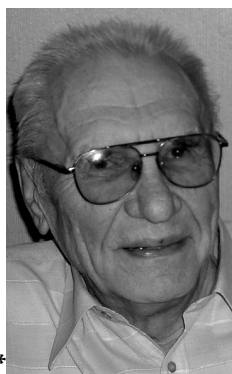


Древо всего происходящего. Титульный лист трактата «Occulta Philosophia ver den verborgenen Philosophischen Geheimnissen...». 1613.

УДК 552.6:523.3-52

**Маракушев А.А.*,
Зиновьева Н.Г.**,
Панях Н.А.***,
Маракушев С.А.******



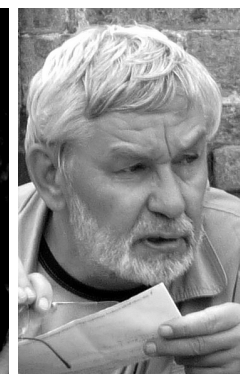
А.А. Маракушев



Н.Г. Зиновьева



Н.А. Панях



С.А. Маракушев

Зарождение и эволюция Солнечной системы¹

*Маракушев Алексей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института экспериментальной минералогии РАН, академик РАН, профессор МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: belova@iem.ac.ru

**Зиновьева Нина Георгиевна, доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: nzinov@mail.ru

***Панях Надежда Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института экспериментальной минералогии РАН

E-mail: napaneyah@yandex.ru

****Маракушев Сергей Алексеевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем химической физики РАН

E-mail: marak@cat.icp.ac.ru

Сотворение мира начиналось с Большого взрыва и образования впоследствии звезд-гигантов, синтезировавших химические элементы тяжелее гелия. Они наследовались звездно-планетными системами, в том числе – Солнечной. Околосолнечные планеты-гиганты, потерявшие флюидные оболочки, породили планеты земной группы. Земля была единственной планетой в Солнечной системе, эволюционировавшей до возникновения и развития жизни.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы «Поддержка научных школ» (грант НШ – 5877.2012.5) и программы Президиума РАН (программа фундаментальных исследований № 28, подпрограмма 1) «Происхождение и эволюция биосферы: от космохимии к биогеохимии».

Ключевые слова: Солнечная система, планеты-гиганты, планеты земной группы, метеориты, хондриты, ахондриты, аминокислоты, азотистые основания, нуклеотиды, дерево жизни.

Крупнейшим достижением астрономии было открытие расширения Вселенной, послужившее основой представлений о ее зарождении в результате Большого взрыва. Непосредственно в его результате образовались водород (H = протон + электрон) и гелий (He = 2H), из горячих облаков которых сформировались звезды, в том числе звезды-гиганты первого поколения (рис. 1), в результате взрыва которых (сверхновые) синтезировались тяжелые химические элементы в периодичности изменения их орбитальных радиусов, рис. 2, которые коррелируются с фундаментальными свойствами, в том числе щелочными (табл. 1). Звезды потому и светятся, что легкие элементы в них соединяются (сгорают) с выделением энергии и образованием более тяжелых элементов (в фазе сверхгиганта) – нечетных: H(1)–Mn(25) и четных: He(2)–Fe(26). Химические элементы более тяжелые, чем железо образуются уже не с выделением энергии (экзотермически), а с ее поглощением (эндотермически), при взрывах (сверхновых).

В результате взрывов очень массивных сверхновых образуются черные дыры, смещающиеся к центрам галактик, облака, рассеивающиеся в космическом пространстве, или диски стремительного вращения, в которых образуются стяжения вещества, превращающиеся в небольшие звезды второго поколения, наследующие химические элементы, синтезированные их предшественниками – звездами-гигантами. Ко второму (а может быть и третьему) поколению принадлежит и Солнце, представленное желтым карликом. Продолжительность жизни звезд-гигантов измеряется миллионами лет. Этим они принципиально отличаются от небольших звезд (желтых карликов), живущих миллиарды лет (продолжительность жизни Солнца оценивается в 10 млрд. лет) в окружении планетных систем подобных Солнечной. Таким образом, сверхновыми фиксируется радикальный рубеж эволюции звездного Мира. В недрах Солнца синтезируются только легкие элементы, так что наблюдаемый химический состав (табл. 1) с характерным преобладанием четных элементов над нечетными Солнечная система унаследовала от своей предшественницы – гигантской звезды и при взрыве сверхновой.

Солнечная система сформировалась в громадном раскаленном диске, в режиме его стремительного вращения и охлаждения с образованием космической пыли, входящей затем в ледяные планетезимали – водородные, концентрирующиеся во внутренних частях диска, и водные, отгоняющиеся на периферию. Соответственно путем аккреции планетезималей формировались массы Солнца, водородных околосолнечных планет-гигантов, удаленных водных планет-гигантов (Урана и Нептуна), а также ледяного окружения Солнечной системы. Планеты-гиганты сформировались из ледяных планетезималей (с железо-силикатной космической пылью), они достигали такой громадной массы, что подвергались гравитационному сжатию с подъемом температуры, создающей их свечение. В их в основном флюидном составе под действием гравитационных сил сформировались жидкие никель-железные ядра, генерирующие их сильные магнитные поля. Благодаря быстрому вращению под воздействием центробежных сил от планет-гигантов отделялись спутники.

Солнце, достигнув звездного состояния, активно воздействовало на гигантский диск, в котором оно образовалось, вызвав его диссипацию в космическом пространстве, так что образованные в нем планеты-гиганты оказались в вакууме, унаследовав, тем не менее, стремительное обращение диска вокруг медленно вращающегося Солнца. Осевое вращение планет-гигантов вначале задавалось динамикой вращения диска, а после его потери изменялось под влиянием Солнца, вызывающего одностороннюю потерю водорода их флюидными оболочками. Различное вращение планет-гигантов фиксируется обращением вокруг них спутников. Спутники подразделяются на дальние и ближние. Дальние – силикатно-ледяные спутники находятся в прямом и обратном обращении вокруг планет-гигантов. Обратное обращение имеют самые удаленные спутники, по видимому, унаследовавшие обращение аккреционных дисков, формировавших массы планет-гигантов, которые затем приобретали собственное вращение. С этим связано отделение главной массы спутников, в том числе массивных. Ближайшие к планетам-гигантам массивные спутники расслоены на силикатные оболочки и небольшие жидкие флюидные железные ядра, создававшие до их консолидации эндогенную активность (очаги землетрясений, магнитные поля и вулканизм на стороне, обращенной к материнским планетам-гигантам). Эндогенная активность планет-гигантов развивалась, омолаживаясь с удалением от Солнца. Начинаясь она с развития околосолнечных планет-гигантов, в ядрах которых сконцентрировался тяжелый железо-силикатный материал с одновременным отделением более легкого вещества, образовавшего спутники. Таким образом сформировались протопланеты – предшественники планет земной группы (Протомеркурий, Протовенера, Протоземля, Протомарс), которые расслаивались на флюидные жидкие железные ядра и силикатные оболочки на разных ступенях их дальнейшего развития с потерей протопланетами гигантских флюидных оболочек под действием солнечного ветра (рис. 3), при этом ближайšie к Солнцу Протомеркурий и Протовенера потеряли свои спутники. Одновременно потерялись и спутники других околосолнечных протопланет, сохранились только Луна, удаляющаяся от Земли со скоростью 4 см в год, Фобос и Деймос (обломочные спутники Марса). Луна в период 4,6–3,2 млрд. лет обладала эндогенной активностью, благодаря жидкому флюидному состоянию ее не-

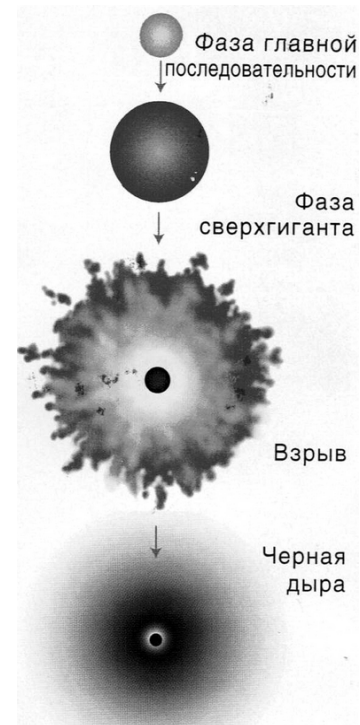


Рис. 1. Эволюция и взрывное разрушение массивных звезд¹.

