

ГЕОХИМИЯ

Г. В. ВОЙТКЕВИЧ

РАДИОАКТИВНОСТЬ КАЛИЯ И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗЕМЛИ

(Представлено академиком В. Г. Хлопиным 22 VII 1950)

Количество теплоты, выделяемой радиоактивными элементами, было в далеком прошлом Земли значительно больше, чем в современную эпоху. Это естественно вытекает из экспоненциального закона радиоактивного распада:

$$Q_0 = Q_t e^{\lambda t},$$

где  $Q_t$  — количество тепла, выделяемого каким-либо радиоактивным элементом сейчас;  $Q_0$  — количество тепла, выделявшееся  $t$  лет назад;  $\lambda$  — константа радиоактивного распада. Повышенное количество радиогенного тепла в ранние геологические эпохи в теле нашей планеты являлось реальным фактором, которым нельзя пренебречь при изучении причин магматических и других эндогенных геологических явлений раннего архея.

Впервые расчет количества радиогенного тепла в геологическом прошлом был произведен академиком В. Г. Хлопиным (1) в 1937 г. с учетом геохимических данных о распространении радиоактивных элементов в горных породах. Согласно этим расчетам, решающее значение в общем балансе радиогенного тепла в прошлом (2—3 миллиарда лет назад) принадлежало актиноурану  $U^{235}$ . Калий по значению выделяемой теплоты стоял на четвертом месте после урана, актиноурана и тория. 2 миллиарда лет назад выделялось теплоты в 2 раза больше, чем сейчас, а 3 миллиарда лет назад — в 5 раз больше. Это связано с быстрым темпом распада актиноурана, полупериод которого был установлен до 1937 г. как  $400 \cdot 10^6$  лет.

Учет общей суммы радиогенного тепла в геологическом прошлом Земли зависит от достоверности и точности данных о количестве тепла, выделяемого определяемой массой радиоэлемента, скорости распада также для каждого радиоэлемента, распространении наиболее экзотермичных радиоэлементов в земной коре.

В настоящее время эти данные, благодаря увеличению точности физико-химического эксперимента, подверглись существенному уточнению. Наибольшему изменению подверглись наши знания о скорости распада актиноурана и калия. Наименее ясным и сейчас остается вопрос о распространении радиоактивных элементов. Отсюда вытекает необходимость новой переоценки значения радиоактивного тепла в прошлом нашей планеты.

Скорость распада актиноурана по старым данным оказалась слишком большой. В настоящее время константа распада актиноурана может быть принята как  $\lambda_{AcU} = 9,8 \cdot 10^{-10}$  лет<sup>-1</sup>, что соответствует

полупериоду распада  $710 \cdot 10^6$  лет (т. е. почти в два раза более длительному, чем это считалось по определениям Гроссе<sup>(2)</sup> в 1934 г.).

Новыми исследованиями установлено, что изотоп калия  $K^{40}$  подвергается двойному превращению и общий темп его распада более ускоренный, чем это принималось по старым данным Мюльхоффа<sup>(3)</sup>. Изотоп  $K^{40}$  превращается, с одной стороны, путем  $\beta$ -распада в изотоп кальция  $Ca^{40}$ , с другой, путем электронного захвата ( $K$ -захвата) в аргон  $Ar^{40}$ :



Определение скорости распада  $K^{40}$  Блеулером и Габриелем<sup>(4)</sup> обнаружило очень быстрый темп (полупериод  $240 \cdot 10^6$  лет), что привело некоторых зарубежных геофизиков к весьма поспешной и неосновательной переоценке радиогенной теплоты калия в геологическом прошлом. По Берчу<sup>(5)</sup>, эта теплота не допускала вообще существования твердой земной коры  $1,0 - 1,5$  миллиардов лет назад. Такое парадоксальное заключение оказалось ошибочным из-за ошибок, допущенных при определении распада калия.

Поскольку термический эффект радиоактивности калия рассчитывается на все количество изотопа  $K^{40}$ , необходимо знать в отдельности темп  $\beta$ -распада и темп электронного захвата, чтобы вывести общую константу распада.

Согласно более точным данным о скорости  $\beta$ -распада  $K^{40}$ , полученным недавно Графом<sup>(6)</sup>, константа  $\beta$ -распада равна  $5 \cdot 10^{-10}$  лет<sup>-1</sup>, что соответствует полупериоду  $13,7 \pm 1,05 \cdot 10^8$  лет. Близкая к этому величина получена также Аренсом и Эвансом путем масс-спектрального определения изотопа  $Ca^{40}$  в калиевых минералах известного возраста. При этом учитывалась вероятность контаминации постороннего кальция<sup>(7)</sup>. Считая результаты этих авторов более надежными, константа  $\beta$ -распада  $K^{40}$  может быть принята  $\lambda_\beta = 6,5 \cdot 10^{-10}$  лет<sup>-1</sup>.

