

# I. КОСМИЧЕСКИЕ СЮЖЕТЫ

## 1

### История Солнечной системы: краткое изложение

Л. Е. Гринин

*Проблема образования Солнца, Земли, других планет и их спутников давно волнует людей. За последние несколько десятков лет астрономам и космологам удалось заметно продвинуться в понимании устройства, истории и эволюции Солнечной системы. В частности, благодаря прямым наблюдениям за процессом возникновения молодых звезд и открытиям множества экзопланет мы намного яснее представляем механизм зарождения Солнечной системы. Однако все же вести речь о ее истории в полном смысле слова не всегда возможно, скорее, речь идет о различных гипотезах. Настоящая статья дает возможность в сжатом виде представить эволюцию Солнечной системы в первые несколько сотен миллионов лет, когда в ней происходили наибольшие изменения. Статья написана в достаточно популярной манере, но в то же время опирается на серьезные научные исследования.*

**Ключевые слова:** Солнечная система, экзопланеты, протооблако, пылевой субдиск, планетезимали, зародыши планет, протопланеты, катастрофы, миграции планет.

#### **1. Формирование протосолнечной системы из газопылевого облака**

В основных своих чертах наша Солнечная система сформировалась в первые несколько десятков миллионов лет, современный ее порядок складывался в течение первых сотен миллионов лет (до 1 млрд), но конкретная история этого раннего периода пока крайне отрывочна и недостоверна. Вот почему вести речь об *истории* Солнечной системы в полном смысле слова не всегда возможно, скорее, речь идет о различных гипотезах. Правда, в отношении некоторых эпизодов, в частности формирования протосолнечной системы из газопылевого облака, гипотезы с каждым годом подкрепляются данными, полученными в результате наблюдений за процессом возникновения молодых звезд, и открытиями множества экзопланет (Gillon *et al.* 2016; 2017; Вибе 2016; Бочкарев 2010).

Эволюция 9 (2018) 13–31

На основе радиоизотопных исследований древнейшего метеоритного вещества возраст Солнечной системы был определен примерно в 4,57 млрд лет, а в целом оценки колеблются в интервале 4,57–4,66 млрд лет (Pfalzner *et al.* 2015; Shukolyukov, Lugmair 2003; Витязев, Печерникова 2010: 168; Хейзен 2015; Лин 2008; Johnson, Melosh 2012).

За последние 20–30 лет был разработан так называемый стандартный сценарий формирования планетной системы из протопланетного газопылевого диска, который окружал протосолнце; разработаны компьютерные модели формирования планет из различных тел астероидных размеров. Сценарий позволяет очертить общие контуры процесса, особенно если говорить об образовании Солнца и планет. Что же касается истории Солнечной системы после формирования протопланет в первые сотни миллионов лет, то она складывалась из миграций, столкновений, слияний и бомбардировок древними метеоритами (см., например: Gomes *et al.* 2005; Альвен, Аррениус 1979: 50–51; Батыгин и др. 2016; Bottke *et al.* 2012; Сурдин 2012; Morbidelli 2013).

**Модель рождения звезд**, подкрепленная многочисленными прямыми наблюдениями, по общему мнению, может быть использована для реконструкции появления протосолнца. Обычно звезды образуются в наиболее плотных областях молекулярных газопылевых облаков, состоящих в основном из водорода и гелия с температурой, приближающейся к абсолютному нулю. При таких условиях возникают неустойчивые к гравитационному сжатию отдельные уплотнения в облаке массой порядка массы Солнца, становится возможным формирование звезд. Газ может находиться в облаках миллионы и десятки миллионов лет, для его сгущения нужен какой-то толчок, триггер. Таким триггером для рождения Солнца, возможно, стал взрыв сверхновой в относительной близости от протосолнечного облака примерно за 2 млн лет до начала процесса; но также есть мнение, что спустя миллион лет после начала формирования Солнечной системы была еще одна вспышка сверхновой (Адушкин и др. 2008: 276; Bizzarro *et al.* 2007). Эти взрывы заметно обогатили химический состав будущих планет Солнечной системы (Маракушев и др. 2013: 133).

Вместе со сгущением газопылевого облака начинается процесс его сжатия (или свободного падения) под действием самогравитации. Сжатие идет неравномерно, центральные части сжимаются быстрее и оказываются более плотными, чем внешние. Этот процесс, возможно, занимает порядка 10 тыс. лет (Маров и др. 2008: 225; Motoyama Kazutaka, Tatsuo Yoshida 2003). В процессе сжатия исходный фрагмент облака распадается на более мелкие сгустки, поэтому из облака обычно рождается много звезд. В конечном фрагменте (сгустке) процесс сгущения продолжается, а его вещество, все уплотняясь, готовится превратиться в протозвезду. Когда плотность достигает величины, превышающей первоначальную примерно в сто раз, облако становится непрозрачным к собственному инфракрасно-

му излучению (Бочкарев 2010: 13). В результате продолжающийся процесс сжатия сопровождается нагревом. Нагрев замедляет сжатие и прекращает фрагментацию. Недра облака становятся горячее его поверхности, и в результате начинается конвекция, то есть перемешивание вещества. За счет прекращения теплообмена с внешней средой и центростремительных сил, поддерживаемых гравитацией, формируется структура будущей звезды – ее ядро и другие оболочки (см. подробнее: Гринин 2013: гл. 5).

Сначала ядро будет иметь массу порядка всего 0,01 солнечной и температуру около 2100 К, зато радиус равен 6000 солнечных. Но падающий на ядро газ разогревает его. После достижения температуры 10 000 К вещество начинает менять свою структуру. В результате дальнейшего нагрева и изменения структуры вещества *центральная часть ядра вновь резко сжимается*. Образуется более плотное и горячее внутреннее ядро, а также сложная периферийная часть. Давление повышается уже более чем в тысячу раз по сравнению с самым начальным этапом. Постепенно растет температура в центре протозвезды.

После того как внешнее и внутреннее ядра протосолнца сформировались, оставшееся вещество периферии начало падать на ядро, которое за счет этого стало увеличиваться в размерах. *Такой процесс выпадения вещества на поверхность какого-либо тела называется аккрецией*. После того как больше половины массы коллапсирующего протозвездного объекта оказывается в протозвезде, темп аккреции замедляется. Наконец, после того как аккреционная оболочка в основном выпадает на протозвезду, последняя превращается в молодую звезду. В это время температура в ней достигает нескольких миллионов градусов и начинаются термоядерные реакции. Возможно, формирование Солнца как звезды произошло за промежуток времени, равный примерно миллиону лет, но есть и определения временного интервала, отличающиеся как в меньшую, так и в большую сторону.

