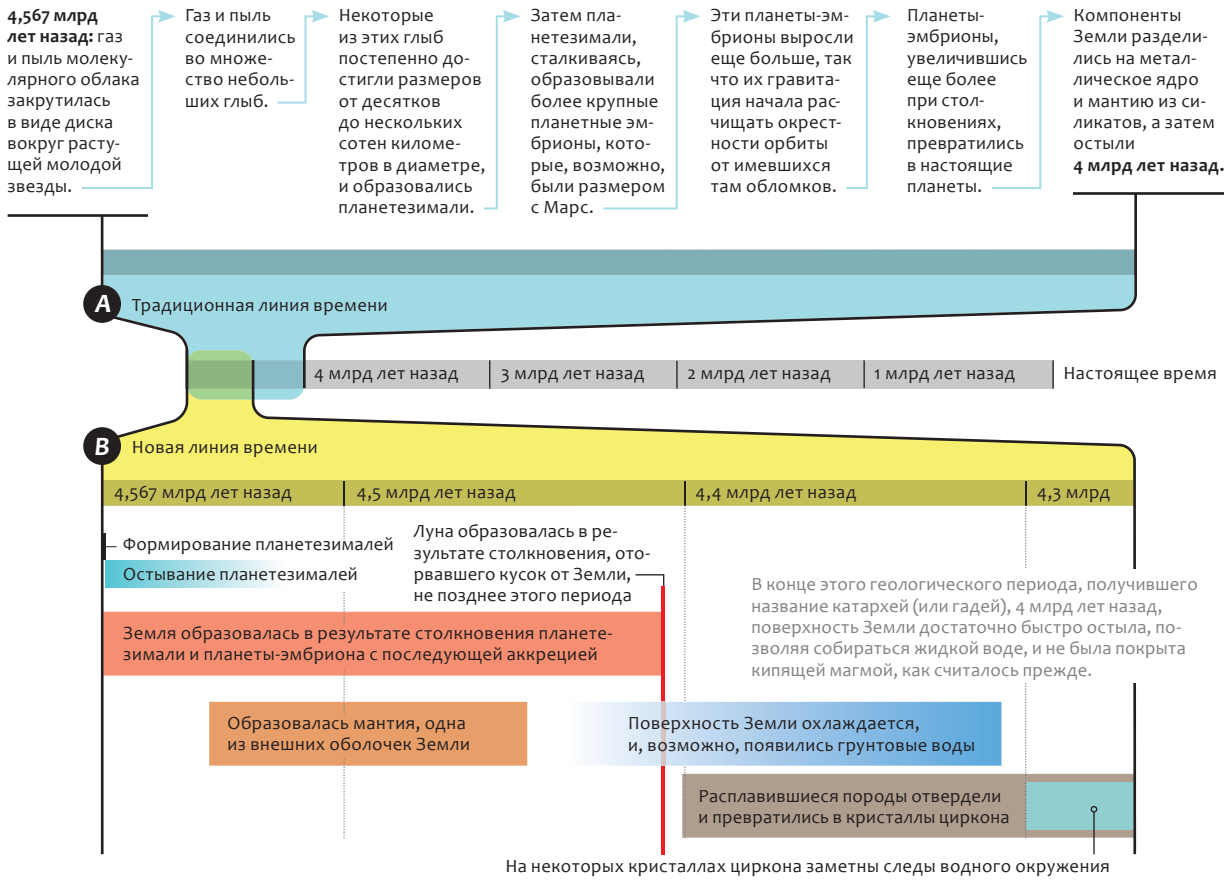
## Имея на руках экспериментальные данные, четко указывающие, что Солнечная система образовалась гораздо быстрее, чем говорится в учебниках, ученые должны были объяснить, за счет чего планеты сформировались так быстро. Значит, пришел черед и теоретикам пошевелить извилинами

Новые методы позволили научным группам Европы и США с достаточно высокой точностью измерить содержание этих элементов и, следовательно, выяснить, как долго эти часы тикали. Метеориты, упавшие на Землю, содержат эти элементы. Большая часть из них — обломки астероидов, которые сами по себе — первобытные остатки планетезималей. (Часть оставшихся метеоритов прилетела к нам с Луны, некоторые — с Марса, остальные — с еще не установленных небесных тел.)

