

Происхождение Солнечной системы и Земли

Учение о биосфере

Д.Ю. Шишкина

Тема 14

План лекции

1. Нуклеосинтез

1.1. Процессы нуклеосинтеза

1.2. Хронология нуклеосинтеза

2. Образование Солнечной системы

2.1. Космохимическая классификация элементов

2.2. Последовательность образования Солнечной системы

2.3. Последовательность конденсации элементов и соединений

2.4. Формирование состава планет

3. Образование Земли

3.1. Гетерогенная аккумуляция вещества

3.2. Дифференциация внутренних оболочек Земли

3.3. Образование атмосферы

3.4. Образование гидросферы

3.5. Стратиграфическая и геохронологическая шкала

Нуклеосинтез

1. Сгорание водорода с образованием гелия ($4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$).
2. Сгорание гелия с образованием изотопов типа $4n$ - ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, что определило преобладание у легких элементов изотопов типа $4n$.
3. Процессы с α -частицами и ядрами ${}^{16}\text{O}$ и ${}^{20}\text{Ne}$, приводящие к возникновению ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{36}\text{Ar}$ и ${}^{40}\text{Ca}$.
4. Равновесный процесс, протекающий при высоких температурах ($3-4 \times 10^9$ К), когда достигалось статистическое равновесие между ядрами, протонами и нейтронами. Образование Mn, Fe, Co и Ni.
5. S-процесс, при котором происходит медленный (slow) нейтронный захват уже существующими элементами с образованием элементов до висмута включительно ${}^{209}\text{Bi}$ ($Z=83$).
6. R-процесс, характеризующийся быстрым (rapid) нейтронным захватом, с образованием тяжелых элементов в трансовисмутовой области ($Z > 83$), включая изотопы трансурановых элементов.
7. P-процесс, при котором возникают изотопы, относительно богатые протонами средних и тяжелых элементов. Протоны (p) ускоряются переменными магнитными полями в атмосферах звезд.
8. X-процесс, ответственный за образование легких малораспространенных изотопов, построение которых нельзя объяснить перечисленными процессами нуклеосинтеза.

Хронология нуклеосинтеза

Ядерные процессы синтеза хорошо объясняют космическую (солнечную) распространенность элементов и их изотопный состав. Вероятно, вещество, из которого возникла Солнечная система, прошло различные этапы развития с последовательной сменой указанных ядерных процессов. Последний акт нуклеосинтеза непосредственно предшествовал образованию планет Солнечной системы. Интервал времени между окончанием последнего акта нуклеосинтеза и формированием твердых тел в ранней Солнечной системе оценивается как 50-100 млн лет.

Перед образованием Солнечной системы возникли многочисленные радиоактивные изотопы, включая изотопы тяжелых и трансурановых элементов. Большая их часть вскоре распалась в соответствии с короткими периодами полураспада, но меньшая часть, с периодами полураспада свыше 1 млн лет дожила до образования твердых тел Солнечной системы и оставила следы своего бывшего существования в виде повышенного содержания радиогенных изотопов в продуктах осколочного деления.

Космохимическая классификация элементов (по Г.В. Войткевичу) (1)

Атмофильные элементы – создают атмосферы Земли и планет. К ним относятся все инертные газы, свойства которых определяются 8-электронной оболочкой атомов. Это позволяет им находиться в свободном, химически не связанном состоянии. Водород и азот. 2-электронная оболочка молекулы водорода H_2 имеет конфигурацию, аналогичную атому гелия. Молекулярный азот N_2 химически также ведет себя инертно. Молекулярный кислород O_2 является вторичным атмофильным элементом, поскольку в биосфере он непрерывно порождается жизнедеятельностью зеленых растений.

Летучие литофильные элементы – сосредоточены в верхних каменных оболочках Земли и планет, в их литосферах. Атомы легко образуют ионы с 8-электронной конфигурацией внешнего слоя. К ним относятся щелочные металлы Li, Na, K, Rb, Cs и более летучие ионы галогенов F^- , Cl^- , Br^- , I^- . Элементы I и VII групп. Они легко мигрируют в природных системах и при повышенных температурах переходят в газовое состояние ранее других элементов, за исключением типичных атмофильных и некоторых халькофильных.