## **2. Образование допланетных тел**

**Протопланетный диск и его эволюция.** При образовании молодой звезды часто образуется околозвездный диск, который можно наблюдать в видимом и более коротковолновом диапазоне. Оставшееся вещество из аккреционного диска частично рассеивается в пространстве, а частично идет на формирование (у некоторых звезд, к числу которых относилось и протосолнце) протопланетного диска, также часто называемого допланетным диском или облаком. Идея «диска» отражает осесимметричную и уплощенную форму того образования, толщина которого не постоянна, а увеличивается с расстоянием от звезды. Естественно, что этот диск по массе составлял только небольшую часть предшествующего ему аккреционного диска.

Длительность существования такого диска вокруг звезд, по наблюдениям, от 5 до 25 млн лет (Макалкин, Дорофеева 1995; Забродин и др. 2008; Маров и др. 2008: 225; Кусков и др. 2009: 57; Адушкин, Витязев 2007: 397).

Сложность реконструкции процесса образования планет Солнечной системы связана с тем, что по большей части этот процесс все еще остается гипотетическим, в лучшем случае моделируемым путем компьютерных симуляций, тогда как данных, подтверждаемых прямыми наблюдениями или анализом вещества с различных планет, мало. И, как это обычно бывает, сложность проблемы и недостаток данных компенсируются огромным количеством гипотез и теорий, которых за два столетия выдвинуто множество. Но пока ни одна из них не может объяснить всех фактов, относящихся к планетам.

Однако абсолютное большинство космологов считает, что Солнце и планеты образовались из единого облака (протосолнечной туманности или небулы), вещество которого дифференцировалось на собственно Солнце и его протопланетную оболочку, в результате вращения ставшую диском (см., например: Тлатов 2010: 175). Из этого протопланетного диска в процессе его вращения и фрагментации образовались планеты путем аккумуляции вещества в протопланетных телах. Длительность периода формирования протопланетного диска оценивается в пределах от одного до нескольких миллионов лет.

В настоящее время Солнце содержит в себе 99 % всей материи Солнечной системы. Какую часть аккумуляировало в себе протосолнце, можно говорить только очень предположительно, но, по всей видимости, не менее 90 %, а массу протопланетного диска оценивают в интервале 3–10 % от массы Солнца. Но хотя протопланетный диск был не слишком массивен по сравнению с газопылевым облаком, из которого родилась Солнечная система, тем не менее он был достаточно пространственно велик и весьма неоднороден. Размеры аккреционных дисков молодых звезд составляют 100–1000 а. е.

По вопросу о том, был ли протопланетный диск горячим или холодным, давно ведутся споры. В настоящий момент большинство космологов исходят из того, что планеты сформировались из холодного материала, который позже был разогрет столкновениями (импактами) и другими процессами. Диск был сильнее нагрет во внутренних своих частях, а его внешние области оставались относительно холодными. В них стали развиваться уплотнения, которые и явились локальными гравитационными центрами формирования планет. Но сам механизм этого процесса исключительно спорен.

**Образование пылевого субдиска.** Протопланетный диск, по-видимому, на 98 % состоял из того же газа, что и протосолнечное облако. А в последнем молекулярный водород, гелий и все остальные вещества представлены по массе соответственно как 0,71; 0,28; 0,01. На пылевые

частицы приходится по массе от 0,5 до 1,5 %, но именно они сыграли особую роль. Эта пыль представляла собой хотя и микроскопические, но твердые частицы водяного льда и слипшихся молекул и атомов, в частности, железа и других твердых веществ микронного размера. В результате образования протосолнца и аккумуляции в нем основной части газа концентрация пыли в протопланетном диске на более поздней стадии его эволюции повысилась. Но она стала еще более повышаться в результате оседания пыли к средней плоскости диска.

Ряд космологов (но не все) считают, что наиболее вероятный путь образования зародышей планет связан с оседанием пылевых частиц (под действием различных физических факторов и вращения диска) к средней, экваториальной плоскости диска (см., например: Засов, Постнов 2011: 199). В результате в центре допланетного диска складывался пылегазовый субдиск, но уже с совсем иным соотношением пыли и газа. В частности, по разным оценкам, соотношение «пыль – газ» меняется в 10–1000 раз по сравнению с космическим. Уже на стадии образования субдиска пылинки могли увеличиваться в размерах (за счет слипания и притягивания). Таким образом, произошел очень важный для будущей планетной системы переход – концентрация твердого вещества (пока в виде пыли), что сыграло громадную, определяющую роль в росте сначала допланетных тел, а потом и планет. Согласно некоторым моделям, эволюция около-солнечного протопланетного диска до образования обогащенного пылью субдиска занимала от 1 до 2 млн лет.

Пылевой субдиск реально представлял собой довольно тонкий диск (по сравнению с его радиусом) толщиной  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  от его радиуса. Он должен был быть непрозрачным для солнечных лучей, и поэтому они не достигали периферии диска. Это определяло в том числе разные условия образования планет в зависимости от близости к протосолнцу.

**Начало образования допланетных тел.** Дальнейшая эволюция диска связана с тем, что, как предполагают некоторые космологи, в течение определенного времени (100 тыс. лет) в связи с силами гравитации и турбулентности, возможно, происходило сжатие субдиска и образование в нем пылевых сгущений и далее – сгустков. Но вопрос, образовались ли планеты из этих газовых сгустков или уже из твердого вещества, дискусионен и обсуждается давно.

Теория образования планет из твердого вещества называется теорией последовательной аккреции (или аккумуляции). Многие космологи (если не большинство), в том числе зарубежные, считают ее более вероятным сценарием. Согласно этой теории, крошечные частицы пыли слипаются (также захватывая газ), образуя сначала мелкие частицы твердого вещества, затем крупные глыбы, которые постепенно вырастают в зароды-

ши планет. Частицы твердого вещества (от мелких до крупных километровых глыб и даже более) называются *планетезимали*.

