



507902315

P6 - 11677

К.Д.Толстов

СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ
И МАЛЫХ ПЛАНЕТ

1978

P6 - 11677

К.Д.Толстов

СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ
И МАЛЫХ ПЛАНЕТ

Толстов К.Д.

P6 - 11677

Сверхтяжелые элементы в эволюции Земли и малых планет

Сопоставляются данные по строению и эволюции Земли, Луны и астероидов, включая время гравитационной конденсации планет из первичного газа - пылевого облака, поток тепла, время образования коры, плотность и содержание элементов. Показано, что энергия аккреции и радиоактивного распада урана, тория и ^{40}K недостаточна для объяснения эволюции, в особенности Луны и астероидов. Приводятся данные по времени жизни сверхтяжелых элементов и дается оценка возможного их содержания в земных, лунных и метеоритных породах. Показано, что эволюция планет и их энергетический баланс могут быть объяснены на основе энергии радиоактивного распада сверхтяжелых элементов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Tolstov K.D.

P6 - 11677

**Superheavy Elements in the Evolution of the Earth,
the Moon and Asteroids**

Data on the structure and evolution of the Earth, the Moon and asteroids are compared. The time of gravitational planet condensation from primary gas-dust cloud, the flux of heat, the time of crust formation, the density and content of elements are considered. It is shown that the energy of accretions and U, Th and ^{40}K radioactive decay is insufficient to explain the evolution, in particular, of the Moon and asteroids. Data on the lifetime of superheavy elements are presented. An estimate of their possible content in terrestrial, lunar and meteorite ores is made. It is shown that the evolution of planets and their energy balance can be explained using the radioactive decay of superheavy elements.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

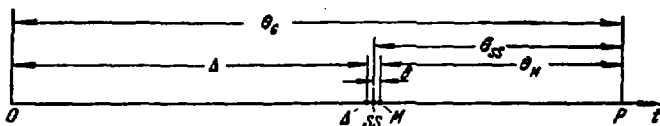
Астрофизический аспект проблемы сверхтяжелых элементов имеет ключевое значение для ряда вопросов эволюции Вселенной, таких как шкала времени эволюции, синтез элементов, образование Солнечной системы. Велико и прикладное значение этой проблемы. Ниже будет показано, что именно сверхтяжелые элементы обуславливали быстрый разогрев Земли, Луны и астероидов, а следовательно, повлияли на структуру внутренних слоев Земли и геологические процессы.

Некоторые современные данные указывают на существование, а ядерно-физические модели и свойства сверхтяжелых элементов — на возможность их естественного синтеза. Эффективность современных методов исследования предопределила открытие природного изотопа ^{244}Pu на Земле, Луне и в метеоритах, период полураспада которого равен $8,2 \cdot 10^7$ лет, а распространенность в Солнечной системе оценивается ^{1/} величиной $8 \cdot 10^{-27}$ г/г.

В нашей работе ^{2/} рассмотрены результаты проведенных поисков СТЭ и предложена совокупность методов по обогащению природных образцов СТЭ с неизвестными ядерно-физическими и химическими свойствами, а также их детектированию в случае, если концентрация СТЭ в земных образцах мала ($\sim 10^{-20}$ г/г.). Это позволит провести прямую проверку развиваемой ниже концепции.

1. ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ

Совокупность известных в настоящее время сведений указывает на то, что окончание нуклеосинтеза и формирование Солнечной системы отделены временем $\sim 10^8$ лет, т.е. много меньшим, чем время существования Солнечной системы ($\sim 5 \cdot 10^9$ лет). На рис. 1, взятом из работы^{3/}, приведена принятая временная шкала эволюции Вселенной.



О — начало нуклеосинтеза, Δ — конец нуклеосинтеза, SS — образование Солнечной системы, М — образование метеоритов и Земли, P — настоящий момент.

Рис. 1.