Космохимическая классификация элементов (2)

Тугоплавкие литофильные элементы сосредоточены в метеоритах и мантиях Земли и планет. Mg, Al, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Sr, Ba и др. Они образуют устойчивые соединения с кислородом в виде окислов, гидроокислов и солей кислородсодержащих кислот.

Халькофильные элементы – имеют склонность образовывать соединения с серой, т.е. ведут себя подобно меди (*халькос* (греч.) - медь). Атомы их образуют ионы преимущественно 18-электронной конфигурации внешнего слоя. Встречаются в виде сернистых минералов – сульфидов. Cu, Zn, Cd, As, Se, Au, Hg, S, Sn, Sb, Pb, Bi и др. Большинство халькофильных элементов относится к сравнительно летучим. Наиболее типичной в этом отношении является ртуть, которая имеет низкую температуру плавления и кипения.

Тугоплавкие сидерофильные элементы – представлены тяжелыми металлами имеют склонность накапливаться совместно с железом в его сплавах (*сидерос* (греч.) - железо). Атомы их образуют 9-17-электронные конфигурации. Fe, Co, Ni, Pt, Ir, Re, Os и др. В метеоритах концентрируются в металлической железо-никелевой фазе. По-видимому, слагают внутренние ядра планет земного типа

Последовательность образования Солнечной системы

Вещество Солнца и вещество планет до определенного этапа имели общую судьбу. Этот этап выразился в разделении общей материальной системы (первичной массивной звезды) на первичное Солнце и околосолнечное вещество такого же состава, как и Солнце. Вероятно, механизм разделения был связан с центробежными силами, возникшими при изменении скорости вращения первичной звезды при её сжатии.

Вокруг Солнца возникла близкая по форме к диску протопланетная туманность, совпадающая с плоскостью солнечного экватора. В дальнейшем происходило охлаждение этой туманности до температур, допускающих образование химических соединений в твердом виде и металлических фаз. Наряду с конденсацией и образованием твердых частиц действовал такой важный фактор, как давление солнечных лучей.

Под влиянием лучевого давления и мощной корпускулярной радиации первичного Солнца газовая составляющая часть охлаждающейся туманности была отброшена далеко за пределы ближайшего к Солнцу пространства. Самые легкие компоненты первичного диска оказались отброшены в далекие краевые части, где впоследствии возникли крупные планеты – Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, состоящие главным образом из газов.

Последовательность конденсации элементов и соединений (1)

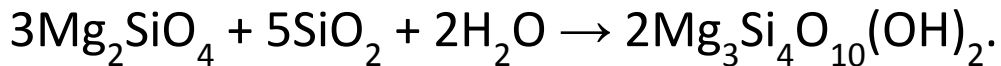
После остывания газа, образовавшегося после последнего этапа нуклеосинтеза, элементы образуют определенные соединения, согласно космохимическим свойствам. При этом элементы и их соединения конденсируются **в порядке, обратном их летучести**: сначала тугоплавкие окислы и металлические конденсаты, затем менее тугоплавкие соединения в виде силикатов и в конце – летучие и атмосферфильные элементы. Наиболее летучие – инертные газы – вообще избегают конденсации в пределах Солнечной системы, образуя газовые оболочки больших внешних планет.

При охлаждении протопланетной туманности солнечного состава происходила конденсация элементов и их соединений. Возникли продукты конденсации – твердые частицы и капли, которые быстро остывали.

Первыми конденсировались тугоплавкие окислы, почти одновременно с ними – капли железа. Затем следовали силикаты, сульфиды, самыми последними – вода и ртуть.

Последовательность конденсации элементов и соединений (2)

При падении температур ниже 400 К происходило взаимодействие ранее выделившихся силикатов с парами воды с образованием гидратированных силикатов. Например, оливин переходит в серпентин:



Таким образом, гидратированные силикаты оказались скрытыми носителями воды. Кроме того, обладая высокой адсорбционной способностью, они могли поглощать из окружающей среды не только молекулы воды, но и газы. Вероятно, адсорбция была важным процессом, при которой оставшиеся в туманности летучие вещества поглощались пылевой фазой.

На заключительной стадии охлаждения газовой туманности возникли органические соединения при реакциях синтеза между легкими элементами под каталитическим воздействием гидратированных силикатов.

