

# Свойства радиоактивных элементов

# ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

www.calc.ru



Д.И. Менделеев  
1834–1907

СИМВОЛ ЭЛЕМЕНТА      ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СЛОЯМ

- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

Периоды	Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ																Энергетический уровень	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			
		a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	а			
1	1	<b>H</b> водород 1,008																<b>He</b> гелий 4,003	2
2	2	<b>Li</b> литий 6,941	<b>Be</b> бериллий 9,0122	<b>B</b> бор 10,811	<b>C</b> углерод 12,011	<b>N</b> азот 14,007	<b>O</b> кислород 15,999	<b>F</b> фтор 18,998										<b>Ne</b> неон 20,179	10
3	3	<b>Na</b> натрий 22,99	<b>Mg</b> магний 24,312	<b>Al</b> алюминий 26,982	<b>Si</b> кремний 28,086	<b>P</b> фосфор 30,974	<b>S</b> сера 32,064	<b>Cl</b> хлор 35,453										<b>Ar</b> аргон 39,948	18
4	4	<b>K</b> калий 39,102	<b>Ca</b> кальций 40,08	<b>Sc</b> скандий 44,956	<b>Ti</b> титан 47,956	<b>V</b> ванадий 50,941	<b>Cr</b> хром 51,996	<b>Mn</b> марганец 54,938	<b>Fe</b> железо 55,849	<b>Co</b> кобальт 58,933	<b>Ni</b> никель 58,7								
	5	<b>Cu</b> медь 63,546	<b>Zn</b> цинк 65,37	<b>Ga</b> галлий 69,72	<b>Ge</b> германий 72,59	<b>As</b> мышьяк 74,922	<b>Se</b> селен 78,96	<b>Br</b> бром 79,904											<b>Kr</b> криптон 83,8
5	6	<b>Rb</b> рубидий 85,468	<b>Sr</b> стронций 87,62	<b>Y</b> иттрий 88,906	<b>Zr</b> цирконий 91,22	<b>Nb</b> ниобий 92,906	<b>Mo</b> молибден 95,94	<b>Tc</b> технеций [99]	<b>Ru</b> рутений 101,07	<b>Rh</b> родий 102,906	<b>Pd</b> палладий 106,4								
	7	<b>Ag</b> серебро 107,868	<b>Cd</b> кадмий 112,41	<b>In</b> индий 114,82	<b>Sn</b> олово 118,69	<b>Sb</b> сурьма 121,75	<b>Te</b> теллур 127,6	<b>I</b> йод 126,905											<b>Xe</b> ксенон 131,3
6	8	<b>Cs</b> цезий 132,905	<b>Ba</b> барий 137,34	57–71 лантаноиды		<b>Hf</b> гафний 178,49	<b>Ta</b> тантал 180,948	<b>W</b> вольфрам 183,85	<b>Re</b> рений 186,207	<b>Os</b> осмий 190,2	<b>Ir</b> иридий 192,22	<b>Pt</b> платина 195,09							
	9	<b>Au</b> золото 196,967	<b>Hg</b> ртуть 200,59	<b>Tl</b> таллий 204,37	<b>Pb</b> свинец 207,19	<b>Bi</b> висмут 208,98	<b>Po</b> полоний [210]	<b>At</b> астат [210]											<b>Rn</b> радон [222]
7	10	<b>Fr</b> франций [223]	<b>Ra</b> радий [226]	89–103 актиноиды		<b>Rf</b> резерфордий [261]	<b>Db</b> дубний [262]	<b>Sg</b> сигборгий [263]	<b>Bh</b> борий [262]	<b>Hn</b> ханний [265]	<b>Mt</b> мейтнерий	<b>110</b>							
		ВЫСШИЕ ОКСИДЫ	$R_2O$	$RO$	$R_2O_3$	$RO_2$	$R_2O_5$	$RO_3$	$R_2O_7$	$RO_4$									
		ЛЕТУЧЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ				$RH_4$	$RH_3$	$H_2R$	$HR$										

## ЛАНТАНОИДЫ

57 <b>La</b> лантан 138,906	58 <b>Ce</b> церий 140,12	59 <b>Pr</b> празеодим 140,908	60 <b>Nd</b> неодим 144,24	61 <b>Pm</b> прометий [145]	62 <b>Sm</b> самарий 150,4	63 <b>Eu</b> европий 151,96	64 <b>Gd</b> гадолиний 157,25	65 <b>Tb</b> тербий 158,926	66 <b>Dy</b> диспрозий 162,5	67 <b>Ho</b> гольмий 164,93	68 <b>Er</b> эрбий 167,26	69 <b>Tm</b> тулий 168,934	70 <b>Yb</b> иттербий 173,04	71 <b>Lu</b> лютеций 174,97
-----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

## АКТИНОИДЫ

89 <b>Ac</b> актиний [227]	90 <b>Th</b> торий 232,038	91 <b>Pa</b> протактиний [231]	92 <b>U</b> уран 238,029	93 <b>Np</b> нептуний [237]	94 <b>Pu</b> плутоний [244]	95 <b>Am</b> амерций [243]	96 <b>Cm</b> кюрий [247]	97 <b>Bk</b> берклий [247]	98 <b>Cf</b> калфорний [251]	99 <b>Es</b> эйнштейний [254]	100 <b>Fm</b> фермий [257]	101 <b>Md</b> менделевий [258]	102 <b>No</b> нобелий [259]	103 <b>Lr</b> лоуренсий [260]
----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

Уран и торий – наиболее распространенные члены семейства актиноидов, в которое входят также актиний, протактиний и еще двенадцать трансураниевых элементов. Это определяет значительную общность их химических свойств.

# Торий

**Торий (Th)** радиоактивный химический элемент, открыт в 1828 году И.Я. Берцелиусом. Назван в честь скандинавского бога грома Тора.

**Атомный номер 90, атомная масса 232,039.**

Атом тория представлен радиоактивными природными изотопами:  $^{232}\text{Th}$  (~ 100 %,  $T_{1/2}$  -  $1,4 \cdot 10^{10}$  лет);  $^{228}\text{Th}$  (радиоторий X и UX1',  $T_{1/2}$  - 1,9 лет);  $^{230}\text{Th}$  (ионий I0,  $T_{1/2}$  -  $8 \cdot 10^4$  лет),  $^{234}\text{Th}$  (уран X1 - UX,  $T_{1/2}$  - 24,1 дня);  $^{227}\text{Th}$  (радиоактивный X - UX;  $T_{1/2}$  - 18,7 дня);  $^{231}\text{Th}$  (уран Y - UY,  $T_{1/2}$  - 25,5 ч). Известно несколько искусственных короткоживущих (секунды, минуты) изотопов Th.  $^{232}\text{Th}$  является вторым по распространенности природным радиоактивным изотопом в земной коре ( $1,2 \cdot 10^{-3}$  %), уступает только  $^{87}\text{Rb}$  ( $4,16 \cdot 10^{-3}$  %).