Другая теория *сгущений* (которой в значительной мере придерживаются отечественные ученые) исходит из того, что в гравитационной неустойчивости плотного пылевого слоя в условиях турбулентности происходила фрагментация пылевого субдиска, а затем образовались допланетные пылевые сгущения. В результате сначала образовались большие сгущения – *препланетезимали*, которые потом трансформировались в крупные планетезимали, а согласно некоторым вариациям этого направления, даже сразу в зародыши планет.

Важнейшим этапом в процессе образования зародышей планет является образование крупных твердых (сплошных) тел-планетезималей. В этом согласны сторонники всех теорий и гипотез. Однако по поводу числа, размеров и иных параметров этих крупных тел имеются существенные расхождения. Разброс мнений здесь огромен, поскольку все эти параметры выведены в основном за счет моделирования. Есть различия и в оценке рубежных (критических для процесса) размеров планетезималей. Сторонники теории последовательной аккумуляции вещества условно считают планетезималиями образование километровых тел, количество которых могло достигать миллиардов и которые в процессе роения постепенно укрупнились. Согласно теории сгущений, крупнейшие тела могли достигать *тысячекилометровых* размеров.

**Хаос и возникновение предпосылок для формирования порядка.**  
**Роль газа и льда.** Движение частиц в протооблаке (и субдиске) было весьма хаотичным, хотя оно в основном было направлено к Солнцу как к главному гравитационному центру. В этом хаосе частицы газа и пыли движутся с разной скоростью. Среди множества сил, которые влияли на процессы концентрации и аккумуляции материи и в целом на формирование протопланет, особую роль, конечно, играли две: гравитация и сила солнечного излучения. Обе они в прямой пропорции зависели от величины расстояния объекта от Солнца. Между расстоянием 2–4 а. е. от Солнца, примерно посередине между орбитами Марса и Юпитера, возникает так называемая линия льда, или снеговая линия. Линия льда означает замерзание воды в этом районе, так как сила излучения Солнца слабеет. На самой линии льда накапливаются молекулы воды, испарившиеся из пылинок. *Линия льда превращается в полосу его скопления* и облегчает создание планетезималей (Лин 2008).

**Образование крупных планетезималей.** По мере возрастания масс планетезималей и достижения ими километрового размера у них появилась способность удерживать близко находящиеся частички за счет тяготения. Образуются миллиарды крупных планетезималей, которые активно подбирают первичную пыль. По мере роста планетезималей образовался так называемый *протопланетный рой объектов*, где роились планетези-

мали самых разных размеров. Постепенно выделилась и небольшая по количеству «элита», тела размером с Луну или даже Меркурий. Гипотез о механизме их выделения много. Со временем орбиты крупнейших тел стали приближаться к круговым, а сами они становились центрами притяжения всего окружающего их вещества, явившись зародышами планет.

Начиная с момента образования роя объектов, включающих в себя и мелкие, и крупные планетезимали, и до образования зародышей планет, описание процессов у представителей разных подходов становится существенно ближе друг к другу. Но расхождения все равно большие. Количество крупных зародышей планет, по разным предположениям, было различным – от единиц до сотен. Образование планетезималей длилось согласно расчетам десятки и сотни тысяч лет, протопланетных тел из планетезималей – несколько миллионов лет.

### **3. Образование зародышей планет и протопланет**

**О веществе, из которого формировались планетезимали и зародыши планет.** Для понимания процессов формирования протопланет важен вопрос о первичном веществе, из которого были сложены планетезимали. В этом отношении первостепенное значение имеют данные о метеоритах и их составе, многие из которых образовались в первые миллионы лет существования Солнечной системы.

Метеориты, называемые хондритами, содержат мелкие зерна миллиметрового размера – хондры, некоторые из хондр имеют стеклообразное строение (Лин 2008; Шкловский 1987). Это самый древний и самый распространенный тип метеоритов – он составляет 85 % всех метеоритов. Вокруг них ведутся большие дискуссии и формируются весьма противоположные утверждения, от тех, что они никогда не плавилась, не входили в состав первичных планетезималей и образовались очень рано, до тех, что они были свободными расплавленными каплями и появились в результате раздробления вещества, разбрызгивания состава и последующей агрегации реконденсатов, возникших при высокоскоростных соударениях тел. В последнем случае получается, что они были не первичными, а вторичными породами.

Хондритовые метеориты аналогичны по своим физическим свойствам большинству астероидов. Поэтому пояс астероидов называется еще хондритовым поясом. Хондритовые метеориты являются образцами планетезималей, формировавшихся в протосолнечном облаке, путем аккреции которых образовались планеты земной группы. Таким образом, хондриты могут дать ключ к пониманию природы планетезималей и того, как образовывались планеты, они есть вещественный материал для суждения о происхождении планет.

Метеоритные данные (Connolly 2005) свидетельствуют о том, что образование хондр длилось от 2 до 5 млн лет. По образному выражению Р. Хейзена (2015: 17), когда ядерный реактор Солнца пришел в действие, образовалась своего рода доменная печь, в которой межзвездная пыль, составившая облако, спеклась в крохотные вязкие капли, или хондры. Скопления этих древнейших хондр сплавлялись в единое целое за счет более мелкой звездной пыли и фрагментов минерального вещества, образуя примитивные хондриты, миллионы которых оседали на поверхности Земли и других планет.

**Появление шарообразной формы и усиление геологических процессов.** Какие-то протогеологические процессы начались уже в процессе формирования протопланет, в частности, тепло импактов (столкновений) вместе с теплом радиоактивных элементов должно было привести к разогреву, частичному плавлению вещества, оседанию к центрам масс будущих планет железоникелевых тяжелых частиц и выдавливанию к поверхности более легких силикатных частиц. Так формировались первичные ядра, мантии и кора будущих планет (Язев 2011: 357).

По мере развития процессов аккумуляции вещества зародышами планет, роста их объемов и массы происходили и важные формообразующие процессы. Предварительные расчеты показывают, что образующиеся тела – зародыши планет – имеют вытянутую форму. Однако постепенно форма менялась, протопланеты становились шарообразными. Наблюдается шарообразность практически всех космических тел, чей поперечник превышает 250–300 км. Шарообразность тела может возникнуть под действием сил собственного тяготения через нагрев и размягчение его недр. И если масса космического тела настолько велика, что собственная сила тяжести придала ему сфероидальную форму, это означает, что в его недрах протекает геологическая эволюция. В результате вещество разделяется по плотности (легкое – вверх, тяжелое – вниз), выделяется тепло, происходят химические реакции и т. п. (Громов 2012: 47).