Формирование состава планет

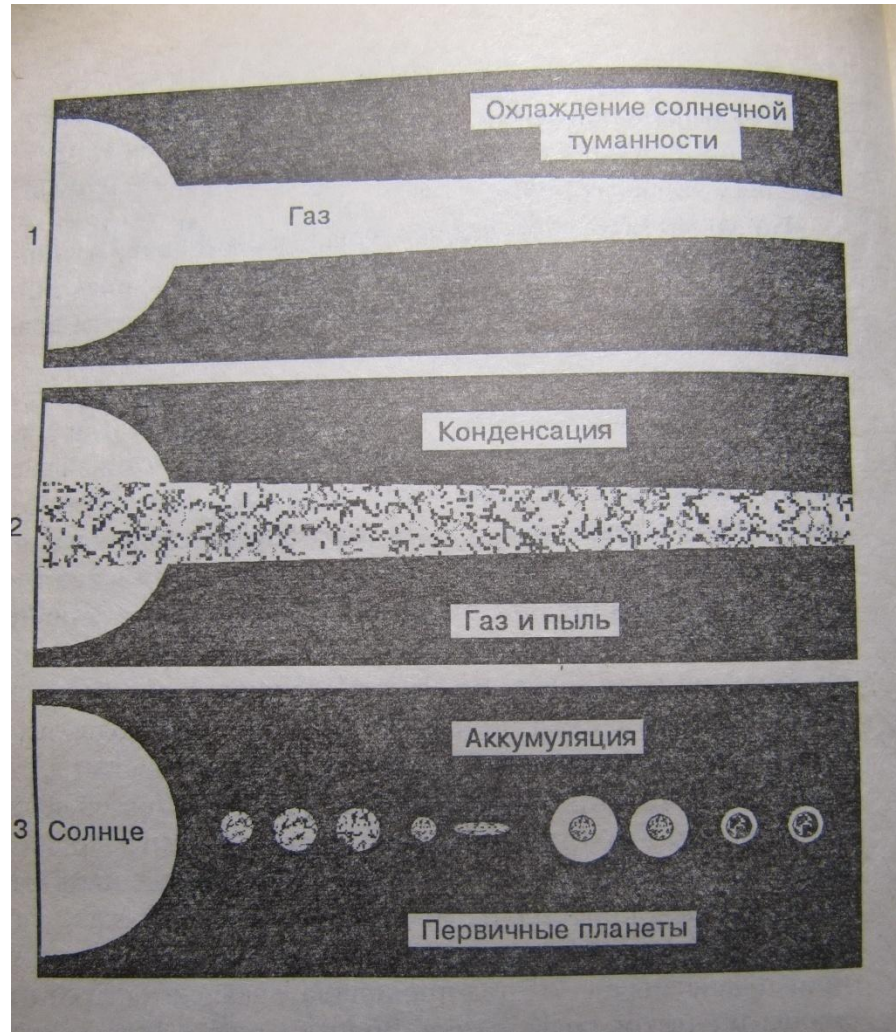
Формирование состава планет проходило в 2 этапа.

1. Охлаждение газового диска и конденсация части его вещества в твердые частицы. Возникла газо-пылевая туманность, которая была неустойчивой и ввиду разной скорости остывания в зависимости от расстояния до Солнца приобрела химическую неоднородность. Неоднородность усиливалась под влиянием давления солнечных лучей, отбросившего легкие вещества в краевые части туманности.
2. Аккумуляция конденсированных частиц в отдельные образования – первичные планеты.

По всей вероятности оба этапа не были резко отделены друг от друга во времени. Более вероятно, что аккумуляция в отдельных зонах протопланетного диска началась тогда, когда конденсация еще не завершилась.