**Торий ( $5f6d27s2$ )** радиоактивный *fd*-металл из группы Ac, в периодической системе расположен в 7-м периоде в IV группе вместе с Ti, Zr, Hf и лантаноидами. При совместном рассмотрении с лантаноидами является гомологом Ce, по диагонали соседствует с La, Gd, Lu, по горизонтали - с Ac, Ra, и Pa, U. Ко всем этим металлам он более или менее близок по химическим свойствам. По термическим свойствам ближе всего к Y и Lu, по энергии образования изолированных атомов - к Zr, Hf, U. Сочетание высокой температуры плавления - Th (металл)  $1800^\circ\text{C}$  и  $\text{ThO}_2$   $3222^\circ\text{C}$ , близкой к таковой Ti, и большой химической активности (близкой к активности Mg) отличает Th от U и большинства других металлов.

# Торий

- По химическим свойствам он близок к РЗЭ, особенно к Се. Оба проявляют наиболее устойчивую в природе валентность ( $\text{Th}^{4+}$ ,  $\text{Ce}^{4+}$ ), но по сравнению с Се торий образует более устойчивые комплексные соединения.
- Th окисляется на воздухе при температуре  $20^\circ\text{C}$ , реагирует с  $\text{H}_2\text{O}$  с образованием защитной пленки  $\text{ThO}_2$ ; при низких температурах взаимодействует с F ( $\text{ThF}_4$ ), при нагревании (до  $\sim 45^\circ\text{C}$ ) - с Cl, Br, I, S, при  $600^\circ\text{C}$  - с  $\text{H}_2$  ( $\text{ThH}_2$ ), при  $800^\circ\text{C}$  образует нитриды, фосфиды, карбиды, силициды, а также интерметаллы и сплавы, пока не установленные в природе. Многие соли Th (галогениды, кроме F), сульфаты растворимы в  $\text{H}_2\text{O}$  и разбавленных кислотах. При  $20^\circ\text{C}$  хорошо растворим  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  - 190,7 г/100 г, практически не растворим  $\text{ThF}_4$  - 0,2 г/100 г, а  $\text{ThCl}_4$  реагирует с  $\text{H}_2\text{O}$ ; не растворимы фосфаты, хроматы, молибдаты, оксикарбонат, оксалат, сульфит. Характерно образование многочисленных комплексных соединений  $\text{Th}^{4+}$ , в том числе растворимых (карбонатные и другие комплексы).

# Торий

В химии известны различные состояния окисления Th; наиболее устойчив Th<sup>4+</sup>: ([Rn])ThO<sub>2</sub>, [Th(H<sub>2</sub>O)]<sup>4+</sup>(aq), ThF<sub>4</sub>, ThCl<sub>4</sub>) и т.д., ThF<sub>7</sub><sup>3-</sup>, соли Th<sup>4+</sup>, комплексы. Гораздо менее устойчивы Th<sup>3+</sup> (ThI<sub>3</sub>), и Th<sup>2+</sup> (ThO, ThH<sub>2</sub>).

Стандартный потенциал восстановления E° (В): Th<sup>4+</sup> → Th° = - 1,83 (кислый раствор); ThO<sub>2</sub> → Th° = - 2,56 (щелочной раствор) и окисления Th(тв.) → Th(OH)<sub>4</sub> (тв.) = - 2,48.

Гидроксид (произведение растворимости 10<sup>-39</sup> - 10<sup>-42</sup>) Th(OH)<sub>4</sub> начинает осаждаться из растворов при pH ≥ 3,5; в присутствии карбонатов щелочных металлов и солей органических кислот образует растворимые комплексы (Титаева, 1991). При pH ≥ 3,5 микроконцентрации тория образуют в растворе коллоидный Th(OH)<sub>4</sub>. Процесс гидролиза Th<sup>4+</sup> носит сложный характер, предполагает наличие, кроме Th(OH)<sub>4</sub>, и других форм Th(OH)<sub>3</sub><sup>+</sup>, Th<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub><sup>6-</sup> и др.

В порошке торий пироморфен, температура воспламенения 270°C, нижний предел взрываемости 75 г/м<sup>3</sup>.

# Уран

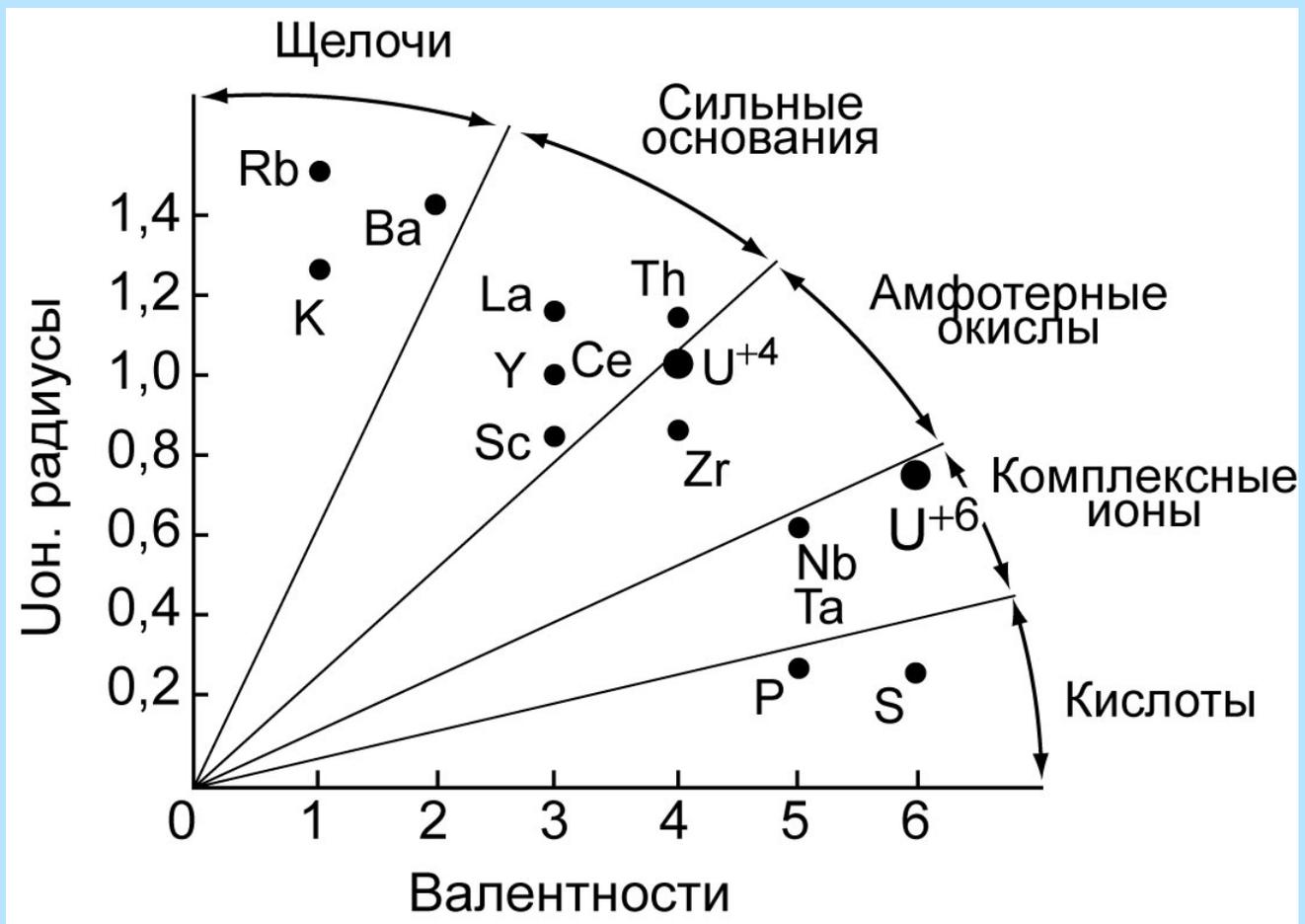
Открыт в 1789 году, но в чистом виде (металл серо-стального цвета) выделен только в 1841 году. Уран является самым тяжелым из относительно распространенных на Земле элементов. Представлен тремя радиоактивными природными изотопами  $^{238}\text{U}$  (99,275%),  $^{235}\text{U}$  (0,720%) и  $^{234}\text{U}$  (0,005%).