**Гипотезы о росте планетезималей и борьба за ресурсы.** Рост планетезималей происходил за счет как аккреции вещества, включая и газ, так и взаимного притяжения и случайных столкновений. Но чем больше становится планетезималь, тем сильнее его гравитация, тем интенсивнее он поглощает своих маломассивных соседей. Таким образом, планетезимали разрастались по мере того, как самые крупные из них поглощали более мелкие. Когда массы планетезималей становятся сравнимы с массой Луны, их гравитация значительно возрастает, они как бы встряхивают окружающие тела и отклоняют их в стороны еще до столкновения. В итоге борьбы, столкновений и объединений образуется небольшое количество крупных космических тел («олигархи», зародыши планет, протопланеты). Они господствуют в своих орбитальных зонах и борются за оставшееся вещество. При этом в процессе роста планетезималей они постоян-

но сталкивались и от ударов иногда объединялись и росли, иногда дробились. Процессы дробления приводили к тому, что наиболее крупные объекты захватывали все больше ресурсов. Росли те, которые и без того были крупными. Постепенно в этом хаосе процессы самоорганизации возобладали.

В зависимости от местоположения возможности для роста зародышей планет были различными. Зоной питания каждого зародыша служит узкая полоса вдоль его орбиты. Рост прекращается, когда зародыш поглотит большую часть планетезималей из своей зоны. Размер зоны и продолжительность поглощения возрастают с удалением от звезды. На расстоянии 1 а. е. зародыши достигают массы 0,1 массы Земли в течение 100 тыс. лет. На расстоянии 5 а. е. они достигают четырех земных масс за несколько миллионов лет.

#### **4. Образование системы протопланет**

**Проблемы и гипотезы образования групп планет.** Большинство исследователей считают, что период до образования первых планет занял как минимум несколько миллионов лет. Но колебания в определении длительности процесса очень велики: от ста тысяч до ста миллионов лет.

Поскольку планеты Солнечной системы делятся на две группы (земного типа и газовые гиганты), важным становится вопрос о разнице в их образовании: было ли оно принципиально тем же в обеих группах, а различия определялись расстоянием от Солнца, либо сам процесс образования разных групп планет был во многом различным, либо имелись иные комбинации. При этом одни исследователи считают, что планеты сформировались почти одновременно, а другие – что неодновременно (см. далее).

То, что расстояние от Солнца играло огромную роль в особенностях формирования планет, ни у кого не вызывает сомнений. Различия в длине орбит у зародышей планет (а чем дальше планета от Солнца, тем орбита больше) влияли на возможность захвата окружающих планетезималей и соответственно на радиус и массу протопланеты. Благодаря линии льда концентрация планетезималей и материи в определенных местах Солнечной системы была выше, что также могло повлиять на размеры планет разных областей.

Однако всех этих факторов явно недостаточно, чтобы объяснить несколько значимых феноменов, которые сейчас имеют место в Солнечной системе. Во-первых, почему состав планет земной группы особый и почему у этих планет мало водорода, гелия, а также других газов? Имелись ли эти газы в их составе или нет; если имелись, то как, когда и почему они потеряли основную часть летучего вещества? Во-вторых, почему Нептун и Уран имеют не так много водорода, как Юпитер и Сатурн, а больше

льда, чем последние? В-третьих, почему Юпитер и Сатурн по своему составу ближе к Солнцу, чем другие планеты?

Есть три главных подхода в отношении формирования планет земной группы:

1. Нарращивание массы планеты путем аккумуляции планетезималей (и метеоритов) до современных размеров, в результате чего постепенно произошла структуризация планет на ядро, мантию и кору.

2. Образование планет земной группы по типу планет-гигантов. Но затем планеты земной группы потеряли свои газовые оболочки под воздействием Солнца, которое рассеяло их. Соответственно, остались только их внутренние железоникелевые и силикатные массы. Таким образом, железосиликатные ядра этих протопланет-гигантов превратились в самостоятельные планеты уже небольшой величины. Расслоение их на железные ядра и прочные силикатные оболочки предотвратило их взрывной распад (Маракушев и др. 2013: 135–137).

3. Влияние Юпитера и Сатурна на формирование планет земной группы, поскольку первые забрали весь газ, но подтолкнули планетезимали ближе к Солнцу, в результате чего планетам земной группы удалось собрать свою массу.

Однако подход в объяснении процессов образования планет земной группы сильно зависит от того, считают ли исследователи, что формирование всех планет Солнечной системы совершилось более или менее одновременно или же разновремененно.

**Гипотезы и теории в отношении планет внешней зоны.** Процесс образования планет-гигантов во многом неясен. При этом двум газовым планетам-гигантам, на которые приходится 92 % массы всей планетной системы (то есть Юпитеру и Сатурну, но особенно Юпитеру), уделяется особое внимание в теории образования планет. Очень важное место здесь отводится наличию низких температур в этой зоне, что препятствовало рассеянию газа.

Есть две основные гипотезы относительно способа образования Юпитера и Сатурна, которые содержат много водорода и гелия (Видьмаченко, Мороженко 2014: 22; Кусков и др. 2009: 129–130). Первая гипотеза, *контракции*, объясняет «солнечный» (то есть газовый) состав планет-гигантов тем, что в протопланетном диске большой массы образовались массивные газопылевые сгущения – протопланеты, которые позже в процессе гравитационного сжатия превратились в планеты-гиганты. Согласно этой гипотезе температура планет-гигантов на ранней стадии была высокой. Однако эта гипотеза не объясняет удаления из Солнечной системы значительных излишков вещества, не вошедшего в планеты, а также причины различия состава Юпитера и Сатурна от состава Солнца.

Согласно второй гипотезе, *аккреции*, образование Юпитера и Сатурна проходило в два этапа. На первом этапе происходила аккумуляция твер-

дых тел таким же образом, как и в области планет земной группы, а когда масса крупнейших тел достигла критического значения (от 2 до 10 и более масс Земли), начался второй этап – аккреция газа на эти уже достаточно массивные тела, который длился не менее  $10^3$ – $10^6$  лет. На первом этапе из области Юпитера диссипировала часть газа, его состав начал отличаться от солнечного, и это еще больше проявилось в области формирования Сатурна. На стадии аккреции самая высокая температура внешних слоев Юпитера достигала 5000 К, а Сатурна – около 2000 К. Значительно более сильное прогревание Юпитером своих окраин определило силикатный состав его близких спутников.