¹ Космос: альманах / Под ред. Капицы С.П. М.: «В мире науки». 2006. С. 146.

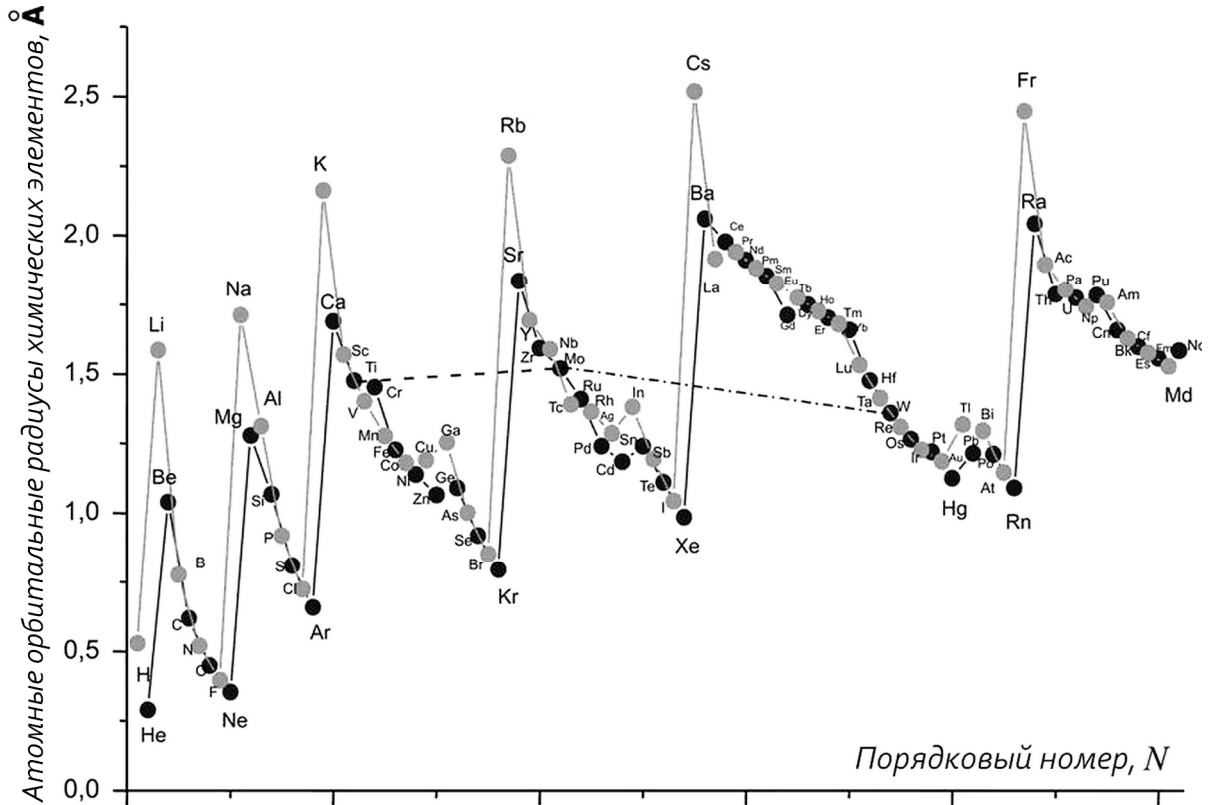


Рис. 2. Периодичность изменения атомных орбитальных радиусов химических элементов (в Å) (нечетные - серые, четные - черные), определяющая разделение их на периоды по щелочным свойствам (табл. 1). Штрих-пунктирной линией (Ti - Mo - W) на диаграмме разделяются рудные металлы, свойственные нормальному (ниже линии) и щелочному (выше линии) магматизму.

Таблица 1

Систематика химических элементов на основе их атомных орбитальных радиусов

Нечетные элементы

Щелочность ↑	Щелочные металлы											
	3	11	19	37	55	87						
	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr						
	Лантаниды и актиниды											
							57	89	91	93	95	97
							La	Ac	Pr	Pa	Pm	Np
							61	93	95	97	99	101
							Eu	Am	Tb	Bk	Ho	Es
							65	97	99	101	103	105
							Tm	Md	Lu	Lr	Yb	No
21							39	71	103	105	107	
Sc							Y	Ta	Db	Re	Bh	
23							41	73	105	107	109	
V	Nb	Ta	Db	Rh	Ir							
25	43	75	107	109	111							
Mn	Tc	Re	Bh	Ag	Au							
27	45	77	109	111	113							
Co	Rh	Ir	Mt	In	Tl							
29	47	79	111	113	115							
Cu	Ag	Au	At	Bi	Fr							
Переходные металлы												
Кислотные металлы и неметаллы												
5	13	31	49	81	113							
B	Al	Ga	In	Tl	Fr							
7	15	33	51	83	115							
N	P	As	Sb	Bi	At							
1	9	17	35	53	85							
H	F	Cl	Br	I	At							
I	II	III	IV	V	VI							
Периоды												

Четные элементы

Щелочность ↑	Щелочноземельные металлы											
	4	12	20	38	56	88						
	Be	Mg	Ca	Sr	Ba	Ra						
	Цериды и ториды											
							58	90	92	94	96	98
							Ce	Th	Nd	U	Sm	Pu
							62	94	96	98	100	102
							Gd	Cm	Dy	Cf	Er	Fm
							66	98	100	102	104	106
							Yb	No	Hf	Rf	Os	Hs
22							40	72	104	106	108	
Ti							Zr	Hf	Rf	W	Sg	
24							42	74	106	108	110	
Cr	Mo	W	Sg	Pd	Pt							
26	44	76	108	110	112							
Fe	Ru	Os	Hs	Cd	Hg							
28	46	78	110	112	114							
Ni	Pd	Pt	Hg	Sn	Pb							
30	48	80	112	114	116							
Zn	Cd	Hg	Rn	Ge	Sn							
6	14	32	50	82	114							
C	Si	Ge	Sn	Pb	Fr							
8	16	34	52	84	116							
O	S	Se	Te	Po	At							
2	10	18	36	54	86							
He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn							
I	II	III	IV	V	VI							
Периоды												

большого никель-железного ядра. В это время у нее было магнитное поле (сохранилась только остаточная намагниченность лунных пород), развивались вулканические депрессии («моря») на стороне, обращенной к гигантской Протоземле. Протоземля была материнской не только для Луны и других потерянных ею спутников, но и для Земли, которая расслоилась под огромным давлением ее водородной оболочки, создавшей громадный запас флюидов в ее ядре. Он обеспечивает ее эндогенное развитие на протяжении уже 4,6 млрд лет. Этим Земля принципиально отличается от Меркурия, Венеры и Марса, которые расслаивались на переходе от протопланетной к планетной стадии развития, под меньшим водородным давлением, так что в их жидких ядрах сосредоточилось значительно меньше флюидов. В результате они давно консолидировались с утратой эндогенной активности и магнитных полей.