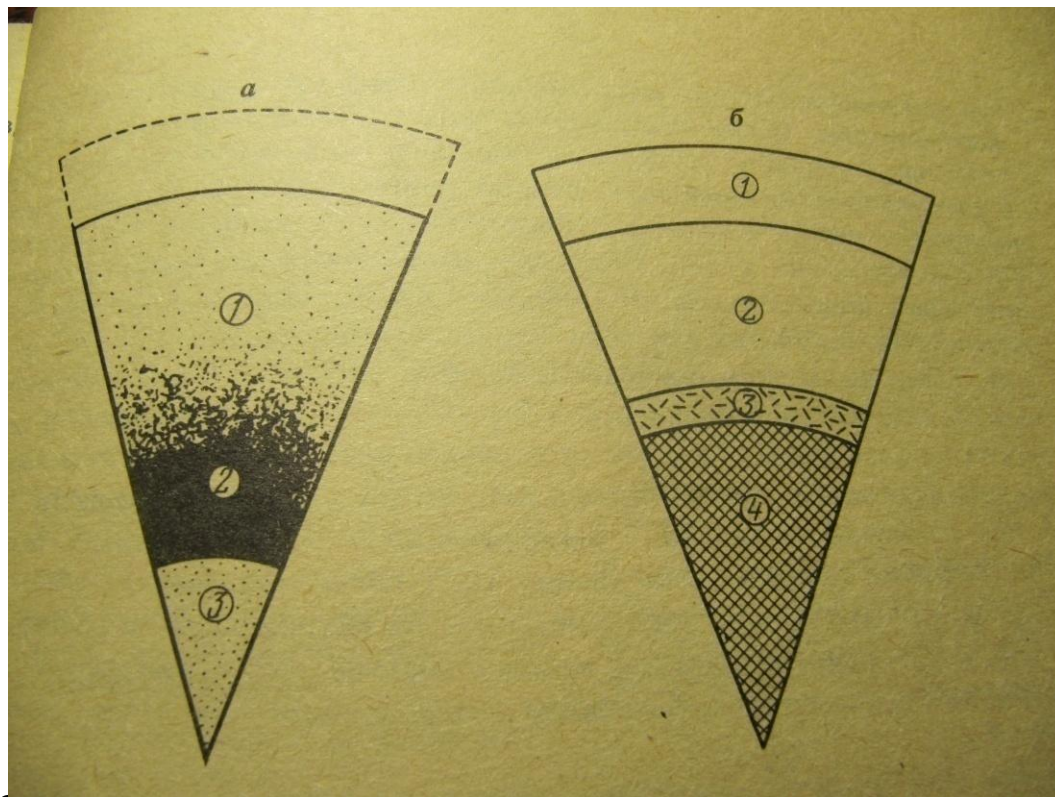
Химическая эволюция протопланетного вещества проходила в зависимости от гелиоцентрического расстояния. Вблизи Солнца формировались планеты преимущественно из высокотемпературных конденсатов, а вдали возрастала пропорция более окисленной низкотемпературной фракции.

Схема эволюции протопланетного диска



Образование Земли. Гетерогенная аккумуляция

Образование Земли было связано с аккумуляцией высокотемпературных конденсатов солнечного газа. Согласно гипотезе гетерогенной аккумуляции, образование Земли началось с накопления высокотемпературных конденсатов, составивших первичное ядро, на которое осели металлические конденсаты и силикаты более поздних этапов. Формирование первичной планеты завершилось осаждением самых низкотемпературных конденсатов. Через 10^6 - 10^8 лет после начала аккумуляции произошло основное перераспределение материала, что привело к образованию основных оболочек планеты – железного ядра и силикатно-оксидной мантии.



Гетерогенная аккумуляция первичной Земли

а) 10^3 - 10^4 лет после начала аккумуляции: 1 – смесь металлического Fe и силикатов Mg, не содержащих Fe; 2 – металлический сплав Fe-Ni; 3 – высокотемпературные конденсаты Ca, Al, Ti.

б) 10^6 - 10^8 лет после начала аккумуляции: 1 – смесь силикатов Mg + Fe_3O_4 + гидратированные силикаты + низкотемпературные конденсаты, обеднена Ca и Al; 2 – силикаты магния, не содержащие Fe; 3) оксиды Ca и Al; 4 – железное ядро (твердое)

Дифференциация внутренних оболочек Земли (1)

В пользу накопления металлических частиц на одной из первых стадий аккумуляции можно привести следующие аргументы.

