

Г. В. ВОЙТКЕВИЧ

**О ВОЗРАСТЕ ЗЕМЛИ**

(Представлено академиком Д. С. Белянкиным 10 I 1951)

Современные способы расчета возраста Земли основаны на данных о соотношении изотопов урана  $U^{235}/U^{238}$  и соотношении изотопов свинца  $Pb^{207}/Pb^{206}$ . Изотопы  $Pb^{207}$  и  $Pb^{206}$  соответствуют конечным продуктам распада актиноуранового и уранового семейств AcD и RaG. В 1937 г. И. Е. Старик исследовал вопрос о возрасте Земли (1). По Старику, следует различать возраст геологический и возраст астрофизический. Геологический возраст соответствует времени, прошедшему с начала существования земной коры. Он может быть приближенно отождествлен с возрастом древнейших минералов земной коры, который получен непосредственно из данных радиохимического анализа радиоэлементов и продуктов их распада. Астрофизический возраст — время, прошедшее с начала образования Земли как космического тела. Принимая, что основная масса земного свинца радиоактивного происхождения, И. Е. Старик использовал отношения  $U^{235}/U^{238}$  и  $Pb^{207}/Pb^{206}$  для определения астрофизического возраста Земли. Он получил величину возраста  $3 \cdot 10^9$  лет, которая косвенно подтверждалась в то время возрастом некоторых железных метеоритов по гелию и общим содержанием свинца и радиоэлементов в земной коре. Однако, как отмечал Старик, в то время не было достаточного количества данных об изотопном составе свинца. Кроме того, константа распада актиноурана, взятая им, оказалась неверной. В настоящее время она уточнена и принимается  $\lambda_{AcU} = 9,72 \cdot 10^{-10}$  лет<sup>-1</sup>.

Благодаря систематическим масс-спектральным определениям удалось обнаружить одну замечательную закономерность в колебаниях изотопного состава свинца, извлеченного из обычных свинцовых минералов (2, 3). Те свинцовые минералы, которые содержат в повышенном количестве, например, изотоп  $Pb^{206}$ , соответственно в большем количестве содержат также и изотопы  $Pb^{207}$ ,  $Pb^{208}$ . Обнаруживается такая особенность: будто к свинцу в разных случаях равномерно добавляется какая-то часть продуктов распада урана (RaG-206), актино-

Таблица 1

	$Pb^{204}$	$Pb^{206}$	$Pb^{207}$	$Pb^{208}$
Свинец смешанный . . . . .	1	19,30	15,73	39,50
Свинец первичный (из галенита гренландских месторождений Ивигтут)	1	14,65	14,65	34,47
Радиогенная надбавка . . . . .	—	4,65 (RaG)	1,08 (AcD)	5,03 (ThD)

урана (AcD-207), тория (ThD-208). Свинец с минимальным содержанием изотопов 206, 207, 208 можно принять в качестве первичного свинца. Остальной свинец из других минералов является смешанным. Он состоит из первичного свинца + радиогенный свинец, накопившийся до образования данного свинцового минерала. В табл. 1 иллюстрируется это заключение, содержание изотопа  $Pb^{204}$  принято за единицу.

При наличии аналогичных данных, полученных из двух десятков свинцовых минералов, можно использовать два уравнения для определения времени накопления радиогенной надбавки  $t$ :

$$\frac{AcD}{RaG} = \frac{AcU}{U} \frac{e^{\lambda_{Ac}t} - 1}{e^{\lambda_U t} - 1}, \quad (1)$$

$$\frac{ThD}{RaG} = \frac{Th}{U} \frac{e^{\lambda_{Th}t} - 1}{e^{\lambda_U t} - 1}. \quad (2)$$

Принимая за исходные величины  $AcD/RaG = 0,250$ ,  $ThD/RaG = 0,93$ ,  $AcU/U = 1/139$  и  $Th/U$  от 3,5 до 4, можно легко показать, что время  $t$ , полученное по обоим уравнениям, совпадает. Таким образом, повышенная надбавка изотопов 206, 207, 208 действительно является радиогенной. Определение возраста Земли с учетом, что радиогенная надбавка накопилась в течение жизни нашей планеты, впервые было произведено Э. К. Герлингом в 1942 г. Соотношение  $AcD/RaG$  было им взято равным 0,253 для свинцовых минералов возраста  $130 \cdot 10^6$  лет. Возраст Земли оказался порядка  $3,5 \cdot 10^9$  лет (4). Подобные расчеты, произведенные несколько позже (в 1946 г.) А. Холмсом, дали результаты довольно близкие, порядка  $3,3 \cdot 10^9$  лет. Привлекая также другие данные о распространении свинца в горных породах и соотношение  $Th/U$  по данным определений, можно считать, что величина  $3,3 \cdot 10^9$  лет недалека от истины (5).

