

Член-корреспондент АН СССР А. П. ВИНОГРАДОВ, И. К. ЗАДОРЖНЫЙ  
и С. И. ЗЫКОВ

**ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СВИНЦОВ И ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ \***

Природный свинец является смесью изотопов  $Pb^{204}$ ,  $Pb^{206}$ ,  $Pb^{207}$  и  $Pb^{208}$ , причем последние три непрерывно накапливаются за счет радиоактивного распада уранов и тория. Поэтому имеется принципиальная возможность из отношения этих изотопов вычислить возраст свинцов и, следовательно, возраст отвердения земной коры и возраст Земли. Полученные в свое время Ниром <sup>(2)</sup> экспериментальные данные по изотопному составу свинца для 25 свинцовых минералов предоставили возможность многим авторам произвести подобного рода вычисления. Однако их данные не согласуются между собой (см. табл. 1).

Таблица 1

Возраст Земли по данным разных авторов

Автор	Год определения	Характер определяемого возраста	Возраст (лет)
Старик И. Е. . . . .	1936	Возраст земной коры . . . . .	$3 \div 4 \cdot 10^9$
Герлинг Э. К. . . . .	1942	Возраст Земли . . . . .	$3,23 \cdot 10^9$
Косци . . . . .	1943	Возраст земной материи . . . . .	$5,33 \cdot 10^9$
Холмс . . . . .	1946	Возраст земной коры . . . . .	$3,35 \cdot 10^9$
Гоутерманс . . . . .	1947	Возраст урана . . . . .	$2,9 \cdot 10^9$
Джефрейс . . . . .	1948—1949	Возраст земной коры . . . . .	$4,0 \cdot 10^9$
Буллард и Стенлей . . . . .	1949	Возраст земной коры . . . . .	$3,29 \cdot 10^9$
Альфер и Герман . . . . .	1951	Максим. возраст Земли . . . . .	$5,3 \cdot 10^9$

Нами был изучен масс-спектральным путем изотопный состав свинца 32 галенитов разных возрастов от  $25 \cdot 10^6$  лет до  $1600 \cdot 10^6$  лет (см. табл. 2).

Точность определения изотопного состава  $\pm 1\%$ . Свыше 30% образцов были измерены по несколько раз, причем получены были хорошо совпадающие результаты. Для образцов №№ 21, 22, 23 и 24 (табл. 2), исследованных нами и Ниром, были получены совершенно идентичные данные. Несмотря на естественно небольшие изменения изотопного состава свинцов, особенно за последние  $1500 \cdot 10^6$  лет, эти изменения точно определяются и имеют закономерный характер. Однако наблюдаются и отклонения в изотопном составе некоторых образцов, например №№ 26, 27 и 29 у нас и образцов Джоплин, галенит из Австрии и Ивигтут у Нира.

Мы произвели математическую обработку всех данных, своих и Нира, всего по 57 образцам. Вычисление возраста было произведено

\* Доложено на собрании Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР, посвященном памяти В. И. Вернадского, 7 I 1952 г. и на конференции по возрасту Земли 14 IV 1952 г.

