

Часть III ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Глава 5. Образование зародышей планет и протопланет

5.1. 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 частности те, из которых образовались планеты земной группы и астероиды. Кроме того, исключительно важен вопрос о том, каким образом и почему это вещество подвергалось переплавке. В отношении перечисленных вопросов первостепенное значение имеют данные о метеоритах и их составе.

Хондриты и метеориты. Многие метеориты содержат мелкие зерна миллиметрового размера – хондры⁶², некоторые из них имеют стеклообразное строение. Эти метеориты соответственно называются хондритами. Они самые древние (их возраст почти равен возрасту формирования протосолнца, то есть около 4,6 млрд лет). Кроме того, это и самый распространенный тип метеоритов (Хейзен 2015: 17; Маракушев 1992: 8). Когда-то, правда, считалось, что самый распространенный тип метеоритов – железные, однако большая выборка антарктических образцов позволила выяснить, что железные метеориты составляют весьма скромную долю – 5 % от всех выпадений (Хейзен 2015: 17, 20), тогда как хондриты – 85 % всех метеоритов⁶³. Они делятся на несколько групп. Хондри-

⁶² От греческого слова, означающего «зерно, гранула».

⁶³ Другой, более молодой вид метеоритов, именуемых ахондритами, относится ко времени, когда вещества Солнечной системы проходили первичную трансформацию: плавилась, дробились и т. д. Среди ахондритов наблюдается удивительное разнообразие – кусочки блестящих металлов и обломки оплавленных камней, фрагменты гладкие, как стекло, и экземпляры, состоящие из глянцевитых кристаллов более 2 см в диаметре (Там же).

товые метеориты аналогичны по своим физическим свойствам большинству астероидов. Поэтому пояс астероидов называют также хондритовым поясом (Маракушев 1992: 8).

Метеоритные данные (Connolly 2005) свидетельствуют о том, что образование хондр длилось от 2 до 5 млн лет (Адушкин и др. 2008: 277). Поэтому достаточно широко распространено мнение, что хондры возникли еще до стадии формирования твердых тел. При этом некоторые исследователи, например Дж. Вуд, выдвигают небезыңтересные гипотезы, что они образовались в местах, где соотношение пыли и газа на порядки превышало космическое, то есть в пылевом субдиске. Насколько верна эта гипотеза, сказать сложно, но с точки зрения эволюции это оправданно, поскольку, повторим, концентрация – важнейшее условие появления новых веществ, объектов и зарождения новых процессов*.

Несмотря на распространенность, хондриты все еще остаются весьма загадочными породами (Шкловский 1987: 45–46). Неудивительно, что вокруг них ведутся масштабные дискуссии и формируются весьма противоположные утверждения: о том, что они никогда не плавильсь, не входили в состав первичных планетезималей и образовались очень рано, уже через два миллиона лет после начала формирования Солнечной системы (Лин 2008), и наоборот, что они были свободными расплавленными каплями и появились в результате раздробления вещества, разбрызгивания состава и последующей агрегации реконденсатов, образовавшихся при высокоскоростных соударениях тел (Витязев и др. 1990: 118 и др.). В последнем случае получается, что они были не первичными, а вторичными породами.

Считается, что *планеты земной группы имеют в целом хондритовый состав*, соответственно хондриты рассматриваются как строительные блоки при аккреции планет (Кусков, Кронрод 2008: 317). А хондритовые метеориты являются образцами планетезималей, формировавшихся в протосолнечном облаке (Маракушев, Зиновьева 2013). Таким образом, хондриты могут дать ключ к пониманию природы планетезималей и того, как образовывались планеты, они являются вещественным материалом для суждения о происхождении планет земной группы (Маракушев и др. 2013: 137)⁶⁴.

⁶⁴ Эти авторы также высказывали гипотезу о формировании в начальный период Солнечной системы примитивных хондритовых планет, располагавшихся в районе сегодняшнего поя-

В мироздании случается, что самые древние объекты являются и самыми распространенными. Так, водород и гелий – самые древние элементы – продолжают быть самыми распространенными в мире. В биологической эволюции бактерии (древнейшие организмы) также являются самыми распространенными. Но в социальной эволюции примеров, когда самые древние народы или общества (языки и т. п.) были бы самыми распространенными, кажется, не наблюдается. Это происходит потому, что имеется выявленное нами (Гринин и др. 2008: 10–11) фундаментальное различие биологической и социальной эволюции. Дело в том, что первая имеет преимущественно аддитивный, или накопительный характер, вторая – в значительной степени последовательно-прогрессивный, или вытеснительный характер. В отношении космических объектов аддитивность (дополнительность) еще более наглядна*. Здесь, как мы видели, сосуществуют темная и светлая материи, древнее гало и молодые звезды, первичные и более поздние элементы и т. п.

