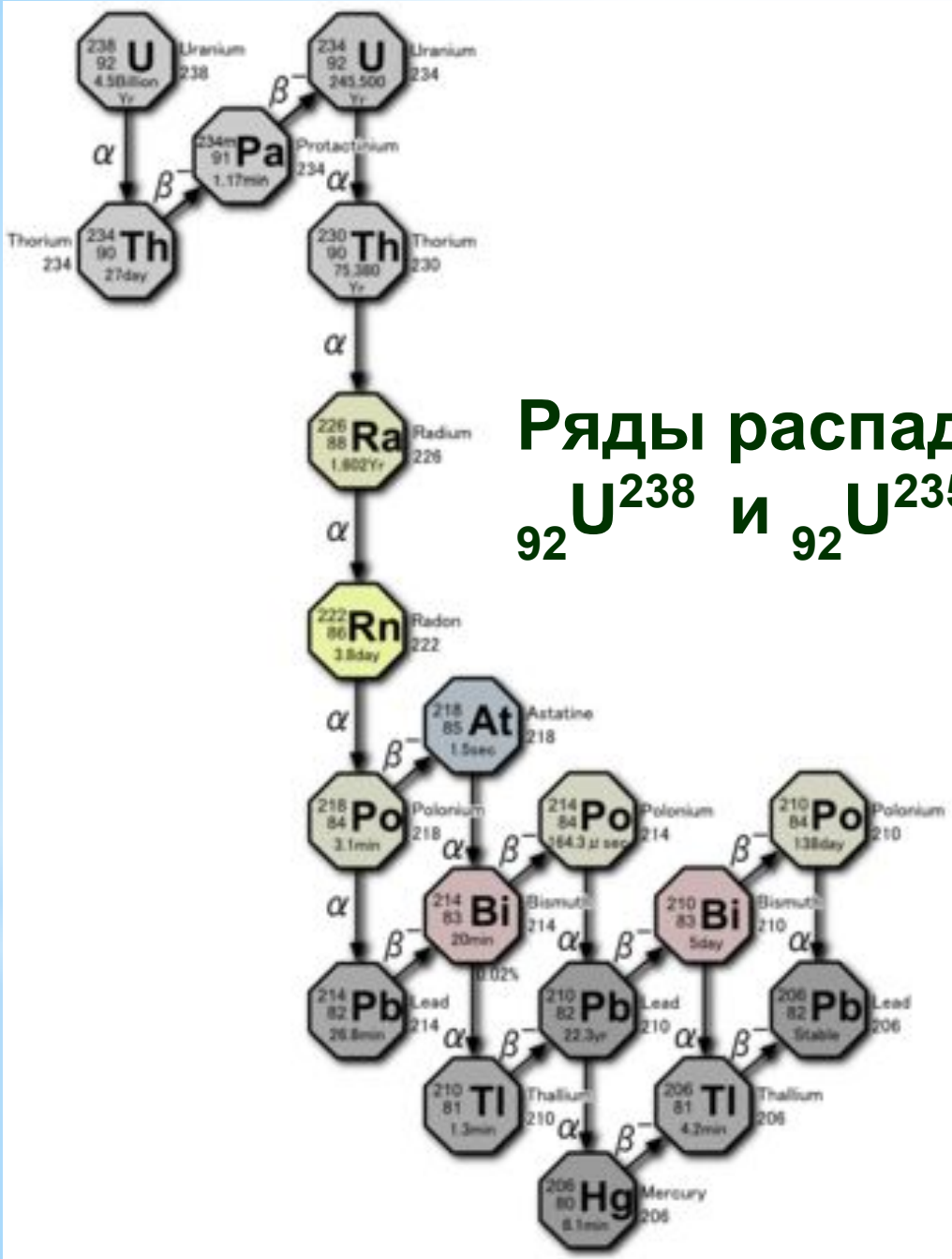