## Изотопный состав свинца

№ пп.	Месторождение	Геологический возраст, лет $\times 10^{-8}$	Распростран. изотопов			
			204	206	207	208
1	Монте-Негро, Боливия	Неоген 25	1,00	17,75	15,20	37,88
2	Приморье, ДВК	Палеоген 50	1,00	17,38	14,91	36,70
3	Segavezza, Италия	Юный третичный 50	1,00	18,51	16,05	38,13
4	ДВК	Палеоген 60	1,00	18,60	16,11	38,95
5	Зангезур, Арм.ССР	Палеоген — юра 60	1,00	17,84	15,42	38,16
6	Сев. Кавказ	В. мел 60	1,00	17,32	14,98	36,54
7	Якутия	Н. мел 100	1,00	17,58	15,09	37,22
8	Болеслав, Карпаты	Неоген или мезозой- ский 130	1,00	18,42	15,89	39,21
9	Сев. Кавказ	Палеоген — в. юра 130	1,00	18,84	16,16	38,98
10	Садон, Сев. Кавказ	Палеоген — в. юра 130	1,00	18,37	16,00	39,27
11	Армянская ССР	Палеоген — юра 130	1,00	18,45	15,80	39,01
12	Забайкалье	В. юра — триас 180	1,00	18,22	15,85	39,27
13	Южная Киргизия	Пермь 200	1,00	18,02	16,26	38,41
14	Кураменский хр., Ср. Азия	Пермь 200	1,00	18,79	16,64	38,55
15	Сев. Киргизия	Пермь 200	1,00	17,68	15,43	38,42
16	Киргизская ССР	Пермь	1,00	18,51	15,79	39,22
17	Кураменский хр.	Пермь — в. карбон 220	1,00	17,65	15,45	38,26
18	Южный забой, Алтай	Пермь — в. карбон 220	1,00	18,03	15,96	37,73
19	Зап. Тянь-Шань	Пермь — в. карбон 220	1,00	17,27	15,11	36,89
20	Каратау	Пермь — в. карбон 220	1,00	17,04	15,07	37,13
21	Нассау, Германия	Пермь — карбон 220	1,00	18,15	15,69	37,56
22	Саксония, Германия	Пермь — карбон 220	1,00	17,34	15,37	37,60
23	Джоплин, США	В. карбон 220	1,00	22,42	16,01	41,47
24	Джоплин, США	В. карбон 220	1,00	21,78	15,72	40,76
25	Нагольный кряж, Украина	Карбон 260	1,00	18,49	16,10	39,59
26	Зап. Прибайкалье	Карбон — девон 260	1,00	18,64	16,46	40,12
27	Сев. Урал	Пермь — девон 320	1,00	20,10	16,08	39,92
28	Сев.-зап. Казахстан	Пермь — девон 320	1,00	16,02	14,38	34,44
29	Прибалхашье, Центр. Ка- захстан	Пермь — девон 320	1,00	19,70	15,80	37,68
30	Центр. Казахстан	Пермь — девон 320	1,00	17,49	15,13	37,18
31	Карело-Фин. ССР	Докембрий 1600	1,00	14,26	14,77	33,23
32	Кинон-Козияла, Финляндия	Докембрий 1600	1,00	14,27	14,64	32,96

путем обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов с экстраполяцией полученных кривых к предполагаемому началу радиоактивного распада материнских элементов. При вычислениях были использованы обычные формулы накопления радиогенного свинца:

$$Pb_n^{206} = Pb_0^{206} + U^{238}(e^{\lambda_{238} t_0} - e^{\lambda_{238} t_n}); (1) \quad Pb_n^{208} = Pb_0^{208} + Th^{232}(e^{\lambda_{232} t_0} - e^{\lambda_{232} t_n}); (3)$$

$$Pb_n^{207} = Pb_0^{207} + U^{235}(e^{\lambda_{235} t_0} - e^{\lambda_{235} t_n}); (2) \quad \frac{Pb_n^{207} - Pb_0^{207}}{Pb_n^{206} - Pb_0^{206}} = \frac{1}{139} \cdot \frac{e^{\lambda_{235} t_0} - e^{\lambda_{235} t_n}}{e^{\lambda_{238} t_0} - e^{\lambda_{238} t_n}}; (4)$$

где  $t_n$  — возраст галенита;  $t_0$  — возраст земного вещества;  $\lambda_{235} = 9,8 \cdot 10^{-10}$  лет $^{-1}$ ;  $\lambda_{238} = 1,54 \cdot 10^{-10}$  лет $^{-1}$ ;  $\lambda_{232} = 4,99 \cdot 10^{-11}$  лет $^{-1}$ ;  $T_{235} = 7,07 \cdot 10^8$  лет;  $T_{238} = 4,50 \cdot 10^9$  лет;  $T_{232} = 1,39 \cdot 10^{10}$  лет.

Формулы (1)–(4) выражают связь в атомных единицах, отнесенных к числу атомов  $Pb^{204}$ .

Данный способ обработки не позволяет однозначно определить все неизвестные для каждого уравнения, вследствие чего необходимо заранее задаться одним из неизвестных, например, полагая, что  $Pb_0^{206} = 0$ . Этот метод дает весьма большую дисперсию определяемых величин, обусловленную не экспериментальными ошибками, которые относитель-

но малы и практически не сказываются на определяемых величинах, а разбросом распространенности изотопов свинца в образцах галенитов, вызванным, по видимому, многократным металлогенезом галенитов или аналогичной причиной.