Имеет смысл более подробно сказать об указанных различиях, имеющих принципиальный характер, между биологической и социальной макроэволюциями (далее излагается по: Там же). Соотношение аддитивности (накопления разнообразия) и конкурентного вытеснения в двух формах макроэволюции является исключительно важным. И аддитивность, и конкурентное вытеснение имеют место в обоих случаях. Однако в целом для социальной макроэволюции (в особенности с XIX в.) намного более характерен поступательный, **последовательно-прогрессивный** характер, развитие по принципу «старое вытесняется новым». Для биологической макроэволюции гораздо более характерен **аддитивный**, накопительный характер, развитие по принципу «новое добавляется к старому», причем между появляющимся новым и сохраняющимся старым возникают новые связи, что существенно усиливает суммарный «приток новизны» в эволюции биоты. (Здесь к месту вспомнить о правиле сосуществования архаичных и эволюционно продвинутых объектов, о котором мы уже говорили выше*.) Например, появление многоклеточных организмов вовсе не привело к вытеснению одноклеточных. Этого и не могло произойти, потому что высшие организмы изначально развивались в среде, насе-

са астероидов, которые предшествовали планетам земной группы. Эти планеты в итоге саморазрушились под воздействием флюидов, попавших в их недра в период формирования. В результате их взрывного разрушения образовался современный пояс астероидов (Марашев и др. 2013: 136).

ленной низшими; эти низшие организмы составляли важнейшую часть тех «внешних условий», к которым изначально должны были адаптироваться высшие. В результате с самого начала своей истории и по сей день низшие организмы остаются жизненно необходимыми для существования высших (Заварзин 2004).

В отличие от биологической эволюции в социальной эволюции (в особенности в последний ее период) общая тенденция направлена на то, чтобы в конечном счете почти полностью вытеснить социальные организмы, которые не сумели воспользоваться инновациями, и модернизировать не выдержавшие конкуренции общественные отношения и институты. Разве могло не сократиться, например, число обществ с каменными орудиями после того, как широко распространились железные орудия? Могло ли не уменьшиться число самобытных цивилизаций в результате экспансии лучше вооруженных социальных систем (например, владеющих огнестрельным оружием)? Одна история завоевания цивилизаций Нового Света испанскими и португальскими конкистадорами дает красноречивый ответ на оба вопроса (см., например: Diamond 1999).

Однако весьма вероятно, что хондриты не были самым первичным веществом, в которое собирались первичные планетезимали, поскольку структура хондр показывает, что их вещество по крайней мере один раз находилось в расплавленном состоянии (Шкловский 1987).

5.2. О начале протогеологических процессов

Причины плавления и спекания хондритов. Хотя встречаются утверждения, что большинство хондр не переплавлялось (Лин 2008) или что многие хондры содержат в своих центральных частях реликтовые зерна нерасплавленного материала (Витязев и др. 1990: 103), тем не менее множество хондритов имеют следы переплавки (часто неоднократной). Гипотез о причинах плавления хондритов много. И то, как, где и почему они прошли процесс плавления, может иметь важнейшее значение для подтверждения или опровержения тех или иных теорий формирования планет.

На первый взгляд факт расплавления хондр приходит в несоответствие с холодной теорией образования планет⁶⁵. Но ее сторон-

⁶⁵ Вообще, вопрос о расплавлении вещества планет является очень важным. Одна из версий (кажется, наиболее распространенная) гласит, что образование планет происходило из хо-

ники дают этому достаточно адекватное объяснение, о котором будет сказано ниже. Имеются также гипотезы, например японских космологов, согласно которым расплавление вещества протопланет происходило уже в составе протопланетного диска (за счет прекращения теплообмена со средой, которому мешала плотная оболочка вокруг будущих протопланет)⁶⁶.