Считается, что Солнечная система образовалась путем гравитационной конденсации газо-пылевого облака, основная часть которого затрачена на образование самого Солнца. Эволюция оставшейся материи облака происходила под действием гравитации и солнечного излучения. Последнее, а также нагревание за счет энергии аккреции и радиоактивности приводило к испарению газов, в особенности водорода, с поверхности относительно малых планет (в том числе Земли), близких к Солнцу, и концентрации газов на массивных удаленных от Солнца планетах. Вот почему в земной коре содержание водорода на грамм в 10^5 раз меньше, чем его космическая распространенность, а в атмосфере Земли — в $10^{7.4}$ раз меньше, чем в атмосфере Юпитера^{4/} (в расчете на 1 см^2 поверхности). Вследствие этого средняя плотность Земли равна $5,52 \text{ г/см}^3$, а Юпитера — только $1,34 \text{ г/см}^3$.

В дальнейшем будет рассматриваться эволюция Земли, Луны и астероидов, плотности которых сравнительно близки. Химический состав поверхности Земли и Луны известен по прямым наблюдениям, а состав астероидов — по анализу метеоритов. Наибольший из астероидов — Церера имеет радиус 380 км, астероидов с диаметром ~10 км насчитывается ~10⁴. Начальное число астероидов, согласно^{5/}, было гораздо меньше, но они дробились при столкновениях, на что указывает их неправильная форма. Масса всех астероидов составляет только 3% от массы Луны. Большое разнообразие химического и структурного состава метеоритов указывает на неоднородность строения астероидов, аналогично тому, что имеет место на Земле и Луне. Поскольку в процессе аккумуляции протопланетного вещества Луна и Земля, очевидно, прошли через размеры астероидов, то время формирования астероидов в среднем меньше, чем время формирования Луны и Земли. По гипотезе Хойла^{6/}, скорость роста планет в предположении, что материал поступает из неограниченного слоя, определяется уравнением

$$\frac{dm}{dt} = \alpha m^2,$$

где m — масса; α — константа.

На основе этого уравнения время формирования Земли оценено в ~10⁷ лет. Однако, как показано О.Ю.Шмидтом и В.С.Сафроновым, расчеты которого приведены в^{7/}, предположение о неограниченности источника планетного материала нестрогое (рост до 0,99 земных масс происходит за 2,5·10⁸ лет). Скорость роста планет иллюстрирует рис. 2, согласно которому рост Луны происходил за ~0,4·10⁸ лет, а Цереры — 0,1·10⁸ лет.

2. ЭНЕРГИЯ АККРЕЦИИ И РАСПАДА U, Th, ⁴⁰K

Энергия, выделяемая при сближении элементов планеты с массой M от ∞ до сферы равномерной плотности с радиусом R , равна

$$E = \frac{3}{5} \gamma \frac{M^2}{R}.$$

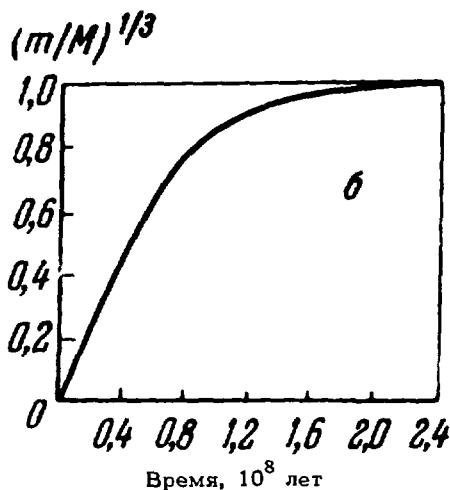


Рис. 2.

Однако значительная часть энергии аккреции была излучена в пространство, когда плотность планеты была малой, а поверхность — значительной. Допустимо предположить, что излучение в пространство за единицу времени стало невелико тогда, когда радиус формирующейся планеты был вдвое больше конечного. В этом случае энергия аккреции, аккумулированная планетой, равна: $E' = \frac{1}{2} E$, и для Земли она составила, $1,1 \cdot 10^{39}$ эрг. Однако значительная часть этой энергии не пошла на нагревание планеты, а затрачена на ее сжатие. По расчетам¹⁷⁾, энергия сжатия мантии и ядра Земли оценена как $\sim 4,2 \cdot 10^{38}$ эрг. Вторым источником энергии, вызвавшим нагревание планет (и обычно считается более существенным) — является радиоактивный распад. Интервал времени 10^8 лет между окончанием нуклеосинтеза и формированием планет позволяет в первом приближении пренебречь энергией распада короткоживущих изотопов типа