Динамика процессов в рамках гипотезы *аккреции* кажется более обоснованной. Образование Урана и Нептуна, где содержится меньше водорода и гелия, также лучше объясняется гипотезой *аккреции*, так как большая часть газа уже покинула пределы Солнечной системы по достижении критической массы.

Но процесс образования планет за счет аккреции на ядро является достаточно медленным и происходит за время порядка нескольких миллионов лет. В то же время некоторые исследователи (см., например: Лин 2008; Дудоров и др. 2015: 11) рассматривают помимо сценария аккреции на ядро также и сценарий гравитационной неустойчивости диска, полагая, что к формированию планет может приводить гравитационная неустойчивость в плотных и холодных областях диска. Образование планет за счет гравитационной неустойчивости может происходить за время значительно меньшее, чем за счет аккреции на ядро. Данная гипотеза предполагает, что газовые гиганты формируются путем внезапного коллапса, приводящего к разрушению первичного газопылевого облака. Но большинство космологов отрицают возможность гравитационного коллапса для планет из-за их относительно малой массы (а признают это только для звезд).

**Последовательность образования планет.** Чаще всего предполагают, что планеты образовались более или менее одновременно. Но некоторые исследователи исходят из того, что одни планеты образовались раньше других. При этом одни считают (см., например: Лин 2008; Савченко, Смагин 2013), что первым сформировался Юпитер, затем Сатурн, а планеты земной группы – много позже (в пределах до 50 млн лет), зато другие полагают (см., например: Маракушев и др. 2013; Витязев и др. 1990), что сначала образовались планеты земной группы. Есть также небезосновательные мнения (см., например: Батыгин и др. 2016), что нынешние планеты (или часть их) не являются планетами первого поколения, так как первые протопланеты были сброшены на Солнце или за пределы солнечной орбиты, либо они коллапсировали.

Некоторые исследователи считают, что планеты земной группы первоначально были похожи на планеты-гиганты, но затем потеряли свои флюидные оболочки. Они объясняют это тем, что вблизи Солнца большая

часть легких газов из атмосфер планет была «выметена» солнечным излучением на периферию, в более далекие области, в открытое космическое пространство.

И напротив, другие исследователи утверждают, что первым сформировался Юпитер, это произошло уже через 2 млн лет после начала процесса трансформации протосолнечного облака. Согласно этим взглядам, формирование данной крупной планеты не просто важнейший момент в истории планетной системы. Если такая планета сформировалась, она начинает управлять всей системой. С одной стороны, газовый гигант стимулирует образование других гигантов и планет земного типа, но с другой – Юпитер за счет того, что сформировался раньше, забрал основную часть газа диска, кроме того, он «выметает» астероиды первого поколения, то есть собирает много масс планетезималей и астероидов. У Сатурна масса меньше, чем у Юпитера, только потому, что он сформировался на несколько миллионов лет позже. В течение последующих 8 млн лет после формирования Юпитера он «помогает» сформироваться остальным планетам-гигантам. Согласно этой версии, планеты земной группы образовались последними, в период от 10 до 100 млн лет. Эти планеты «опоздали» к разделу газа, соответственно, им досталось немного газа, да и твердого вещества было не так много. Словом, кто не успел, тот опоздал, раздел ресурсов в космическом мире столь же несправедлив, как в мире биологическом и социальном (о «борьбе за ресурсы» в космосе см.: Гринин Л. Е. 2013: гл. 5; см. также: Гринин А. Л. 2016).

Состояние современных взглядов на проблему последовательности формирования планет Солнечной системы, равно как и в целом на механизмы их формирования, находится еще на уровне, на котором приходится довольствоваться сосуществованием множества конкурирующих и противоположных гипотез. Тем не менее данный набор гипотез позволяет увидеть основные контуры этого интереснейшего и в чем-то уникального процесса.

**Аналог планеты.** Естественно, не вся материя могла собраться в крупные тела. Планетезимали, которые так и не успели слипнуться в большие тела, а также фрагменты столкновений протопланет наблюдаются в Солнечной системе как астероиды, метеороиды и кометы (Засов, Постнов 2011: 279). Астероиды и метеориты, имеющиеся в огромном количестве в Солнечной системе, таким образом, в основном являются остатками материала, из которого формировались планеты. Астероиды сохранились до нашего времени благодаря тому, что подавляющее большинство их движется в широком промежутке между орбитами Марса и Юпитера. Таким образом, пояс астероидов – это, скорее всего, несформировавшаяся планета, образованию которой помешало гравитационное влияние Юпитера.

## 5. Смена местоположения планет

**Менялось ли положение планет в Солнечной системе?** Раньше считалось (и сегодня встречаются сторонники этой теории), что все планеты сформировались приблизительно на тех орбитах, где находятся сейчас. Но с начала этого века стали все более распространенными мнения, согласно которым для того, чтобы планеты приняли современные орбиты, потребовалось очень много времени. Таким образом, первые несколько сотен миллионов лет система планет и спутников устанавливалась. По мнению В. Г. Сурдина (2012: 62), орбиты планет приняли современный вид около 4 млрд лет назад. Считается, что после этого значительных изменений в Солнечной системе уже не происходило. Происходили большие изменения на самих планетах, в их геологии, климатологии, составе атмосферы и прочем.

Но в самый ранний свой период Солнечная система была иной, нежели сейчас. В частности, есть предположение, что внешняя Солнечная система была гораздо компактнее по размеру, чем в наши дни, а пояс Койпера находился гораздо ближе к Солнцу. На местоположение и орбиты планет влияли их миграции, столкновения с планетезималями и различные другие факторы, как то: метеоритные бомбардировки, катастрофы и т. п., которых было особенно много в течение первого миллиарда лет истории Солнечной системы. Все нижеописанные варианты смены орбит, конечно, пока являются гипотезами, фактов, их подтверждающих, почти нет. Ни одну из гипотез нельзя считать доминирующей.

