



ГЛАВА I

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕМЛИ, ЛУНЫ, ИХ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА, ЕЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ И СОСТАВ

Солнечная система образовалась около 5 млрд лет назад в результате длительной эволюции звездного мира. Первые звезды в нем были, по существу, антиподами Солнцу — желтому карлику диаметром 1391980 км с массой $1989 \cdot 10^{30}$ кг и расчетной продолжительностью жизни около 10 млрд лет. Это были голубые гиганты в сотни раз более массивные, чем Солнце, с небольшими периодами жизни — в несколько миллионов лет, характеризующиеся ультрафиолетовой светимостью (Larson, Bromm, 2001). С их образованием прекратились так называемые темные времена (Dark Ages), когда в гелий-водородной Вселенной, рожденной Большим Взрывом (Big Bang), еще не было светящихся объектов. Время появления первых звезд называется в астрономии расцветом Вселенной — космическим Ренессансом (Cosmic Renaissance). Охлаждение играло главную роль в образовании гигантских звезд, способствуя уплотнению гелий-водородного газа, понижению газового давления и образованию гравитационно связанных газовых стяжений (gravitationally bound clumps), вовлекшихся в дискообразные, плоские, быстро вращавшиеся конфигурации комковатой и волокнистой структуры. Наиболее плотные стяжения под действием собственной гравитации коллапсировали, что и сопровождалось образованием звезд. Минимальная масса стяжения, необходимая для этого, называется массой Джинса (Jeans mass). Она пропорциональна квадрату температуры коллапсирующих стяжений, которая, несмотря на охлаждение, оставалась высокой. Это и определяло огромные размеры стяжений, соответствующие гигантским первым звездам. Вследствие коротких периодов звездной жизни их поколения быстро сменяли друг друга, определяя стремительную эволюцию звездного Мира на ранних этапах его развития.

Самые гигантские звезды, чья масса более чем в 250 раз больше солнечной, в конце жизни коллапсировали в такие же массивные черные дыры. Черные дыры объединялись в системы все большего размера и в результате формировали ядра галактик, сложенных светящимся и темным веществом (Краус, 1987).

Звезды, массы которых меньше 250 солнечных масс, в конце жизни взрывались как сверхновые и порождали газовые облака, из которых развивались звезды следующего поколения, что намечало эволюцию звезд в сторону уменьшения их размера и увеличения продолжительности жизни. Это связано с тем, что в гигантских звездах, первоначально имевших практически чисто гелий-водородный состав, происходил синтез тяжелых химических

элементов, называемых в астрономии металлами, способствующих охлаждению порождаемых ими газовых облаков. «Когда распространенность металлов в формирующих звезды облаках поднимается выше одной тысячной их распространенности в Солнце, металлы быстро охлаждают газ до температуры фонового излучения (эта температура понижается с расширением Вселенной, опускаясь до 19 К за миллиард лет после Большого Взрыва и до 2,7 К в настоящее время)» (Larson, Bromm, 2001. С. 58). Понижение температуры и изменение состава протозвездных дисков сопровождалось уменьшением размера и увеличением плотности формирующих звезды стяжений вещества вплоть до достижения ими твердого ледяного состояния.

Это значительно увеличивало скорость вращения протозвездных дисков и ускоряло процесс формирования звезд, эволюционировавших в конце концов до размера желтых карликов многомиллиардной продолжительности жизни. В них вовлекалась только часть вещества протозвездных дисков, наследовавшихся системами от гигантских звезд предшествующего поколения. Это и создавало возможности возникновения одновременно со звездами в протозвездных дисках гигантских планет, соизмеримых по размеру с Юпитером, и коричневых карликов. Их массивность нарастала с приближением к звездам, и в непосредственном их окружении возникали коричневые карлики с массой в пределах 13-75 юпитерианской (Сурдин, 1999). Со звездами их сближают термоядерные реакции, развивающиеся на основе дейтерия. Вариации массивности ставят коричневые карлики в один ряд с планетами-гигантами, относящимися в Солнечной системе к группе Юпитера. Открытие в последнее десятилетие звездно-планетных систем относится к величайшим достижениям астрономии (Сурдин, 1999; Вибе, 2000), позволяющим как бы завершить общую картину эволюции звездного Мира, определяемой синтезом в гигантских звездах тяжелых химических элементов (металлов) и направленной в сторону формирования все менее массивных и все дольше живущих звезд. Настанет время, когда долгоживущие желтые карлики полностью придут на смену звездным гигантам.

Планетное окружение обнаруживается только у звезд, содержание тяжелых металлов в которых не ниже солнечной распространенности, а большей частью превышает ее. Это служит дополнительным доказательством образования звездно-планетных систем на заключительных этапах звездной эволюции.

Обнаружение во Вселенной огромного множества звездно-планетных систем (Extra-solar..., 2001) проливает свет на механизм образования как самих звезд, так и окружающих их планет-гигантов. Становится очевидным, что и те и другие возникают в результате сходных процессов аккреции небулярного вещества, уплотняющегося до состояния ледяных планетезималей вследствие падения температуры. Это подчеркивается также вхождением в звездно-планетные системы коричневых карликов – образований промежуточных между гигантскими флюидными планетами и небольшими звездами.

Обнаружение звездно-планетных систем объясняет и происхождение нашей Солнечной системы, в которой с удалением от Солнца массивность планет-гигантов последовательно уменьшается (Юпитер-Сатурн-Уран и Нептун). В окружении Солнечной системы находятся несравнимо более мелкие ледяные объекты – Плутон (диаметр 2320 км), образующий динамическую систему с Хароном (диаметр 1270 км), Иксион, Варуна, Куаоар, Хаос и десятки тысяч комет, образующих пояс Койпера (Luu, Jewitt, 1996), который

служит главным источником комет, вторгающихся в Солнечную систему, и более удаленные гипотетические кометные облака Хиллса и Оорта.

Кометы состоят из водного льда и космической пыли и относятся к наиболее близким аналогам ледяных тел (планетезималей), которые пришли на смену огромным стяжениям уплотненного газового вещества (prestellar clumps), формировавшим гигантские звезды.

Современное представление о строении Солнечной системы складывалось в астрономии постепенно. Долгое время, до Николая Коперника (1473-1543 гг.), господствовало сформулированное Аристотелем (384-322 гг. до н.э.) представление о геоцентрическом ее строении. Однако уже в античное время оно пересматривалось Аристархом Самосским (310-230 гг. до н.э.), создавшим близкую к современной гелиоцентрическую модель строения Солнечной системы и тем самым на много веков опередившим свое время. Согласно модели Аристарха Самосского, Солнце находится в центре Мира, вокруг него обращаются все планеты, а Луна дополнительно обращается вокруг Земли. Смена дня и ночи на Земле объяснялась им вращением Земли вокруг своей оси. Модель объясняла также наблюдаемое с Земли изменение блеска Венеры и Марса. Однако эта гениальная модель не была принята современниками Аристарха Самосского.

Солнечная система формировалась в гигантском протосолнечном небулярном диске в условиях температурного градиента с минимумом температуры в его центральной области. Поэтому в отличие от ее периферических планет (Урана, Нептуна) и кометного окружения внутренние планеты (Сатурн, Юпитер) и само Солнце имеют гелий-водородный состав, отражающий несравнимо более низкие температуры формирования их планетезималей, обеспечившие конденсацию и затвердевание водорода, что отражает диаграмма (рис. 1.1). К центру протосолнечного диска происходило понижение температуры, и соответственно в состав планетезималей входило все большее число газовых компонентов, что и определяло нарастание массивности планет-гигантов с приближением к Солнцу. В Солнце, отвечавшем температурному минимуму, аккумулировалась масса ледяного вещества, в 1000 раз превышавшая массу Юпитера. Аккумуляция вещества сопровождалась аккреционным сжатием с подъемом температуры, достаточным для теплового излучения планет-гигантов, а в Солнце к нему добавилось затем термоядерное излучение. По аналогии со звездно-планетными системами можно полагать, что и в Солнечной системе между Солнцем и Юпитером формировались планеты-гиганты массивнее Юпитера и коричневые карлики с массой, превышающей 13 масс Юпитера. Однако в настоящее время этот орбитальный диапазон в ней занимают небольшие железо-каменные планеты Земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и обломки примитивных железо-каменных (хондритовых) планет, образующие пояс астероидов между орбитами Марса и Юпитера. Они совершенно не вписываются в прогрессивное развитие звездно-планетных систем. Как показано нами ранее (Маракушев 1992, 1999), планеты Земной группы относятся к регрессивной стадии развития Солнечной системы, когда Солнце, достигнув звездного состояния, оказывало разрушительное воздействие на систему окружающих его планет-гигантов. Околосолнечные планеты (протопланеты Земной группы) теряли при этом гигантские флюидные оболочки, а их железо-силикатные ядра превращались в самостоятельные небольшие планеты Земной группы.

Следует заметить, что еще в далеком прошлом одним из основателей геологической школы непунистов Б. Мелле (1656-1738) высказывалось

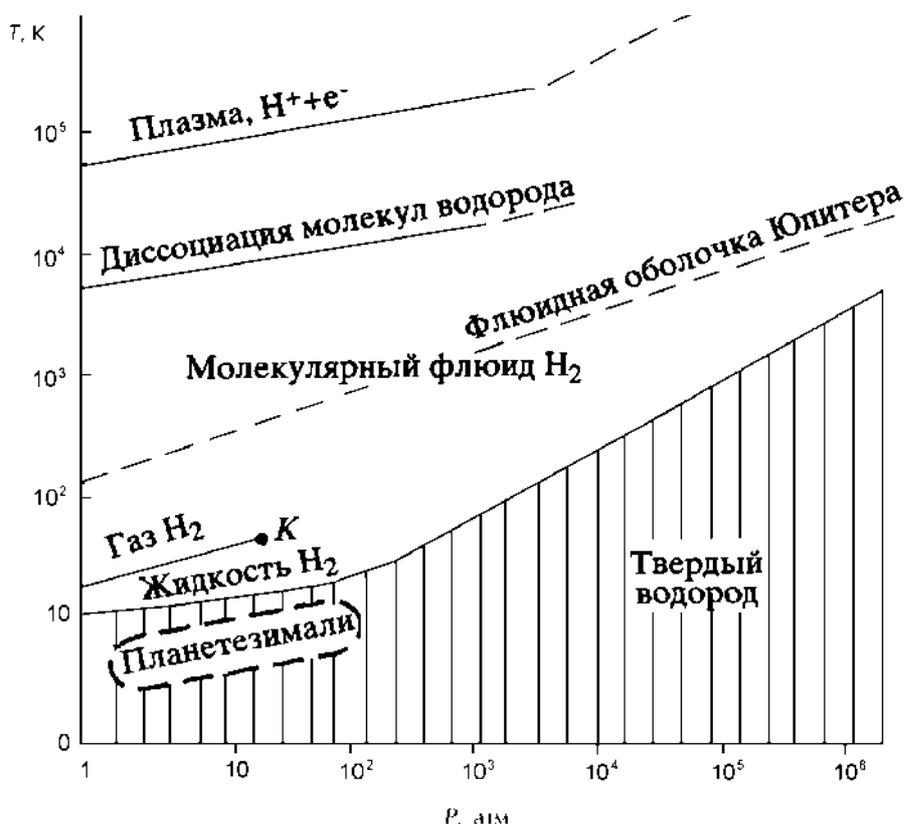


Рис. 1.1. Диаграмма P - T состояния водорода (K — критическая точка). Оконтурина область формирования ледяных водородных планетезималей, в результате аккреции которых аккумулировались массы Солнца и околосолнечных планет (Сатурн, Юпитер, протопланеты Земной группы), и показано современное состояние гигантской флюидной оболочки Юпитера

представление о Земле и сходных с ней планетах как о потухших звездах. В настоящее время известно, что судьба настоящих звезд с термоядерной природой светимости иная. В конце жизни они взрываются как сверхновые и порождают раскаленные газовые облака, на основе которых развиваются звезды следующего поколения. Однако обращающиеся вокруг Солнца гигантские планеты типа Юпитера обладают собственной светимостью, что и сближает их по внешнему виду со звездами, и определяет их название «блуждающие звезды». С увеличением массивности до более 13 юпитерианских масс они превращаются в коричневые карлики, к тепловому излучению которых добавляется вклад термоядерных реакций на основе дейтерия. В ядрах подобных блуждающих звезд под огромным давлением их водородных оболочек и формировались железо-каменные массы планет Земной группы. Затем блуждающие звезды потухли, потеряв гигантские водородные оболочки под воздействием Солнца, а их железо-силикатные ядра превратились в самостоятельные планеты Земной группы. Гипотезу Б. Мелле в аспекте современных знаний можно отнести в разряд гениальных интуитивных догадок.

Остановимся на проблемах космохимии, касающихся водорода и гелия. Водород (см. рис. 1.1) является главным минералом Вселенной, с которого начиналась ее вещественная эволюция. Рассмотрим его положение в периодической системе элементов на термодинамической основе с привлечением

теплоемкости и энтропии простых веществ, соответствующих химическим элементам. Хотя энтропия вычисляется по теплоемкости, их термодинамический смысл различен. Теплоемкость (Cp^0_{298}) относится к свойствам элементов при стандартной температуре, тогда как энтропия является интегральной величиной, отражающей специфику изменения теплоемкости в диапазоне от абсолютного нуля до температуры 298 К. Поэтому теплоемкость и энтропия характеризуют элементы в различных аспектах и относятся к их фундаментальным термодинамическим свойствам. Ниже используются их стандартные удельные величины, рассчитанные на 1 г вещества (Приложение). Анализ взаимоотношений этих величин выявил фундаментальную зависимость, отражающую периодичность изменения энтропии веществ с увеличением их теплоемкости. На рис. 1.2 эта периодичность показана применительно к соответствующим водороду нечетным химическим элементам (указывается также температура плавления простых веществ, К). Соответственно выводится периодическая система нечетных химических элементов (табл. 1.1). Сам водород в этой системе занимает крайнее положение, он относится к группе галогенов (At-I-Br-Cl-F-H) и возглавляет период самых легких элементов (H-Li-B-N).

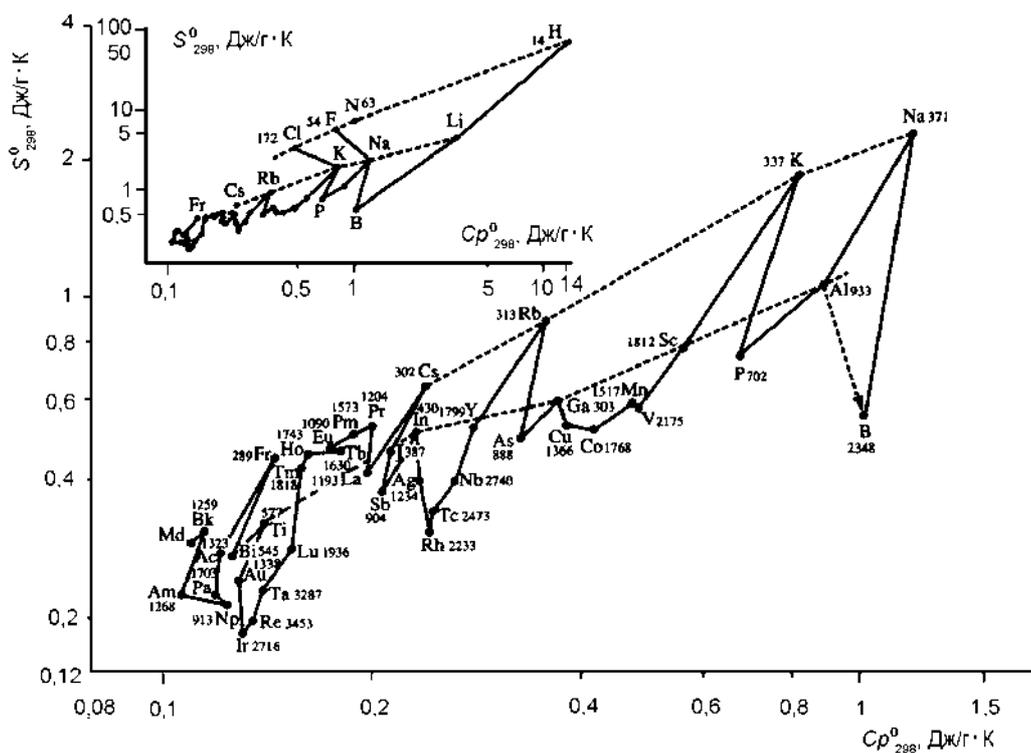


Рис. 1.2. Периодичность изменения энтропии в зависимости от теплоемкости простых веществ, соответствующих нечетным химическим элементам, с указанием их температуры плавления (К)

Аналогичное построение для второго по распространенности элемента — гелия — выявляет периодичность изменения термодинамических свойств соответствующих ему четных элементов (рис. 1.3, табл. 1.2). В этой периодичности гелий относится к группе благородных газов (Rn-Xe-Kr-Ar-He) и к периоду самых легких элементов (He-Be-C-O).

Таблица 1.1. Периодическая система нечетных элементов на термодинамической основе

			85At					53I		35Br		17Cl	9F	1H	O	
101Md	95Am	91Pa	87Fr	79Au	69Tm	63Eu	59Pr	55Cs	47Ag	37Rb	29Cu	19K	11Na	3Li	I	Г Р У П П Ы
103Lw	97Bk	93Np	89Ac	81Tl	71Lu	65Tb	61Pm	57La	49In	39Y	31Ga	21Sc	13Al	5B	Ш	
105Db	99Es			83Bi	73Ta	67Ho			51Sb	41Nb	33As	23V	15P	7N	V	
107Bh					75Re					43Tc		25Mn			VIII	
109Mt					77Ir					45Rh		27Co				
→ C ⁰ P ₂₉₈																

Термодинамическое обоснование водородного и гелиевого периодов химических элементов вносит в периодическую систему космохимический аспект. Относящиеся к водородному и гелиевому периодам легкие элементы возникли в дозвездный период формирования Вселенной, тогда как более тяжелые элементы связаны своим происхождением с возникновением и эволюцией звезд (Тейлер, 1975). В результате этого легкие элементы резко аномальны по термодинамическим и физическим свойствам: соответствующие им твердые вещества отличаются аномально низкой энтропией и аномально высокими температурами плавления. Они выпадают в низкоэнтропийную область из соответствующих им групповых корреляций, как показано штри-

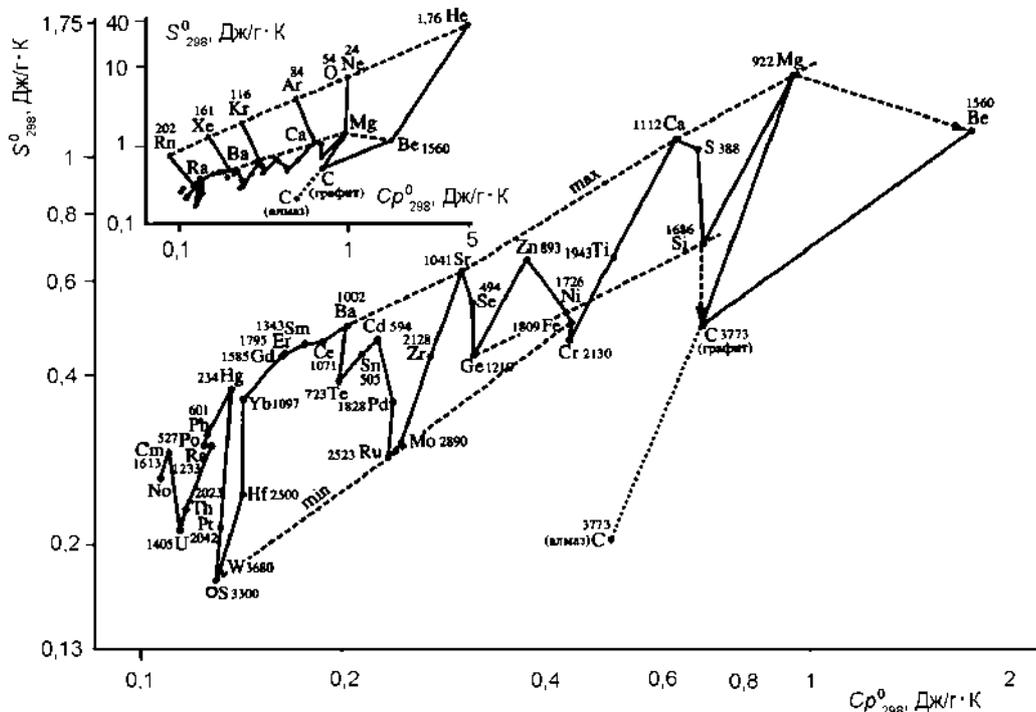


Рис. 1.3. Периодичность изменения энтропии в зависимости от теплоемкости простых веществ, соответствующих четным химическим элементам, с указанием их температуры плавления (К)

Таблица 1.2. Периодическая система четных элементов на термодинамической основе

			⁸⁶ Rn					⁵⁴ Xe		³⁶ Kr		¹⁸ Ar	¹⁰ Ne	² He	O	Г Р У П П Ы
¹⁰² No	⁹⁶ Cm	⁹² U	⁸⁸ Ra	⁸⁰ Hg	⁷⁰ Yb	⁶⁴ Gd	⁶⁰ Nd	⁵⁶ Ba	⁴⁸ Cd	³⁸ Sr	³⁰ Zn	²⁰ Ca	¹² Mg	⁴ Be	II	
¹⁰⁴ Rf	⁹⁸ Cf	⁹⁴ Pu	⁹⁰ Th	⁸² Pb	⁷² Hf	⁶⁶ Dy	⁶² Sm	⁵⁸ Ce	⁵⁰ Sn	⁴⁰ Zr	³² Ge	²² Ti	¹⁴ Si	⁶ C	IV	
¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁰ Fm			⁸⁴ Po	⁷⁴ W	⁶⁸ Er			⁵² Te	⁴² Mo	³⁴ Se	²⁴ Cr	¹⁶ S	⁸ O	V	
¹⁰⁸ Hs					⁷⁶ Os					⁴⁴ Ru		²⁶ Fe			VIII	
110					⁷⁸ Pt					⁴⁶ Pd		²⁸ Ni				
→ C°P ₂₉₈																

ховыми стрелками на рис. 1.3 для бериллия и углерода. К дозвездным элементам принято относить только самые легкие элементы до бора включительно, но выявленная термодинамическая и термическая аномальность углерода позволяет и его отнести к их семейству.

Следующая специфика дозвездных элементов касается их космической распространенности. Среди химических элементов доминируют водород и гелий, за которыми следуют (со значительным разрывом) кислород, углерод и азот, затем магний, кремний и железо. В глубоком минимуме распространенности находятся литий, бериллий и бор. Обрисованная закономерность космической распространенности элементов свойственна и Солнечной системе, как показано на рис. 1.4, где наглядно выражено правило Оддо-Гаркинса преобладания атомов четных номеров (занимают максимальные позиции) над атомами нечетных номеров (находятся в минимумах распространенности). Однако в ряду крайне легких элементов эта закономерность нарушается (водород занимает максимальную позицию, а бериллий – минимальную), что связано с особым происхождением этих элементов. По существующим представлениям (Тейлер, 1975), они составляют группу легких химических элементов (H, He, Li, Be, B), возникших во Вселенной в результате Большого Взрыва. В результате слияния их ядер происходит синтез более тяжелых элементов в недрах звезд. Для образования звезды необходима критическая масса (около 0,3 массы Солнца), при которой начинаются термоядерные реакции слияния ядер водорода с образованием гелия и выделением атомной энергии, определяющей звездное состояние космических тел. В более массивных телах (около 0,7 массы Солнца) к этим реакциям добавляются реакции горения гелия с образованием углерода и ряда более тяжелых элементов (O, Ne, Mg). Их синтез происходит в настоящее время в Солнце, но они так и остаются в его недрах и недоступны для наблюдения. Свой химический состав Солнечная система в основном унаследовала от своей предшественницы – гигантской звезды. Она взорвалась как сверхновая около 5 млрд лет назад и породила гигантское облако газа, на основе которого и возникло Солнце и окружающие его планетная и кометная системы. Предшествующая их образованию гигантская звезда оставила после себя химические элементы всех генетических групп (см. рис. 1.4). К ним относятся, с одной стороны, элементы, образовавшиеся в недрах звезды в результате реакций слияния ядер с выделением энергии (до железа включительно), с другой – более тяжелые элементы, образующиеся не с освобождением, а, наоборот, с погло-

щением энергии в процессах захвата нейтронов. Элементы до висмута включительно образовались в результате медленного s-процесса в слабом нейтронном поле в крайне высокотемпературных звездах. Более тяжелые, чем висмут, элементы образовались при быстром и сильно неравновесном г-процессе, таком как взрыв сверхновой (Флейшер и др., 1981).

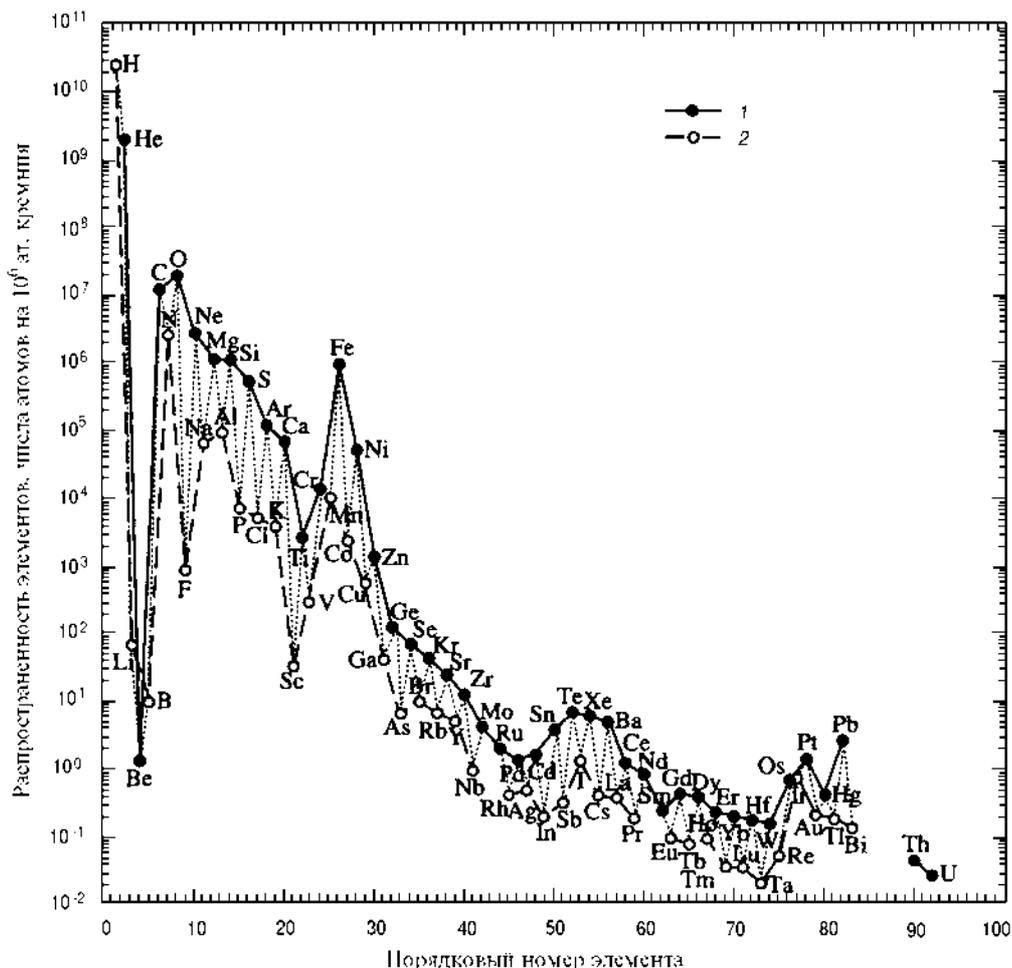


Рис. 1.4. Распространенность химических элементов в Солнечной системе, нормированная на 10^6 ат. кремния (Cameron, 1982)

1 — четные элементы; 2 — нечетные элементы. Элементы от H до B возникли в результате Большого Взрыва в дозвездный период эволюции Вселенной; от C до Fe — в ходе нормальной эволюции звезд в результате экзотермических реакций горения (слияния ядер) элементов; тяжелее Fe — при катастрофических процессах эндотермического захвата нейтронов — медленном s-процессе (от Ni до Bi) и быстром г-процессе (Th, U и другие тяжелые элементы) в крайне высокотемпературных гигантских звездах и при взрывах сверхновых

Газовые облака и туманности, возникавшие при взрывах сверхновых, имеют примерно звездный состав, нормированный по отношению к водороду ($\lg N = 12$): H — 12,00 (12,00); He — 11,23 (10,09); O — 8,9 (8,8); C — 8,7 (8,6); N — 8,1 (8,0); Ne — 7,9 (7,6); S — 7,9 (7,2); Ar — 7,0 (6,0); Cl — 6,9 (5,5); Ca — 6,4 (6,4); Na — 6,6 (6,3); F — 4,9 (4,6) (Войткевич, 1987); цифры в скобках относятся к объектам, относительно бедным гелием. Углерод в них входит в

группу самых распространенных после водорода и гелия химических элементов (O, C, N). Преобладающей формой его нахождения служат углеводороды, в ряду которых, помимо преобладающего метана (CH₄), спектроскопически выявлено около 60 молекул различной сложности (Сковилл, Янг, 1984), таких как цианпентацетилен HC₁₁N, цианооктатетраин HC₉N, цианистый водород HCN, формальдегид H₂CO, муравьиная кислота H₂CO₂ и др.

Движущей силой эволюции газовых облаков является очаговое охлаждение, сопровождаемое уплотнением. Пыль, возникающая в составе облаков при охлаждении и уплотнении, как и тяжелые элементы (металлы), блокирует излучение и тем самым способствует понижению его температуры. С повышением содержания пыли могли сжиматься все меньшие объемы газовых облаков, способствуя приближению их к небольшим звездам, подобным Солнцу (Greenberg, 2000). Самые холодные из молекулярных облаков имеют температуру около 5 К. Низкая температура делает такие агрегаты вещества неустойчивыми по отношению к гравитации, и они эволюционируют в звезды (Шкловский, 1984). На этом пути молекулярные облака достигают такой плотности, при которой начинается гравитационный коллапс вещества, ведущий к образованию быстро вращающегося диска.

Солнце, его планетное и кометное окружение формировались в таком диске путем аккреции ледяных планетезималей, содержащих железо-силикатную пыль и имевших водный состав на периферии диска и гелий-водородный — в его центральной части, где температура опускалась до минимальных значений, близких к абсолютному нулю.

Элементы, занимающие максимальные позиции (см. рис. 1.4), играют главную роль в строении Вселенной вообще и Солнечной системы в частности. Это в первую очередь наиболее распространенные элементы, занимающие высокие максимумы и подразделяющиеся на диаграмме на легкие, входящие больше во флюидную (ледяную) фазу космических объектов (H, He, C, O, N), и более тяжелые порообразующие элементы с относительно близкой космической распространенностью, концентрирующиеся в железо-каменном материале (Mg, Si, Fe). Это разделение элементов отражает дифференциацию космического вещества, начиная с самых ранних стадий его эволюции. В более общем выражении разделение химических элементов выглядит следующим образом (в скобках — космическая распространенность атомов на 10⁶ ат. кремния): I — водород (2,66·10¹⁰), гелий (1,8·10⁹), кислород (1,84·10⁷), углерод (1,11·10⁷), азот (2,31·10⁶); II — магний (1,06·10⁶), кремний (10⁶), железо (0,9·10⁶), никель (4,78·10⁴) и хром (1,27·10⁴) (Cameron, 1982). Дифференциация космического вещества в этом аспекте (I-II) происходит, по существу, с самого начала образования газовой-пылевой (каменно-ледяной) туманности.

При низких давлениях, господствующих в межзвездной среде, лед кристаллизуется только на ранее образованных ядрах конденсации — пылинках размером в десятые доли микрометра. В протозвездных небулах они представлены высокотемпературными железо-каменными конденсатами, окруженными слоями углеводородного, азотного и водного льда (Гринберг, 1984). Более мелкая пыль (размером в тысячные доли микрометра) полностью состоит из углеводородного вещества — аморфного и кристаллического в виде молекул полициклических ароматических углеводородов (Greenberg, 2000). Наличием углеводородного вещества объясняется способность небулярного газа поляризовать проходящий через них свет. В режиме охлаждения в небулярных дисках возникали стяжения ледяного вещества с рассеянной в нем

космической пылью. При смерзании они образовывали массивные ледяные тела, сохранившиеся в настоящее время только в окружении Солнечной системы, это пояс Койпера и облака Хиллза, Оорта – источники комет, периодически вторгающихся в Солнечную систему по сильно вытянутым эллиптическим, приближающимся к параболам орбитам. Зарегистрировано уже более 2000 кометных вторжений. Как само Солнце, так и окружающие его гигантские планеты формировались путем аккреции (гравитационного стяжения) планетезималей – ледяных масс с замороженной в них космической пылью, сходных по физическому состоянию с кометами. Однако в составе комет преобладает водный лед, тогда как планетезимали имели водный состав только на периферии Солнечной системы, где они сформировали Нептун и Уран. В центральной части, где аккумулировались массы Солнца и непосредственно окружавших его планет-гигантов (до Сатурна включительно), плотные затвердевавшие стяжения газо-пылевого вещества имели преимущественно гелий-водородный состав, приближавшийся к валовому составу протосолнечной небулы. Поэтому в вещественном отношении понятие планетезимали охватывает более широкий диапазон водно-водородных составов по сравнению с составом комет (в основном водным). В возрастной иерархии твердого вещества Солнечной системы кометы и ледяные планетезимали занимают второе место после космической железо-силикатной пыли.

КОМЕТЫ, ПЛАНЕТЕЗИМАЛИ И ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Современные представления о кометах как первозданных аккумуляциях ледяного вещества, захватывавших пылевые частицы в межзвездном облаке, сложились в результате длительного кропотливого изучения Солнечной системы. До исследований датского астронома Тихо Браге (1546-1601 гг.) господствовало представление о кометах Аристотеля (384-322 гг. до н.э.), связывавшего их появление с «эманациями Земли, поднимающимися в сферу небесного огня и воспламеняющимися».

Из описанных в настоящее время более 2000 комет у более 700 из них вычислены орбиты и установлено, что кометы являются посланниками самых далеких миров, окружающих Солнечную систему, – кометных облаков (Койпера, Хиллза, Оорта). На рис. 1.5 показано положение в Солнечной системе орбиты кометы Галлея. Из комет возвращавшихся дважды, к самым далеким относится комета, открытая Каролиной Гершель в 1788 г. и вернувшаяся в 1942 г. с расстояния 57 АЕ. Исследования кометы Делавана в 1914 г. привели астрономов к предположению о рекордном ее удалении на 170 тыс. АЕ и возвращению через 24 млн лет.