Расплавление и даже испарение могло произойти и непосредственно в газопылевой среде, если ее потоки проходили через ближайšie окрестности рождающегося Солнца. Это вполне возможно, так как температура могла быть достаточно высокой. В то же время в более дальних и периферийных районах Солнечной системы планетезимали могли быть ледяными⁶⁷. Также есть предположения, что первичными планетезималиями выступали кометы (Дорофеева 2015; Маракушев 1992; Маракушев, Зиновьева 2013).

По мнению ряда исследователей, первичное вещество еще небольших планетезималей спекалось, то есть под влиянием солнечного излучения начиналось спекание вещества в небольшие фрагменты (это могло происходить, конечно, только во внутренней зоне Солнечной системы, но не за линией льда). По образному выражению Р. Хейзена (2015: 17), когда ядерный реактор Солнца пришел в действие, образовалась своего рода доменная печь, в которой межзвездная пыль, составлявшая облако, спеклась в крохотные вязкие капли, или хондры. Он пишет, что, будучи размером от дробинок до небольшой горошины, эти продукты воздействия солнечного пламени переплавлялись множество раз, вслед за пульсацией излучения, которое преобразовало околосолнечное пространство⁶⁸.

Формирование протоминералов. Скопления этих древнейших хондр сплавлялись в единое целое за счет более мелкой звездной

лодной материи и планеты никогда не проходили через стадию полного расплавления, хотя расплавление большей части вещества на ранних стадиях жизни некоторых планет вероятно (Савченко, Смагин 2013: 8–9).

⁶⁶ Они исходят из того, что, подобно тому как прекратилась теплоотдача в окружающую среду в процессе сжатия ядра протосолнечного облака, будущие планеты также оказались в ситуации, когда шла активная аккреция на них вещества, но при этом за счет прекращения теплообмена нарастала температура, в результате чего произошла переплавка вещества, что способствовало внутреннему расслаиванию планет на железное ядро, мантию и кору.

⁶⁷ Хотя есть мнения, что это как раз характерно для более близких к протосолнцу районов (Маракушев 1992; Маракушев, Зиновьева 2013).

⁶⁸ Возможно, Хейзен здесь все же несколько преувеличивает, поскольку, как мы видели выше, не все исследователи признают, что хондры переплавлялись (по крайней мере, полностью), тем более неоднократно.

пыли и фрагментов минерального вещества, образуя примитивные хондриты, миллионы которых оседали на поверхности Земли и других планет. Но, конечно, планеты строились за счет не только хондритов, но и так называемых ахондритов и многих других минералов.

Интересно отметить, что досолнечных протоминералов насчитывается порядка 2–3 десятков⁶⁹, то есть в 20 раз меньше, чем во всех образцах метеоритов, где обнаружено более 250 различных минералов (Хейзен 2015). Это показывает, сколь огромным может быть рост разнообразия, который происходит, если для развития данной области наступают подходящие условия. До появления человеческого общества вариантов социальной организации в животном мире также было немного, зато потом вариативность выросла на порядки.

Здесь к месту упомянуть правило роста разнообразия (Гринин, Марков, Коротаев 2008: 72–75)*. В биологической эволюции практически всеми признается рост биоразнообразия, иногда это даже возводится в ранг закона (Алексеев 2008). В социальной эволюции, несмотря на указанную выше вытеснительную тенденцию, в целом также мы видим шаг за шагом рост разнообразия в орудиях труда, продуктах культуры, пищевых продуктах и множестве других вещей. Но увеличение разнообразия также наблюдается и в космическом мире в процессе его развития, что лишний раз подтверждается фактами роста числа минералов и их сочетаний. Формы и размеры звезд, галактик, их сочетаний в разных случаях также, вероятно, демонстрируют тенденцию к росту. Таким образом, рост разнообразия с ходом эволюции присущ всем уровням эволюции, возможно, ускоряясь вместе с ускорением темпа самой эволюции.

С момента формирования твердого вещества и его аккумуляции начали происходить протогеологические процессы. Под воздействием гравитации ранние хондриты соединялись в группы, и сокрушительное давление, высокие температуры, агрессивная вода и жесткие столкновения преобразовывали планетезимали, создавая все новые виды минеральных веществ. Эти разнообразные твердые вещества, включающие раннюю мелкую пыль, пластины слюды и

⁶⁹ Здесь Р. Хейзен, вероятно, имеет в виду вещества, которые встречаются вне Солнечной системы.