Уран ( $5f36d17s2$ ) является *fd*-металлом и принадлежит к 6-й группе периодической системы, подгруппе актиноидов: по группе наиболее близок к W, Mo, в какой-то мере к Ho, Nd, а по периоду - к Th.

Металлический U, как и Th, взаимодействует с  $\text{O}_2$  с образованием защитной пленки оксидов, неравновесных при комнатных температурах ( $t$ ) и давлении ( $P$ ). Соединения UO часто содержат N и C, а  $\text{UO}_2$  и  $\text{UO}_{2+x}$  окисляются при по-вышении температурах и давлении до более высоких оксидов вплоть до  $\text{UO}_3$ . Из многочисленных кислородных соединений наиболее устойчивыми считаются  $\text{UO}_2$  (тип флюорита  $\text{U}_{16}\text{O}_{36+m}$ ) и типа уранила  $[\text{UO}_2]^{2+}$  или  $\text{U}_{5n}\text{O}_{13n+3}$ , которые относятся к двум разным гомологическим рядам оксидов U.

Металлический U имеет сильную восстановительную способность, в порошке пироморфен, сильный комплексообразователь, образует фториды, нитриды, гидриды, сульфиды, а также сплавы с металлами. Характерная особенность химии U - высокая летучесть его карбидов, галоидов, уранилов и др. У всех соединений U преобладают основные свойства. Металлический U реагирует с  $\text{H}_2\text{O}$  при  $t > 100^\circ\text{C}$ ,  $\text{UH}_3$ ,  $\text{UC}_2$  и UC реагируют с холодной и горячей  $\text{H}_2\text{O}$ .

# Кисотно-щелочные свойства



# Уран

Химически U весьма активен, имеет переменную валентность - 3+, 4+, 5+, 6+; особенно устойчивое состояние в геохимии и минералогии имеют  $U^{6+}$  и  $U^{4+}$ , которые ведут себя как разные элементы. В природе уран существует в двух степенях окисления: +4 и +6. В лабораторных условиях получены слабоустойчивые U (III) и U (V).

$U^{4+}$  в природе по свойствам наиболее близок к  $Th^{4+}$ , лантаноидам:  $TR^{4+}$  ( $Ce^{4+}$ , Pr, Tb),  $TR^{3+}$  (Nd, Ho), и к элементам иттриевой группы. U отличается от всех элементов очень крупным размером комплексного катиона  $(UO_2)^{2+}$ , способным образовывать собственные урановые минералы. В этом отношении катион  $U^{6+}$  сходен с анионами  $W^{6+}$  ( $WO_4^{2-}$ ) и особенно с  $Mo^{6+}$  ( $Mo_4^{2-}$ ) устойчивостью анионных комплексов. Менее устойчивы другие состояния окисления U. Стандартные потенциалы восстановления  $E^\circ$  (В)

# Потенциал восстановления

	VI		V		IV		III		0
Кислый раствор	$\text{UO}_2^{2+}$	<u>-0,16</u>	$\text{UO}_2^+$	<u>-0,38</u>	$\text{U}^{4+}$	<u>-0,52</u>	$\text{U}^{3+}$	<u>-1,66</u>	$\text{U}^0$
Щелочной раствор	$\text{UO}_2^{2+}(\text{OH})_2$	<u>-0,3</u>		$\text{UO}_2$	<u>-2,6</u>	$\text{U}(\text{OH})_3$	<u>-2,10</u>	$\text{U}^0$	

**Уран (IV)** в своих соединениях присутствует в форме иона  $U^{4+}$ . По химическим свойствам он близок к Th (IV), Y (III) и тяжелым лантаноидам иттриевой группы. С химической точки зрения ион  $U^{4+}$  является слабым основанием. Он существует лишь в сильноокислых растворах и при понижении кислотности гидролизует с образованием  $U(OH)_4$ . Гидроксид  $U(OH)_4$  слабо растворим в воде, но хорошо растворяется в кислотах. Диоксид урана  $UO_2$  практически не реагирует с водой до  $300^\circ C$ , нерастворим в  $HCl$ , но хорошо растворяется в  $HNO_3$  и смесях кислот. Из соединений U (IV) наиболее растворимы в воде  $UCl_4$  и  $U(SO_4)_2$ . Вследствие этого U (IV) устойчив в сильноокислых сульфатных, хлоридных и нитратных растворах. Силикаты U (IV) растворимы в сильноокислых средах. U (IV) склонен к образованию комплексных соединений, где имеет координационное число 8. Известны карбонатные, сульфатные, оксалатные и другие комплексы  $U^{4+}$ . Большинство из них малоустойчиво, причем устойчивость падает с повышением температуры. Например, в карбонатных растворах U (IV) образует устойчивый в избытке карбоната комплекс  $U(CO_3)_5^{6-}$ .

Отличительной особенностью, отличающей геохимию  $U^{4+}$  от лантаноидов,  $Ti^{2+}$  и других элементов-гидролизатов является высокая среди катионов степень подвижности в водных растворах.