Однако возникает очень важный вопрос. Выражает ли величина  $3,3 \cdot 10^9$  лет геологический или астрофизический возраст Земли? Исходя из многочисленных полевых наблюдений, а также из данных о распространении свинца в массивных породах, можно считать, что свинец большинства рудных месторождений генетически связан с кислыми — гранитными породами. Поэтому следует принять, что накопление радиогенной надбавки произошло в гранитной оболочке Земли. Определяя возраст по радиогенной надбавке, мы этим самым определяем возраст сиалической оболочки Земли или, во всяком случае, возраст верхних геосфер, но отнюдь не возраст Земли как космического тела. Изменение изотопных соотношений в радиогенной надбавке происходило совершенно независимо от магматических метаморфических и денудационных процессов во время ранних стадий формирования и существования сиалитического материала. Возраст древнейших минералов порядка  $2 \cdot 10^9$  лет характеризует время, прошедшее с момента последнего усиленного метаморфизма верхних геосфер, но не их возраст. Судя по характеру древнейших архейских пород, первичные осадки Земли могли испытать неоднократный усиленный метаморфизм в промежутке между  $2 \cdot 10^9$  и  $3,3 \cdot 10^9$  лет. А. Холмс признает, что полученная им величина  $3,3 \cdot 10^9$  лет характеризует возраст сиала. Однако он отождествляет возраст сиала с возрастом Земли, ссылаясь на теоретические работы Г. Джеффриса, по которым остывание огненно-жидкой Земли происходило очень быстро под влиянием вертикальных конвективных токов за время 15 000—20 000 лет (6). Очевидно, что, несмотря на физическую правдоподобность, расчеты Джеффриса исходят из космогонической гипотезы о первичном огненно-жидком состоянии Земли.

Очень сомнительно, чтобы дифференциация земного вещества по отдельным геосферам была столь внезапной, как это получается у Джеффриса. Гораздо более вероятным является предположение, что наша планета имела более длительную предисторию до  $3,3 \cdot 10^9$  лет, до образования гранитной геосферы, которой большинство геологов и петрографов приписывает вторичное происхождение. Вторичное происхождение гранитной геосферы может быть принято к тому же независимо от существующих гипотез о происхождении гранитов. В отношении величины порядка  $3 \cdot 10^9$  лет, полученной, правда, из других данных, В. И. Вернадский, глубоко осветивший проблемы радиогеологии, высказывался, что ее нельзя считать пределом при эмпирическом изучении явлений (7).

Верхний предел космического (астрофизического) возраста Земли не может быть выше времени существования наиболее быстро распадающегося актиноурана ( $\text{AcU-235}$ ), полупериод которого равен  $700 \cdot 10^6$  лет. По нашим современным представлениям, в термодинамических условиях Земли немислим синтез элементов, тем более таких тяжелых, как уран. Чтобы определить возраст актиноурана, в первом приближении можно допустить, что все изотопы  $206$  и  $207$  в обычном смешанном свинце являются радиогенными. Часть из них образовалась за время существования свинца в виде отмеченной радиогенной надбавки, остальная часть — до этого времени. Наш расчет будет в принципе аналогичен расчету И. Е. Старика. Однако мы берем более точные константы распада  $\lambda_{\text{AcU}} = 9,72 \cdot 10^{-10}$  лет $^{-1}$  и  $\lambda_{\text{U}} = 1,52 \cdot 10^{-10}$  лет $^{-1}$ . Для расчета используем уравнение:

$$\frac{\text{Pb}^{207}}{\text{Pb}^{206}} = \frac{\text{AcU}}{\text{U}} \frac{e^{\lambda_{\text{AcU}}t} - 1}{e^{\lambda_{\text{U}}t} - 1} \quad (3)$$

Средний изотопный состав свинца, по многим данным, выражается следующим образом (в процентах):

$\text{Pb}^{204}$	$\text{Pb}^{206}$	$\text{Pb}^{207}$	$\text{Pb}^{208}$
1,2	26	21	51,7

Отсюда соотношение  $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206} = 0,80$ . Подставляя это значение в уравнение (3), а также  $\text{AcU}/\text{U} = 1/139$ , и решая относительно  $t$ , получаем  $5 \cdot 10^9$  лет. Если же считать, что изотопный состав свинца до образования гранитной геосферы выражался одинаковым количеством  $\text{Pb}^{207}$  и  $\text{Pb}^{206}$  и соотношение их было равным 1, как это имеет место для свинца из галенитов месторождений Ивигтут в Гренландии, то можно произвести несколько иной расчет. Соотношение  $\text{AcU}/\text{U}$   $3,3 \cdot 10^9$  лет тому назад было равно 1:10. Подставляя эти значения в уравнение (3), находим для  $t$   $1 \cdot 10^9$  лет. Таким образом, изотопный состав первичного свинца мог образоваться при длительности распада урана и актиноурана порядка  $1 \cdot 10^9$  лет. Отсюда существование обоих изотопов урана выражается временем  $3,3 \cdot 10^9 + 1 \cdot 10^9 = 4,3 \cdot 10^9$  лет.