^{26}Al , т.к. она была рассеяна в пространстве, и рассматривать энергию распада U , Th и ^{40}K . Содержание их известно только в поверхностном слое Земли – ее коре и океанах, а состав изверженных пород показывает значительное уменьшение с глубиной содержания U и Th . В оценке среднего содержания этих элементов во всей массе Земли имеются большие расхождения, и поэтому более объективно исходить из космической распространенности элементов и плотности Земли. При этом в космической распространенности можно ограничиться атомами H , He , C , O и Ne , т.к. число остальных очень мало. Тогда отношение числа атомов C , O , Ne к числу атомов водорода $\leq 2 \cdot 10^{-2}$. Используя далее космическую распространенность U , Th и K , согласно ^{/8/}, получим концентрацию этих элементов по отношению ко всем, помимо водорода и гелия, равной:

$$W_{\text{U}} = 2,5 \cdot 10^{-10}; \quad W_{\text{Th}} = 5 \cdot 10^{-10}; \quad W_{\text{K}} = 3 \cdot 10^{-5}.$$

В соответствии с предполагаемым содержанием основных элементов во всей массе Земли для ее среднего атомного веса получим величину ~ 35 . Тогда число граммов элемента с атомным весом $- A$ в земле при ее массе M будет равно:

$$Q = \frac{MW_A}{35},$$

откуда получим: $Q_{\text{U}} = 10^{19}$ г, $Q_{\text{Th}} = 2 \cdot 10^{19}$ г, $Q_{\text{K}} = 2 \cdot 10^{23}$ г. Относительное содержание, например, урана составит $1,67 \cdot 10^{-9}$ г/г (в океанической воде его $\sim 1,5 \cdot 10^{-9}$ г/г). В табл. 1 показано содержание U , Th , K в некоторых

Таблица 1. Содержание U , Th и K в г/г.

Образец	U	Th	K
Средняя величина;			
Луна	$0,23 \cdot 10^{-9}$	$0,9 \cdot 10^{-9}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
Земля ^{/7/}	$0,6 \cdot 10^{-8}$		
Хондритные метеориты	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Настоящий расчет	$1,67 \cdot 10^{-9}$		

образцах. Изотопное содержание урана сейчас: $U_{235} 0,9928$, $U_{238} - 0,0072$. Следовательно, во время формирования Земли $4,6 \cdot 10^9$ лет назад имелось $0,75 U_{238}$ и $0,25 U_{235}$, а общее содержание урана было в 2,7 раза больше, чем сейчас. Следовательно, распалось $\sim 0,87 \cdot 10^{19}$ г U_{235} , $1,03 \cdot 10^{19}$ г U_{238} , а также $\sim 0,4 \cdot 10^{19}$ г Th. Выделение энергии U и Th составило $E_{U+Th} = 1,05 \cdot 10^{29}$ кал, в результате распада ${}^{40}K - E_{40K} = 1,1 \cdot 10^{29}$ кал, а суммарное: $E_{U+Th+K} = 9 \cdot 10^{28}$ эрг.

3. ПОТОК ТЕПЛА

Энергия, выделявшаяся в результате аккреции и радиоактивного распада, поступает к поверхности планет и рассеивается в пространстве. Приток тепла на поверхность Земли измерен с достаточной точностью и в среднем составляет $1,2 \cdot 10^{-6}$ кал/см²с. Согласно радиоастрономическим измерениям^{9/}, тепловой поток с поверхности Луны равен $0,85 \cdot 10^{-6}$ кал/см²с. Интегральный тепловой поток за время существования планет оценивается в широких пределах, что связано со многими неизвестными величинами в настоящем и прошлом: внутренней структурой планет, содержанием радиоактивных элементов и их распределением по глубине, теплопроводностью и температурой глубинных слоев, турбулентностью в расплавленном состоянии и т.д. В работе^{7/} на основе термической истории Земли и Луны интегральный поток для Земли оценен в $(0,17 \div 7,4) \cdot 10^{37}$ эрг, а для Луны в $(0,8 \div 3,2) \cdot 10^{36}$ эрг. Если предположить, что все время поток равен нынешнему, то он составит $\sim 4 \cdot 10^{37}$ эрг для Земли и $2 \cdot 10^{36}$ эрг для Луны; очевидно, это и есть нижняя оценка. В стационарной модели^{11/} вследствие малой теплопроводности Земли изменение температуры в ее центре скажется на поверхности только через $2 \cdot 10^{11}$ лет.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС

Для выяснения сложных и во многом противоречивых сведений о строении и эволюции планет рассмотрим энергетический баланс для Земли, Луны и астероида Цереры. Данные для Земли и некоторые - для Луны были расчи-

Таблица 2

	Энергия в эрг.				Энергия распада U, Th, K^{40} эрг.			Энергия СТЗ за $0,5 \cdot 10^9$ лет		
	Аккреции от $R = 2 R_0$	Затрачен-ная на сжатие	Для плавления при $1000^\circ C$	Излученная за счет теплопровод.	За $4,6 \cdot 10^9$ лет		За $0,5 \cdot 10^9$ лет			
					Наш расч.	Литер.	Наш расч.	Литер.	P_{Li}	$A \sim 300$
ЗЕМЛЯ $R_0 = 6371 \text{ км}$ $M = 5,976 \cdot 10^{27} \text{ г}$	$1,12 \cdot 10^{39}$	$4,2 \cdot 10^{38}$	$\sim 10^{38}$	$3,6 \cdot 10^{37}$	$9 \cdot 10^{36}$	$(0,9 \div 1,4) \times 10^{38}$	$1,3 \cdot 10^{36}$	$(1,5 \div 2,3) \times 10^{37}$	$1,4 \cdot 10^{36}$	$1,2 \cdot 10^{38}$
ЛУНА $R_0 = 1738 \text{ км}$ $M = 7,35 \cdot 10^{25}$	$7 \cdot 10^{35}$	-	$1,2 \cdot 10^{36}$	$1,2 \cdot 10^{36}$	$1,1 \cdot 10^{35}$	$1,5 \div 1,75 \times 10^{36}$	$1,6 \cdot 10^{34}$	$2,5 \cdot 10^{35}$	$1,7 \cdot 10^{34}$	$1,5 \cdot 10^{36}$
ЦЕРЕРА $R_0 = 380 \text{ км}$ $M = 10^{24} \text{ г}$	$5,3 \cdot 10^{32}$	-	$1,6 \cdot 10^{34}$	$1,6 \cdot 10^{34}$	$1,5 \cdot 10^{32}$	-	$2,2 \cdot 10^{31}$	-	$2,3 \cdot 10^{32}$	$2 \cdot 10^{34}$

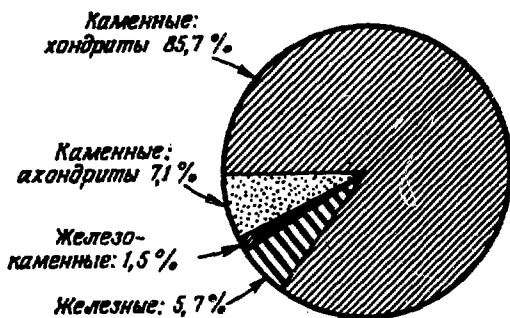
таны ранее. Допустимо предположить, что средняя концентрация U, Th и K для Луны и Цереры одинакова с земной. Это предположение, во всяком случае, более естественно, чем любое другое, т.к. формирование произошло из единого протопланетного материала примерно в одно и то же время, и при относительно небольшом различии расстояния от Солнца. Так же близки средние плотности и содержание многих элементов в коре Земли, Луны и метеоритах. В табл. 2 приведены результаты расчетов и опубликованные данные. Большое различие в массах и радиусах Земли, Луны и Цереры, а следовательно, в энергии аккреции, плавления и рассеянной в пространство - позволяет провести сопоставление энергетического баланса. Как следует из табл. 2, только для Земли, и в основном за счет энергии аккреции, можно согласовать баланс энергии, необходимой для ее сжатия, плавления и излучения. Это уже нельзя сделать для Луны, даже при необоснованных литературных оценках по содержанию радиоактивных элементов. Большое (30-кратное) расхождение баланса имеет место для Цереры, а с уменьшением массы астероидов оно будет еще увеличиваться. Таким образом, приведенный энергетический баланс не может обеспечить плавления Луны и астероидов, что, как будет показано ниже, следует из известных данных по их эволюции.