Представление о формировании планет земной группы в результате потери флюидных оболочек их околосолнечными гигантскими предшественницами (рис. 3), у которых они составляли железо-силикатные ядра, гипотетически сложилось у нас еще в давние времена¹. Однако, только на рубеже наших веков² оно нашло прямое подтверждение обнаружением астрономами аналогов Солнечной системы, у которых сохранились в различной мере дегазированные с поверхности околозвездные планеты-гиганты³ в позиции, в которой в Солнечной системе находились протопланеты (см. рис. 3) – материнские для планет земной группы. Они представляли железо-силикатные ядра этих протопланет (Протомеркурия, ПротоВенеры, Протоземли, Протомарса), которые выделились в качестве самостоятельных планет земной группы

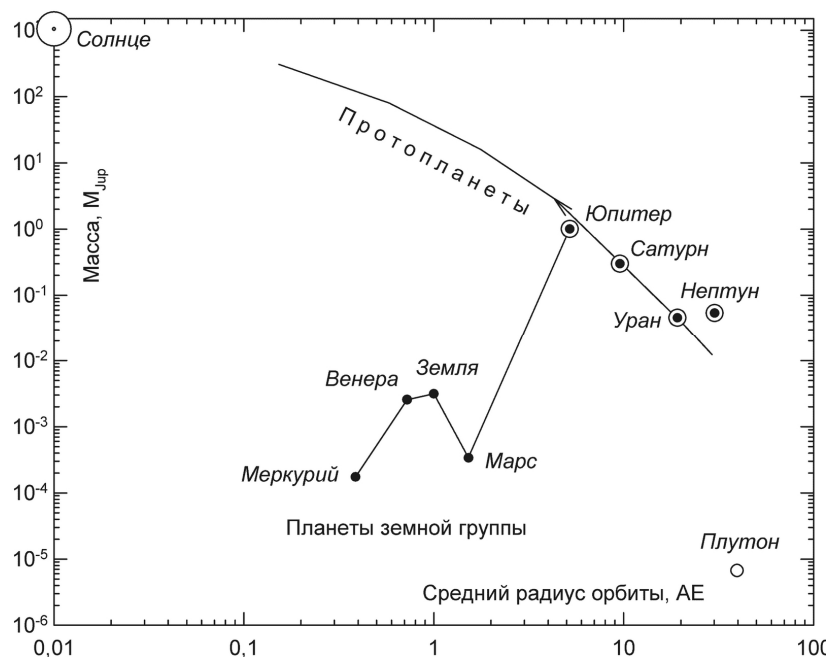


Рис. 3. Модель формирования планет земной группы путем поверхностной дегазации их околосолнечных протопланет под воздействием солнечного ветра.

Представление о формировании планет земной группы в результате потери флюидных оболочек их околосолнечными гигантскими предшественницами (рис. 3), у которых они составляли железо-силикатные ядра, гипотетически сложилось у нас еще в давние времена¹. Однако, только на рубеже наших веков² оно нашло прямое подтверждение обнаружением астрономами аналогов Солнечной системы, у которых сохранились в различной мере дегазированные с поверхности околозвездные планеты-гиганты³ в позиции, в которой в Солнечной системе находились протопланеты (см. рис. 3) – материнские для планет земной группы. Они представляли железо-силикатные ядра этих протопланет (Протомеркурия, ПротоВенеры, Протоземли, Протомарса), которые выделились в качестве самостоятельных планет земной группы

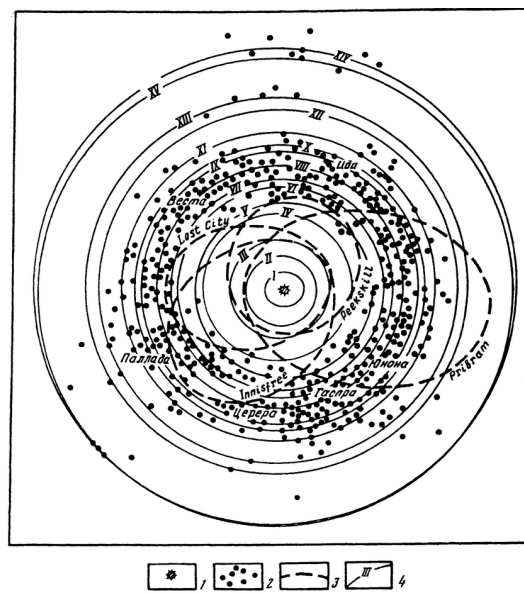


Рис. 4. Орбиты падения метеоритов в поясе астероидов⁴, подразделяющихся на семейства, обозначенные римскими цифрами (I–XIV)

1 – Солнце; 2 – астероиды (обломки планет и их спутников); 3 – орбиты падения хондритов Pribram, Innisfree, Lost Sity, Peekskill⁵, 4 – орбиты обращения планет и астероидов различных семейств вокруг Солнца: I – Меркурия, II – Венеры и семейства Афины, III – Земли и семейства Аполлона, IV – Марса и семейства Амура, V–XIV – семейства астероидов (Венгерцев (V), Флоры (VI), Факи (VII), Короны (VIII), Эоса (IX), Фемиды (X), Кибелы (XI), Гильды (XII), Туле (XIII). Троянцев (XIV)); XV – Юпитера. Семейства астероидов, как и планеты, имеют исключительно прямое орбитальное движение вокруг Солнца.

¹ Маракушев А.А., Безмен Н.И. Эволюция метеоритного вещества, планет и магматических серий. М.: Наука, 1983. 184 с.; Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М.: Наука, 1992. 208 с.
² Маракушев А.А., Грановский Л.Б., Зиновьева Н.Г., Митрейкина О.Б. Космическая петрология. Москва: Наука, 2003, 387 с.; Marakushev A.A., Zinovieva N.G., Granovsky L.B. Genetic Relations between Meteorites and Terrestrial and Lunar Rocks // Petrology. 2010. V. 18, No 7, P. 677–720.
³ Charbonneau D. Atmosphere out of that world // Nature. 2003. N 422. P. 124-125; Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etang A., Desert J.-M. et al. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b // Nature. 2003. N 422. P. 143–146.
⁴ По: Бинцель Р. П., Баруччи А., Фульчиньони М. Происхождение астероидов // В мире науки. 1991. № 12. С. 54–61.
⁵ По: Brown P., Ceplecha Z., Howkes P.L. et al. The orbit and atmospheric trajectory of the Peekskill meteorite from video records // Nature. 1994. Vol. 367, N 6464. P. 624–626.

после потери ими флюидных оболочек под воздействием Солнечного ветра. Расслоение на флюидные железные ядра и прочные силикатные оболочки предотвратило их взрывной распад. Этим они отличаются от хондритовых планет, расположенных дальше от Солнца, которые после потери их протопланетными флюидными оболочек подвергались взрывному распаду на астероиды (в основном – хондриты) (рис. 4) под действием флюидов, сконцентрировавшихся в их недрах на протопланетной стадии развития.