Константа превращения  $K^{40}$  в  $Ar^{40}$  была недавно установлена Э. К. Герлингом<sup>(8)</sup> по накоплению аргона в некоторых калиевых минералах известного геологического возраста. Исследование изотопного состава этого аргона обнаружило явное отличие его от аргона атмосферного. Результаты аналогичных исследований Олдрича и Нира<sup>(9)</sup> совпали с результатами Э. К. Герлинга. Константа электронного захвата для  $K^{40}$  оказалась  $\lambda_e = 0,61 \pm 0,12 \cdot 10^{-10}$  лет<sup>-1</sup>.

Для получения общей константы распада  $K^{40}$  нужно сложить числовые значения обеих констант:  $\lambda_K = \lambda_\beta + \lambda_e$ :

$$\lambda_K = 6,50 \cdot 10^{-10} + 0,61 \cdot 10^{-10} = 7,1 \cdot 10^{-10} \text{ лет}^{-1}.$$

Поскольку выделяемая при радиоактивном распаде энергия пропорциональна скорости распада, отсюда необходимо принять новую величину тепла, выделяемого калием за единицу времени. В соответствии с новыми данными о скорости распада, эта величина равна  $26 \cdot 10^{-6}$  кал/г в год. Учитывая распространенность калия в земной коре по данным акад. А. Е. Ферсмана, получаем, что в настоящее время все количество калия Земли выделяет  $\sim 4,7 \cdot 10^{16}$  кал/час.

Вводя соответствующие поправки на скорость распада актиноурана и калия и не меняя остальных величин, данных В. Г. Хлопиным в 1937 г., можно показать изменение радиогенной теплоты в геологическом прошлом за счет распада урана, актиноурана, тория и калия (см. табл. 1).

Из величин, приведенных в табл. 1, видно, что в современную эпоху калиевая теплота составляет  $\sim 10^0\%$  всей радиогенной теплоты

Таблица 1

## Количество выделяемой теплоты в ккал/час

Радиоактивный элемент	В настоящее время	$2 \cdot 10^8$ лет назад	$3 \cdot 10^9$ лет назад	$4 \cdot 10^9$ лет назад
Уран . . . . .	$21,26 \cdot 10^{16}$	$29,42 \cdot 10^{16}$	$34,06 \cdot 10^{16}$	$39,03 \cdot 10^{16}$
Актиноуран . . . . .	$0,89 \cdot 10^{16}$	$6,33 \cdot 10^{16}$	$17,34 \cdot 10^{16}$	$43,43 \cdot 10^{16}$
Торий . . . . .	$20,27 \cdot 10^{16}$	$22,78 \cdot 10^{16}$	$24,12 \cdot 10^{16}$	$25,13 \cdot 10^{16}$
Калий . . . . .	$4,70 \cdot 10^{16}$	$19,46 \cdot 10^{16}$	$39,53 \cdot 10^{16}$	$80,42 \cdot 10^{16}$
Общее количество радиогенного тепла	$47,12 \cdot 10^{16}$	$77,69 \cdot 10^{16}$	$115,05 \cdot 10^{16}$	$188,09 \cdot 10^{16}$

и занимает третье место после урана и тория. В течение длительного времени соотношение между радиоэлементами по интенсивности выделяемой энергии существенно изменялось. Это изменение в первую очередь зависит от более интенсивного распада калия и актиноурана и значительно более медленного распада тория и урана. В начальные стадии существования Земли калий по количеству выделяемой энергии занимал первое место, энергия распада актиноурана была близка к энергии урана и, возможно, превышала последнюю.

Учитывая современную концентрацию калия в верхних геосферах Земли, можно допустить, что радиоактивность калия играла большую роль при первоначальном формировании сиалической оболочки. Обогащение калием верхних геосфер в результате первоначальной дифференциации определило более устойчивое термодинамическое состояние Земли, чем в случае радиального рассеяния калия.

Хотя приведенные расчеты и носят ориентировочный характер, однако в настоящее время можно считать доказанным, что теплота калия имела в тепловом балансе Земли 3,5 миллиардов лет назад решающее значение по сравнению с тяжелыми радиоэлементами, которым до сих пор уделялось главное внимание. Непосредственное проявление калиевой радиогенной теплоты, каково бы оно ни было, скрыто от нас архейским метаморфизмом. Тепловой эффект радиоактивности калия в ранние эпохи существования Земли, возможно, уступал другим атомным превращениям, которые сейчас угасли или совершаются крайне медленно — как деление тяжелых элементов.

Поступило  
3 VI 1950

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. Г. Хлопин, Изв. АН СССР, сер. геофизич., № 2 (1937). <sup>2</sup> A. Nieg, Phys. Rev., 55, 21 (1939). <sup>3</sup> W. Mühlhoff, Ann. d. Phys., 7, 205 (1930). <sup>4</sup> E. Bleuer и M. Gabriel, Helvetica Phys. Acta, 20, 67 (1947). <sup>5</sup> F. Birch, Phys. Rev., 72, 1128 (1947). <sup>6</sup> T. Graf, ibid., 74, 1199 (1948). <sup>7</sup> L. H. Ahrens and R. D. Evans, ibid., 74, 279 (1948). <sup>8</sup> Э. К. Герлинг, Н. Е. Титов и Г. М. Ермолин, ДАН, 68, No. 3 (1949). <sup>9</sup> L. T. Aldrich and A. Nieg, Phys. Rev., 74, 876 (1948).