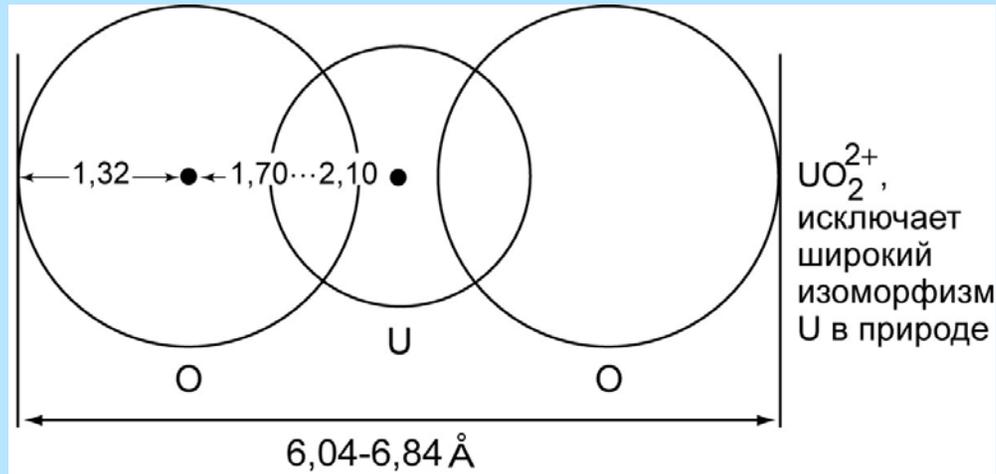
# Ионные радиусы

Элемент	Группа	Валентность			
		3+	4+	5+	6+
Ac	актиноиды	–	–	–	–
Th		(1,08)	1,02	–	–
Pa		(1,05)	0,98	0,80	–
U		1,03	0,97	0,87	0,80
La	лантаноиды	1,14	–	–	–
Ce		1,07	0,94	–	–
Pr		1,06	0,92	–	–
Nd		1,04	–	–	–
Sm		1,00	–	–	–
Eu		0,98	–	–	–
Gd		0,97	–	–	–
Tb		0,93	0,81	–	–
Dy		0,92	–	–	–
Ho		0,91	–	–	–
Er		0,89	–	–	–
Tm		0,87	–	–	–
Yb		0,86	–	–	–
Lu		0,85	–	–	–
Y	иттрий	0,92			

**Уран (VI)** — наиболее устойчивая степень окисления урана при свободном доступе воздуха.

Валентность 6 является высокой даже для такого крупного катиона, как  $U^{6+}$ . Он энергетически неустойчив и в водных растворах мгновенно гидролизуется с образованием комплексного двухвалентного катиона уранила  $UO^{2+}$ .  
Например,  $UF_6 + 2H_2O \rightarrow UO_2F_2 + 4HF$ .

# Уранил-ион



По размерам уранил-ион превышает все известные в природе катионы и равен 6,04- 6,84 Å. В связи с этим он не может изоморфно замещать другие катионы в химических соединениях и в природе легко образует собственные минералы.

Соединения U(VI) сравнительно хорошо растворимы и устойчивы в водных растворах. Наиболее растворимы уранил-нитраты. Хорошо растворимы сульфаты уранила и оксигалогениды ( $\text{UO}_2\text{Cl}_2$  и  $\text{UO}_2\text{F}_2$ ).  $\text{UF}_6$  и  $\text{UCl}_6$  летучи, но в присутствии паров воды легко гидролизуются, переходя в оксигалогениды.

Растворимы многие соли уранила с органическими кислотами. Типичными труднорастворимыми соединениями U (VI) являются фосфаты, арсенаты, ванадаты.

U (VI) проявляет большую склонность к образованию комплексных соединений, которые играют важную роль в его геохимии. Во всех этих соединениях уран находится в форме уранил-иона, который имеет координационные числа 4 и 6. Комплексообразование U (VI) с  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  и  $\text{NO}_3^-$  идет слабо.

Наиболее важное значение в природных условиях имеют карбонатные, сульфатные, фторидные, фосфатные и гидроксильные комплексы.

Аквагидроксикомплексы уранила образуются при ступенчатом замещении аквагрупп в акваионе уранила  $[\text{UO}_2(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  и имеют форму  $[\text{UO}_2(\text{OH})_n(\text{H}_2\text{O})_{6-n}]^{2-n}$  ( $n$  - от 0 до 6) (Наумов, 1978).

Карбонатные комплексы образуют семейство соединений, среди которых в водных растворах устойчивы лишь  $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$  и  $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$ . Первый преобладает в растворе с избытком ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  и при разбавлении переходит во второй. Следующей ступенью является образование слаборастворимого карбоната уранила  $\text{UO}_2\text{CO}_3$ .

Фторидные комплексы образуются лишь в средах с высокими концентрациями фтора.

Сульфатные комплексные соединения уранила по строению подобны карбонатным, однако по прочности уступают не только карбонатным, но и фторидным. Они характерны лишь для кислой среды с  $\text{pH}$  2—4.

Очень важную группу комплексных соединений уранил-ион образует с органическими кислотами (щавелевой, уксусной, лимонной, группой гумусовых кислот и т. д.).

Ионы  $U^{6+}$  наиболее устойчивы в условиях окислительной обстановки и отличаются от  $U^{4+}$  более высоким значением ионной плотности; в водных растворах неустойчивы и гидролизуются с образованием  $UO_2^{2+}$  и  $[UO_2(H_2O)_6]^+$ ,  $[UO_2(H_2O)_5]^+$  и др., а при наличии  $CO_3^{2-}$  -  $UO_2(CO_3)_2^{2-}$  и др. Гидроксил-уранильный комплекс  $UO_2(OH)_2$  устойчив при pH 4,5-7, осаждение карбонатных комплексов начинается при pH > 4,5, сульфатных — 4, гуминовых и фульвокомплексов - при pH ~ 7.

Важное химическое свойство U (особенно  $U^{6+}$ ) - его сильная восстановительная способность, например для  $Fe^{3+}$ . Соединения  $U^{6+}$ , растворимы в  $H_2O$ , особенно уранил-нитраты, а также сульфаты и оксигалогениды ( $UO_2Cl_2$  и  $UO_2F_2$ );  $UF_6$  и  $UCl_6$  летучи, но легко гидролизуются, образуя оксигалогениды.

$UO_4 \cdot 2H_2O$  растворим в холодной (0,0006 г/100г) и горячей (0,008 г/100г)  $H_2O$ ;  $UF_4$  (0,01 г/100г при 20°C),  $UF_6$ ,  $UCl_4$  и  $UCl_5$  гигроскопичны и также реагируют с  $H_2O$  при 20°C; хорошо растворим сульфат  $UO_2SO_4 \cdot 3H_2O$  (151,4 г/100г при 20° и 237,8 при 100°C) и  $UO_2F_2$  (64,4 г/100г при 20° и 74 при 100°C). **Главные нерастворимые соединения  $U^{6+}$  - оксиды, фосфаты, арсенаты и ванадаты, которые известны в качестве экзогенных урановых минералов.**

Характерна тенденция  $U^{6+}$  к образованию комплексов с карбонатными, сульфатными, фторидными, фосфатными (но не Cl, Br,  $NO_3^-$ ). Важное значение имеют устойчивые гидроксокомплексы, карбонатные и органические (с щавелевой, лимонной, гумусовыми и другими кислотами) комплексы; сульфатные характерны только для кислой среды. Существенное значение в геохимии U имеют потенциалы окисления-восстановления в условиях различных pH с изменением направления реакции  $2Fe^{2+} + U^{6+} \leftrightarrow 2Fe^{3+} + U^{4+}$  в кислой среде справа налево, а в щелочной - слева направо. Этим определяется разнообразие природных обстановок, приводящих к миграции и осаждению U на различных геохимических барьерах.

