

Лекция 1

Ядерно-топливный цикл

**Гузеева Татьяна Ивановна – профессор
Северского технологического института
Научно-исследовательского ядерного
университета «МИФИ»**

Ядерный топливный цикл (ядерный реакторный цикл) - совокупность технологических процессов, связанных с получением энергии на ядерных установках (в ядерных реакторах).

В зависимости от ядерного горючего возможно осуществление трех типов циклов:

1) урановый топливный цикл, в котором делящимся материалом служит уран-235, а фертильным материалом (воспроизводящим, сырьевым) – уран-238. Урановое горючее изготавливают из природного урана (0,72% ^{235}U), низкообогащённого урана (1-5% ^{235}U) или высокообогащенного урана (до 93% ^{235}U).

- 2) Уран-плутониевый топливный цикл. Горючее для этого цикла состоит из природного или обедненного (0,2-0,3% ^{235}U) урана с добавкой ^{239}Pu в количестве, эквивалентном соответствующему обогащению по ^{235}U . Это горючее может быть использовано как в реакторах на тепловых нейтронах, так и в реакторах на быстрых нейтронах. Сырьевым материалом здесь также служит ^{238}U .
- 3) Уран-ториевый топливный цикл. Делящийся материал - ^{235}U или ^{233}U , сырьевой - ^{232}Th .

В промышленном масштабе используется в основном урановое горючее. Все способы производства топлива для ядерных энергетических реакторов, подготовки его к использованию и утилизации отработанного топлива вместе взятые составляют топливный цикл.

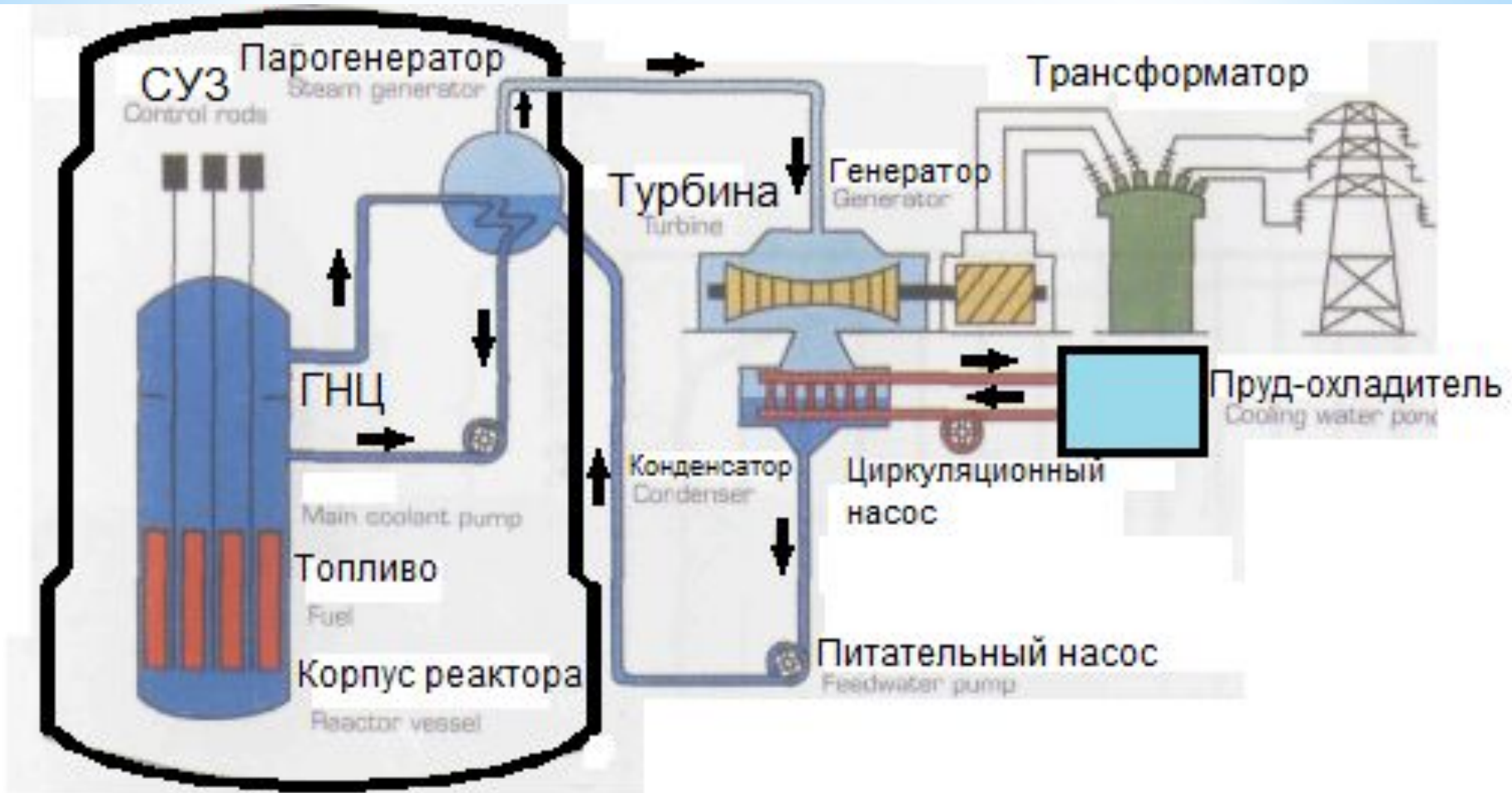
"Сердце" ядерного реактора — активная зона, которая содержит ядерное топливо.

В состав ядерного топлива должны входить делящиеся ядра. Практический интерес представляют только четыре делящихся изотопа: ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu .

Изотоп ^{235}U является единственным естественным нуклидом, который делится под действием тепловых нейтронов, остальные получают в результате превращений, индуцированных нейтронами.

Материалы ядерного топлива подвергаются превращениям как до их введения в реактор, так и после использования. Получение топлива – производственный процесс, который включает добычу урановой руды, доведение ее до необходимого химического состава с последующей химической очисткой и в зависимости от обстоятельств изотопным обогащением и получение топливных материалов требуемой формы и размера.

Важнейшее звено в ядерной энергетике – это ядерный реактор



ГНЦ – Главный циркуляционный насос

Ядерные топливные материалы

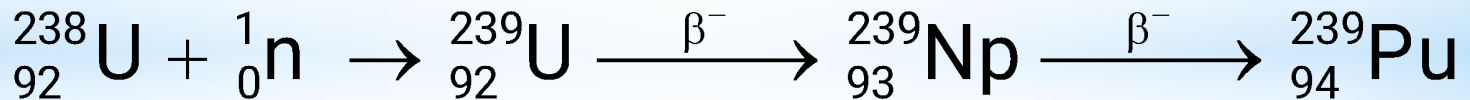
Ниже перечислены делящиеся и воспроизводящие ядерные топливные материалы:

Делящиеся материалы - ^{233}U ; ^{235}U ; ^{239}Pu

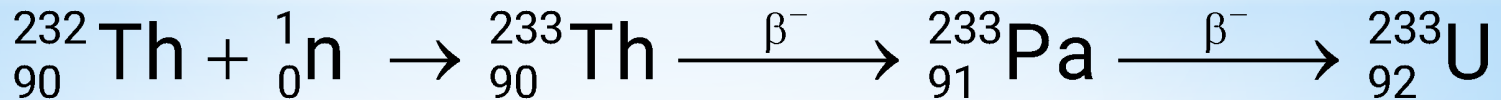


$\text{Q} = 1\text{г U} = 2,3 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \approx 3 \text{ т угля}$