5. КОРА ЗЕМЛИ И ЛУНЫ, МЕТЕОРИТЫ И ПРОЦЕССЫ В ИХ РОДИТЕЛЬСКИХ ТЕЛАХ

Согласно радиоактивной датировке, возраст древнейших земных пород, обнаруженных в Антарктиде, составляет $(4,0 \pm 0,1) \cdot 10^9$ лет. На Луне найдены породы возрастом не менее $4,10^9$ лет, но так как ее поверхность исследована совсем мало, то возможно наличие и более древних пород. Следовательно, с момента формирования Земли и Луны прошло не более $5 \cdot 10^8$ лет до начала кристаллизации на их поверхности первой коры. О породах астероидов пока можно судить только по метеоритам, которые с момента остывания астероидов до падения на Землю проходят сложный путь дробления, воздействия на их поверхность космических лучей и нагрева в ат-

мосфере Земли при падении.^{/11/} Однако внутренняя часть некоторых метеоритов сохраняется практически неизменной с момента затвердевания родительского астероида. Соотношение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в результате распада изотопов урана дает для возраста метеоритов различных типов $\sim 4,5 \cdot 10^9$ лет, а датирование по распаду $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$ — $\sim 4,4 \cdot 10^9$ лет. Согласно^{/5/}, это показывает, что тогда "произошло событие, которое привело к химическому фракционированию метеоритов", а именно — к плавлению вещества родительского тела.

При всей сложности проблемы большое разнообразие состава и строения метеоритов не дает возможность проследить процессы, имевшие место с момента образования родительского тела до падения метеорита на Землю. Рис. 3 из работы^{/5/} показывает распределение найденных метеоритов по их типам. Основной тип — каменные хондриты (от греческого хондрос — пшеничное зерно) имеют сложную структуру. В отличие от земных пород элементы в хондритах не дифференцированы, т.е. они не испытали действия тех процессов, которые имели место в земной коре. Ахондриты имеют однородную структуру и в большинстве сходны с земными изверженными поро-



Соотношение хондридов, ахондридов, железо-каменных и железных метеоритов среди упавших на Землю.

Рис. 3.

дами. Железные метеориты имеют преимущественно сложную структуру и часто содержат пластины со сплавом никеля, расположенные параллельно четырем граням октаэдра. Такую структуру невозможно воспроизвести в лаборатории, т.к., согласно расчетам^{/12/} требуется длительное охлаждение, $1 \div 10^6$ за миллион лет, т.е. октаэдры образовались глубоко внутри тела с низкой теплопроводностью и радиусом $\sim 70 \div 200$ км. Аналогичный вывод сделан и в отношении скорости остывания хондритов, которые не могут образоваться в массе породы, сдавленной со всех сторон, по поводу чего в работе^{/5/} сказано: "Следовательно, процесс нагревания и остывания следовал за образованием".

Таким образом, структура метеоритов различных типов показывает, что астероиды, из которых они образовались, были нагреты до температуры плавления, метаморфизма и спекания хондритной основы, а также выплавления каменной оболочки по типу земной коры.

Процесс аккреции занимал интервал времени в десятки, а остывания – сотни миллионов лет. Породы ряда метеоритов являются древнейшими из известных, возраст которых приближается к возрасту Солнечной системы.

6. РОЛЬ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭВОЛЮЦИИ

Вначале сконцентрируем основные сведения по этому вопросу.

Земля. Нельзя сделать однозначного заключения – достаточно ли энергия аккреции для расплава Земли с учетом энергии, затраченной на ее сжатие, и излученной в пространство. Расплав Земли за счет энергии распада U, Th и K требует увеличения в десятки раз концентрации этих элементов по сравнению с ожидаемой по космической распространенности всех элементов. Кроме того, это увеличение вследствие малой теплопроводности силикатных расплавов должно привести к слишком сильному разогреву Земли и расплавленному состоянию ее глубинных слоев в настоящее время, что противоречит сейсмическим данным. Это также будет противоречить

образованию земной коры за $5 \cdot 10^8$ лет. Следовательно, необходим дополнительный источник энергии радиоактивного распада и с более коротким, по сравнению с ураном, временем распада.