# Радий (Ra)

Известны 4 природных изотопа радия:  $^{223}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=11,2$  дня),  $^{224}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=3,6$  дня),  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=1602$  года),  $^{228}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=8,8$  года). Радий— щелочноземельный элемент, близкий по химическим свойствам к барию. В своих соединениях радий и барий изоструктурны. Радиус иона  $\text{Ra}^{2+}=1,44\text{Å}$ ,  $\text{Ba}^{2+}=1,38\text{Å}$ . Как и все щелочноземельные элементы, радий обладает единственной формой окисления +2, мало склонен к комплексообразованию, находится в водных растворах в форме иона  $\text{Ra}^{2+}$ . Радий обладает более основными свойствами, чем барий. Растворимы в воде хлориды, бромиды, йодиды, сульфиды и нитраты радия. Слабо растворимы его сульфаты, карбонаты, фосфаты, хроматы, фториды и оксалаты. Как следует из этой характеристики его свойств, условия миграции радия отличаются от миграции урана, что нередко приводит к нарушению радиоактивного равновесия.

# Радон (Rn)

В природе известно 3 изотопа радона:  $^{222}\text{Rn}$  (радон,  $T_{1/2}=3,8$  дня),  $^{220}\text{Rn}$  (торон,  $T_{1/2}=54,5$  с.),  $^{219}\text{Rn}$  (актинон,  $T_{1/2}=3,9$  с.), представляющие ряды распада  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{235}\text{U}$ .

Химические свойства радона определяются его положением в группе благородных газов Периодической системы. В соответствии с этим, для него характерна химическая инертность и валентность, равная 0. Он не вступает в реакцию с кислородом даже в искровом разряде и в присутствии катализаторов. В обычных условиях радон находится в молекулярном состоянии в виде Rn. Однако он может образовывать клатратные соединения с водой, фенолом, толуолом.

При взаимодействии с газообразным фтором радон способен давать соединения типа  $\text{RnF}_4$ , сокристаллизуясь при этом с ксеноном. Аналогично криптону и ксенону радон образует гексагидраты.  $\text{Rn}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  изоморфен с  $\text{H}_2\text{S}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{SO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Изотопы радона растворимы в воде и других жидкостях. Коэффициент растворимости в воде при 15 °C варьирует от 0,25 до 0,30. Растворимости радона падает при повышении температуры. **При кипячении он полностью удаляется из раствора.**

Существенно выше его растворимость в органических жидкостях. **Хорошая растворимость его в жирах обуславливает его концентрирование жировыми тканями.** Радон сорбируется на поверхности твердых тел. **Различного рода неограниченные гели и органические коллоиды весьма прочно удерживают адсорбированный радон.** Лучшим сорбентом является активированный уголь. Адсорбированный радон очень подвижен и легко перераспределяется в твердом теле от крайних молекулярных слоев в более глубокие зоны. Десорбция радона происходит при нагревании. С активированного угля он полностью десорбируется при 350-400 °C.

Выделения радона из одной фазы в другую называют **эманированием**. **Коэффициент эманирования радона  $k_{\text{Rn}}$  равен отношению количеству радона, выделившегося из твердого или жидкого тела к его количеству, образовавшемуся в этом теле за тот же интервал времени.** Он варьирует от доли процента до десятков процентов.

# Полоний (Po)

В природе известен ряд изотопов полония:  $^{210}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=138$  дней),  $^{214}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=1,6 \cdot 10^{-4}$  с),  $^{218}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=3,5$  мин) – ряд  $^{238}\text{U}$ ;  $^{211}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=0,52$  с),  $^{215}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=1,8 \cdot 10^{-3}$  с) - ряд  $^{235}\text{U}$ ;  $^{212}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=2,9 \cdot 10^{-7}$  с) и  $^{216}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=0,15$  с) – ряд  $^{232}\text{Th}$ . Из их характеристик видно, что практическое значение для геохимии может иметь лишь относительно долгоживущий  **$^{210}\text{Po}$** .

Химические свойства полония определяются его положением в VIA группе Периодической системы. Он обладает конфигурацией электронных оболочек подобной селену и теллуру и по химическим свойствам близок к ним. В соответствии с принадлежностью к VIA группе он имеет несколько степеней окисления: -2, +2, +3, +4 и +6.  $\text{Po}^{3+}$  имеет сходство с Bi. Наиболее устойчив в растворе  $\text{Po}^{4+}$ .

В природные растворы Po поступает в ультрамикроразнообразиях. Он склонен к образованию псевдоколлоидов, которые возникают в результате адсорбции Po на коллоидных частицах двуокиси кремния, органических веществ и т. д. Адсорбция носит ионообменный характер. При pH 1—4 Po находится в негидролизированных ионных формах; при pH 6—7 наблюдаются гидролиз и образование положительно заряженных коллоидных частиц; при pH 8—9 Po находится в виде отрицательно заряженных коллоидных частиц гидроксидов. В сильнощелочной среде образуется анион  $\text{PoO}_3^{2-}$ . Образование псевдоколлоидов происходит в растворах, где произведение растворимости никак не может быть достигнуто.

Для Po характерна способность к комплексообразованию с различными анионами. Геохимическое значение имеет лишь наиболее долгоживущий изотоп -  $^{210}\text{Po}$ . Он образуется при распаде  $^{222}\text{Rn}$ . Обычным его спутником является более долгоживущий  $^{210}\text{Pb}$  (22 года), из которого  $^{210}\text{Po}$  образуется по следующей цепочке:

$$^{210}\text{Pb} \xrightarrow{\beta} ^{210}\text{Bi} \xrightarrow{\beta} ^{210}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{206}\text{Pb}.$$

22 года      5 дней      138 дней

# Протактиний (Pa)

Атом Pa ( $5f56d17s2$ ) состоит только из радиоактивных изотопов. В природе установлено лишь два изотопа:  $^{231}\text{Pa}$  (T $_{1/2}$  3,43-104 лет) - ряд  $^{235}\text{U}$ ,  $^{234}\text{Pa}$  (2 изомера T $_{1/2}$  6,75 ч и 1,175 мин) - ряд  $^{238}\text{U}$ .

Расположен в V группе периодической системы с Ta, Pr, Dy и др. и геохимически близок к этим элементам, являясь химическим аналогом тантала. По некоторым свойствам близок также к Zr и Hf.

Протактиний – член семейства актиноидов и, соответственно, по химическим свойствам близок к U и Th. Как и U, взаимодействует с кислотами и водяным паром и не реагирует со щелочами. Относится к химически инертным элементам (как и Ta), но на воздухе  $\text{Pa}^{4+}$  окисляется в  $\text{Pa}^{5+}$  с образованием защитной пленки. Соединения Pa слабо растворимы, легко гидролизуются и быстро адсорбируются коллоидными частицами других веществ, образуя псевдоколлоиды на поверхности твердых фаз. Наиболее типичные простые соединения разной валентности:  $\text{Pa}^{4+}$  -  $\text{PaO}_2$ ,  $[\text{Pa}(\text{H}_2\text{O})]^{4+}(\text{aq})$ ,  $\text{PaF}_4$ ,  $\text{PaCl}_4$  и т.д.;  $\text{Pa}^{5+}$  -  $\text{Pa}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PaO}^{2+}$  (соединения),  $\text{PaF}_5$ ,  $\text{PaCl}_5$  и т.д.,  $[\text{PaF}_6]^-$ ,  $[\text{PaF}_7]^{3-}$ ;  $\text{Pa}^{3+}$  -  $\text{PaJ}_3$ .