Кометные тела имеют небольшие размеры (10-100 км), и вследствие этого они не подвергались, подобно планетам-гигантам, гравитационному сжатию, плавлению и последующей дифференциации. Поэтому вещество комет наиболее близко по физическому состоянию к первичному твердому веществу планетезималей и представляет с этой точки зрения особый интерес. На периферии Солнечной системы, где формировались Уран, Нептун, Плутон и кометы, температура опускалась только до уровня, определившего формирование твердых тел, сложенных преимущественно водным льдом, например в комете Галлея (в мас. %): H_2O – 80; CO – 10; CO_2 – 3; CH_4 – 2,

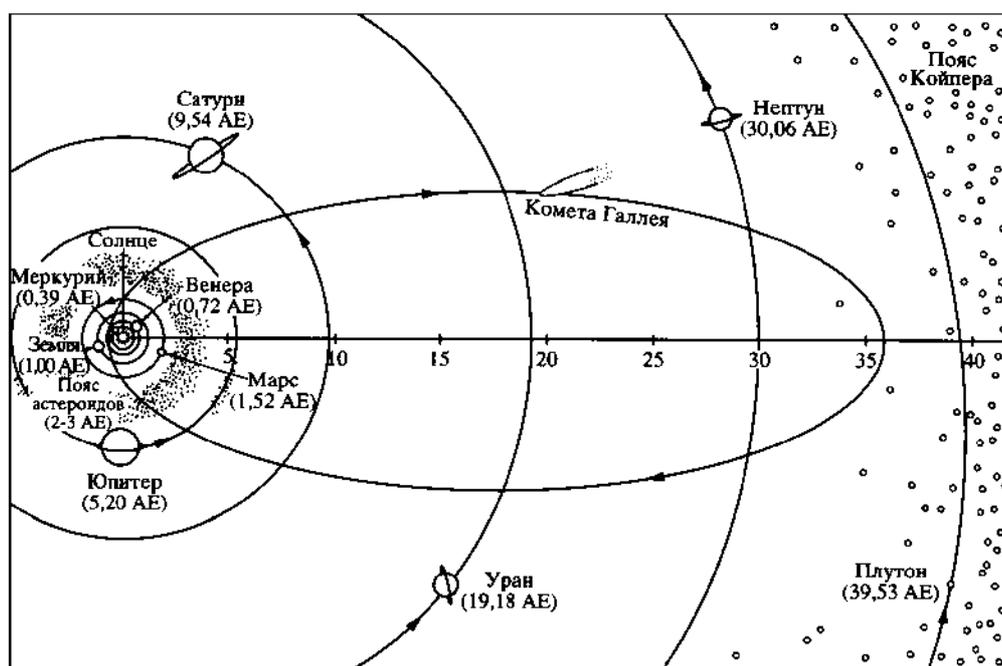


Рис. 1.5. Положение орбиты кометы Галлея в плане Солнечной системы (цифры – расстояние, АЕ). Комета обращается вокруг Солнца с периодичностью 75-76 лет и наблюдается с 240 г. до н.э. Недавнее ее появление было в 1986 г., следующее ожидается в 2061 г.

NH_3 - 11,5; HCN – 0,1. Такой состав ледяной фазы показывает, что охлаждение вещества при образовании комет было не особенно глубоким, о чем свидетельствует преобладание в нем водного компонента (самого высокотемпературного в ряду газовых компонентов).

Химический состав комет, нормализованный по кремнию (Si - 10^6 ат.), в среднем характеризуется следующими данными (Delsemme, 1981): H – $2,66 \cdot 10^7$; O – $1,84 \cdot 10^7$; C – $4,9 \cdot 10^6$; N – $1,15 \cdot 10^6$; Mg – $1,06 \cdot 10^6$; Si – 10^6 ; Fe – $0,9 \cdot 10^6$; S – $5 \cdot 10^5$; $\text{Ni} + \text{Cr}$ – $6 \cdot 10^4$. Состав комет принципиально отличается от космической распространенности химических элементов низким содержанием водорода, азота и углерода.

Это закономерное отличие отражает прежде всего температурный режим формирования комет, ограничивающий вхождение в их состав низкотемпературных газовых компонентов. Этот режим определяется местом формирования комет по периферии и в окружении Солнечной системы в поясе Койпера и в удаленных гипотетических кометных облаках Хиллза и Оорта. Не случайно поэтому сходство кометного вещества с веществом периферических флюидных планет (Нептуна, Урана). Эти планеты не содержат свободного водорода в своих флюидных оболочках, он присутствует только в атмосфере, что обусловлено сильными гравитационными полями планет, способными удерживать водород при общей миграции газов из межпланетных и межкометных пространств под воздействием солнечного ветра. Однако кометы по составу принципиально отличаются от флюидных планет внутренней области Солнечной системы (Сатурна и Юпитера), железо-каменные расплавленные ядра которых окружены существенно водородными оболочками, а также от Солнца, формирование которого сопровождалось почти полной конденса-

сацией газовой-пылевой небулярной космической вещества, по распространности химических элементов идентичного солнечному. Этим определяется необычайно широкий диапазон изменения температуры образования Солнечной системы, что отражается последовательным нарастанием роли водорода в ряду кометы и Плутон – периферические планеты (Нептун, Уран) – водородные планеты-гиганты (Сатурн, Юпитер) – Солнце.

Наблюдаемые с Земли кометы падают на Солнце или обращаются вокруг него по сильно вытянутым или относительно коротким орбитам, разделяясь соответственно на долгопериодические, с периодом обращения 10^2 - 10^7 лет (преобладающие среди известных комет) и короткопериодические, с более короткими периодами обращения. Кометы, падающие на Солнце и обнаруживающиеся при исследованиях его короны, получили шутовское название «камикадзе». Проходя вблизи Солнца, кометы постепенно теряют массу в результате плавления и испарения льда, входящего в их состав, с образованием характерной комы – эллиптического ярко светящегося облака и хвоста, направленных в сторону от Солнца.

Кома представляет собой смесь нейтрального и ионизированного газов. Внутренняя часть комы (ближе к ядру) состоит в основном из нейтральных молекул и атомов. С удалением от ядра в коме возрастает количество ионов. Каждый вид молекул или атомов специфичен по способности к ионизации, подвергаясь ей на различных расстояниях от ядра кометы. Например, атомарный водород, который возникает при диссоциации молекул воды, ионизируется с трудом, оставаясь нейтральным до расстояния нескольких миллионов километров от ядра. Как только нейтральные атомы и молекулы превращаются в ионы и электроны, они попадают под действие электрических и магнитных полей, индуцируемых солнечным ветром, и увлекаются в плазменный хвост кометы, строго направленный в сторону от Солнца. Под действием светового давления Солнца в хвост кометы перемещаются также мельчайшие пылинки, первоначально замороженные в лед кометного ядра и отделяющиеся от него в результате сублимации льда и увлечения образующимся газом. Эти мельчайшие пылинки образуют пылевой хвост кометы, отклоняющейся от плазменного (газового) хвоста в направлении, обратном движению кометы. Однако световое давление способно отбрасывать только мельчайшие пылинки диаметром меньше 1 мкм, на более крупные частицы действует гравитационное притяжение Солнца, уравновешивающее световое давление, так что они остаются вблизи орбиты кометы, образуя шлейф ее пылевого рассеяния в виде мощного потока частиц. При попадании в атмосферу Земли этот поток вызывает явление, известное под названием «метеорного дождя». Эти пылевые частицы, собранные в стратосфере, дали первую информацию о кометной пыли, представленной рыхлыми частицами низкой плотности (менее 1 г/см^3), несмотря на их железо-силикатный состав.

Пылевидные частицы комет состоят из силикатов магния и железа, самородного железа, сульфидов и соединений углерода. В состав ледяной фазы входят (в мол.%) следующие компоненты (Войткевич, 1987): H_2O – 73,0; CO_2 – 7,3; CO – 4,9; CH_2O – 4,4; HCN – 2,9; CH_3CN – 1,4; N_2H_4 – 1,8; C_2H_2 – 2,2; C_4H_2 – 0,7; CS_2 – 1,4.

Наиболее детально изучена комета Галлея, которая, двигаясь по вытянутой эллиптической орбите вокруг Солнца во внутреннюю часть Солнечной системы, каждые 75-76 лет пролетает мимо Земли (см. рис. 1.5). Сведения о ней содержатся в записях Древнего Вавилона (164 и 87 гг. до н.э.), в китайских хрониках (240 г. до н.э.). Изучение этой кометы, которая прошла

вблизи Земли в марте 1986 г., особенно способствовало углублению знаний о кометном веществе.

Для изучения кометы Галлея были запущены космические зонды (один европейский, два русских и два японских). Удалось проанализировать газы и пыль в непосредственной близости от кометы и сфотографировать ее ядро (Балсигер и др., 1988; Kissel et al., 1986). Газ, выделявшийся из кометы Галлея, состоял из водного пара (80%), монооксида углерода (10%), диоксида углерода (3%), метана (2%), аммиака (1,5%) и цианистоводородной кислоты (0,1%). Пылеударные анализаторы на борту космических кораблей проанализировали состав многих тысяч пылевых частиц диаметром от 0,1 до 10 мкм, состоящих из смеси легкого ледяного вещества и тяжелого каменистого материала, состоящего в основном из магния, кремния, железа и кислорода в пропорции, типичной для космического вещества.

Ядро кометы Галлея имело размер 16 x 8 x 8 км и массу 100 млрд т, обладало крайне низкой отражательной способностью.

Плавление и сублимация льда быстро нарастали по мере приближения кометы к Солнцу, что в спектрограммах отражалось в появлении все большего числа линий излучения, характеризующих усиление диссоциации молекул газов и ионизации атомов. Разлагающиеся молекулы воды образовали в этом процессе огромное облако атомарного водорода и меньшее облако гидроксидов вокруг ядра кометы. При этом ледяная оболочка, окружающая ядро, становилась все более тонкой и рыхлой, покрываясь пористым слоем пыли толщиной в несколько сантиметров, который изолировал более глубоко лежащий лед, так что температура сердцевины ядра оставалась крайне низкой (порядка $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Частицы пыли постепенно отрывались от поверхности и сдувались потоком газа, выделяющегося при сублимации льда на границе пористого слоя пыли и загрязненного льда. Пыль и нейтральный газ, выделяемые кометой, образовали кому диаметром до 100 тыс. км. Как и у других комет, по мере приближения к Солнцу у кометы Галлея возникали плазменный и пылевой хвосты (рис. 1.6). Плазменный хвост выглядел голубоватым потоком заряженных частиц, направленным почти по прямой от Солнца. В отличие от него желтоватый пылевой хвост был изогнут так, что его вогнутая

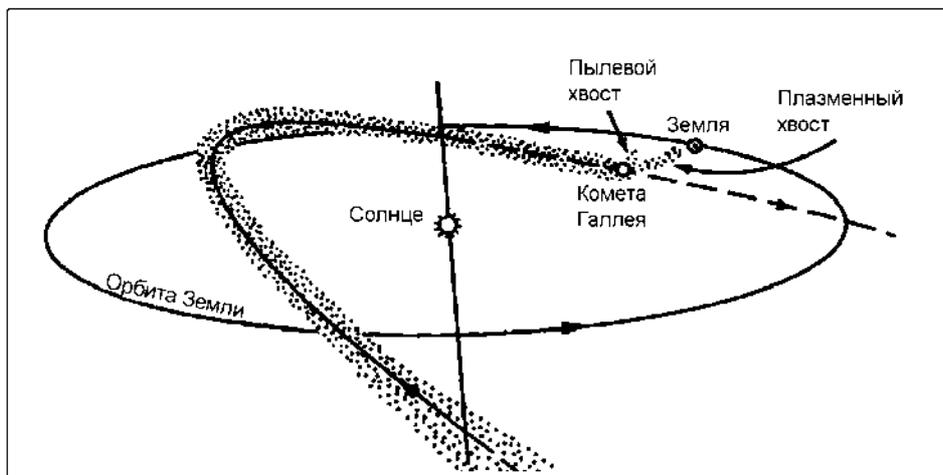


Рис. 1.6. Положение кометы Галлея при максимальном сближении ее с Землей в марте 1986 г. и схема образования у нее плазменного хвоста (направлен строго от Солнца), пылевого хвоста (мельчайших частичек пыли) и пылевого шлейфа (более крупных частиц железо-силикатной пыли), рассеивающихся вдоль кометной орбиты

сторона обращена в сторону предыдущих положений кометы. Следствием посещения кометой Галлея Солнечной системы является образование широкого шлейфа относительно крупных (больше 1 мкм) пылевидных частиц, которым фиксируется ее орбита. Через этот пылевой поток кометы Галлея Земля проходит 2 раза в год, тогда в ее атмосфере возникают метеорные дожди: Ориониды в октябре и Аквариды в мае.

Динамика формирования пылевого хвоста и шлейфа кометы Галлея крайне своеобразна. Пыль, увлекаемая газом, выбрасывалась из ядра в виде нескольких мощных струй (джетов) и летела в пространство по спирали, что объясняется вращением ядра (с периодом обращения 7,4 сут) вокруг своей длинной оси. Ядро имеет форму ореха арахиса длиной 16 км и покрыто слоем пыли. Темная окраска ядра объясняется не только наличием пылевидных частиц, но и вхождением в его состав сложных молекул, состоящих из водорода, углерода, азота и кислорода, образующих темные, подобные дегтю, углеводородные полимеризованные вещества.

Кометы, разрушаясь в Солнечной системе на пыль и газ, дают существенный вклад в метеорную бомбардировку Земли, особенно интенсивную в плоскости эклиптики, проходящей через зодиакальные созвездия. Обилие метеоров в этой плоскости вызывает утреннее сияние перед восходом Солнца (зодиакальный свет). Кометные тела испаряются в атмосфере из-за сопротивления воздуха и, по-видимому, никогда не достигают поверхности Земли. Кометы – крайне нестойкие, рыхлые, легко разрушающиеся космические образования, по-видимому, неспособные оказывать сильное воздействие на планеты. Периодические вторжения комет являются важным источником обогащения Солнечной системы космическими газами и пылью. Метеорные дожди, возникающие в атмосфере Земли при пересечении ею кометных пылевых шлейфов, могут представлять грандиозное зрелище (рис. 1.7). Проис-



Рис. 1.7. Метеорный дождь Драконида в 1947 г.

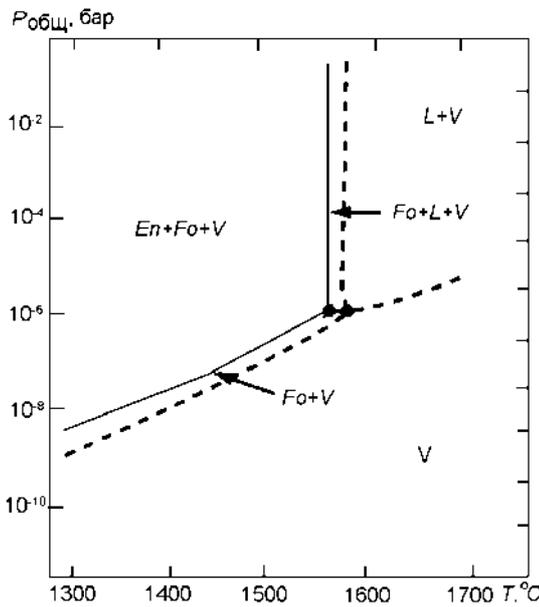


Рис. 1.8. Диаграмма фазовых равновесий форстерита (Fo), энстатита (En), расплава (L) и газовой фазы (V) в системе $Mg_2SiO_4 - MgSiO_3 - SiO_2 - H_2$ применительно к условиям первичной высокотемпературной конденсации вещества в межзвездной туманности

хождение пылинок, так эффектно сторающих в атмосфере Земли, связано с начальными (высокотемпературными) стадиями.

Главным фактором формирования комет и ледяных планетезималей служило охлаждение раскаленного газового облака, порожденного взрывом звезды (сверхновой) – предшественницы Солнечной системы. В нем и началась первичная конденсация газов, ведущая к последовательному превращению газового облака в более плотное молекулярное газопылевое облако и протосолнечную небулу (туманность).

Петрологической моделью этой начальной конденсации и затвердевания вещества в горячих газовых туманностях может служить система форстерит-энстатит-кварц-водород ($Mg_2SiO_4 - MgSiO_3 - SiO_2 - H_2$), экспериментально изученная в работе (Kushiro, Mysen, 1990) при температуре 1350-1650

°C применительно к условиям глубокого межзвездного вакуума ($P = 10^{-2} - 10^{-10}$ бар). Соответствующая фазовая диаграмма (рис. 1.8) показывает, что капельки силикатного расплава (L) в первичной газовой туманности (V) могут возникать только при ее изотермическом уплотнении при температуре выше 1550 °C. В реальных условиях охлаждения газа должна происходить непосредственная конденсация твердых силикатных частиц из газовой фазы в последовательности: газ (V) – форстерит + газ (Fo + V) – энстатит + форстерит + газ (En + Fo + V). Непосредственная конденсация вещества из газа, как и кристаллизация из расплава, начинается с образования наиболее тугоплавких силикатных частиц (в этой системе – с форстерита). Силикатные пылевидные частицы представляют ранний конденсат газовой туманности, на которые при дальнейшем охлаждении намерзали флюидные (ледяные) твердые фазы. Они смерзались с образованием массовых ледяных водных, водно-водородных и водородных (см. рис. 1.1) планетезималей, формировавших солнечную массу и планеты-гиганты в быстро вращающемся небулярном диске. Одновременно и в окружении Солнечной системы возникали кометные стяжения. Этот процесс называется аккрецией. Массивностью возникавших при этом аккумуляций определялось все разнообразие объектов Солнечной системы (Солнца, флюидных планет-гигантов) и небольших кометных тел, образующих ее окружение.

В Солнце сосредоточилась огромная масса вещества, достаточная для гравитационного сжатия с подъемом температуры, необходимой для развития в нем термоядерных реакций и достижения им звездного состояния. Гравитационное сжатие менее массивных планет-гигантов – Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна сопровождалось подъемом температуры, достаточной только для приобретения ими теплового излучения.

Кометные тела сохранились в первозданном состоянии до настоящего времени, так как в них аккумулировалась масса, недостаточная для гравитационного сжатия, сопровождаемого выделением тепловой энергии и плавлением, определяющим превращение ледяных аккумуляций в гигантские планеты. Тем не менее кометные тела — Плутон, образующий двойную систему с Хароном, Хирон, Варуна и множество других объектов, обнаруживаемых в настоящее время в кометном поясе Койпера, являются очень существенными аккумуляциями ледяного вещества. К крупнейшим из обнаруженных к настоящему времени подобных тел относится Плутон, периодически, как и кометы, вторгающийся в Солнечную систему по орбите, лежащей в плоскости, пересекающей плоскость эклиптики, в которой расположено Солнце и планеты, под углом 17° . В результате периодического испарения льда с его поверхности Плутон приобрел форму шара, покрытого с поверхности черной пленкой полимерного вещества и содержащего белые пятна, сходные с джетами, характерными для кометных тел. Эта аналогия наглядно выражена на рис. 1.9. Испарение воды и других газов, фиксируемое на Плуtone светлыми пятнами, сопровождается накоплением в его составе космической железо-силикатной пыли и возрастанием средней плотности, которая в настоящее время равна 2 г/см^3 .

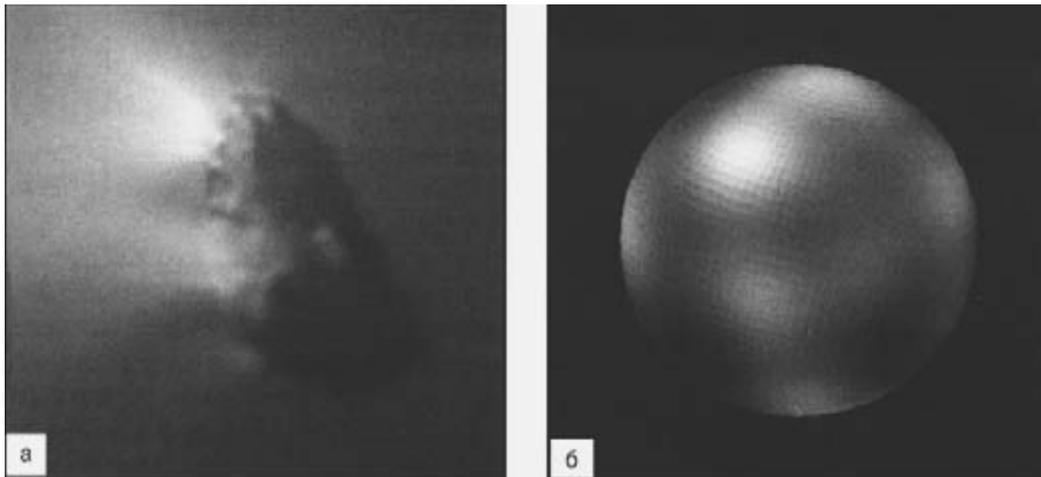


Рис. 1.9. Сопоставление космического снимка ядра кометы Галлея (16x8 км), сделанного с аппарата «Джотто» в 1986 г. (а), с изображением Плутона (диаметр 2320 км), полученным при компьютерной обработке наблюдений космического телескопа «Хаббл» (б). Темный цвет объектов обусловлен тугоплавкими полимерными веществами, накапливающимися на поверхности в результате испарения льда. Светлые пятна (джеты) обусловлены возгонкой газообразных веществ — метана, водорода, углекислоты, воды

В аспекте зарождения в Солнечной системе твердого вещества, способного к гравитационной аккреции, необходимо выделить ее самую раннюю, кометную стадию, когда планеты еще не возникли. В небулярном диске в эту стадию образовывались вращающиеся системы планетезималей и комет, подобные сохранившейся до наших дней системе Плутон-Харон (рис. 1.10), представляющей два огромных кометных тела, обращающихся вокруг общего центра. Для сравнения на рис. 1.10 приведена планетная система — Уран, расслоенный на плотное железо-каменное ядро и флюидную оболочку и окруженный спутниками. Это сопоставление наглядно отражает принципиаль-

ное отличие примитивных кометных систем от планет-гигантов, представляющих более высокий уровень эволюции космического вещества. Кометные системы служили эмбриональными центрами стяжения и аккумуляции ледяных, сходных с кометами планетезималей, завершившихся при достижении критической массы коллапсом вещества, его гравитационным сжатием и образованием планет. Вследствие температурного градиента масштаб этих процессов нарастал к центру протосолнечного диска с последовательным увеличением массивности планет и изменением их водно-водородного состава вплоть до гигантской аккумуляции гелий-водородной солнечной массы в центре, где формировалось Солнце. В результате центральная область небулярного диска в плоскости эклиптики очистилась от кометоподобных планетезималей.

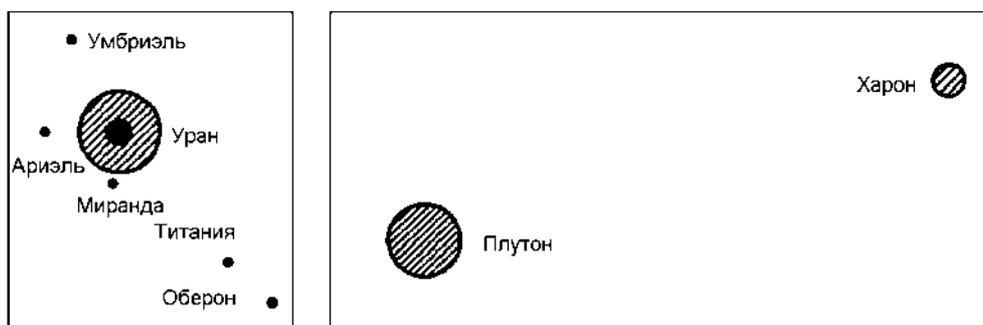


Рис. 1.10. Схема строения Урана (диаметр 51 800 км), расслоенного на расплавленное железо-каменное ядро и флюидную оболочку, и система его спутников (Миранда – 235 км, Ариэль – 580 км, Умбриэль – 585 км, Титания – 799 км, Оберон 770 км) в сопоставлении с двойной кометной системой Плутон (2320 км) – Харон (1270 км) (Остапенко, 1998; Рускол, 1986)

Таким образом, в развитии Солнечной системы небулярная стадия сменялась стадией господства планетезималей и комет, когда развивались образования, подобные ассоциации Плутона и Харона. В последовавшую затем собственно планетную стадию в систему планет-гигантов входило и Солнце на дозвездном (планетном) этапе своего развития: Нептун-Уран-Сатурн-Юпитер-протопланеты Земной группы-Солнце.

Путем аккреции водяных планетезималей образовались внешние планеты Солнечной системы (Нептун и Уран), средний состав которых сходен с составом комет. С переходом к планетезималам, формировавшим Солнце и околосолнечное планетное окружение, водный компонент ледяной фазы вытеснялся водородом, а оксиды углерода – углеводородом с приближением состава планетезималей к солнечному (в расчете на $\text{Si} = 10^6$): $\text{H} - 2,66 \cdot 10^{10}$; $\text{He} - 1,8 \cdot 10^9$; $\text{O} - 1,84 \cdot 10^7$; $\text{C} - 1,11 \cdot 10^7$; $\text{N} - 2,31 \cdot 10^6$; $\text{Ne} - 2,6 \cdot 10^6$; $\text{Mg} - 1,06 \cdot 10^6$; $\text{Si} - 10^6$; $\text{Fe} - 9,0 \cdot 10^6$; $\text{S} - 5,0 \cdot 10^5$; $\text{Ar} - 1,06 \cdot 10^5$; $\text{Al} - 8,5 \cdot 10^4$; $\text{Ca} - 6,25 \cdot 10^4$; $\text{Ni} - 4,78 \cdot 10^4$; $\text{Cr} - 1,27 \cdot 10^4$. Остальные элементы в солнечном составе распространены в ничтожных количествах, последовательно понижающихся с увеличением их порядковых номеров ($\text{U} - 2,7 \cdot 10^{-2}$) (Cameron, 1982). Этот ряд распространенности химических элементов, в котором (помимо водорода и гелия) преобладают кислород и углерод, характеризует в настоящее время состав не только Солнца, но и Сатурна и Юпитера.

Таким образом, по составу флюидных планет-гигантов можно судить о характере ледяных планетезималей, путем аккреции которых происходило их образование. Гелий-водородный состав Солнца и околосолнечных планет до

Сатурна включительно и водный состав периферических планет (Уран, Нептун) и кометного окружения Солнечной системы отражают характер первичной дифференциации диска протосолнечной небулы, сопровождаемой образованием ледяных планетезималей в режиме температурного градиента с минимумом в центральной части диска. В этих условиях обеспечивалось почти полное затвердевание протосолнечной небулы, определявшее огромные масштабы аккумуляции ледяного вещества при формировании Солнца и околосолнечных планет. Конденсация распространялась почти на весь спектр газов (кроме гелия и других благородных газов) и приобретала катастрофический характер, обусловленный конденсацией водорода — доминирующего компонента газовой-пылевой туманности.

С затвердеванием газовых компонентов (и особенно водорода) связываются наиболее сильные флуктуации плотности межзвездных облаков, ведущие к их распаду на дискообразные динамические туманности, в которых вследствие дальнейшего уплотнения (аккреции) вещества в каменно-ледяные массы формировались планеты-гиганты и кометы.

Флюидные гигантские планеты эндогенно-активны и обладают очень высокими температурами (20000 К в центре Юпитера), достаточными для полного расплавления их недр, но недостаточными для протекания термоядерных реакций. Источником их тепла является освобождение гравитационной энергии. Радиоактивность в тепловом балансе этих планет не играет роли. Мощный тепловой поток, поднимающийся из недр планет, создает их собственную светимость ($1,7 \cdot 10^{-6}$ эрг \cdot г $^{-1}$ \cdot с $^{-1}$ для Юпитера), что сближает водородные планеты-гиганты с Солнцем, которому они аналогичны также и по способу формирования и составу, охватывающему все компоненты (газы и конденсаты) протосолнечного диска.

Движущей силой эволюции протосолнечного диска, которая сопровождалась аккумуляцией массы Солнца и планет его непосредственного окружения, было падение температуры до уровня, близкого к абсолютному нулю в его центре, где создались условия, благоприятные для конденсации и затвердевания водорода — главного компонента небулы, и вхождения его в состав ледяных планетезималей (см. рис. 1.1).

При охлаждении газообразный водород конденсируется сначала в жидкость (-253 °С), а затем в лед (-259 °С). Жидкий водород смачивает любой из известных материалов, поскольку его молекулы очень слабо взаимодействуют друг с другом. Поэтому он легко образует пленки на поверхности пылевидных частиц и проникает в них вдоль мельчайших трещин. При затвердевании водород кристаллизуется в кубической или гексагональной сингонии. Однако скорость роста его кристаллов из жидкости очень мала, и при быстром охлаждении они образуют подобие рыхлого снега (плотность твердого водорода примерно в 10 раз ниже плотности водного льда). Твердый водород трудно наблюдать, поскольку скорость света в нем из-за низкой плотности электронов только на 1/6 меньше скорости света в вакууме. Обычная примесь гелия в космическом водороде препятствует его затвердеванию, поскольку гелий не растворяется в жидком водороде и образует в нем мельчайшие пузырьки, не замерзающие даже при самой низкой температуре. Гелий возникает также при распаде тяжелого изотопа водорода (трития) и в силу его низкой растворимости нарушает структуру водорода.

Конденсация и затвердевание водорода играли главную роль в центральной области Солнечной системы в ходе аккумуляции водородного вещества Солнца и его ближайшего планетного окружения (до Сатурна включитель-

но). Массы этого вещества накапливались здесь в результате аккреции ледяных тел, состав которых приближался к полному составу газо-пылевой туманности (протосолнечной небулы), чем и определялась грандиозность этого процесса, нарастающего к центру, где аккумулировалась солнечная масса.

Подъем температуры в ходе сжатия планет-гигантов был достаточен для их полного расплавления, которое сопровождалось нарастанием светимости (усилением излучения энергии в инфракрасной области). Повышение температуры достигало максимума, с переходом через который температура планетных недр падала, что сопровождалось дальнейшим, но в общем уже незначительным уплотнением вещества. Этим эволюция планет отличается от эволюции субзвезд и звезд. В субзвездах (коричневых карликах и звездах небольшой массы) температура при их первоначальном коллапсе достигает значений порядка $5 \cdot 10^6$ К, достаточных для преобразования дейтерия, содержащегося в виде примеси в первичном веществе, в гелий, что сопровождается выделением термоядерной энергии и задерживает их сжатие. В более массивных объектах (протозвездах) подъем температуры становится достаточным для развития стабильных водород-гелиевых термоядерных реакций и превращения их в настоящие звезды. К ним относится и Солнце, масса которого $1,989 \cdot 10^{30}$ кг.

Юпитер отличается от Солнца повышенным содержанием всех веществ, более тяжелых, чем водород и гелий. «В число этих веществ входят как горные породы и железо (в ядре), так и некоторые или даже все «льды» — H_2O , CH_4 и NH_3 » (Хаббард, 1987. С. 261). При подобного рода расчетах следует иметь в виду, что Юпитер существенно дегазирован с поверхности под воздействием солнечного ветра с потерей в основном водорода, как можно судить об этом по его высокой средней плотности ($1,3$ г/см³), почти в 2 раза превышающей плотность Сатурна ($0,7$ г/см³).

Сатурн и Юпитер — в основном водородные планеты, и роль водорода и гелия закономерно уменьшается при переходе от центральной части Солнечной системы к ее периферии в последовательности: Солнце-Юпитер, Сатурн-Уран и Нептун-кометы.

Гигантская масса вещества, которая сосредоточилась в Солнце, Юпитере и Сатурне, обусловлена конденсацией, затвердеванием и аккумуляцией в основном водорода, что было возможно при понижении температуры почти до уровня температуры космического фонового излучения (cosmic background radiation). В эпоху образования первых звезд, около 1 млрд лет после Большого Взрыва, она равнялась 19 К, а к настоящему времени снизилась до 2,7 К (Larson, Bromm, 2001). Однако в традиционных космогонических построениях затвердевание водорода обычно не допускается. «Если уменьшать температуру почти до абсолютного нуля, сконденсируются даже водород и гелий, и конденсированная фаза будет иметь солнечный состав. Однако ни одна часть Солнечной системы никогда не находилась при температурах достаточно низких, чтобы сконденсировались все компоненты. Поэтому существующие в Солнечной системе конденсаты должны отличаться по составу от солнечной атмосферы» (Хаббард, 1987. С. 26). Однако, это отличие связано уже с последующей потерей околосолнечными планетами водорода под воздействием Солнца.

Влияние расслоения планет на их эволюцию заключается главным образом в увеличении времени их охлаждения. Наиболее важным и радикальным в этом процессе является жидкостное разделение планет на плотные железосиликатные ядра и флюидные оболочки, которые затем расслаиваются авто-

номно. В ядрах содержатся преимущественно тугоплавкие компоненты (MgO , SiO_2 , Fe и FeO , Ni , CaO и др.), концентрация которых в исходных газовой-пылевых туманностях была очень низкой. Соответственно и железо-каменные ядра невелики по сравнению с общим размером флюидных планет-гигантов. Эти ядра по размеру могут быть сопоставимы с планетами Земной группы. Так, радиус ядра Урана («приблизительно земного состава»; Хаббард, 1987. С. 280) оценивается в 8000 км, что относительно близко к радиусу Земли (6378 км), тогда как общий экваториальный радиус Урана (до границы его флюидной оболочки, где давление снижается до 1 бар) составляет 25650 км.

Нептун (радиус 24 820 км) и Уран (25 650 км), находящиеся соответственно на расстояниях $44,97 \cdot 10^8$ и $28,70 \cdot 10^8$ км от Солнца, сходны во многих отношениях (массы их составляют 17,23 и 14,54 земной массы).

Детальные данные по Урану получены в результате полета к нему американской автоматической станции «Вояджер-2», которая пролетала мимо этой планеты 24 января 1986 г. со скоростью 72000 км/ч на расстоянии 81 500 км и передала на Землю уникальную информацию о ее строении. Выяснено, что Уран имеет расплавленное железо-каменное ядро, генерирующее магнитное поле этой планеты, по мощности сходное с земным. Магнитная ось наклонена под углом 55° к оси вращения планеты, которая на 98° отстоит от перпендикуляра к эклиптике (лежит почти в плоскости орбиты). Температура на поверхности планеты равна 59 К ($-214^\circ C$), атмосфера состоит из молекулярного водорода (H_2) и метана (CH_4), придающего планете голубовато-зеленый цвет.