Формирование хондритовых планет (планеты, обломки которых сформировали пояс астероидов) охватывает громадный диапазон времени, рис. 5, разделяющий развитие земных планет и планет, относящихся к группе Юпитера. В этом диапазоне происходило формирование железо-силикатных (хондритовых) ядер гигантских протопланет под громадным давлением их флюидных оболочек. С селективной потерей водорода в них возрастало H_2O/H_2 отношение и в хондритовых планетах происходило хондро-матричное взаимодействие: $Mg_2SiO_4 + (2Fe+Si) + 4H_2O = 2MgFeSiO_4 + 4H_2$, $MgSiO_3 + Fe + H_2O = MgFeSiO_4 + H_2$. Они последовательно теряли металлическую матрицу и способность расслаиваться подобно планетам земной группы (рис. 6):

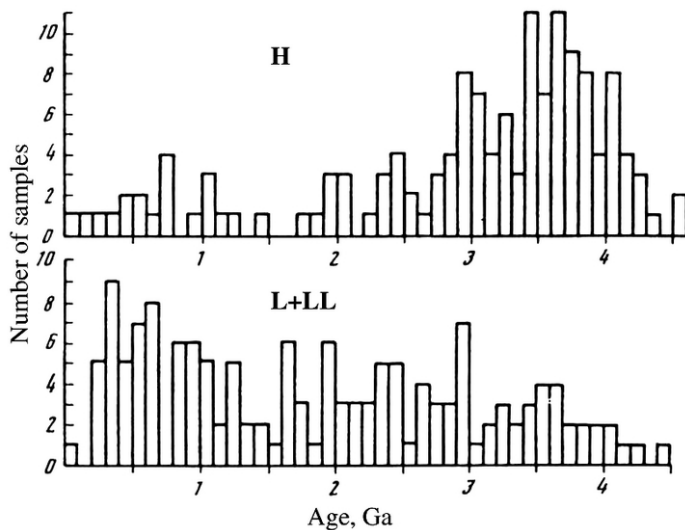
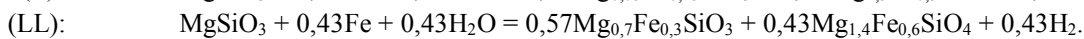
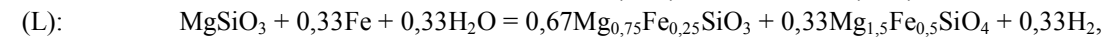
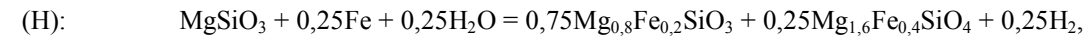
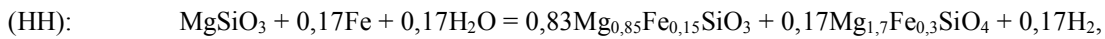


Рис. 5. Гистограмма абсолютного возраста обыкновенных хондритов с подразделением их на богатые железом - H и бедные железом - L + LL¹.

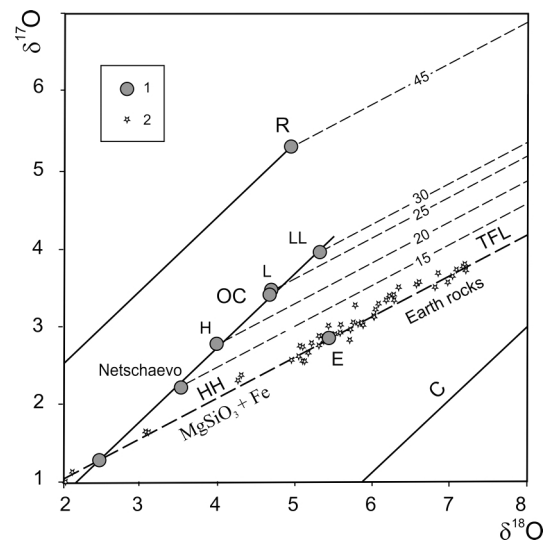


Рис. 6. Систематика хондритов в последовательности утяжеления состава воды, участвующей в окислительных реакциях их образования. 1 – типы хондритов (Румурути R – обыкновенные OC (НН-Н-L-LL) – энстатитовые E – углистые C), 2 – земные изверженные породы (TFL)². Штриховые линии – железистость минералов.

Более древние богатые железом НН и Н хондриты близки к самым примитивным хондритам с полностью металлической матрицей, представлявшим хондритовые планеты, расслоение которых на флюидные жидкие никель-железные ядра и силикатные оболочки, привело к формированию планет земной группы.

Бедные железом L и LL хондриты отличаются более молодым возрастом. Они намечают как бы переход по возрасту к хондритовым планетам, формируют в настоящее время ядро Юпитера и генерируют совместно с металлическим субъядром его сильное магнитное поле. Об этом можно судить по генерации его молодых массивных спутников (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто), из которых только Каллисто утратил эндогенную активность и магнитное поле вследствие консолидации. Формирование массивных спутников планет-гигантов является процессом комплементарным генерации и развитию их хондритовых ядер, что отражает две стороны единого проявления их эндогенной активности. Особенно интересен спутник Ио, рис. 7, вулканы и образование вулканических депрессий на котором сосредоточены на стороне, обращенной к Юпитеру. Он является во всех отношениях современным аналогом Луны, древнейшая (4,6–3,2 млрд. лет) вулканическая активность которой была обращена аналогичным образом к ее материнской Протоземле (наблюдается на видимой стороне Луны). Ио имеет массу $8,93 \cdot 10^{25}$ г (на 20% больше массы Луны). Он обращается по круговой орбите на расстоянии 422 тыс. км от Юпитера совместно с облаком водорода, отделившегося вместе с ним от Юпитера и не успевшего рассеяться.

Обрисованное по возрасту хондритов и последовательности образования спутников планет-гигантов центробежное развитие Солнечной системы относится к ее самым фундаментальным особенностям. Оно обусловлено

¹ Wasson J.T., Wang S. The histories of ordinary chondrite parent bodies: U, Th-He age distributions // Meteoritics. 1991. N 26. P. 161–167.

² По данным: Koblitz J. MetBase. Meteoritic Data Retrieval Software. Bremen/Germany. 2010; Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. GCA. 1999. Vol. 63. No 13/14. Pp. 2089–2104; Weisberg M.K., Prinz M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Suigura N., Zashu S., Ebihara M. A new metal-rich chondrite grouplet. Meteoritics and Planet. Sci. 2001. N 36. P. 401–418; Robert F., Rejou-Michel A., and Javoy M. Oxygen isotopic homogeneity of the Earth: new evidence // EPSL. 1992. N 108. P. 1–9; и др.

Рис. 7. 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 планеты¹.

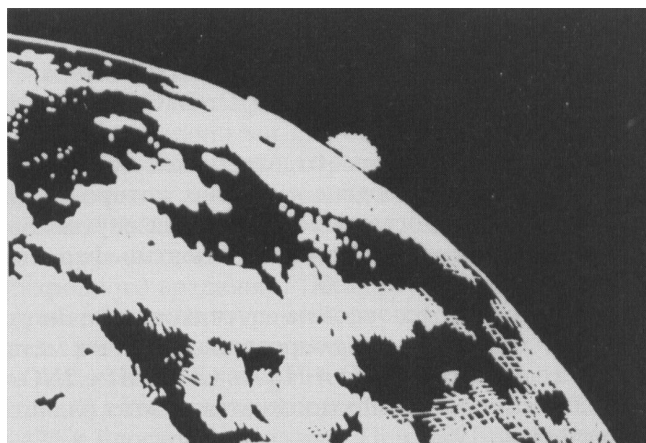
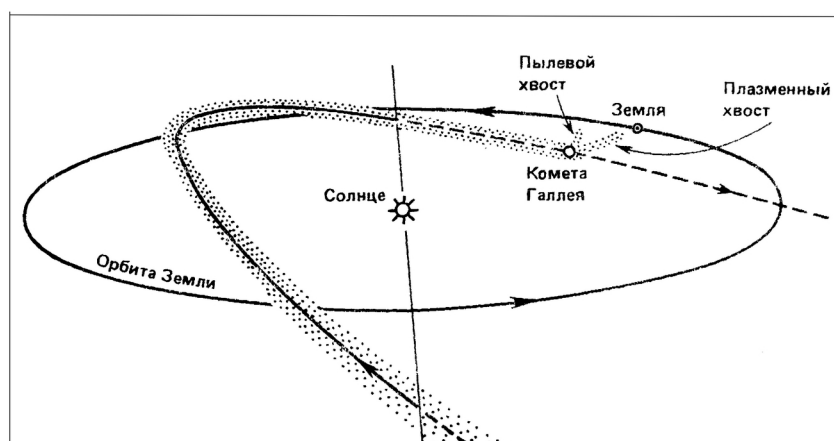


Рис. 8. Положение кометы Галлея при максимальном сближении ее с Землей в марте 1986 г. и схема образования у нее плазменного хвоста (направлен строго от Солнца), пылевого хвоста (мельчайших частичек пыли) и пылевого шлейфа (более крупных частиц железо-силикатной пыли), рассеивающихся вдоль кометной орбиты.



