

«Стратегическое, дефицитное и критическое минеральное сырьё» (Th, торий – потенциальный ядерный ресурс)



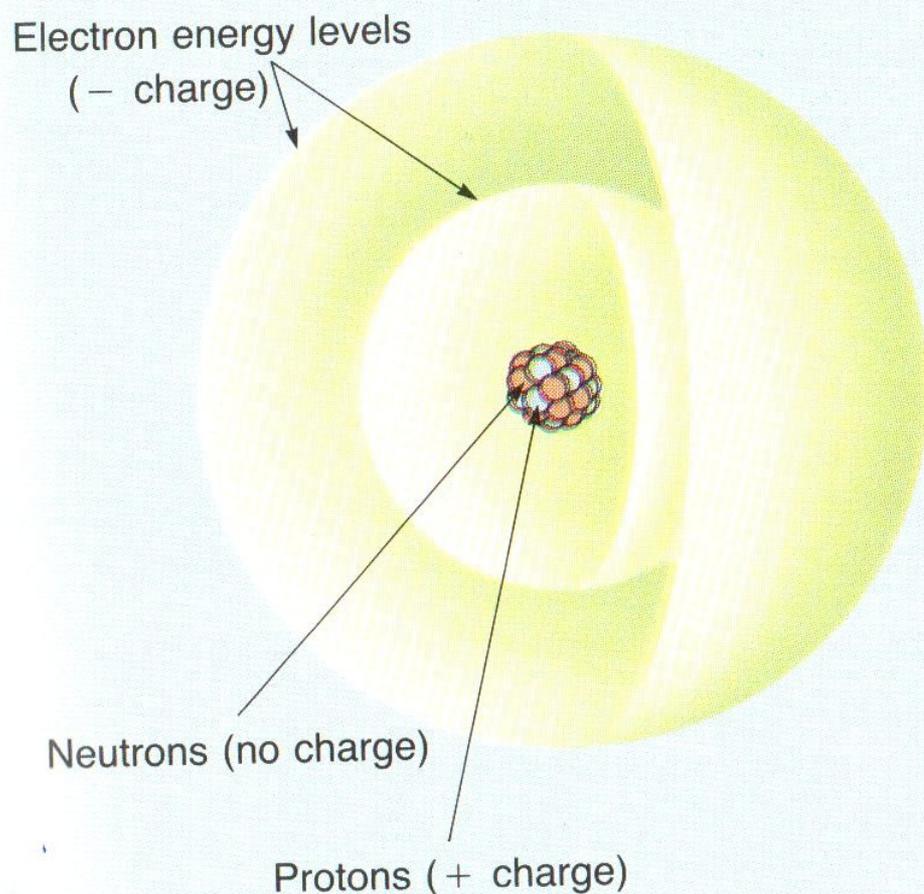
Ерёмин Николай Иосифович

Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

Содержание

- Атомное ядро
- Актиноиды
- Ядерные реакции и ядерное горючее
- Торий
- Проблемы МСБ тория
- Прогнозы
- Заключение

Атомное ядро



Ядро атома (более 99,9% всей массы атома) состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов (общее название – «нуклоны»). Число протонов равно порядковому номеру элемента **Z**, а сумма протонов и нейтронов – атомному весу, или массовому числу **A**. Радиус ядра:

$$R=1,5 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3}$$

Плотность ядер приблизительно одинакова и равна $1,3 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$. Атомы с равной суммой чисел протонов **Z**, но с разным числом нейтронов являются изотопами одного и того же элемента и не отличаются по своим химическим свойствам.

Радиоактивные элементы (семейство актиноидов – «5f-элементов»)

- Значительная группа радиоактивных элементов, встречаемых на Земле, входит в **семейство актиноидов**. Это актиний (89Ac), торий (90Th), протактиний (91Pa), уран (92U), нептуний (93Np) и плутоний (94Pu). Их химические свойства имеют много общего. Семейство актиноидов «5f-элементов» - более тяжелый аналог **семейства лантаноидов** - «4f-элементов».
- Изучение структуры электронных оболочек актиноидов показало, что при переходе от более легких элементов к более тяжелым у них не появляются новые электронные уровни, а происходит достройка более глубоко расположенной 5f-подоболочки. Подобно этому в семействе лантаноидов происходит застройка 4f-подоболочки.

Схема строения электронных оболочек актиноидов «5f-элементов»

Электронный уровень (оболочка)	Номер оболочек (главное квантовое число – n)	⁸⁹ Ac актиний	⁹⁰ Th торий	⁹¹ Pa протактиний	⁹² U уран	⁹³ Np нептуний	⁹⁴ Pu плутоний	⁹⁵ Am америций
Q	7	2	2	2	2	2	2	2
P	6	9	10	9	9	9	8	8
O	5	18	18	20	21	22	24	25
N	4	32	32	32	32	32	32	32
M	3	18	18	18	18	18	18	18
L	2	8	8	8	8	8	8	8
K	1	2	2	2	2	2	2	2

- В связи с тем, что происходит заполнение внутренней оболочки, последняя оказывает определенное экранирующее воздействие на притяжение внешних электронов ядром, и радиусы ионов актиноидов очень слабо отличаются при переходе от одного элемента к другому. Наблюдается так называемое «актиноидное сжатие», аналогичное «лантаноидному сжатию».
- Близость семейств актиноидов и лантаноидов проявляется в очень большом сходстве их спектров поглощения и наличии изоморфизма между отдельными членами различных семейств, который широко распространен в природных соединениях. Ионные радиусы лантаноидов и актиноидов также весьма близки.

- Помимо сходства с семейством лантаноидов актиний (Ac), торий (Th), протактиний (Pa) и уран (U) имеют общие черты с элементами переходных групп:
 - актиний (Ac) – с элементами группы IIIa (со скандием, иттрием и лантаном),
 - торий (Th) – с элементами группы IVa (с титаном, цирконием и гафнием),
 - протактиний (Pa) - с элементами группы Va (с ванадием, ниобием и танталом),
 - уран (U) - с элементами группы VIa (с хромом, молибденом и вольфрамом).

Сходство актиноидов с элементами своих подгрупп уменьшается от актиния к урану и для трансурановых элементов не наблюдается совсем (после открытия нептуния обнаружили, что он по химическим свойствам напоминает уран и совершенно не похож на рений, непосредственно под которым он расположен в периодической системе).

Актиноиды (actinoides)

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ																Энергетические уровни	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а			
1	1	H водород 1,008															He гелий 4,003	2	
2	2	Li литий 6,941	Be бериллий 9,0122	B бор 10,811	C углерод 12,011	N азот 14,007	O кислород 15,999	F фтор 18,998									Ne неон 20,179	10	
3	3	Na натрий 22,99	Mg магний 24,312	Al алюминий 26,982	Si кремний 28,086	P фосфор 30,974	S сера 32,064	Cl хлор 35,453									Ar аргон 39,948	18	
4	4	K калий 39,102	Ca кальций 40,08	Sc скандий 44,956	Ti титан 47,88	V ванадий 50,941	Cr хром 51,996	Mn марганец 54,938	Fe железо 55,849	Co кобальт 58,933	Ni никель 58,7								
	5	Cu медь 63,546	Zn цинк 65,37	Ga галлий 69,72	Ge германий 72,59	As мышьяк 74,922	Se селен 78,96	Br бром 79,904										Kr криптон 83,8	36
5	6	Rb рубидий 85,468	Sr стронций 87,62	Y иттрий 88,906	Zr цирконий 91,22	Nb ниобий 92,906	Mo молибден 95,94	Tc технеций [99]	Ru рутений 101,07	Rh родий 102,906	Pd палладий 106,4								
	7	Ag серебро 107,868	Cd кадмий 112,41	In индий 114,82	Sn олово 118,69	Sb сурьма 121,75	Te теллур 127,6	I йод 126,905										Xe ксенон 131,3	54
6	8	Cs цезий 132,905	Ba барий 137,34	La лантаноиды 57-71	Hf гафний 178,49	Ta тантал 180,948	W вольфрам 183,85	Re рений 186,207	Os осмий 190,2	Ir иридий 192,22	Pt платина 195,09								
	9	Au золото 196,967	Hg ртуть 200,59	Tl таллий 204,37	Pb свинец 207,19	Bi висмут 208,98	Po полоний [210]	At астат [210]											Rn радон [222]
7	10	Fr франций [223]	Ra радий [226]	Ac актиноиды 89-103	Rf резерфордий [261]	Db дубний [262]	Sg сигборгий [263]	Bh борний [262]	Hn ханний [265]	Mt мейтнерий [268]	110								
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄										
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ					RH ₄	RH ₃	H ₂ R	HR											



Д.И. Менделеев
1834–1907



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СЛОЯМ

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

ЛАНТАНОИДЫ

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

АКТИНОИДЫ

89 Ac актиний [227]	90 Th торий 232,038	91 Pa протактиний [231]	92 U уран 238,29	93 Np нептуний [237]	94 Pu плутоний [244]	95 Am амерций [243]	96 Cm куриум [247]	97 Bk берклий [247]	98 Cf калифорний [251]	99 Es эйзштейний [254]	100 Fm фермий [257]	101 Md менделеев [258]	102 No нобелий [259]	103 Lr лоуренсий [260]
----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

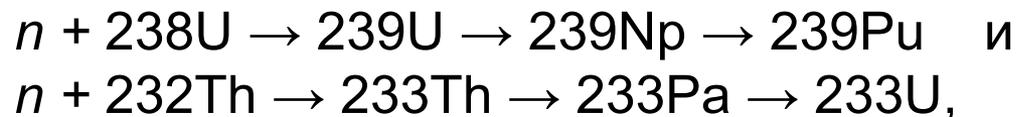
Ядерные реакции

- Ядерные реакции – процессы превращения атомных ядер в результате их взаимодействия с элементарными частицами, электромагнитным излучением или другими ядрами. Их классифицируют по типу бомбардирующих частиц на реакции под действием нейтронов, заряженных частиц или гамма-квантов (фотоядерные реакции).
- В зависимости от энергии воздействующих на ядро частиц различают ядерные реакции при малых, средних и высоких энергиях.
- При бомбардировке тяжелых ядер нейтронами может происходить деление ядер. Образуются два ядра-осколка неравной величины и несколько нейтронов. Как правило, продукты деления – радиоактивные изотопы элементов средней части таблицы Менделеева. Из встречаемых в природе изотопов под действием нейтронов малых энергий (медленных) делятся ^{235}U и ^{239}Pu , нейтроны высоких энергий (быстрые) вызывают деление всех изотопов тория, протактиния и урана.
- Во всех ядерных реакциях соблюдается закон сохранения суммарного электрического заряда. В обычных ядерных реакциях сохраняется также и общее число нуклонов.