**Об орбитах и смене местоположения планет земной группы.** Выше мы уже приводили мнение, что планеты земной группы образовывались не одновременно и под влиянием Юпитера, который сформировался первым. Длительное влияние его гравитации вызвало у формирующихся планет земной группы миграцию, передвигая их в области ближе к Солнцу. И если бы поднятая Юпитером волна не встретила препятствий, то сдвинула бы все планеты земной группы к орбите Меркурия (Лин 2008). Земля и другие существующие ныне планеты земной группы, согласно отдельным предположениям, слиплись из редких обломков, оставив внутри системы почти пустое пространство. Повторим, есть также идея, что *существовало не одно, а два или более поколений первичных планет, поскольку Юпитер и Сатурн сбросили их на Солнце или выбросили за пределы Солнечной системы. Соответственно, пространство внутри Солнечной системы стало более свободным, а планетные орбиты – более круговыми. То есть современный порядок потребовал двух или более попыток создания системы.*

**Смена орбиты Юпитера и других планет.** Есть разные предположения о возможных направлениях этих миграций самой крупной планеты Солнечной системы. Согласно одному из них, этот газовый гигант должен был формироваться во внутренней части планетной системы, вблизи ли-

нии льда, пока в диске было еще достаточно газа и твердого вещества. Кроме того, он должен был переместиться к месту своего нынешнего расположения (Лин 2008). Когда Юпитер дрейфовал к центру и тянул за собой Сатурн, он действовал как гравитационный бульдозер, толкая несколько земных масс ледистого вещества внутрь системы (Батыгин и др. 2016: 22).

Имеется гипотеза, с которой согласны часть космологов, о том, что в районе 600–700 млн лет от начала формирования Солнечной системы в результате дрейфа Юпитер и Сатурн вошли в орбитальный резонанс\*. Резонанс изменил движение этих планет – затормозил их миграцию внутрь и направил обратно к внешней части Солнечной системы. Резонанс оказал мощнейшее влияние на всю Солнечную систему. Последняя вошла в гравитационное возбуждение, а это привело к тому, что Нептун и Уран поменялись местами и орбитами, так как ранее Уран находился дальше Нептуна (Батыгин и др. 2016: 23).

Далеко не сразу планеты вышли из резонанса. Хаотическое взаимодействие между теперь уже нестабильными гигантами за несколько миллионов лет толкнуло Юпитер внутрь, на его нынешнее место, а другие планеты отодвинуло наружу. При этом, согласно одной из самых экзотических гипотез, один из гигантов мог быть выброшен в межзвездное пространство. Речь идет о гипотетической девятой планете, которая могла существовать в то далекое время. Оставшиеся планеты постепенно стабилизировали свои орбиты, взаимодействуя с внешними ледистыми обломками (которые теперь мы называем поясом Койпера). Около 3,8 млрд лет назад гиганты успокоились в их современном положении (Там же).

## **6. Дальнейшее формирование Солнечной системы и роль катастроф**

**Основные моменты достраивания и упорядочения Солнечной системы в первый миллиард лет после формирования планетной системы.** Как уже было сказано, для формирования порядка в планетной системе, какой мы видим ее сейчас, возможно, потребовались сотни миллионов лет. И этот период «отладки» и упорядочения был довольно бурным, включал в себя множество грандиозных катастроф, а также различные миграции, о части которых мы уже говорили выше. Одновременно это был период грандиозных геологических изменений в рамках планет и их спутников, в результате чего сформировались основы их структуры и оболочек.

Когда, согласно некоторым космологам, в районе 600–700 млн лет от образования Солнечной системы Юпитер и Сатурн вступили в резонанс, это повлекло за собой множество последствий. В дополнение к вышесказанному в этом процессе они проредили пояс астероидов и пояс Койпера, в которых в результате стало в разы меньше планетезималей (полагают,

---

\* Юпитер делал три оборота вокруг Солнца за каждые два оборота Сатурна.

что их стало в сто раз меньше, хотя это, вероятно, является преувеличением). В любом случае это, видимо, была грандиозная чистка, хотя разрушение и перенаправление планетезималей продолжалось и до и после нее.

Кроме того, с указанным событием, вероятно, связана и так называемая *поздняя эпоха тяжелой бомбардировки*, точнее, особый период этой эпохи (см.: Bottke *et al.* 2012; Gomes *et al.* 2005). Ранняя эпоха, как мы помним, была в начале формирования планетной системы в первые миллионы или десятки миллионов лет. Во время поздней эпохи, по современным представлениям, на каменные планеты выпало огромное количество метеоритных осадков. Первоначально считалось, что она длилась 300 млн лет (с 4,1 млрд лет назад по 3,8 млрд лет назад). Однако относительно недавние исследования показали, что это была более длительная эпоха, и закончилась она не 3,8 млрд, а 3,2 млрд лет назад, то есть продолжалась почти один миллиард лет и была вызвана вышеуказанным изменением орбит Юпитера и Сатурна после формирования Нептуна и Урана. Не так давно также было высказано предположение, что пояс астероидов в прошлом начинался на расстоянии 1,7 а. е. от Солнца вместо сегодняшних 2,1 а. е., то есть этот пояс благодаря гравитационным воздействиям был отодвинут (см.: Bottke *et al.* 2012). В результате этого катастрофические столкновения с астероидами и их мощные падения на планеты земной группы продолжались довольно долго.

**Образование спутников.** Происхождение систем регулярных спутников (то есть движущихся в направлении вращения планеты по почти круговым орбитам, лежащим в плоскости ее экватора) авторы космогонических гипотез обычно объясняют повторением в малом масштабе того же процесса, который они предлагают для объяснения образования планет Солнечной системы. Такие спутники есть у Юпитера, Сатурна, Урана. Однако происхождение иррегулярных спутников (то есть таких, которые обладают обратным движением) эти теории объясняют захватом. Поскольку спутники оказывают гравитационное влияние на планеты, то эта система «планета – спутник(и)» с течением времени эволюционирует. Так, вследствие приливных явлений эволюционировали системы Земля – Луна и Нептун – Тритон.