Катионы протактиния легко образуют комплексные соединения, однако большинство из них так же неустойчиво к гидролизу, как и простые соединения. В водных растворах сравнительно устойчивы лишь фторидные, сульфатные и некоторые органические комплексные соединения.

Металлический Pa при повышенной температуре образует гидрид (250 °C), карбид (1200 °C), оксид  $\text{Pa}_2\text{O}_5$  (> 650 °C); известны соединения  $\text{PaP}$ ,  $\text{PaP}_2$ ,  $\text{Pa}_3\text{P}_4$  и сходные с As, Sb, S, Se, а также комплексы с  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CN}_3$  и т.д.

# Гелий (He)

**Гелий** – нерадиоактивный элемент. После водорода гелий – самый легкий из всех газов. Относится к восьмой группе главной подгруппу периодической системы. Составляющие эту подгруппу элементы характеризуются очень низкой химической активностью, что дало основание называть их благородными или инертными газами. Гелий характеризуется химической инертностью и 0-й степенью окисления. Температура сжижения гелия  $-268,9^{\circ}\text{C}$ , затвердевания  $-271,4^{\circ}\text{C}$  при давлении 3,0 МПа.

В природе известно 2 изотопа гелия –  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$ .  $^3\text{He}$  рассматривается как газ, захваченный Землей в начальный момент ее формирования,  $^4\text{He}$  – как продукт термоядерного синтеза и радиоактивного распада тяжелых ядер.

Гелий характеризуется хорошей растворимостью в магматических расплавах. Он способен легко проникать через кварцевое стекло. Это свойство используется в методике его определения. Изотоп  $^3\text{He}$  – единственное вещество пригодное для измерения температур ниже 1К.

# Ряды распада

- В отличие от долгоживущих природных радионуклидов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  не сразу превращаются в стабильные дочерние продукты, а образуют длинные цепочки относительно короткоживущих промежуточных продуктов распада, которые называются рядами распада или радиоактивными семействами

# Ряды распада

## Ряд урана-238

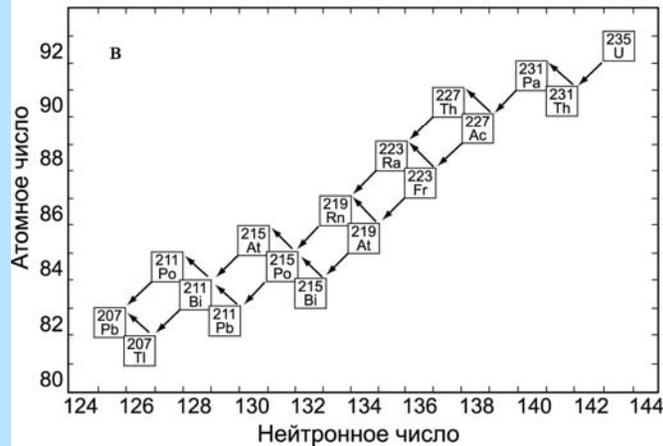
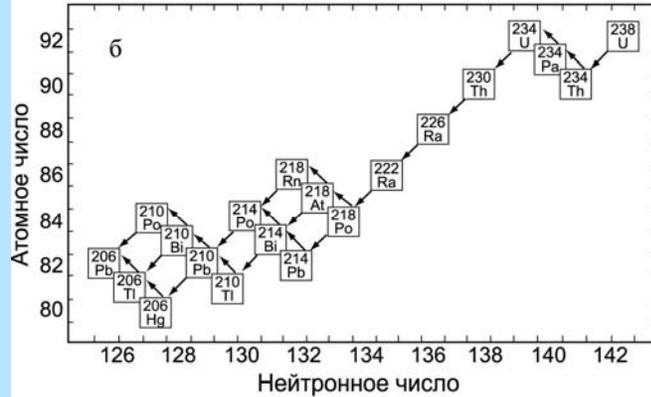
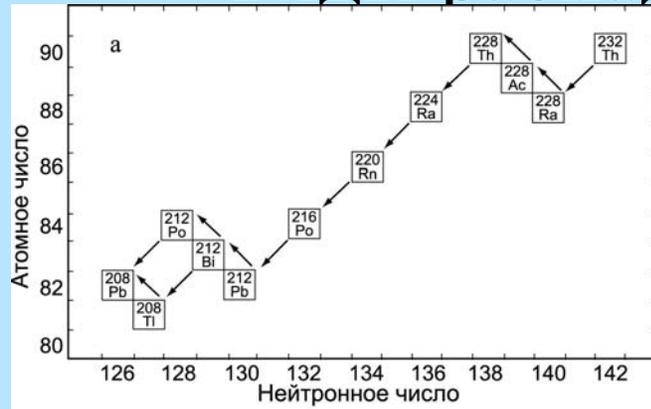
Ряд	$^{238}\text{U}_{92} \xrightarrow{\alpha} ^{234}\text{Th}_{90} \xrightarrow{\beta} ^{234}\text{Pa}_{91} \xrightarrow{\beta} ^{234}\text{U}_{92} \xrightarrow{\alpha} ^{230}\text{Th}_{90} \xrightarrow{\alpha} ^{226}\text{Ra}_{88} \xrightarrow{\alpha} ^{222}\text{Rn}_{86} \xrightarrow{\alpha} \dots ^{206}\text{Pb}_{82} + 8\ ^4\text{He}_2$							
$T_{1/2}$	$4,5 \cdot 10^9$ л	24 сут	6,7 ч	$2,48 \cdot 10^5$ л	$8 \cdot 10^4$ л	1602 г	3,825 сут	стабильные

## Ряд тория-232

Ряд	$^{232}\text{Th}_{90} \xrightarrow{\alpha} ^{228}\text{Ra} \xrightarrow{\beta} ^{228}\text{Ac} \xrightarrow{\beta} ^{228}\text{Th} \xrightarrow{\alpha} ^{224}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha} ^{220}\text{Rn} \xrightarrow{\alpha} \dots ^{208}\text{Pb}_{82} + 6\ ^4\text{He}_2$							
$T_{1/2}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ л	5,75 л	6,13 ч	1,9 л	3,6 сут	4,5 сек	стабильные	

Конечными стабильными продуктами всех трех рядов являются изотопы свинца:  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ , которые носят название радиогенных, в отличие от нерадиогенного изотопа  $^{204}\text{Pb}$ . **Радиоактивный распад - явление необратимое.** Поэтому от начала каждого ряда к его концу в целом уменьшаются массовые числа и порядковые номера. Это обеспечивается лишь за счет альфа-распада, так как при бета-распаде порядковый номер увеличивается на единицу, а массовое число не меняется.