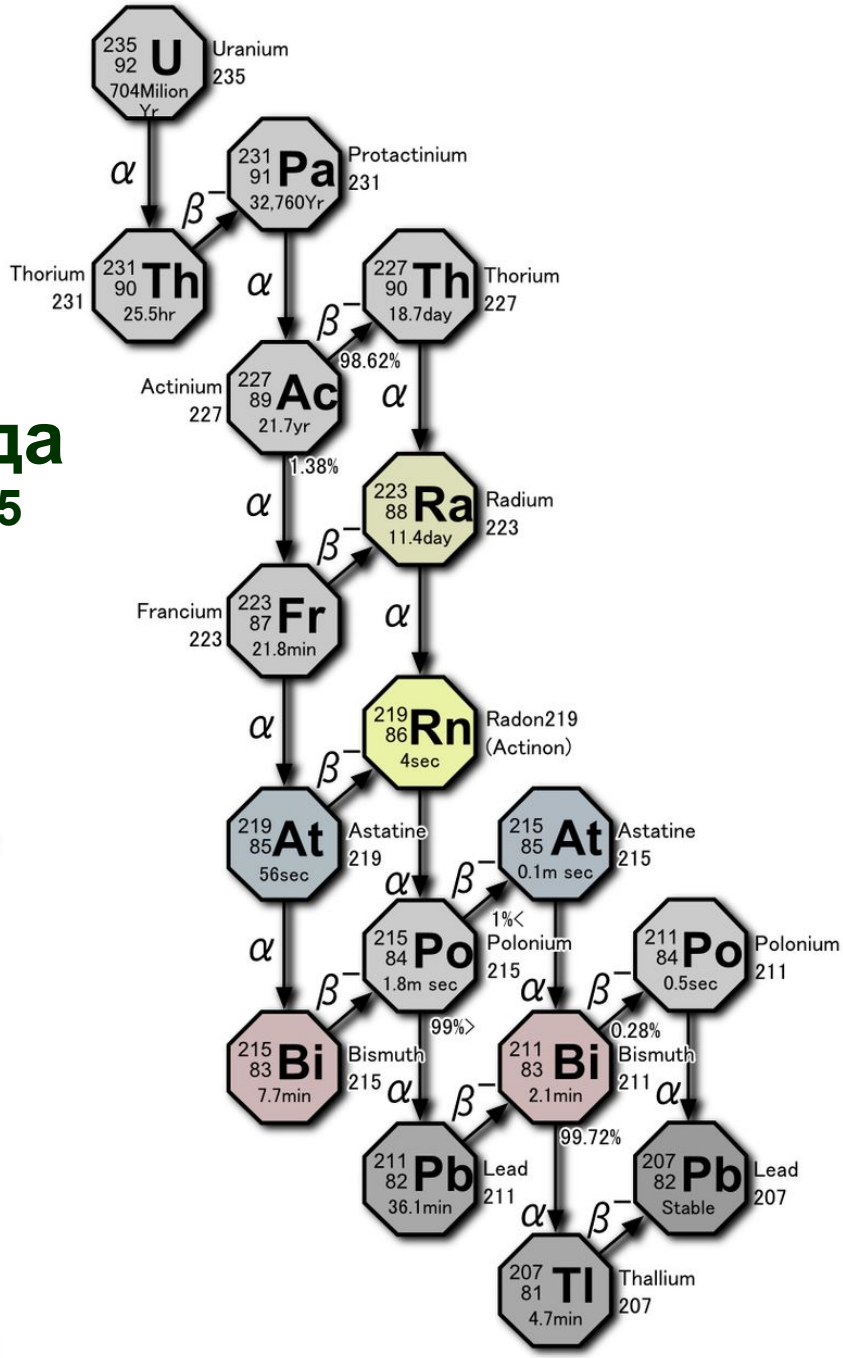
Лекция 1