Ядерное горючее

- Ядерное горючее – делящиеся нуклиды, используемые в ядерных реакторах для осуществления ядерной цепной реакции деления; эти нуклиды при взаимодействии с нейтронами делятся с испусканием не менее двух нейтронов и обладают ядерно-физическими свойствами, обеспечивающими создание критической массы в реальных геометрических размерах активной зоны реактора.
- Этим требованиям удовлетворяют четно-нечетные ядра актиноидов (с четным числом протонов и нечетным числом нейтронов), в том числе природный изотоп ^{235}U , искусственные изотопы ^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{243}Pu , которые делятся во всем спектре энергий нейтронов, начиная с тепловых, и способны создать цепные реакции деления.
- Четно-четные ядра актиноидов (природные изотопы ^{238}U , ^{232}Pu , искусственные изотопы ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U , ^{240}Pu , ^{242}Pu и др.) могут делиться только на нейтронах с энергией около 1 МэВ и более. Используя эти изотопы, невозможно создать цепную реакцию вследствие низких вероятностей деления и среднего выхода нейтронов. *Однако в процессе нейтронного захвата эти ядра способны превращаться в делящиеся изотопы.* Таким образом, открывается реальная возможность воспроизводства ядерного горючего и возвращения его в топливный цикл (замкнутый топливный цикл).

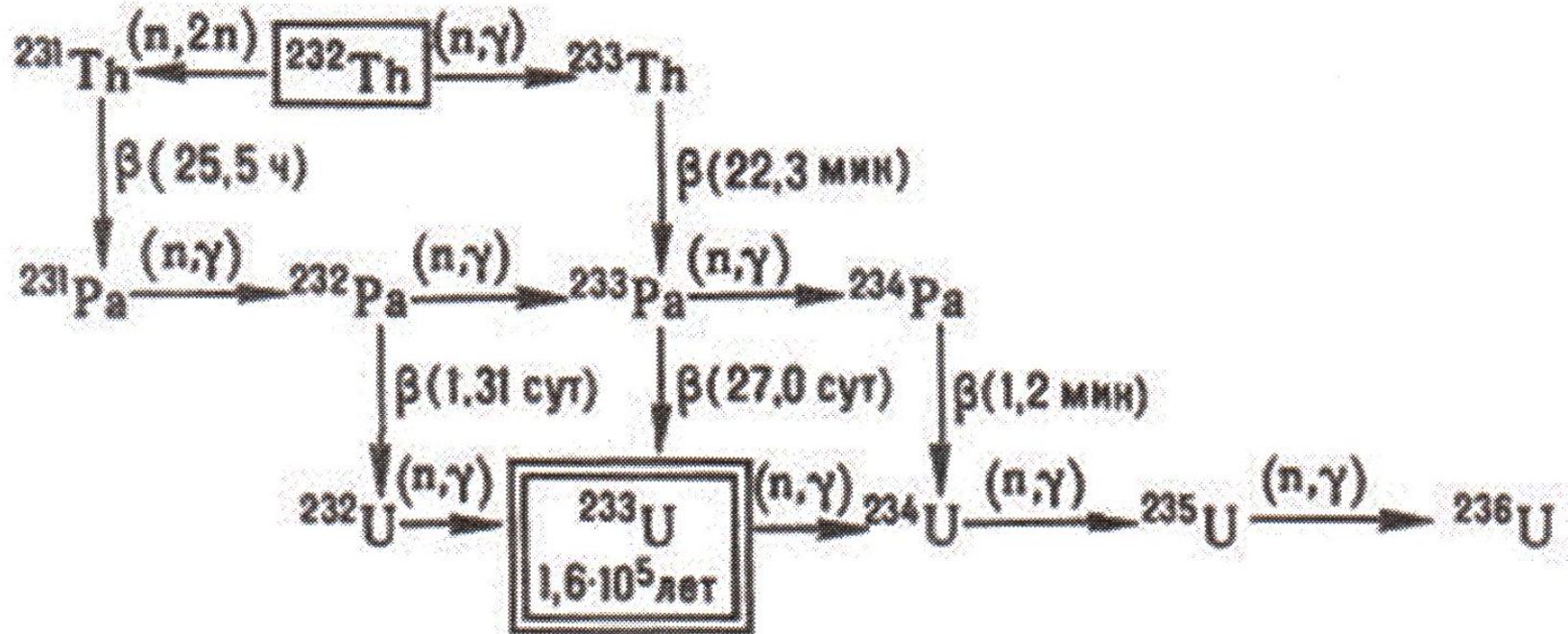
- Наибольшее значение для воспроизводства ядерного горючего имеют природные изотопы ^{238}U и ^{232}Th , которые при поглощении нейтронов образуют не существующие в природе изотопы ^{239}Pu и ^{233}U («оборотное ядерное горючее»). Природный уран в основном состоит из ^{238}U и лишь на 0,714% по массе из изотопа ^{235}U . Природный торий состоит практически полностью из ^{232}Th . Как исходный материал для воспроизводства ядерного горючего изотопы ^{238}U и ^{232}Th получили название «топливного сырья».
- Отсутствующие в природе изотопы ^{239}Pu и ^{233}U («оборотное ядерное горючее»), делящиеся тепловыми нейтронами, в необходимом количестве можно наработать в реакторах на быстрых нейтронах (более 1 МэВ) по схемам:



что открывает возможности воспроизводства ядерного горючего в цепной реакции деления. Именно в этом состоит ценность тория как потенциального сырья для ядерной энергетики.

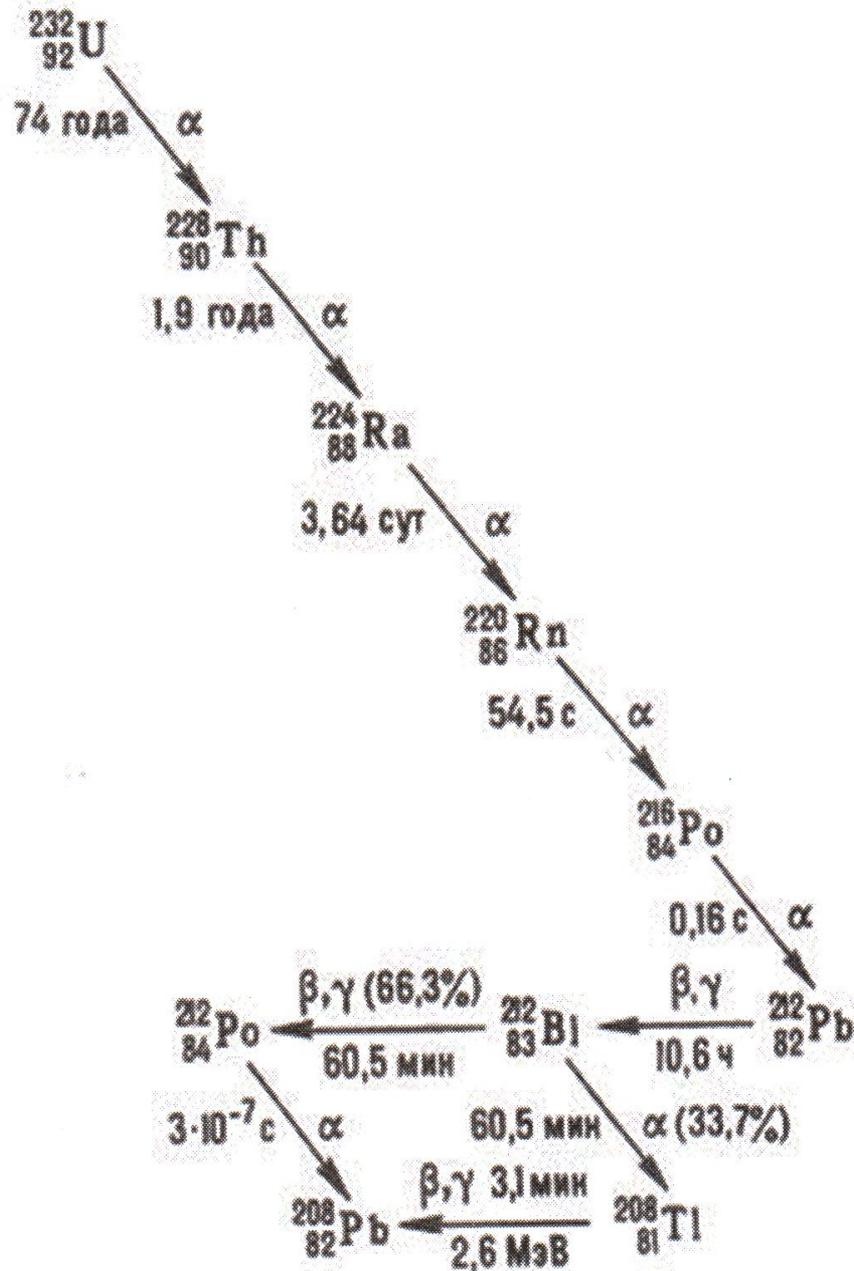
- Эффективность воспроизводства ядерного горючего определяется коэффициентом воспроизводства K_v , равным отношению количества воспроизведенного ядерного горючего к количеству «выгоревшего» за то же время и существенно зависящим от нейтронного энергетического спектра реактора.
- В реакторах на тепловых (медленных) нейтронах K_v не превышает 0,5 – 0,8. Повысить количество использованного природного урана за счет воспроизводства в тепловых реакторах возможно не более чем на 2% по массе. В реакторах на быстрых нейтронах K_v больше 1, что обеспечивает расширенное воспроизводство ядерного горючего и практически полное использование всего добываемого урана, а в будущем и тория.

