

## 2. ПРИРОДНЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ СЕМЕЙСТВА

Рассмотрим некоторые общие свойства рассмотренных выше рядов. Основные природные радиоактивные элементы объединены в 4 семейства: тория, нептуния, урана и урана-актиния. Родоначальниками семейств являются долгоживущие радиоактивные элементы, периоды полураспада которых соизмеримы с возрастом Земли ( $5 \times 10^9$  лет), а конечными элементами - стабильные изотопы свинца и висмута.

Радиоактивные превращения элементов происходят за счет испускания или захвата электрона с образованием изобарных пар или триад, а также за счет испускания  $\alpha$ -частицы с изменением массы ядра, отличающейся на значения, кратные 4 ( $4n, 4n+1, 4n+2, 4n+3$ ) (см. Табл.1).

Например, каждый атом  $^{238}\text{U}$  при последовательном распаде дает 8 атомов гелия с общей массой 32 и один атом  $^{206}\text{Pb}$ , или один грамм - атом материнского вещества превращается в грамм-атом дочернего ( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8^4\text{He}$ ). Превращение одного изотопа в другой происходит за счет двух бета - распадов и одного альфа-распада в любой последовательности. Максимальной энергией гамма-излучения в ряду  $4n+2$  ( $^{238}\text{U}$ ) обладает изотоп  $^{214}\text{Bi}$  (1.76 Мэв), а в ряду  $4n$  ( $^{232}\text{Th}$ ) изотоп  $^{206}\text{Tl}$  (2.62 Мэв), последний обладает самой высокой энергией гамма-излучения из всех природных радионуклидов.

Вклады в радиационной гамма-фон с поверхности Земли рассматриваемых семейств и не входящего в радиоактивные семейства изотопа  $^{40}\text{K}$  составляют: ряд тория - 40%, ряд урана - 25%,  $^{40}\text{K}$  - 35% при среднем содержании элементов в почвах  $8.5 \times 10^{-4}\%$ ,  $1.5 \times 10^{-4}\%$  и 1.2% соответственно. Максимальную энергию альфа-излучения (10.5 Мэв) имеет природный радионуклид ториевого семейства ( $4n$ )  $^{212}\text{Po}$ .

Табл.1. Природные радиоактивные семейства

Семейство □	Изменение массы	Радиоактивный Материнский изотоп	Стабильный дочерний изотоп
Тория	$4n$	$^{232}\text{Th}$ $T=1.405 \times 10^{10}$ лет	$^{208}\text{Pb}$
Нептуния	$4n+1$	$^{237}\text{Np}$ $T=2.14 \times 10^6$ лет	$^{209}\text{Bi}$
Урана	$4n+2$	$^{238}\text{U}$ $T=4.47 \times 10^9$ лет	$^{206}\text{Pb}$
Уран-актиния	$4n+3$	$^{235}\text{U}$ $T=7.04 \times 10^8$ лет	$^{207}\text{Pb}$