Никто не принимал во внимание вероятного перераспределения U, Th и Pb в Земле в течение ее существования. Так, Холмс<sup>(3)</sup> при всех своих расчетах заранее задавался возрастом Земли около  $3,0 \cdot 10^9$  лет, полученным из общих геологических соображений, и по существу своими расчетами определял поправку к нему. Полученный им возраст Земли (или коры, как он сейчас пишет), равный  $3,35 \cdot 10^9$  лет, не является достоверным с точки зрения независимого решения приведенных выше уравнений. Примененная Холмсом многократная искусственная комбинация небольшого числа экспериментальных данных не улучшает метода вычисления и не может привести к успешному решению данной проблемы.

Гоутерманс<sup>(4)</sup>, пользуясь методом изохрон, получил величину  $(2,9 \pm 0,3) \cdot 10^9$  лет, которую он принял за возраст урана. Однако отсутствие достаточного количества древних образцов не позволяет определить с достоверной точностью направление изохрон и их точку пересечения, ввиду чего его величина не может быть принята за истинное значение возраста урана. Более того, изохроны, проведенные для  $Pb^{208}/Pb^{206}$ , дают совершенно другие значения как для возраста, так и для  $Pb_0$  в сравнении с этими же величинами, полученными из изохрон  $Pb^{207}/Pb^{206}$ .

Если предполагать, что первоначальная распространенность изотопов  $Pb^{206}$  и  $Pb^{207}$  была равна нулю, и не учитывать возможного перераспределения урана, тория и свинца по оболочкам Земли за время ее существования, мы получим возраст около  $(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^9$  лет. Разные авторы этот возраст приписывали различным событиям в истории планеты, считая его то возрастом земной материи, то земной коры и т. д. (см. табл. 1). Недавно Альфер и Герман<sup>(5)</sup>, обработав данные Нира, доказывали, что это максимальный возраст Земли.

Ни с одним из этих взглядов нельзя согласиться, потому что при обработке данных они не принимали во внимание вероятного перераспределения урана, тория и свинца на Земле. Земля построена из

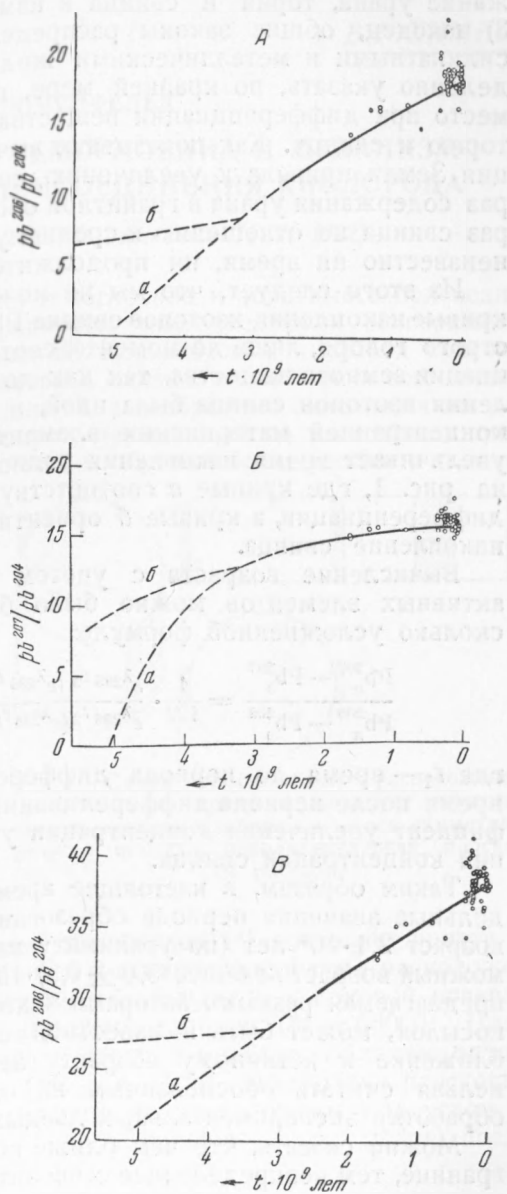


Рис. 1. Графики накопления  $Pb^{206}$  (А),  $Pb^{207}$  (Б) и  $Pb^{208}$  (В)