Цепочка воспроизводства делящегося ^{233}U при поглощении торием медленных нейтронов



Поглощая нейтрон, ^{232}Th преобразуется в ^{233}Th , который при распаде переходит в ^{233}Pa , а затем в ^{233}U . Облученное топливо можно выгрузить из реактора, ^{233}U отделить от тория и загрузить в другой реактор как часть замкнутого топливного цикла.

- Этот изотоп урана (^{233}U), участвуя в цепной реакции деления, выделяет теплоту и избыточные нейтроны, которые преобразовывают еще большее количество ^{232}Th в делящийся ^{233}U . Такая технология привлекательна тем, что, во-первых, позволяет избежать наработки плутония, во-вторых, эффективность использования топлива может быть близка к эффективности реакторов на быстрых нейтронах, а в-третьих, в качестве топлива используется торий, в природе более распространенный, чем уран.
- Возможность технической реализации уран-ториевого топливного цикла изучается около 30 лет. Широкомасштабные разработки по нему осуществляет Индия, располагающая большими запасами тория, в 6 раз превышающими запасы урана. К 2050 году до 30% ядерной электроэнергии в Индии предполагается получать на реакторах с ториевым топливом.
- Уран-ториевому топливному циклу присущ ряд технических проблем, связанных с высокой радиоактивностью изотопа ^{233}U и пока не решенных должным образом.



Торий (^{232}Th) как сырьевой материал для получения делящихся ядер ^{233}U пока не нашел применения.

Одна из главных причин этого состоит в том, что ^{232}Th наряду с ^{233}U дает изотоп ^{232}U , который при распаде образует γ -активные ядра (^{212}Bi , ^{212}Pb , ^{208}Tl) и высоко радиоактивный ^{228}Th .

Загрязнение ^{233}U изотопом ^{232}U делает невозможным изготовление твэлов в открытых условиях.

Торий, Th (thorium)

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Ряды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																Энергетические уровни	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			a
		a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б				
1	1	H ВОДОРОД 1,008																He ГЕЛИЙ 4,003	2
2	2	Li ЛИТИЙ 6,941	Be БЕРИЛЛИЙ 9,0122	B БОР 10,811	C УГЛЕРОД 12,011	N АЗОТ 14,007	O КИСЛОРОД 15,999	F ФТОР 18,998										Ne НЕОН 20,179	10
3	3	Na НАТРИЙ 22,99	Mg МАГНИЙ 24,312	Al АЛЮМИНИЙ 26,982	Si КРЕМНИЙ 28,086	P ФОСФОР 30,974	S СЕРА 32,064	Cl ХЛОР 35,453										Ar АРГОН 39,948	18
4	4	K КАЛИЙ 39,102	Ca КАЛЬЦИЙ 40,08	Sc СКАНДИЙ 44,956	Ti ТИТАН 47,887	V ВАНАДИЙ 50,941	Cr ХРОМ 51,996	Mn МАРГАНЕЦ 54,938	Fe ЖЕЛЕЗО 55,849	Co КОБАЛЬТ 58,933	Ni НИКЕЛЬ 58,7								
	5	Cu МЕДЬ 63,546	Zn ЦИНК 65,37	Ga ГАЛЛИЙ 69,72	Ge ГЕРМАНИЙ 72,59	As МЫШЬЯК 74,922	Se СЕЛЕН 78,96	Br БРОМ 79,904											Kr КРИПТОН 83,8
5	6	Rb РУБИДИЙ 85,468	Sr СТРОНЦИЙ 87,62	Y ИТРИЙ 88,906	Zr ЦИРКОНИЙ 91,22	Nb НИОБИЙ 92,906	Mo МОЛИБДЕН 95,94	Tc ТЕХНЕЦИЙ [99]	Ru РУТЕНИЙ 101,07	Rh РОДИЙ 102,906	Pd ПАЛЛАДИЙ 106,4								
	7	Ag СЕРЕБРО 107,868	Cd КАДМИЙ 112,41	In ИНДИЙ 114,82	Sn ОЛОВО 118,69	Sb СУРЬМА 121,75	Te ТЕЛЛУР 127,6	I ИОД 126,905											Xe КСЕНОН 131,3
6	8	Cs ЦЕЗИЙ 132,905	Ba БАРИЙ 137,34	La ЛАНТАНОИДЫ 57-71	Hf ГАФНИЙ 178,49	Ta ТАНТАЛ 180,948	W ВОЛЬФРАМ 183,85	Re РЕНИЙ 186,207	Os ОСМИЙ 190,2	Ir ИРИДИЙ 192,22	Pt ПЛАТИНА 195,09								
	9	Au ЗОЛОТО 196,967	Hg РУТУТЬ 200,59	Tl ТАЛЛИЙ 204,37	Pb СВИНЕЦ 207,19	Bi ВИСМУТ 208,98	Po ПОЛОНИЙ [210]	At АСТАТ [210]											Rn РАДОН [222]
7	10	Fr ФРАНЦИЙ [223]	Ra РАДИЙ [226]	Ac АКТИНОИДЫ 89-103	Rf РЕЗЕРФОРДИЙ [261]	Db ДУБИЙ [262]	Sg СИБОРИЙ [263]	Bh БОРИЙ [262]	Hn ХАНИЙ [265]	Mt МЕЙТНЕРИЙ [268]	110								
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄										
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ					RH ₄	RH ₃	H ₂ R	HR											



Д.И. Менделеев
1834–1907



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

ЛАНТАНОИДЫ

57 La ЛАНТАН 138,906	58 Ce ЦЕРИЙ 140,12	59 Pr ПРАЗЕОДИМ 140,908	60 Nd НЕОДИМ 144,24	61 Pm ПРОМЕТИЙ [145]	62 Sm САМАРИЙ 150,4	63 Eu ЕВРОПИЙ 151,96	64 Gd ГАДОЛИНИЙ 157,25	65 Tb ТЕРБИЙ 158,926	66 Dy ДИСПРОЗИЙ 162,5	67 Ho ГОЛЬМИЙ 164,93	68 Er ЭРБИЙ 167,26	69 Tm ТУЛИЙ 168,934	70 Yb ИТТЕРБИЙ 173,04	71 Lu ЛЮТЕЦИЙ 174,97
-----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

АКТИНОИДЫ

89 Ac АКТИНИЙ [227]	90 Th ТОРИЙ 232,038	91 Pa ПРОТАКТИНИЙ [231]	92 U УРАН 238,29	93 Np НЕПУНИЙ [237]	94 Pu ПЛУТОНИЙ [244]	95 Am АМЕРИЦИЙ [243]	96 Cm КЮРИЙ [247]	97 Bk БЕРКЛИЙ [247]	98 Cf КАЛИФОРНИЙ [251]	99 Es ЭЙНШТЕЙНИЙ [254]	100 Fm ФЕРМИЙ [257]	101 Md МЕНДЕЛЕВИЙ [258]	102 No НОБЕЛИЙ [259]	103 Lr ЛОУРЕНСИЙ [260]
----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

