

Член-корреспондент АН СССР Ю. П. БУЛАШЕВИЧ, Ю. В. ХАЧАЙ

О СВЯЗИ ВЫДЕЛЕНИЯ АРГОНА И ГЕЛИЯ ИЗ МАНТИИ С ТЕРМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИЕЙ ЗЕМЛИ

Термическая эволюция Земли (¹⁻⁴) (тепловая задача) и процесс выделения радиогенных газов He⁴ и Ar⁴⁰ в атмосферу (⁵⁻⁷) (газовая задача) рассматривались до сих пор независимо. Однако: 1) изотопы U²³⁸, U²³⁵, Th²³² и K⁴⁰ являются как источниками образования He⁴ и Ar⁴⁰, так и достоверным источником внутреннего типа Земли; 2) в соответствии с термодинамическими свойствами открытых систем поступление He⁴ и Ar⁴⁰ из мантии и коры в атмосферу должно зависеть от температуры этих оболочек литосферы.

При рассмотрении газовой задачи будем исходить из следующей схемы термической эволюции Земли. Около 4,5·10⁹ лет назад произошло «холодное» образование Земли из однородного пылевого облака (⁸⁻¹⁰). В настоящий момент Земля не однородна по составу. Процесс дифференциации вещества в верхней мантии по типу «зонной плавки» (¹¹) начинается после образования в ней расплавленного слоя, который мог возникнуть на глубине 150–600 км около 3·10⁹ лет назад (¹⁻³). Расплавленный слой перемещается к поверхности (¹²). Проплавление мантии могло циклически повторяться (^{2, 3}).

Рассмотрим модельную задачу о выделении He⁴ и Ar⁴⁰ в атмосферу из мантии при ее проплавлении. Предположим, что He⁴ и Ar⁴⁰ полностью выделяются из расплавленного слоя мантии и поступают в атмосферу. Нерасплавленное вещество мантии сохраняет весь образовавшийся после предыдущего проплавления He⁴ и Ar⁴⁰. Определим функцию газообразования *i*-го материнского элемента, дающую количество газа, генерируемого в 1 см³ за 1 сек. в точке, находящейся на расстоянии *r* от центра Земли в момент времени *t*, считая с момента образования Земли:

$$\psi_i(r, t) = \lambda_i G_i N_i^0 \varphi_i(r, t) e^{-\lambda_i t} \rho(r, t), \quad (1)$$

где λ_i — постоянная распада материнского элемента, N_i^0 — его начальная концентрация, G_i — количество газа, выделяющегося при полном распаде 1 г материнского элемента, $\rho(r, t)$ — плотность вещества, $\varphi_i(r, t)$ — функция, описывающая изменение концентрации, обусловленное выносом источников.

При сделанных предложениях для количества радиогенного газа, поступившего в атмосферу из расплавленного слоя мантии благодаря распаду *i*-го материнского элемента после n_0 циклов проплавления, можно написать

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_i = & 4\pi G_i N_i^0 \left\{ \int_{t_{01}}^{t_{11}} \varphi_i(r_{11}, t) \rho(r_{11}, t) [1 - e^{-\lambda_i t}] r_{11}^2(t) v_{11}(t) dt + \right. \\ & + \sum_{n=2}^{n_0} \int_{t_{0n}}^{t_{1n}} \varphi_i(r_{1n}, t) \rho(r_{1n}, t) e^{-\lambda_i t} [e^{-\lambda_i (t_{1n}(t) - t_{11})} - 1] r_{1n}^2(t) v_{1n}(t) dt + \\ & \left. + \lambda_i \sum_{n=1}^{n_0} \int_{t_{0n}}^{t_{1n}} \int_{r_{0n}(t)}^{r_{1n}(t)} \varphi_i(r, t) \rho(r, t) e^{-\lambda_i t} r^2 dr dt \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

и для потока при многократном проплавлении

$$P_i(t) = 4\pi G_i N_i^0 \left\{ \varphi_i(r_{1n}, t) \rho(r_{1n}, t) e^{-\lambda_i t} [e^{-\lambda_i [y(t)-t]} - 1] r_{1n}^2(t) v_{1n}(t) + \right. \\ \left. + \lambda_i \int_{r_{2n}(t)}^{r_{1n}(t)} \varphi_i(r, t) \rho(r, t) e^{-\lambda_i r^2} dr \right\}, \quad (3)$$

где $r_{jn}(t) = [r_{0n} + \int_{t_{0n}}^t v_{jn}(\eta) d\eta]$, $j=1, 2$, — соответственно положения верхней

и нижней границ расплавленного слоя в момент времени t , v_{jn} — скорости движения верхней и нижней границ в n -м цикле проплавления, t_{0n} и t_{1n} — моменты начала и конца n -го цикла; переменная $y(t)$ определяется из условий

$$\int_{t_{0(n-1)}}^{y(t)} v_{1(n-1)}(\eta) d\eta = [r_{0n} - r_{0(n-1)}] + \int_{t_{0n}}^t v_{1n}(\eta) d\eta; \quad (4)$$

величины $r_{jn}(t)$, $v_{jn}(t)$, t_{0n} , t_{1n} , n_0 , N_i^0 определяются из решения тепловой задачи с учетом геологических данных, $\varphi_i(r, t)$ должна определяться из совместного решения тепловой и газовой задач, как это показано ниже.