Воспроизводящиеся материалы



${}^{238}\text{U}$



${}^{232}\text{Th}$

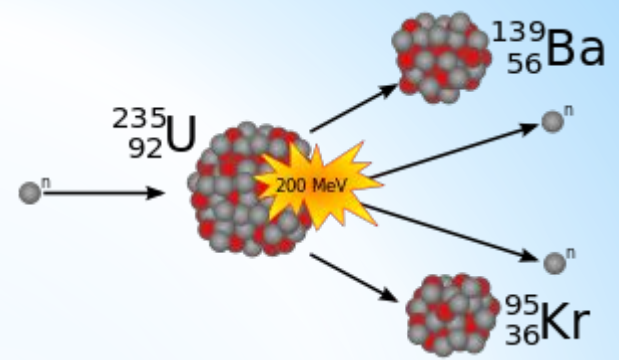
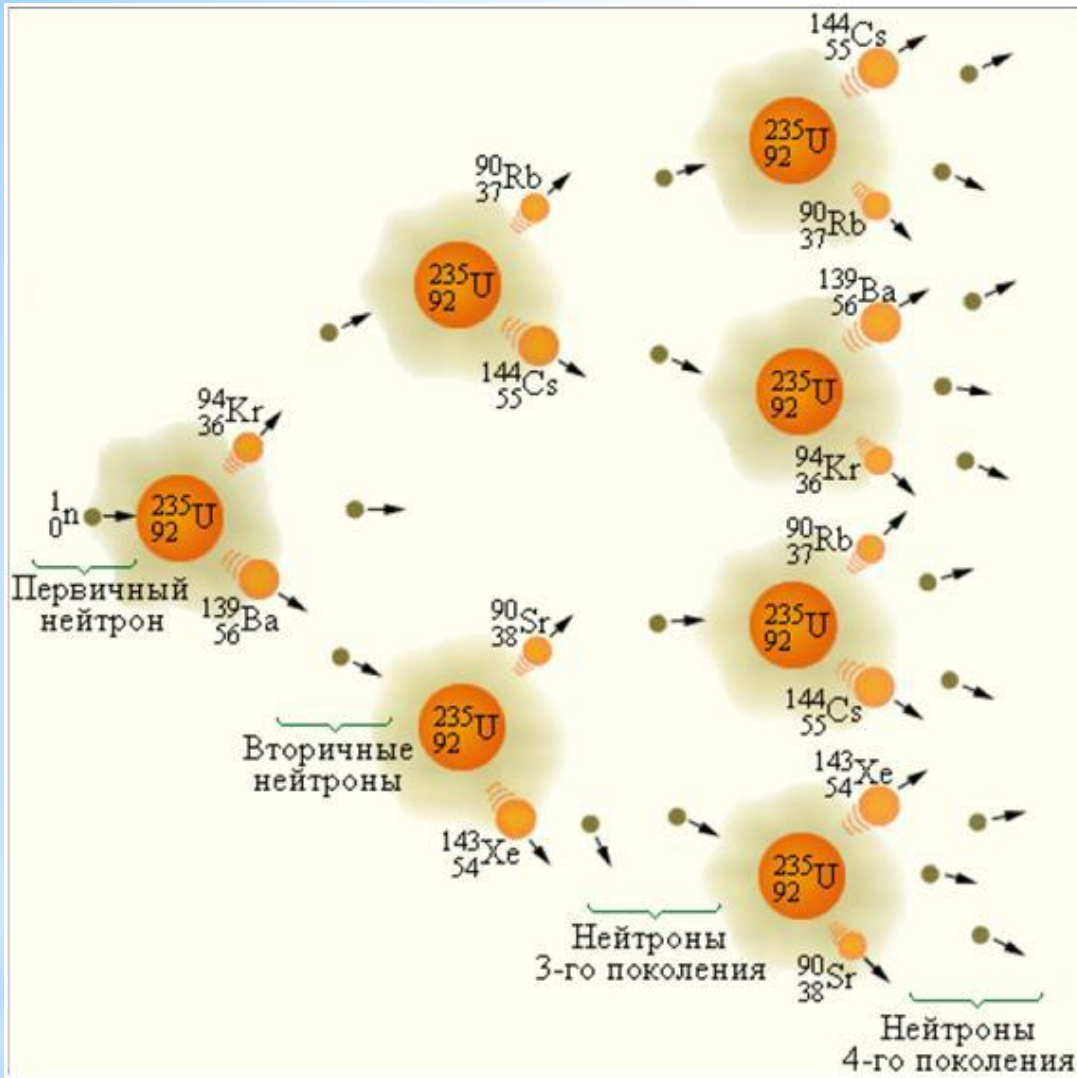
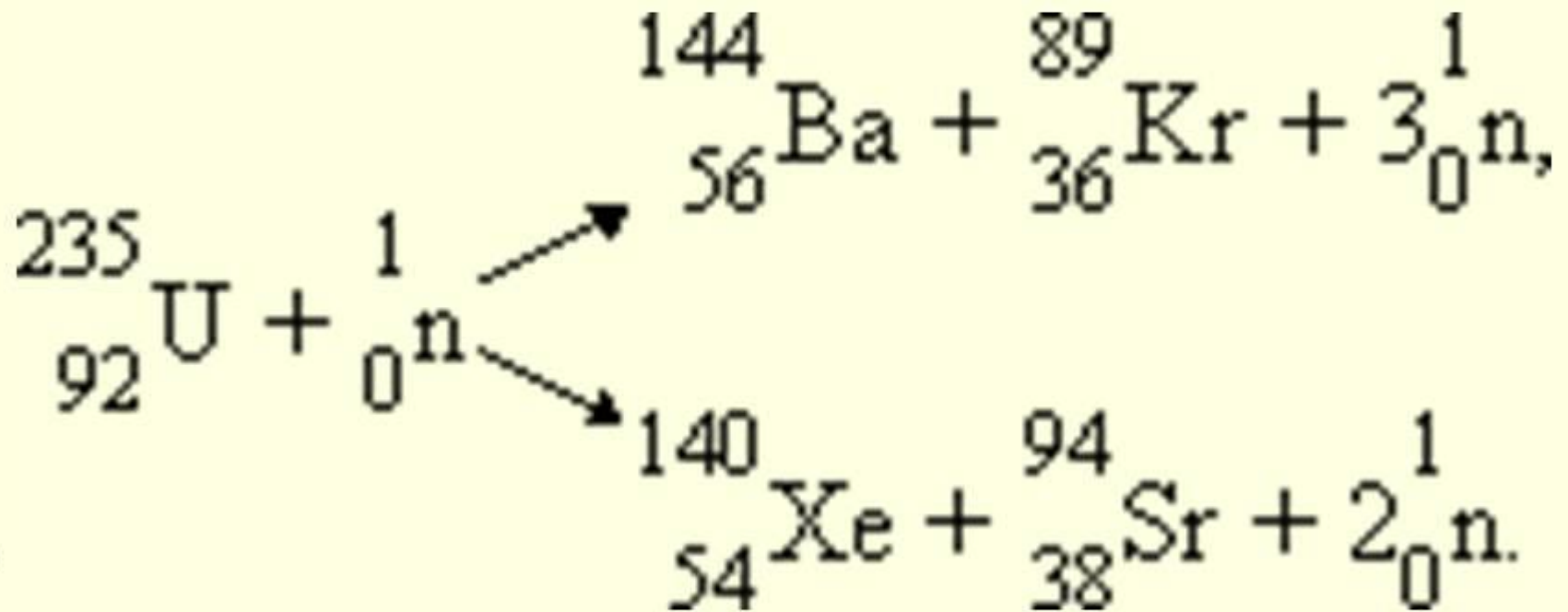
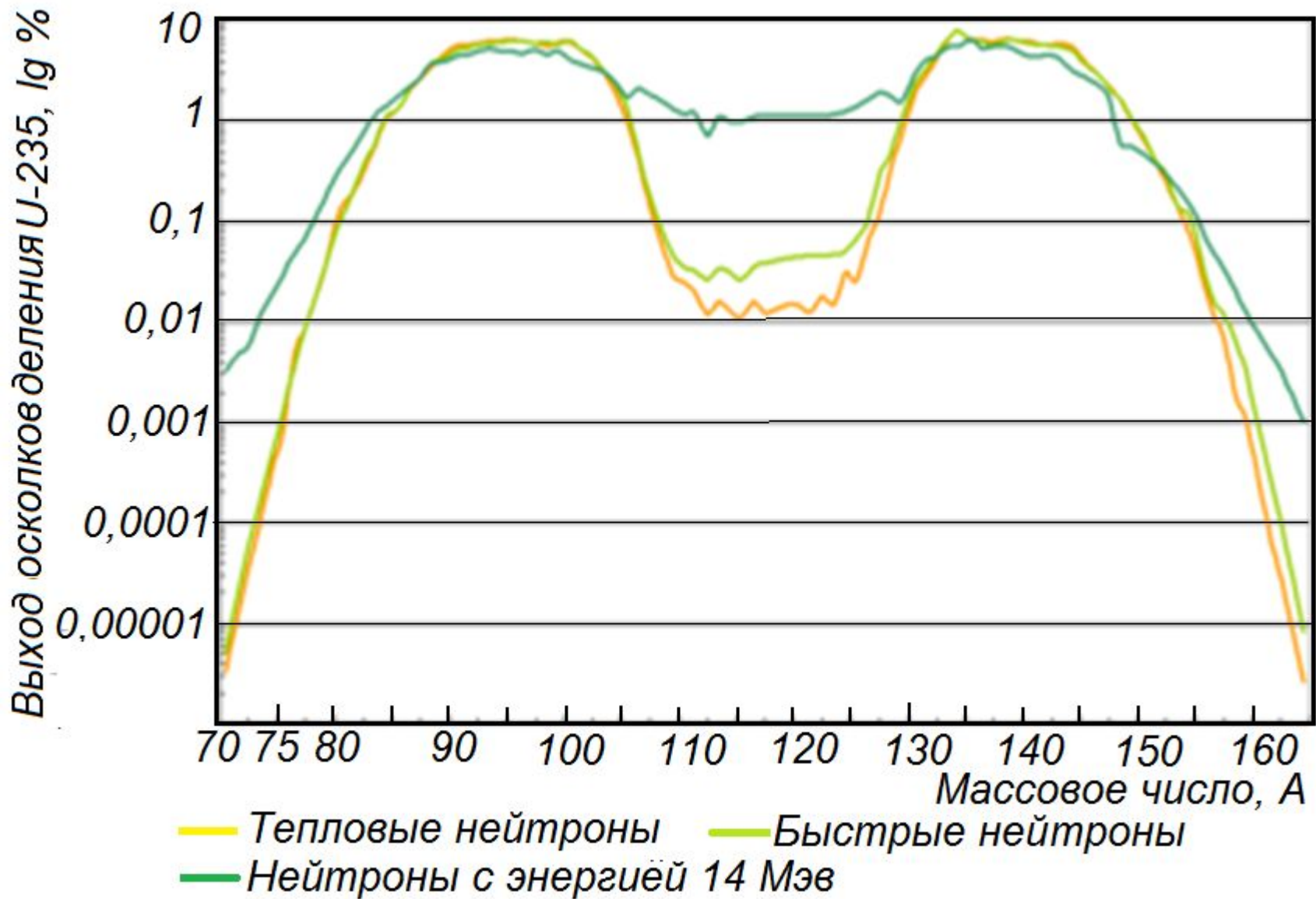