В составе Урана велика доля тугоплавких компонентов, хотя она меньше, чем у Нептуна. Эндогенная активность Урана характеризуется тем, что около 30% излучаемой Ураном тепловой энергии поступает из его недр (у Юпитера и Сатурна это значение близко к 70%). Экваториальный диаметр Урана на 2,4% больше полярного, что свидетельствует о сплюснутости его водной оболочки, простирающейся от ядра до видимой поверхности, в которой льды, жидкость и газ перемешаны. По мере приближения к верхней границе атмосферы, где температура падает до 52 К, вода, аммиак и метан (именно в таком порядке) образуют мощные слои облаков ледяного аэрозоля.

Юпитер (радиус 71 492) и Сатурн (60 330 км) — действительно гигантские планеты, обращающиеся вокруг Солнца по орбитам с полуосями $7,78 \cdot 10^8$ и $14,27 \cdot 10^8$ км соответственно.

Юпитер внешне выглядит как золотистый диск, слегка сплюснутый перпендикулярно полюсам. Он вращается вокруг оси несколько быстрее в экваториальной области (с периодом 9 ч 50 мин), чем вблизи полюсов (9 ч 55 мин).

Юпитер дегазирован с поверхности и поэтому богаче Сатурна и Солнца элементами тяжелее гелия, объединяемыми в космохимии в группу Z. Помимо силикатных компонентов, железа и никеля, они образуют флюидные компоненты H_2O , CH_4 , NH_3 . Повышенным содержанием элементов группы Z объясняются результаты модельных расчетов строения Юпитера, определяющих наличие в нем очень массивного расплавленного железо-силикатного ядра. Однако с поправками на эффект поверхностной дегазации Юпитера состав его приближается к составу Сатурна и Солнца, а расчетная масса железо-силикатного ядра уменьшается и становится близкой к массе Земли. «Хотя имеются некоторые неопределенности с химией (например, включать ли серу в ядро или считать, что она сосредоточена в водородной оболочке в

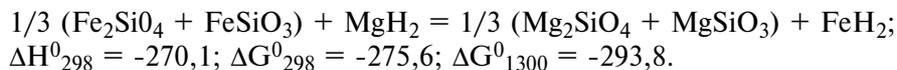
виде H_2S), в результате всегда получается около 1,0-1,5 земных масс» (Хаббард, 1987. С. 260). Ядро расслоено, в свою очередь, на силикатную оболочку и металлическую фазу, генерирующую сильное магнитное поле Юпитера с осью, наклоненной под углом 10° к оси вращения. Магнитное поле Юпитера существенно сильнее магнитного поля Земли, железное ядро которой в значительной части уже консолидировалось (затвердело). При полной консолидации планеты и спутники утрачивают магнитные поля.

Радиометрические измерения Юпитера указывают на мощные запасы тепла в его недрах. Тепло из недр выносится восходящими флюидными потоками, порождающими вертикальную конвекцию и турбулентные вихри. В результате на поверхности Юпитера образуются неоднородности; наиболее примечательно Большое Красное Пятно, поддерживаемое за счет конвективных ячеек выноса к видимой поверхности внутреннего тепла Юпитера и веществ, концентрирующихся в его недрах. Предполагается, что окраска Большого Красного Пятна связана с выносом гидрида фосфора – фосфина PH_3 , который на поверхности разлагается под действием солнечного излучения. Юпитер является также источником радиоизлучения, связанного с мощным магнитным полем планеты и взаимодействием его со спутниковой планетой Ио.

Сатурн – самая легкая планета Солнечной системы (его средняя плотность $0,69 \text{ г/см}^3$). Подобно Юпитеру он вращается вокруг своей оси очень быстро (с периодом вращения около 10 ч) и поэтому заметно сплюснут. Его поверхность неоднородна – наблюдаются белые и красные пятна, обусловленные вертикальной конвекцией вещества. Это свидетельствует о высокой эндогенной активности Сатурна и его мощной тепловой энергии (излучение в 2,5 раза больше энергии, полученной от Солнца). У Сатурна устанавливается магнитное поле с осью, почти совпадающей с осью вращения планеты. Его газовая поверхность имеет температуру 110 К и сходна по составу с гелиево-водородной атмосферой Юпитера, хотя метана в ней больше, а аммиака меньше. Как и другие флюидные планеты, Сатурн состоит из железосиликатного жидкого центрального ядра, окруженного флюидной оболочкой из водорода, гелия, метана, аммиака и воды.

Рассмотренные флюидные планеты эндогенно активны и обладают очень высокими температурами (20 000 К внутри Юпитера), достаточными для полного расплавления их недр и теплового излучения, но недостаточными для протекания термоядерных реакций. Источником их тепла является освобождение огромной энергии гравитационного сжатия. Радиоактивность в тепловом балансе этих планет не играет практически никакой роли. Мощный тепловой поток и собственная светимость в какой-то мере сближают водородные планеты-гиганты с коричневыми карликами, с которыми они сходны также по способу формирования вследствие вхождения в их состав всех компонентов первичной туманности примерно в солнечной пропорции. Первоначально в Солнечной системе в окружении формировавшегося Солнца возникли только планеты-гиганты и, по-видимому, коричневые карлики. Это относится и к планетам-гигантам, находившимся в околосолнечной позиции. Важнейшим этапом их эволюции явилось обособление расплавленных центральных ядер хондритового состава – будущих планет Земной группы, аналогичных ядрам планет группы Юпитера, состоящим «из горных пород, железа и льдов» (Хаббард, 1987. С. 260). Расслоение этих ядер происходило под давлением водородных оболочек протопланет на внутренние богатые железом и внешние силикатные зоны с распределением водорода между ними

согласно термодинамике следующей обменной реакции, сильно смещенной вправо (в кДж):



Смещенность реакции вправо отражает распределение флюидных компонентов (водорода и др.) в ходе расслоения железо-силикатных ядер флюидных планет, в которых железо и водород концентрируются во внутренних, а магний и кремний – во внешних частях. По этому механизму и создавался огромный запас флюидов (водорода и др.) в недрах Земли, возникшей после миграции флюидной оболочки ее материнской протопланеты-гиганта (Протоземли). Богатое флюидами ее железное ядро создает тектоническую напряженность и последующую эндогенную активность (магматизм, метаморфизм, тектогенез) Земли, обусловленные восходящими флюидными потоками, поднимающимися из их недр вдоль тектонически ослабленных направлений. Это относится и к другим планетам Земной группы (Меркурию, Венере, Марсу), хотя они отличались от Земли меньшим запасом флюидных компонентов в их железных ядрах и соответственно меньшей продолжительностью их эндогенной активности. Это подробнее обсуждается в дальнейшем. Флюидный запас сохраняется в планетах благодаря наличию в их недрах богатого железом расплавленного вещества, с которым связывается генерация их магнитных полей. При полной консолидации планеты утрачивают эндогенную активность и собственный магнетизм. Флюидным режимом обусловлены и процессы распада планет (их автобрекчирование), которые широко распространялись при потере флюидных оболочек не успевшими расслоиться (примитивными) планетами. Обломки планет (рис. 1.11) образовали пояс астероидов, окружающий Солнце между орбитами Марса и Юпитера, который является главным источником гелиоцентрических метеоритов (хондритов и др.), падающих на Солнце и захватываемых гравитационными полями планет Земной группы. Астероиды образуют ряд семейств, что отражает взрывной распад в их поясе нескольких планет, тогда как семейства астероидов с орбитами, близкими к орбитам планет (Юпитера, Марса, Земли и Венеры), сформировались на основе потерянных спутников планет (рис. 1.12).

Образование спутниковых систем относится к важным естественным порождениям планет-гигантов, в том числе и протопланет-гигантов, являвшихся материнскими по отношению к планетам Земной группы (Меркурию, Венере, Земле и Марсу). Они возникают в ходе эволюции, сопровождаемой импульсным усилением вращения их гигантских флюидных оболочек под действием центробежных сил, противоположных по направленности силам гравитации, порождающим тяжелые железо-силикатные ядра планет. В спутниковые системы планет-гигантов отделяется более легкий силикатный и флюидно-силикатный расплавленный материал. Поэтому в отличие от хондритовых ядер планет их спутники являются ахондритовыми. Однако образование тяжелых ядер и отделение более легких спутников планет обусловлено общей причиной – развитием фазовой неоднородности в их гигантских флюидных оболочках. С этим связана корреляция плотности хондритовых ядер планет с плотностью их ахондритовых спутников, наглядно прослеживаемая в системе галилеевых (околопланетных) тяжелых спутников Юпитера, коррелирующихся с системой Земля-Луна (рис. 1.13).



Рис. 1.11. Вращающийся астероид Гаспра (снимок с космического аппарата «Галилео») представляет собой типичный для астероидов обломок хондритовой планеты, усеянной множеством ударных кратеров, что отражает взрывной характер формирования пояса астероидов

В иерархии развития планетных систем Солнечной системы формирование спутников, а следовательно, и ахондритов, образовавшихся в результате их распада, относится к наиболее ранним этапам, с которых и целесообразно начать их систематическое рассмотрение.

СПУТНИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ И ПЛАНЕТОЦЕНТРИЧЕСКИЕ МЕТЕОРИТЫ

Кометные тела, представляющие собой самые примитивные ледяные объекты Солнечной системы, объединяются силами гравитации и создают вращающиеся системы, которые только условно могут рассматриваться в подчинении планета-спутник, например Плутон-Харон. Периоды обращения Харона и Плутона (6,32 сут) одинаковы, так что в целом они образуют двойную систему с общей осью вращения. Подобные динамические системы характеризуются сопоставимыми размерами тел, объединяющихся в динамическом взаимодействии. Этим они принципиально отличаются от планетно-спутниковых систем, в которых размер спутников несравнимо меньше их ма-

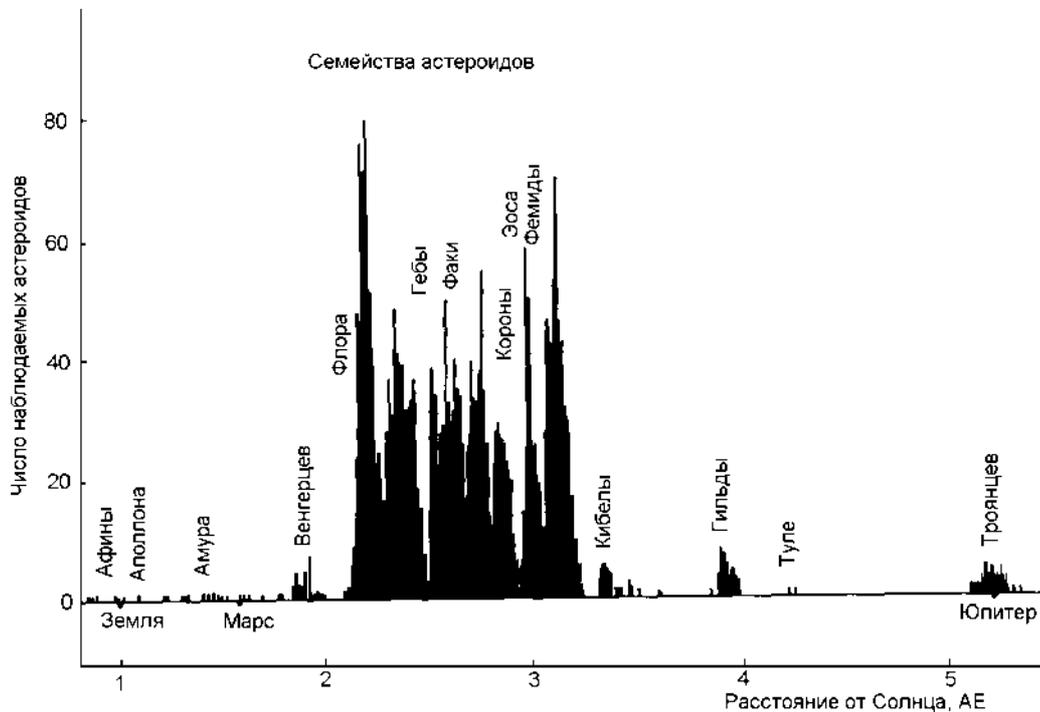


Рис. 1.12. Семейство астероидов (Кегг, 1996)

теринских планет, как это показано на примере сопоставления системы Плутон-Харон с Ураном и его спутниками (см. рис. 1.10). Это различие, как отмечалось выше, имеет генетическое значение, так как в системах Плутон-Харон динамически объединились равноправные объекты, не соподчиненные генетически, тогда как Уран и аналогичные ему планеты-гиганты являются материнскими по отношению к своим спутникам. Порождение спутников закономерно вписывается в эволюцию планет-гигантов, совпадая с импульсами их расслоения на расплавные железо-силикатные тяжелые ядра и гигантские флюидные оболочки. Формирование тяжелых ядер сопровождалось ускорением вращения оболочек и отделением от них под действием центробежных сил более легких по сравнению с ядрами флюидно-силикатных расплавов, формирующих спутниковые системы планет. Развитие железо-силикатно-флюидной несмесимости в гигантских флюидных оболочках планет находилось в основе образования как их массивных тяжелых железо-силикатных ядер, так и более легких силикатных спутников. Сопряженность их образования доказывается общей корреляцией плотности ядер планет и их массивных спутников, выявленной у Юпитера. Средняя плотность его массивных спутников (Ганимед, Европа, Ио) с приближением к Юпитеру линейно возрастает, сближаясь с плотностью его тяжелого ядра. Диаграмма (см. рис. 1.13) отражает подчиненность этой корреляции и средних плотностей Земли и Луны. Поскольку спутники способны породить только планеты-гиганты представленное на диаграмме соответствие плотностей отражает аналогию спутниковых систем Юпитера и Протоземли, обладавшей, подобно Юпитеру, гигантской флюидной оболочкой и хорошо развитой спутниковой системой, в которой Луна занимала такую же позицию, как планета Ио в системе Юпитера. С потерей флюидной оболочки под воздействием Солнца

Протоземля потеряла и спутниковую систему, от которой Земля унаследовала только Луну, главная масса ее спутников отошла в пояс астероидов, сформировав в нем семейство Аполлона с орбитой, близкой к орбите Земли. Поэтому представления о развитии спутниковой системы Протоземли можно составить только по аналогии со спутниковой системой Юпитера, которая фиксирует своим составом и спецификой орбитального движения сложную историю формирования этого ближайшего аналога Протоземли. Подтверждением представлений о формировании спутников Юпитера, выброшенных центробежными силами из его быстро вращающейся водородной оболочки в виде расплавных флюидно-силикатных масс (Маракушев, 1992, 1999), служат недавние данные по ближайшему его спутнику – планете Ио. Совместно с этим спутником на расстоянии 421,6 тыс. км от Юпитера вращается огромное вытянутое облако из водорода, паров серы и других элементов (Ксанфомалити, 1997. С. 154), выброшенное из раскаленной оболочки Юпитера и сопровождающееся тором горячей плазмы с температурой до 10^5 К. Это может служить свидетельством сравнительно недавнего рождения планеты Ио – самого молодого и ближайшего к Юпитеру спутника из группы массивных галилеевых спутников, на котором и в настоящее время продолжают грандиозные эксплозивные извержения вулканов. По размеру и средней плотности аналогом Ио служит Луна (спутник Земли), на которой подобный эксплозивный вулканизм происходил 4,6-3,2 млрд лет назад.

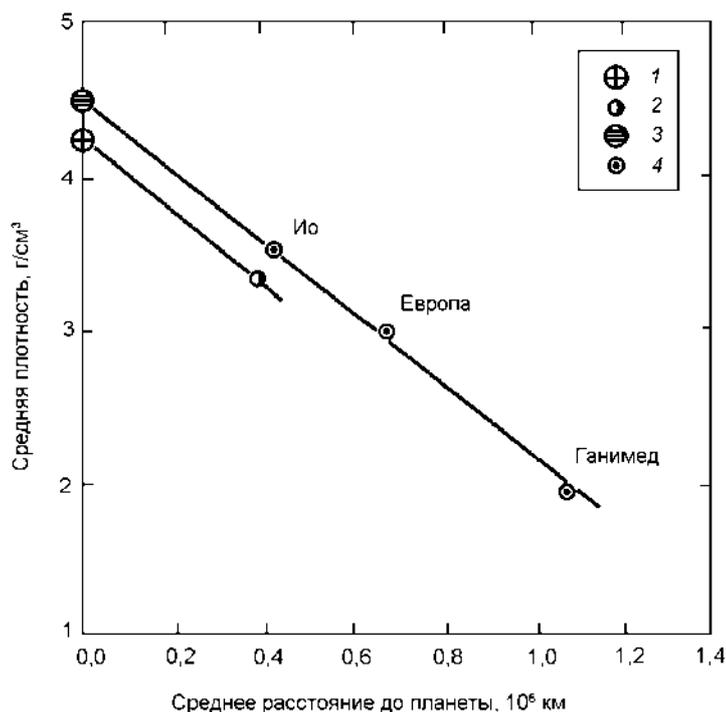


Рис. 1.13. Диаграмма корреляции плотности (пересчитана на нулевое давление) и орбитальной позиции Луны и галилеевых спутников Юпитера
 1 – Земля; 2 – Луна; 3 – предполагаемое расплавленное железо-силикатное ядро Юпитера; 4 – галилеевы спутники

Несмотря на разницу в возрасте, Луна закономерно вписывается в ряд галилеевых спутников Юпитера по плотности (в g/cm^3) и моменту инерции

(Anderson et al., 1995) (в скобках): Ио 3,53 (0,38)-Луна 3,34 (0,39)-Европа 3,03 (0,34)-Ганимед 1,94 (0,31)-Каллисто 1,8, а также по массе (10^{25} г): 8,92-7,14-4,87-14,90-10,73.

Ряд галилеевых спутников Юпитера образует как бы общую систему с железо-каменным ядром Юпитера, так же как Луна с Землей. Это их соответствие возникло на стадии формирования Земли как тяжелого расплавленного ядра гигантской Протоземли, окруженной системой спутников (Маракушев, 1999). После потери Протоземлей флюидной оболочки ее железо-каменное ядро стало планетой Земля.

Сходство Луны (плотность $3,3 \text{ г/см}^3$) с планетой Ио (плотность $3,5 \text{ г/см}^3$) отражает гигантский, сравнимый с Юпитером, размер Протоземли, сопоставимый с ее аналогами в звездном мире, так как планеты с умеренными флюидными оболочками (Сатурн, Уран, Нептун) способны были порождать только спутники с плотностью не более $1,9 \text{ г/см}^3$.

В табл. 1.3 и 1.4 приведены сводки известных в настоящее время параметров спутников Юпитера и Сатурна (Ксанфомалити, 1997 и др.) и дается разделение их на генетические группы I-IV в предполагаемой последовательности их формирования. Спутники внешних орбит (I) имеют обратное относительно современного обращение вокруг материнских планет, фиксируя их раннее вращение, которое, по всей вероятности, Юпитер и Сатурн унаследовали от сформировавших их аккреционных дисков. В дальнейшем они обрели собственное вращение, начало которого фиксируется формированием мелких спутников, относящихся к генетической группе II, обращающихся вокруг планет по сильно эксцентрическим орбитам. Принципиальное различие спутников групп I и II по направлению орбитального обращения на диаграммах спутниковых систем планет (рис. 1.14, 1.15) обозначено встреч-

Т а б л и ц а 1.3. Спутники Юпитера

Генетическая группа	Название	Радиус орбиты, тыс. км	Орбитальный период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклонение орбиты к экватору, град.	Радиус, км	Плотность, г/см^3	Масса, кг
I	Синопе	23700	758	0,28	153	(15)*	(3,1)	$(7,77 \cdot 10^{16})$
	Пасифе	23500	735	0,38	145	(20)	(2,9)	$(1,91 \cdot 10^{17})$
	Карме	22060	692	0,21	164	(15)	(2,8)	$(9,56 \cdot 10^{16})$
	Ананке	21200	631	0,17	147	(10)	(2,7)	$(3,82 \cdot 10^{16})$
II	Элара	11737	259,7	0,207	24,8	(40)	(3,3)	$(7,77 \cdot 10^{17})$
	Лиситея	11720	259,2	0,107	29	(10)	(3,1)	$(7,77 \cdot 10^{16})$
	Гималия	11480	250,6	0,158	27,6	(90)	(2,8)	$(9,56 \cdot 10^{18})$
	Леда	11094	238,7	0,148	26,1	(5)	(2,7)	$(5,68 \cdot 10^{15})$
III	Каллисто	1880	16,689	0,007	0,51	240	1,85	$10,75 \cdot 10^{22}$
	Ганимед	1070	7,155	0,002	0,21	2631	1,94	$14,8 \cdot 10^{22}$
	Европа	670,9	3,551	0,009	0,47	1569	2,99	$4,87 \cdot 10^{22}$
	Ио	421,6	1,769	0,004	0,04	1815	3,53	$8,93 \cdot 10^{22}$
IV	Теба	221,4	0,675	0,013	0,9	55x45	(1,5)	$(7,77 \cdot 10^{17})$
	Амальтея	181,3	0,498	0,003	0,45	135x85x75	(1,8)	$(7,17 \cdot 10^{18})$
	Адрастея	128,98	0,298	0	0	12x10x8	(4,5)	$(1,91 \cdot 10^{16})$
	Метис	127,96	0,295	0	0	20	(2,8)	$(9,56 \cdot 10^{16})$

*Данные в скобках ненадежны.

Таблица 1.4. Спутники Сатурна

Генетическая группа	Название	Радиус орбиты, тыс. км	Орбитальный период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклонение орбиты к экватору, град.	Радиус, км	Плотность, г/см ³	Масса, кг
I	Феба	12954	550,4	0,163	175	110	(0,7)*	(4·10 ¹⁸)
II	Япет	3561,3	79,331	0,028	(7,52)	730	1,2	2,0·10 ²¹
III	Гиперион	1481,1	21,277	0,104	0,43	175x117x100	(1,4)	(1,77·10 ¹⁹)
	Титан	1221,86	15,945	0,029	0,33	2575	1,9	(1,4·10 ²³)
IV	Рея	572,04	4,518	0,001	0,35	765	(1,3)	2,4·10 ²¹
	Елена	377,42	2,737	0,005	0,2	(18x15)	-	-
	Диона	377,42	2,737	0,002	0,02	560	1,4	1,0·10 ²¹
	Калипсо	294,67	1,888	-	-	15x12x8	-	-
	Телесто	294,67	1,888	-	-	(12x11)	-	-
	Тефия	294,67	1,888	0	1,86	530	1,0	6,2·10 ²⁰
	Энцелад	238,04	1,370	0,004	0,02	250	1,1	7,2·10 ¹⁹
	Мимас	158,54	0,942	0,020	1,52	196	1,2	3,8·10 ¹⁸
	Эпиметей	151,42	0,694	0,009	0,3	70x57x50	(0,6)	(5,59·10 ¹⁷)
	Янус	151,47	0,695	0,007	0,1	110x95x80	(0,65)	(1,98·10 ¹⁸)
	Пандора	141,70	0,629	0,004	0,1	55x42x33	(0,7)	(2,2·10 ¹⁷)
	Прометей	139,35	0,613	0,003	0	70x50x37	(0,7)	(2,7·10 ¹⁷)
Атлант	137,67	0,602	0,002	0,3	(19x13)	-	-	
Пан	134	-	-	-	10	-	-	

* Данные в скобках ненадежны.

ными стрелками. Диаграммы отражают прохождение спутников через максимумы массивности, отвечающие спутникам генетической группы III, обращающихся вокруг планет по практически круговым орбитам. По-видимому, их образование совпадало с максимальными уплотнениями формировавшихся ядер и скоростями вращения планет.

Для сравнения на эти диаграммы нанесена система Земля-Луна, которая закономерно вписывается в спутниковую систему Юпитера, что отражает аналогию Протоземли и Юпитера, тогда как от спутниковой системы Сатурна она существенно отличается. В такой же мере Луна отличается от спутников Урана и Нептуна. Особенно удивительно сходство орбитальных радиусов Ио (421,6 тыс. км) и Луны (384,4 тыс. км), создающее впечатление существования соответствующих друг другу жестко детерминированных двойных планет Ио-ядро Юпитера и Луна-Земля. Теоретически с потерей Протоземлей гигантской флюидной оболочки и уменьшением гравитационного поля в ходе формирования, по существу, новой системы Луна-Земля радиус лунной орбиты должен существенно возрасти. В результате этого же эффекта Протоземля, обладавшая, судя по аналогии с Юпитером, хорошо развитой спутниковой системой потеряла и все другие спутники, кроме Луны, отошедшие на гелиоцентрические орбиты, свойственные астероидам. Орбита Луны при этом отклонилась от экваториальной плоскости Земли и практически совпадает с плоскостью ее орбиты. В других спутниковых системах отклонение от экваториальных плоскостей материнских планет-гигантов (порядка 14-29°) фиксируется только у удаленных легких спутников (II) Юпитера (Леда, Гималия, Лиситея, Элара) и Сатурна (Япет). Тяжелые и

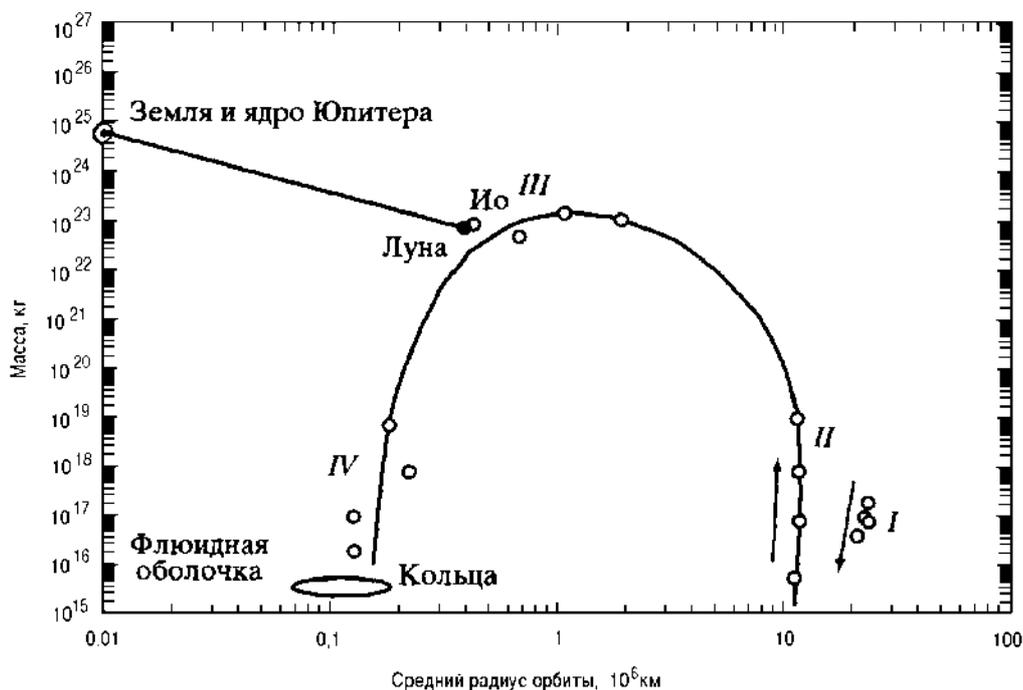


Рис. 1.14. Спутниковая система Юпитера

I–IV – последовательность образования спутников: *I* – спутники раннего обратного обращения планетезималей вокруг Юпитера, *II, III* – спутники, сопряженные с последующим формированием ядра Юпитера, определившим его современное вращение, *IV* – околопланетные легкие обломочные спутники, относящиеся к завершающей стадии формирования его колец; стрелки – обратное (*I*) и прямое (*II*) обращение спутников; названия и параметры спутников см. в табл. 3; для сравнения на диаграмму вынесена система Земля–Луна, соответствующая, как предполагается, системе расплавленное ядро Юпитера–спутниковая планета Ио

плотные спутники группы *III* обращаются вокруг материнских планет-гигантов строго в их экваториальных плоскостях.

Планеты-гиганты и в настоящее время существенно сплюснуты благодаря вращению: экваториальные радиусы Юпитера и Сатурна (в скобках) существенно больше (в км) 71 492 (60 330), чем полярные 69 894 (58 300). В период максимальной скорости вращения, с которым связывается образование их плотных массивных спутников, планеты вообще представляли собой флюидные диски с плотными железо-силикатными расплавленными ядрами. Повышение скорости вращения планет, по-видимому, и создавалось отделением этих ядер, как можно судить по возрастанию с приближением к ним средней плотности спутников (Элара, Лиситея, Гималия, Леда)–Каллисто–Ганимед–Европа–Ио (в системе Юпитера) и Япет–Гиперион–Титан (в системе Сатурна). Достигнув максимума, значения плотности спутников с дальнейшим приближением к планетам уменьшаются в последовательности Теба–Амальтея–Адрастея–Метис (у Юпитера) и Рея–Диона–Тетия и др. (у Сатурна). Это отражает снижение активности планет на переходе к современному их состоянию медленного вращения, при котором околопланетные спутники не выходили за предел Роша и разрушались под действием приливных сил с образованием окружающих планеты колец обломочного материала.

Спутники являются светлыми космическими объектами благодаря вхождению в их состав водного льда. Только в самых плотных спутниках (Ио и

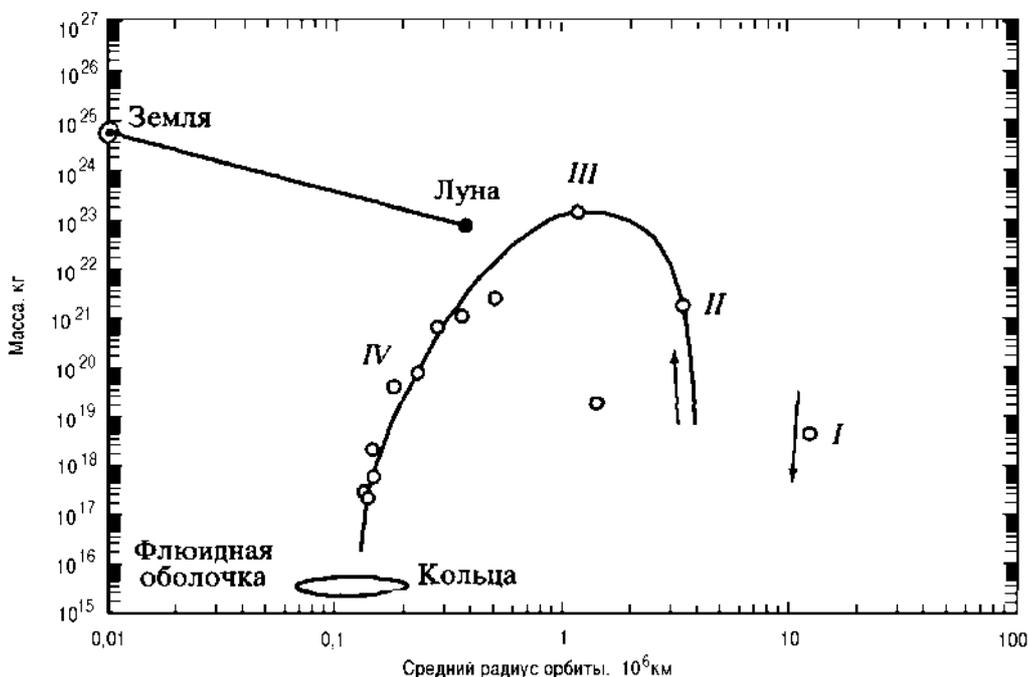


Рис. 1.15. Спутниковая система Сатурна

I-IV – последовательность образования спутников: *I* – спутник Феба с обратным обращением вокруг планеты, *II-IV* – спутники прямого обращения – Япет (*II*), Титан (*III*), спутники, связанные с формированием колец (*IV*); из обозначенной последовательности выпадает спутник Гиперион (350 × 234 × 200 км), представляющий собой обломок массивного спутника группы *III*, стрелки – обратное (*I*) и прямое (*II*) обращение спутников; названия и параметры спутников см. в табл. 1.4; для сравнения на диаграмму вынесена система Земля–Луна, находящаяся в явном несоответствии со спутниковой системой Сатурна

Луна) лед отсутствует, а у всех остальных спутников он входит в число главных компонентов и нередко преобладает над силикатной составляющей. Наличие льда является прямым доказательством отделения спутников от гигантских оболочек планет в виде флюидно-силикатных расплавных масс. У периферических планет (Урана и Нептуна) флюиды были первично существенно водными, а у планет центральной зоны имели гелий-водородный состав, подвергавшийся затем диспропорционированию с образованием воды, углеводородов, углекислоты и других компонентов: $\text{H}_2 + \text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{C}$, $3\text{H}_2 + \text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$, $5\text{H}_2 + 3\text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{CH}_4$ и др., в том числе и азотных. Водный компонент флюидов, восходящих из недр как спутников, так и железо-каменных планет, стимулировал флюидное плавление консолидировавшихся силикатных оболочек и развитие вулканизма, продолжавшегося до их полной консолидации. Обнаружение водного льда в постоянно затененных областях вблизи полюсов на Луне было сделано с американских орбитальных станций «Clementine» и «Lunar Prospector» (Alpert, 2003. P. 12). Спутники обычно лишены атмосферы, тогда как вода намерзала на их поверхности, формируя водные оболочки на многих спутниках (Европа, Япет и др.). У Ганимеда лед цементирует брекчию силикатных пород его коры и образует в них жилы. Ближайший аналог Ганимеда (радиус 2631 км, масса $1,48 \cdot 10^{23}$ кг) в системе Сатурна – Титан (радиус 2575 км, масса $1,4 \cdot 10^{23}$ кг). Титан – уникальная спутниковая планета: он обладает атмосферой, оказы-

вающей на него давление 1,6 бар и состоящей из азота (85%), аргона (12%), метана и многих других углеводородов (этана, пропана, ацетилена, этилена и др.), водорода, кислорода. Наличие атмосферы у Титана объясняется его сильным гравитационным полем, тогда как гравитационное воздействие на него Сатурна было более слабым, чем гравитационное воздействие Юпитера на Ганимед, который вследствие этого не был способен удерживать атмосферу, хотя он и обладает сходным с Титаном гравитационным полем.