Один из радиоактивных изотопов гафния предпочитает обосноваться в силикатах — минералах вроде тех, что находятся в мантии Земли. Но он распадается на изотоп вольфрама, который охотно соединяется с металлами, составляющими ядра планет. Такой распад идет постоянно: половина гафния превращается в вольфрам за 9 млн лет. Эта физическая система дает нам временную шкалу для разграничения планет и планетезималей по соотношению содержания в них металлов и силикатов (ядра и мантии): в процессе формирования металлического ядра вольфрам выплавлялся из состоящей в основном из силикатов мантии и утекал в растущее ядро, а гафний по-прежнему оставался в мантии и продолжал превращаться

## Ускорение строительства

Ученые когда-то полагали, что формирование планет в нашей Солнечной системе было медленным монотонным процессом, растянувшимся на 500 млн лет, и началось примерно 4,5 млрд лет назад **A**. Новые свидетельства, полученные при изучении упавших на Землю метеоритов, уточнение скоростей радиоактивного распада элементов и наблюдение за пылевыми дисками звезд показывают, что наша Солнечная система, включая зарождающуюся Землю, начала развиваться гораздо быстрее **B**, в течение не более 3 млн лет, стремительно, словно в фильме о столкновениях болидов на бешеных скоростях с их уничтожением и воссозданием заново.



в вольфрам, который теперь, когда процесс формирования ядра уже прекратился, тоже застревал в ней. Когда ученые измеряют в метеоритах соотношение количества гафния к вольфраму, содержание изотопа вольфрама в них показывает время с момента образования ядра.

Подобные измерения изотопного состава железных метеоритов, многие из которых предположительно были когда-то частью металлических ядер малых планет, показывают, что их родительские небесные тела образовались не позднее чем через 500 тыс. лет после того, как началась конденсация первых твердых тел из нашего протопланетного газово-пылевого диска. Это время — меньше, чем десять секунд в нашей воображаемой сжатой во времени до 24 часов истории Солнечной системы. Если железные метеориты — действительно фрагменты ядер планетезималей, разрушенных при столкновениях друг с другом,

то эти малые планеты должны были образоваться, расплавиться и сформировать железные ядра в течение этого ничтожно короткого промежутка времени.

### Резкое ускорение роста

Имея на руках экспериментальные данные, четко указывающие, что Солнечная система образовалась гораздо быстрее, чем рассказывается в учебниках, исследующим ее ученым теперь необходимо объяснить, за счет чего планеты сформировались так быстро. Значит, пришел черед и теоретикам пошевелить извилинами. Каким образом пыль и камешки размером от нескольких микронов до нескольких сантиметров, обращающиеся по орбите вокруг нашего молодого Солнца, соединились вместе и образовали небесные тела в 10 млн раз больше их самих (100-километровые планетезимали) всего за 500 тыс. лет?

Ответ на этот вопрос не очевиден. Устоявшиеся физические постулаты говорят, что небольшие комочки пыли при столкновении могут легко пристать друг к другу под воздействием электромагнитных сил, во многом сродни тому, как статическое электричество образует сгустки пыли у вас под кроватью. Поглощение энергии во время столкновений в результате сжатия и потери пористости структуры также помогает сгусткам прилипнуть друг к другу и не дает им разлетаться или рассыпаться на части. Однако рост комков упирается в так называемый метровый барьер. Не успев набрать и 1 м в диаметре, эти наращивающие массу глыбы становятся слишком большими, чтобы их могли удерживать электростатические силы, но еще слишком малы, чтобы их смогли удерживать от разрушения силы гравитации. Столкновения даже с очень низкими скоростями вызывают не аккрецию, а распад этих конгломератов. Однако мы точно знаем, что так или иначе эти структуры должны каким-то образом иметь возможность вымахать от 1 м до размеров планетезимали: планета, на которой все мы с вами сейчас находимся, — прямое тому свидетельство. Следовательно, в этом непременно должны быть задействованы какие-то иные процессы.