Схема деления U-235

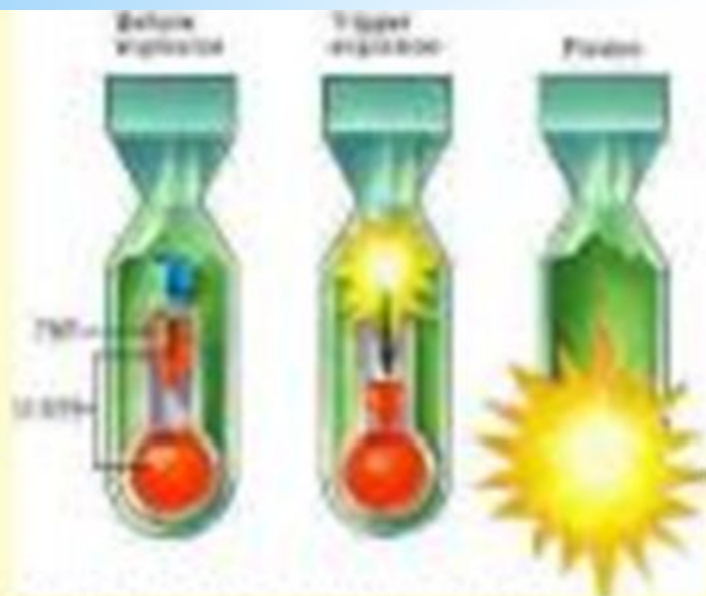
1938 г. О. Ган и Ф. Штрассман

Две типичные реакции деления ядра урана имеют вид:





Продукты деления U^{235}



В атомных бомбах цепная неуправляемая ядерная реакция возникает при быстром соединении кусков урана-235 каждый из которых имеет массу меньше критической

Неуправляемая ядерная реакция





На АЭС – управляемая ядерная реакция

Топливо-энергетический цикл представляет собой совокупность связанных производств, которые можно объединить в четыре стадии общего технологического процесса.