К важным открытиям последних лет относится обнаружение железных ядер у массивных (галилеевых) спутниковых планет Юпитера – Ио, Европы, Ганимеда, которые находятся в жидком состоянии и создают собственные магнитные поля планет. Однако самая древняя спутниковая планета этой генетической группы (см. табл. 1.3, группа III) – Каллисто уже утратила собственное магнитное поле вследствие полной консолидации. Луна в период эндогенно-активного состояния (4,6-3,2 млрд лет назад) обладала сильным магнитным полем, которое сейчас фиксируется по остаточной намагниченности ее пород (Ранкорн, 1998). Активное состояние устанавливается по проявлениям вулканизма на поверхности всех массивных спутников Солнечной системы вплоть до самых удаленных, например на Тритоне (спутнике Нептуна), обладающем массой $2,14 \cdot 10^{22}$ кг при средней плотности $2,07 \text{ г/см}^3$ (радиус 1352 км). По этим параметрам Тритон близок к Титану (спутнику Сатурна), но принципиально отличается от него обратным движением по орбите по отношению к Нептуну, его кольцам и спутникам. Тритон обладает характеристиками, типичными для спутников генетической группы III (см. табл. 1.3, 1.4) – большой массой и обращением по круговым орбитам синхронно, что определяет их одностороннее положение по отношению к материнским планетам. «Эксцентриситета орбиты у Тритона практически нет, но обращение вокруг планеты обратное, с периодом 5,88 суток. Таков же и период его синхронного вращения» (Ксанфомалити, 1997. С. 216). Из этого следует вывод об обратном современному вращению и самого Нептуна во время рождения Тритона в экваториальной плоскости, близкой к современной плоскости магнитного экватора Нептуна, сохранившейся в какой-то мере от этого раннего этапа его эволюции. Эта магнитная плоскость находится под углом 47° к плоскости экватора Нептуна, определяемой его современным вращением вокруг оси, которая сдвинута относительно оси его прежнего (обратного) вращения на 6 тыс. км. Такая радикальная перестройка Нептуна сопровождалась импульсом быстрого вращения его гигантской оболочки, от которой отделилась Нереида (диаметр 340 км), обладающая огромным эксцентриситетом орбиты ($e = 0,75$), определяющим ее удаление от Нептуна в афелии на 5510 тыс. км (радиус орбиты Тритона 355 тыс. км). В генетической систематике спутников Нереида относится к группе II, и породивший ее импульс быстрого вращения Нептуна был единственным, как можно судить по отсутствию массивных спутников группы III в системе его спутников нормального обращения. Все околопланетные спутники Нептуна относятся к группе IV, характеризуясь с приближением к нему уменьшением размера (в скобках – радиус, км): Протеус (200), Ларисса (95), Галатея (90), Деспина (75), Таласса (40), Наяда (27) с переходом к обломочным кольцам.

Таким образом, две стадии формирования Нептуна фиксируются наличием у него двух экваториальных плоскостей формирования спутников, различающихся по наклону к эклиптике: Тритон – 157° , Нереида – 29° . Острый угол между ними (52°) в какой-то мере близок углу между осью магнитного диполя и осью вращения Нептуна (47°). У Урана этот угол еще больше (59°),

и таким же образом, как у Нептуна, ось его магнитного диполя смещена на 8 тыс. км от оси вращения (Ксанфомалити, 1997. С. 196-197). Спутники Урана (Оберон, Титания, Умбриэль, Ариэль, Миранда и еще 10 более мелких спутников, сопряженных с кольцами) также проходят через максимум массивности $3,3 \cdot 10^{21}$ кг, который приходится на Титанию (плотность $1,59 \text{ г/см}^3$, радиус 793 км). У Урана обнаружены и небольшие спутники раннего поколения (I) с обратным орбитальным обращением. Уран как бы повален на бок (ось его вращения всего на 8° отстоит от плоскости эклиптики). В таком лежачем положении Уран и породил свою спутниковую систему. В отличие от Урана и Нептуна у Сатурна и Юпитера аналогичная перестройка носила почти гомоосевой характер и проявилась во вращении, противоположном раннему вращению, фиксируемому внешними спутниками обратного обращения (Феба, Синопе и др.). Обратное вращение сохранилось у Венеры, унаследовавшей его от своей материнской протопланеты, что выделяет ее в ряду других планет Земной группы.

Флюидными потоками, восходящими из ядер, определяется эндогенная активность спутниковых планет. У планеты Ио она выражается в эксплозивном вулканизме крайне высокотемпературного характера – температура вулканических извержений достигает 1500°C (Davies et al., 1997; Prentice, 1997).

Во флюидно-силикатные массы отделявшихся спутников входило в большом количестве и углеводородное вещество, которое надежно фиксируется в настоящее время у достаточно массивных спутников, способных формировать ледяные оболочки или удерживать атмосферы в ходе дегазации их недр.

С восходящими потоками флюидов на спутниковых планетах Юпитера – Европе и Ганимеди – связывается формирование оболочек метаново-водного льда, содержащего азот: $3\text{H}_2 + \text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$; $2\text{H}_2 + 2\text{NO} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$. Формирование ледяных оболочек продолжается на этих планетах и в настоящее время (Bennett et al., 1997).

В вулканических районах затухание вулканизма нередко сопровождается гейзеровой активностью. Действующие (фонтанирующие) гейзеры зафиксированы «Вояджером-2» на гигантском спутнике Нептуна – Тритоне (Кук, 1990). У него выявлена разреженная углеродно-азотная атмосфера. Однако в общем случае гравитационные поля спутниковых планет слишком слабы для удержания атмосфер. Низкие температуры на поверхностях спутников способствуют замерзанию восходящих из недр флюидных компонентов и формированию углеводородно-азотно-водных ледяных оболочек. Такие оболочки в системе Сатурна (помимо Титана) были обнаружены на Энцеладе, Тефии, Дионе и Рее. По существу, почти полностью ледяной состав имеют все спутники удаленных орбит планет-гигантов, как можно судить по их низкой плотности. Это придает им некоторое сходство с околопланетными спутниками, с разрушением которых связано возникновение обломочных колец планет, относящихся к их самым молодым образованиям.

Наличие ледяных оболочек, как и атмосфер, отражает флюидный характер массивных спутниковых планет, который нередко приводит к их взрывному распаду. Возникающие при этом обломки спутников имеют неправильную форму, а наиболее крупные из них сохраняют свое положение на орбитах, например спутники Юпитера – Амальтея (270 x 150 км) и Сатурна – Гиперион (350 x 220 км) и U1 (160 x 170 км). Обломочный характер имеют и спутники Марса – Фобос (25 x 21 км) и Деймос (14 x 12 км), унаследованные этой небольшой железо-каменной планетой от материнской гигантской флюидной протопланеты.

Многочисленные мелкие обломки спутников не сохраняли свое положение на орбитах и падали на материнские планеты и спутники нижележащих орбит в виде планетоцентрических метеоритов (Маракушев, 1996₁). Кратерами от их падения покрыты поверхности массивных спутниковых планет, причем особенно обильно в пределах древнейших формаций, тогда как на молодых структурных образованиях, представленных базальтами, метеоритные кратеры относительно редки или отсутствуют.

Это прослеживается не только на спутниках, но и на планетах, на которых сохранились их первичные коры (Меркурий, Марс), усеянные метеоритными кратерами, тогда как замещающие их новообразованные базальтовые коры содержат редкие небольшие кратеры или лишены их. Кратерирование коры планет и спутников служит, таким образом, важным критерием их возрастного расчленения, причем как на Луне и планетах Земной группы, относящихся к очень древним образованиям (3,2-4,6 млрд лет), так и на относительно молодых (моложе 1,3 млрд лет) спутниках Юпитера и планет его группы. К самым молодым в Солнечной системе относится спутник Юпитера Ио, эксплозивная вулканическая деятельность которого находится в расцвете в настоящее время. Вулканы (рис. 1.16), расположенные на стороне этого спутника, обращенной к Юпитеру, формируют на его поверхности покров пирокластического материала, аналогичного лунному реголиту. Луна представляет древнейшую в Солнечной системе спутниковую планету, ранний эксплозивный вулканизм на которой относится к возрасту 4,6 млрд лет. С ним связано формирование так называемой континентальной коры на Луне, образующей ее бескрайние равнины, осложненные выступами скальных вулканических пород, богатых плагиоклазом (рис. 1.17), покрытые слоем вулканической тефры (реголита) пирокластического происхождения. Кора, сложенная породами этой древнейшей лунной формации, испещрена вулканическими кратерами, что визуально отличает ее от более молодой (3,9-3,2 млрд лет) базальтовой коры, слагающей огромные депрессии коры (так называемые лунные моря), распространенные на обращенной к Земле (видимой) более эндогенно-активной стороне Луны. Обратная, обильно кратерированная сторона Луны рассматривалась как полностью сложенная древнейшей корой. Однако в последнем десятилетии XX в. существенные коррективы в эти представления внесли космические снимки с американских аппаратов («Clementine» и «Lunar Prospector»), выявивших вблизи южного полюса Луны огромную (2500 км) глубокую базальтовую депрессию (Aitken Basin), значительно распространяющуюся на ее обратную сторону (рис. 1.18). Она, как и вся невидимая сторона Луны, буквально усеяна метеоритными кратерами, что определяет ее древний возраст (порядка 4 млрд лет) и отличается от более молодых базальтовых депрессий видимой стороны Луны, метеоритные кратеры на которых редки или отсутствуют. Из этого следует, что эндогенное обновление первичной лунной коры начиналось с ее южного полюса и смещалось затем на сторону, обращенную к материнской планете Луны, где и прекратилось 3,2 млрд лет назад.

Гигантская, подобная Юпитеру, Протоземля оказывала в свое время на эндогенное развитие Луны примерно такое же воздействие, какое в настоящее время оказывает Юпитер на планету Ио. Планетоцентрические метеориты, порожаемые распадом спутников, принципиально отличаются от гелиоцентрических, источником которых служит пояс астероидов — обломков планет примитивного (хондритового) уровня развития. Метеориты этого типа падали на Солнце и захватывались гравитационными полями планет.

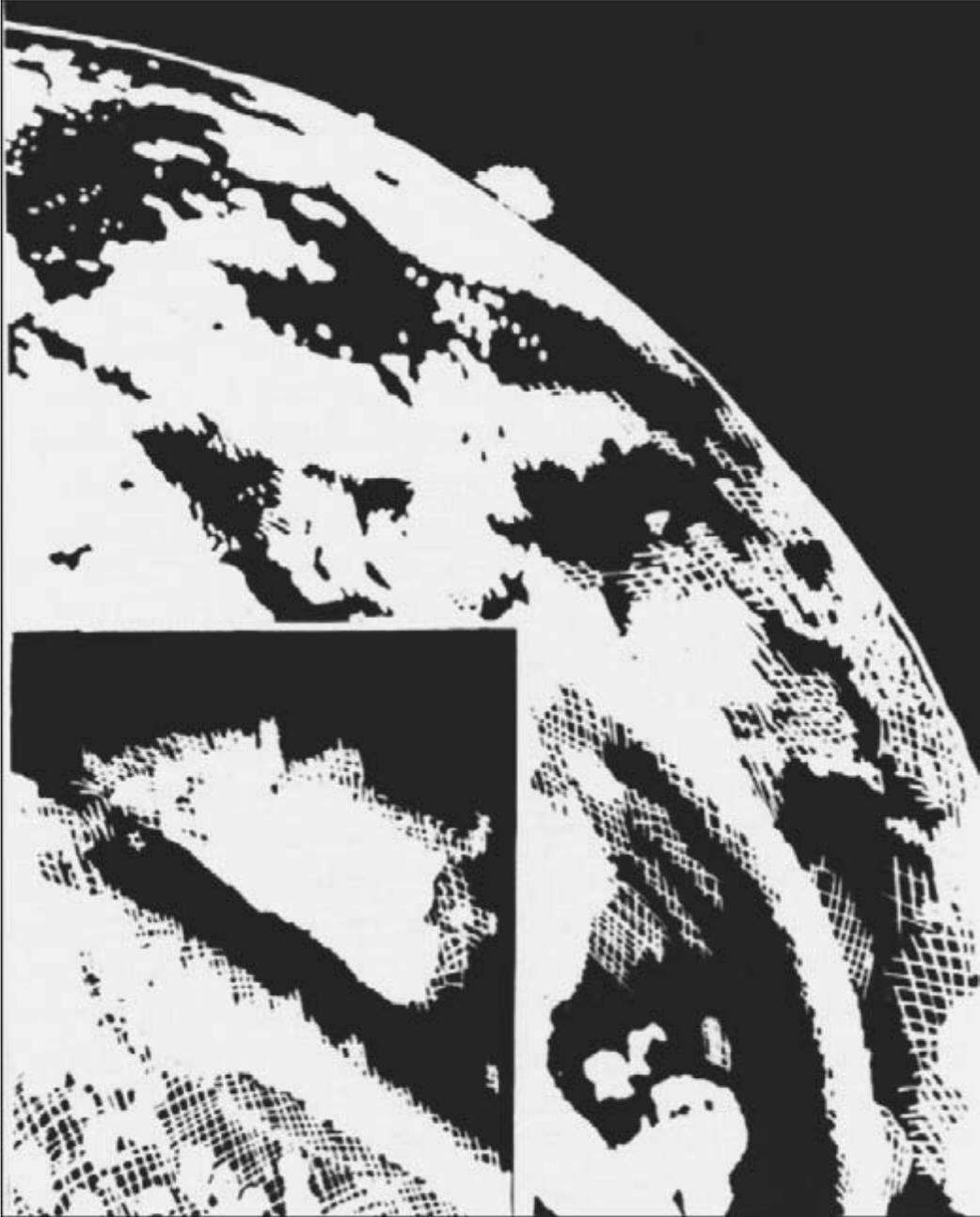


Рис. 1.16. Схематическая зарисовка космического снимка планеты Ио (спутника Юпитера), сделанного 4 марта 1979 г. американской межпланетной станцией «Вояджер-1» с расстояния 490 тыс. км, фиксирует гигантское взрывное вулканическое извержение (на высоту 160 км), которое четко вырисовывается на темном фоне космического пространства над поверхностью планеты (на врезке оно дано в большем масштабе)

Широкое распространение взрывного распада планет и спутников отражает специфику планетного развития Солнечной системы – вовлечение в него энергоемких флюидных компонентов, таких как тяжелые углеводороды, удельная энергия которых, согласно расчетам (Карпов и др., 1998), со-



Рис. 1.17. Типичный равнинный рельеф древнейшей лунной формации, осложненный огромными выступами вулканических скальных пород, богатых плагиоклазом, при свете Земли, которая вырисовывается в виде полумесяца на черном лунном небосклоне (Кук, 1990)

поставима с тринитротолуолом $C_7H_5(NO_2)_3$. Образование их происходило как при взрыве сверхновой, предшествовавшей образованию Солнечной системы, так и в оболочках гигантских протопланет, являвшихся материнскими по отношению к спутникам и хондритовым планетам, формировавшимся в результате взрывного распада пояса астероидов. Астероиды и их обломки на протяжении уже более 4,6 млрд лет падали из этого пояса на Солнце и захватывались гравитационными полями планет в виде метеоритов. Поэтому современный пояс астероидов представляет только небольшой реликт этого некогда грандиозного образования.

Планетоцентрические метеориты, в изобилии падавшие на Луну, практически неотличимы от самих лунных пород. К этому типу метеоритов относятся и так называемые «лунные метеориты» (Marakushev, 1991), найденные во льдах Антарктиды. На Луне не были обнаружены хондриты — преобладающий тип метеоритов, источником которых служит пояс астероидов. Падения метеоритов на спутниковые планеты Солнечной системы относятся к автономным, связанным со взрывными разрушениями их собственных спутниковых систем (Маракушев, 1996₁). Метеориты буквально усеивают поверхности многих спутников и их обломков, свидетельствуя о существовании у планет-гигантов в прошлом значительно более развитых спутниковых систем по сравнению с системами, наблюдаемыми в настоящее время.

Вулканически активный в настоящее время спутник Ио имеет массу $8,92 \cdot 10^{25}$ г (на 20% больше массы Луны), среднюю плотность $3,55$ г/см³, диаметр 3630 км (диаметр Луны 3476 км) и ускорение свободного падения на

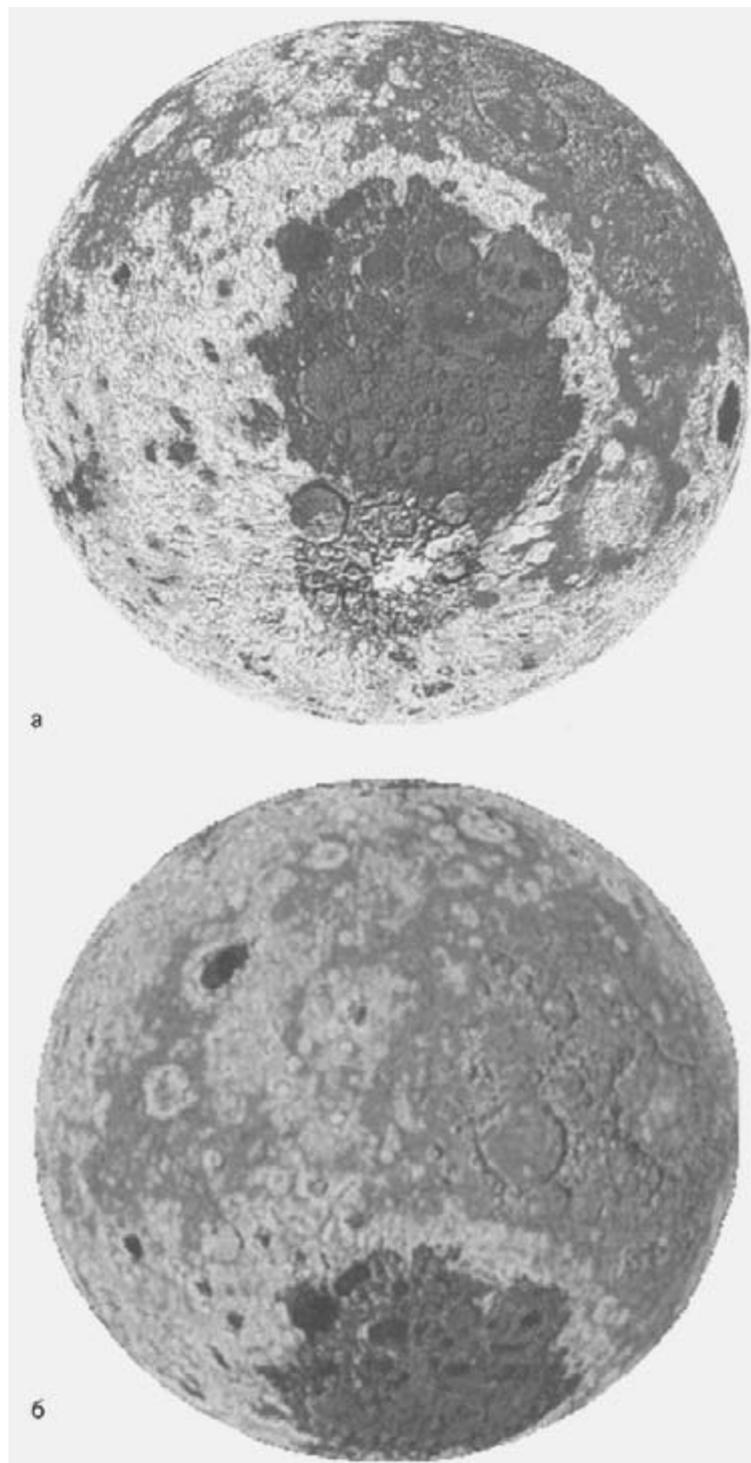


Рис. 1.18. Фотографии Луны с южного полюса (а) и с обратной (невидимой) стороны (б), сделанные американскими космическими аппаратами «Clementine» и «Lunar Prospector» (Alpert, 2003). Видна огромная (2500 км) базальтовая депрессия вблизи южного полюса, смещающаяся на обратную сторону Луны и выделяющаяся темной окраской. Она испещрена метеоритными кратерами, как и остальная поверхность Луны, что отражает ее древний возраст порядка 4 млрд лет

поверхности 181 см/с^2 . Поэтому при крайне эксплозивных извержениях его вулканов мигрировать в космос могут только самые легкие элементы. Сернистые газы приводят к отложению на его поверхности серы. Ио обращается в радиационном поясе Юпитера на расстоянии 442 тыс. км от центра планеты по круговой орбите, затрачивая на один оборот 42,5 ч (1,8 земных суток).

Небольшой возраст спутника Ио доказывается продолжающейся вулканической активностью и отсутствием на нем метеоритных кратеров.

Второй галилеев спутник Юпитера – Европа – покрыт оболочкой водного льда, на которой отмечаются только единичные метеоритные кратеры – самый крупный с диаметром 25 км. Это отражает молодость ледяного покрова на Европе, в основном каменной планете со средней плотностью $3,01 \text{ г/см}^3$. Межпланетной станцией «Галилей» в 1997 г. на Европе выявлена многокольцевая структура диаметром 100 км, представляющая собой, по видимому, вулканическую депрессию, подобную лунным, базальтовое заполнение которой сменилось отложением водного льда на гейзеровой ступени эволюции вулканизма.

Ледяной компонент еще более значительную роль играет в составе Ганимеда (средняя плотность $1,93 \text{ г/см}^3$) и Каллисто ($1,83 \text{ г/см}^3$). Позднее выравнивание их поверхности также приводило к погребению первичных вулканических структур, в результате чего формировались «кратеры-фантомы», которые выделяются только оттенком, но не имеют выраженного рельефа (Ксанфомалити, 1997. С. 170).

Около половины поверхности Ганимеда занимает древняя гористая темная кора, несущая следы многочисленных метеоритных ударов. Она образует угловатые блоки, крупнейшие из которых носят имена Галилея и Симона Мариуса. Темные блоки цементируются и пересекаются жилами более светлой ледяной фазы. Метеоритные кратеры на ней распространены редко или отсутствуют. Это свидетельствует об относительно молодом возрасте водной ледяной фазы, развивавшейся на Ганимеде, а также на Европе, в заключительную стадию их эндогенной активности, фиксируемой, как и у Ио, наличием у них собственных дипольных магнитных полей.

В отличие от них Каллисто (самый удаленный из галилеевых спутников Юпитера) утратил собственное магнитное поле и эндогенную активность. В этом отношении он сходен с Луной, которая, однако, полностью дегазирована, тогда как поверхность Каллисто покрыта оболочкой водного льда, усеянной метеоритными кратерами. На стороне, обращенной к Юпитеру, на Каллисто выявлена огромная (диаметром 2600 км) покрытая льдом многокольцевая структура Валгалла, по размеру более чем на порядок превышающая самую крупную из известных кольцевых депрессий на Ганимеде (диаметр 175 км). Центр депрессии Валгалла смещен относительно подъюпитерной точки на 20° по широте и 55° по долготе.

Рассмотрим еще более богатые водным льдом спутники со средней плотностью $1,0\text{-}1,2 \text{ г/см}^3$ (Мимас, Эцелад, Тефия и др.) в системе Сатурна, непосредственно окружающие кольцевую систему Сатурна, и связанные с ней мелкие обломочные спутники (Атлант, Прометей, Пандора, Янус, Эпиметей). Они находятся в синхронном вращении и обращены к Сатурну одной стороной, на которой и проявляется их эндогенная активность.

Особенно показателен в этом отношении Мимас, имеющий диаметр 390 км. Его поверхность, как и других спутников Сатурна, густо усеяна небольшими метеоритными кратерами, тогда как крупная депрессия диаметром 130 км с центральным поднятием около 30 км занимает характерное для та-

ких образований положение «посередине стороны, обращенной к Сатурну» (Ксанфомалити, 1997. С. 187).

Эндогенная активность, сама по себе удивительная на планетах такой низкой средней плотности, была выявлена и на Энцеладе. «Съемка с высоким разрешением показала, что поверхность Энцелада несет следы каких-то потоков глобальной протяженности, которые на своем пути разрушали кратерный рельеф (что указывает на геологическую молодость происходивших явлений)» (Ксанфомалити, 1997. С. 187-188). Наложенные структуры срезают более старый кратерированный рельеф вследствие развития на его поверхности депрессий, заполненных водным льдом.

Еще грандиознее эти явления выражены на Тефии (диаметр 1060 км), усеянной метеоритными кратерами и содержащей огромную эндогенную депрессию (диаметром 400 км). В ее развитии, как и на Ганимеди, фиксируются процессы брекчирования древней коры и цементации ее более молодым ледяным материалом.

Обрисованное сходство спутников, таких различных по средней плотности, раскрывает универсальность обновления их коры, обусловленного восходящими водородными флюидными потоками, генерирующими воду в результате реакций диспропорционирования компонентов $3\text{H}_2 + \text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$ и др. Это способствовало флюидному выносу вещества коры и развитию ее прогибов, в том числе многокольцевого характера, сопровождаемых воздыманием мантии. Прогибы заполнились базальтами (Луна, Ио), сменяемыми ледяными отложениями (Европа, Ганимед, Каллисто) или только ледяными покровами (Мимас, Энцелад, Тефия и др.). Прогибы накладывались на древние коры спутников, развиваясь преимущественно на сторонах, обращенных к их материнским планетам, тогда как на обратных сторонах спутников сохранялись древние коры, отличающиеся от новообразованных базальтовых кор прогибов обилием метеоритных кратеров (Луна, Каллисто, Мимас и др.).

Разрушение околопланетных спутников с образованием колец обломочного материала относится к завершающим стадиям развития спутниковых систем. Оно связано с уменьшением скорости вращения планет-гигантов, когда они уже не в состоянии были отбрасывать флюидно-силикатный материал на далекие расстояния, что необходимо для образования спутников. В понимание этих соотношений большой вклад внесли исследования французского астронома Э. Роша (1848 г.). Он показал, что на ближайших к планете орбитах жидкие и частично консолидированные спутники (тела, связанные только собственными силами гравитации) должны разрушаться под действием приливных сил и образовывать кольца. Расстояние от планеты, на котором происходит это естественное разрушение спутников, получило название предела Роша. Он определяется радиусом планеты, ее средней плотностью и плотностью спутника. Поэтому спутники, порождаемые планетами, остаются стабильными (не разрушаются с образованием колец) только на достаточно удаленных от них орбитах (за пределом Роша).

Завершая общий обзор спутников, рассмотрим их в отношении к главным химическим группам метеоритов, представленным на диаграмме (рис. 1.19) в сопоставлении со средними составами Луны и планет Земной группы. Метеориты на этой диаграмме подразделяются на недифференцированные железо-каменные (хондриты), соответствующие средним составам планет Земной группы, и контрастные по составу метеориты — каменные (ахондриты) и богатые железом (железные метеориты, палласиты и мезоси-

дериты). Спутниковые планеты в петрогенетическом аспекте соответствуют главным образом силикатным оливин-пироксен-плаггиоклазовым метеоритам — ахондритам. Оливин-пироксеновым ахондритам (диогенитам) близок средний состав Луны. И тем не менее в массивных спутниковых планетах устанавливаются небольшие расплавленные железные ядра, генерирующие их собственные магнитные поля. Это определяет образование железных метеоритов при распаде спутников. Следует заметить, что и в поясе астероидов описаны объекты с контрастной отражательной способностью, указывающие на распад небольших (спутниковых) планет, с силикатными оболочками и железными ядрами. Примером может служить закономерное сочетание в пространстве астероида Герта (Hertha) с высоким альбедо, соответствующим палласитам и железным метеоритам, с ахондритовым астероидом Найза (Nysa), отвечающее расслоенной спутниковой планете диаметром порядка 200 км.

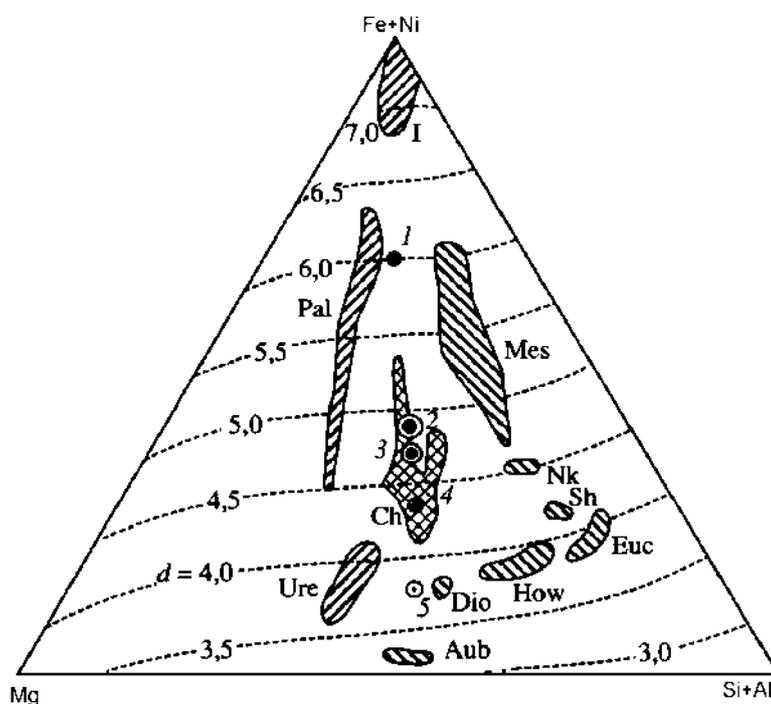


Рис. 1.19. Петрохимическая диаграмма (в числах атомов) метеоритов в сопоставлении с валовыми составами планет

1 — Меркурий; 2 — Земля; 3 — Венера; 4 — Марс; 5 — Луна (размеры черных кружков отражают роль в их составе железных ядер относительно силикатных оболочек). Типы метеоритов: железо-силикатные недифференцированные (Ch), богатые железом (Pal, I), силикатные (каменные) нормального ряда (ахондриты) — оливиновые (Ure), пироксеновые (Aub, Dio), пироксен-плаггиоклазовые (How, Euc), в том числе богатые железом (Sh, Nk, Mes); d — плотность, г/см³

Железо-силикатное расслоение, порождающее контрастную ассоциацию ахондритов и железных метеоритов, свойственно не только спутникам, но и планетам Земной группы, состоящим из железных ядер и силикатных оболочек. Железные ядра были свойственны и хондритовым примитивным планетам, распадавшимся в поясе астероидов с образованием метеоритов, что подробнее рассматривается ниже.

Эти представления И. Канта о плотном небулярном диске, в котором происходило формирование планет, согласуются с выводами наших исследо-

ваний (1983-2002 гг.), согласно которым Солнечная система развивалась в результате охлаждения огромного газового облака, которое она унаследовала от своей предшественницы – гигантской звезды, взорвавшейся как сверхновая около 5 млрд лет назад. Система Солнца и окружающих его планет-гигантов формировалась в этом облаке в плотном, быстро вращающемся небулярном диске путем аккреции ледяных водно-водородных планетезималей, сходных по физическому состоянию с кометами, которые образуют огромные облака Койпера, Хиллза, Сорта, окружающие Солнечную систему в настоящее время. Протосолнечный диск сформировался в режиме градиента температуры, благодаря которому внешние планеты-гиганты Солнечной системы имеют водный состав, аналогичный кометам, а внутренние – гелий-водородный состав, сходный с составом Солнца. Планеты достигали огромных масс, возрастающих с приближением к Солнцу, при которых происходило их гравитационное сжатие с выделением энергии, создававшей тепловое излучение. У ближайших к Солнцу планет-гигантов массивность, возможно, превышала 13 масс Юпитера ($1,9 \cdot 10^{27}$ кг), и к их тепловому излучению добавлялся вклад термоядерных реакций на основе дейтерия, свойственный коричневым карликам. Еще дальше эволюционировало Солнце, масса которого в 1000 раз превысила массу Юпитера. В недрах Солнца началось горение водорода, и оно превратилось в звезду. На этой прогрессивной стадии формирования Солнечной системы планеты Земной группы только еще зарождались в недрах их материнских околосолнечных планет-гигантов в виде расплавных железо-силикатных (хондритовых) ядер под действием гравитационных сил. Одновременно усиливалось вращение флюидных оболочек планет-гигантов, и под воздействием центробежных сил от них отделялись ахондритовые спутники, располагающиеся в их экваториальных плоскостях. Соотношением гравитационных и центробежных сил в планетах-гигантах определялись начальная дифференциация железо-силикатного вещества и соотношение состава тяжелых хондритовых ядер и более легких (ахондритовых) спутников планет-гигантов.

На регрессивной стадии эволюции Солнечная система стала терять первоначальную огромную массу в результате потери водорода и гелия, мигрировавших из межпланетных и межкометных пространств под воздействием солнечного ветра. В результате Солнце и стремительно обращавшиеся вокруг него планеты-гиганты оказались в вакууме космического пространства. Такая стадия в развитии Солнечной системы находит аналогию в обнаружении зарубежными астрономами (Mayor, Queloz, 1995; Noyes et al., 1997; Marcy, Butler, 1998; Butler, 1999 и др.) множества сходных с Солнцем звезд, окруженных гигантскими планетами, сопоставимыми по массе с Юпитером, и коричневыми карликами (рис. 1.20).

Эти гигантские планеты и коричневые карлики находятся в околозвездной позиции, в которой в Солнечной системе находятся планеты Земной группы. В их расположении относительно звезд прослеживаются два тренда вариации массивности планет с приближением к звездам: естественное ее возрастание и противоположное – понижение, обусловленное поверхностной дегазацией планет-гигантов под влиянием солнечного ветра. В Солнечной системе этот процесс привел к полной потере флюидных оболочек околосолнечными планетами, поэтому их расплавные железо-силикатные ядра образовали самостоятельные планеты Земной группы – Меркурий, Венеру, Землю и Марс, расслоенные на флюидные железные ядра и силикатные оболочки. Планеты, не успевшие расслоиться и образовать прочные силикатные

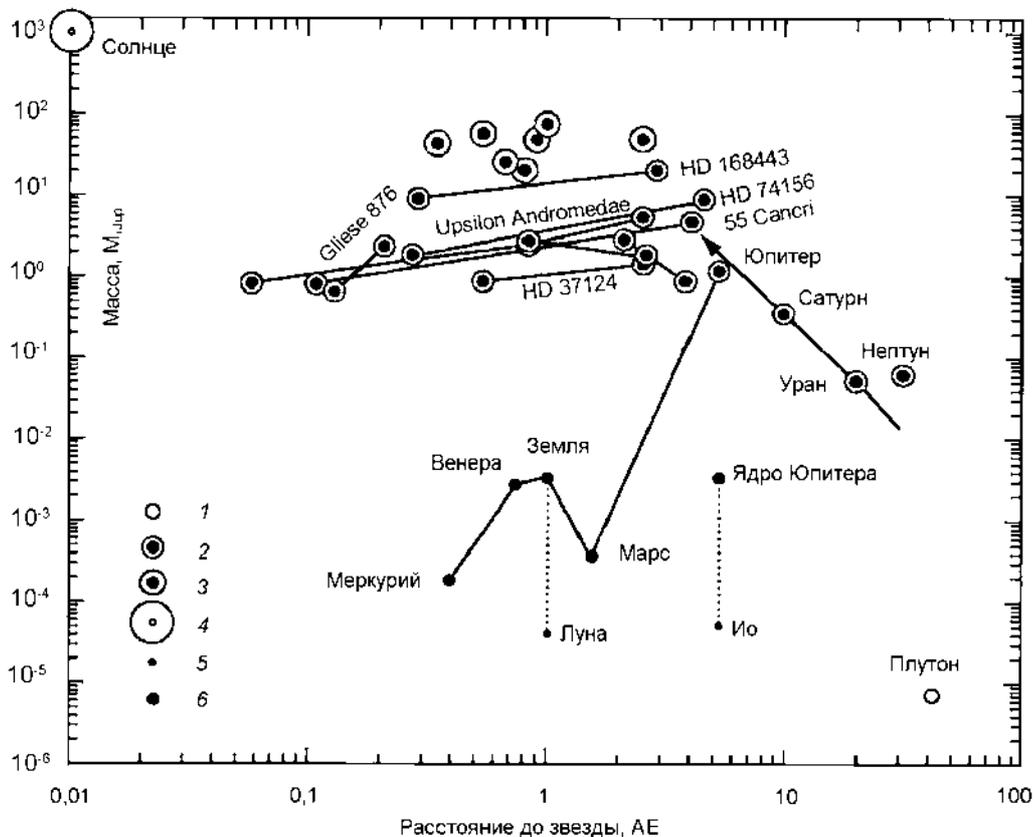


Рис. 1.20. Модель формирования Солнечной и других звездно-планетных систем. На первом этапе из ледяных планетезималей (1) возникали планеты-гиганты (2), коричневые карлики (3) и звезды (4), увеличение их массивности обозначено стрелкой. На втором этапе от планет-гигантов отделялись спутники (5). Третий этап охватывает поверхностную дегазацию околозвездных планет-гигантов, выражающуюся в уменьшении их массивности с приближением к звездам (конноды), что в Солнечной системе привело к полной потере флюидных оболочек околосолнечными планетами-гигантами и образованию планет Земной группы (6), предположительно сопоставимых с железо-силикатным ядром Юпитера

оболочки, при этом превращении подверглись взрывному распаду и образовали между орбитами Марса и Юпитера обломочный пояс астероидов – источник метеоритов.