В ряде работ, например,^{/12-14/}, предполагался распад СТЭ, а также ^{244}Pu . Многочисленные попытки прямого детектирования СТЭ, обзор которых сделан в^{/2/}, по существу не дали пока однозначных результатов, а достигнутый предел соответствует концентрации СТЭ $\sim 10^{-14}$ г/г. Однако в некоторых земных породах^{/15,16/} были обнаружены так называемые гигантские гало - плюсохронические сферы с радиусом до 110 мкм, вокруг крупинок, которые могут быть объяснены только вылетом из них α -частиц с энергией до 15 МэВ. Следовательно, на основании закона Гейгера-Неттола в крупинках содержался элемент с большим Z , период полураспада которого в^{/2/} оценен как $(0,1 \div 0,2) \cdot 10^9$ лет.

Луна. Целиком или, во всяком случае, частично была в расплавленном состоянии. По последним данным^{/17/}, свойства кристаллических лунных пород указывают на то, что в прошлом Луна была окружена сильным магнитным полем. Следовательно, она имела жидкое железное ядро, магнитогидродинамическое состояние которого поддерживалось мощным источником энергии. Усредненная за 10^9 лет его мощность оценивается в 10^{12} Вт, и в^{/18/} сделан вывод о нагреве Луны за счет распада СТЭ. Дальнейшее изучение пород показывает, что уменьшение вдвое напряженности магнитного поля происходило $\sim 10^8$ лет, т.е. период полураспада СТЭ совпадает с его оценкой, сделанной ранее^{/2/}. По данным табл. 2, энерговыделение за счет аккреции и распада U, Th и K недостаточно для расплава Луны, а усредненная за первые $0,5 \cdot 10^9$ лет мощность составляет только $6 \cdot 10^9$ Вт, или 10^{11} Вт по завышенным оценкам. Кроме того, на основе выводов работы^{/7/}, расплавление Луны требовало бы времени $2,8 \cdot 10^9$ лет, а ее кора образовалась уже через $0,5 \cdot 10^8$ лет. Согласно^{/7,18/}, подтверждается вывод о том, что содержание радиоактивных элементов значительно ниже, чем в хондритах L и H групп.

Астероиды. Ранее обосновано, что астероиды были нагреты до плавления и метаморфизма, а процесс остывания и образования каменной оболочки занимал сотни миллионов лет. Как следует из табл. 2, расплав за счет энергии U, Th и K требует увеличения в 100 раз их концентрации, следующей из космической распространенности, но тогда исключено быстрое остывание астероидов, т.к. приток тепла за последующее время будет много больше, чем за первые $5 \cdot 10^8$ лет. Приведенные данные, а также обнаруженные несоответствия можно объяснить, включив в рассмотрение энергию СТЭ с периодом полураспада $\sim 10^8$ лет. На рис. 4, взятом из работы^{/18/}, приведена, по известным космическим данным, распространенность элементов к моменту окончания нуклеосинтеза и расчетная кривая вплоть до СТЭ с $A \sim 300$. Согласие расчетной

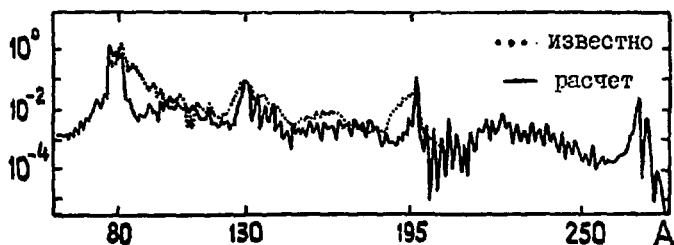


Рис. 4.