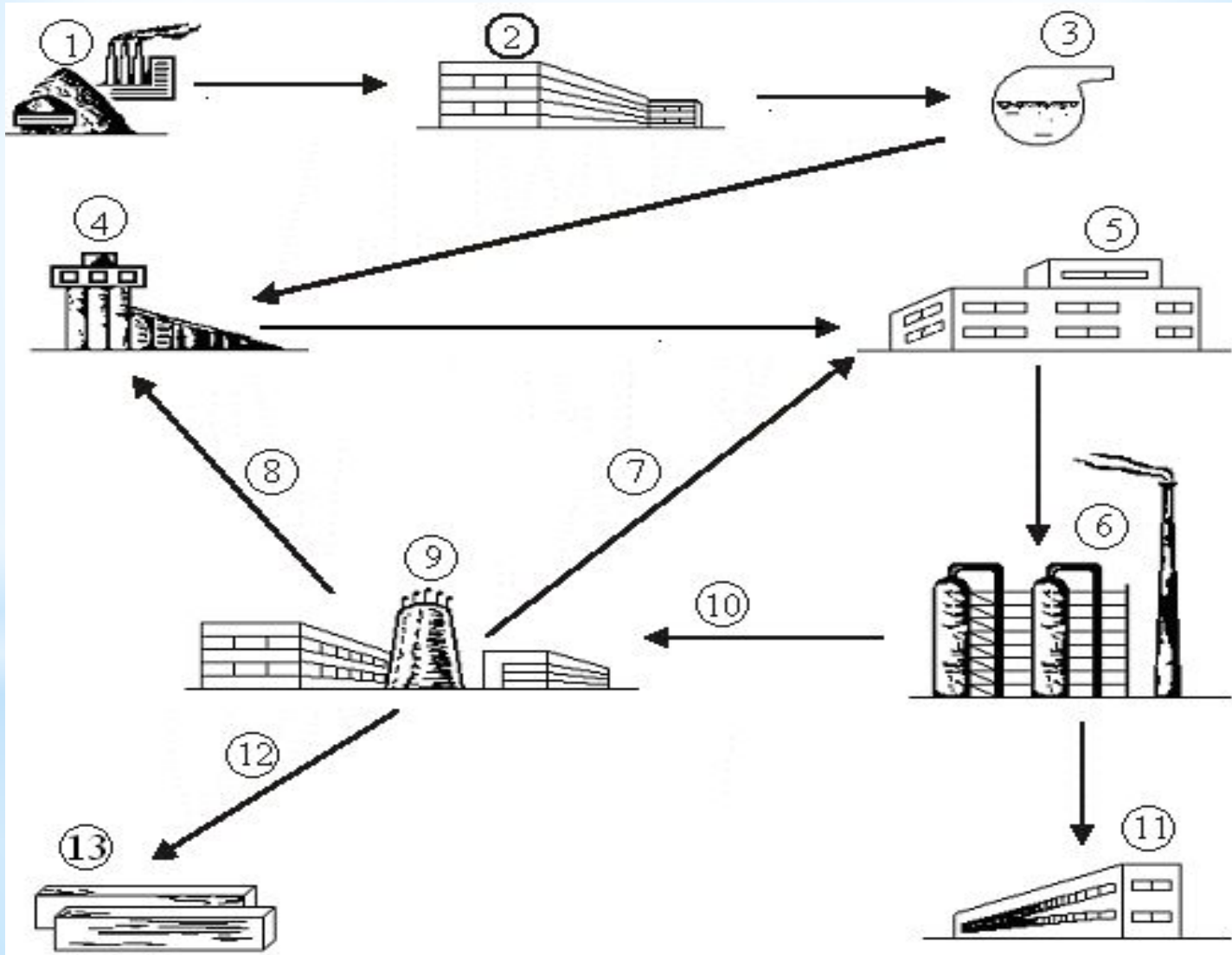


Рис. 1. Схема ядерно-энергетического топливного цикла

- 1 – урановый рудник (руда и концентраты);
- 2 – обогатительные фабрики (U_3O_8);
- 3 – превращение U_3O_8 в UF_6 ;
- 4 – обогащение ^{235}U ;
- 5 – превращение UF_6 в UO_2 и изготовление топливных сборок;
- 6 – реактор;
- 7 – плутоний (в виде PuO_2);
- 8 – регенерированный уран;
- 9 – завод по переработке топлива;
- 10 – обработанное топливо;
- 11 – обработка низкоактивных отходов и захоронение;
- 12 – твердые высокоактивные отходы;
- 13 – хранилище высокоактивных отходов.

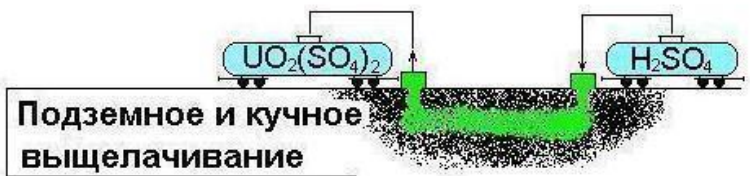
Первая стадия – приготовление ядерного топлива: добыча урана, обогащение, получение уранового концентрата и гексафторида урана, разделение изотопов, изготовление топливных композиций, ТВЭЛов.

Вторая стадия – сжигание ядерного топлива в реакторах.

Третья стадия – выдержка отработанного ядерного топлива и его транспортирование к месту регенерации.

Четвертая стадия – регенерация отработанного ядерного топлива (в замкнутых циклах), извлечение ценных компонентов, рефабрикация топлива, переработка и захоронение отходов.

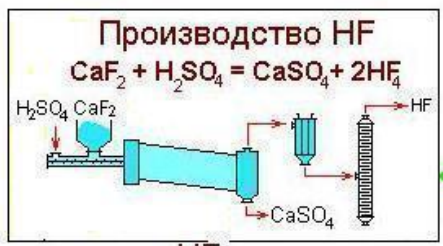
Структурная схема предприятий Ядерно-топливного цикла



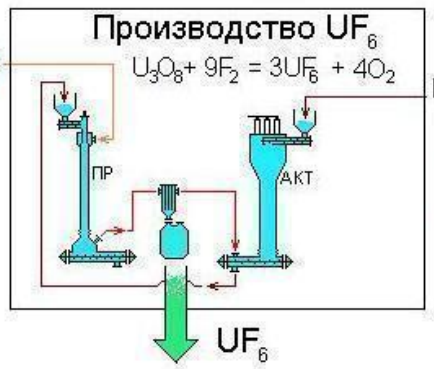
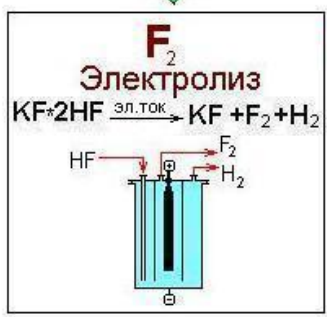
ионообменная сорбция, аффинаж
получение природных оксидов урана U_3O_8

Регенерированный уран

Регенерированный уран



Производство оксидов U_3O_8 из регенерированного урана



Радиохимический передел



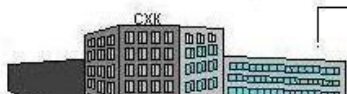
Разделение изотопов

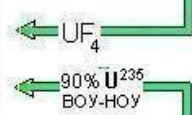
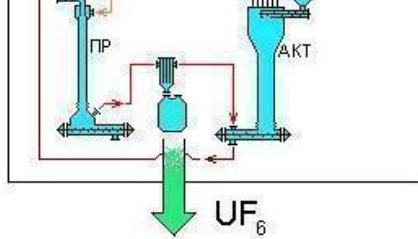
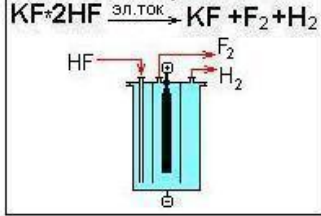
Обогащенный UF_6 (энергетический)