Было предложено несколько идей, объясняющих, каким образом происходит перерастание метрового барьера. Большинство гипотез базировались на возможности концентрации вещества в протопланетном диске посредством различных видов турбулентности, которая и спрессовывает частицы воедино. К таким вихреобразующим явлениям, вероятно, относятся так называемая неустойчивость Кельвина — Гельмгольца, когда между слоями газа и пыли газово-пылевого диска развиваются вихри, которые, по всей видимости, эффективно спрессовывают рассредоточенное в пространстве вещество в более крупные тела. Значительную часть этой работы первым провел Андерс Йохансен (Anders Johansen), в настоящее время сотрудник Лундского университета в Швеции. Хэл Льюисон (Hal Levison) из Юго-Западного научно-исследовательского института и Йохансен независимо друг от друга разрабатывали усовершенствованную модель, получившую название «галечная аккреция». Его вычисления показывают, что даже самые мелкие крупитцы и комки пыли под действием гравитации могут отклоняться вдоль определенных орбит, чтобы прирастить массу растущей планетезимали, причем делать это они могут достаточно быстро, чтобы успеть выстроить малые планеты еще на раннем этапе жизни Солнечной системы.

### Таяние в морозильнике

Однако даже очень сильное сдавливание не смогло бы вызвать у малых планет разделение на мантию и ядро. Если планетезимали сначала формирова-

лись из материала первозданного газово-пылевого диска, в котором металлы и силикаты были равномерно перемешаны, то только высокие температуры и по крайней мере частичное плавление вещества внутри небесного тела позволило бы металлу просочиться внутрь и образовать ядро. Расчеты показывают, что соударение на большой скорости этих относительно небольших тел не могло обеспечить им энергию, необходимую для того, чтобы расплавиться. Поэтому ученым ничего не оставалось, кроме как попытаться найти ответ на вопрос: откуда могла взяться внутри огромной морозильной камеры обжигающего космоса эта энергия, необходимая для плавления?

Именно тогда и родилась идея о радиоактивном алюминии. При каждом распаде одного из таких атомов происходит небольшой выброс тепла. Эти крошечные кванты тепла все вместе, вероятно, образовывали в молодой Солнечной системе мощный источник энергии. Поскольку алюминий — один из шести самых распространенных элементов в каменной породе (другие пять — это кремний, магний, железо, кислород и кальций),  $^{26}\text{Al}$  с периодом полураспада примерно 700 тыс. лет легко мог разогреть по крайней мере некоторые из малых планет до температуры плавления.

Данные новых наблюдений, как оказалось, убедительно указывают, что некоторые из этих зародышей планет имели твердую внешнюю оболочку. Что же помешало им расплавиться полностью? Размер — лишь часть ответа на этот вопрос. В случае родительской планетезимали Альенде, чтобы расплавиться, каменистое тело должно было быть достаточно массивным, чтобы внутри него тепло производилось быстрее, чем излучала поверхность. Более крупное тело может разогреться внутри сильнее, чем тело меньшего размера, поскольку отношение генерирующего тепло внутреннего объема к излучающей тепло поверхности у него больше. Но короткий период полураспада  $^{26}\text{Al}$  означает, что этот рост температуры должен был быть быстрым. Чтобы аккумулировать достаточно тепла для получения картины плавления, которую мы нарисовали в своем воображении, родительская планетезималь Альенде должна была вырасти радиусом до 10 км или более в течение примерно 2 млн лет с момента появления в Солнечной системе первых твердых тел (что эквивалентно первым 37 секундам в нашей 24-часовой Солнечной системе) — и мы полагаем, что она скорее всего разрослась до внушительного размера, радиусом не менее 200 км.

Когда-то считалось, что планетезимали либо расплавлялись полностью, либо оставались в первородном состоянии. Но Вайс и я предположили гибридную концепцию, в которой исходное вещество Солнечной системы образовывало оболочку планетезимали, расплавленной



внутри, — одновременно и твердая внешняя кора, и расплавленное ядро. В этом есть резон, поскольку метеорит Альенде с его остаточным магнитным полем, образованным разогретым внутренним содержимым, состоит исключительно из не подвергавшегося сильному разогреву вещества первобытного облака. Родительская планетезималь Альенде сохранила эту первозданную, не претерпевшую плавления оболочку, поскольку она промерзла, непосредственно соприкасаясь с космическим холодом, а также потому что пыль холодного протопланетного диска продолжала оседать на нее все это время. Не испытывавшая теплового воздействия кора смогла сохранить следы магнитного поля, образованного внутренней частью структуры планетезимали — ее расплавленным ядром и магнитной динамо-машиной.