полудрагоценный цирконий, послужили основным строительным материалом для формирования Земли и других планет (Хейзен 2015: 20).

Вот как образно описывает это разнообразие Р. Хейзен. Железные метеориты могли представлять плотные металлические ядра таких планетезималей. Поскольку железные метеориты не столь распространены, соответственно, ядра планетезималей должны были отличаться небольшими размерами (Там же). Зато мантии планетезималей, богатые кремниевыми солями, напротив, представлены в большом разнообразии.

Это говардиты, эвкриты, диогениты, урейлиты, акапулькоиты, лодраниты и т. д. – все они отличаются характерной структурой, текстурой и минералогическим составом и названы по местности, в которой найден первый соответствующий образец. Некоторые из этих метеоритов аналогичны горным породам, существующим на Земле в наше время. Например, диогениты, состоящие преимущественно из силиката магния, по-видимому, являются результатом оседания кристаллов в крупных подземных резервуарах магмы. По мере охлаждения магмы кристаллы становились плотнее окружающей расплавленной среды, росли и опускались на дно, образуя концентрированную массу, аналогичную той, которая образуется в наше время глубоко под землей в магматических камерах Земли.

Иногда во время особенно разрушительных столкновений метеорит мог захватить частицы силикатных соединений из пограничной зоны между ядром и мантией планетезимали, где силикаты соединены с металлами. В результате появлялся прекрасный палласит – потрясающее сочетание блестящего металла и золотистых кристаллов оливина. Шлифованный срез палласита, где блики сверкающего металла на фоне оливина выглядят, словно витражи, выделяют его среди самых красивых образцов в мировом собрании метеоритов (Там же).

Но, конечно, основная геологическая работа началась позже, хотя что-то происходило уже в процессе формирования протопланет. Уже на стадии планетообразования (преимущественно импактных событий, то есть столкновений, а не *аккреции* пыли) начался процесс дифференциации вещества в формирующихся

протопланетах. Тепло импактов вместе с теплом радиоактивных элементов должно было привести к разогреву, частичному плавлению вещества, оседанию к центрам масс будущих планет тяжелых железоникелевых частиц и выдавливанию к поверхности более легких силикатных частиц. Так формировались первичные ядра, мантии и кора будущих планет (Язев 2011: 357).

Таким образом, хондриты и другие минералы образовывали планетезимали, а те поглощали друг друга и росли, при этом на вновь образовавшиеся протопланеты выпадали хондриты и другие метеориты. Время от времени две достаточно крупные планетезимали сталкивались с такой силой, что разлетались на осколки (этот бурный процесс до сих пор продолжается в поясе астероидов за Марсом вследствие гравитационного воздействия Юпитера)⁷⁰. Соответственно, большая часть разнообразных ахондритов, которые мы находим теперь, является осколками таких разрушенных планетезималей (Хейзен 2015: 20)⁷¹.

Гомогенность и гетерогенность. Как уже было сказано, в настоящее время много сторонников имеет идея холодного, а не горячего начального состояния Земли и других планет Солнечной системы, которые возникли в результате объединения частиц и твердых тел протопланетного облака (хотя набирает популярность идея о разогреве вещества уже в процессе образования и роста сгущений). Но отсюда вытекает важный вопрос о том, была ли Земля гомогенна или гетерогенна к концу своего формирования, образовались ли ядро, мантия и кора в результате гетерогенной аккреции или же наша планета создавалась из гомогенного материала, который затем подвергался дифференциации в процессе последующей геологической истории. Большинство исследователей

⁷⁰ Но есть мнение, что большинство астероидов не связаны с первым поколением планетезималей, которые, скорее всего, были выброшены из системы под действием Юпитера. Частицы, избежавшие влияния Юпитера или позже попавшие в пояс астероидов, объединились в новые планетезимали, но к тому времени в них осталось мало алюминия-26, поэтому они никогда не плавилась, тогда как в первом поколении планетезималей было много изотопа алюминия-26, имеющего период полураспада 700 тыс. лет и, возможно, попавшего в них при взрыве сверхновой. Этот изотоп способствовал нагреву и плавлению планетезималей первого поколения, в результате чего железо отделилось от силикатов. Тяжелое железо опустилось к ядру, а легкие силикаты собрались во внешних слоях (Лин 2008).