U^{235} 4,5%

Реактор для синтеза

Регенерированный уран

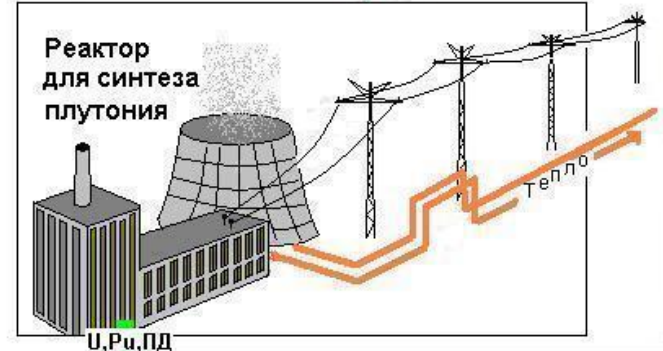




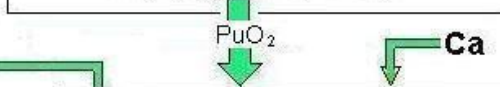
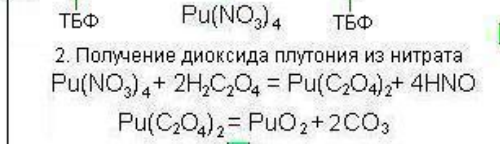
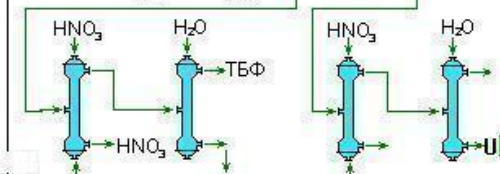
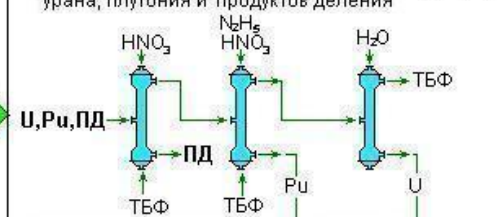
Ca

Производство U-металлического
Изготовление ТВЭЛов
 $UF_4 + 2Ca = U + 2CaF_2$

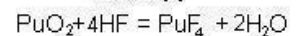
U-металлический



Радиохимический завод РТ-1
1. Экстракционное разделение урана, плутония и продуктов деления

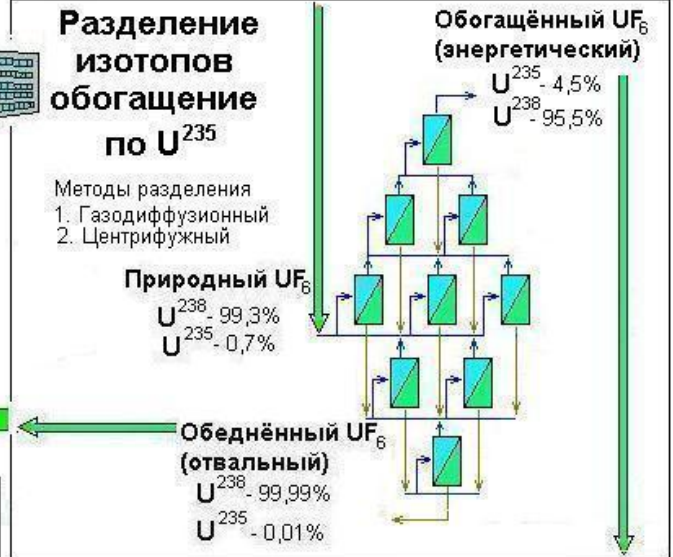


Химико-металлургический завод



Получение керамического UO_2
1. Водные методы переработки
Гидролиз с нитратом алюминия
Аммонийдиуранатный процесс
Аммонийуранилкарбонатный процесс
2. Сухая конверсия
 $UF_6 + 2H_2O + H_2 = UO_2 + 6HF$

Изготовление топливных таблеток

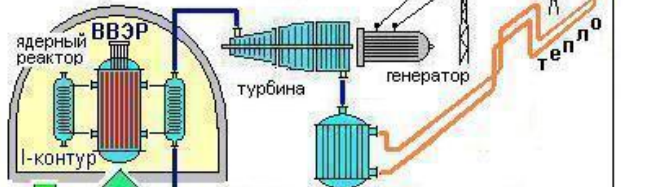


Хранилище отвалного UF_6

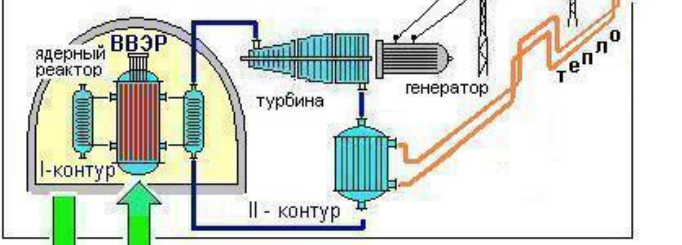
Космос
30 блоков

Атомный морской флот
360 блоков

Производство тепловой и электрической энергии на АЭС
30 блоков ВВЭР, РБМК, БН



Производство тепловой и электрической энергии на АЭС
30 блоков ВВЭР, РБМК, БН



Транспортировка ТВС на атомную станцию

Транспортировка Облучённого Ядерного Топлива после выдержки в водных бассейнах

Регенированный уран

Обеднённый уран

1. Водные методы переработки
Гидролиз с нитратом алюминия
Аммонийдиуранатный процесс
Аммонийуранилкарбонатный процесс

2. Сухая конверсия
 $UF_6 + 2H_2O + H_2 = UO_2 + 6HF$

ТБФ $Pu(NO_3)_4$ ТБФ

2. Получение диоксида плутония из нитрата
 $Pu(NO_3)_4 + 2H_2C_2O_4 = Pu(C_2O_4)_2 + 4HNO_3$

$Pu(C_2O_4)_2 = PuO_2 + 2CO_3$

PuO_2 Ca

Изготовление топливных таблеток ТВЭЛов, ТВС

7 мм
11 мм

Химико-металлургический завод

$PuO_2 + 4HF = PuF_4 + 2H_2O$

$PuF_4 + 2Ca = Pu + 2CaF_2$

Хранилище ядерных боезарядов



Радиохимический завод РТ-2

Изготовление МОХ-топлива
ТВЭЛы, ТВС 5% - PuO_2
95% - UO_2 (U^{238})

Извлечение полезных изотопов
Np, Sr, Cs, Tc, Am и др.

Производство циркония
 $ZrSiO_4 \rightarrow K_2ZrF_6 \rightarrow Zr \rightarrow$ Изделие

Производство кальция
 $CaO \rightarrow CaCl_2 \rightarrow Ca$

Zr Ca

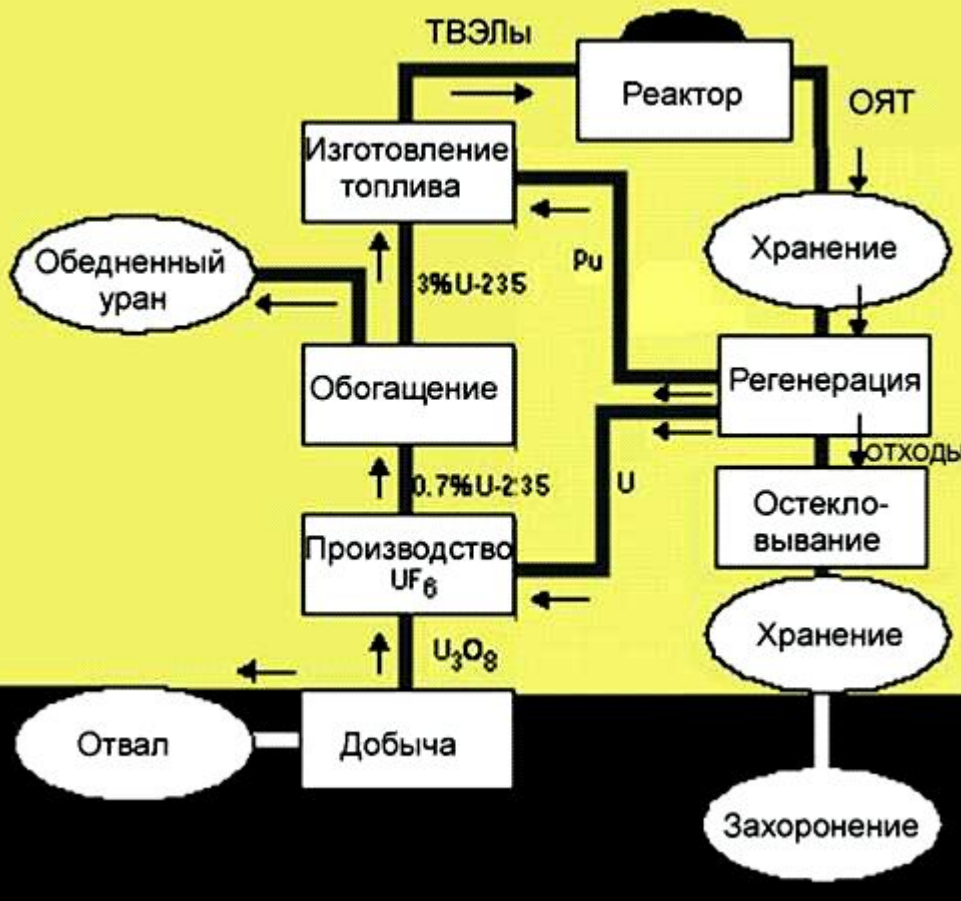
Переработка и захоронение радиоактивных отходов
Низкоактивные отходы Среднеактивные отходы Высокоактивные отходы