- Как химический элемент торий был открыт в 1828 г. И.Я.Берцелиусом в сиенитах Норвегии и назван по имени бога грома в скандинавской мифологии – Тора. По химическим свойствам торий близок элементам IV группы периодической системы (Ti, Zr, Hf); он – первый (после актиния) член семейства актиноидов, по величине заряда и ионного радиуса близок урану ($^{238}\text{U}^{+4}$, $r_i = 0,89 \text{ \AA}$), что обуславливает их совместное нахождение в минералах и породах.
- Торий - типичный литофильный элемент, встречающийся в природе только в кислородных соединениях с преобладающим ионным типом связи. В природных условиях он – четырехвалентный. По своим кристаллохимическим свойствам близок к редкоземельным элементам цериевой группы и изоморфно входит в решетки всех их минералов. Кларк в земной коре - $8 \times 10^{-3}\%$ (сравни: кларк урана – $2,5 \times 10^{-4}\%$).
- Торий – перспективное ядерное топливо (уран-ториевый топливный цикл) ближайшего будущего. Он состоит практически из одного долгоживущего изотопа ^{232}Th , являющегося родоначальником одного из радиоактивных рядов и имеет период полураспада $1,39 \times 10^{10}$ лет. Конечный продукт естественного радиоактивного распада тория – изотоп свинца:

$$^{232}\text{Th} \rightarrow \dots \rightarrow ^{208}\text{Pb}.$$

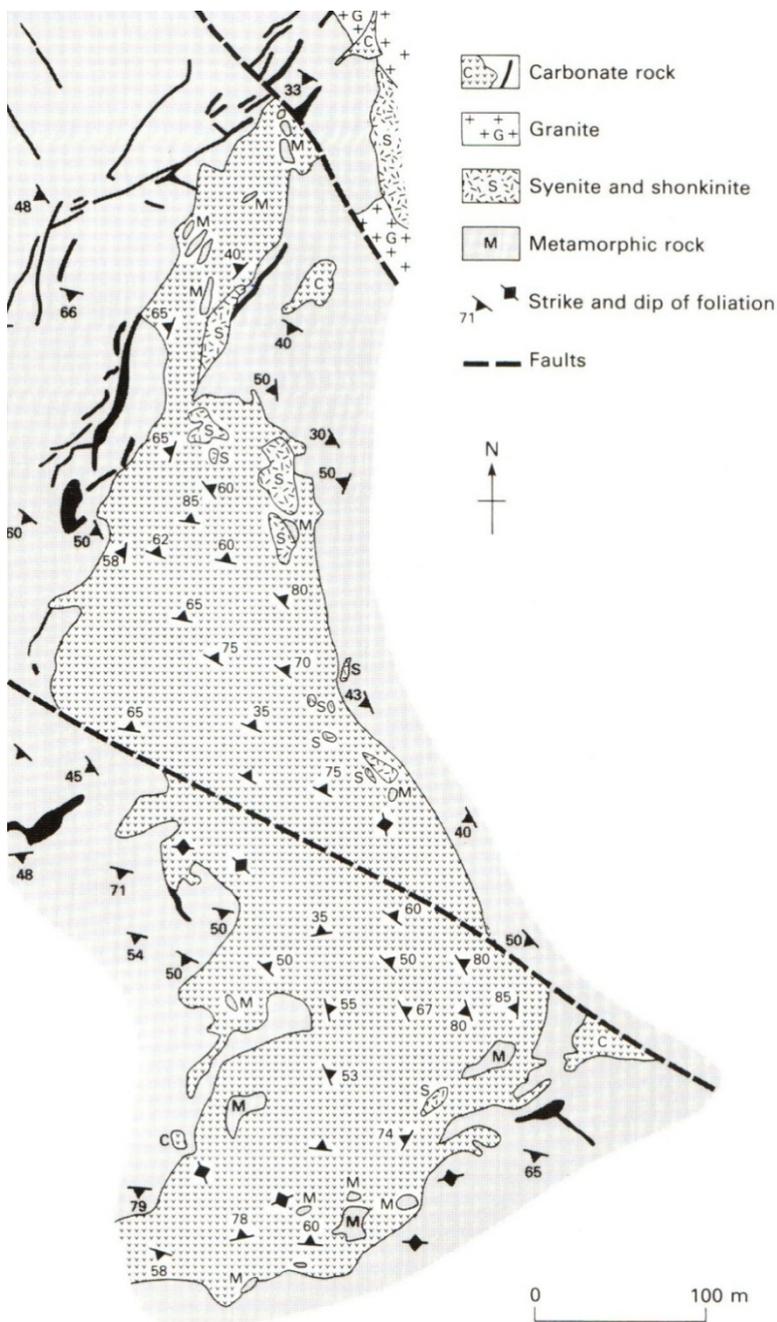
- Важнейшие собственные минералы тория:
торит – $(\text{Th}, \text{U})\text{SiO}_4$ (до 70% Th, тетраг.) и
торианит – ThO_2 (45-93% Th, куб., образует
изоморфный ряд с уранинитом – UO_2).
- В качестве примеси торий присутствует более чем в
100 минералах; наиболее характерные его
минералы-концентраторы (до 13% Th):
монацит – $(\text{Ce}, \text{La})\text{PO}_4$ (3,5 – 10% Th),
ортит (алланит) – $(\text{Y}, \text{Ce}, \text{Ca})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$,
пирохлор – $(\text{Ca}, \text{Na})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F})$,
эксенит – $(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$,
эшинит – $(\text{Y}, \text{Ce}, \text{Nd}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb})_2(\text{O}, \text{OH})_6$,
самарскит – $(\text{Y}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_5\text{O}_{16}$,
чевкинит – $(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{Th})_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_3\text{Si}_4\text{O}_{22}$
и др.

- Основными источниками Th в настоящее время являются **монацитовые россыпи**. Крупнейшие прибрежно-морские россыпи имеются в Индии (ср.сод. монацита в песках 0,75%), Бразилии (2-5%), Австралии и Малайзии; **минералы**: торианит ThO_2 (88%), бреггерит $(\text{U,Th})\text{O}_2$ (6-15), торит ThSiO_4 (81,4), ураноторит $(\text{Th,U})\text{SiO}_4$ (50-70), ферриторит $(\text{Th,Fe})\text{SiO}_4$ (45-65), торогуммит $(\text{Th,U})(\text{SiO}_4)(\text{OH})_4$ (45-65), эшинит $(\text{Ce,Th})(\text{Nb,Ti})_2\text{O}_6$ (до 20), приорит $(\text{Y,Th})(\text{Nb,Ti})_2\text{O}_6$ (до 8), **торийсодержащий монацит $(\text{Ce,Th})(\text{P,Si})\text{O}_4$ (3,5-10 до 40)**.
- По данным USGS Mineral Commodity Summaries-2020 господствующая доля **мировых ресурсов (World Resources) Th** связана с м-ниями россыпей, карбонатитов и жильного типа, где Th находится в виде монацита, торита и торианита. Эти ресурсы оцениваются до 6,4 млн.т Th, приходясь на Индию (850 тыс.т), Бразилию (630 тыс.т), Австралию и США (по 600 тыс.т) и др. страны.
- **Th извлекается попутно из комплексных руд** совместно с Nb, Ta, Zr, U, REE; его содержания в этих рудах от 0,0X до 0,X %.
- Самое известное месторождение ураноторианита находится на о-ве Мадагаскар. Другие важнейшие месторождения: карбонатитовое **Маунтин-Пасс** (США), пегматитовое **Банкрофт** (Канада), альбититовое **Джос** (Нигерия), гидротермальное **Стинкампскрааль** (ЮАР).
- Несколько компаний и в ряде стран (Бельгия, Бразилия, Канада, Китай, Чехия, Франция, Германия, Индия, Израиль, Япония, Нидерланды, Норвегия, Россия, Великобритания и США) проводят исследования по коммерциализации Th как топлива для нового поколения ядерных реакторов (USGS Mineral Commodity Summaries-2020).

Черные пески

пляжевая россыпь монацита на берегу Индийского океана.
Индия, штат Керала (по Г.А.Пелымскому и др., 2012).





Самое известное месторождение ураноторианита находится на о-ве Мадагаскар. Другие важнейшие месторождения: карбонатитовое **Маунтин-Пасс** (США), пегматитовое Банкрофт (Канада), альбититовое Джос (Нигерия), гидротермальное **Стинкампскрааль** (ЮАР).

Маунтин-Пасс (США, Калифорния)

пояс (10x2,5 км) щелочных пород и карбонатитов; в его составе - карбонатитовое тело Сульфайд Куин (Sulphide Queen) шириной до 200 м и длиной около 730 м (в плане), сложенное преобладающими кальцитом, доломитом, анкеритом и сидеритом. Считают, что это рудное тело – крупнейшее в мире скопление REE-минералов. Бастнезит и паризит в ассоциации с баритом, кварцем и др. минералами образуют многочисленные жилы и прожилки. Содержание REE в рудном теле составляет 5-15%.

Защитный ангар над обветшавшим хранилищем монацитового концентрата (по Г.А.Пелымскому и др., 2012).



Источником получения тория в России могут быть **монацитовые концентраты** (82 тыс. т. складских запасов близ Красноуфимска, Свердловская обл.), доставлявшиеся в течение 50 лет из России, Монголии, Китая и Вьетнама

и содержащие в ср. до **7,8% ThO₂**, а также преим. Се – состав лантаноидов (%%): La (13), Ce (23), Pr (3), Nd (11), Sm (1), Eu (0,1), Gd (0,6), Tb (0,4), Dy (0,2), Ho (0,05), Er (0,2), Tu (0,05), Yb (0,03), Lu (0,05), Y (0,8).

Монацит (Ce,La)PO₄



Монацит крупной фракции из проанализированных (партий концентрата, отобранного в хранилище ОАО «Уралмонацит» (по Г.А.Пелымскому и др., 2012). Средняя объемная доля монацита в концентрате – **78-97%**.. Концентрат в среднем содержит **до 7,8% ThO₂**, а также преимущественно Ce –состав лантаноидов (%%): La (13), Ce (23), Pr (3), Nd (11), Sm (1), Eu (0,1), Gd (0,6), Tb (0,4), Dy (0,2), Ho (0,05), Er (0,2), Tu (0,05), Yb (0,03), Lu (0,05), Y (0,8). Сод. Th уменьшается к периферии кристаллов.