1. Fe-Ni-частицы по физическим свойствам имели явное преимущество в плане объединения перед другими частицами. Если первоначальная аккумуляция начиналась при высоких температурах, то капли никелистого железа при соприкосновении легко слипались в крупные массы, образуя зародыши планет. Если аккумуляция начиналась при низких температурах, то металлические частицы также легко объединялись из-за своей пластичности и хорошей теплопроводности.
2. Действовал магнитный фактор объединения. Первичное Солнце имело магнитное поле, способное намагничивать ферромагнитные материалы: металлическое железо, кобальт, никель. При температуре ниже точки Кюри вещество приобретает магнитные свойства. Для железа она равна 1043 К, для никеля 630 К. Магнитные силы притяжения для мелких частиц намного превосходят другие силы притяжения, зависящие от масс.

Дифференциация внутренних оболочек Земли (2)

В связи с адиабатическим сжатием, первичным разогревом от падающих частиц, радиогенным нагревом от распада радиоактивных изотопов произошло быстрое повышение температур, и местами материал планеты начал плавиться. Первыми плавилась железо-сернистые массы (температура плавления 900-1000°), асимметрично стекая вниз в центральные области.

В верхних горизонтах первичной мантии выплавлялись обогащенные летучими компонентами легкоплавкие силикатные фракции, что привело к образованию базальтовой магмы. В результате её поступления на поверхность первичной мантии и последующего остывания образовалась базальтовая кора океанического типа.

Таким образом, первый центростремительный процесс дифференциации приводил к извлечению из первичной мантии преимущественно сидерофильных и халькофильных элементов и накоплению их в ядре планеты. Второй центробежный процесс миграции охватил преимущественно летучие литофильные и атмосфильные элементы.

Образование атмосферы

В результате плавления и дегазации верхней мантии на поверхность Земли поступали 3 фракции мантийного материала: базальтовая магма и растворенные в ней вода и газы. Каждое излияние базальтов сопровождалось выносом определенного количества воды, поскольку в основной магме могло содержаться до 7% воды. На поверхность первичной планеты поступали H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , S , N_2 , H_2S , NH_3 , HCl , HF , а также He , Ne , Ar , Kr , Xe . Эти газы составили первичную атмосферу.

По-видимому, основная роль принадлежала H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 . Есть гипотеза о ксеноновой первичной атмосфере, возникшей за очень короткий период, равный времени гетерогенной аккумуляции Земли. Быстрое образование атмосферы обусловлено энергичным выделением газов при ударах метеоритных тел о Землю.

Первичная атмосфера Земли была восстановительной, в ней практически отсутствовал свободный кислород.

Образование гидросферы

С того момента, как температура поверхности планеты опустилась ниже 100°C , пары воды стали конденсироваться и образовывать первичные водоёмы. Первичная гидросфера возникла из паров мантийного материала, и в соответствии с составом выделявшихся газов, первые скопления воды на поверхности планеты были кислыми, обогащенными в основном HCl , а также HF , H_2S , H_3BO_3 . Первые воды были минерализованными. Пресные воды появились позже, вследствие процесса естественной дистилляции – испарения с поверхности первичных водоемов. В первичном океане сульфаты присутствовали в ничтожных количествах, т.к. для окисления и образования сульфатов было очень мало свободного кислорода. Таким образом, первичный океан был кислым, хлоридным и восстановительным.

Нейтрализация кислот гидросферы происходила за счет взаимодействия с силикатными породами ложа океана и поступления в катионов кальция, магния, натрия, калия и др. Воды древней гидросферы приобрели хлор-кальциевый состав.

Общая стратиграфическая и геохронологическая шкала (1)

Эра	Период	Эпоха	Длительность, млн лет	Абс. возраст начала, млн лет
Кайнозойская	Четвертичный	Голоцен	2	2
		Плейстоцен		
	Неогеновый	Плиоцен Миоцен	23	25
	Палеогеновый	Олигоцен Эоцен Палеоцен	41	66
Мезозойская	Меловой		66	132
	Юрский		53	185
	Триасовый		50	235

Общая стратиграфическая и геохронологическая шкала (2)

Эра	Период	Эпоха	Длительность, млн лет	Абс. возраст начала, млн лет
Палеозойская	Пермский		45	280
	Каменноугольный		65	345
	Девонский		55	400
	Силурийский		35	435
	Ордовикский		55	490
	Кембрийский		80	570
Протерозойская			2030	2600
Архейская			900	>3500