1. Захоронение в подземных хранилищах
2. Закачивание в грунт
3. Цементация и остекловывание

Составители
проф. Г.Г. Андреев,
к.т.н. А.Н. Дьяченко
Кафедра Химической технологии редких элементов
Томского политехнического университета

Для атомной энергетики различают два вида ЯТЦ – открытый (разомкнутый) и закрытый (замкнутый).

Замкнутый ядерный топливный цикл - ядерный топливный цикл, в котором отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), выгруженное из реактора, перерабатывается для извлечения урана и плутония для повторного изготовления ядерного топлива. В цикл возвращается невыгоревший уран-235, почти вся масса урана-238, а также изотопы энергетического плутония, образовавшиеся при работе ядерного реактора (Рис.1).



Из ОЯТ выделяют ценные компоненты, которые используют для изготовления нового ядерного горючего. При этом активность отходов, подлежащих окончательному захоронению, минимизируется.

Рис. 1. 3
Замкнутый урановый топливный цикл.

Основным ядерным топливом является $^{235}\text{U}_{92}$, который встречается в природе в ограниченном количестве. Изотопный состав природного урана приведен в табл. 1

Таблица 1 – Изотопный состав природного урана

Массовое число	Массовое содержание, %	Масса изотопа, а.е.м.	Период полураспада, лет
U-234	0,0058	234,0409	$2,60 \cdot 10^5$
U-235	0,720	235,0439	$8,50 \cdot 10^8$
U-238	99,274	238,0508	$4,51 \cdot 10^9$

Главные рудные минералы урана:

ОКСИДЫ — уранинит, урановая смолка, урановая чернь;

СИЛИКАТЫ — коффинит;

ТИТАНАТЫ — браннерит;

УРАНИЛСИЛИКАТЫ — уранофан, бетауранотил;

УРАНИЛ-ВАНАДАТЫ карнотит, туюмунит;

УРАНИЛФОСФАТЫ — отенит, торбернит. Кроме

того, уран в рудах нередко входит в состав минералов, содержащих P, Zr, Ti, Th и др.

(фторапатит, лейкоксен, монацит, циркон,

ортит, торианит, давидит и др.), или находится

в сорбированном состоянии в углистом

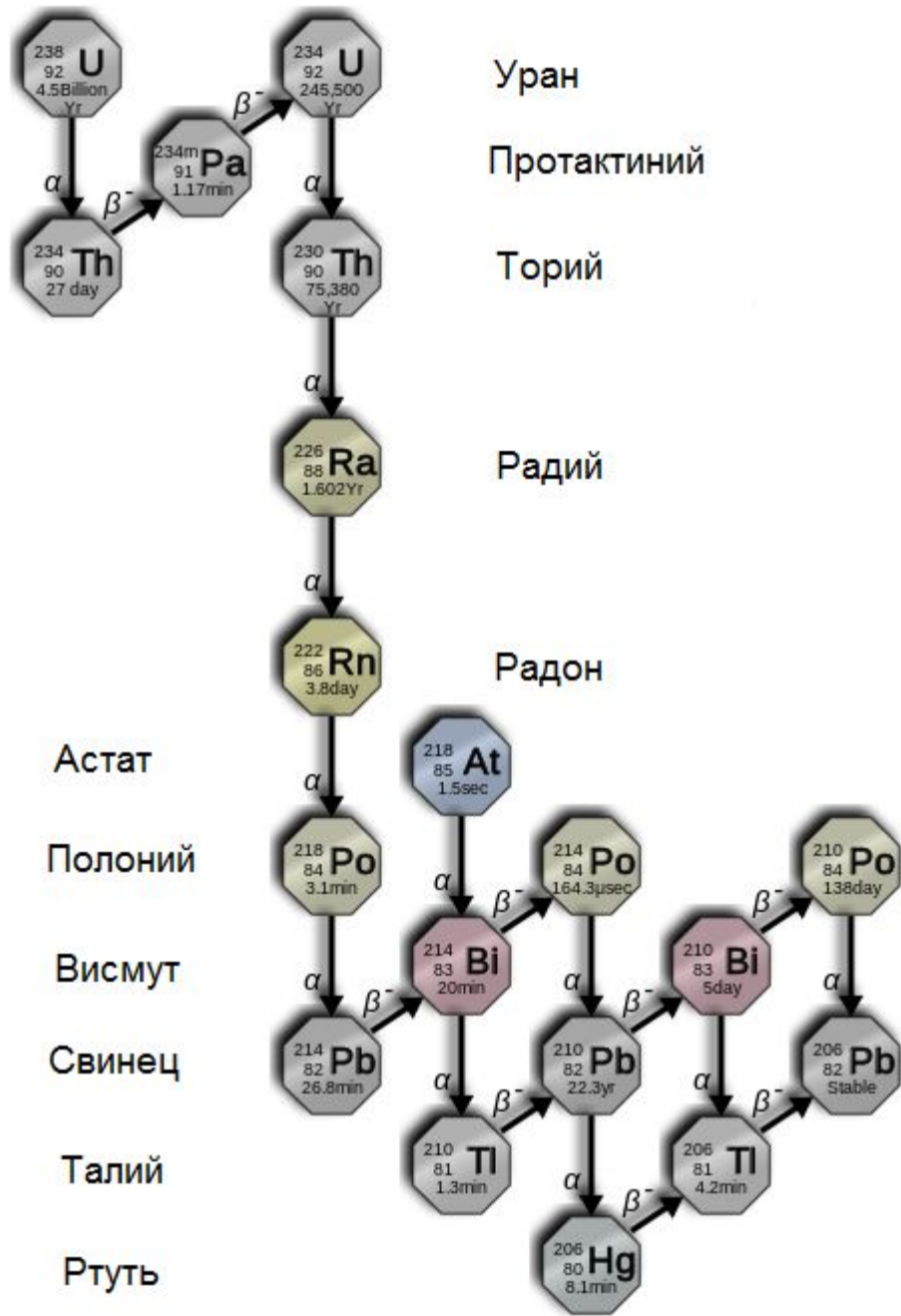
веществе.