С потерей флюидных оболочек протопланеты Земной группы потеряли и свои спутниковые системы (сохранились только Луна у Земли и два обломка спутников у Марса – Фобос и Деймос), поэтому судить об их спутниковых системах можно только по аналогии с планетами-гигантами.

Спутники расположены в экваториальной плоскости планет-гигантов группами (I-IV), различающимися по средней плотности, расстоянию от планет и специфике вращения вокруг них. Наиболее развитой спутниковой системой обладает Юпитер – планета с самой гигантской флюидной оболочкой диаметром $1,43 \cdot 10^5$ км. На периферии спутниковой системы Юпитера находятся легкие ледяные спутники (I) с обратным обращением вокруг планеты. Ближе к Юпитеру спутники обращаются согласно с его вращением, а их плотность последовательно возрастает (II, III). Максимум плотности приходится на спутник Ио ($3,5 \text{ г/см}^3$). Затем плотность спутников падает, и непо-

средственно в окружении планеты находятся каменно-ледяные легкие спутники (IV), которые недалеко отбрасывались планетой и разрушались под действием приливных сил с образованием окружающих планету колец обломочного материала.

Генеральная эволюция Солнечной системы наглядно отражает философский принцип перехода количества в качество. Небольшие аккреционные тела в окружении планетной системы (кометы, Плутон, Харон) остались на самом примитивном уровне развития, свойственном кометам и планетезидам. Более массивные аккреционные тела приобрели принципиально новое качество, они подверглись плавлению за счет тепла гравитационного сжатия, превратились в периферические планеты (Нептун, Уран), расслоенные на железо-силикатные расплавленные ядра и флюидные (водные) оболочки, и приобрели при этом способность порождать кольца обломочного материала и спутники небольшой плотности (менее 2 г/см^3).

Еще более массивная планета промежуточной зоны (Сатурн) качественно отличается от периферических планет водородным составом флюидной оболочки, но сходна с ними по способности порождать кольца обломочного материала и спутники только небольшой плотности: самый плотный гигантский спутник Сатурна – Титан – имеет плотность $1,9 \text{ г/см}^3$ и диаметр 5150 км.

Наиболее массивные околосолнечные планеты (Юпитер и протопланеты Земной группы) качественно отличались от перечисленных выше менее массивных планет гигантскими размерами флюидных оболочек и их способностью порождать не только кольца и спутники небольшой плотности, но и плотные спутники, такие как спутник Юпитера Ио (плотность $3,5 \text{ г/см}^3$, диаметр 3640 км) и ее аналог Луна (спутник Протоземли) с диаметром 3480 км и плотностью $3,3 \text{ г/см}^3$.

Массивность планет возрастает по направлению к центру Солнечной системы с последовательным ее сближением с Солнцем (гелий-водородным центральным аккреционным телом), в котором сосредоточилась масса ледяного вещества, несоизмеримо большая, чем в Юпитере и протопланетах центральной зоны (более $2 \cdot 10^{33} \text{ г}$). Этим определился качественный скачок Солнца в отличное от планет – звездное состояние, обусловленное развитием в нем термоядерных реакций.

Посредством солнечного ветра Солнце разрушительно воздействовало на окружающую его систему, определив ее регрессивное развитие. Она потеряла при этом свою первоначальную гигантскую массу в результате миграции небулы, состоящей из водорода и гелия, составлявшей как бы матрицу кометных тел и планет и создававшей их быстрое обращение вокруг Солнца, а околосолнечные планеты-гиганты потеряли флюидные оболочки, превратившись в железо-каменные планеты.

Понимание того, что железо-каменные планеты, в том числе спутниковые, порождались протопланетами, сходными с Юпитером, раскрывает природу их эндогенной активности, результатом которой было обновление планетных кор. Направленность этих процессов на планетах определялась не только внутренними факторами, но и внешним гравитационным воздействием на планеты со стороны Солнца и смежных с ними планет.

Гравитационное воздействие Солнца на Меркурий выразилось в образовании у него двух противоположных направлений максимальной вулканической активности, одно из которых фиксируется гигантской депрессией Планиция Калорис диаметром 1300 км. Это объясняется резонансным, хотя и несинхронным обращением Меркурия вокруг Солнца, в результате которого

подсолнечную позицию в перигелии, когда гравитационное воздействие Солнца максимально, всегда занимает структура Планития Калорис или противоположная ей область распространения вулканических депрессий на обратной стороне Меркурия.

Гравитационное воздействие материнских планет на эндогенное развитие их спутников более стабильно и однозначно благодаря их резонансному и синхронному обращению. Стороны спутников, стабильно обращенные к материнским планетам, эндогенно развивались более активно по сравнению с обратными сторонами. Это относится к их первичному расслоению и процессам корового обновления. Мощность эвкритовой коры Луны на ее обратной стороне (80 км) значительно больше, чем на видимой стороне (60 км), на которой сосредоточены все эндогенные процессы ее обновления с образованием «морей», в которых происходило дальнейшее уменьшение мощности коры, фиксируемое масконами.

Сходное обновление коры на Венере и Марсе продвинулось значительно дальше, о чем можно судить по образованию на них более грандиозных морей и океанов. На Марсе морские депрессионные структуры с пониженной мощностью коры объединились в огромную океаническую область, занимающую почти все его северное полушарие.

Неоднородность преобразования первичных кор этих планет, по-видимому, так же связана с влиянием внешних гравитационных факторов на их эндогенное развитие, как это прослеживается на Меркурии и спутниках. Такие факторы могли создаваться Солнцем и планетами на смежных орбитах. Так, длительное гравитационное воздействие Земли на Венеру создало ее резонансное движение вокруг Солнца, при котором в так называемом верхнем соединении, когда Солнце расположено между Землей и Венерой, она обращена к Солнцу и Земле всегда одной и той же стороной, которая в эпоху ее эндогенной активности должна была подвергаться более интенсивной переработке по сравнению с обратной стороной.

Влияние гравитационных полей Земли и Солнца на Марс максимально во время так называемых великих противостояний, повторяющихся через каждые 15-17 лет. Во время этих противостояний Марс находится в перигелии, а Земля оказывается между Марсом и Солнцем, при этом расстояние между Землей и Марсом сокращается до 56 млн км (когда Марс в афелии, расстояние между ними превышает 100 млн км). Такие сближения с Солнцем и одновременно с Землей, несомненно, создавали в прошлом импульсы усиления направленной эндогенной активности Марса.

К главным положениям обоснованной в работе хондритовой модели происхождения планет Земной группы относится вывод о двухстадийном их развитии, сначала в недрах их материнских протопланет-гигантов под огромным давлением их флюидных оболочек, затем как самостоятельных небольших железо-каменных планет. Спецификой этого перехода от протопланетной к планетной стадии развития определяется и вся последующая их история. При дегазации их материнских протопланет планеты, оставшиеся на примитивной (хондритовой) стадии развития, подвергались взрывному распаду с образованием обломочного пояса астероидов между Марсом и Юпитером. В отличие от них планеты Земной группы расслоились на флюидные железные ядра и прочные силикатные оболочки, сохранившие их от взрывного распада в катастрофической обстановке поверхностной дегазации их материнских околосолнечных планет-гигантов. Однако расслоение Земли и планет Земной группы осуществлялось в разных режимах. Протоземля в этом

отношении развивалась по типу Юпитера, тяжелое ядро которого подверглось железо-силикатному расслоению, определяющему генерацию его собственного магнитного поля. Соответственно Земля в расплавленном состоянии расслаивалась под гигантским давлением флюидной оболочки ее материнской протопланеты, благодаря чему в ее расплавленном железном ядре сосредоточился огромный запас флюидных компонентов с преобладанием в их составе водорода и гелия. Этим определились необычайная длительность эндогенного развития Земли, продолжающаяся уже 4,6 млрд лет, и полное обновление земной коры. В отличие от Земли Венера, Марс и Меркурий расслаивались в режиме частичной или полной потери флюидных оболочек их материнскими протопланетами, определившей ограниченность флюидного запаса в их железных ядрах, которого было достаточно только на 2-3 млрд лет эндогенной активности, что определило сохранность на них примитивных планетных кор. Это в какой-то мере сближает эти планеты со спутниками планет-гигантов, отделявшимися от их флюидных оболочек и расслаивавшихся в вакууме космического пространства. Флюидного запаса в самых массивных спутниках (Луна, Ио) достаточно всего на 1,5 млрд лет эндогенной активности.

Представленные в работе хондритовая модель образования планет Земной группы и ахондритовая модель образования спутников планет-гигантов не имеют альтернативы, так как дают единственное объяснение их эндогенной активности, создаваемой флюидными потоками, исходящими из их расплавленных ядер. Основные черты моделей образования планет отображены на диаграмме (см. рис. 1.20). Стрелкой на ней обозначено характерное для звездно-планетных систем увеличение массивности планет-гигантов с приближением к звездам. Образование на этом пути коричневых карликов (объектов, промежуточных между планетами и звездами) подчеркивает единообразие процессов образования звезд и планет-гигантов. Планеты-гиганты являются материнскими для образования ахондритовых спутников (на диаграмму нанесены только самые массивные спутники – Луна и Ио) и планет Земной группы, зародившихся в виде хондритовых ядер планет-гигантов и превратившихся в самостоятельные планеты в результате потери ими флюидных оболочек под воздействием Солнца. Промежуточные стадии поверхностной дегазации планет-гигантов обозначены на диаграмме коннодами, соединяющими составы планет мультипланетных звездных систем. Они фиксируют уменьшение массивности планет-гигантов с приближением к звездам.

С давних времен (Маракушев, 1992, 1999; Маракушев и др. 1992₁) нами высказываются представления о поверхностной дегазации околосолнечных планет-гигантов под воздействием Солнца в качестве процесса, породившего в Солнечной системе Землю и сходные с ней железо-каменные планеты, первоначально зародившиеся в них в виде плотных ядер. Это представление в настоящее время нашло прямое подтверждение обнаружением с помощью космического телескопа «Хаббл» планеты-гиганта, оболочка которой подвергается дегазации под действием интенсивного звездного ветра. Звезда HD 209458, расположенная на расстоянии 150 световых лет, является желтым карликом и похожа на наше Солнце. Вращающаяся вокруг этой звезды планета HD 209458b выделяется положением орбиты, обращаясь по которой с периодом 3,5 сут, она каждый раз проходит по диску звезды (Charbonneau et al., 2000; Henry et al., 2000). При этом планета затмевает свет звезды в большей части спектра на 1,5%. Расчеты показывают, что масса планеты HD

209458b составляет около 0,7 массы Юпитера (220 масс Земли), диаметр примерно в 1,35 раза больше юпитерианского, а радиус орбиты – 7 млн км.

Удачное положение орбиты позволяет определить состав флюидной оболочки планеты. Приборы «Хаббла» зафиксировали, что в дальней ультрафиолетовой области спектра планета при затмении блокирует 15% излучения. Это указывает на наличие протяженной водородной оболочки (облака), распространяющейся на расстоянии 4,3 радиуса Юпитера (рис. 1.21). Газ с поверхности планеты уносится в космос звездным ветром, что подтверждается фиолетовым смещением линий спектра. Из-за столь близкого положения планеты к звезде ее атмосфера нагрета до 1100 °С. Ежесекундно планета теряет, по оценкам астрономов, не менее 10 тыс. т водорода. «Испаряющийся водород распространяется в виде асимметричного кометоподобного хвоста и постепенно исчезает по мере удаления от планеты» (Vidal-Madjar et al., 2003; Charbonneau, 2003) (рис. 1.22). Цитируемые астрономы полагают, что в будущем водородная оболочка планеты полностью мигрирует и останется только плотное ядро. Это совершенно согласно с нашими представлениями о происхождении железо-каменных околозвездных планет Земной группы, непосредственно окружающих Солнце (рис. 1.23).

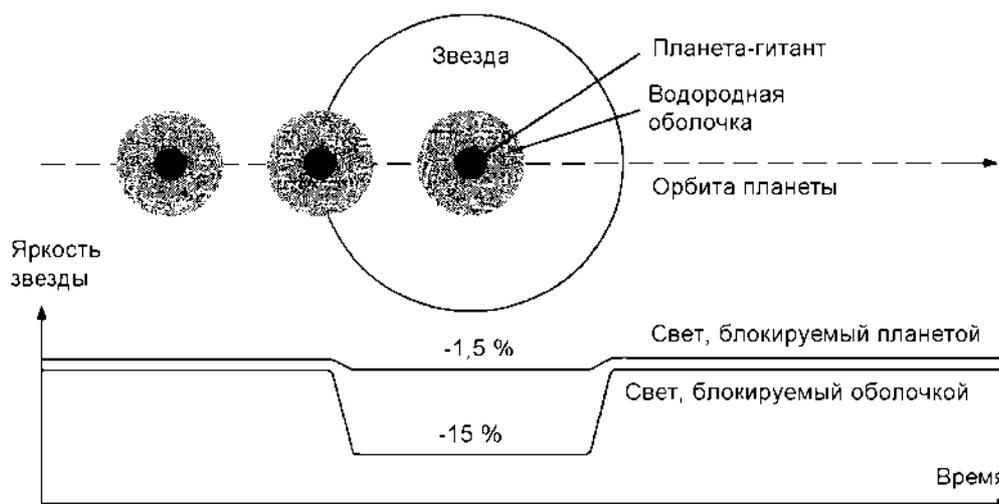


Рис. 1.21. Схема затмения звезды HD 209458 планетой-гигантом, которая блокирует 1,5%, а ее водородная оболочка – 15% излучения в дальней ультрафиолетовой области спектра (Charbonneau, 2003)

Таким образом, изложенные в книге представления позволили объединить астрономические явления, происходящие в других звездных системах, с событиями произошедшими в нашей Солнечной системе в далеком прошлом и приведшими к образованию планет Земной группы.

В звездных аналогах Солнечной системы стали также выявляться признаки окружения звезд небольшими околозвездными планетами, сопоставимыми по размеру с Землей (Doyle et al., 2000). На основе этих открытий возникает надежда на нахождение среди них аналогов Земли, причем не только по размеру, но и по оптимальному расстоянию от звезды в так называемой непрерывной обитаемой зоне, обеспечивающей образование у планеты гидросферы, которая необходима для зарождения и развития жизни.

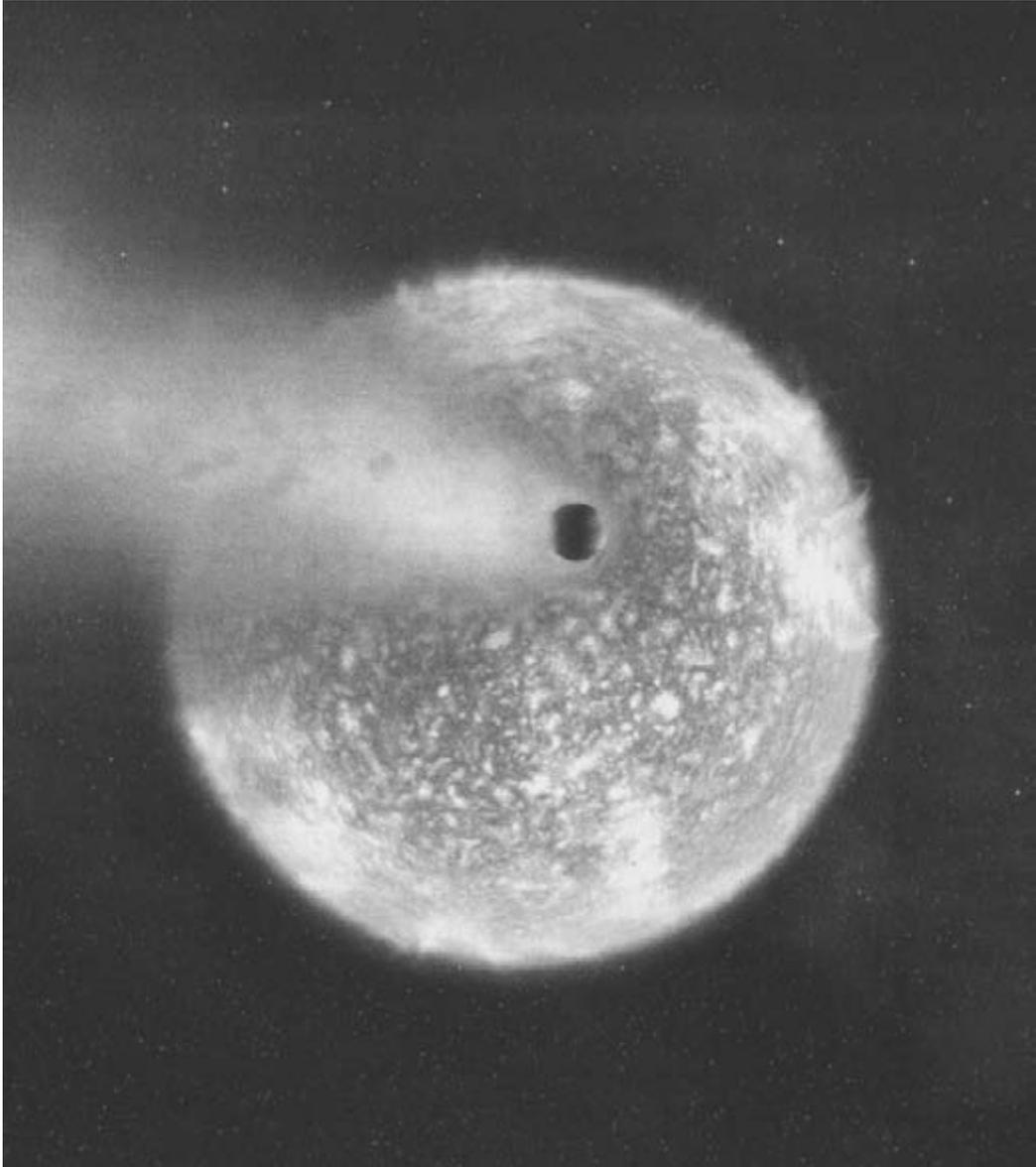


Рис. 1.22. Так на фоне звезды HD 209458 может выглядеть гигантская флюидная планета HD 209458b, которая, двигаясь по орбите, оставляет за собой водородный хвост

В разрешении проблемы происхождения Земли и Луны большую роль сыграло получение образцов лунных пород (1969 г.). Как показало их всестороннее изучение лунные породы представили недостававшее ранее звено связи между земными горными породами и метеоритами. До этого метеориты казались настолько отличными от земных пород, что рассмотрение их в общих петрогенетических моделях было невозможным, и они традиционно не включались в петрологическую науку и исследовались только космохимически.

Лунные породы вначале поразили исследователей сходством с земными базальтами (лейкократовыми и меланократовыми), но детальное их изучение

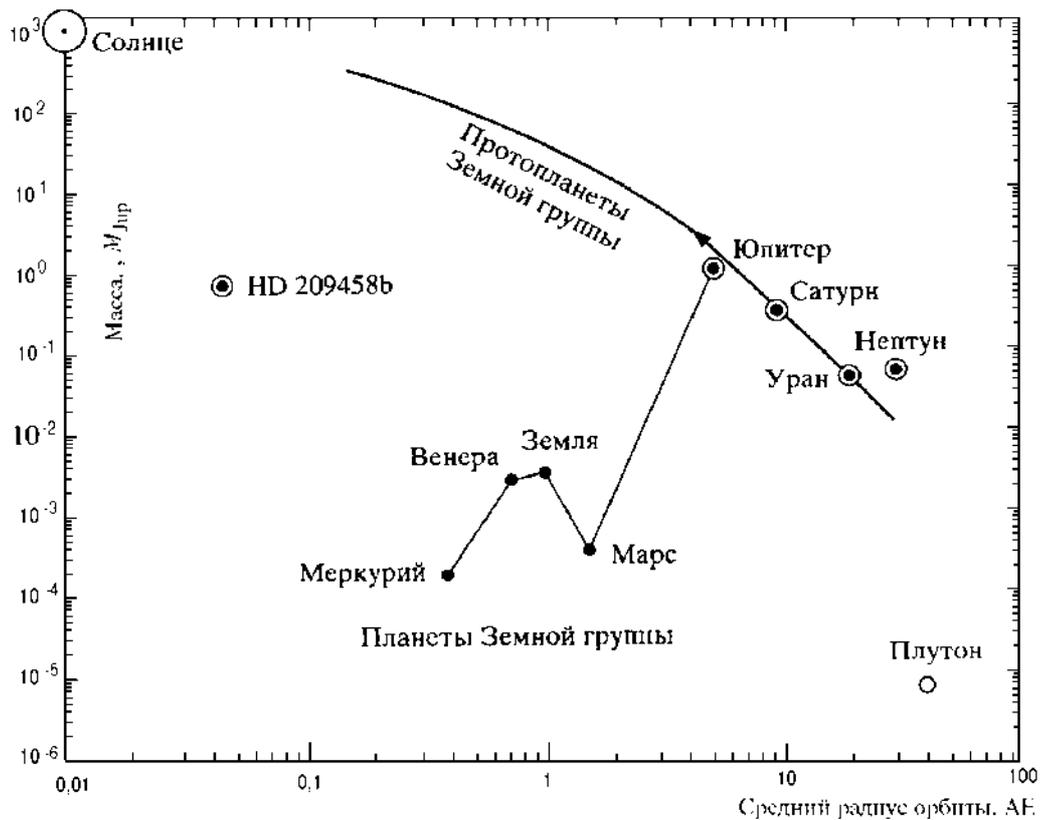


Рис. 1.23. Модель появления на свет планет Земной группы в результате потери гелий-водородных оболочек их гигантскими протопланетами под влиянием Солнца. Для сравнения показано положение планеты-гиганта HD 209458b, в настоящее время теряющей водородную оболочку под воздействием звезды HD 209458. Условные обозначения те же, что и на рис. 1.20

показало, что они больше сходны с метеоритами, отличаясь от земных базальтов огромным возрастом 4,3-3,2 млрд лет. Их отличие особенно наглядно устанавливается также путем анализа распределения изотопов гелия между метеоритами, лунными и земными горными породами (рис. 1.24). Земные горные породы отличаются крайне низким содержанием в них (в см³/г) легкого изотопа гелия (10⁻¹⁰-10⁻¹⁵) от лунных пород и метеоритов, в которых его содержание отвечает хондритовому уровню (10⁻⁵-10⁻⁷).

Были выявлены также особенности, принципиально отличающие лунные породы от метеоритов и сближающие их с земными горными породами. Так, по изотопам кислорода на диаграмме (рис. 1.25) лунные породы следуют так называемому земному тренду нормального массфракционирования (совместно с некоторыми малораспространенными метеоритами — ахондритами), тогда как преобладающие типы метеоритов (обыкновенные хондриты: LL-L-N-НН) образуют принципиально иной тренд аномального распределения изотопов кислорода. На диаграмме видно пересечение этих двух трендов (хондритового и земного), исходящих из поля хондрита НН, наиболее бедного легкими изотопами кислорода. Из этих соотношений следует, что хондрит НН является аналогом хондрита, который был родоначальным в развитии системы Земля-Луна. Хондритовая модель происхождения этой системы

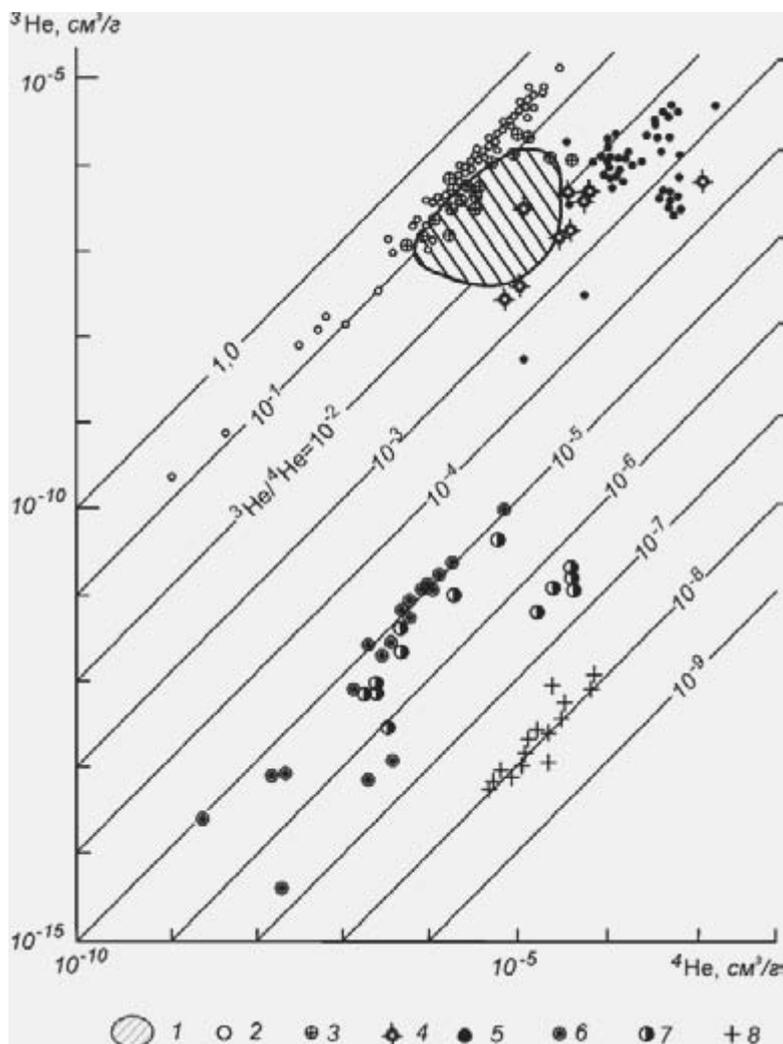


Рис. 1.24. Изотопы гелия в метеоритах лунных и земных горных пород
 1-5 – метеориты и лунные породы; 1 – хондриты, 2 – железные метеориты и палласиты, 3 – урейлиты, диогениты, обриты, 4 – говардиты и эвкриты, 5 – лунные базальты; 6-8 – породы земной коры и мантии: 6 – базальты и габбро, 7 – перидотиты, 8 – граниты и гнейсы

приобретает, следовательно, конкретное содержание, что выдвигает на передний план ключевую проблему происхождения и развития обыкновенных хондритов. Хондритовая железо-силикатная модель основана на аналогии валового состава Земли с богатыми железом обыкновенными хондритами, как показано на петрохимической диаграмме (рис. 1.26). Хондритам (I) соответствуют и другие планеты земной группы за исключением Меркурия, который богаче железом. В противоположность ему Луна беднее хондритов железом и соответствует по составу силикатным метеоритам – оритам-ахондритам (II) (табл. 1.5).

Петрологическое исследование хондритов позволило однозначно доказать магматическую природу всех типов – обыкновенных (LL, L, H, HH), энстатитовых (E) и углистых (C) хондритов и связать их происхождение с ранними этапами эволюции планет (Маракушев, 1992, 1999). Это опровергло

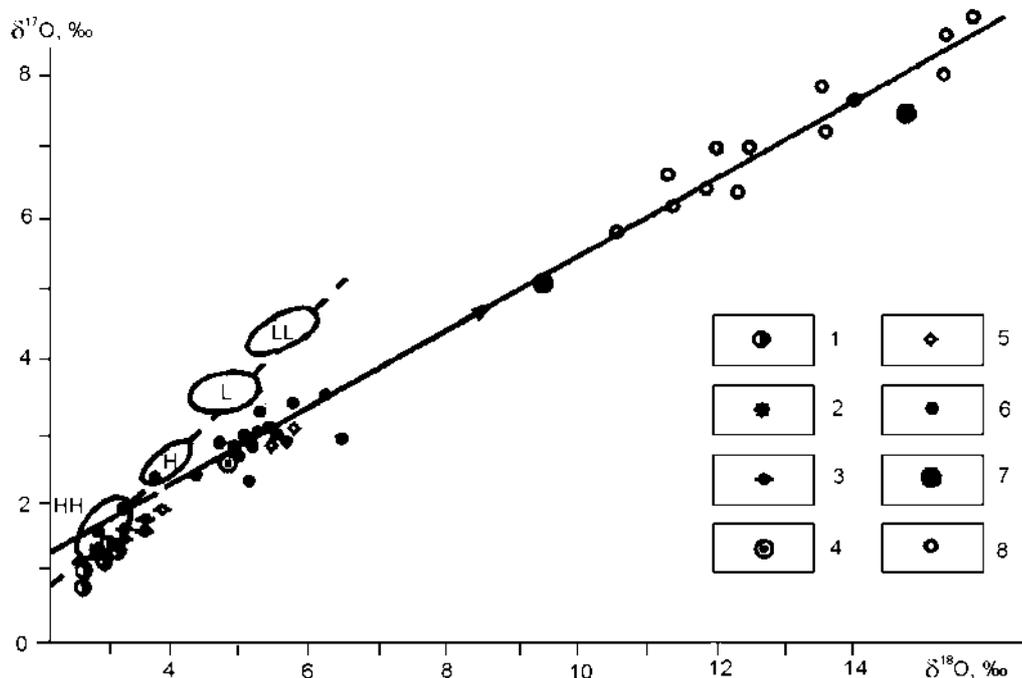


Рис. 1.25. Изотопные составы кислорода метеоритов, лунных и земных горных пород 1-3 – метеориты (1- палласиты, 2 – диогениты, 3 – эвкриты); 4-5 – лунные породы (4 – дуниты, 5 – базальты); 6-8 – земные породы (6 – базальты, 7 – граниты, 8 – докембрийские метапелитовые сланцы). Вдоль обозначенного сплошной линией тренда нормального массового фракционирования изотопов стрелкой показано направление изотопной эволюции земной коры. Составы обыкновенных хондритов LL, L, H, HH выделены контурами

традиционное представление о хондритах как прямых конденсатах протосолнечной небулы, участвующих в аккреции планет (согласно так называемой метеоритной гипотезе их происхождения). Был доказан, таким образом, более высокий эволюционный уровень хондритового вещества, связанного своим происхождением с развитием уже сформированных планет. Самым же примитивным твердым веществом, образовавшим первичные планетозимали, из которых формировались путем аккреции планеты, были ледяные массы с рассеянной космической железо-силикатной пылью. Они сходны по физическому состоянию с кометами, окружающими Солнечную систему в виде кометных облаков и сохраняющими свое первозданное состояние. Чтобы понять природу этого самого примитивного твердого вещества и его роль в формировании планет, необходимо рассмотреть происхождение и ранние этапы эволюции Солнечной системы.

Состав Солнца, аналогичный составу других звезд и межзвездного газа, на 3/4 (по массе) представлен водородом и на 1/4 гелием (атомное отношение близко к 10), тогда как прочие элементы составляют около одного процента. Гелиево-водородный состав Вселенной с незначительной примесью тяжелых изотопов водорода (дейтерия D и трития T) и легких элементов (Li, Be, B) возник в самом начале ее эволюции в результате так называемого Большого Взрыва (Big Bang). Более тяжелые химические элементы возникали позднее на различных стадиях эволюции звезд (рис. 1.27). Соотношение их содержаний наглядно отражает состав хондритов, к преобладающим металлам в которых относится магний, кремний и железо.

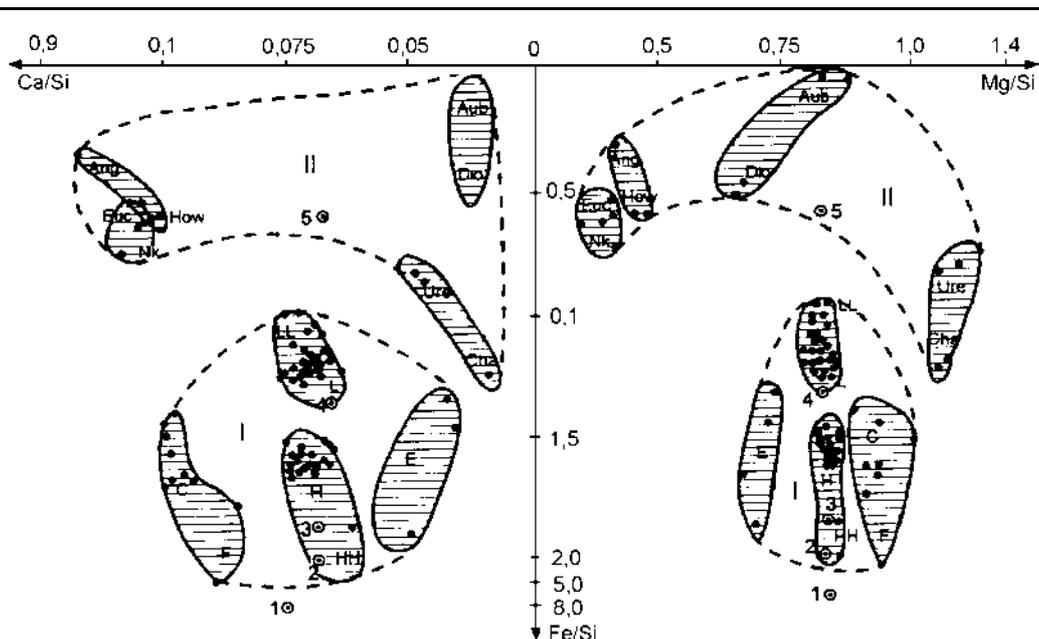


Рис. 1.26. Петрохимическая диаграмма хондритов (I) и ахондритов (II) в сопоставлении с валовыми составами планет земной группы: (1 – Меркурий, 2 – Земля, 3 – Венера, 4 – Марс) и Луны (5)
 I – хондриты: обыкновенные LL-L-H-HH, энстатитовые (E) и углистые (C); II – ахондриты: обриты (Aub) и диогениты (Dio), ангриты (Ang) и говардиты (How), эвкриты (Euc) и наклиты (Nk), уреилиты (Ure) и шассиньиты (Cha)

Солнце является небольшой звездой (желтым карликом), в недрах которой осуществляется синтез относительно легких элементов (C, O, Ne, Mg). Наблюдаемые же элементы Солнечной системы, включая и такие тяжелые как торий, уран, были унаследованы от гигантской звезды – ее предшественницы, которая взорвалась как сверхновая в космическом пространстве около 5 млрд. лет тому назад и породила раскаленное газовое облако. В нем дополнительно могли синтезироваться только легкие элементы (Li, Be, B) под воздействием космических лучей.