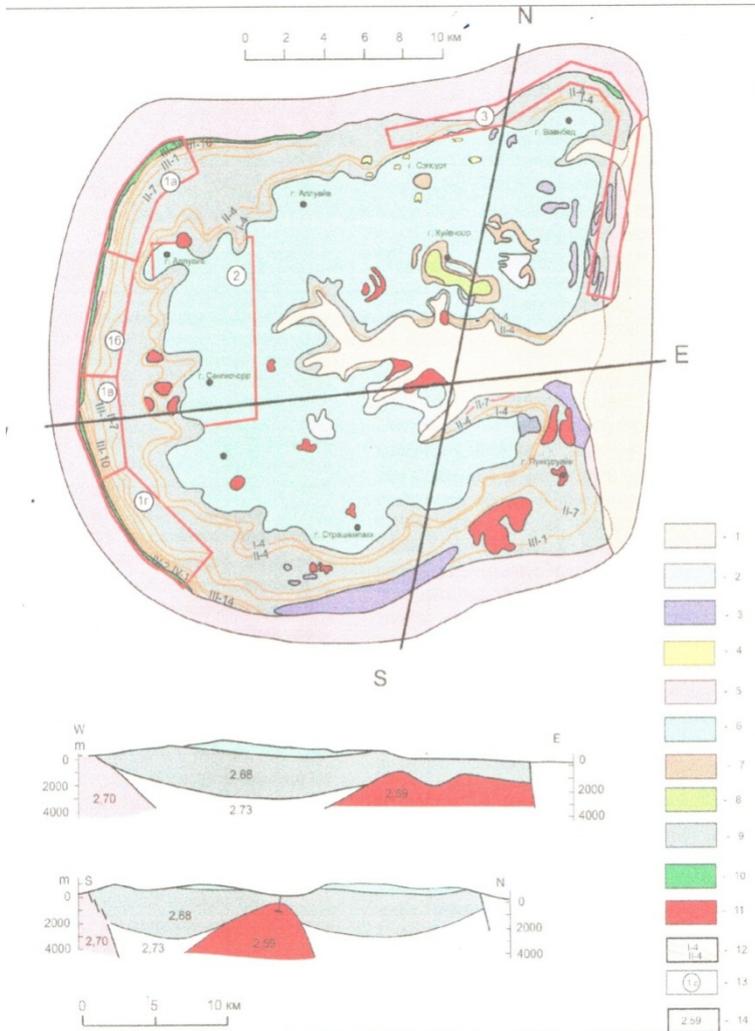
Мировые запасы тория, доступные для добычи, тыс. т *(Г.А.Пелымский и др., 2012)*

Страна	По данным USGS* (2010)	По данным МАГАТЭ (2007)
США	440	400
Австралия	300	489
Бразилия	16	302
Канада	100	44
Индия	290	319
Малайзия	45	-
ЮАР	35	18
Венесуэла	-	300
Норвегия	-	132
Египет	-	100
Россия	-	75
Гренландия	-	54
Другие страны	90	33
Всего	1300	2610
*United States Geological Survey – Геологическая служба США		

Прогнозные ресурсы тория на территории России (Г.А.Пельмский и др., 2012)

Группы месторождений по сортам руд по торию	Среднее содержание тория в рудах, %	Ресурсы в пересчете на металл, тыс. т				Число месторождений	Краткая характеристика ресурсов
		В месторождениях			Итого		
		эксплуатированных на Та, Nb, U	потенциально промышленных на Та, Nb, TR, U и др.	слабоизученных			
1. Эндогенные месторождения и рудопроявления: собственно ториевые, преимущественно гидротермальные							
Рядовых и богатых руд	0,1-0,2 до 1-2 и более	-	28	52	80	16	Мелкие и средние месторождения, слабо изученные
2. Комплексные месторождения с торием эндогенные: магматические, метасоматические, гидротермальные							
Рядовых руд	0,1-0,2	-	90		90	1	Кийское ториево-редкометалльное
Бедных руд	0,05-0,1	-	405	115	520	14	В том числе месторождение Улуг-Танзекское
Убогих руд	0,01-0,05	102	180	638	920	35	В том числе ранее эксплуатировавшееся Ловозерское месторождение
3. Комплексные месторождения с торием экзогенные: погребенные третичные и более древние монацитсодержащие россыпи разных типов							
Убогих и рядовых руд	0,05-0,1	-	20	80	100	38	Разведывались на титан и цирконий
Всего	-	102	723	885	1710	104	-

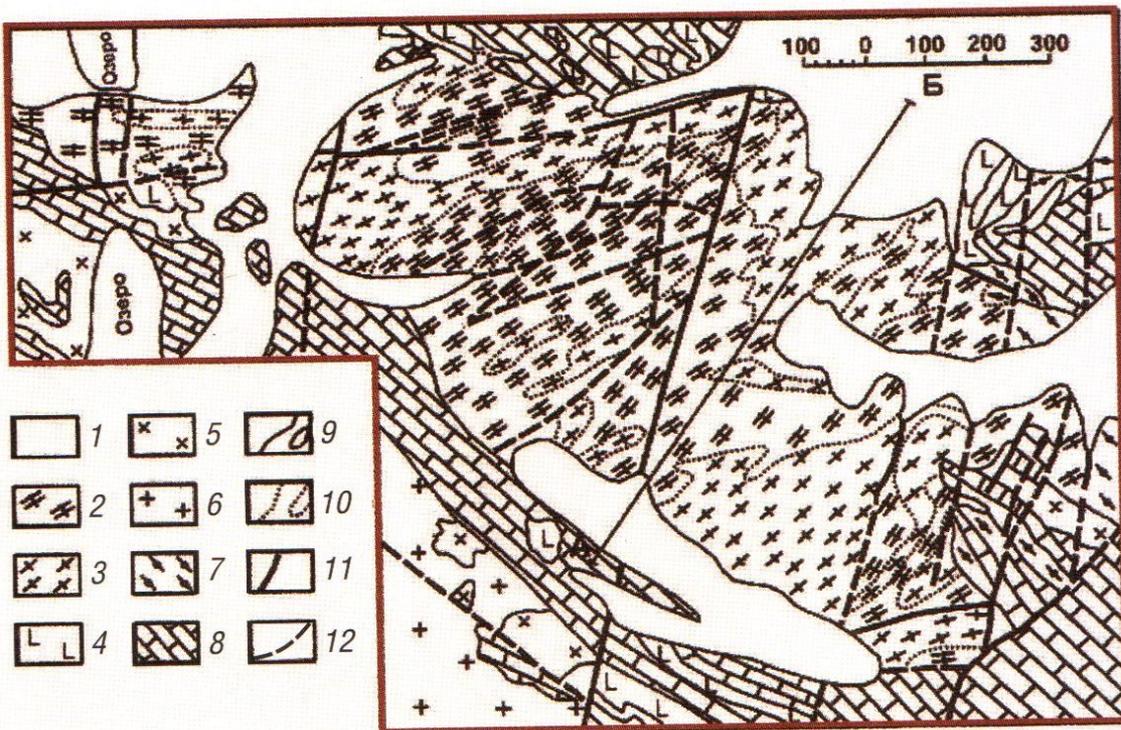
Ловозерский массив (Кольский полуостров)



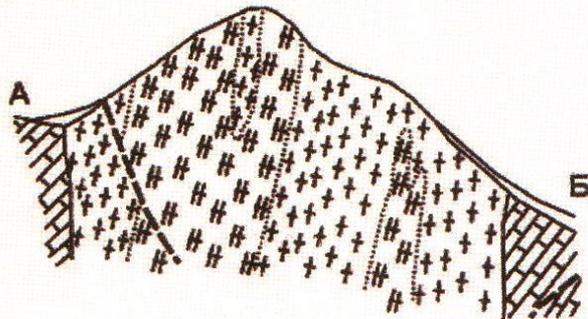
Ловозерский массив сложен
щелочными породами 3-х
комплексов:
дифференцированного
лопаритоносного
(нефелиновые и содалитовые
сиениты), *эвдиалитовых*
луявритов
(эвдиалитсодержащие
разновидности нефелиновых
сиенитов) и *жильных пород*
(дайки щелочных лампрофиров).
Основные промышленные
руды – лопаритовые
 $(Ln, Na, Ca)_2(Ti, Nb)_2O_6$
дифференцированного
комплекса и лопаритовые
россыпи.