кривой при ее сложной форме с экспериментальными данными указывает на то, что и в области СТЭ следует ожидать справедливости расчета, во всяком случае по порядку величины. Для ^{244}Pu расчет дает значение, близкое к урану. Это, согласно параграфу 2 данной работы, соответствует относительной концентрации ^{244}Pu при формировании планет $\sim 10^{-9}$ г/г, что согласуется с оценкой современной распространенности ^{244}Pu в Солнечной системе. (По данным работы^{/1/}, сейчас ^{244}Pu $8 \cdot 10^{-27}$ г/г, что при пересчете к моменту формирования планет дает для его концентрации величину $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ г/г). В распаде

^{244}Pu → ^{232}Th выделяется энергия 17 МэВ на ядро, и суммарное энерговыделение, приведенное в табл. 2, относительно невелико.

В области значений $A \sim 300$, что соответствует магическим числам: для протонов = 114 и 126, а для нейтронов 184, на рис. 4 наблюдается пик. Это обуславливается малой величиной сечения захвата нейтронов магическими ядрами, аналогично тому, что известно для ^{208}Pb . Высота пика в несколько десятков раз больше значений для U и Th. В соответствии с этим примем, что в момент формирования планет сверхтяжелых ядер с $A = 300$ было в десять раз больше, чем урана. Они распадались до изотопов свинца и в цепи распада имелось звено с $T_{1/2} = 10^8$ лет. Следовательно, происходило ~ 23 α -распадов, и, если принять среднюю энергию на один α -распад (а следует ожидать большего значения, т.к. больше Z) одинаковой с ее величиной в урановой цепи, то суммарное выделение на ядро составит ~ 150 МэВ. В результате получим, что за $5 \cdot 10^8$ лет энерговыделение для Земли составит $\sim 1,2 \cdot 10^{38}$ эрг; Луны $\sim 1,5 \cdot 10^{38}$ эрг, Цереры $\sim 2 \cdot 10^{34}$ эрг. Согласно табл. 2, эти величины могут полностью обеспечить энергетический баланс, необходимый для расплава планет, причем почти половина энергии выделялась в первые 10^8 лет, обеспечивая быстрый разогрев планет, что следует из данных их эволюции. Если период полураспада СТЭ принять равным $2 \cdot 10^8$ лет, то энергия, выделяемая за $5 \cdot 10^8$ лет, уменьшится только на 20%.

Таким образом: обоснованные предположения об относительной концентрации в планетах U, Th и K, возможная концентрация СТЭ и оценка периода их полураспада $T_{1/2} = 10^8$ лет, на основе данных, обнаруженных на Земле и Луне /1.18/, приводят к согласованию сведений по эволюции Земли, Луны и астероидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neffman D.C. et al. Nature 234, 132 (1971)
2. Толстов К.Д. ОИЯИ Р6-10515, Дубна (1977).
3. Чечев В.П., Крамаровский Я.М. УФН 116, 687 (1975).

4. Аллен К.У. *Астрофизические величины*. "Мир", М., 1977.
5. Вуд Д. *Метеориты и происхождение Солнечной системы*. "Мир", М., 1971.
6. Hoyle F. *Rep. Astr. S.* 106 (1946).
7. Любимова Е.А. *Термика Земли и Луны*. "Наука", М., 1968.
8. *Таблицы физических величин*. (Под редакцией акад. И.К.Кикоина), Атомиздат, 1976.
9. Троицкий В.С. *Радиофизика X*, 9 (1967).
10. Shiefter L.B. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 52 (1941).
11. Лаврухина А.К., Колесов Г.М. *Образование химических элементов в космических телах*. М., (1962).
12. Wood J.A. *The Cooling Rates and Parent Geochim. Cosmochim Acta* 31, 1733 (1977).
13. Войткевич Г.В. *Радиоактивность и история Земли*, "Наука", М., 1970.
14. Fleisher R.L. et al. *Journal Geophys. Res.* 72, 331 (1967).
15. Wiman E. *Bull. Inst. Univ. Uppsala* 23, 1 (1930).
16. Gentry R.V. *Science* 169, 670 (1970).
17. Runcorn K. *New Scientist*, v. 76, No. 1080, p. 562 (1977).
18. Shramm D, Norman E. *3-th Intern. Conf. on Nucl far from Stability*. Corsica, 1976, p. 570.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июня 1978 года.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Заказ 25364. Тираж 475. Уч.-изд. листов 0,85.

Редактор Б.В.Колесова.

Корректор Т.Е.Жильцова.

Подписано к печати 20,9.78 г.