В гелий–водородном составе исходного облака относительно тяжелые металлы с преобладанием Mg, Si, Fe составляли менее 1 мас. %. С их участием при охлаждении началась дифференциация раскаленного газового облака с отделением от газовой фазы железо-каменного вещества (космической пыли): Fe (Ni), MgO, SiO₂, (Mg, Fe)₂SiO₄, (Mg, Fe)SiO₃ и др. Это было первым шагом на пути превращения газового облака в протосолнечную небулу (туманность), сформировавшую затем огромный протосолнечный диск, вращающийся вокруг зоны очагового охлаждения в его центре. Принципиальное различие этих двух звездных систем (предшествующей и протосолнечной) было обусловлено динамикой исходных небулярных дисков, определяемой, главным образом, скоростью вращения. Протозвездный диск гигантской предшественницы Солнечной системы вращался с меньшей скоростью, вследствие чего в ходе эволюции вся его масса и кинетическая энергия смогли сосредоточиться в массивной звезде, определив ее быстрое вращение, высокую светимость и стремительность звездного развития – короткий период жизни, в который звезда породила огромное разнообразие химических элементов, унаследованных затем Солнечной системой.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕМЛИ, ЛУНЫ, ИХ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Т а б л и ц а 1.5. Состав (ат.% металлов) Солнца, планет земной группы (Reynolds, Summers, 1969) и обычных хондритов (НН, Н и L)

Металлы	Солнце	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Rose City (НН)	Richardton (Н)	Modoc (L)
Si	34.70	16.45	33.03	31.26	36.44	27.81	31.43	35.56
Fe	30.90	63.07	30.93	34.50	24.78	36.26	29.42	21.81
Mg	27.40	15.65	31.21	29.43	34.33	27.26	30.43	33.39
Na	2.19	-	-	-	-	1.23	1.70	1.62
Al	1.74	0.97	2.03	1.90	2.29	3.03	2.85	2.66
Ca	1.56	0.88	1.62	1.53	1.73	1.19	1.38	2.66
Ni	0.90	2.98	1.18	1.38	0.43	2.12	1.47	1.21
P	0.24	-	-	-	-	0.28	0.41	0.23
Cr	0.17	-	-	-	-	0.26	0.41	0.39
Mn	0.09	-	-	-	-	0.18	0.27	0.26
K	0.06	-	-	-	-	0.16	0.16	0.13
Ti	0.05	-	-	-	-	0.10	0.07	0.08
Co	-	-	-	-	-	0.12	0.09	-
Fe/Si	0.89	-	-	-	-	1.30	0.94	0.61
Fe/Mg	1.13	-	-	-	-	1.33	0.97	0.65

В противоположность такому режиму, протосолнечный диск обладал более высокой кинетической энергией (вращался с несравненно большей скоростью), что препятствовало сосредоточению его массы в центральной звезде (на Солнце), в которой аккумулировалась только небольшая часть ($1.983 \cdot 10^{33}$ г) вещества гигантской протосолнечной небулы. Этим определился небольшой размер, медленное вращение и продолжительность жизни Солнца, длящейся уже 5 млрд лет. Главная же масса плотного небулярного диска оставалась в окружавшей Солнце динамичной системе, в которой формировались планеты и кометы в результате стяжения ледяного вещества, содержащего примесь космической пыли. Солнце формировалось аналогично планетам путем аккреции ледяного вещества, но достигло несравненно большей массы и, превратившись в небольшую звезду, активно воздействовало на быстро вращающийся плотный небулярный диск посредством интенсивного солнечного ветра. В результате Солнечная система потеряла исходную огромную массу. Гелий и водород мигрировали в космос из межпланетных и межкометных пространств небулярного диска. Планеты оказались, таким образом, в вакууме, унаследовав, тем не менее, значительную часть кинетической энергии быстро вращавшегося плотного небулярного диска, в котором происходило их формирование: на их долю приходится 99.2 % полного момента количества движения Солнечной системы.

Главной спецификой протосолнечного диска было его развитие в режиме резкого температурного градиента. В центральной области достигалась минимальная температура (5-10 К). На периферии же протосолнечного диска температура оставалась высокой, обеспечивающей вхождение в ледяные планетызимали только относительно высокотемпературных компонентов небулы (до H_2O включительно), тогда как главная масса водорода и гелия небулы оставалась в газообразном состоянии и не вовлекалась в формирование периферийных планет (Урана, Нептуна), Плутона и кометных тел, в дальнейшем она была потеряна Солнечной системой. Вследствие малой массивности кометные тела и Плутон, составляющий всего 0.0025 массы Земли, остано-

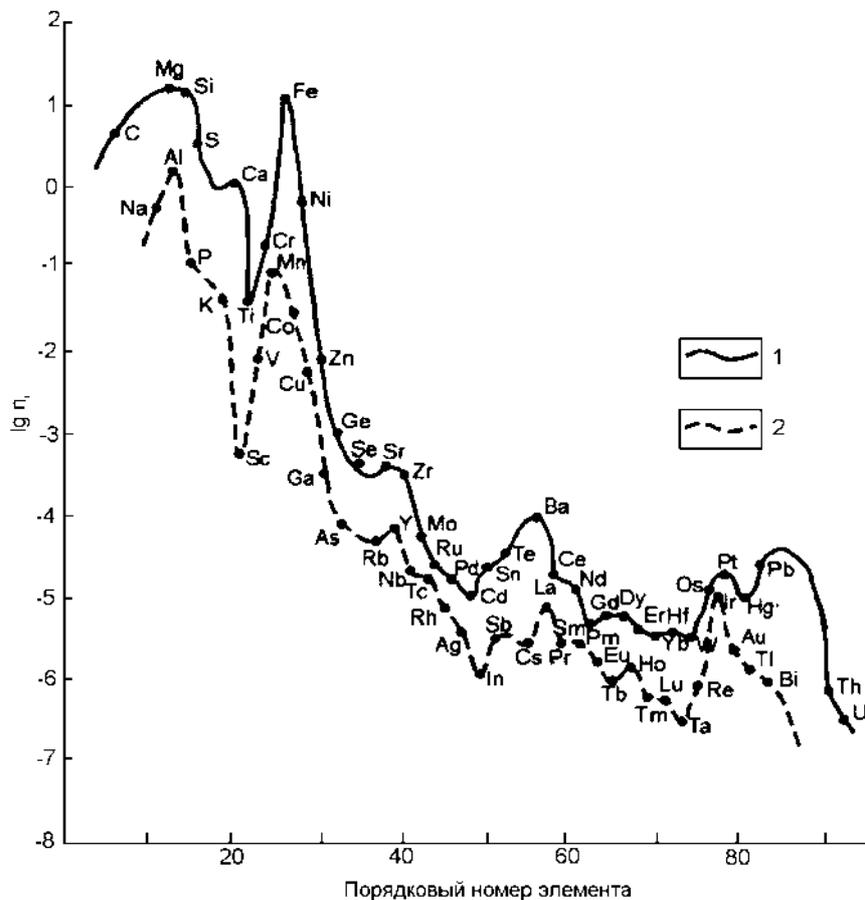


Рис. 1.27. Диаграмма распространенности элементов (химический спектр) в хондритах (согласно хондритовой модели аналогов валового состава Земли)

$\lg n_i$ – содержание химических элементов (логарифмы чисел атомов в стандартной формуле, рассчитанной на 50 атомов кислорода; 1 – максимальные позиции элементов четных порядковых номеров; 2 – минимальные позиции элементов с нечетными порядковыми номерами

лись в своем развитии на самой примитивной стадии эволюции. На рис. 1.28 показаны Солнце в окружении планет земной группы и орбиты планет-гигантов (Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна), видно особое положение по отношению к ним Плутона, периодически вторгающегося в Солнечную систему по удлинненной орбите из кометного облака Койпера – нижний рисунок (Malhotra, 1999).

Исследование комет важно для познания начала планетного развития периферийной области Солнечной системы. Кометы, периодически вторгающиеся в Солнечную систему, состоят из водного льда (около 80 %), оксидов углерода, метана, аммиака и рассеянного пылевидного железо-силикатного вещества. Аналогичны по составу Плутон и Харон – гигантские кометообразные тела, находящиеся в динамическом взаимодействии. Все эти объекты являются ближайшими аналогами планетезималей, из которых формировались Нептун и Уран. В отличие от Плутона они сосредоточили в себе огромные массы (в единицах массы Земли): 14.6 (Уран) и 17.2 (Нептун), достаточные для гравитационного сжатия с выделением энергии, определившей их собственное тепловое излучение, полное плавление и расслоение на флю-

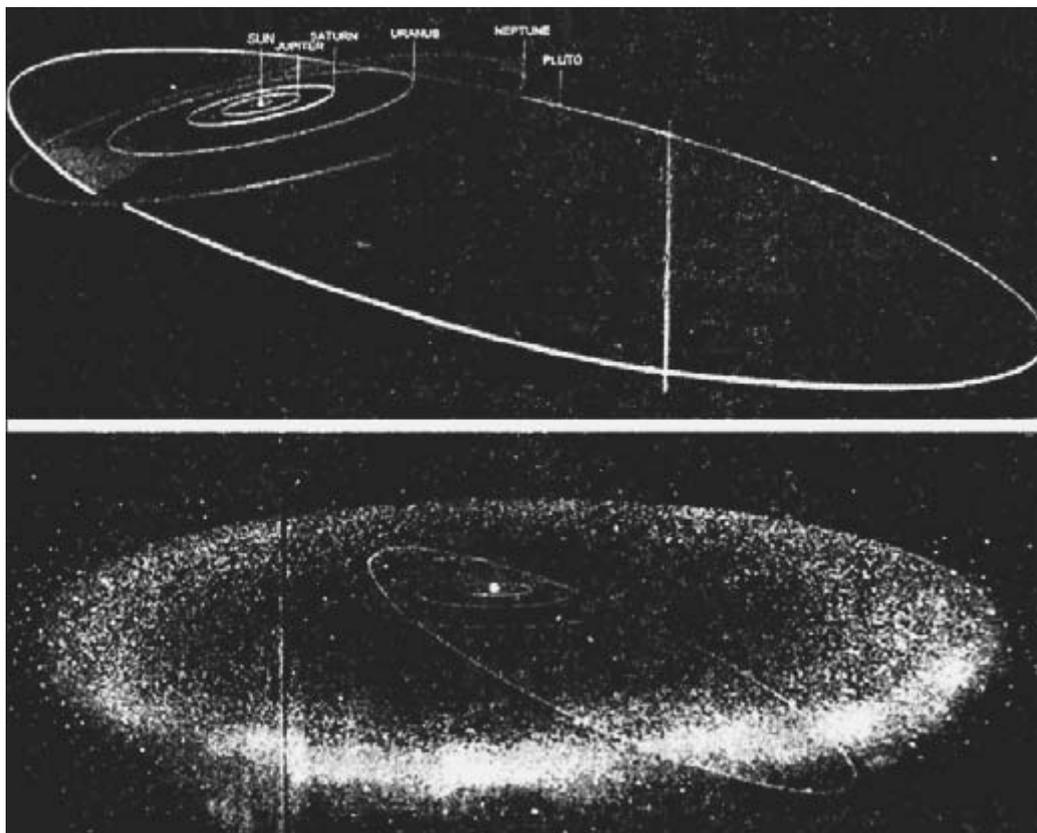


Рис. 1.28. Схема взаимного расположения окружающих Солнце планетной системы (планеты земной группы, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) и кометного облака Койпера (нижний рисунок). Видно особое положение Плутона, периодически вторгающегося в планетарную систему из кометного облака (Malhotra, 1999)

идные (водные) оболочки и расплавленные железо-каменные ядра. Расслоение носило ступенчатый характер и сопровождалось быстрым вращением флюидных оболочек планет (прямым и обратным), что приводило к отделению флюидно-силикатных расплавленных масс (спутников).

Качественный скачок на переходе от кометного развития к планетному наглядно выражен при сопоставлении космических снимков Плутона и Урана. Кометообразная масса Плутона (диаметр 2320 км), динамически связанная с Хароном (диаметр 1270 км) контрастно отличается на снимках от шарообразного Урана (диаметр 51800 км), окруженного стройной системой спутников (Мириада, Ариэль, Убриэль, Титания, Оберон) и расслоенного на железо-силикатное ядро и огромную флюидную (водную) оболочку. Кометы, Плутон, Нептун и Уран почти на 80 % состоят из воды, но Нептун и Уран принципиально отличаются более высоким энергетическим уровнем эволюционного развития и дифференциацией вещества, в ходе которой произошло образование железо-силикатных (хондритовых) расплавов, образовавших ядра планет, и флюидно-силикатных (ахондритовых) расплавов, отброшенных центробежными силами от флюидных оболочек планет в спутниковые системы.

Околосолнечные планеты (Сатурн, Юпитер) принципиально отличаются от периферийных планет (Нептуна и Урана) гелий-водородным составом, сходным с составом Солнца. Из этого следует, что движущей силой аккумуля-

лации твердого вещества в центре Солнечной системы было падение температуры протосолнечного диска до уровня, близкого к абсолютному нулю, создавшее условие для конденсации и затвердевания водорода, входившего в состав ледяных планетезималей.

При охлаждении газообразный водород превращался в лед, который кристаллизуется в кубической или гексагональной сингонии, формировавший подобие рыхлого снега (плотность твердого водорода примерно в 10 раз ниже плотности водяного льда). Примесь гелия препятствовала его затвердеванию, поскольку гелий не растворяется в жидком водороде и образует мельчайшие пузырьки, не замерзающие даже при самой низкой температуре.

Флюидные гелиево-водородные планеты обладают очень высокими температурами в недрах (20000°K у Юпитера), достаточными для полного плавления, но недостаточными для термоядерных реакций. Источником тепла было освобождение гравитационной и аккреционной энергий. Радиоактивность в тепловом балансе этих планет не играет роли. Мощный тепловой поток, поднимающийся из недр планет, определяет их собственную светимость ($1.7 \cdot 10^{-6}$ эрг \cdot г \cdot с $^{-1}$ для Юпитера), придающим им внешнее сходство со звездами («блуждающие звезды»). Между тем, во всех этих планетах-гигантах устанавливаются железо-силикатные расплавные ядра, аналогичные околосолнечным планетам земной группы (рис. 1.29). Они образовались в них в ре-

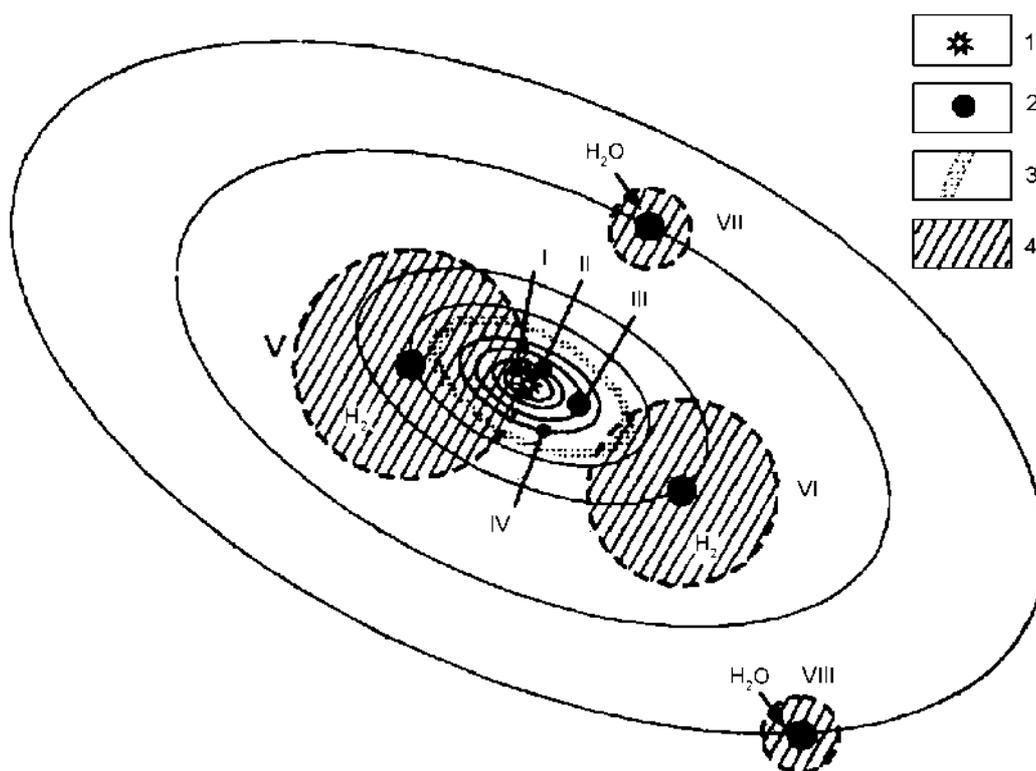


Рис. 1.29. Схема строения Солнечной системы

1 – Солнце, 2 – планеты земной группы: Меркурий (I), Венера (II), Земля (III), Марс (IV) и аналогичные им расплавные ядра планет-гигантов – Юпитера (V), Сатурна (VI), Урана (VII) и Нептуна (VIII), 3 – пояс астероидов – обломков планет земной группы, подвергшихся взрывному распаду на примитивной стадии эволюции, 4 – флюидные оболочки планет-гигантов, водные на периферии (H₂O) и водородные (H₂) во внутренней части Солнечной системы

зультате развития железо-силикатной флюидной несмесимости в их недрах. Планеты земной группы развивались аналогично планетам-гигантам, но потеряли гигантские флюидные оболочки под воздействием Солнца. Земля в ходе своего образования и ранней эволюции проходила аналогичную стадию флюидной (подобной Юпитеру) протопланеты, обладавшей массой, в сотни раз превышавшей ее современную массу. Аналогичную протопланетную стадию проходили и другие планеты земной группы, а также материнские планеты хондритов. Это нашло отражение в их составе, запечатлившем две стадии развития – протопланетную под высоким водородным давлением флюидных оболочек (изотопные аномалии, алмазная минерализация) и планетную (после потери протопланетами флюидных оболочек), в которую происходила кристаллизация минералов, образование стекол и брекчий.

Протопланетная стадия развития околозвездных планет в последние годы получила также астрономическое подтверждение. Аналоги гигантских протопланет земной группы были обнаружены в космическом пространстве в звездных системах, представленных долгоживущими, подобно Солнцу, небольшими звездами, которые окружены массивными флюидными планетами, соизмеримыми по размеру с Юпитером (см. обзор в статье Malhotra, 1999). Эти планеты были обнаружены путем точных измерений на спектрометре «Advanced Fiber Optic Echelle». Планеты обращаются по близким к круговым орбитам вокруг звезд и создают их периодические смещения, фиксируемые доплеровскими эффектами. Аналогия с Солнцем этих звезд устанавливается по слабой хромосферной активности, свойственной старым долго живущим звездам. К настоящему времени было обнаружено около двух десятков подобных звезд, окружающихся гигантскими флюидными планетами, сходными по размеру с Юпитером. Юпитер находится на большом расстоянии от Солнца (5.2 АЕ), но в отличие от него обнаруженные у других звезд гигантские планеты занимают околозвездную позицию, в которой в Солнечной системе находятся планеты земной группы (0.39-1.53 АЕ), подвергшиеся дегазации с поверхности и утратившие гигантские размеры. Обнаруженные в других звездных системах планеты-гиганты являются аналогами ранней протопланетной стадии эволюции Солнечной системы. На этой стадии Солнце находилось в окружении только флюидных планет-гигантов (протопланет земной группы, как показано на схеме, рис. 1.30 (табл. 1.6), аналогично его звездным аналогам, окружающимся планетами, сопоставимыми по размеру с Юпитером. Коннодами отражена поверхностная дегазация протопланет. Следует заметить, что и Юпитер подвергся частичной дегазации с поверхности, как можно судить по его аномально высокой средней плотности (1.3 г/см^3), почти вдвое превышающей плотность Сатурна (0.7 г/см^3). В основном же у него, как и у других планет его группы, сохранилась гигантская гелий-водородная флюидная оболочка и спутниковая система благодаря удаленности от Солнца (5.2 АЕ). В отличие от него околозвездные планеты земной группы полностью потеряли под воздействием Солнца гигантские флюидные оболочки и спутниковые системы, от которых сохранились лишь реликты (Луна у Земли, Фобос и Деймос у Марса). Уникальный процесс околозвездной (околозвездной) поверхностной дегазации протопланет земной группы прослеживается также в окружении звезды Upsilon Andromedae (рис. 1.31), с приближением к которой по наблюдениям Р.П. Батлера (R.P. Butler) флюидные гигантские планеты последовательно становятся менее массивными (M_{Jup} – массы Юпитера, АЕ – астрономические единицы): $4M_{\text{Jup}}$ (2.5 АЕ) – $2M_{\text{Jup}}$ (0.8 АЕ) – $0.7M_{\text{Jup}}$ (0.06 АЕ (цит. по Malhotra, 1999, с. 521).

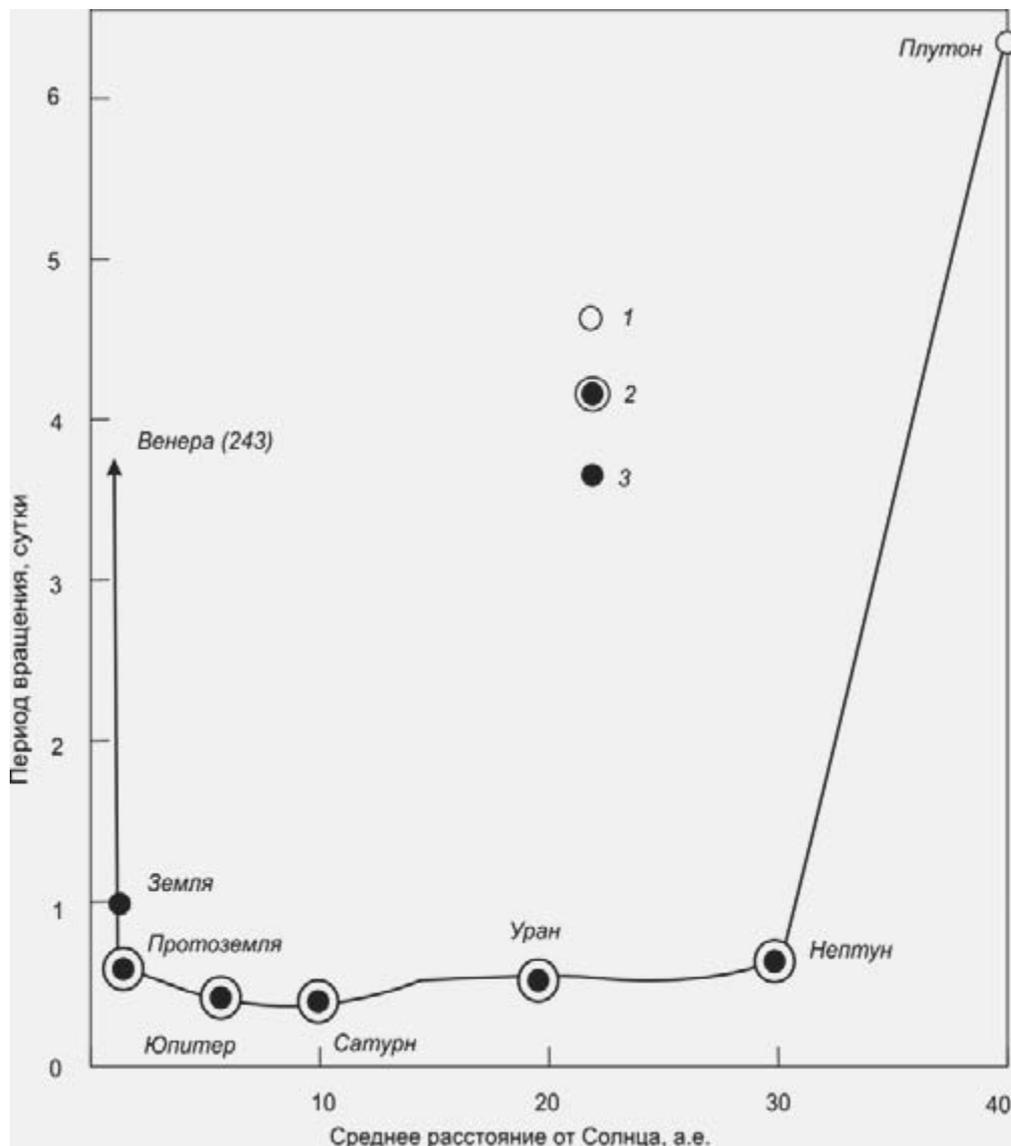


Рис. 1.30. Диаграмма сопоставления околосолнечных протопланет земной группы с их аналогами в других звездных системах

1-9 – протопланеты и планеты Солнечной системы: Юпитер (1), Марс (2) и Протомарс (3), Земля (4) и Протоземля (5), Венера (6) и ПротоВенера (7), Меркурий (8) и Протомеркурий (9); 10-14 – планеты звездных систем: 16 Sygni B (10), 47 Ursae Majoris (11), Upsilon Andromedae (12-15).

На графике отображено предполагаемое первичное состояние протопланет (2, 5, 7, 9, 14), их поверхностная дегазация, показанная штриховыми стрелками. 1-2 – первичное (1) и дегазированное (2) состояние планет

Дегазированные с поверхности планеты системы Upsilon Andromedae обозначены на схеме особым знаком, как и планеты земной группы. Орбита самой крупной из выявленных планет этой системы (2.5 АЕ) коррелируется с положением пояса астероидов Солнечной системы (2.7-2.8 АЕ). Эта планета является, таким образом, аналогом протопланет пояса астероидов, которые подверглись полной поверхностной дегазации под воздействием Солнца и

Таблица 1.6. Сопоставление параметров Юпитера (1), протопланет земной группы (2-9) и некоторых планет звездных систем (10-15)

№ на рис. 1.30	Планеты звездных и Солнечной систем	Массы, M_{Jup}	Расстояние от звезды или Солнца, АЕ
1	Юпитер	1.00	5.2
3 (3)	Марс (Протомарс)	(2.13)	1.53
4 (5)	Земля (Протоземля)	(2.53)	1.00
6 (7)	Венера (Протовенера)	(2.80)	0.72
8 (9)	Меркурий (Протомеркурий)	(3.40)	0.39
10	16 Cygni B	1.70	1.78
11	47 Ursae Majoris	3.40	2.20
12	Upsilon Andromedae	4.00	2.50
13 (14)	->-	2.00	0.80
15	->-	0.7	0.06

взрывному распаду под давлением гелий-водородных флюидов, сконцентрированных в их ядрах в период протопланетного расслоения (в недрах материнских планет-гигантов).

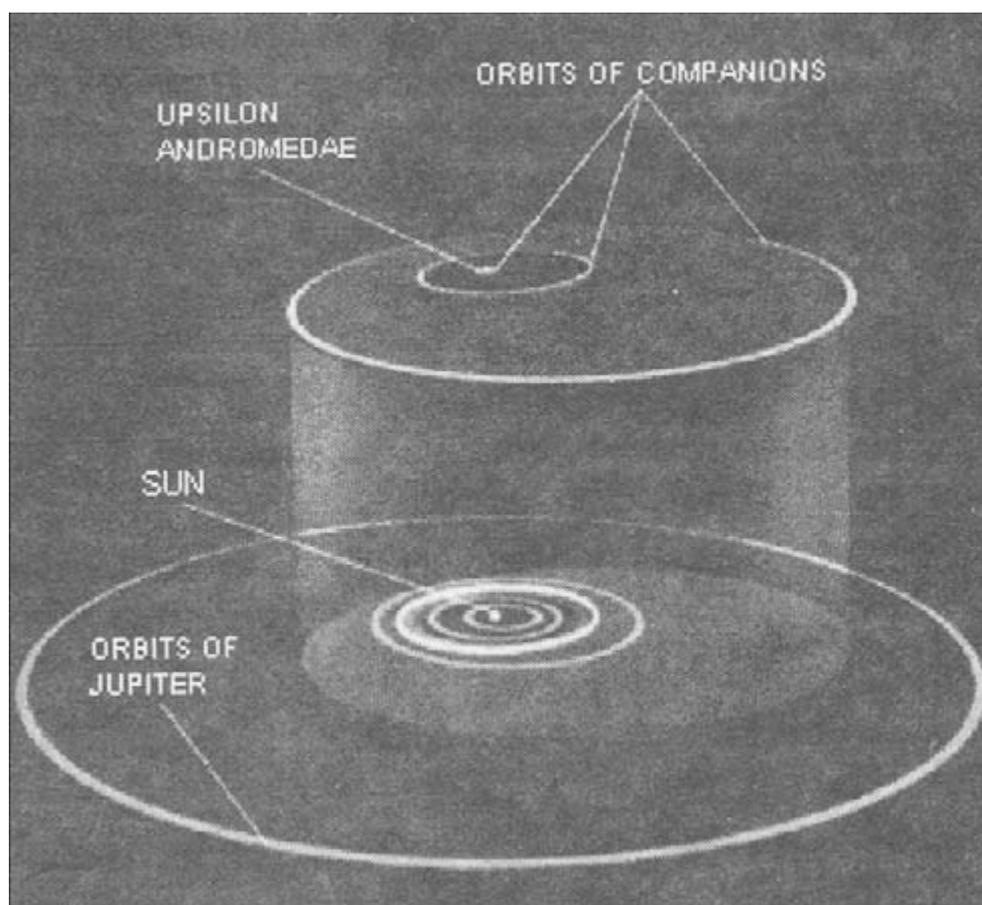


Рис. 1.31. Схема сопоставления орбит частично дегазированных планет звезды Upsilon Andromedae с орбитами полностью дегазированных планет земной группы, включая материнские планеты астероидов. Поясу астероидов относительно близка эксцентричная орбита внешней самой удаленной планеты Upsilon Andromedae

Обломочный характер астероидов, пояс которых шуточно был назван каменоломней Солнечной системы, наглядно устанавливается многочисленными космическими снимками с межпланетных станций («Галилео» и др.) и по наблюдениям с Земли, фиксирующим широкие колебания их блеска. На космических снимках астероиды представлены неправильными каменными телами со сглаженными углами (Гаспра, Ида, Дактиль и др.). На поверхности астероидов наблюдаются многочисленные ударные кратеры от падения метеоритов, что отражает катастрофичность взрывного распада планет, приведшего к их образованию. Взрывы достигали огромной мощности, как можно судить по эффектам наложения на метеориты взрывного (ударного) метаморфизма с образованием плотных фаз, сопровождавшегося плавлением метеоритов.

Большинство астероидов в главном поясе между орбитами Марса и Юпитера движутся по орбитам в прямом направлении со скоростью около 20 км/с с периодами обращения вокруг Солнца от 3 до 9 лет. Вхождение астероидов в общую систему с планетами отражает их природу как обломков самостоятельных железо-каменных планет. Наряду с этим к астероидам относятся и потерянные планетами спутники или их обломки, которые в той или иной мере наследовали орбиты планет и приобретали свойственное астероидам обращение вокруг Солнца. К ним относятся и астероиды с орбитами, близкими к орбитам Юпитера, Марса, Земли и Венеры, образующие семейства троянцев, Амура, Аполлона и Афины соответственно.

Характерно, что и планеты земной группы, потеряв гигантские массы своих предшественников (протопланет), унаследовали их орбиты, как можно судить по соблюдению закона планетных расстояний, охватывающему по правилу Тициуса-Боде планеты земной группы и группы Юпитера Солнечной системы (в скобках даны реальные расстояния, АЕ): Меркурий — 0.4 (0.387), Венера — 0.7 (0.723), Земля — 1.0 (1.0), Марс — 1.6 (1.524), астероиды Перера и Паллада — 2.8 (2.8), Юпитер — 5.2 (5.203), Сатурн — 10.0 (9.539), Уран — 19.6 (19.18), Нептун — 30.4 (39.06). Это отражает единообразное происхождение планет, определившее монотонное уменьшение их массивности с удалением от Солнца в последовательности Протомеркурий, ПротоВенера, ПротоЗемля, Протомарс, протопланеты пояса астероидов, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.

Изначально однотипно массивное состояние всех планет Солнечной системы, включая планеты земной группы, постулировалось еще В.Г. Фесенковым в 1947 году при расчете их гравитационной устойчивости и выводе закона планетных расстояний. Согласно интерпретации В.Г. Фесенкова планеты земной группы при формировании были примерно в 30 раз массивнее, но «потеряли» потом 97% своей массы за счет легких газов — водорода и гелия (Вдовыкин, 1967).

Пояс астероидов служит источником метеоритов так называемого гелеоцентрического типа, которые, падая на Солнце, захватывались гравитационным полем Земли. Среди них преобладают хондриты — магматические железо-каменные метеориты, в структуре которых фиксируется распад исходного расплава на мельчайшие силикатные хондры и богатую железом и никелем матрицу, обусловленный развитием жидкостной несмесимости. Магматический распад, как и ранняя кристаллизация хондритов, происходили на ранней (протопланетной) стадии развития их материнских протопланет под высоким гелий-водородным давлением. В развитии жидкостной несмесимости возникали равновесные соотношения между силикатными хондрами и ме-

таллической фазой матрицы, фиксируемые закономерным распределением между ними магния, железа и никеля согласно известному правилу Прайора: повышение железистости силикатов в хондрах коррелируется с возрастанием содержания никеля в металлической фазе матрицы.

Прямым доказательством высокого флюидного давления, господствовавшего на ранних этапах эволюции метеоритного магматизма, служит наличие алмазной минерализации во всех типах хондритов, в железных метеоритах и в уреилитах (Маракушев и др., 1992, 1995). Алмаз во всех типах примитивных метеоритов приурочен к металлической никель-железной фазе (камаситу) и сопровождается муассанитом (SiC), троилитом, шпинелью, добреелитом и графитом, иногда галитом, сильвином, нинингеритом. Зерна алмаза буквально переполнены флюидными включениями, благодаря чему его объемная плотность местами снижается с 3.5 г/см^3 до 2.2 г/см^3 .