оболочек — осадочно-метаморфической, гранитной, базальтовой и других. Следовательно, в истории Земли имела место дифференциация вещества на эти оболочки, образование земной коры. На том основании, что мы знаем: 1) современное распределение урана, тория и свинца в гранитной, основной и ультраосновной оболочках Земли, 2) содержание урана, тория и свинца в каменных и железных метеоритах и 3) наконец, общие законы распределения тех же элементов между силикатными и металлическими жидкими фазами, — мы можем определенно указать, по крайней мере, на ту тенденцию, которая имела место при дифференциации вещества Земли по отношению к урану, торию и свинцу. Как показывают вычисления, подобная дифференциация Земли привела к увеличению, по крайней мере, во многие десятки раз содержания урана в гранитной оболочке и уменьшению в несколько раз свинца по отношению к среднему содержанию их в Земле. Но нам неизвестно ни время, ни продолжительность этого процесса.

Из этого следует, что мы не можем экстраполировать полученные кривые накопления изотопов свинца  $Pb^{206}$ ,  $Pb^{207}$  и  $Pb^{208}$  до нуля, а можно, строго говоря, лишь до момента, соответствующего времени дифференциации земного вещества, так как до этого времени скорость накопления изотопов свинца была иной, в соответствии с меньшей средней концентрацией материнских элементов. А это, как легко понять, увеличивает время накопления радиогенного свинца, как и показано на рис. 1, где кривые *a* соответствуют накоплению свинца без учета дифференциации, а кривые *b* ориентировочно показывают двухэтапное накопление свинца.

Вычисление возраста с учетом изменения концентрации радиоактивных элементов можно было бы формально произвести по несколько усложненной формуле:

$$\frac{Pb_n^{207} - Pb_0^{207}}{Pb_n^{206} - Pb_0^{206}} = \frac{1}{139} \cdot \frac{e^{\lambda_{235} t_2} (e^{\lambda_{235} t_1} - 1) + kp (e^{\lambda_{235} t_2} - e^{\lambda_{235} t_n})}{e^{\lambda_{238} t_2} (e^{\lambda_{238} t_1} - 1) + kp (e^{\lambda_{238} t_2} - e^{\lambda_{238} t_n})}$$

где  $t_1$  — время до периода дифференциации земного вещества,  $t_2$  — время после периода дифференциации,  $t_n$  — возраст галенита,  $k$  — коэффициент увеличения концентрации урана,  $p$  — коэффициент уменьшения концентрации свинца.

Таким образом, в настоящее время можно лишь определить предельные значения периода образования земной коры: наименьший возраст  $2,1 \cdot 10^9$  лет (по ураниниту из Манитобы) и максимально возможный возраст не более  $(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^9$  лет. Величина возраста  $3 \cdot 10^9$  лет, предлагаемая разными авторами исходя из общих геологических предпосылок, может быть в известной степени принята как первое приближение к истинному возрасту земной коры. Однако этот возраст нельзя считать обоснованным ни одним из предложенных методов обработки экспериментальных данных по изотопному составу свинцов.

Можно сказать, что чем ближе возраст земной коры к ее верхней границе, тем неопределеннее становится возраст Земли, и чем он ближе к ее нижнему пределу, тем больше возраст Земли приближается к  $5 \cdot 10^9$  лет.

Институт геохимии и аналитической химии  
им. В. И. Вернадского  
Академии наук СССР

Поступило  
19 VI 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> И. Е. Старил, Радиоактивные методы определения геологического времени, 1938; Э. К. Горлинг, ДАН, 34, 282 (1942). <sup>2</sup> А. О. Nier R. W. Thompson, V. F. Murphey, Phys. Rev., 60, 112 (1941). <sup>3</sup> A. Holms, Nature, 163, 453 (1949). <sup>4</sup> F. G. Houtermans, Z. Naturforsch., 1a, 322 (1947). <sup>5</sup> R. A. Alpher, R. C. Herman, Phys. Rev., 84, 1111 (1951).