⁷¹ Далее Р. Хейзен проводит такое сравнение: исследование ахондритов напоминает, таким образом, урок анатомии на примере разъятого на части трупа. Требуется много времени, терпения и множество образцов, чтобы представить ясную картину целого тела.

придерживаются модели гетерогенной аккреции, хотя вопрос о разделении вещества допланетного облака на железные и силикатные частицы пока не решен окончательно (Найдыш 2007). Но многие исследователи, как мы видели выше, придерживаются мнения, что в результате ударов в формирующихся протопланетах и радиоактивности начался процесс разогрева и дифференциации вещества (см., например: Язев 2011: 357).

Появление шарообразной формы и усиление геологических процессов. 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 (Ле-Захаров, Кривцов 2008: 339). Однако постепенно форма менялась, протопланеты становились шарообразными. Здесь к месту будет сказать, во-первых, о шарообразности форм не только планет, но вообще большинства крупных тел в Солнечной системе. Шарообразность практически всех космических тел, чей поперечник превышает 250–300 км, является общепризнанным фактом. И шарообразность тела как под действием сил собственного тяготения может возникнуть только через нагрев и размягчение его недр (Громов 2012: 47). Таким образом, форма протопланет претерпела существенные изменения, но в данном случае форма оказалась единой с содержанием, поскольку для придания шарообразной формы требовались существенные изменения в структуре протопланеты. Таким образом, требуется определенный размер, чтобы получилась правильная форма. Важно, что все тела Солнечной системы, чей поперечник превышает 250–300 км, более или менее сферичны, тогда как меньшие тела угловаты или, чаще, картофелеобразны. Отметим также, что если масса космического тела настолько велика, что собственная сила тяжести придала ему сфероидальную форму, то это означает, что в его недрах протекает геологическая эволюция. В результате вещество разделяется по плотности (легкое поднимается вверх, тяжелое опускается вниз), выделяется тепло, происходят химические реакции и т. п. (Сурдин 2011: 32).

Итак, в результате формирования новых структур, общесистемных процессов молодой Солнечной системы мы видим активное проявление новых сил, которые в условиях и масштабах пла-

нет, их спутников и малых планет становятся главными: химические и геологические. Наконец-то в истории Вселенной развитие переходит из гигантских масштабов в средние. А для эволюции не столь больших объектов требуется меньше энергии. Соответственно, можно говорить о *законе зависимости скорости эволюции от сокращения ее «фронта»*^{*}. Сокращение «фронта» эволюции при переходе от геологической к биологической эволюции, а от нее – к социальной полностью подтверждает это правило.

5.3. Гипотезы о росте планетезималей и борьба за ресурсы

Рост планетезималей. Итак, рост планетезималей происходил как за счет аккреции вещества, включая и газ, так и за счет их взаимного притяжения и столкновений. Роль случайных столкновений (импактов) в ходе формирования протопланет, возможно, была ведущей (Адушкин, Витязев 2007: 397)⁷², но не в течение всего процесса, а скорее на первых его фазах. Чем больше становится планетезималь, тем сильнее ее гравитация, тем интенсивнее она поглощает своих маломассивных соседей. Таким образом, планетезимали разрастались по мере того, как самые крупные из них поглощали более мелкие.

Здесь, если использовать термины социологии и теории игр, шла игра с нулевой суммой, по принципу «если к кому-то что-то прибавилось, то у другого столько же убавилось». В рамках классической физики этот процесс в какой-то мере мог бы быть описан законом сохранения массы. Но с точки зрения эволюции более интересно, что налицо один из вариантов естественного отбора додарвиновского типа (об этом см. ниже).

Затем, как уже было сказано, согласно представлениям многих исследователей, множество километровых планетезималей собираются в крупные тела. Когда массы планетезималей становятся сравнимы с массой Луны⁷³, их гравитация возрастает настолько,

⁷² Важность столкновений планетезималей подтверждается уже астрофизическими данными в ИК-диапазоне по ряду пылевых протопланетных дисков (различных звезд). Эти данные интерпретируются как поступления вещества при соударениях тел (Там же).

⁷³ В солнечной системе в области планет земной группы масса отдельных зародышей должна была быть 10^{23} кг и еще большей – в области планет-гигантов (см.: Засов, Постнов 2011: 279). 10^{23} кг – это 10 млрд триллионов тонн. Масса Земли – в 60 раз больше, зато масса Луны несколько меньше.