# Ряды распада



**Альфа-распад** заключается в способности ядер превращаться в другие более легкие ядра путем испускания  $\alpha$ -частиц – ядер гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ). Альфа-частицы относятся к группе тяжелых заряженных частиц. Энергия  $\alpha$ -частиц, испускаемых в процессе альфа-распада находится в пределах 3,15( ${}^{209}\text{Bi}$ ) – 8,8 ( ${}^{212}\text{Po}$ ) МэВ

**Бета-распад** – это переход радиоактивных ядер в стабильное состояние путем превращения избыточных нейтронов в протон с испусканием электрона. При этом формируется  $\beta$ -излучение, представляющее собой поток электронов, образующий в процессе  $\beta$  – распада.

Помимо  $\alpha$ -распада для очень тяжелых ядер возможен и иной тип превращений – **спонтанное деление на два сравнимых по массе осколка** с испусканием нескольких нейтронов. Спонтанное деление наблюдается для ядер с массовым числом не менее 232 и имеет очень малую вероятность по сравнению с конкурирующим  $\alpha$ -распадом. Это свойство тяжелых атомов используется в практике для изучения радионуклидов методом осколочной радиографии.

**Гамма – излучение** представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение, возникающее при ядерных превращениях, изменении энергетического состояния ядер и аннигиляции частиц. Длина волны  $\lambda$  для  $\gamma$ -излучения меньше межатомного расстояния ( $10^{-10}$  м). Радионуклиды характеризуются строго определенными спектрами  $\gamma$ -излучения, которые используются для гамма-спектрометрического анализа.

Радионуклид	название	T <sub>1/2</sub>	Основные энергии излучения (МэВ) и их доля в общей интенсивности		
			α	β	γ
1	2	3	4	5	6
<b>Ряд U<sup>238</sup></b>					
<sup>238</sup> U <sub>92</sub>	Уран I	4,468×10 <sup>9</sup> лет	4,15 (25%) 4,2 (75%)		
<sup>234</sup> Th <sub>90</sub>	Уран X <sub>1</sub>	24,1 сут		0,103 (21%) 0,193 (79%)	0,063 (3,5%) 0,093 (4%)
<sup>234m</sup> Pa <sub>91</sub>	Уран X <sub>2</sub>	1,17 мин		2,29 (98%)	0,765 (0,3%) 1,001 (0,6%)
<sup>234</sup> Pa <sub>91</sub>	Уран Z	6,75 ч		1,13 (13%)	0,7 (24%) 0,9 (70%)
<sup>234</sup> U <sub>92</sub>	Уран II	2,45×10 <sup>5</sup> лет	4,72 (28%) 4,77 (72%)	–	0,053 (0,2%)
<sup>230</sup> Th <sub>90</sub>	Ионий	7,7×10 <sup>4</sup> лет	4,62 (24%) 4,68 (76%)	–	0,068 (0,6%) 0,142 (0,07%)
<sup>226</sup> Ra <sub>88</sub>	Радий	1602 года	4,60 (5%) 4,78 (95%)	–	0,186 (4%)
<sup>222</sup> Rn <sub>86</sub>	Радон	3,823 сут	5,49 (100%)	–	0,510 (0,07%)
<sup>218</sup> Po <sub>84</sub>	Радий А Радий В	3,05 мин 26,8 мин	6,0 (100%) –	0,33 (~0,19%) 0,65 (50%) 0,71 (40%) 0,98 (6%)	0,295 (19%) 0,352 (36%)
<sup>218</sup> At <sub>85</sub>	Астат	~ 2 сек	6,65 (6%) 6,70 (94%)	? (~0,1%)	–
<sup>214</sup> Bi <sub>83</sub>	Радий С	19,9 мин	5,45 (0,012%) 5,51 (0,008%)	1,0 (23%) 1,151 (40%) 3,26 (19%)	0,609 (47%) 1,12 (17%) 1,764 (17%)
<sup>214</sup> Po <sub>84</sub>	Радий С'	164 мкс	7,69 (100%)	...	0,799 (0,014%)
<sup>210</sup> Tl <sub>81</sub>	Радий С''	1,3 мин	–	1,3 (25%) 1,9 (56%) 2,3 (19%)	0,296 (80%) 0,795 (100%) 1,31 (21%)
<sup>210</sup> Pb <sub>82</sub>	Радий D	2 года	3,72 (0,00002%)	0,010 (85%) 0,061 (15%)	0,047 (4%)
<sup>210</sup> Bi <sub>83</sub>	Радий E	5,01 сут	4,65 (0,0007%) 4,69 (0,0005%)	1,161 (~100%)	–
<sup>210</sup> Po <sub>84</sub>	Радий F	138,4 сут	5,305 (100%)	–	0,803 (0,0011%)
<sup>206</sup> Tl <sub>81</sub>	Радий E''	4,19 мин	–	1,571 (100%)	–
<sup>206</sup> Pb <sub>82</sub>	Радий G	стабильный	–	–	–

В каждом из природных рядов встречается определенная последовательность превращений, когда **за одним альфа-распадом следуют два бета-распада или наоборот.**

Альфа-распад уменьшает заряд ядра на 2 единицы, а два бета-распада увеличивают его также на 2 единицы, то есть возвращают к прежнему значению. В результате появляется новый изотоп одного и того же элемента, который на 4 атомных единицы массы меньше первичного (за счет альфа-распада). Примером могут служить группы изотопов в ряду урана-238:  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ ,  $^{234}\text{Th}$  и  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{218}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  и др. Аналогичные группы имеют место и в других рядах.

**Альфа-частицы являются ядрами  $^4\text{He}$ .** Поэтому при их стабилизации после присоединения двух электронов появляются атомы  $^4\text{He}$ . В ряду урана-238 образуется 8 атомов  $^4\text{He}$ , в ряду урана-235 - 7 атомов, а в ряду тория-232 - 6 атомов. Таким образом, радиоактивный распад природных рядов ведет к появлению  $^4\text{He}$ .

# Радиоактивное равновесие в рядах распада

Члены каждого ряда связаны друг с другом последовательными необратимыми альфа- и бета- превращениями. Если система, в которой находятся радионуклиды того или иного ряда, закрыта, то есть не происходит выноса или поступления отдельных ее членов относительно других, то со временем в ряду наступает радиоактивное равновесие. Так как периоды полураспада материнских радионуклидов – родоначальников рядов – много больше периодов полураспада дочерних (промежуточных) членов, то условие равновесия выражается соотношениями:

$$N_1/T_1 = N_2/T_2 = \dots N_i/T_i = A \text{ или} \\ N_1/\lambda_1 = N_2/\lambda_2 \dots = N_i/\lambda_i = A; N_1/\lambda_1 / N_2/\lambda_2 = 1,$$

где  $N$  – число атомов,  $\lambda$  – константа распада,  $T$  – период полураспада,  $A$  – активность, Бк.