Обычно различаются урановые руды: супербогатые (более 0,3 % U), богатые (0,1-0,3%), рядовые (0,05-0,10%), убогие (0,03-0,05%) и забалансовые (0,01-0,03%).

К очень крупным относятся урановые месторождения с запасами (тысяч т) более 50, к крупным — от 10 до 50, к средним — от 1 до 10, к мелким — 0,2-1,0 и к очень мелким — менее 0,2.

ПЕРВИЧНЫЕ УРАНОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

Уранинит – встречается в пегматитовых породах. В момент образования его состав отвечал формуле UO_2 . С увеличением возраста минерала в нем накапливаются радиоактивные продукты распада вплоть до стабильных изотопов Pb^{206} и Pb^{207} , а также увеличивается содержание UO_3 вследствие окисления, которому способствует радиоактивный распад ($UO_2 \rightarrow PbO + O$). Поэтому состав минерала выражается формулой: $xUO_2 \cdot yUO_3 \cdot zPbO$, причем y и z увеличиваются с ростом возраста минерала. Некоторые физические свойства минерала: цвет черный, плотность $7,6 - 10 \text{ г/см}^3$, твердость $5 - 7,6$ по десятибалльной шкале Мооса.



Уран
 Протактиний
 Торий
 Радий
 Радон
 Астат
 Полоний
 Висмут
 Свинец
 Талий
 Ртуть

Ряд распада ^{238}U

Настуран (урановая смолка) – основной минерал урана в гидротермальных месторождениях. Состав минерала отвечает той же формуле:

$x\text{UO}_2 \cdot y\text{UO}_3 \cdot z\text{PbO}$, но с несколько большим значением «у», соотношение U^{4+} и U^{6+} близко к U_3O_8 . Цвет минерала – черный, плотность 5–7,7 г/см³, твердость 4–6,3.

Давидит (примерный состав: ~52% TiO_2 , 17% FeO , 18% Fe_2O_3 , 2% UO_3 , 5% P_2O_5 , 1% SiO_2 , немного V, Th и др.) – титанат железа, урана, РЗЭ. Цвет от серовато-черного до черного, плотность 4,8 г/см³, твердость – 6.

Браннерит – метатитанат урана, тория, иттрия, РЗЭ, железа (TiO_2 – 31–43%, UO_2 – до 24 %, UO_3 – до 40%, ThO_2 до 8%, Fe_2O_3 – до 4%, CaO до 3,5%). Плотность 4,5 – 5,4 г / см³, твердость 4,5–5,5/

Бетафит – титано-тантало-ниобат урана, кальция, железа, тория, РЗЭ.

Содержание урана – до 20%. Цвет от зеленовато-бурого до черного, плотность 3,7 – 5 г / см³ , твердость – 4.

Коффинит – гидролизованый силикат четырехвалентного урана – $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x} \cdot (\text{OH})_{4x}$.

Содержание урана 45–67%. Цвет – черный, бутылочно-зеленый, буровато-зеленый, плотность 5,1 г / см³, твердость 5–6.

ВТОРИЧНЫЕ УРАНОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

Урановые черни – рыхлые вещества аморфной структуры и переменного состава, с химической точки зрения – это гидратированные оксиды и уранаты. Степень окисления больше, чем у настурана (вплоть до UO_3). Содержит много примесей. Содержание урана 8–3,4%, плотность 3 – 4,8 г / см³, твердость 1–4.

Карнотит – $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot (1-3)H_2O$ – двойной ванадат калия и уранила. Минерал ярко-желтого цвета, плотность 4,5 г/см³, твердость 2–2,5.

Тюямунит – $CaO \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot (4-10)H_2O$ – двойной ванадат кальция и уранила. Цвет – ярко-желтый, плотность 3,3–4,4 г/см³, твердость 1–2.

Карбонатная группа.

Шрекингерит – $\text{Na}_2\text{Ca}_3(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3(\text{SO}_4)\text{F}(\text{OH})$
 $\cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Цвет минерала желтый или зеленый, плотность
2,5 г / см³ , твердость 2,5.

ОСНОВНЫЕ УРАНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Среднее содержание урана в земной коре (так называемый массовый кларк) составляет $3 \cdot 10^{-4} \%$ масс. (Кларк никеля, по А.П. Виноградову - 0,008)

В кислых изверженных породах (с большим содержанием SiO_2) содержание урана выше среднего. Так, в гранитах (70 % SiO_2) урана содержится $9 \cdot 10^{-4} \%$. В основных изверженных породах содержание урана меньше, чем в кислых, например, в базальте (50 % SiO_2) – $3 \cdot 10^{-4} \%$ масс. Среднее содержание урана в осадочных породах в среднем в 2 раза меньше, чем в изверженных и составляет $2 \cdot 10^{-4} \%$ масс..

Уран содержится в почве, в воде озер и рек ($\sim 10^{-8}\%$), в морской воде ($\sim 2 \text{ мг/м}^3$). Уран принадлежит к числу рассеянных элементов, поэтому месторождений с высоким содержанием урана сравнительно мало. По классификацией МАГАТЭ по степени **разведанности** запасы подразделяются на достоверные (RAR), дополнительно оцененные первой категории (EAR-1), дополнительно оцененные второй категории (EAR-II) и прогнозные (SR).

По себестоимости получения урана из руды – в МАГАТЭ используется 5 ценовых категорий:

1. низкая (менее 34 долл/кг),
2. низкая–средняя (34–52 долл/кг),
3. средняя–высокая (52–78 долл/кг),
4. высокая (78–130 долл/кг.)
5. очень высокая (более 130 долл/кг).

Мировые запасы по цене 40 долл/кг составляют 1,2 млн. тонн, а по цене 80 долл/кг – 3,4 млн. тонн . Прогнозные же ресурсы оцениваются в 8,67 млн. тонн.

Разведанные запасы (RAR+EAR-I) по цене менее 40 долл./кг (на 01.01.2001 г.)

№	СТРАНА	Запасы, тыс.т.	%
1	Австралия	839	35,9
2	Казахстан	430	18,4
3	Канада	380	16,2
4	ЮАР	163	7,0
5	Узбекистан	137	5,8
6	Намибия	132	5,6
7	США	104	4,4
8	Россия	81	3,4
9	Бразилия	56	2,4

Австралия занимает первое место в мире по запасам урана и второе место – по производству урана (~22 % от мировой добычи). Уникальным в мире является месторождение Олимпик Дам, где уран ассоциируется с медью, золотом и серебром. Запасы меди составляют 11 млн. тонн при содержании меди 2,5 %, запасы урана – 275 тыс. тонн с содержанием 0,07%, запасы золота — 270 тонн с содержанием 0,6 г/т, запасы серебра — 2700 тонн с содержанием 6 г/т. Данное комплексное месторождение является самым рентабельным в мире.

Европа. В Европе отсутствуют крупные месторождения урана. Европейские АЭС работают преимущественно на привозном уране из Африки, Австралии, Канады, стран СНГ.

Это гидротермальное месторождение в Яхимово (Чехия и в Центральном Французском массиве. В Швеции - крупное месторождение урансодержащих битуминозных сланцев (0,01–0,04% U_3O_8). На Украине *метаморфогенные* месторождения вблизи города Желтые Воды с запасами около 90 тыс. тонн. В Заксене и Тюрингене (Восточная Германия) с 1946 по 1990 год проводилась разработка урановых месторождений в сланцах. Совместным немецко-советским государственным обществом «Висмут» здесь добыто 230 тыс. тонн урана.