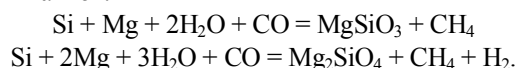
влиянием Солнца, ускоряющего эндогенное развитие окружающих его планет-гигантов. Солнечное воздействие усиливает миграцию водорода с их поверхности, повышая тем самым H_2O/H_2 отношение в их флюидных оболочках. Это способствует их разделению на железо-силикатные расплавленные ядра и спутники.

Хондриты представляют вещественный материал для суждения о происхождении планет земной группы и их предшественников – хондритовых планет. Признаком их формирования под огромным давлением флюидных оболочек их материнских планет-гигантов служит обычное вхождение парагенезиса мельчайших зерен муассанита с алмазом ($SiC+C$) в их неравновесные типы, в которых сочетаются минералы левой и правой сторон хондро-матричных окислительных реакций: $MgSiO_3 + Fe + H_2O = MgFeSiO_4 + H_2$. Окислительные реакции характеризуют главный процесс формирования хондритовых планет в ядрах материнских планет-гигантов. Он обусловлен возрастанием H_2O/H_2 отношения в их флюидных оболочках, связанным с селективной миграцией водорода. С водородом отчасти увлекается и водный компонент флюидов, причем главным образом с легким, более миграционным изотопным составом кислорода. В результате вода, участвующая в окислительных реакциях образования хондритов, раскрывает новый аспект их генетической систематики (рис. 6), в который закономерно вписываются и земные изверженные породы, занимающие промежуточное положение между обыкновенными NH-хондритами и энстатитовыми хондритами.

Сложное и многообразное развитие Солнечной системы осуществлялось в окружении скоплений водного льда, образующих пояса Койпера, Хиллса, Оорта. Они не достигали масс, достаточных для их гравитационного сжатия, плавления и эндогенного развития. Поэтому они остаются в первозданном состоянии, в котором и вторгаются в Солнечную систему в виде кумулятивных вращательных комплексов (Плутон – Харон) или одиночных комет (рис. 8), под действием Солнца приобретающих округлую форму.

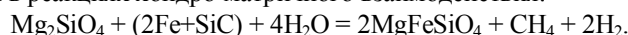
Естественным продолжением эндогенного развития железо-силикатных планет является абиогенное образование органических соединений. Это относилось и к хондритовым планетам, разрушавшимся в поясе астероидов с образованием геолоцентрических метеоритов (хондритов). Наличие в них абиогенных органических веществ (аминокислоты, азотистые основания и др.) служит прямым доказательством происхождения хондритов, являющихся обломками планет с жидким ядром и способностью генерировать углеводороды. С другой стороны отсутствие в метеоритах и на других космических объектах органических соединений более высокого эволюционного уровня (нуклеозидфосфаты и др.) свидетельствует о развитии жизни только на Земле.

Хондритам свойственны углеводороды. Их образование вписывается в сам процесс отделения силикатных хондр от флюидных матриц планет-гигантов:



¹ Voyager 1, Encounter with Jupiter // National Aeronautics and Space Administration. New York. 1979. N 4. P. 3–44.

Генерация углеводородов связана также с вхождением кремния и углерода в металлическую матрицу углистых хондритов, участвующих в реакциях хондро-матричного взаимодействия:



С охлаждением связано образование свободного азота, азотистых водородных веществ, углеводородов и воды ($2\text{H}_2+2\text{NO}=2\text{H}_2\text{O}+\text{N}_2$, $1,5\text{H}_2+\text{NO}=\text{H}_2\text{O}+\text{NH}$, $3\text{H}_2+\text{CO}=\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_4$, $2\text{H}_2+\text{CO}=\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_2$ и др.). С дальнейшим понижением температуры все эти вещества реагируют друг с другом в две стадии. На ранней, более высокотемпературной стадии углеводороды соединяются с азотом с образованием углеводородно-азотистых оснований ($\text{C}_5\text{H}_3+2,5\text{N}_2=\text{C}_5\text{H}_3\text{N}_5$ и др.). Их гидратация на второй более низкотемпературной стадии, $\text{C}_5\text{H}_3\text{N}_5+\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_3\text{N}_5\text{O}$ (гуанин, Gua) и др., приводит к образованию всего разнообразия первичных органических веществ, сведенных в табл. 2. Из их числа к ранней стадии относится аденин: $(\text{CH})_5+2,5\text{N}_2=\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$. По нашему мнению они являются первичными веществами, с которых и начиналось образование органического мира на Земле и других железокремнистых планетах. Таблица представляет широкий охват веществ (земных и космических) и отражает универсальное их образование в результате реакций углерода и углеводородов с азотом и водой, отражающей гидратацию – главный процесс образования примитивных органических веществ. Необходимая для гидратации вода возникла в ходе генерации углеводородов в водородных струях, исходящих из расплавленных ядер планет $3\text{H}_2 + \text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$, $5\text{H}_2 + 2\text{CO} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_6$ и т.д., так что для образования органических веществ, сведенных в табл. 2, требуется только падение температуры. Поэтому, они естественно сменяют генерацию углеводорода в водородных флюидах, восходящих из жидких ядер планет¹.

Таблица 2.

Реакции первичного преобразования углерода и углеводородов в органические вещества:

I - моносахариды, II – пурины и пиримидины и III – аминокислоты.

Вещества, содержащиеся в углистых хондритах (Allende, Murchison, Murety, Ефремовка), обозначены звездочками²