Это соотношение определяет так называемое **«вековое» равновесие** (Баранов, 1956). Скорость установления радиоактивного равновесия в ряду распада зависит от периода полураспада наиболее долгоживущего члена ряда, а для пары взаимосвязанных радионуклидов определяется периодом полураспада дочернего –  $T_d$ . С точностью до 0,8% равновесие наступает через  $7T_d$ , а с точностью до 0,1% – через  $10T_d$ . Так, для ряда U-238 наиболее долгоживущим промежуточным членом ряда является  $^{234}\text{U}$  с периодом полураспада 244 тыс. лет. Поэтому радиоактивное равновесие в целом по ряду наступит лишь через 1,7 млн лет (с точностью до 1%). В ряду Th-232, где наиболее долгоживущим является  $^{228}\text{Ra}$  с периодом полураспада, равным 5,75 года, равновесие будет наблюдаться всего через 40 лет (с точностью до 1%).

В зависимости от соотношения периодов полураспада материнского ТМ и дочернего ТД может встречаться несколько вариантов изменения их активностей (Титаева, 2000):

1.  $T_M < T_D$ . Материнский радионуклид распадается быстрее, чем дочерний. В этом случае равновесие наступить не может, если материнский радионуклид изолирован и не подкреплён предыдущим, более долгоживущим членом ряда. Активность материнского радионуклида при этом уменьшается в соответствии с уравнением  $N = N_0 \exp(-\lambda t)$ . Примером может служить пара  $^{234}\text{Th}$  (24 дня) -  $^{234}\text{U}$  (244 тыс. лет).
2.  $T_M > T_D$ . Если период полураспада материнского радионуклида соизмерим или несколько больше периода полураспада дочернего, то с течением времени активность дочернего возрастет до состояния подвижного равновесия с материнским. Затем их активности, равные между собой, будут уменьшаться в соответствии с ТМ. Примером может служить пара  $^{228}\text{Ra}$  (5,75 года) –  $^{228}\text{Th}$  (1,9 года).
3.  $T_M \gg T_D$ . Чаще используются пары, где период полураспада материнского (например, родоначальника ряда) много больше дочернего радионуклида. В этом случае через  $10T_D$  (с точностью до 0,1%) наступает вековое равновесие, описываемое приведенным выше уравнением. В природных системах редко встречаются случаи, когда присутствует только материнский радионуклид, а дочерние полностью отсутствуют. Обычно некоторое их количество находится в системе вместе с материнскими атомами.

**Радиоактивное равновесие в данном ряду распада считается нарушенным, если соотношение между членами ряда не удовлетворяет приведенному выше выражению, а отношения активностей отдельных радионуклидов не соответствует единице (Титаева, 2005).**

В открытой системе радиоактивное равновесие может быть нарушено в результате перемещения атомов одних членов ряда относительно других из системы либо в систему. При этом перемещение атомов должно происходить на расстояние, превышающее размер системы, и за время, более короткое, чем то, которое необходимо для восстановления равновесия.

**Нарушение радиоактивного равновесия является результатом геохимической дифференциации членов одного ряда, где одни из них оказываются в данных условиях более подвижными, чем другие.** Важнейшими процессами, приводящими к такой дифференциации, являются процессы растворения и осаждения, которые локализуются на границе раздела жидкой и твердой фаз. Однако подобные процессы нередко могут возникать также и на границах газ/твердое вещество и газ/жидкость.

Существуют три основные группы факторов, приводящие к нарушению радиоактивного равновесия в рядах распада (Титаева, 2005):

- различие химических свойств элементов, изотопами которых являются исследуемые радионуклиды,
- свойства элементов, связанные с радиоактивностью
- физико-химические условия окружающей среды.

Исключительно химическими свойствами членов рядов распада обусловлено геохимическое поведение лишь наиболее долгоживущих и распространенных в природе родоначальников рядов:  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , концентрации которых сопоставимы с концентрациями большинства микроэлементов. Геохимия остальных членов рядов при равных физико-химических условиях среды обусловлена как их химическими особенностями, так и факторами, связанными с радиоактивностью: а) происхождением из того или иного родоначальника ряда; б) скоростью радиоактивного распада (или накопления); в) энергией радиоактивной отдачи; г) концентрацией и зависимостью от присутствия носителей.

Обычно нарушения радиоактивного равновесия наблюдаются на границе раздела двух фаз, т.е. на границе двух систем. В природе часто такие условия создаются при взаимодействии природных вод, циркулирующих по порам и трещинам, с горными породами, рыхлыми осадками или почвами. В зависимости от состава растворенных в воде ионов, величин pH и Eh одни дочерние нуклиды могут оказаться более растворимы, чем другие. В результате селективного выщелачивания произойдет дифференциация радионуклидов, принадлежащих к одному ряду распада. Жидкая фаза окажется обогащенной наиболее растворимыми членами ряда; твердая фаза, напротив, будет испытывать их дефицит. В результате и горные породы, и циркулирующие по ним воды будут характеризоваться нарушением радиоактивного равновесия в рядах распада. Процессы селективного осаждения радионуклидов из природных вод и последующей их адсорбции на твердой фазе также являются механизмами, способствующими нарушению радиоактивного равновесия среди членов одного ряда.

Рассмотрим некоторые примеры (Титаева, 2000).

- 1) При выветривании горных пород природные воды будут окислять атомы урана, находящиеся на поверхности минеральных зерен, и переводить их в раствор. При этом дочерние атомы изотопов тория ( $^{234}\text{Th}$  и  $^{230}\text{Th}$ ), обладающие существенно меньшей растворимостью, в значительной степени останутся на месте. В результате горные породы в зоне выветривания и особенно почвы приобретают неравновесные отношения активностей с избытком  $^{230}\text{Th}$  ( $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U} \geq 2,0$ ), а воды, напротив, характеризуются относительным дефицитом  $^{230}\text{Th}$  ( $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U} \leq 0,5$ ).
- 2) В океанической воде  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  находятся в растворе в составе устойчивых карбонатных комплексов, а образующийся из  $^{234}\text{U}$  дочерний радионуклид  $^{230}\text{Th}$  будет адсорбироваться на взвешенных частичках или соосаждаться с гидроксидами железа, обогащая таким образом донные осадки. В результате радиоактивное равновесие оказывается нарушенным и в воде, и в осадках.
- 3) Примером иной геохимической обстановки может служить взаимодействие подземных вод с водовмещающими породами в зоне контакта с углеводородными залежами, создающими резко восстановительные условия. В этих условиях окисления атомов урана не происходит и переход их в воду ничтожно мал. В то же время дочерний  $^{226}\text{Ra}$  легко выщелачивается из горных пород и весьма устойчив в растворе в хлоридных бессольфатных барийсодержащих рассолах. В итоге радиоактивное равновесие на контакте порода – вода резко нарушается, а отношение активностей  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  в рассолах может достигать 102-104.

- В практике геологоразведочных работ особое значение имеет радиоактивное равновесие между ураном и радием и ураном, торием и конечными продуктами распада – изотопами свинца.