Ядерно-топливный цикл

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

Ряды распада $_{92}U^{238}$ и $_{92}U^{235}$





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% 235U), низкообогащённого урана (1-5% 235U) или высокообогащенного урана (до 93% 235U).

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

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 циклом.

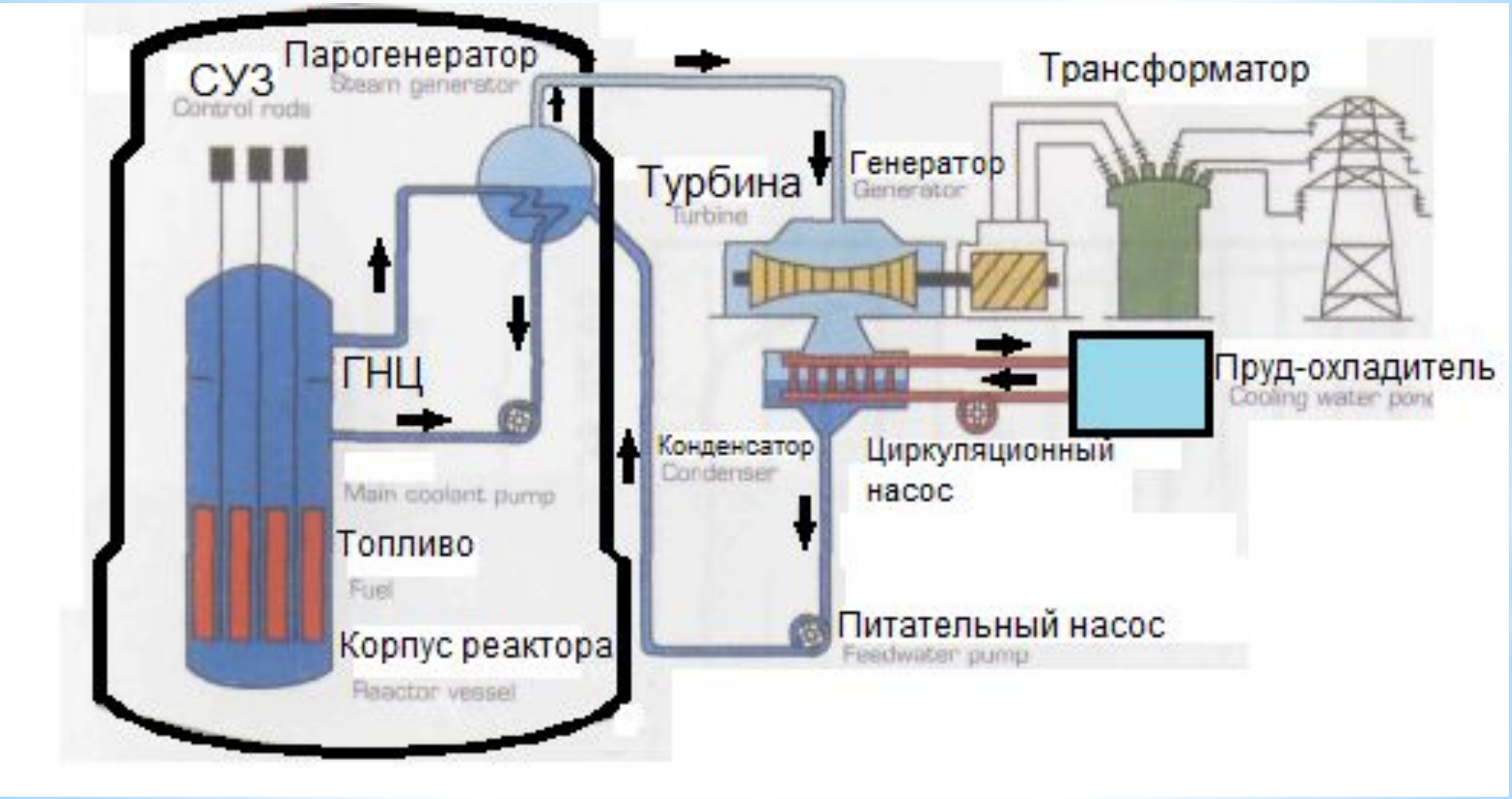
"Сердце" ядерного реактора — активная зона, которая содержит ядерное топливо.

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 получаются 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**

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow X + Y + (2-3)\,^{1}_{0}n + Q$$