Наличие в метеоритах алмазной минерализации служит наиболее надежным признаком раннего этапа их протопланетного развития под высоким гелий-водородным давлением флюидных оболочек материнских протопланет. Наглядно выраженная на диаграмме дискретность изотопного состава алмаза метеоритов отражает сложный характер этого воздействия. Железо-силикатные расплавленные ядра в протопланетах формировались в результате длительного процесса развития жидкостной несмесимости в их флюидных оболочках. Показателем этого процесса служат спутниковые системы планет, рассматриваемые на примере Юпитера, спутниковая система которого является наиболее развитой (рис. 1.32, табл. 1.7).

Спутниковые системы отделяются от планет системами колец обломочного материала, образованного при разрушении околопланетных спутников. Кольцо вокруг Юпитера расположено в экваториальной части планеты, имеет толщину около 30 км и совершает полный оборот за 7 часов. Внешний край кольца находится на расстоянии 55000 км от границы его облаков. Плотность частиц, образующих кольцо, убывает по направлению к планете. Кольцо состоит из мельчайших силикатных и ледяных частиц, имеет ажурное строение и выглядит прозрачным, представляя остаток плотных и компактных колец, подобных кольцам Сатурна или Урана, окружавших эту планету в древние времена.

Как и у всех планет, кольцо Юпитера ограничивается орбитами мелких (диаметром около 40 км) спутников — Метида, Адрастея, Амальтея, Теба (группа IV на рис. 1.32), разрушавшихся под приливным воздействием Юпитера и имеющих вследствие этого обломочную форму. Они аналогичны в этом отношении кольцам обломочного материала, непосредственно окружающим планеты. Спутники, порождаемые планетами, остаются стабильными (не разрушаются с образованием колец) только на достаточно удаленных от них орбитах (за пределами Роша). Кольца, как и тесно связанные с ними околосопутниковые легкие планеты, относятся к самым молодым порождениям флюидных планет, уже утративших былую активность, характеризующую скоростью вращения их флюидных оболочек. На диаграмме эти спутники относятся к IV возрастной группе, принципиально отличаясь в хорошо развитой спутниковой системе Юпитера от массивных спутников внутренней зоны (III) и мелких легких спутников промежуточной (II) и внешней (I) зон. В зоне III располагаются свойственные только Юпитеру спутники (галилеевы) с высокой плотностью вещества ($1.8\text{--}3.5 \text{ г/см}^3$) и большими размерами (указаны диаметры в км, в скобках — расстояния до Юпитера): Каллисто — $4840 (1.88 \cdot 10^6)$, Ганимед — $5270 (1.07 \cdot 10^6)$, Европа — $3130 (6.71 \cdot 10^5)$, Ио — 3640

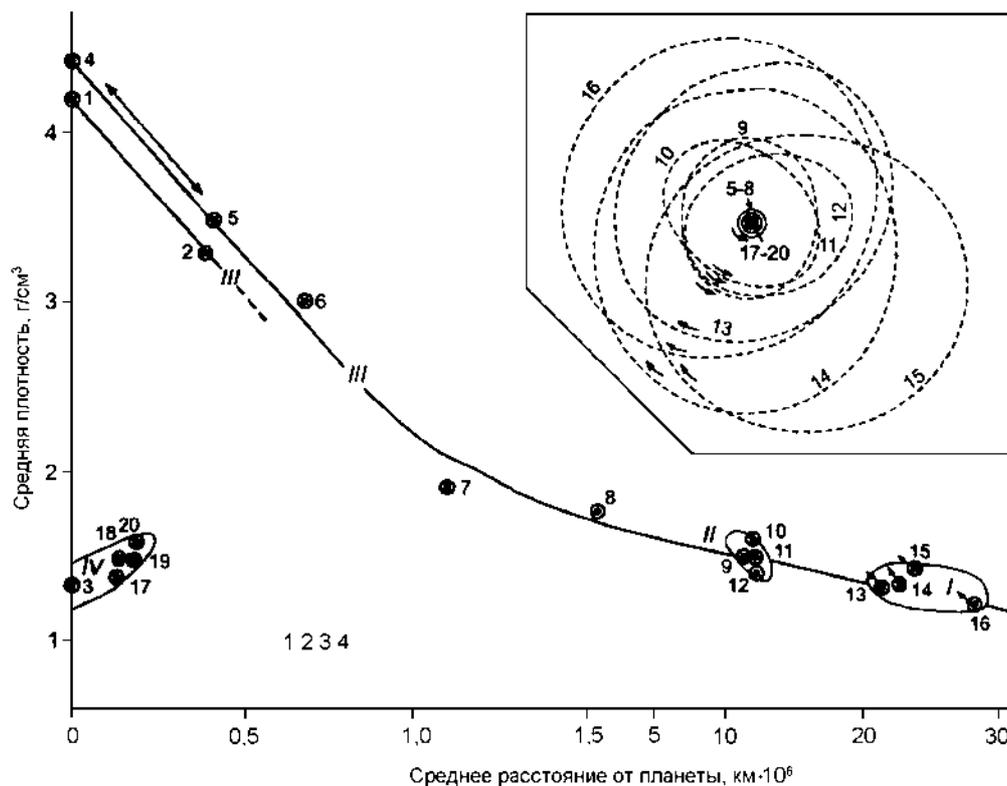


Рис. 1.32. Диаграмма распределения плотности в системе Земля-Луна и ядро Юпитера – его спутники в зависимости от удаленности спутников от материнских планет (средних радиусов орбит)

1 – Земля (плотность Земли (1) и ядра Юпитера (4) пересчитаны на нулевое давление; 1 и 2 – Земля и Луна; 3-5 – Юпитер (3), его железо-силикатное расплавленное ядро (4) и ближайший спутник Ио (5); 6-20 – другие спутники Юпитера, рассматриваемые в тексте (табл. 1.7). Направление движения спутников обозначено на схеме их орбит стрелками. I-IV – группа спутников в предполагаемой последовательности их образования: I-II – удаленные спутники с обратным (I) и нормальным (II) движением по орбитам, III-IV – околопланетные массивные плотные спутники (III) и спутники низкой плотности, обрамляющие кольцевую систему планеты (IV)

($4.22 \cdot 10^5$). В этом ряду плотность спутников (г/см^3) последовательно возрастает: 1.8 – 1.9 – 3.1 – 3.5, приближаясь к плотности ядерного железо-каменного вещества планеты (около 4.5 г/см^3 при приведении его к нулевому давлению). Корреляция наглядно отражает взаимосогласованность образования тяжелого железо-каменного ядра и массивных плотных спутниковых планет, генетически связанных с общим процессом развития флюидно-силикатной неомородности в их недрах.

Образованию плотных галилеевых спутников Юпитера предшествовала длительная история порождения этой планетой легких спутников, относящихся к периферии спутниковой системы групп I (с обратным обращением вокруг планеты) и II (с прямым нормальным обращением). Небольшая их средняя плотность свидетельствует о том, что неомородность флюидной оболочки Юпитера вначале создавалась развитием водородно-водной жидкостной несмешиваемостью в динамике его очень быстрого (обратного и затем прямого) вращения.

Т а б л и ц а 1.7. Планеты Солнечной системы и их спутники различных генетических групп (I-IV)

Группа	Номер на рис. 1.32	Планеты и их спутники	Плотность, г/см ³	Расстояние от планеты, км·10 ⁶
	1	Земля	(4.25)	
III	2	Луна	3.34	0.38
	3	Юпитер	1.33	
	4	Ядро Юпитера	(4.45)	
III	5	Ио	3.53	0.422
	6	Европа	3.04	0.671
	7	Ганимед	1.93	1.070
	8	Каллисто	1.79	1.880
II	9	Леда	(1.5)	11.1
	10	Гималия	(1.6)	11.5
	11	Лиситея	(1.5)	11.7
	12	Элара	(1.4)	11.74
I	13	Ананке	(1.3)	20.7
	14	Карме	(1.3)	22.35
	15	Пасифе	(1.4)	23.30
	16	Синопе	(1.2)	27.70
IV	17	Адрастея	(1.4)	0.13
	18	Метида	(1.5)	0.13
	19	Теба	(1.5)	0.18
	20	Амальтея	(1.6)	0.18

П р и м е ч а н и е. В скобки заключены приблизительно вычисленные значения.

Плотность спутниковых I, II и III групп постепенно возрастала и достигла максимального значения у спутника Ио (3.53 г/см³), относительная молодость которого доказывается его современной вулканической активностью и наличием собственного магнитного поля. «Вояджер-1» открыл 4 марта 1979 года на Ио восемь действующих вулканов. Они, за исключением одного, оставались активными четыре месяца спустя при пролете «Вояджера-2». Необычайно сильная эксплозивная активность вулканизма характеризуется выбросами пирокластического материала на высоту 70–280 км над поверхностью планеты.

С переходом к современному состоянию скорость вращения Юпитера, пройдя через максимум, снизилась настолько, что он мог породить только легкие спутники группы IV, разрушающиеся в пределах Роша с образованием колец обломочного материала.

Сопоставление рассмотренной спутниковой системы Юпитера со спутниковыми системами других планет-гигантов (Сатурна, Урана и Нептуна) выявляет их аналогичное развитие с образованием легких спутников на удаленных от планеты орбитах. Однако в отличие от Юпитера, они, как планеты, обладающие несравненно меньшими флюидными оболочками, могли породить в аналогичной последовательности I – II – III только более легкие, чем у Юпитера, спутники с максимумом плотности, приходящимся в системе Нептуна на Тритон (плотность 2 г/см³), в системе Урана на Титанию (1.7 г/см³) и в системе Сатурна на Титан (плотность 1.9 г/см³, диаметр 5150 км), после чего Сатурном порождались только легкие спутники группы IV и связанные с ними кольца обломочного материала, которые у этих пла-

нет отличаются плотным сложением. Несовершенство спутниковых систем Сатурна, Урана и Нептуна, отличающихся от Юпитера отсутствием у них плотных спутников, объясняется небольшими размерами их флюидных оболочек, возрастающих в последовательности (диаметр, км·10⁵): 0.49 (Нептун) – 0.52 (Уран) – 1.20 (Сатурн) – 1.43 (Юпитер).

Таким образом, плотные галилеевы спутники (Ио, Европа, Ганимед) могли порождаться только Юпитером, благодаря наличию у него поистине гигантской флюидной оболочки. Этот вывод о зависимости спутниковых систем планет от размера их флюидных оболочек имеет прямое отношение к проблеме происхождения Луны, которая является аналогом планеты Ио по размеру и средней плотности. Следовательно, она могла порождаться Протоземлей, сопоставимой по размеру с Юпитером. На рассмотренной диаграмме наглядно выражена аналогия систем Земля-Луна и железо-силикатное ядро Юпитера-спутниковая планета Ио.

К сложившимся к настоящему времени уникальным особенностям Земли относится и то, что она имеет необычайно древний спутник Луну, вулканическая активность которой происходила в период 4.6-3.2 млрд лет. Этим Луна принципиально отличается от более молодых спутников планет Солнечной системы. На ее ближайшем аналоге по размеру и плотности вещества – планете Ио (спутнике Юпитера) грандиозный эксплозивный вулканизм продолжается и в настоящее время. И тем не менее, образование всех спутников планет Солнечной системы (в том числе и Луны) происходило единообразно, путем отделения под действием центробежных сил флюидных расплавленных масс от гигантских оболочек планет благодаря их быстрому вращению. Однако спутники такой высокой плотности, как Луна и планета Ио (3.3-3.5 г/см³), могли порождаться только планетами размером не меньше Юпитера. Поэтому само существование у Земли такого плотного спутника раскрывает специфику ее протопланетного развития, когда она обладала гигантской гелий-водородной оболочкой, превышающей оболочку Юпитера и была способна породить ее спутниковую и кольцевую системы, в которые отошла часть ее силикатного материала.

Несмотря на возрастное отличие, Луна как бы вписывается в систему галилеевых спутников Юпитера по плотности (в г/см³) и моменту инерции (Куртийо, 1990; Anderson et al., 1995) – гравитационной безразмерной характеристике, отражающей внутреннюю расслоенность спутников (в скобках): Ио – 3.53 (0.38), Луна – 3.34 (0.39), Европа – 3.03 (0.34), Ганимед – 1.94 (0.31), Каллисто – 1.8.

Соответствие систем Луна-Земля и Ио-силикатное ядро Юпитера указывает на их сходное происхождение. Аналогично ядру Юпитера Земля первоначально выделялась в своей материнской протопланете как тяжелое ядро благодаря развитию в ней водород-железо-силикатной жидкостной несмешиваемости. Отделение ядра сопровождалось образованием быстро вращающейся гигантской флюидной оболочки. Под действием центробежных сил массы флюидно-силикатных расплавов отделялись от гигантской оболочки Протоземли, в последовательности I-II-III-IV (см. рис. 1.32), формируя ее спутниковую систему, в которой Луна занимала такую же позицию (III), как Ио в системе Юпитера.

Соотношение между гравитационными и центробежными силами определило железо-силикатное распределение вещества между тяжелым хондритовым ядром Протоземли (будущей Землей) и более легкими спутниками (ахондритовой Луной и др.). Спутники при отделении от материнских планет

консолидировались с поверхности, приобретая эндогенную активность в результате возрастания флюидного давления в их недрах. Недостаточно консолидировавшиеся спутники подверглись под действием этого давления эксплозивному разрушению, давая начало метеоритам планетоцентрического типа, которыми обусловлены метеоритные кратеры на поверхности спутников и их фрагментов в пределах всей Солнечной системы. С потерей Протоземлей флюидной обложки она превратилась в железо-каменную планету (Землю), у которой сохранилась только Луна, остальные же спутники отошли в поле астероидов, образовав в нем семейство Аполлона. На рис. 1.33 проводится фотография одного из астероидов этого семейства. Спутники Земли, разрушавшиеся на удаленных орбитах, были источником метеоритов, в изобилии падавших на Луну. Они, а не сама Луна, порождали так называемые «лунные метеориты», собранные в Антарктиде.

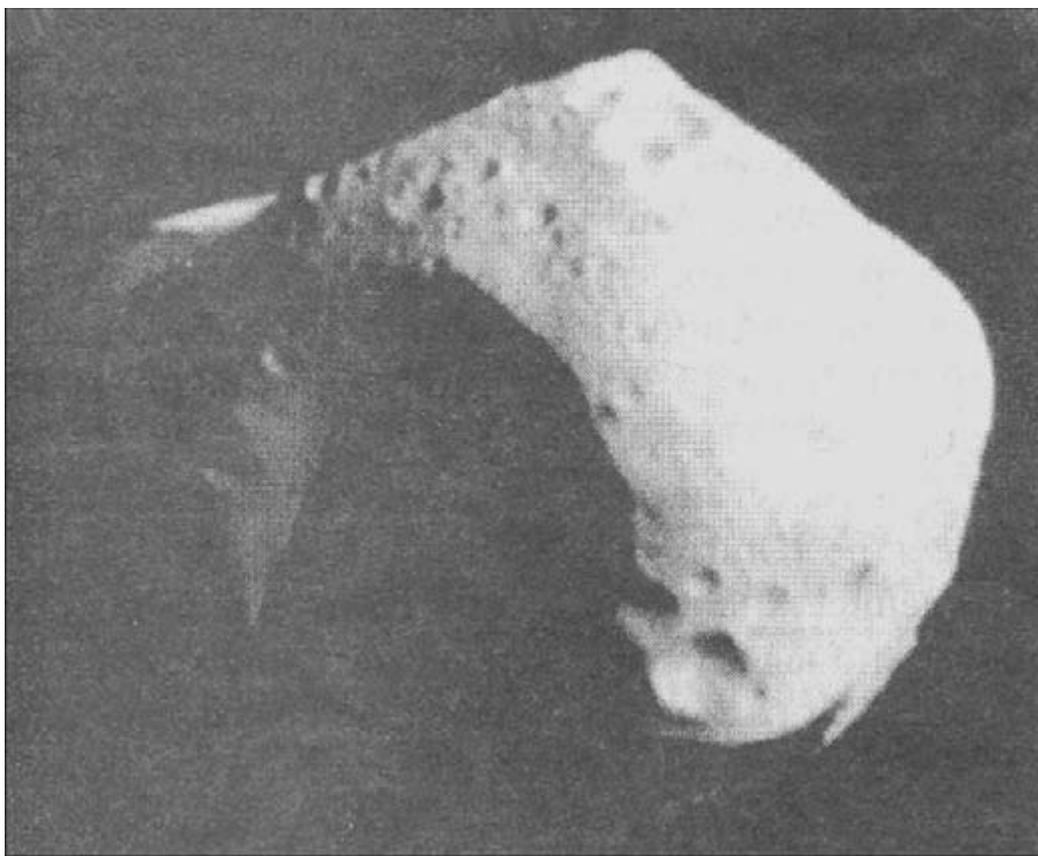


Рис. 1.33. Космический снимок околоземного астероида Матильда (Schneider, 1997) – вероятного обломка распавшегося спутника Земли, содержащего на поверхности множество кратеров от падений планетоцентрических метеоритов

В аналогичной Земле ситуации протопланетное развитие Марса характеризовалось развитием системы его спутников, подвергавшихся взрывному распаду. Следы падения их обломков в виде ударных кратеров сохранились на поверхности не только самого Марса, но и на двух небольших фрагментах его спутников – Фобосе (рис. 1.34) и Деймосе, которые он был в состоянии удержать на собственно планетной стадии развития (после потери Протомар-

сом гигантской флюидной оболочки). Главная масса спутников Марса, отчасти унаследовав его орбиту, отошла в пояс астероидов, образовав в нем самостоятельное семейство Амура. Возможно, что именно он служит источником так называемых марсианских SNC метеоритов-шерготтитов, наклитов и шассиньитов, имеющих относительно молодой возраст (1.0-1.3 млрд лет), что принципиально отличает их от лунных пород и метеоритов. В табл. 1.8 приводится их состав (Сидоров, Золотов, 1989).

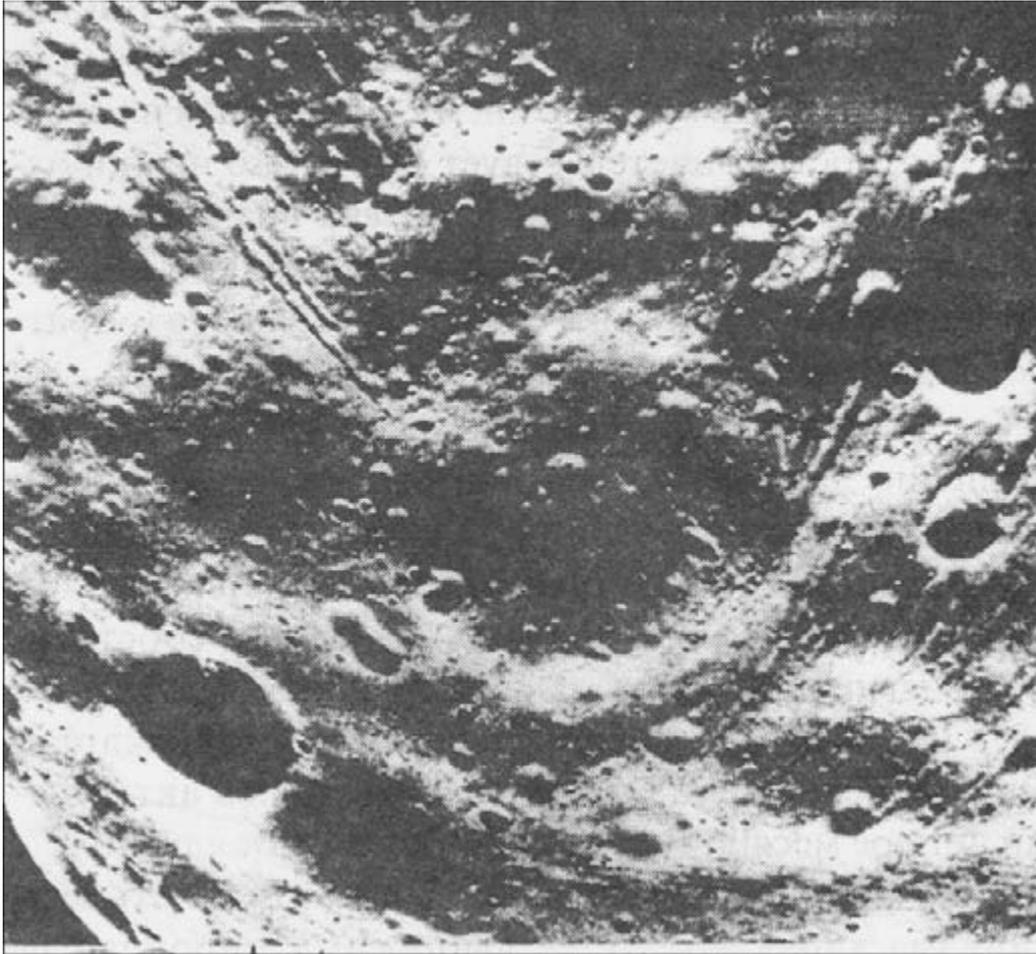


Рис. 1.34. Фрагмент поверхности Фобоса (обломочного спутника Марса) размером 9,5 км. Видны ударные кратеры и борозды, образованные падением планетоцентрических метеоритов (Уиппл, 1984; с. 220)

Хотя у планет земной группы сохранились только реликты их спутниковых систем (Луна, Фобос, Деймос), можно полагать, что именно отделение спутников на протопланетной стадии их развития было главным фактором, определившим их химический состав. В наибольшей мере это влияние отделения спутников проявилось у Меркурия. Меркурий полностью потерял спутниковую систему, от которой не сохранилось даже реликтового семейства астероидов. Между тем можно полагать, что у Протомеркурия (ближайшей к Солнцу планеты) была наиболее развитая спутниковая система. В потерянные спутники Меркурия отошла значительная доля силикатного мате-

риала его системы. Об этом можно судить по аномально высокой средней плотности Меркурия, представляющего собой никель-железную планету с маломощной силикатной оболочкой. В целом же планеты земной группы по возрастанию величины $Fe/(Fe+горные\ породы)$ (Витязев и др., 1990) образуют ряд: Марс (0.3), примерно соответствует Солнцу, – Венера (0.35) – Земля (0.4) – Меркурий (0.6). В этой последовательности все большая доля флюидно-силикатного (относительно легкого) вещества отходила в спутники, что определялось скоростью вращения флюидных оболочек протопланет, связанной с импульсами формирования тяжелых железо-каменных расплавных ядер.

Таблица 1.8. Химический состав лунных дунитов и составляющих их минералов (мас. %, приведенные к 100): оливина (Ol), хромита (Spl), ортопироксена (Orx), клинопироксена (Cpx) и плагиоклаза (Pl)

Оксиды	Дуниты			Ol	Spl	Orx	Cpx	Pl
SiO ₂	38.25	40.39	37.41	40.04	0.04	56.51	53.94	44.77
TiO ₂	-	-	-	0.02	1.05	0.28	0.11	0.01
Al ₂ O ₃	4.00	0.55	0.41	0.01	16.70	0.97	1.22	34.99
Cr ₂ O ₃	0.20	0.83	0.12	0.04	51.78	0.26	1.11	-
FeO	11.40	11.76	11.50	12.23	19.26	7.00	2.70	0.14
MnO	0.11	0.11	0.12	0.13	0.58	0.15	0.11	-
MgO	43.00	45.76	50.00	47.40	10.59	32.56	18.34	0.23
CaO	3.00	0.60	0.44	0.13	-	2.26	22.42	19.24
Na ₂ O	0.04	-	-	-	-	0.01	0.05	0.62

Динамика развития в прошлом системы Протоземля-Луна, подобно системе Юпитер-Ио, отражают данные о современном строении Луны, тяжелые ядерно-мантийные массы которой смещены в сторону Земли, так что лунная кора имеет меньшую мощность (60 км) на видимой стороне Луны по сравнению с обратной стороной (80 км), как показано на схеме (рис. 1.35). Такая специфика расслоенности Луны могла возникнуть лишь под влиянием сильного, чем современное земное гравитационного поля Протоземли, сходного с полем Юпитера. Такое сильное поле было способно не только определить специфику первичного расслоения Луны, но и вызвать одностороннюю дегазацию лунных недр, определившую размещение на видимой стороне ее вулканических депрессий (лунных морей). Эта самая древняя в Солнечной системе «океанизация» первичной коры, обусловленная внедрением в мощную эвкритовую кору Луны гипербазитовых мантийных масс (рис. 1.36), сопровождаемым образованием вулканических депрессий на ее поверхности. В результате мощность коры сокращается с 60 км до 20 км в наиболее развитых лунных морях. Внедрение гипербазитов в первичную лунную кору фиксируется аномалиями силы тяжести (масконами), свойственными этим структурам. Оно происходило путем замещения эвкритовой коры гипербазитовыми расплавами, что естественно сопровождалось флюидным выносом силикатного материала (аллохимический метаморфизм или метасоматоз на фронте магматического замещения), что и служило причиной сокращения мощности коры и кольцевого проседания лунной поверхности, создающего морфологическое своеобразие лунных морей (рис. 1.37) – огромных плоских (блюдецобразных) структур. Морфологически они принципиально отличаются от небольших чашеобразных метеоритных кратеров, усиливающих гористую по-

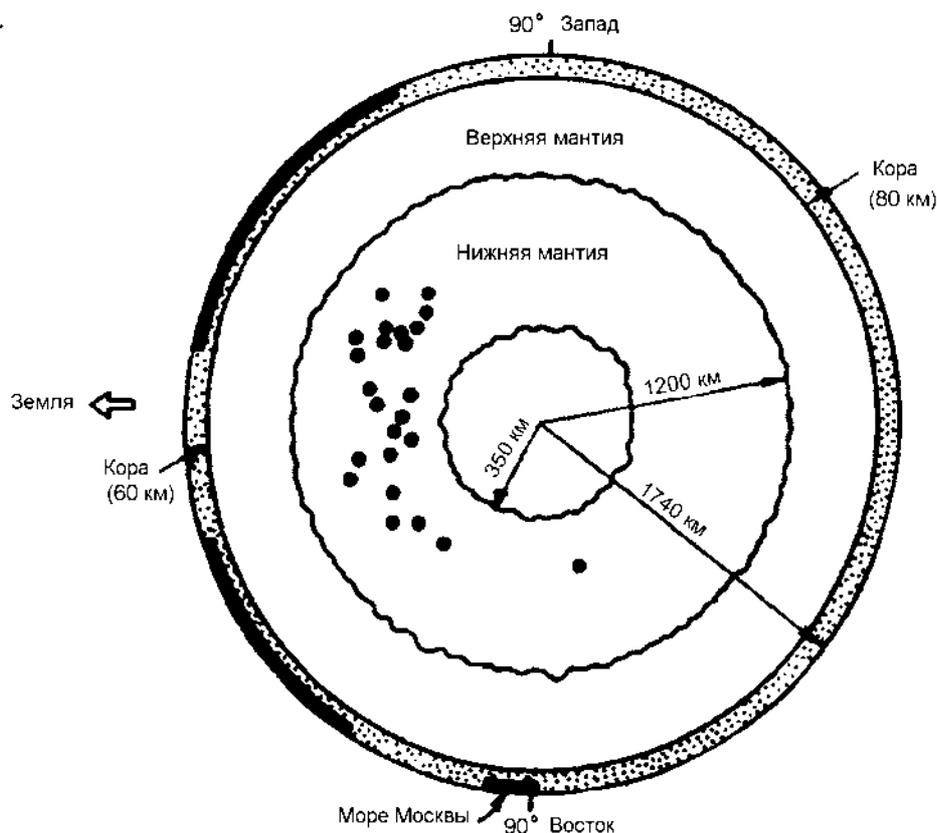


Рис. 1.35. Схема строения Луны (Уиппл, 1984).

Черным цветом на лунной коре обозначены вулканические депрессии (моря), черными точками в нижней мантии обозначены очаги лунотрясений (слабых потрескиваний)

верхность распространения древнейшей формации Луны, и более редко встречающихся в более молодых вулканических депрессиях.

Древнейшие возвышенные структуры на Луне сложены очень богатыми плагиоклазом (анортитом, битовнитом) вулканическими породами, находящимися большей частью в обломочном состоянии (в виде реголита) и представляющими собой древнейшие дифференциаты лунного вещества. Ниже приводится их средний состав (мас. %) в сопоставлении со средним составом Луны (в скобках): SiO_2 — 45 (42), TiO_2 — 9.6 (0.4), Al_2O_3 — 27 (8), FeO — 7 (12), MgO — 9 (31), CaO — 14 (6), Na_2O — 0.4 (0.1). Это сопоставление отражает характер первичного расслоения Луны, ядро которой (в противоположность обедненным железом породам внешней оболочки) сконцентрировало в себе основную массу железа и водородных флюидов. С расплавленным состоянием этого ядра и выходящими из него водородными потоками связывается вулканизм Луны, особенно эксплозивный в начале ее эндогенной активности (4.6-3.2 млрд лет).

Лунные породы представлены полным рядом составов от почти чисто плагиоклазовых (микроанортозитов) через пироксен-плагиоклазовые до пироксеновых, богатых железом и титаном (микрпироксенитов), причем богатые плагиоклазом породы доминируют на возвышенных областях лунной поверхности, а пироксеновые породы тяготеют к депрессиям. В вулканические

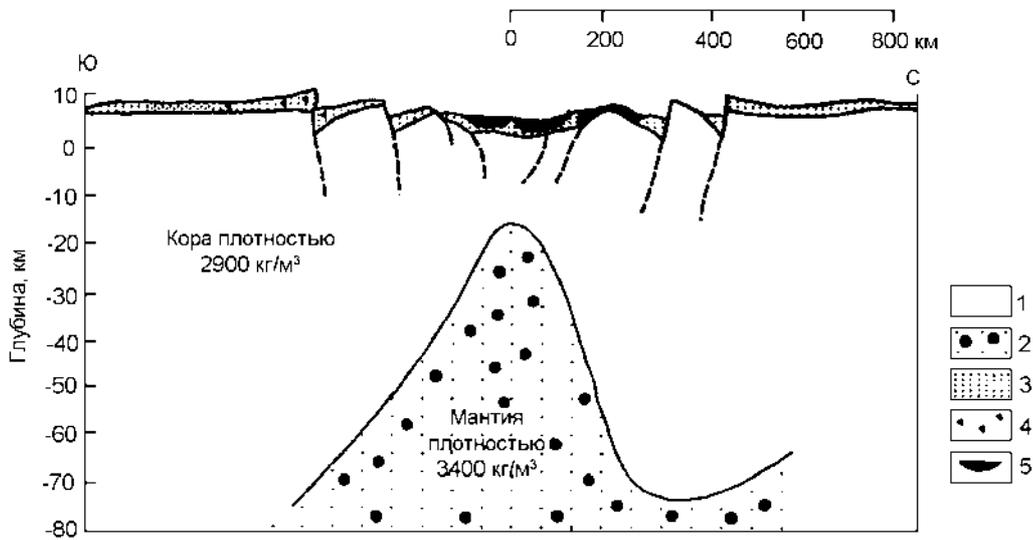


Рис. 1.36. Структура многокольцевой вулканической деятельности Моря Восточного на Луне (Мелosh, 1994)

1 – первичная лунная кора; 2 – ультраосновная мантия; 3 – пирокластический материал; 4 – брекчии; 5 – базальтовые покровы. Вертикальный масштаб увеличен в 10 раз, чтобы показать кольцевые уступы и нагляднее отразить сокращение мощности коры в вулканических депрессиях за счет внедрения ультраосновного вещества мантии, которое на поверхности фиксируется аномалией силы тяжести (масконом)

комплексы входит небольшое количество кислых дифференциатов. Характерно обилие стекол, представленных вулканическим пеплом, микролапил-

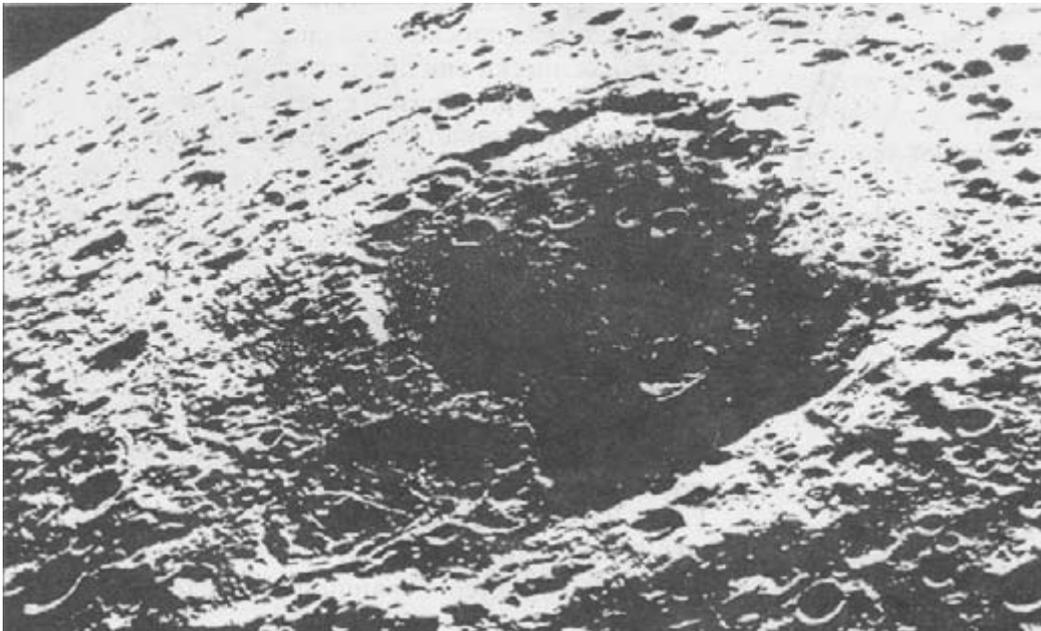


Рис. 1.37. Вулканическая депрессия диаметром 350 км (море Москвы) на обратной стороне Луны вблизи ее восточной окраины (см. рис. 1.35), содержит редкие метеоритные кратера, отличаясь в этом отношении от окружающей более древней формации, усеянной метеоритными кратерами (Уиппл, 1984; с. 129)

лями (стеклянными шариками) и потоками, причем остаточное стекло обычно входит во все в той или иной мере раскристаллизованные лунные породы. Изредка встречаются никель-железные (камаситовые) капли, иногда с сульфидными оторочками.