Полученные выражения могут быть сопоставлены с экспериментальными данными. Известно количество Ar^{40} в атмосфере, имеется определение плотности потока He^4 для одного из гранитных массивов ⁽¹³⁾ и многочисленные оценки скорости диссипации He^4 в космос: $P_{дис} \sim (1-13,2) \cdot 10^{31}$ ат/год ^(14, 15).

Результаты решения газовой задачи для однократного проплавления мантии ⁽⁴⁾ в предположении, что верхняя граница расплавленного слоя перемещается с постоянной скоростью $v=L/(T-t_{31})$ и $l/L \ll 1$, где L — мощность зоны обеднения по ⁽⁴⁾, l — толщина расплавленного слоя, T — возраст Земли, представлены в табл. 1, $N_{U\delta}$ — концентрация U^{238} в недифференцированной мантии, $d_{кор}$ — мощность земной коры, принятая в расчетах ⁽⁴⁾. Принято $N_{Th\delta}/N_{U\delta}=4$, $N_{238\delta}/N_{235\delta}=137,8$.

Т а б л и ц а 1

	Хондритовый состав					Состав $N_{K\delta}/N_{U\delta} = 1 \cdot 10^4$		
$N_{U\delta} \cdot 10^8$, г/г	1	2	2	2	2	3	3	4
$d_{кор}$, км	10,8	32	10,8	10,8	6	10,8	10,8	10,8
L , км	1000	2000	1000	500	500	1000	1000	1000
$\mathcal{L}_{Ar} \cdot 10^{42}$, ат	2,7	4,6	2,7	1,1	1,2	2,7	0,86	1,23
$P_{He}(T) \cdot 10^{31}$, ат/год	1,67	25,2	22,9	0,83	8,1	43,7	43,7	64,6
$P_{Ar}(T) \cdot 10^{32}$, ат/год	6,9	13,8	6,9	2,5	2,8	6,9	2,0	3,0

Так как количество Ar^{40} в атмосфере $9,85 \cdot 10^{41}$ атомов ⁽⁵⁾, то из табл. 1 следует, что в моделях с однократным проплавлением мантии удастся получить решение газовой задачи, одновременно согласующееся с экспериментальными данными и для гелия и для аргона только в случае коры мощностью 6 км (кора под океаном).

Решение тепловой задачи с многократным проплавлением мантии получено в ^(2, 3). При решении газовой задачи в этом случае рассмотрим первоначальный состав мантии, для которого $N_{K\delta}/N_{U\delta} = 1 \cdot 10^4$, $N_{U\delta} = 4 \cdot 10^{-8}$. Для

этого состава $\varphi_i(r, t)$ принимается аналогично ⁽⁴⁾ в виде

$$\varphi_i(t) = \left(1 + K_i \frac{t - t_{01}}{T - t_{01}} \right), \quad (5)$$

где $K_i = (N_{i \text{ об}}/N_{i \text{ з}} - 1)$, $N_{i \text{ об}}$ — концентрация i -го материнского элемента в обедненной зоне мантии. Рассматривался так же и хондритовый состав мантии; в этом случае отыскивалась функция $\varphi_n(r, t)$ такая, чтобы \mathcal{L}_{Ag} , определяемое выражением (2), удовлетворяло условиям

$$\mathcal{L}_{\text{Ag}} = B_{\text{Ag}} - B_{\text{AK}}, \quad (6)$$

где B_{Ag} — количество Ag^{40} в атмосфере, $B_{\text{AK}} \simeq 1 \cdot 10^{41}$ ат ⁽⁷⁾ — оценка поступления Ag^{40} из коры. Функция $\varphi_n(r, t)$ отыскивалась в виде

$$\varphi_n = \left\{ 1 - \left[\frac{n}{n_0} \left(1 - \frac{N_{K \text{ об}}}{N_{K \text{ з}}} \right) + (n_0 - n)x \right] \right\}, \quad (7)$$

где x — искомая величина, n — номер цикла.

Для коры массой $3 \cdot 10^{25}$ г ⁽⁷⁾ результаты вычислений представлены в табл. 2.