Мы не были первыми, кто задумался о дифференциации частиц. Геолог Джон Вуд (John Wood) нарисовал от руки аналогичную структуру в своей докторской диссертации, защищенной им в Массачусетском технологическом институте в 1958 г. Однако никому до сих пор не случилось оказаться в достаточной мере еретиком, чтобы посметь утверждать, что Альенде, олицетворяющий собой первозданные, не подвергшиеся плавлению метеориты, возможно, появился на свет именно таким образом — или же что такие процессы в начале истории нашей Солнечной системы были обычными и даже формирующими.

Теперь они действительно кажутся обычным делом. Ученые обнаружили, что родительские небесные тела по крайней мере четырех других метеоритов пригрели в своем ядре магнитные динамо-машины. В то же время другие возможные источники намагничивания были исключены: Альенде и его собратья не были намагничены ни магнитным полем Солнца, ни самим газово-пылевым облаком, ни кратковременными шлейфами магмы в местах соударений. Если на самом раннем этапе Солнечная система действительно была населена сотнями или даже тысячами планетезималей с горячими ядрами, быстро перемещающимися в пространстве и генерирующими сильное тепло и магнитные динамо-машины, совсем как уменьшенные копии Земли, это означает, что вся зарождающаяся Солнечная система содержала в себе гораздо больше тепла, чем геологи когда-либо предполагали.

### Густонаселенное поле

Другие идеи также ослабили традиционные представления о линейном характере роста планет от крошечных размеров до гигантских. Многие годы ради простоты и удобства манипуляции числами во всех моделях формирования планет предполагалось, что при любых столкновениях планетезималей все вещество обоих соучастников

происшествия шло на образование нового, большего по размеру небесного тела. Такое слияние должно было происходить даже в случае, когда планетезимали состояли из пыли. Но недавно Эрик Асфог (Erik Asphaug) из Университета штата Аризона первым выдвинул новые соображения и новые подходы к моделированию процессов столкновения. Асфог выяснил, что часть столкновений конструктивны, то есть в результате их образуются более крупные тела, в то же время другие соударения могут быть пагубными, если одно из столкнувшихся тел вырывает вещество из другого и продолжает свой путь, сея новые разрушения.

Только к 10 млн лет от роду небесные тела становятся действительно большими и остаются таковыми и далее. Что же придало им стабильности, позволяющей выжить? И снова ответом, по видимому, будет размер. Когда планетезимали сталкиваются и образуют более крупные планетные эмбрионы, их масса, а следовательно и сила гравитационного притяжения, становится больше. В итоге гравитация становится настолько большой, что всякий раз, когда движение по орбите сближает такое тело с другим объектом, этот объект либо притягивается к нему силами гравитации и становится его составной частью, либо отбрасывается прочь в результате изменения своей орбиты. Таким образом, эти растущие планеты начинают расширять свои орбиты, что и служит одним из критериев, дающих право небесному телу называться планетой. У более мелких тел становится все меньше и меньше убежищ, где их орбиты могут оставаться стабильными и не испытывать возмущения со стороны растущих планет. Пояс астероидов стал для них одной из таких безопасных гаваней.

### Экспедиция в мир металлов

Вайс, Асфог и я, да и другие тоже, хотели бы выяснить, каким образом сформировались структура и состав нашей планеты из этого активного, подчас хаотичного окружения. Хотели бы, но не можем хотя бы мельком взглянуть на земное ядро, несмотря на множество посвященных этому научно-фантастических книг и фильмов, в том числе романов Жюль Верна. Ядро расположено слишком глубоко и находится под слишком высоким давлением, чтобы непосредственно отколоть от него образец.

Но, возможно, один из астероидов, осколок доисторической планетезимали, может оказаться неплохой его заменой. Примерно четыре года назад несколько моих коллег и я начали разрабатывать проект космической экспедиции для изучения такой возможности. Мы собрались в «Комнате ошибок и заблуждений» (специальном зале для обсуждения экзотических космических экспедиций) Лаборатории реактивного движения NASA.

Этот зал специально задуман как место для проявления необузданной фантазии. Полки здесь забиты материалами для художественного и других видов созидательного творчества, такими как бумага, картон, пенопласт, различные провода, колеса, наборы *Lego*, фломастеры и т.д. Это весьма подходящее место для того, чтобы придумывать нечто совершенно необычное, и именно этим мы и пытались заняться. Мы хотели изучить объект, который помог бы нам доказать или опровергнуть гипотезу. Мы пришли к выводу, что самым лучшим пунктом назначения для экспедиции будет малая планета, целиком состоящая из металла, — металлический астероид Психея.