Косвенные подтверждения этих величин можно искать в накоплении свинца и гелия в метеоритах. При этом мы будем исходить из следующих двух положений: 1) средний химический состав метеоритов соответствует среднему составу Земли; 2) изотопный состав элементов Земли и метеоритов одинаков. Первое положение крайне вероятно и разбиралось неоднократно многими исследователями. Второе положение эмпирически доказано для 10 элементов. Недавно опубликованные данные А. Трофимова об изотопном составе метеоритного углерода подтверждают это положение, и мы имеем право полностью согласиться с его заключением о том, что вещество Земли и метеоритов одного ядерного генезиса (8). Допуская, что изотопные соот-

ношения метеоритных урана и свинца близки к земным и используя данные об их распространении в метеоритах по А. Ферсману и И. и В. Ноддакам, можно легко подсчитать среднее содержание  $\text{AcU}^{235}$  и  $\text{Pb}^{207}$  в метеоритах (<sup>9,10</sup>). Для определения возраста  $\text{AcU}$  используем формулу:

$$t = \frac{1}{0,43429 \lambda_{\text{AcU}}} \log_{10} \left( \frac{\text{AcU}^{235} + \text{Pb}^{207}}{\text{AcU}^{235}} \right). \quad (4)$$

Подставляя соответствующие численные значения, получаем: для исходных данных А. Ферсмана  $6 \cdot 10^9$  лет, для данных И. и В. Ноддаков  $5,7 \cdot 10^9$  лет.

Определения возраста железных метеоритов гелиевым методом, проделанные Ф. Панетом и его сотрудниками, дали довольно разнообразные величины от  $10^6$  до  $6,8 \cdot 10^9$  лет. Однако из этих данных намечается довольно ясно группа „древних“ метеоритов в пределах от  $4 \cdot 10^9$  до  $6,8 \cdot 10^9$  лет. В этих метеоритах наиболее частые величины возраста группируются около  $5 \cdot 10^9$  лет. Среднее значение для группы „древних“ метеоритов равно  $5,3 \cdot 10^9$  лет (<sup>11</sup>).

Подводя итог, мы можем сравнить полученные результаты:

Возраст урана по отношению $\text{Pb}^{207} / \text{Pb}^{206}$	
в обычном смешанном свинце земной коры . . . . .	$5 \cdot 10^9$ лет
Возраст урана по отношению $\text{Pb}^{207} / \text{Pb}^{206}$	
в первичном свинце Земли . . . . .	$4,3 \cdot 10^9$ лет
Возраст актиноурана в метеоритах по свинцу . . . . .	$5,7 - 6 \cdot 10^9$ лет
Возраст урана по гелию в железных метеоритах . . . . .	$5,3 \cdot 10^9$ лет

Нетрудно видеть, что результаты, полученные разными способами, довольно близки между собой. Учитывая это довольно близкое совпадение, мы вправе сделать следующий вывод.

Наличие продуктов распада урана и особенно одного из его изотопов — актиноурана — в изученном материале солнечной системы ограничивает время его существования как элемента величиной 5 миллиардов лет. Пожалуй, эту величину следует рассматривать как максимальную, так как мы совершенно игнорировали возможность присутствия нерадиогенного свинца и нерадиогенного гелия.

Отсюда истинный возраст Земли как самостоятельно эволюционирующего космического тела должен выражаться величиной между  $3,3 \cdot 10^9$  и  $5 \cdot 10^9$  лет. Подтверждение и уточнение этих чисел может быть произведено определением изотопного состава свинца и гелия метеоритов.

Поступило  
25 XI 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> И. Е. Старик, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., № 2 (1937). <sup>2</sup> А. Nier, Journ. Am. Chem. Soc., 10, 1571 (1938). <sup>3</sup> А. Nier, Phys. Rev., 60, № 2, 112 (1941). <sup>4</sup> Э. К. Герлинг, ДАН, 34, № 9 (1942). <sup>5</sup> А. Holmes, Nature, 157, 680 (1946). <sup>6</sup> А. Holmes, Geol. Mag., 74, № 2, 193 (1947). <sup>7</sup> В. И. Вернадский, Очерки геохимии, 1934. <sup>8</sup> А. В. Трофимов, ДАН, 72, № 4 (1950). <sup>9</sup> А. Е. Ферсман, Геохимия, 1, 1934. <sup>10</sup> J. u. W. Noddack, Svensk Kemisk Tidskrift, 46, 173 (1934). <sup>11</sup> F. Paneth, Astr. Newsletter, No. 36, 9 (1946).