В табл. 2 \mathcal{L}_{Ag} — количество Ag^{40} , поступившего в атмосферу после пер-

Таблица 2

	Количество циклов			
	$n_0 = 10$		$n_0 = 13$	
$N_{K \text{ з}} \cdot 10^{-4}$, г/г	8	4	8	4
$\mathcal{L}_{\text{Ag}} \cdot 10^{41}$, ат	8,85	7,8	8,85	7,44
x	0,055	0	0,041	0
$\mathcal{L}_{\text{Ag}} \cdot 10^{41}$, ат	6,22	6,4	5,89	5,7
$P_{\text{Ag}}(T) \cdot 10^{31}$, ат	3,2	1,6	3,2	1,6
$P_{\text{окHe}}(T) \cdot 10^{31}$, ат/год	10	20	10	20
$P_{\text{корHe}}(T) \cdot 10^{31}$, ат/год	$\leq 0,5$	2,9	$\leq 0,5$	2,9

вого цикла проплавления; $P_{\text{окHe}}$ и $P_{\text{корHe}}$ — потоки He^4 под океанами и на континентах. Предполагалось, что длительность циклов τ_n постоянна для каждого n_0 , а также $r_{01} = r_{0n}$, $r_1(t_{11}) = r_1(t_{1n})$, $v_{1n} = L/\tau_n$, $l/L < 1$. Значения λ_i и G_i для K^{40} , U^{238} , U^{235} и Th^{232} принимались равными соответственно $\lambda_1 = 5,28 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹, $G_1 = 1,5 \cdot 10^{22}$ ат/г; $\lambda_2 = 1,54 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹, $G_2 = 2 \cdot 10^{22}$ ат/г; $\lambda_3 = 9,72 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹, $G_3 = 1,8 \cdot 10^{22}$ ат/г; $\lambda_4 = 0,499 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹, $G_4 = 1,55 \cdot 10^{22}$ ат/г. Из результатов табл. 2 видно, что решение газовой задачи в предположении начального состава $N_{K \text{ з}}/N_{U \text{ з}} = 1 \cdot 10^4$ может дать правильную оценку \mathcal{L}_{Ag} в том случае, когда первый цикл проплавления начался позднее, чем $t_{01} = 2,4 \cdot 10^9$ лет. При этом оценки потока P_{He} оказываются выше имеющихся ⁽¹³⁻¹⁵⁾.

Для первоначального хондритового состава мантии получено решение газовой задачи, одновременно согласующееся с экспериментальными данными и по Ag^{40} и по He^4 . Однако решение получено с функцией определенного вида. Вид этой функции может быть уточнен при совместном решении тепловой и газовой задач.

Как следует из табл. 2, при числе циклов проплавления $n_0 = 13$ за счет выделения из расплавленного слоя мантии в атмосферу поступает в первом цикле около 60% современного количества Ag^{40} . Вклад следующих

циклов последовательно уменьшается. Этот результат хорошо согласуется с качественными выводами работы (7).

Следующие геологические данные, по-видимому, свидетельствуют в пользу предпочтительности хондритового состава мантии по сравнению с составом $N_{K\delta}/N_{U\delta}=1\cdot 10^4$. Если последовательность развития геосинклинального процесса соответствует принятому в работе (6), т. е. сначала происходит внедрение ультраосновных пород ($N_K/N_U=1\cdot 10^5$), затем следуют основные эффузивы ($N_K/N_U=1,66\cdot 10^4$) и на последней стадии получают распространение кислые породы ($N_K/N_U=0,95\cdot 10^4$), то это означает, что в начале процесса К выносится быстрее U (значения N_K/N_U приняты согласно (16)). Но ускоренный по сравнению с линейным (5) характер выноса К требуется только для первичного хондритового состава мантии.

Для выяснения процессов дегазации мантии и коры необходимы результаты непосредственных измерений потоков He^4 и Ar^{40} на континентах и под океанами.

Институт геофизики
Уральского научного центра Академии наук СССР
Свердловск

Поступило
18 VI 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. А. Любимова, Термика Земли и Луны, «Наука», 1968. ² А. Н. Тихонов, Е. А. Любимова, В. К. Власов, ДАН, т. 188, № 2 (1969). ³ А. Н. Тихонов, Е. А. Любимова, В. К. Власов, Тр. МОИП, т. 46, сборн. Энергетика геологических и геофизических процессов, «Наука», 1972, стр. 27. ⁴ С. В. Маева, Физика Земли, № 3 (1967). ⁵ К. К. Turekian, Geochim. et cosmochim. acta, v. 17, № 1/2 (1959). ⁶ В. А. Магницкий, Внутреннее строение и физика Земли, М., 1965. ⁷ В. И. Баранов, К. Г. Кнорре, Геохимия, № 12 (1967). ⁸ О. Ю. Шмидт, Происхождение Земли и планет (сборник статей), Изд. АН СССР, 1962, стр. 131. ⁹ В. С. Сафронов, Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет, «Наука», 1969. ¹⁰ Б. Ю. Левин, Физика Земли, № 7 (1972). ¹¹ А. П. Виноградов, Геохимия, № 7 (1965). ¹² Y. Shimazu, J. Earth Sci. Nagoja Univ., v. 9, № 2 (1961). ¹³ Ю. П. Булашевич, В. Н. Башорин, ДАН, т. 201, № 4 (1971). ¹⁴ М. Николе, Астрономия, М., 1964. ¹⁵ W. I. Axford, J. Geophys. Res., v. 73, № 21 (1968). ¹⁶ А. П. Виноградов, Геохимия, № 7 (1962).