Таблица 1.9. Состав (ат. % металлов) пород Луны по петрохимическим типам I-VI

Тип	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	P
I	33.91	-	1.68	8.06	55.23	1.02	0.05	-	0.05
	38.06	0.05	21.68	3.78	25.25	10.81	0.32	0.05	-
II	40.90	-	38.51	0.38	0.28	18.98	0.06	-	-
	41.10	0.06	36.93	0.94	1.72	18.35	0.78	0.06	0.06
	42.02	0.22	31.24	3.34	6.06	16.23	0.72	0.11	0.06
	41.93	0.23	29.42	4.31	8.17	15.04	0.78	0.06	0.06
	45.22	0.78	18.81	6.64	16.35	10.26	1.23	0.44	0.27
	43.95	0.77	19.11	7.29	16.68	10.22	1.32	0.44	0.22
	44.28	1.07	18.69	8.97	14.29	10.73	1.24	0.45	0.28
48.71	1.61	16.69	8.57	1.69	9.96	1.38	0.81	0.58	
III	41.77	0.86	10.82	16.63	19.33	10.13	0.46	-	-
	43.47	1.74	10.52	18.38	15.01	10.24	0.52	0.06	0.06
	45.13	2.39	14.56	14.79	9.67	12.06	1.22	0.06	0.12
	45.03	1.57	10.83	17.53	13.68	10.66	0.58	0.06	0.06
	43.38	3.34	11.60	17.17	12.43	11.31	0.59	0.06	0.12
IV	39.33	8.80	11.32	15.93	11.86	11.86	0.78	0.06	0.06
	40.76	7.70	12.61	16.07	10.43	11.52	0.79	0.06	0.06
	40.21	8.80	10.65	16.22	11.25	11.31	1.02	0.42	0.12
V	54.90	0.51	20.65	4.44	4.66	8.93	2.27	3.64	-
	59.58	0.51	12.41	7.63	8.88	4.16	2.33	4.50	-
	67.89	0.66	11.92	5.81	2.28	5.21	1.50	4.31	0.42
VI	71.15	0.47	13.64	1.11	0.99	1.46	2.63	8.43	0.12
	70.98	0.23	14.08	1.84	0.11	1.26	0.98	10.52	-
	70.75	0.40	14.08	1.78	0.11	1.90	1.67	9.25	0.06
	72.50	0.17	13.87	2.47	0.29	0.52	0.98	9.20	-

Лунные породы представлены вулканическими образованиями как существенно раскристаллизованными, так и стекловатыми. Они схематически подразделяются на шесть типов (I-VI), представленных в табл. 1.8 и 1.9 в атомных процентах металлов и на петрохимической диаграмме (рис. 1.38) по сводкам многих исследователей. Стрелками на диаграмме намечена петрохимическая модель развития лунного магматизма. Начало его связано с базит-гипербазитовым расслоением исходных эвкритовых магм, признаки которого усматриваются в находках округлых дунитовых выделений в брекчиевидных богатых плагиоклазом породах, окруженных реакционными каймами пироксена и непрозрачных минералов (рис. 1.39) и пироксен-оливиновых капель (рис. 1.40). Кристаллизация плагиоклаза, близкого по составу к анортиту была, по-видимому, ведущим процессом образования обозначенного на диаграмме тренда накопления в расплавах железа и титана (II-III-IV). Однако, этот процесс осложнялся развитием жидкостной несмесимости в остаточных расплавах. Об этом можно судить по бимодальности стекловатых пород, богатых нормативным плагиоклазом (рис. 1.41), соответствующей группам II-

III, и по структурам жидкостной несмесимости, характерным для лунных пород (III-V и IV-VI). Среди стекол преобладают богатые нормативным плагиоклазом (I), соответствующие микроанортозитам и лейкократовым долеритам. В микролапиллях (стекловатых шариках) они нередко находятся в тонкой перемежаемости со стеклами, богатыми пироксеновыми миналами, так что в пределах отдельной стеклянной микросферулы могут охватываться составы почти всех главных типов лунных пород. Многие пепловые стекловатые частицы лунного реголита восстановлены с краев, вплоть до металлического состояния не только железа, но и кремния, алюминия, кальция, что отражает специфику эксплозивных извержений в глубокий вакуум, господствующий на лунной поверхности.

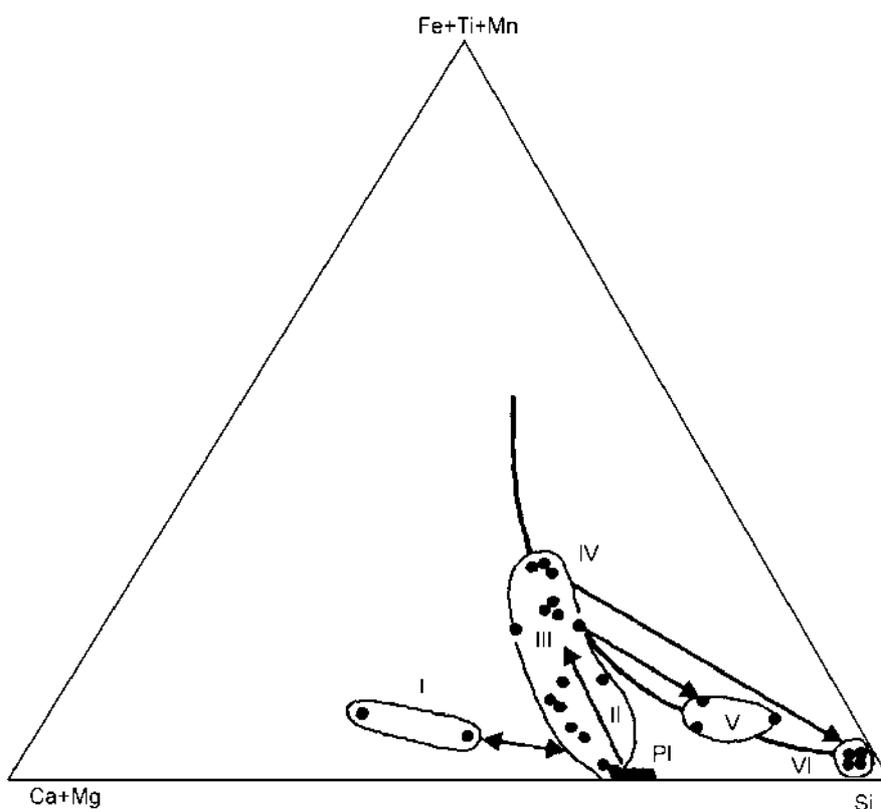


Рис. 1.38. Петрохимическая диаграмма лунных пород (по табл. 1.9).

Стрелками намечена их петрогенетическая схема: базит-гипербазитовое расщепление исходной магмы (I-II), ее кристаллизационная дифференциация (II-III-IV), отщепление кислых, богатых калием расплавов III-IV и IV-VI

В лунных депрессиях базальты ассоциируют с магнезиальными стеклами как бедными титаном (зелеными), так и титанистыми (оранжевыми). В стеклах, очень богатых железом (ферробазальтовых), находящихся в интерстициях между кристаллами пироксенов и плагиоклаза, обычны структуры жидкостной несмесимости, выражающиеся наличием в них мельчайших каплевидных выделений светлого стекла богатого калием (рис. 1.42). Это проливает свет на механизм образования кислых стекол Луны (группы V, VI), резко отличающихся по составу от стекол главной магматической серии (II-IV).

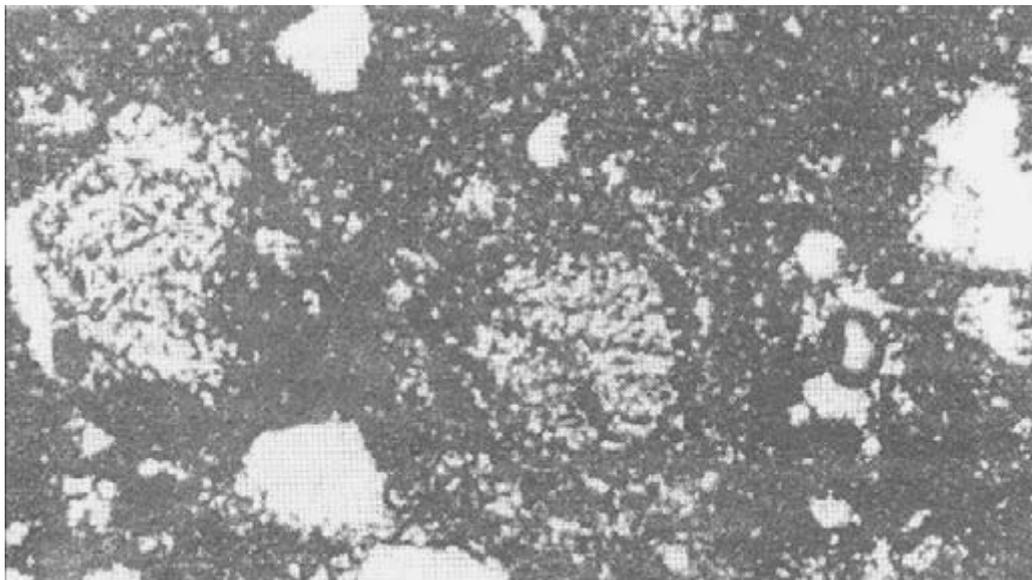


Рис. 1.39. Округлое выделение дунита с каймой пироксена и непрозрачного минерала в брекчиевидной, богатой плагиоклазом породе, Аполлон-14 (Кинг, 1979)

Кристаллические лунные породы, составы которых представлены в табл. 1.9 и на диаграмме (см. рис. 1.38), петрохимически аналогичны стеклам, и только составы интерстиционных ферробазальтовых стекол не имеют аналогов в ряду кристаллических пород. Как и стекловатые образования, раскристаллизованные породы представлены эвкритовой серией образований, крайне бедных щелочными металлами, содержащие в своем составе плагиоклаз, близкий к анортиту, а также оливины и пироксены с широким размахом железистости в зональных кристаллах, ильменит, металлическое железо. Кислые породы (V, VI) входят в комплексы с лунными породами главного ряда в ничтожном количестве.

Сходные с лунными породами метеориты, были обнаружены во льдах Антарктиды (Warren, 1990; Yanai, Kojima, 1990). Сходство их с лунными породами определяется аналогией их минерального состава по темноцветным минералам и плагиоклазу, близкому к анортиту (An_{88-98}), абсолютному возрасту (2.8-4.6 млрд лет) и изотопам кислорода.

Богатые плагиоклазом метеориты параллелизуются с пирокластическими лунными породами, слагающими возвышенные области лунной поверхности, а богатые пироксеном метеориты больше похожи на породы вулканических депрессий. Среди них встречаются обломочные и массивные типы. Некоторые исследователи считают их прямыми выбросами пород с поверхности Луны в результате сильных метеоритных ударов. По нашему мнению они родственны планетоцентрическим метеоритам, являясь обломками подобных Луне других спутников Земли, которые унаследовали ее орбиту, образовав вдоль нее множество астероидов (обломков спутников), которые объединяются в генетическую группу (семейство) Амура.

Огромные базальтовые депрессии на лунной поверхности (моря) по морфологии и специфике распределения метеоритных кратеров сходны с аналогичными образованиями, наблюдаемыми на других планетах земной группы. Например, на Марсе, на сильно кратеризованной примитивно разви-

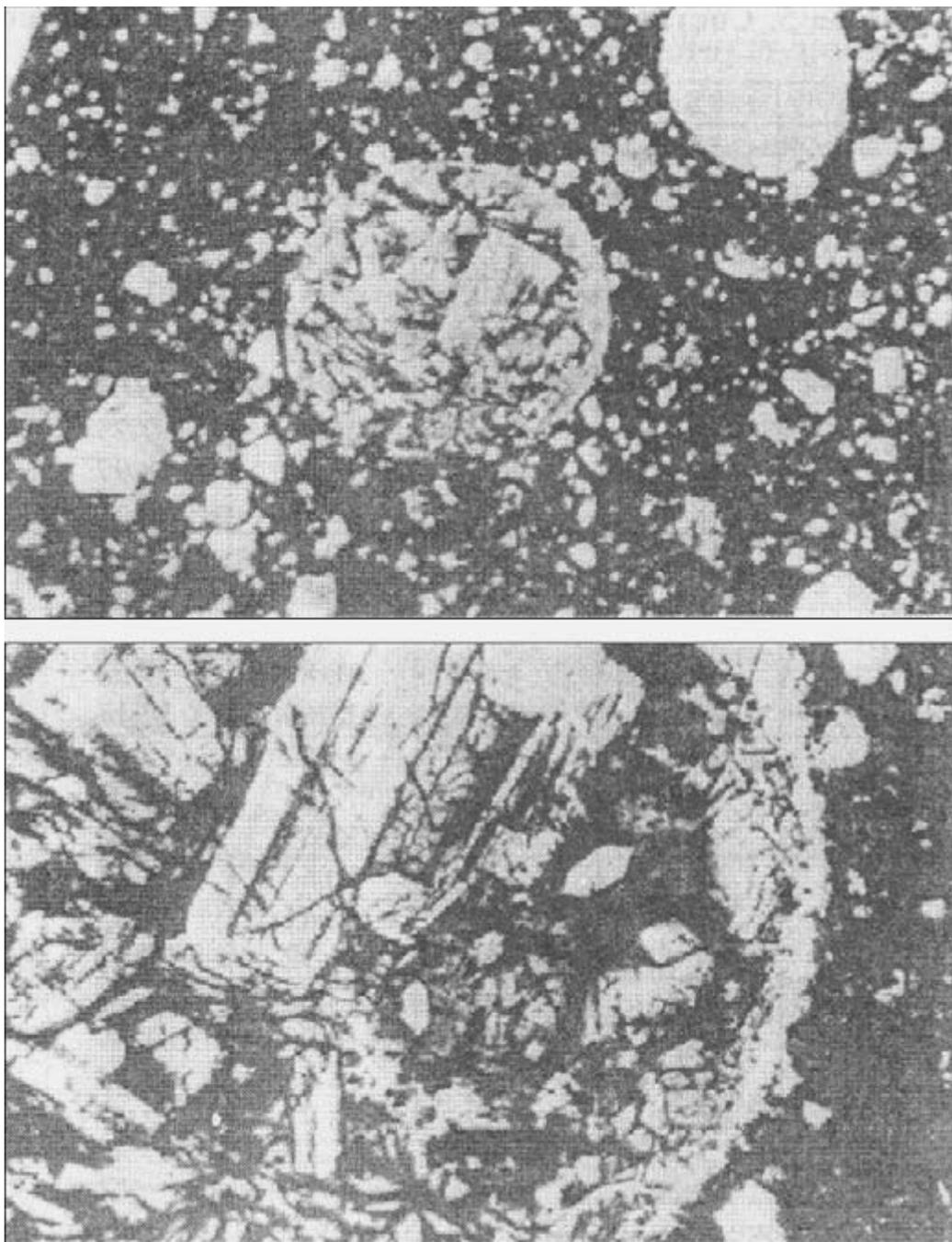


Рис. 1.40. Капля диаметром 0,8 мм ультраосновной породы, состоящей из ортопироксена и оливина в буре прозрачном стекле из образца № 14 313, сборки «Аполлона-14». В стеклянном шарики в правом верхнем углу на верхнем снимке нет слоев девитрификации или кристаллизации. Нижний снимок – увеличенная фотография верхнего снимка (Кинг, 1979)

той поверхности распространения древней формации его южного полушария выделяются огромные базальтовые депрессии, значительно превышающие по размеру лунные. Пример их показан на рис. 1.43, заимствованный из работы

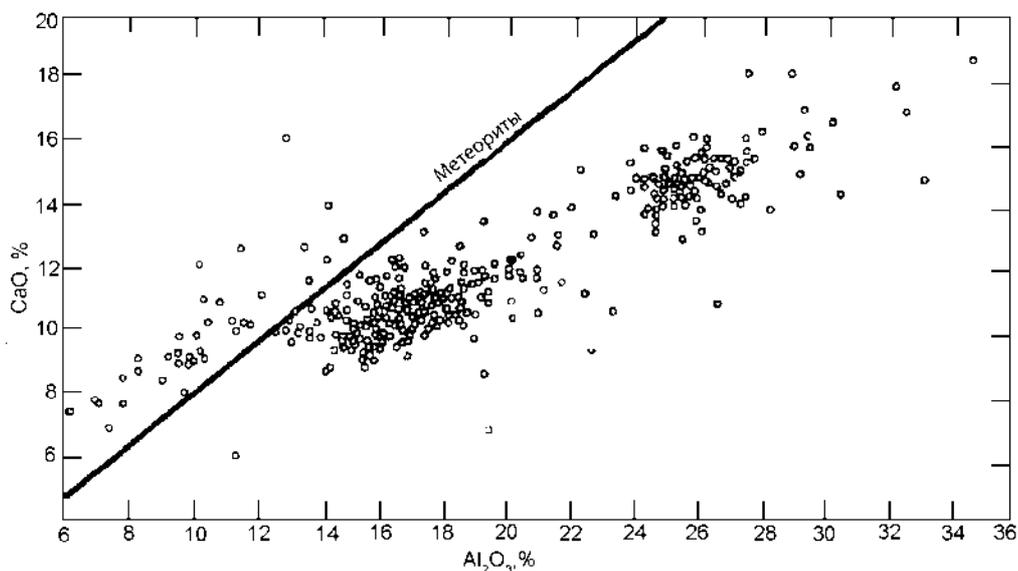


Рис. 1.41. Бимодальная стекловатая порода на графике зависимости содержания CaO (в мас. %) от содержания Al_2O_3 с места посадки «Аполлона-14». Черная точка – средний состав

(Сидоров, Залетов, 1989). Процесс такого преобразования первичной коры продвинулся на Марсе дальше, чем на Луне и помимо кольцевых морских структур на нем образовалась огромная равнинная северная территория (рис. 1.44), обладающая присущими морям особенностями, но по грандиозности распространения соответствующая океанической структуре, занимающей почти все северное полушарие Марса. Как было установлено А.А. Баренбаумом, плотность кратеров на Марсе, как и на Меркурии, максимальна в экваториальной области, что может служить дополнительным подтверждением планетоцентрического характера падавших на него метеоритов, особенно обильных на начальных этапах формирования марсианской поверхности. Поэтому на Марсе, как и на Луне, по густоте метеоритных кратеров различаются древнейшие и более молодые формации горных пород. В работах А.А. Баренбаума проводится разделение древних и молодых формаций на Марсе четкой границей, делящей эту планету как бы на две полусферы – древнюю пассивную (Р) и молодую «активную» (А). «Рельеф пассивного старого полушария характеризуется наличием большого числа кратеров и практически идентичен континентальным областям Луны» (Баренбаум, в печати, с. 13), а рельеф слабо кратеризированного молодого полушария (А), аналогичен лунным и марсианским морям. На рис. 1.44 это фундаментальное разделение полусфер Марса представлено в схематизированном варианте, предложенном А.А. Баренбаумом, но в специальных работах (Сидоров, Залетов, 1989; Никишин, 1987 и др.) приводится ее разделение на равнины – Великая Северная, Утопия, Ациделийская, Аркадия, Амазения и др.

Выявление Северной океанической области на Марсе имеет огромное познавательное значение, позволяя по аналогии с Марсом судить о формировании первичного океана на Земле. Можно полагать, что аналогичным образом, начиная с Северного полушария, на Земле формировалась сплошная океаническая кора путем развития на ней грандиозного вулканизма, характеризующегося щелочным уклоном и сопряженного с крупными воздыманиями

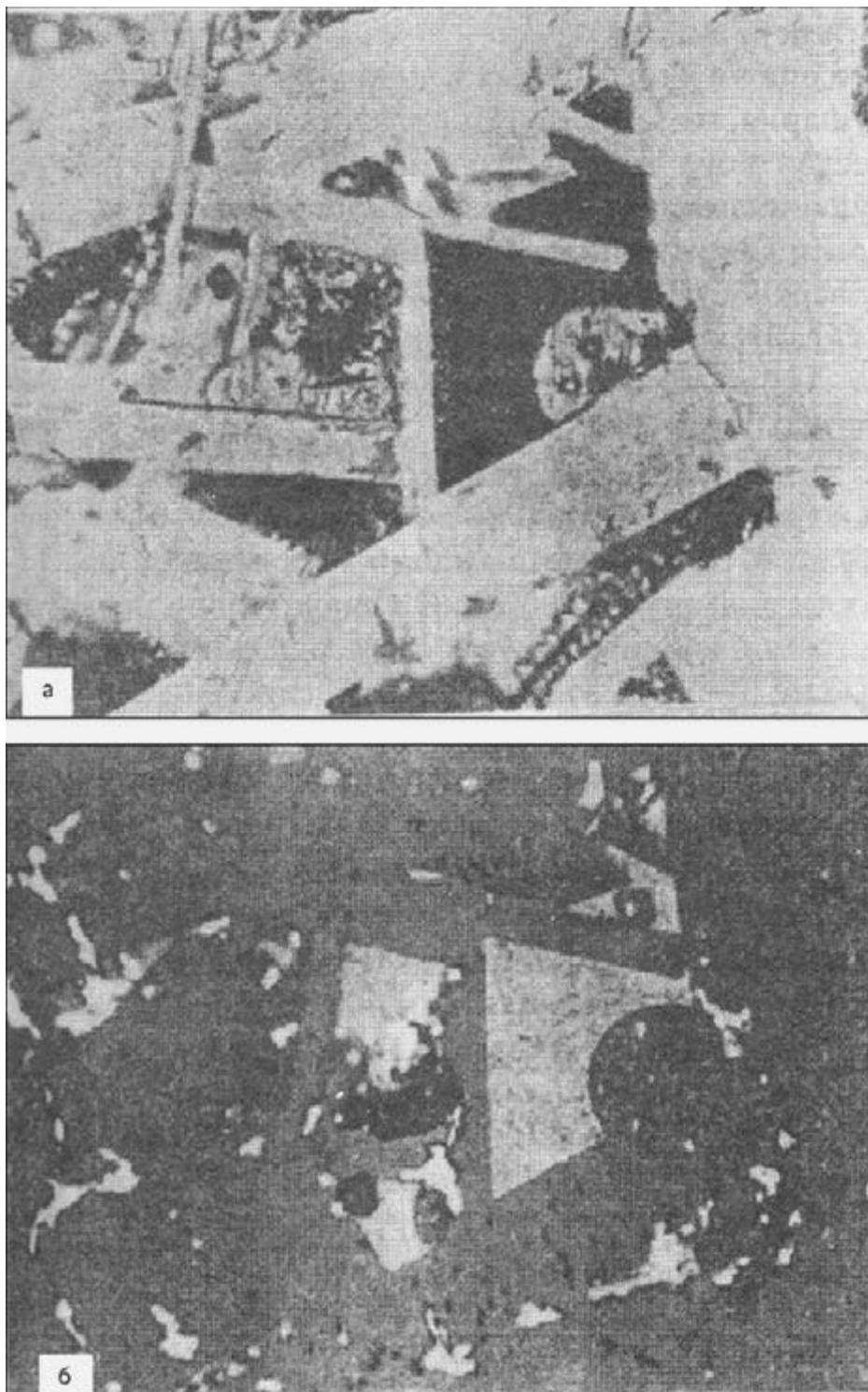


Рис. 1.42. Структура жидкостной несмешиваемости в остаточном расплаве между лейстами плагиоклаза в лунной породе (Кинг, 1979)
а – в проходящем свете; б – в отраженном свете. Шарик расплава, обогащенного кремнеземом, содержит несколько игольчатых кристаллов и стекло, а в сопутствующем расплаве, обогащенном железом, при кристаллизации образовались различные минеральные фазы. Минеральный размер включений расплава, обогащенного кремнеземом, составляет примерно 30 мкм

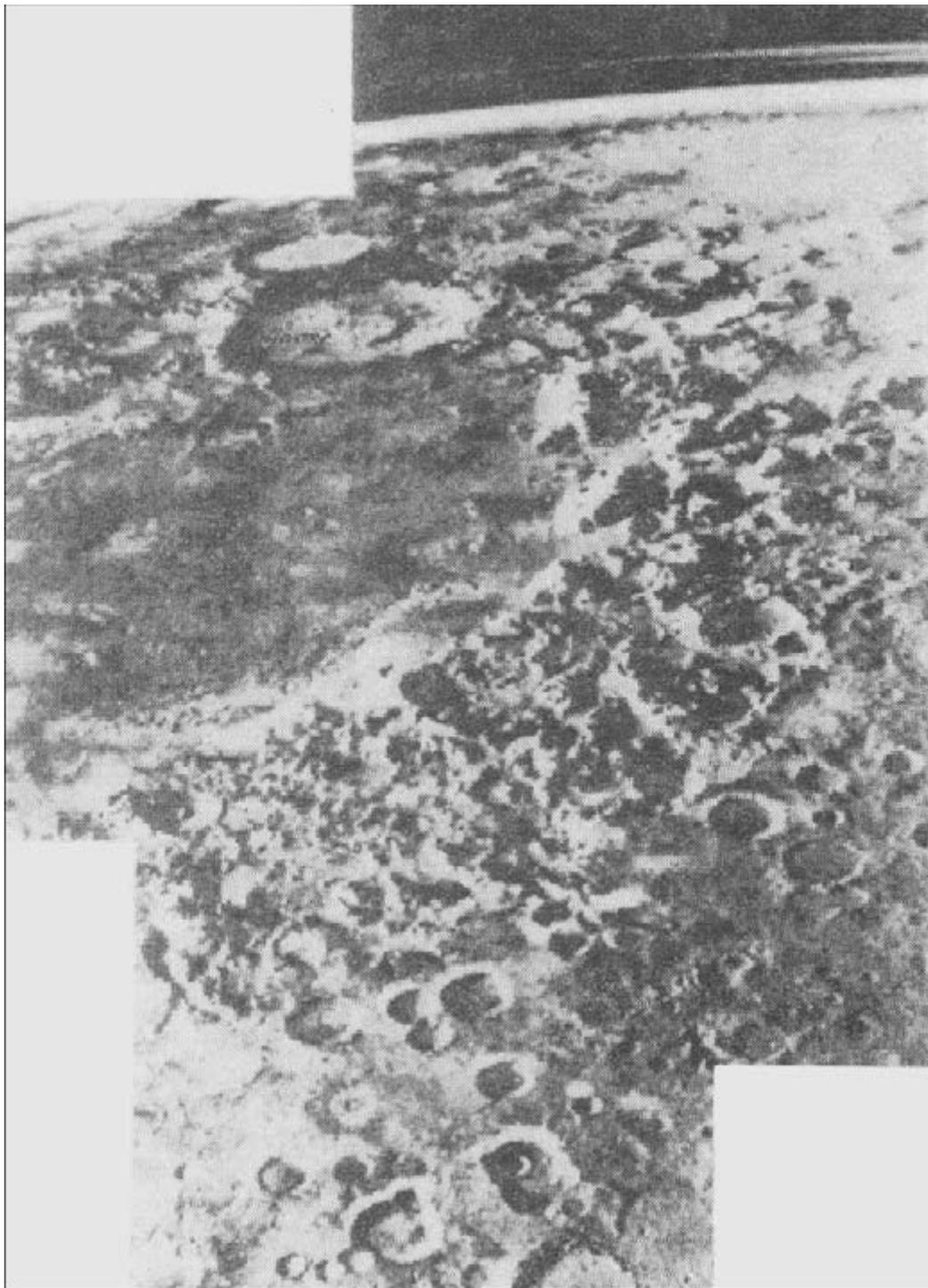


Рис. 1.43. Южная часть кольцевого бассейна Аргир и его горное обрамление (вид с юго-запада).
Фото «Викинг-1»

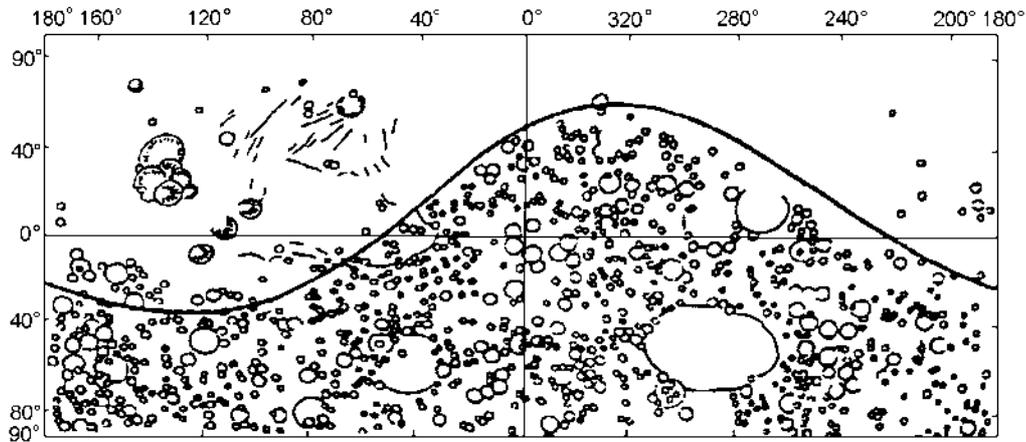


Рис. 1.44. Принципиальная схема строения Марса, разделенного на две формации – на южную древнюю гористую, испещренную метеоритными кратерами и содержащую огромные вулканические депрессии (моря) и северную – молодую равнинную с редкими метеоритными кратерами и огромными щитовыми вулканами, группирующиеся в грандиозные вулканические районы воздымания марсианской поверхности (по А.А.Баренбауму)

его поверхности. Горная цепь Фарсида на Марсе связана с гигантскими щитовыми вулканами Арсия, Павлина, Акрийский, поднятие Элизий – с вулканами Геката, Альбор.

Обособленно стоит крупнейший щитовой вулкан Олимп высотой в 27 км и диаметром 75 км (рис. 1.45) на огромном воздымании марсианской поверхности диаметром 700 км. Он значительно превосходит крупнейшие горные сооружения, распространенные на Земле вулканических депрессий (морей), обусловленных воздыманием ультраосновной мантии. Однако, в отличие от Марса, эндогенная активность которого прекратилась на определенной стадии «океанизации» его первичной эвкритовой коры, на Земле этот процесс продолжался с охватом и южного ее полушария, вплоть до полного вытеснения мощной первичной эвкритовой земной коры, маломощной базальтовой корой Мирового океана. В отличие от марсианской океанической структуры на базальтовой земной коре сформировалась гидросфера. Выявленная на Марсе специфика океанической коры обусловлена настоящим временем. Однако, в далеком прошлом в Мировом океане на Земле, по-видимому, развивались сходные с марсианским грандиозные поднятия, сопровождаемые утолщениями океанической коры, которые в геоструктурной эволюции Земли были предшественниками континентов. Щелочной уклон вулканизма этих грандиозных поднятий был выявлен на Марсе гамма-спектроскопическими измерениями автоматической станции «Марс-5», позволившими выявить следующие содержания в породах вулканических извержений калия (мас. %), урана и тория ($\times 10^{-6}$), в скобках приводятся фоновые значения: К-0.4 (0.1), U-1.1 (0.2), Th-5.0 (0.7). Это позволяет прямо связать формирование гигантских вулканических поднятий с развитием щелочного уклона в магматизме и определить тем самым принципиальное отличие по эволюционному уровню марсианского петрогенезиса от лунного. На Луне аналогичные значения, характеризующие щелочность пород, представлены следующими цифрами (Сидоров, Золотов, 1989) для древнейших формаций (К-0.04, U-0.7, Th-1.1) и лунных морей: К-0.03-0.2, U-0.16-0.68, Th-0.61-3.98. Щелочной уклон в лунном петрогенезисе проявляется только образованием

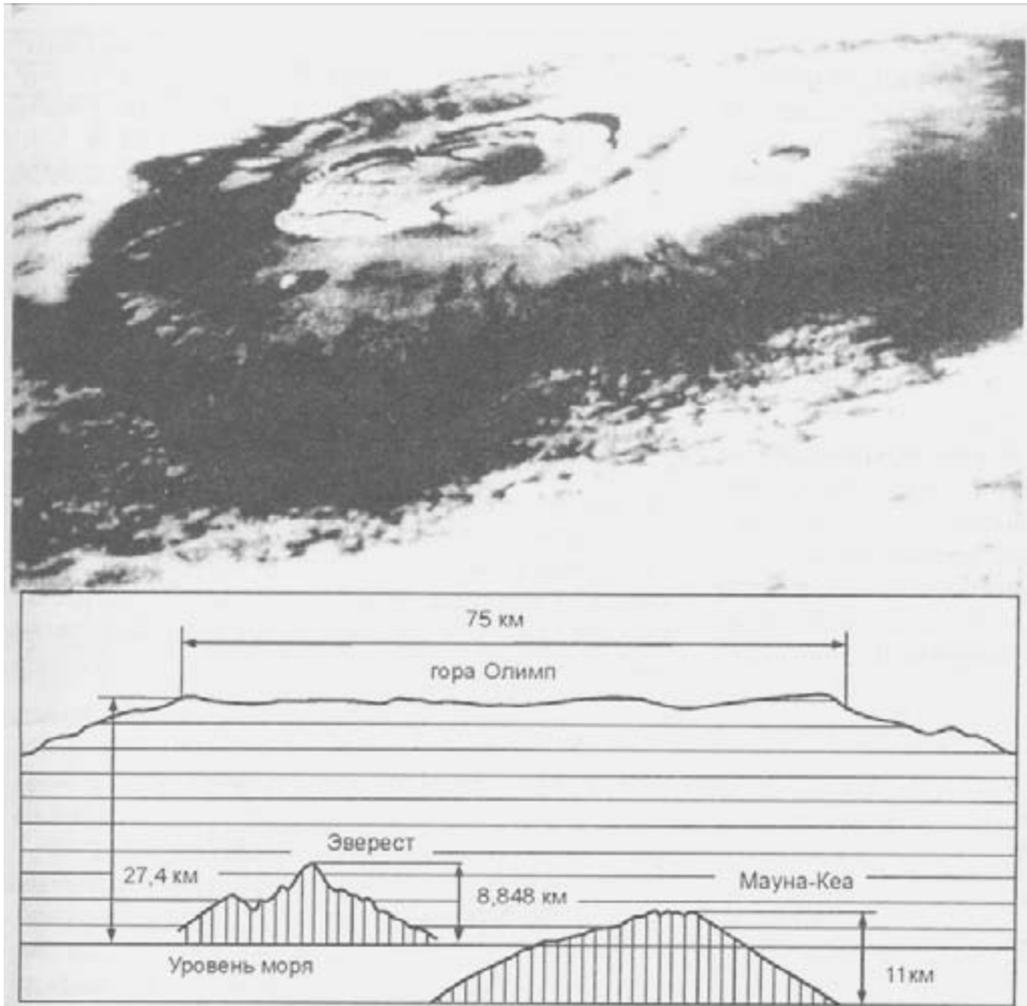


Рис. 1.45. Космический снимок щитового вулкана Олимп на Марсе и схема его сопоставления с крупнейшими воздыманиями поверхности на Земле – горой Эверест и океаническим вулканом Мауна-Кеа в Гавайском архипелаге Тихого океана

стекловатых, так называемых KREEP базальтов, богатых калием (K), редкоземельными элементами (REE) и фосфором (P): K-0.24, U-2.8, Th-9.3. Эти брекчиевые породы пользуются на Луне незначительным распространением, но тем не менее ими фиксируется зарождение щелочного уклона в лунном петрогенезисе, который на Марсе получил яркое развитие, сопряженное с образованием грандиозных вулканических поднятий.