Типы веществ	Углерод-углеводородные предшественники		Органические вещества		
	$\frac{\text{H}}{\text{C}+\text{H}}$	Формулы	Название и их символы	Реакции образования (гидратация)	$\frac{\text{N}}{\text{C}+\text{N}}$
I	0	C ₅	Рибоза (Rib)	$5\text{C}+5\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5$	0
	0,29	C ₅ H ₂	Дезоксирибоза (dRib)	$\text{C}_5\text{H}_2+4\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_4$	0
II	0	C ₄	Урацил (Ura)*	$(4\text{C}+\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_2$	0,33
	0	C ₅	Ксантин (Xan)*	$(5\text{C}+2\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$	0,44
	0,29	C ₅ H ₂	Тимин (Thu)	$(\text{C}_5\text{H}_2+\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_2$	0,29
	0,38	C ₅ H ₃	Гуанин (Gua)*	$(\text{C}_5\text{H}_3+2,5\text{N}_2)+\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5\text{O}$	0,50
	0,43	C ₄ H ₃	Цитозин (Cyt)	$(\text{C}_4\text{H}_3+1,5\text{N}_2)+\text{H}_2\text{O}=\text{C}_4\text{H}_5\text{N}_3\text{O}$	0,43
	0,50	(CH) ₅	Аденин (Ade)*	$(\text{C}_5\text{H}_5+2,5\text{N}_2)=\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$	0,50
III	0	C ₄	Аспарат (Asp)*	$(4\text{C}+0,5\text{N}_2+0,25\text{O}_2)+3,5\text{H}_2\text{O}=\text{C}_4\text{H}_7\text{NO}_4$	0,20
	0,17	C ₅ H	Глутамат (Glu)*	$(\text{C}_5\text{H}+0,5\text{N}_2)+4\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$	0,17
	0,18	C ₉ H ₂	Тирозин (Tyr)	$(\text{C}_9\text{H}_2+0,5\text{N}_2)+3\text{H}_2\text{O}=\text{C}_9\text{H}_{11}\text{NO}_3$	0,10
	0,25	C ₃ H	Серин (Ser)*	$(\text{C}_3\text{H}+0,5\text{N}_2)+3\text{H}_2\text{O}=\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_3$	0,25
	0,33	C ₂ H	Глицин (Gly)*	$(\text{C}_2\text{H}+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$	0,33
	0,33	(C ₂ H) ₂	Аспарагин (Asn)	$(\text{C}_4\text{H}_2+\text{N}_2)+3\text{H}_2\text{O}=\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_3$	0,33
	0,42	C ₁₁ H ₈	Триптофан (Trp)	$(\text{C}_{11}\text{H}_8+\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_2$	0,15
	0,43	C ₄ H ₃	Треонин (Thr)	$(\text{C}_4\text{H}_3+0,5\text{N}_2)+3\text{H}_2\text{O}=\text{C}_4\text{H}_9\text{NO}_3$	0,20
	0,44	C ₉ H ₇	Фенилаланин (Phe)	$(\text{C}_9\text{H}_7+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_9\text{H}_{11}\text{NO}_2$	0,10
	0,44	C ₅ H ₄	Глутамин (Gln)	$(\text{C}_5\text{H}_4+\text{N}_2)+3\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_3$	0,29
	0,45	C ₆ H ₅	Гистидин (His)	$(\text{C}_6\text{H}_5+1,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_6\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_2$	0,33
	0,50	(CH) ₃	Аланин (Ala)*	$(\text{C}_3\text{H}_3+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$	0,25
	0,50	(CH) ₃	Цистеин (Cys)	$(\text{C}_3\text{H}_3+0,5\text{N}_2+0,5\text{S}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$	0,25
	0,50	(CH) ₅	Пролин (Pro)*	$(\text{C}_5\text{H}_5+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_2$	0,17
	0,56	C ₄ H ₅	Амино(изо)бутират (Aba, AIB)*	$(\text{C}_4\text{H}_5+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_4\text{H}_9\text{NO}_2$	0,20
	0,58	C ₅ H ₇	Валин (Val)*	$(\text{C}_5\text{H}_7+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2$	0,17
	0,58	C ₅ H ₇	Метионин (Met)	$(\text{C}_5\text{H}_7+0,5\text{N}_2+0,5\text{S}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2\text{S}$	0,17
	0,60	(C ₂ H ₃) ₃	Лейцин (Leu)*	$(\text{C}_6\text{H}_9+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}_2$	0,14
	0,60	(C ₂ H ₃) ₃	Изолейцин (Ile)*	$(\text{C}_6\text{H}_9+0,5\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}_2$	0,14
	0,63	(C ₃ H ₅) ₂	Лизин (Lys)	$(\text{C}_6\text{H}_{10}+\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_2$	0,25
0,63	(C ₃ H ₅) ₂	Аргинин (Arg)	$(\text{C}_6\text{H}_{10}+2\text{N}_2)+2\text{H}_2\text{O}=\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2$	0,40	

¹ Маракушев А.А., Маракушев С.А. Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 505–521.

² Irvine W.M. Extraterrestrial organic matter: a review // Orig. Life Evol. Biosph. 1998. N 28. P. 365–383; Pizzarello S., Cooper G.W., Flynn G.J. The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles. In: Meteorites and the early solar system. Lauretta & Mc Sween eds. University of Arizona press, 2006. P. 625–651.

Эта последовательность реакций отражает эволюцию углеводородных соединений в исходном флюиде: углеводороды – азотистые углеводороды (органические вещества). При этом высокотемпературный водородный флюид сменяется низкотемпературным гидротермальным раствором. Подобное регрессивное образование органических веществ (сведенных в табл. 2) развивается на всех железо-каменных планетах и спутниках планет-гигантов, не утративших эндогенную активность (и собственные магнитные поля) вследствие полной консолидации. Таблица отражает специфику образования первичных органических веществ на Земле, на которой они представлены более разнообразно, чем на космических объектах. Например, только на Земле в органические вещества входят моносахариды – важнейшие соединения, необходимые для дальнейшей абиогенной эволюции органического мира, характеризующиеся реакциями дегидратации, сведенными в табл. 3. В отличие от ранней эволюции она отражает прогрессивную тенденцию, сопряженную с реакциями дегидратации, требующими значительных энергетических затрат по сравнению с реакциями гидратации. Можно полагать, что подобные реакции свойственны только Земле. благодаря наличию у нее внешних оболочек (стратисферы, гидросферы и атмосферы), богатых кислородом. При поступлении глубинных сильно восстановленных флюидов, содержащийся в них молекулярный водород и углеводороды вступают в экзотермические реакции с кислородом, сопровождающиеся выделением энергии, необходимой для эндотермических абиогенных реакций образования органических веществ высокого эволюционного уровня. Это реакции образования нуклеозидов и нуклеотидов (органических фосфатов), табл. 3. Ими фиксируется свойственная только Земле более высокая энергетическая ступень развития органического вещества на пути образования биосферы. В реакциях участвуют первичные органические вещества, рассмотренные выше (см. табл. 2), которые при образовании нуклеозидов теряют воду (подвергаются дегидратации). Универсально входящие в реакции моносахаридов, которые в окислительных условиях представлены рибозой (C₅H₁₀O₅), а в восстановительных – дезоксирибозой (C₅H₁₀O₄).

Таблица 3

Нуклеозиды и соответствующие им нуклеотиды (приводятся только трифосфаты, ТР) и реакции их образования даны в окислительно-восстановительных фациях рибозы (Rib) и дезоксирибозы (dRib)