что они отклоняют окружающие тела в стороны еще до столкновения. Этим они ограничивают свой рост⁷⁴.

Приведем еще одно образное описание процесса. Несколько дюжин крупных каменных шаров, каждый величиной с небольшую планету (скорее, несколько меньше, как мы видели выше, – с крупный спутник планеты, Луну. – *Л. Г.*), подобно гигантским пылесосам, подчищая на своем пути внутри Солнечной системы значительную часть пыли и газа, срастались между собой и выравнивали свои орбиты до почти идеальных окружностей (Хейзен 2015: 20). Далее Р. Хейзен подчеркивает, что расположение орбит в значительной мере зависело от массы планет, однако, конечно, далеко не только от нее.

Между тем в некоторых моделях численное моделирование показало, что могло образоваться множество (многие сотни) объектов примерно лунного размера⁷⁵. При этом взаимное гравитационное влияние этих объектов должно было приводить к изменениям их орбит с взаимными пересечениями. Это должно было вызвать укрупнение объектов в результате взаимных столкновений (Язев 2011: 356–357).

В итоге, согласно данному представлению, разделяемому большинством космологов, в результате борьбы, столкновений и объединений образуется относительно небольшое количество крупных космических тел, называемых зародышами планет, протопланетами, «олигархами». Они господствуют в своих орбитальных зонах и борются за оставшееся вещество.

В зависимости от местоположения возможности для роста зародышей планет различны. Зонай питания каждого зародыша служит узкая полоса вдоль его орбиты. При этом, что вполне логично, рост зоны питания происходит вместе с ростом массы зародыша. Рост прекращается, когда зародыш поглотит большую часть планетезималей из своей зоны. И соответственно вместе с ростом его

⁷⁴ Интересный пример положительной обратной связи, которая, достигнув максимума, переходит в отрицательную обратную связь.

⁷⁵ К. Батыгин, Г. Лафлин и А. Морбиделли (2016; *Batygin et al.* 2016) даже говорят, что протопланетный диск Солнечной системы кишел «эмбрионами» размерами с Луну. Однако другие исследователи считают, что крупных планетезималей было не так много. Некоторые даже полагают, что в протопланетном рое крупных, таких как Луна или Меркурий, совсем немного – единицы (Савченко, Смагин 2013). Но все же, вероятно, их было достаточно много.

массы уменьшается и вероятность появления в зоне его роста серьезных конкурентов. Крупные небесные тела, как медведи или другие крупные хищники, не уживаются в одной берлоге, имеют каждый свою зону обитания и питания либо борются за них.

Конечно, нельзя не обратить внимание на терминологию, явно взятую из биологии: *зародыш, зона питания*; также упоминаются *перекрещивающиеся и предельные зоны питания* и т. п. (см., например: Витязев и др. 1990: 145, 153 и др.). Но здесь не только сходная с биологией терминология, но и явно похожая ситуация, поскольку возникает некая пищевая (трофическая) цепочка, только в отличие от живой природы воспроизводство пищевых ресурсов не происходит с четкой регулярностью. Это лишний раз показывает, что многие процессы на разных фазах эволюции имеют типологическое сходство.

Размер зоны питания 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 лет⁷⁶. Зародыши могут стать еще больше вблизи линии льда или на краях разрывов диска, где концентрируются планетезимали (Лин 2008).

При этом скорости тел в диске планетезималей росли пропорционально радиусам крупнейших тел. Сталкивающиеся планетезимали начинали дробиться, тем более что при достижении размеров Луны относительные скорости возросли до 1 км/с, а возрастающий разброс в скоростях должен был привести к нарастанию энергии ударов. Но дробление вело и к росту крупных тел. Ведь наиболее крупные объекты обладали и большим гравитационным полем, в результате чего осколки становились спутниками центрального тела, со временем падали на него и продолжали увеличивать его массу (Язев 2011: 356–357).

Новая эпоха хаоса, борьба за ресурсы и процессы самоорганизации. Таким образом, в этом первичном хаосе роящихся и сталкивающихся планетезималей легко угадывается борьба за

⁷⁶ Однако эта логика годится только в первом приближении. Она не объясняет, почему Марс, будучи от Солнца на расстоянии, в два раза большем, чем Земля, меньше последней. По этой логике Уран также должен был быть больше Сатурна и даже Юпитера. Другими словами, здесь вступают в действие еще и другие факторы, в том числе индивидуальные для каждой планеты, о которых еще будет речь.