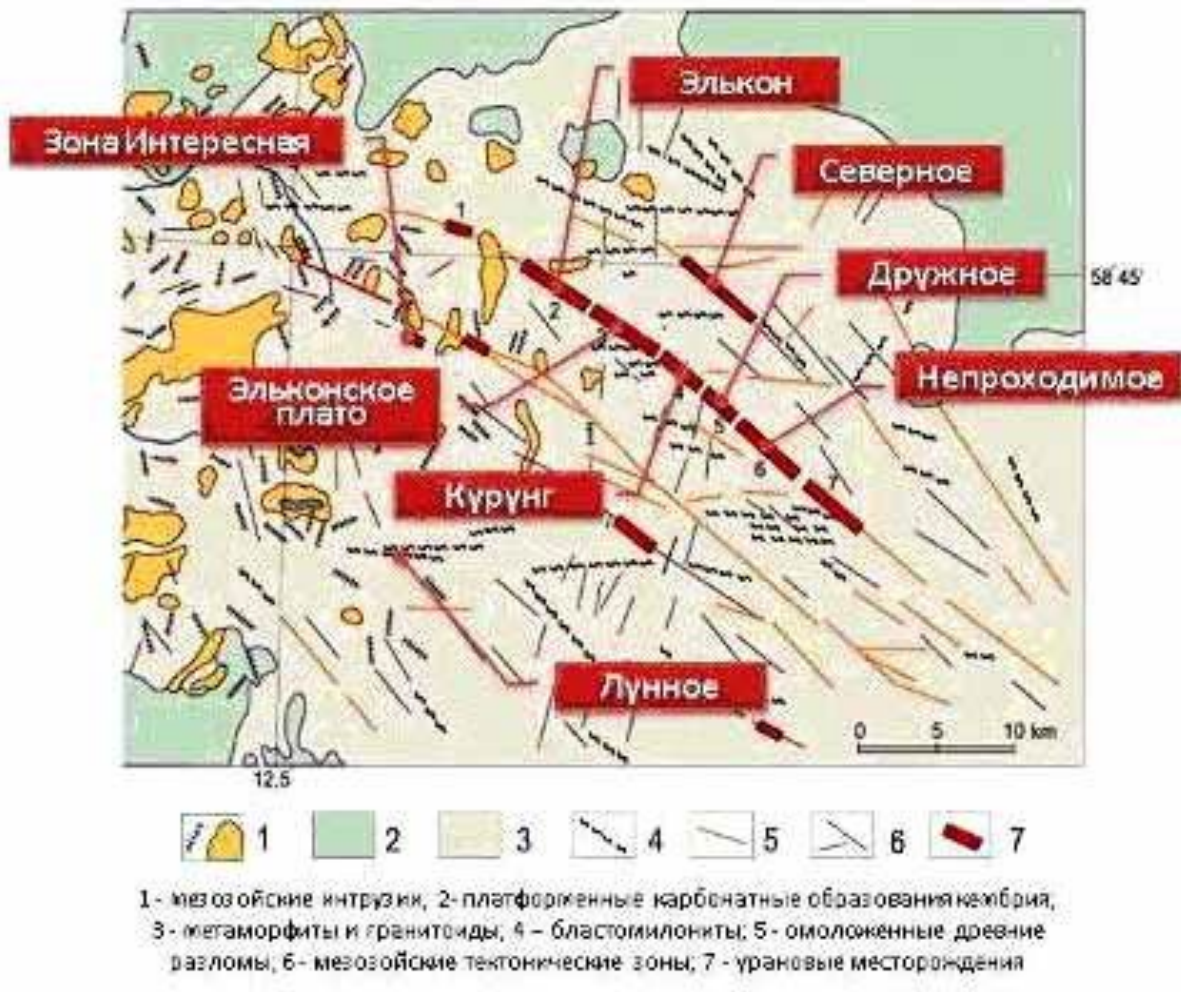
Азия. Казахстан. В недрах Казахстана сосредоточены около 19% мировых достоверно разведанных запасов, что составляет около 900 тыс. тонн урана. Из них 70% запасов пригодны для подземного выщелачивания. Важнейшее промышленное значение имеют пластово-инфильтрационные месторождения на границах артезианских бассейнов и зон пластового окисления. Эти месторождения образуют **Шу-Сарысуйскую** уранорудную провинцию (месторождения Инкай, Мынкудук, Моинкум, Акдала, Уванас, Канжуган и др.) и **Сыр-Дарьинскую** провинцию (месторождения Северный и Южный Карамурун, Харасан, Заречье и др.).

В 2001 году разведанные запасы урана в **России** по цене менее 80 долл/кг составили 172 тыс. тонн, в том числе по цене 40 долл/кг – 81 тыс. тонн. Из них только 10 тыс. тонн пригодны для отработки методом ПВ. Ведется подготовка испытаний в новых центрах по ПВ в Зауральском - **ОАО «Далур»** Курганская область, Далматовский район, Республика Бурятия, Баунтовский район **ОАО «Хиагда»**, Республика Саха (Якутия), Алданский район **ЗАО «Эльконский ГМК»**

Основные запасы связаны с месторождениями Стрельцовского рудного поля в Забайкалье (ОАО «ПГХК»).

Добычу осуществляет шахтным способом «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО), входящее в состав ОАО «Атомредметзолото» (Урановый холдинг) 93%. Остальные 7 % получают методом подземного выщелачивания ЗАО «Далур» (Курганская обл) и ОАО «Хиагда» (Бурятия).

По годовому производству урана (около 3,3 тысячи тонн) Россия занимает 4-е место после Казахстана. Годовое же потребление урана в России сейчас составляет 16 тысяч тонн и складывается из расходов на собственные АЭС в объёме 5,2 тысячи тонн, а также на экспорт тепловыделяющих средств (5,5 тысячи тонн) и низкообогащенного урана (6 тысяч тонн)^[28].



Запасы урана и схема размещения месторождений Эльконского урановорудного района.



Карьер по добыче урана. Приаргунский горно-химический комбинат, Краснокаменск, Читинской₂ обл.



Урановая шахта.

Уранодобывающие компании

В группу крупнейших уранодобывающих компаний входят компании с годовой добычей урана более 1тыс.т. Традиционно к ним относятся: канадская компания **Cameco Corp.**, британская **Rio Tinto**, казахстанская НАК **Казатомпром**, французская **AREVA**, англо-австралийская BHP **Billiton**, российская «**Урановый холдинг АРМЗ**» (ОАО «**Атомредметзолото**») и узбекская компания Навоийский горно-металлургический комбинат (НГМК). Их вклад в мировую добычу урана составляет 80%.

ОАО Атомэнергопром

ОАО «Атомный энергопромышленный комплекс» – 2007 российский государственный холдинг, 89 предприятий атомной отрасли. Компания обеспечивает полный цикл в сфере ядерной энергетики, от добычи урана до строительства АЭС и выработки электроэнергии в России и за рубежом. В состав «Атомэнергопрома» вошли **ОАО ТВЭЛ** (17% мирового рынка ядерного топлива), **ОАО «Техснабэкспорт»** (40% мирового рынка услуг по обогащению урана), **ОАО «Атомэнергомаш»**, ФГУП "Росэнергоатом", объединившее все атомные электростанции,

ОАО «Атомредметзолото». 100% акций ОАО
«Атомэнергопром» принадлежит
Государственной корпорации по атомной
энергии **«Росатом»**



Тепловыделяющие сборки для отечественных ядерных реакторов