**Столкновения и катастрофы в ранний период Солнечной системы.** Наиболее известны две предполагаемые катастрофы, которые произошли в период первых ста миллионов лет. Одна связана с Венерой и Меркурием. Венера имеет обратное вращение (противоположное движению Солнца вокруг собственной оси), тогда как почти все прочие крупные тела Солнечной системы вращаются в одном и том же направлении, совпадающем с направлением вращения самого Солнца вокруг своей оси. Меркурий имеет непропорционально большое железоникелевое ядро, в результате чего его металлическая часть составляет 60 % или более от всей его массы (Solomon 2003). Это также причина очень высокой плот-

ности вещества планеты. Объяснения этому разные. Одно из них – столкновение Меркурия с крупным астероидом; в результате этого касательного удара планета потеряла большую часть своей мантии и оболочки (Язев 2011: 48). Существует и еще более экзотическая версия, согласно которой Меркурий первоначально был расположен дальше от Солнца, однако он был не самостоятельной планетой, а спутником Венеры, но затем «убежал» от нее. Эта версия объясняет сразу две проблемы: малый размер Меркурия, но более чем приличный для спутника; обратное другим планетам вращение Венеры. Основная версия по этому поводу – приливное воздействие в далеком прошлом массивного спутника, то есть Меркурия, которое не только затормозило вращение планеты, но даже слегка «раскрутило» ее в обратном направлении (Там же: 57–58).

Другой известной гипотезой о катастрофе является идея, что между 30 и 100 млн лет после формирования Солнца зародыш размером с Марс врезался в протоземлю и породил гигантское количество обломков, из которых сформировалась Луна. Столь мощный удар, конечно же, разбросал огромное количество вещества по Солнечной системе. Этот сильный удар должен был сорвать первичную атмосферу Земли. Ее современная атмосфера в основном возникла из газа, заключенного в планетезималиях, из которых сформировалась Земля. Позже этот газ вышел наружу при извержении вулканов (Лин 2008; Lin 2008). Но здесь имеются варианты. Есть красивая гипотеза, выдвинутая еще в 1975 г. У. Хартманом и Д. Девисом, что рядом с протоземлей миллионы лет относительно близко вращалась протопланета Тейя (Тея). В конце концов планеты столкнулись. Считается, что столкновение произошло почти по касательной и на относительно низкой скорости. Поэтому часть вещества земной мантии и Тейи была выброшена на околоземную орбиту. Из этих обломков и сформировалась Луна, которая начала обращаться по круговому пути.

**Другие гипотезы о столкновениях.** Выше мы говорили, что Нептун в районе 600–700 млн лет от коллапса протосолнечного облака мигрировал и стал менять свою орбиту. Недавно астрономом Юго-Западного исследовательского института в Боулдере (штат Колорадо) Дэвидом Неворны была выдвинута гипотеза о том, что в Солнечной системе существовало не четыре, а пять планет-гигантов и эта пятая планета столкнулась с Нептуном в период его миграции. Это сдвинуло Нептун к его современной орбите, пятая планета-гигант распалась на кластер обломков, которые были выброшены Нептуном в пояс Койпера, то есть на окраину Солнечной системы (обычно считалось, что Нептун при своей миграции выбросил туда планетезимали, а не обломки разрушенной им планеты).

Таким образом, прежде чем Солнечная система достигла более или менее устойчивого состояния, произошел ряд впечатляющих катастроф, изменений и потерь: две из девяти планет (Тейя и пятая планета-гигант)

разрушены и исчезли, зато Меркурий превратился в самостоятельную планету (либо был сильно покорежен и уменьшен в размерах, если находился на современном месте); Венера стала вращаться в обратном направлении; Нептун заметно отделился от Солнца, выбросив остатки разбитой планеты на ее окраину, в пояс Койпера; резонанс Юпитера и Сатурна вызвал мощную бомбардировку земных планет и резко расчистил пояс астероидов и пояс Койпера.

Были ли эти конкретные катастрофы или нет, но в любом случае мы вправе ожидать, что формирование столь сложной и мощной системы, как Солнечная, должно было сопровождаться какими-то катастрофами и крупными пертурбациями (подробное и систематическое изложение истории и эволюции Солнечной системы, а также литературу по этой теме см.: Гринин 2017).

### Библиография

- Адушкин В. В., Витязев А. В. 2007. Происхождение и эволюция Земли: современный взгляд. *Вестник Российской академии наук* 77(5): 396–402.
- Адушкин В. В., Витязев А. В., Печерникова Г. В. 2008. В развитие теории происхождения и ранней эволюции Земли. *Проблемы зарождения и эволюции биосферы*: сб. науч. работ / Ред. Э. М. Галимов, с. 275–296. М.: ЛИБРОКОМ.
- Альвен Х., Аррениус Г. 1979. *Эволюция Солнечной системы*. М.: Мир.
- Батыгин К., Лафлин Г., Морбиделли А. 2016. Рожденные из хаоса. *В мире науки*. Вып. 7. URL: <https://sciam.ru/articles/details/rozhdennye-iz-chaosa>.
- Бочкарев Н. Г. 2010. Рождение звезд. *Активность звезд и Солнца на разных стадиях их эволюции. Рабочее совещание-дискуссия. Москва, 17–18 декабря 2010 г.*: сб. ст. / Отв. ред. В. Н. Обридко, Ю. А. Наговицын, с. 11–26. СПб.: Астрономическое общество.
- Вибе Д. 2016. Проблемы звездообразования по наблюдательным данным в УФ. *Вестник НПО им. С. А. Лавочкина* 3(33): 47–51.
- Витязев А. В., Печерникова Г. В. 2010. Происхождение и ранняя эволюция Солнечной системы. *Активность звезд и Солнца на разных стадиях их эволюции. Рабочее совещание-дискуссия. Москва, 17–18 декабря 2010 г.*: сб. ст. / Отв. ред. В. Н. Обридко, Ю. А. Наговицын, с. 161–176. СПб.: Астрономическое общество. URL: <http://crydee.sai.msu.ru/~mir/sborn2010.pdf>.
- Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафронов В. С. 1990. *Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция*. М.: Наука.
- Відьмаченко А. П., Мороженко О. В. 2014. *Фізичні характеристики поверхонь планет земного типу, карликових і малих планет та їхніх супутників за даними дистанційних досліджень*. Київ: Профі.
- Гринин А. Л. 2016. Саморегуляция как глобальный тренд мегаэволюции. *Эволюция: срезь, правила, прогнозы* / Ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев, с. 17–43. Волгоград: Учитель. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29243488>.
- Гринин Л. Е. 2013. *Большая история развития мира: космическая эволюция*. Волгоград: Учитель.