Q = 1г U = 2,3 · 10^4 кВт · ч ≅ 3 т угля

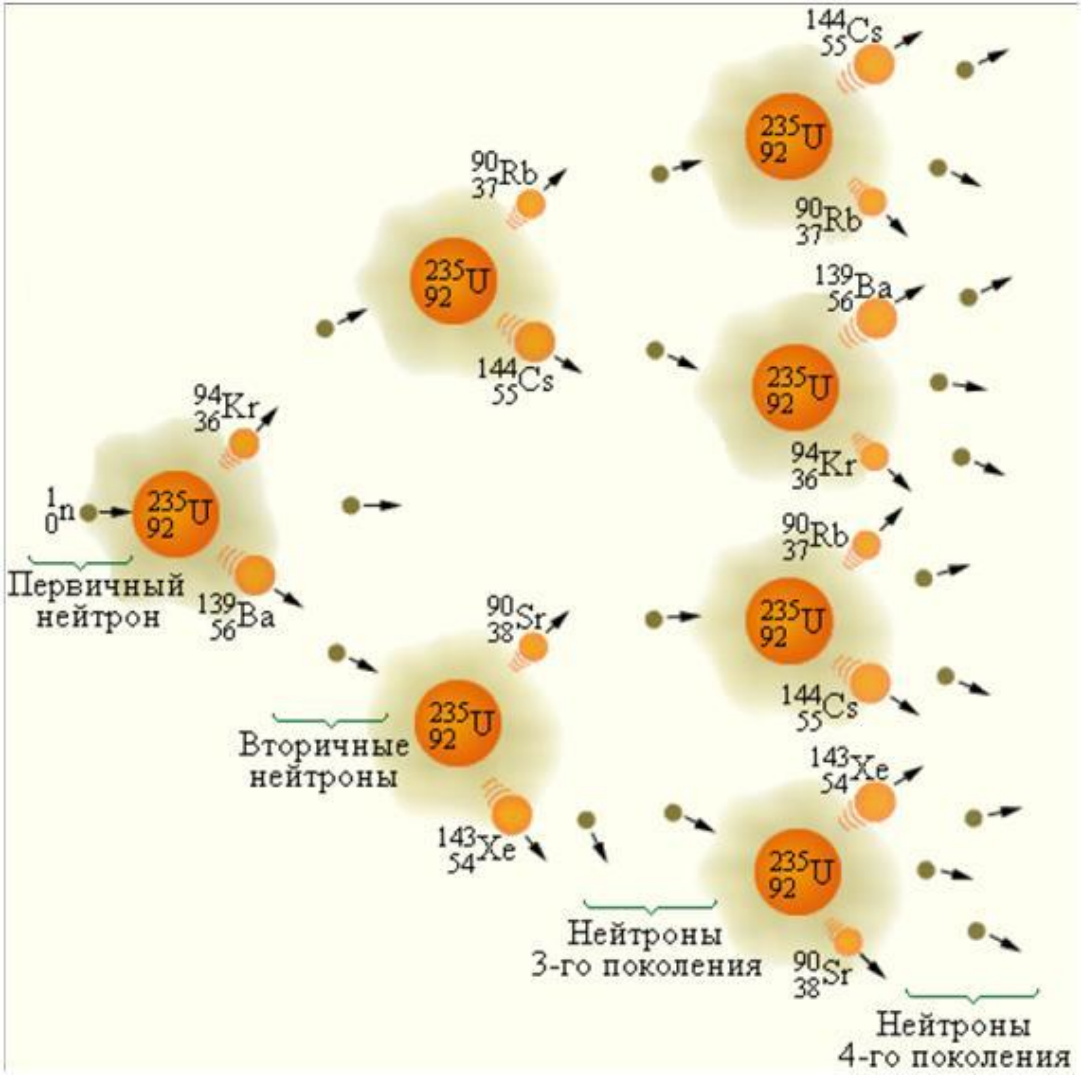
Воспроизводящиеся материалы

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}Pu$$

^{238}U

$$^{232}_{90}Th + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{233}_{90}Th \xrightarrow{\beta^-} ^{233}_{91}Pa \xrightarrow{\beta^-} ^{233}_{92}U$$