ресурсы, ибо побеждал тот, кто появился раньше либо в более удачное время, находился в более удачном месте (в том числе в отношении соседей), имел большие массы, лучшую орбиту и т. п. В частности, в результате дробления и захвата крупными планетезималиями мелких в итоге выживали лишь некоторые наиболее крупные объекты. При этом до некоторых пор они захватывали все больше ресурсов. Словом, росли те, кто и без того был крупным.

Борьба за ресурсы есть общий способ отбора в эволюции, однако сами механизмы отбора существенно варьируются на разных ее уровнях и в разных ее линиях. Соответственно, огромную роль в процессе отбора всегда играют те или иные, в том числе случайные, преимущества. Эволюционный отбор можно рассматривать и как способ апробирования различных вариантов и конструкций, как орудие, с помощью которого эволюция осуществляет «творческое разрушение». Отбор одновременно и повышает, и снижает разнообразие, создавая новые варианты и уничтожая старые*.* С одной стороны, как мы видим, число объектов должно было значительно сократиться. С другой стороны, в итоге формируется система с небольшим числом крупных объектов – планет и их спутников, то есть принципиально новых для Солнечной системы тел, с появлением которых только и мог установиться (и то не сразу) какой-либо порядок. Таким образом, отбор – это важнейший инструмент упорядочения процессов.

Влияние среды на отбор прослеживается в большинстве типов отбора. Но хотя рой планетезималей – это явно среда, влияющая на объекты, что в ней находятся, в данном случае мы видим механизм отбора, еще не связанный с попытками приспособиться к окружающей среде⁷⁷.

Перед нами возникает весьма впечатляющая картина смены хаоса и порядка в процессе формирования планетной системы. Сначала в результате хаоса коллапсирующего газопылевого облака возникает первичная структура протосолнечной системы (с молодым Солнцем и протопланетным диском вокруг него). Затем начинается переход к твердой материи в рамках протопланетного диска и его пылевого субдиска, которая и собирается в разного рода планетезимали. Это ведет к новой эпохе хаоса. Ведь образовалось

⁷⁷ Правда, в отношении формирующихся оболочек протопланет можно сказать, что их следует рассматривать как способ изолироваться от среды, например, в плане теплообмена и уменьшения влияния бомбардировок астероидами.

огромное множество (многие миллиарды, возможно, триллионы) зародышей планет размерами с астероид, то есть тел самого разного масштаба, которые одновременно двигались по разным орбитам. Расчеты показывают, что плотность вещества в этих образованиях приближалась к 1 г/см^3 (Язев 2011: 356), что вовсе не мало (отсюда и частота столкновений). Соответственно, налицо и проявления этого хаоса: постоянные столкновения тел, которые приводили к различным последствиям. Постепенно, однако, как мы видим, за счет поглощения мелких объектов и роста объема крупных процессы самоорганизации возобладали в этом хаосе.

Длительность процесса формирования протопланетных тел, зародышей планет и протопланет. Относительно длительности формирования протопланет существует формула, согласно которой эта длительность равна 10^n лет, где, по разным оценкам, $n =$ от 5 до 8 (Найдыш 2007). Но подобная формула дает не так много, ведь в этом интервале процесс мог колебаться от 100 тыс. лет до 100 млн лет⁷⁸. Большинство исследователей исходят из того, что процесс до образования первых планет занял до 10 млн лет. Но при этом есть мнения, что планеты формировались неодновременно. Так, например, Д. Лин считает, что хотя первая планета Юпитер образовалась рано (в течение 2–3 млн лет после образования протопланетного диска), полностью планетная система сформировалась за 50 или более миллионов лет (Лин 2008).

⁷⁸ По мнению Д. Лина, период формирования зародышей планет – от 1 до 10 млн лет (Там же). Другие считают, что рост массы до земных значений занимает около 10^8 лет, то есть 100 млн лет (Засов, Постнов 2011: 279; см. также ниже о подходах К. Батыгина и др. [2016] на длительность образования планет земной группы). Встречаются даже мнения, что образование протопланетных тел заняло несколько сотен миллионов лет (Савченко, Смагин 2013: 8).