Содержание Th в руде – 0,02%

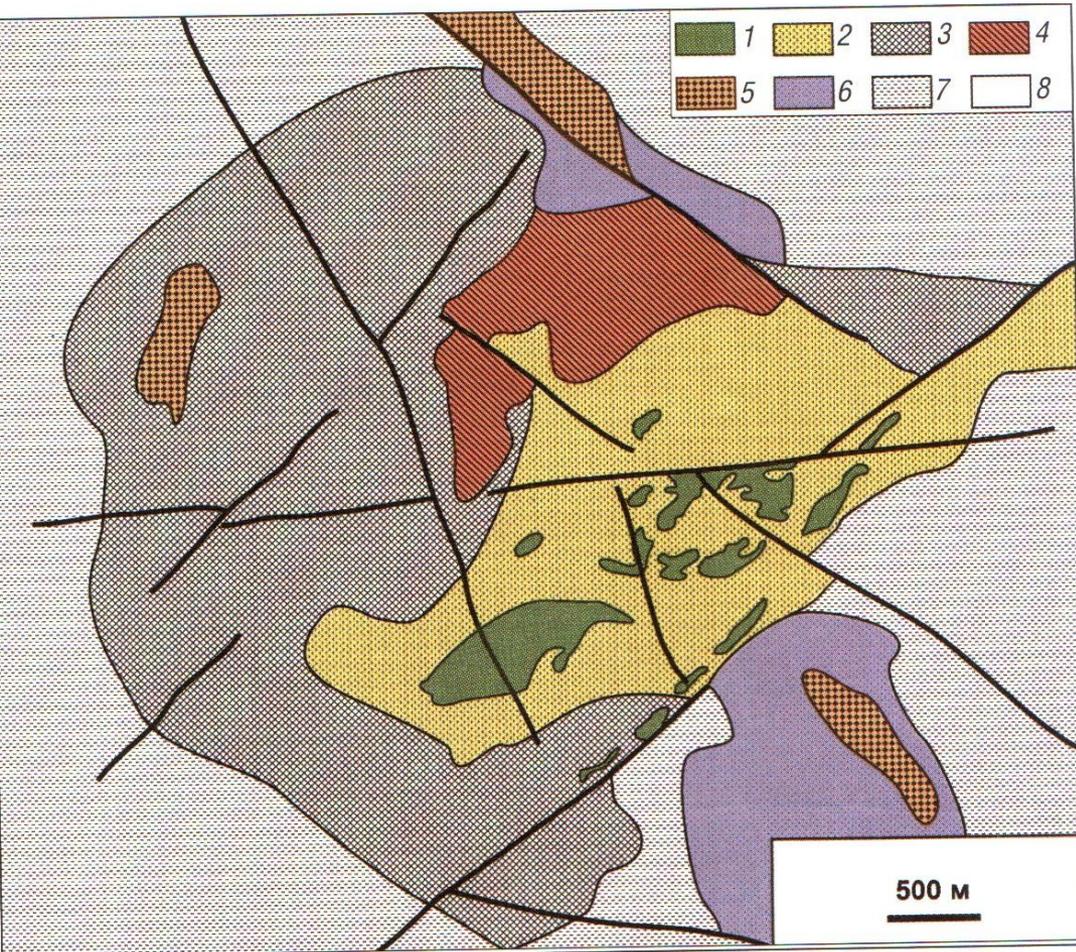
Улуг-Танзекское месторождение (Юго-Восточная Тува)



- 1 - четвертичные отложения;
 - 2,3 - кварц-альбит-микроклин. метасоматиты;
 - 4 - субщелочные граниты и кварцевые сиениты (Pz3-Mz)
 - 5 - дориты и кварцевые диориты (Pz1);
 - 6 - биотитовые и лейкократовые граниты позднего протерозоя;
 - 7 - позднепротерозойские сланцы и гнейсы;
 - 8 - позднепротерозойские мраморы и мраморизованные известняки;
 - 9,10 - геологические границы;
 - 11,12- разрывные нарушения.
- Pz-Mz рудоносный шток субщелочных биотитовых гранитов размером 1,8 x (0,1-0,8) кв. км. среди Pz метаморфических пород до глубины почти 700 м содержит промышленную вкрапленность тантало-ниобатов (колумбита, пироклора), циркона, минералов TR, U и Th. (Сод.0,1% Th в руде)

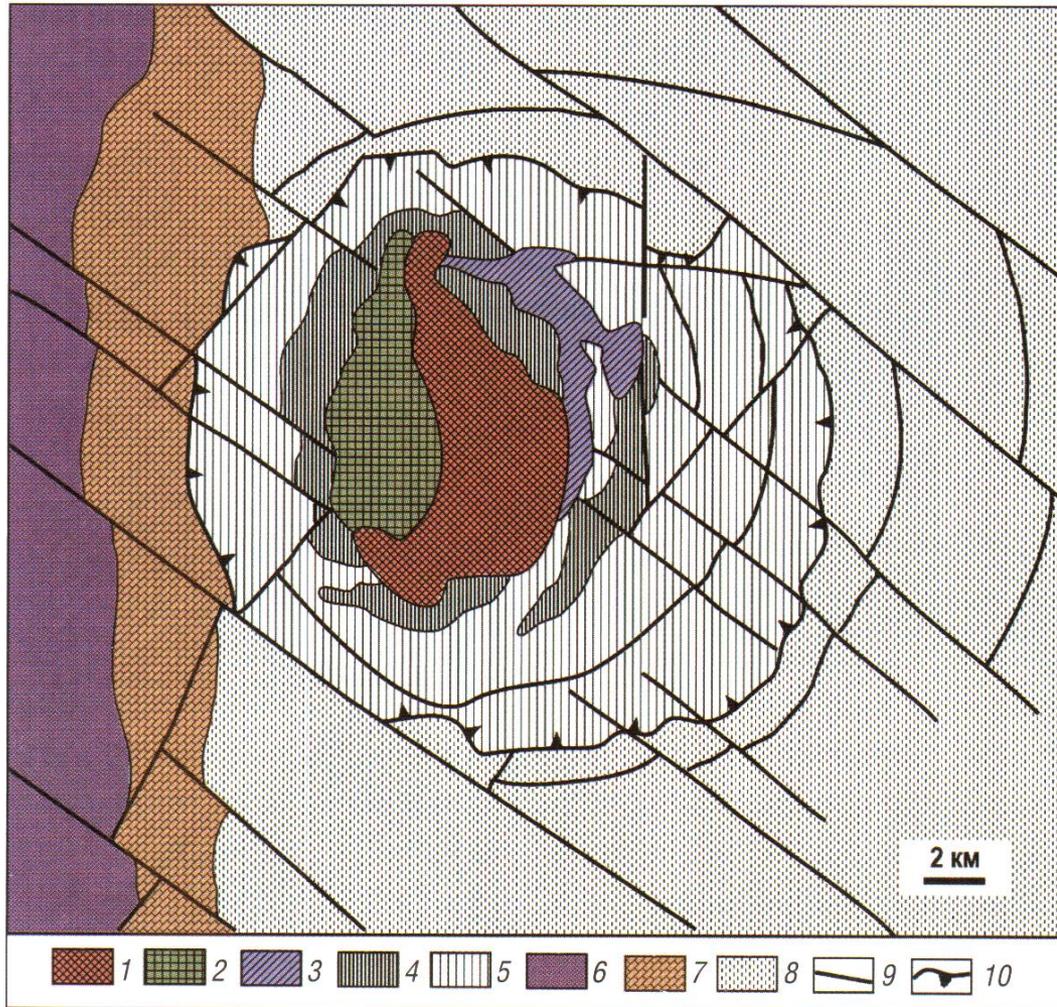


Кийский массив щелочных пород (Енисейский край)



- 1 – штокверковые зоны карбонатных прожилков с редкоземельной минерализацией;
 - 2 – сиенит-порфиры с вкрапленностью карбонатов;
 - 3 – нефелиновые сиениты;
 - 4 – пироксеновые, амфибол-пироксеновые, нефелин-пироксеновые породы;
 - 5 – кератофиры, кварцевые кератофиры, туфогенные пооды;
 - 6 – песчаники, известняки, аргиллиты верхнего кембрия;
 - 7 – гранито-гнейсы, кристаллические сланцы нижнего протерозоя;
 - 8 – разрывные нарушения
- В коре выветривания карбонатитов содержание Th составляет 0,4% (по Г.А.Пелымскому и др., 2012).**

Массив Томтор (Северо-Западная Якутия)

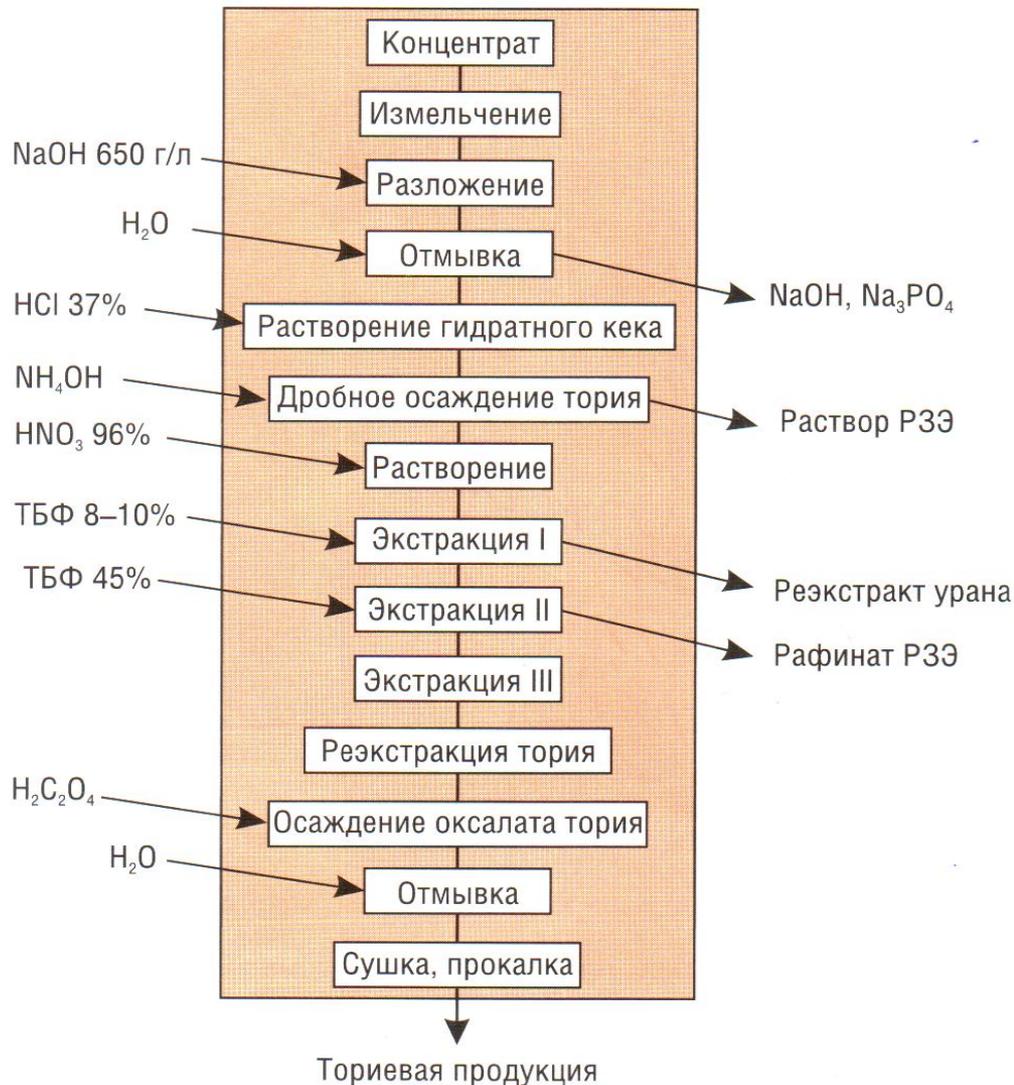


Схематическая геологическая карта массива со снятым покровом Рзз-пород осадочного чехла (по Г.А.Пелымскому и др. 2012)

- 1 - рудоносные карбонатиты;
- 2 – безрудные карбонатиты ;
- 3 – карбонатитоиды;
- 4 – ийолит-мельтейгиты;
- 5 – нефелиновые и щелочные сиениты;
- 6 – кембрийские породы;
- 7 – томторская свита, венд;
- 8 – рифейские отложения;
- 9 – разрывные нарушения;
- 10 - граница массива Томтор.

