

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 (5×10^9 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 α -частицы с изменением массы ядра, отличающейся на значения, кратные 4 ($4n, 4n+1, 4n+2, 4n+3$) (см. Табл.1).

Например, каждый атом ^{238}U при последовательном распаде дает 8 атомов гелия с общей массой 32 и один атом ^{206}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}U) обладает изотоп ^{214}Bi (1.76 МэВ), а в ряду $4n$ (^{232}Th) изотоп ^{206}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}K составляют: ряд тория - 40%, ряд урана - 25%, ^{40}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}Po .

Табл.1. Природные радиоактивные семейства

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

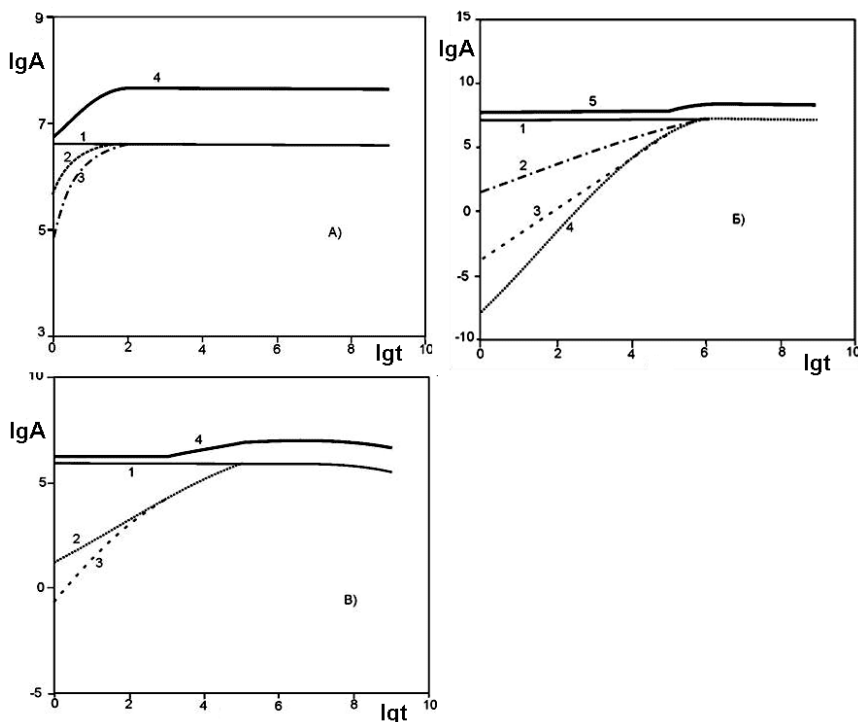


Рис.2. Изменение во времени активности элементов природных семейств

- А) Семейство $4n$ (1 кг ^{232}Th)
- Б) Семейство $4n+2$ (1 кг ^{238}U)
- В) Семейство $4n+3$ (10 г ^{235}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}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 1.9×10^{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).

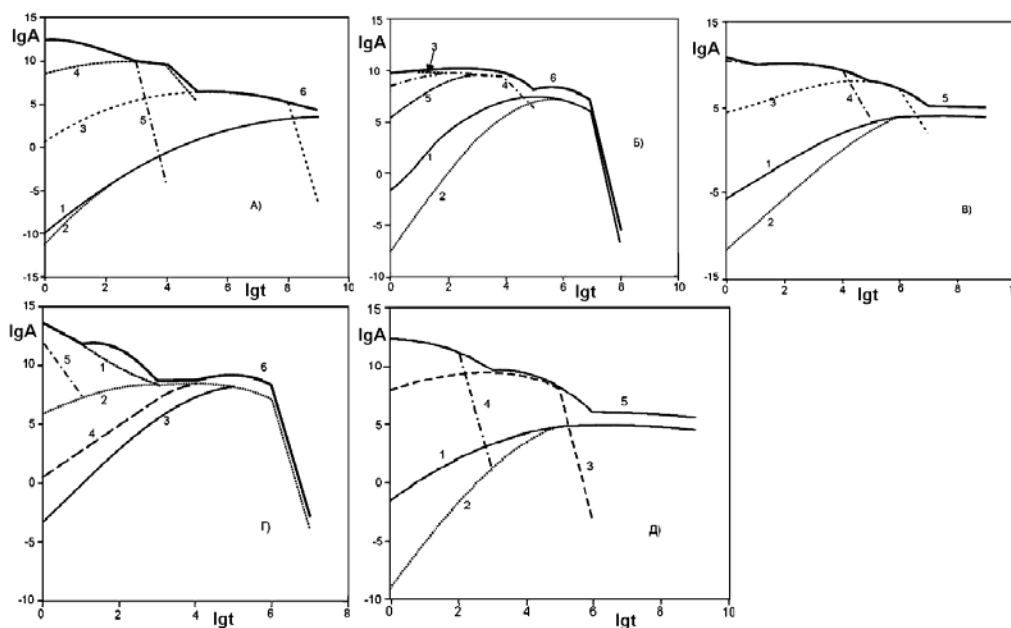


Рис.3. Изменение во времени активности реакторных семейств

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

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

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

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

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