Фации	N C+N	Названия и символы	Реакции дегидратации	Углерод-углеводородные предшественники	
				N C+N	Формулы
Рибозы (Rib) C ₅ H ₁₀ O ₅	0,18	Уридин (U)	C ₄ H ₄ N ₂ O ₂ (Ura)+C ₅ H ₁₀ O ₅ =C ₉ H ₁₂ N ₂ O ₆ +H ₂ O	0	(C) ₉
		Фосфат (УТР)	C ₉ H ₁₂ N ₂ O ₆ (U)+3H ₃ PO ₄ =C ₉ H ₁₅ N ₂ O ₁₅ P ₃ +3H ₂ O		
	0,33	Гуанозин (G)	C ₅ H ₅ N ₅ O(Gua)+C ₅ H ₁₀ O ₅ =C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₅ +H ₂ O	0,23	C ₁₀ H ₃
		Фосфат (GTP)	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₅ (G)+3H ₃ PO ₄ =C ₁₀ H ₁₆ N ₅ O ₁₄ P ₃ +3H ₂ O		
	0,33	Аденозин (A)	C ₅ H ₅ N ₅ (Ade)+C ₅ H ₁₀ O ₅ =C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₄ +H ₂ O	0,23	C ₁₀ H ₃
		Фосфат (ATP)	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₄ (A)+3H ₃ PO ₄ =C ₁₀ H ₁₆ N ₅ O ₁₃ P ₃ +3H ₂ O		
0,25	Цитидин (C)	C ₄ H ₅ N ₃ O(Cyt)+C ₅ H ₁₀ O ₅ =C ₉ H ₁₃ N ₃ O ₅ +H ₂ O	0,25	(C ₃ H) ₃	
	Фосфат (CTP)	C ₉ H ₁₃ N ₃ O ₅ (C)+3H ₃ PO ₄ =C ₉ H ₁₆ N ₃ O ₁₄ P ₃ +3H ₂ O			
Дезоксирибозы (dRib) C ₅ H ₁₀ O ₄	0,33	Дезоксигуанозин (dG)	C ₅ H ₅ N ₅ O(Gua)+C ₅ H ₁₀ O ₄ =C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₄ +H ₂ O	0,23	C ₁₀ H ₃
		Фосфат (dGTP)	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₄ (dG)+3H ₃ PO ₄ =C ₁₀ H ₁₆ N ₅ O ₁₃ P ₃ +3H ₂ O		
	0,33	Дезоксиаденозин (dA)	C ₅ H ₅ N ₅ (Ade)+C ₅ H ₁₀ O ₄ =C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₃ +H ₂ O	0,23	C ₁₀ H ₃
		Фосфат (dATP)	C ₁₀ H ₁₃ N ₅ O ₃ (dA)+3H ₃ PO ₄ =C ₁₀ H ₁₆ N ₅ O ₁₂ P ₃ +3H ₂ O		
	0,17	Дезокситимидин (dT)	C ₅ H ₆ N ₂ O ₂ (Thy)+C ₅ H ₁₀ O ₄ =C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₅ +H ₂ O	0,29	(C ₅ H ₂) ₂
		Фосфат (dTTP)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₅ +3H ₃ PO ₄ =C ₁₀ H ₁₇ N ₂ O ₁₄ P ₃ +3H ₂ O		
0,25	Дезоксицитидин (dC)	C ₄ H ₅ N ₃ O+C ₅ H ₁₀ O ₄ =C ₉ H ₁₃ N ₃ O ₄ +H ₂ O	0,36	C ₉ H ₅	
	Фосфат (dCTP)	C ₉ H ₁₃ N ₃ O ₄ +3H ₃ PO ₄ =C ₉ H ₁₆ N ₃ O ₁₃ P ₃ +3H ₂ O			

Образование первичных органических веществ (табл. 2) и последующее их взаимодействие, генерирующее нуклеозиды и нуклеотиды (табл. 3) создает геохимическую основу происхождения жизни¹ и формирования биосферы на Земле. На этой абиогенной основе и возникла возможность образования полинуклеотидов (дезоксирибонуклеиновых – DNA и рибонуклеиновых – RNA) и полипептидов (белков).

На рис. 9 представлены ступени эволюции органического вещества и стадия образования протоклеток. В этой геохимической эволюции образовались все компоненты полипептидов (белков) и полинуклеотидов (нуклеиновых кислот), необходимые для генерации клеток, которые представляют живое вещество – метаболизм и репликация. Геохимическую основу рассмотренного развития органического вещества составляют углеводороды.

С образованием живой клетки завершается процесс химической предбиологической эволюции - полинуклеотиды образуют комплексы с полипептидами и, изолируясь липидной оболочкой от окружающей среды (минимизируя геохимический фактор), образуют «протоклетку» и в дальнейшем популяцию последних общих предшественников (LCA – ‘last common ancestors’). Эволюция этих предшественников около 3,5 млрд. лет тому назад привела к разви-

¹ Маракушев А.А., Маракушев С.А. Геохимические основы теории происхождения жизни // ДАН. 2008. Т. 420. № 1. С. 97–103; Маракушев А.А., Маракушев С.А., Происхождение и флюидная эволюция Земли // Пространство и Время. 2010. № 1. С. 98–118; Marakushev A.A., Marakushev S.A., Geochemical basis for the advent of life, Proceedings of 6th International Conference EMMM-2011, P. 171–173, Moscow: PIN RAS, 2011. 336 p.

тию прокариот (Bacteria, Archaea), затем благодаря их симбиозу – эукариот (Eucaria), рис. 10. Все ветви этого эволюционного древа (включая нас – эукариот, обозначенных как ‘animals’), образовавшиеся в результате дарвиновского естественного отбора, представляют собой современный этап и вершину эволюции Солнечной системы.

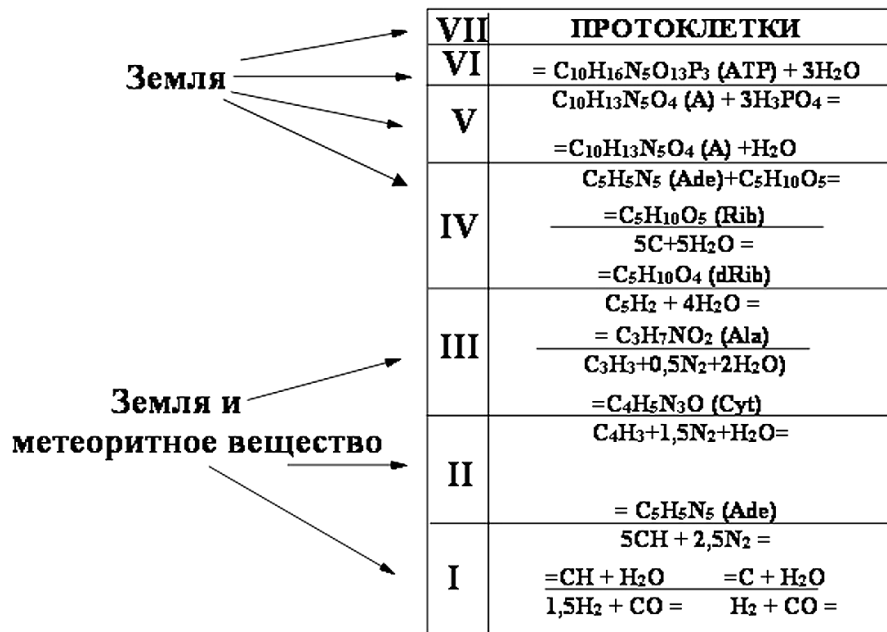


Рис. 9. Ступени геохимической эволюции углерод-углеводородных веществ (I → VII) (приводятся примеры реакций на их границах из табл. 2 и 3): I – водород, углерод и углеводороды, II – аденин, III – аминокислоты, пурины и пиримидины, IV – моносахариды, V – нуклеозиды, VI – нуклеотиды, VII – полинуклеотиды, полипептиды, полисахариды → прото-клетки. Показаны ступени развития органического вещества на земле и в Космосе. Ступени ведут к началу развития биохимической эволюции. Стрелкой обозначено понижение температуры и кислотности флюидов