В пироклор-монацитовых рудах сод.Th 0,0191-0,3044%.

Щелочно-экстракционная схема переработки монацита

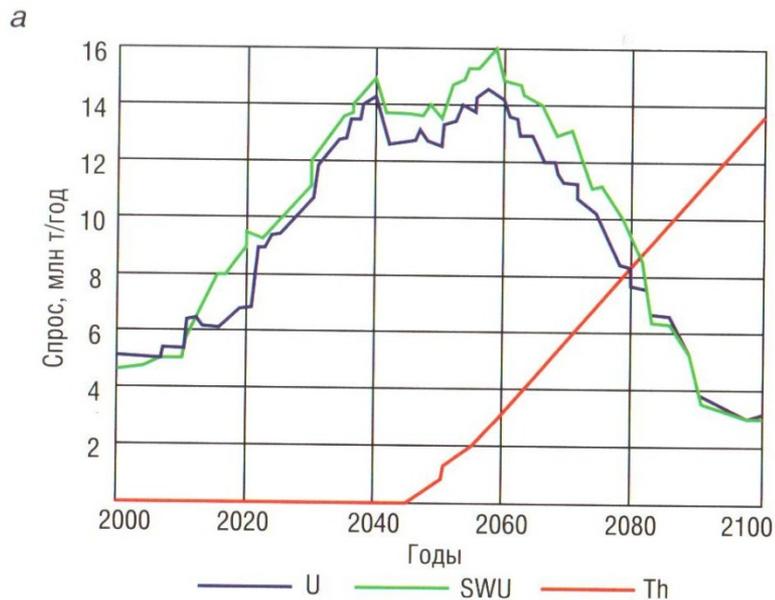


Технология переработки

монацитового концентрата до ядерно-чистого тория с использованием каустической соды применялась в течение 10 лет – до 1971 г. Из монацита получали торий ядерной чистоты в виде металла, фторида, нитрата и оксалатов. В настоящее время эта технология нуждается в проверке и модернизации в связи с требованиями по чистоте продукта и экономическими условиями его получения.

(Г.А.Пелымский и др. 2012)

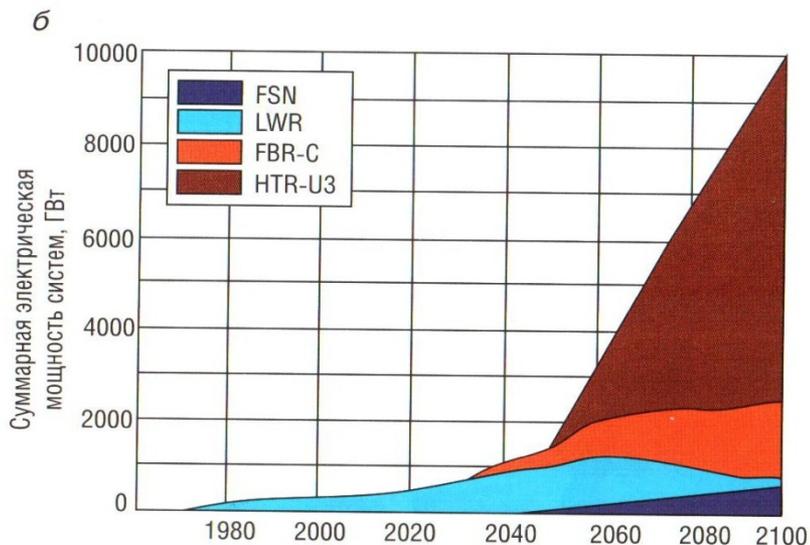
Прогнозы ежегодного спроса на ядерное горючее (^{235}U) и «топливное сырье» (^{238}U , ^{232}Th) и мирового производства ядерной энергии с использованием реакторов различных типов



- а U – природный уран;
SWU – обогащенный уран;
Th – природный торий.
- б HTR –высокотемпературные реакторы;
FBR – реакторы-размножители на быстрых нейтронах;
LWR – легководные реакторы;
FSN – гибридные системы с термоядерными источниками нейтронов.

Торий, возможно, будет добываться в больших масштабах для нужд ядерной энергетики с 2050 г и к 2100 г достигнет 140 тыс т/год. Предполагается, что потребление урана достигнет максимума (ок.140 тыс т/год) в 2040-2060 гг, но затем упадет до 30 тыс.т/год к 2100 г.

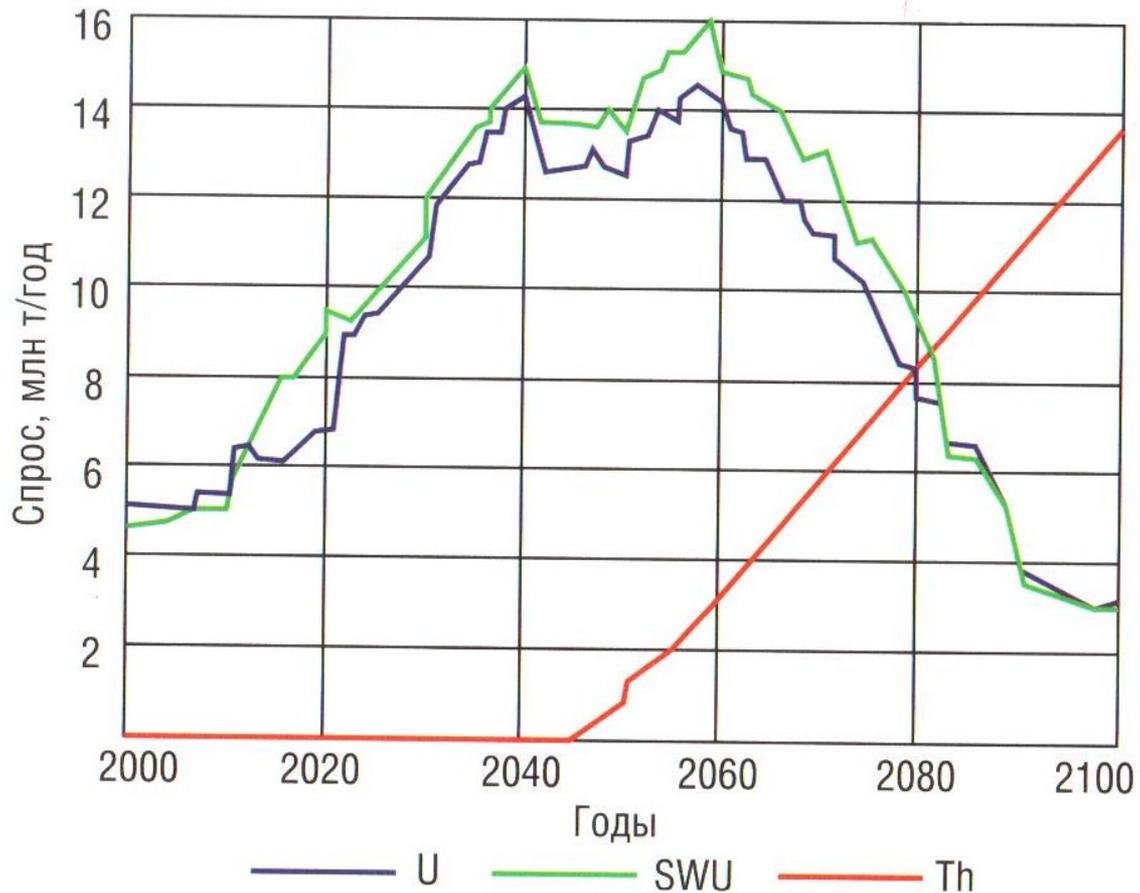
Активная разработка гибридных систем, включающих как реакции термоядерного синтеза, так и реакции деления ядер, может начаться в 2030-2050 гг.