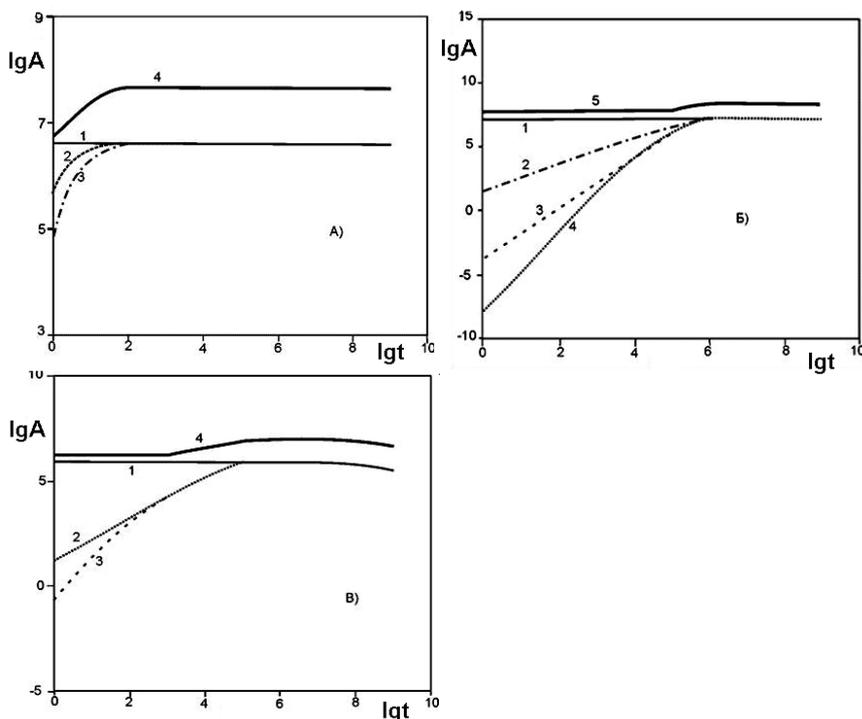


Рис.2. Изменение во времени активности элементов природных семейств

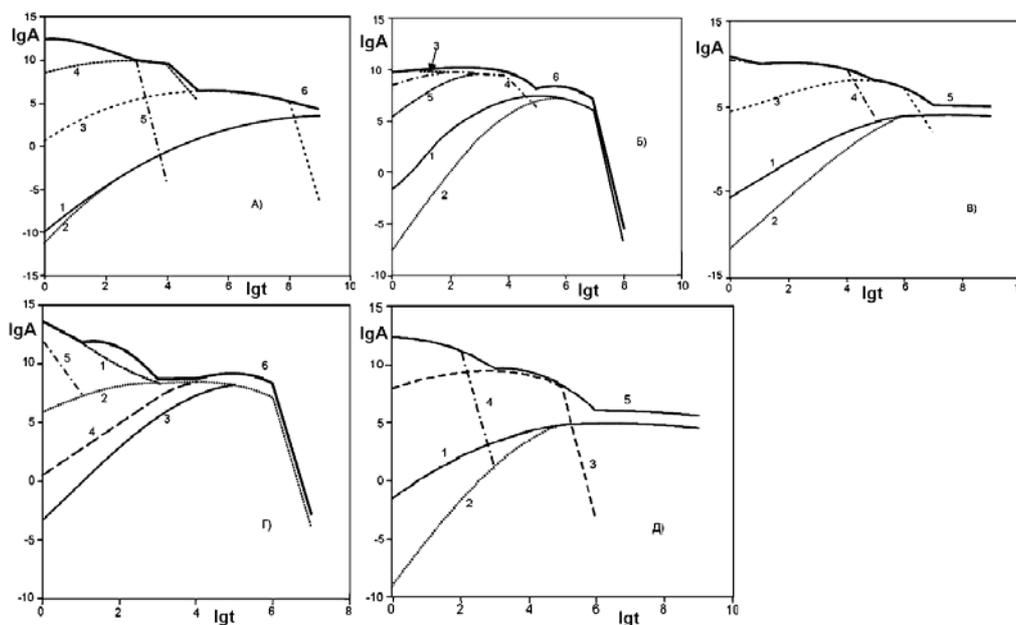
- А) Семейство  $4n$  (1 кг  $^{232}\text{Th}$ )
- Б) Семейство  $4n+2$  (1 кг  $^{238}\text{U}$ )
- В) Семейство  $4n+3$  (10 г  $^{235}\text{U}$ )

Все члены радиоактивных рядов связаны друг с другом последовательными необратимыми взаимными превращениями, и в закрытой системе со временем наступает равновесие. Скорость наступления равновесия в целом по ряду определяется периодом полураспада ( $T$ ) наиболее долгоживущего его члена. С точностью приблизительно 1% время установления равновесия равно приблизительно  $7T$  данного нуклида. Например, для уранового семейства, в котором самый долгоживущий член

$^{234}\text{U}$  ( $T=2.45 \times 10^5$  лет), продолжительность установления равновесия 1.7 млн. лет. Радиоактивность одной тонны природного урана с находящимися с ним в равновесии радиоактивными элементами семейств ( $4n+1, 4n+2, 4n+3$ ) составляет  $1.9 \times 10^{11}$  Бк/т.

Природные руды содержат накопленные за миллионы лет радиоактивные элементы, которые извлекаются из недр при добыче угля, нефти и т.п. В равновесии с ураном, торием находятся значимые

количества дочерних радиотоксичных изотопов (Табл. 2, 3). Радиоактивность урановых руд, отнесенная к 1 кг природного урана, в 4 раза выше, чем радиоактивность ториевых руд и практически мало изменяется со временем по сравнению с равновесной максимальной величиной. Исключение составляет семейство нептуния, которое к настоящему моменту практически распалось. (Изменение во времени активности элементов природных семейств представлено на Рис. 2).



**Рис.3.** Изменение во времени активности реакторных семейств

А) Семейство 4n (1 г  $^{244}\text{Cm}$ ); Б) Семейство 4n+1 (1 г  $^{245}\text{Cm}$ ); В) Семейство 4n+2 (1 г  $^{246}\text{Cm}$ ); Г) Семейство 4n+2 (1 г  $^{242}\text{Cm}$ ); Д) Семейство 4n+3 (1 г  $^{243}\text{Cm}$ )

**Табл.2.** Равновесное содержание радиотоксичных изотопов (мг) на 1 тонну урана или тория

Радиоактивное семейство	Изотоп	Период полураспада, T	Содержание
4n ториевое	$^{232}\text{Th}$	$1.41 \times 10^{10}$ лет	$10^9$
	$^{226}\text{Ra}$	5.75 лет	0.470
	$^{228}\text{Th}$	1.91 года	0.134
	$^{224}\text{Ra}$	3.66 сут	$6.9 \times 10^{-4}$
4n+2 урановое	$^{236}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$ лет	$9.93 \times 10^8$
	$^{234}\text{U}$	$2.45 \times 10^5$ лет	$5 \times 10^4$
	$^{230}\text{Th}$	$7.70 \times 10^4$ лет	$1.78 \times 10^4$
	$^{226}\text{Ra}$	1600 лет	$3.30 \times 10^2$
	$^{210}\text{Pb}$	22.30 лет	4.32
4n+3 актиниевое	$^{235}\text{U}$	$7.04 \times 10^8$ лет	$7.06 \times 10^6$
	$^{231}\text{Pa}$	$3.28 \times 10^4$ лет	$3.14 \times 10^2$
	$^{227}\text{Ac}$	21.77 года	0.21
	$^{223}\text{Ra}$	11.30 сут	$2.90 \times 10^{-4}$

**Табл.3.** Радиоактивность (A) природных семейств ( $\Delta t = 10^9$  лет)

Ряд	Материнский изотоп	Период установления равновесия	A, Бк/кг (МИ)
4n	$^{232}\text{Th}$	$5 \times 10^3$ лет	$4 \times 10^7$
4n+1	$^{237}\text{Np}$	$1 \times 10^6$ лет	0
4n+2	$^{238}\text{U}$	$1 \times 10^7$ лет	$1.6 \times 10^8$
4n+3	$^{235}\text{U}$	$5 \times 10^6$ лет	$3.7 \times 10^8$