- Гринин Л. Е. 2017. *Большая история развития мира: история и эволюция Солнечной системы*. М.: Моск. ред. изд-ва «Учитель».
- Громов А. Н. 2012. *Удивительная Солнечная система*. М.: ЭКСМО.
- Дудоров А. Е., Сипатов Д. И., Хайбрахманов С. А. 2015. О формировании протопланет в аккреционных дисках молодых звезд с остаточным магнитным полем. *Челябинский физико-математический журнал* 7(362): 11–20.
- Забродин А. В., Забродина Е. А., Легкоступов М. С., Мануковский К. В., Плинер Л. А. 2008. Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции. *Проблемы зарождения и эволюции биосферы*: сб. науч. работ / Ред. Э. М. Галимов, с. 297–316. М.: ЛИБРОКОМ.
- Засов А. В., Постнов К. А. 2011. *Курс общей астрофизики*. Фрязино: Век 2.
- Кусков О. Л., Дорофеева В. А., Кронрод В. А., Макалкин А. Б. 2009. *Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников*. М.: ЛКИ.
- Лин Д. 2008. Происхождение планет. *В мире науки* 8: 22–31. URL: [http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/430678](http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430678).
- Макалкин А. Б., Дорофеева В. А. 1995. Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца. I. Исходные данные, уравнения и методы построения моделей. *Астрономический вестник* 29(2): 99–122.
- Маракушев А. А., Зиновьева Н. Г., Панях Н. А., Маракушев С. А. 2013. Зарождение и эволюция Солнечной системы. *Пространство и Время* 2(12): 132–41.
- Маров М. Я., Колесниченко А. В., Макалкин А. Б., Дорофеева В. А., Зиглина И. Н., Чернов А. В. 2008. От протосолнечного облака к планетной системе: Модель эволюции газопылевого диска. *Проблемы зарождения и эволюции биосферы*: сб. науч. работ / Ред. Э. М. Галимов, с. 223–274. М.: ЛИБРОКОМ.
- Савченко В. Н., Смагин В. П. 2013. *Концепции современного естествознания*: в 2 т. Т. 2. *Планетное, химическое, биологическое, эволюционное, философия и инструменты, мегаистория Вселенной*. Владивосток: Изд-во ВГУЭС.
- Сурдин В. Г. (ред.) 2012. *Солнечная система*. М.: Физматлит.
- Глатов А. Г. 2010. Влияние магнитного цикла Солнца на формирование Солнечной системы. *Активность звезд и Солнца на разных стадиях их эволюции. Рабочее совещание-дискуссия. Москва, 17–18 декабря 2010 г.*: сб. ст. / Отв. ред. В. Н. Обриджко, Ю. А. Наговицын, с. 177–182. СПб.: Астрономическое общество. URL: <http://crydee.sai.msu.ru/~mir/sborn2010.pdf>.
- Хейзен Р. 2015. *История Земли: от звездной пыли – к живой планете, первые 4 500 000 000 лет*. М.: Династия, АНФ.
- Шкловский И. С. 1987. *Вселенная, жизнь, разум*. М.: Наука.
- Язев С. А. 2011. *Лекции о Солнечной системе: учеб. пособие* / Ред. В. Г. Сурдин. СПб.: Лань.
- Bizzarro M., Ulfbeck D., Trinquier A., Thrane K., Connelly J. N., Meyer B. S. 2007. Evidence for a Late Supernova Injection of  $^{60}\text{Fe}$  into the Protoplanetary Disk. *Science* 316(5828): 1178–1181. doi:10.1126/science.1141040.

- Bottke W. F., Vokrouhlický D., Minton D., Nesvorný D., Morbidelli A., Brassier R., Simonson B., Levison H. F. 2012.** An Archaean Heavy Bombardment from a Destabilized Extension of the Asteroid Belt. *Nature* 485(7396): 78–81. doi:10.1038/nature10967.
- Connolly H. C. 2005.** From Stars to Dust: Looking into a Circumstellar Disk through Chondritic Meteorites. *Science* 307(5706): 75–76. URL: doi:10.1126/science.1108284.
- Gillon M., Jehin E., Lederer S. M., Delrez L., de Wit J., Burdanov A., Van Grootel V. et al. 2016.** Temperate Earth-sized Planets Transiting a Nearby Ultracool Dwarf Star. *Nature* 533(7602): 221–224. doi:10.1038/nature17448.
- Gillon M., Triaud A. H. M. J., Demory B., Jehin E., Agol E., Deck K. M., Lederer S. M. et al. 2017.** Seven Temperate Terrestrial Planets. *Nature* 542(7642): 456–460. doi:10.1038/nature21360.
- Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., Morbidelli A. 2005.** Origin of the Cataclysmic Late Heavy Bombardment Period of the Terrestrial Planets. *Nature* 435(7041): 466–469. doi:10.1038/nature03676.
- Johnson B. C., Melosh H. J. 2012.** Impact Spherules as a Record of an Ancient Heavy Bombardment of Earth. *Nature* 485(7396): 75–77. doi:10.1038/nature10982.
- Lin D. N. C. 2008.** The Genesis of Planets. *Scientific American* 298(5): 50–59. doi:10.1038/scientificamerican0508-50.
- Morbidelli A. 2013.** Planet, Stars and Stellar Systems. *Planet, Stars and Stellar Systems* / Eds. T. D. Oswalt, L. M. French, P. Kalas. Dordrecht: Springer Netherlands. Doi:10.1007/978-94-007-5606-9.
- Motoyama Kazutaka, Tatsuo Yoshida. 2003.** High Accretion Rate During Class 0 Phase due to External Trigger. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 344(2): 461–467. doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06833.x.
- Pfalzner S., Davies M. B., Gounelle M., Johansen A., Muenker C., Lacerda P., Zwart S. P., Testi L., Trialet M., Veras D. 2015.** The Formation of the Solar System. *Physica Scripta* 90(6): 1–19. doi:10.1088/0031-8949/90/6/068001.
- Shukolyukov A., Lugmair G. W. 2003.** Chronology of Asteroid Accretion and Differentiation. *Asteroids III* / Eds. W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel, pp. 687–695. Tucson: University of Arizona Press.
- Solomon S. C. 2003.** Mercury: the Enigmatic Innermost Planet. *Earth and Planetary Science Letters* 216(4): 441–55. doi:10.1016/S0012-821X(03)00546-6.