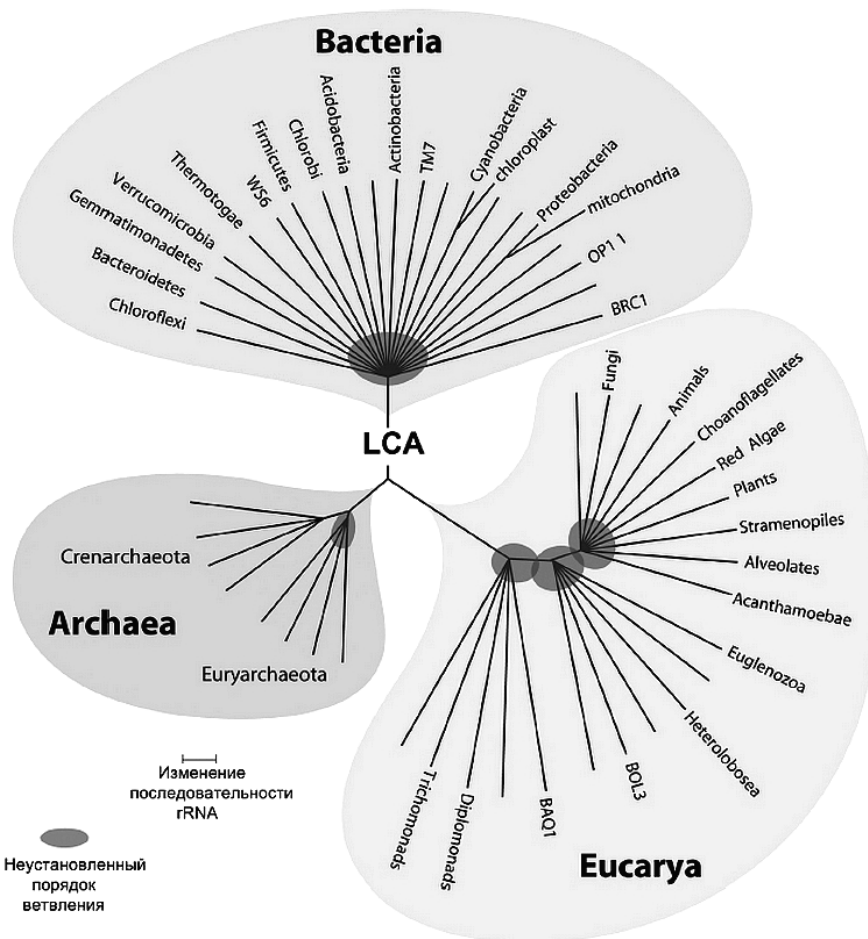


Рис. 10. Молекулярное древо жизни, представленное на основе сравнения последовательностей рибосомальной RNA (rRNA)¹. Показаны только несколько из известных родословных линий. LCA – последний общий предшественник

Таким образом, абиогенное зарождение и развитие органического мира определяется флюидной эволюцией планет, проявляясь как в самых примитивных планетах, например, в древнейших (3–4 млрд. лет) хондритовых пла-

¹ Согласно Pace N. R. Mapping the Tree of Life: Progress and Prospects, Microbiol // Mol. Biol. Rev. 2009. V. 73. N. 4. P. 565–576.

нетах, так и в их современном развитии, например, на планете Титан – спутнике Сатурна. Можно полагать, что и на Земле, возраст которой близок к 4,6 млрд. лет, органический мир зародился очень рано, реализуясь образованием первичных органических веществ (табл. 2). Однако дальнейшее его развитие (табл. 3) требовало затраты энергии, которую могло обеспечить только окисление восстановленных веществ в богатых кислородом оболочках Земли (стратисфере, гидросфере, атмосфере), сформировавшихся в результате ее длительной эволюции.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бинцель Р.П., Баруччи А., Фульчиньони М. Происхождение астероидов // В мире науки. 1991. № 12. С. 54–61.
Bintsel' R.P., Baruchchi A., Ful'chin'oni M. (1991). Proiskhozhdenie asteroidov. V mire nauki. N 12. Pp. 54–61.
- 2 Космос: альманах / Под ред. Капицы С.П. М.: «В мире науки». 2006. 224 с. (Scientific American)
Kosmos: al'manakh. Pod red. Kapitsy S.P. "V mire nauki", Moskva. 2006. 224 p. (Scientific American).
- 3 Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М.: Наука, 1992. 208 с. (перевод на японский язык в 1997, 269 с.).
Marakushev A.A. (1992). Proiskhozhdenie i evolyutsiya Zemli i drugikh planet Solnechnoi sistemy. Nauka, Moskva. 208 p. (Op. cit. on Japan. 1997, 269 p.).
- 4 Маракушев А.А., Безмен Н.И. Эволюция метеоритного вещества, планет и магматических серий. М.: Наука, 1983. 184 с.
Marakushev A.A., Bezmen N.I. (1983). Evolyutsiya meteoritnogo veshchestva, planet i magmaticheskikh serii. Nauka, Moskva. 184 p.
- 5 Маракушев А.А., Грановский Л.Б., Зиновьева Н.Г., Митрейкина О.Б., Чаплыгин О.В. Космическая петрология. М.: Наука, 2003. 387 с.
Marakushev A.A., Granovsky L.B., Zinovieva N.G., Mitreikina O.B., Chaplygin O.V. (2003). Kosmicheskaya petrologiya. Nauka, Moskva. 387 p.
- 6 Маракушев А.А., Маракушев С.А. Геохимические основы теории происхождения жизни // ДАН. 2008. Т. 420. № 1. С. 97–103.
Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2008). Geokhimicheskie osnovy teorii proiskhozhdeniya zhizni. DAN. T. 420. N 1. Pp. 97–103.
- 7 Маракушев А.А., Маракушев С.А. Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 505–521.
Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2008). Obrazovanie neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii. Litologiya i poleznye iskopaemye. T. 43. N 5. Pp. 454–469.
- 8 Маракушев А.А., Маракушев С.А. Происхождение и флюидная эволюция Земли // Пространство и Время. 2010. № 1. С. 98–118.
Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2010). Proiskhozhdenie i flyuidnaya evolyutsiya Zemli. Prostranstvo i Vremya. N 1. Pp. 98–118.
- 9 Маракушев А.А., Панеях Н.А., Сук Н.И. Рудоносность щелочного магматизма // Вторые и третьи чтения памяти ак. В.А. Жарикова. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2011. С. 5–22.
Marakushev A. A., Paneyakh N.A., Suk N.I. (2011). Rudonosnost' shchelochnogo magmatizma. Vtorye i tret'i chteniya pamyati ak. V.A. Zharikova. IPHF RAN, Chernogolovka. Pp. 5–22.
- 10 Brown P., Cepplecha Z., Howkes P.L. et al. The orbit and atmospheric trajectory of the Peekskill meteorite from video records. Nature. 1994. Vol. 367, N 6464. P. 624–626.
- 11 Charbonneau D. Atmosphere out of that world. Nature. 2003. N 422. P. 124–125.
- 12 Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. GCA. 1999. V. 63. N 13/14. Pp. 2089–2104.
- 13 Irvine W.M. Extraterrestrial organic matter: a review. Orig. Life Evol. Biosph. 1998. N 28. P. 365–383.
- 14 Koblinz J. MetBase. Meteoritic Data Retrieval Software. Bremen, Germany. 2010.
- 15 Marakushev A.A., Marakushev S.A. Geochemical basis for the advent of life. Proceedings of 6th International Conference EMMM-2011, P. 171–173, Moscow: PIN RAS, 2011. 336 p.
- 16 Marakushev A.A., Zinovieva N.G., Granovsky L.B. Genetic relations between meteorites and terrestrial and lunar rocks. Petrology. 2010. N 18 (7). P. 677–720.
- 17 Pace N.R. Mapping the Tree of Life: Progress and Prospects. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2009. V. 73. N. 4. P. 565–576.
- 18 Pizzarello S., Cooper G.W., Flynn G.J. The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles. In: Meteorites and the early solar system. Lauretta & Mc Sween eds. University of Arizona press, 2006. P. 625–651.
- 19 Robert F., Rejou-Michel A., and Javoy M. Oxygen isotopic homogeneity of the Earth: new evidence. EPSL. 1992. N 108. P. 1–9.
- 20 Schulz L., Kruse H. Helium, neon, and argon in meteorites - a data compilation. Meteoritics. 1989. N 24. P. 155–172.
- 21 Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etang A., Desert J.-M. et al. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b. Nature. 2003. N 422. P. 143–146.
- 22 Voyager 1, Encounter with Jupiter. National Aeronautics and Space Administration. New York. 1979. No 4. P. 3–44.
- 23 Wasson J.T., Wang S. The histories of ordinary chondrite parent bodies: U, Th-He age distributions. Meteoritics. 1991. N 26. P. 161–167.
- 24 Weisberg M.K., Prinz M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Suigura N., Zashu S., Ebihara M. A new metal-rich chondrite grouplet. Meteoritics and Planet. Sci. 2001. N 36. P. 401–418.