Не существует ничего и отдаленно похожего на это небесное тело, по крайней мере ничего в достаточной близости, куда можно было бы долететь за разумное время. Психея — это один из самых больших астероидов, примерно 200 км в диаметре, и летает он по орбите между Марсом и Юпитером. Все данные физических измерений, имеющиеся в нашем распоряжении (полученные при изучении отраженного телом астероида излучения радаров), указывают, что он почти целиком состоит из железа и никеля. Похоже, что Психея — это оголенное ядро планетезимали, все, что осталось в результате столкновений на огромных скоростях, которые разрушили небесные тела еще формирующейся Солнечной системы. Ориентация частиц, как крошечные иглы компаса выстроившихся вдоль магнитного поля на поверхности Психеи, возможно, расскажет нам, была ли у нее когда-то магнитная динамо-машина. Может быть, найдутся также какие-нибудь остатки ее каменной наружной обшивки, которые поведают нам о том, на что похожа мантия планетезимали на большой глубине. Если случались удары о чисто металлическую поверхность, брызги железа, вероятно, образовали острые металлические скалы, которые примерзли прежде, чем смогли бы упасть назад на поверхность.

Каждый из нас в этом зале для обдумывания новых космических экспедиций выложил на стол свою совокупность знаний и опыта: Вайс умеет измерять магнитные поля метеоритов, Уильям Боттке (William F. Bottke) — специалист по динамике космических тел, Асфог хорошо изучил воздействие столкновений, Брюс Биллс (Bruce Bills) лучше всех способен вычислять гравитационное поле тела, Дэниел Уэнкерт (Daniel Wenkert) — специалист по системам управления и передачи данных, Дэймон Ландау (Damon Landau) быстрее всех рассчитает траекторию, он агент бюро межпланетных путешествий. Джон Брофи (John Brophy) организовал нашу дискуссию, а я внесла в общий котел свои знания о составе, процессах плавления, отвердевания и дифференциации вещества в недрах планет.

Накал страстей в зале был безумным. Никто даже не проверял входящие сообщения на мобильных, и дискуссия не прерывалась ни на минуту. Мы слились в едином эмоциональном порыве, чтобы выработать верное направление исследования: ведь ни один представитель человечества еще не посещал полностью металлическое небесное тело, мы даже не представляли, на что оно будет похоже.

Теперь, спустя несколько лет, эти несколько дней игры с моделями из пенопласта и кубиками *Lego* открыли путь организованным усилиям команды из 75 человек. Мы предложили небольшой космический аппарат, разгоняемый ионным двигателем, питаемым от солнечной батареи, который несет магнитометр для измерения магнитных полей, гамма-спектрометр для определения химических элементов, и две фотокамеры. В 2015 г. в NASA наше предложение уже прошло первый этап отбора. Космическое агентство собирается объявить о выборе его в качестве очередного пункта своей программы исследований в этом месяце. Если нам не удастся пробиться в финальный список в этом году, мы продолжим разработку наших планов для участия в следующей группе экспедиций NASA. И если все пойдет хорошо, то мы наведаемся к этому удивительному свидетелю сотворения планет в 2021 г. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Батыгин К., Лафлин Г., Морбиделли А. Рожденные из хаоса // ВМН. № 7, 2016.
- Iron Meteorites as Remnants of Planetesimals Formed in the Terrestrial Planet Region. William F. Bottke in *Nature*, Vol. 439, pages 821–824; February 16, 2006.
- Asteroids, Meteorites, and Comets. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
- The Earth and the Moon. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
- Jupiter and Saturn. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
- Mars. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
- The Sun, Mercury, and Venus. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
- Uranus, Neptune, Pluto, and the Outer Solar System. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
- Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013–2022. Committee on the Planetary Science Decadal Survey. National Academies Press, 2011.
- Mercury and Other Iron-Rich Planetary Bodies as Relics of Inefficient Accretion. E. Asphaug and A. Reufer in *Nature Geoscience*, Vol. 7, No. 8, pages 564–568; August 2014.