Прогноз ежегодного спроса на ядерное горючее (235U) и «топливное сырье» (238U, 232Th)

(По Г.А.Пелымскому и др. 2012)

а

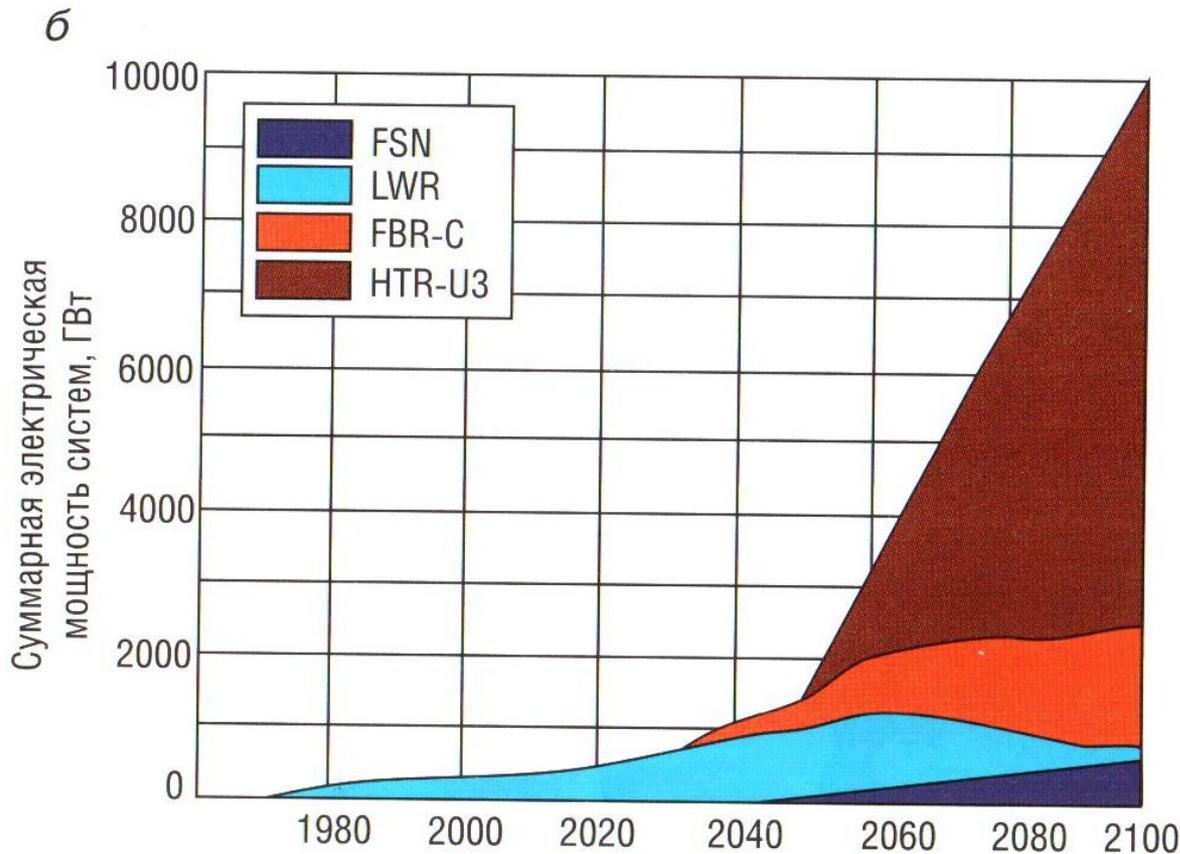


U – природный уран;
SWU – обогащенный уран;
Th – природный торий

Торий, возможно, будет добываться в больших масштабах для нужд ядерной энергетики с 2050 г и к 2100 г достигнет 140 тыс т/год. Предполагается, что потребление урана достигнет максимума (ок.140 тыс т/год) в 2040-2060 гг, но затем упадет до 30 тыс.т/год к 2100 г.

Прогноз ежегодного мирового производства ядерной энергии с использованием реакторов различных типов

(По Г.А.Пелымскому и др. 2012)



HTR –высокотемпературные реакторы;

FBR – реакторы-размножители на быстрых нейтронах;

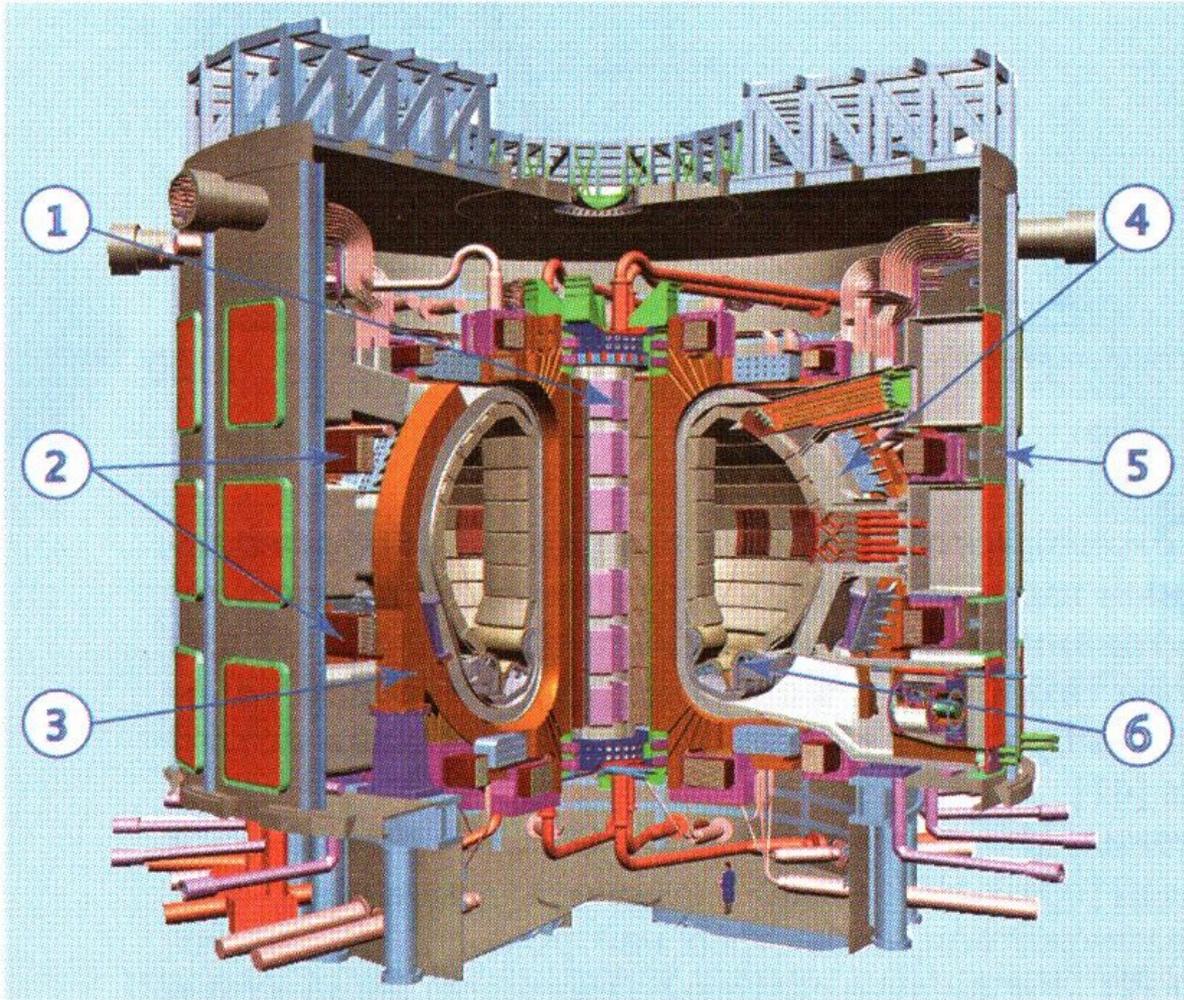
LWR – легководные реакторы;

FSN – гибридные системы с термоядерными источниками нейтронов.

Активная разработка гибридных систем, включающих как реакции термоядерного синтеза, так и реакции деления ядер, может начаться в 2030-2050 гг.

Модель термоядерного реактора ITER в разрезе

(По Г.А.Пелымскому и др. 2012)



International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

строится на юге Франции в исследовательском центре Кадараш.

Техническая проработка реактора была осуществлена научными, техническими и финансовыми усилиями России, ЕС, США и Японии. В сооружении реактора участвуют также КНР, Индия и Республика Корея. Его пуск намечен на конец текущего десятилетия.

Россия является инициатором проекта ITER

- 1- центральный соленоид (индуктор);
- 2,3 – катушки полоидального и тороидального магнитного поля;
- 4 – вакуумная камера;
- 5 – криостат; 6 – дивертор.

Заключение

- Сегодня человечество удовлетворяет более 60% своих энергетических потребностей за счет невозобновляемых нефти и газа, потребление которых в XXI веке резко возрастает.
- За более чем полувековой период своего существования ядерная энергетика (ЯЭ) достигла 7% потребляемой человечеством первичной энергии и превзошла гидроэнергию и все другие возобновляемые источники, утвердившись в качестве нового, неуклонно возрастающего источника и безальтернативной замены в мировом энергетическом балансе исчерпаемых углеводородов.
- Доминирующий в ЯЭ уран-плутониевый топливный цикл сопровождается накоплением плутония в ОЯТ (отработанное ядерное топливо) и проблемой захоронения все возрастающих объемов РАО (радиоактивные отходы), представляющих радиоэкологическую опасность в течение тысячелетий.
- Спасение от всего этого – отказ от плутония в ЯЭ. С этих позиций несомненный интерес представляет уран-ториевый топливный цикл.
- Неотложные задачи: создание МСБ тория, совершенствование технологий по его получению из руд и минералов (монацит!), преодоление технических и технологических трудностей, существующих в реализации уран-ториевого топливного цикла.

***Спасибо за
внимание !***