^{232}Th



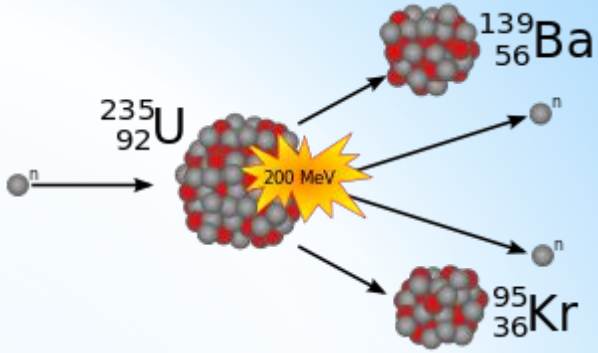


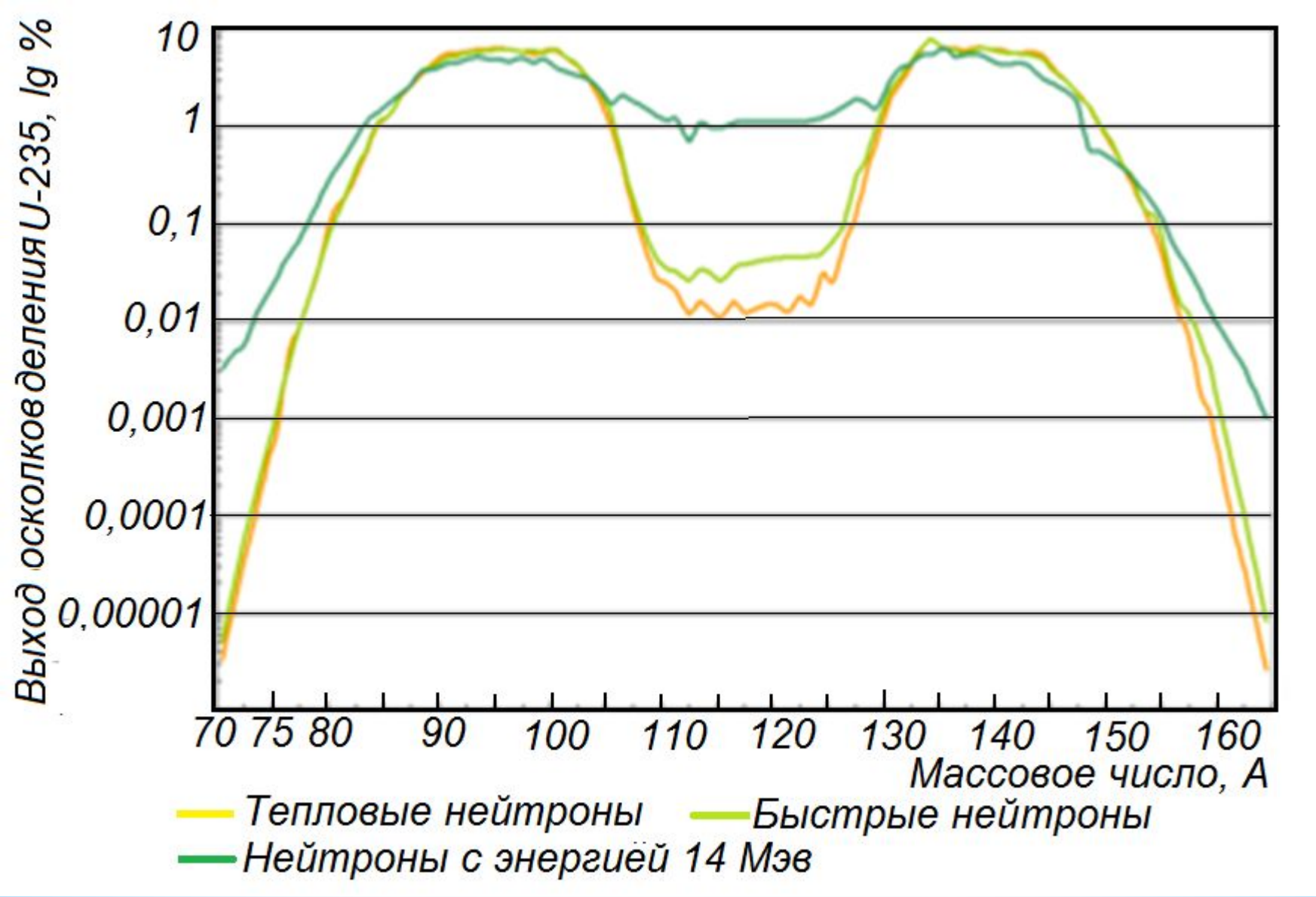
Схема деления U-235

1938 г. О. Ган и Ф. Штрассман

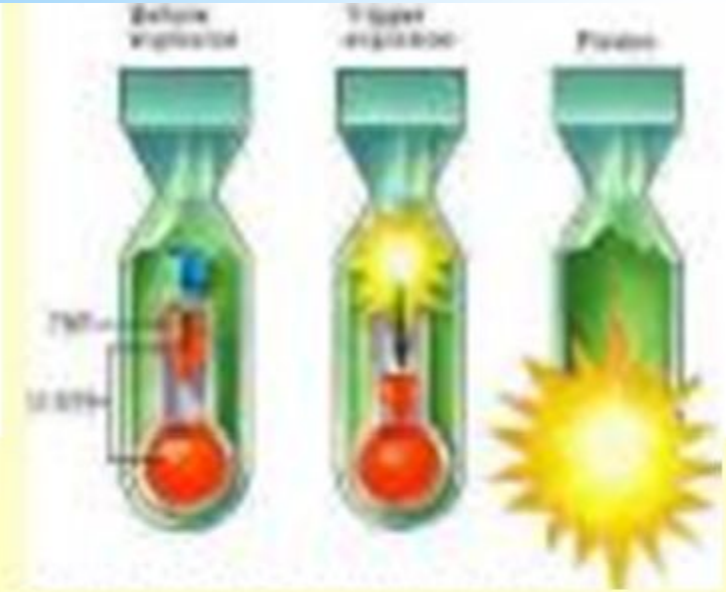
Две типичные реакции деления ядра урана имеют вид:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{144}_{56}Ba + ^{89}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n,$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2^{1}_{0}n.$$



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

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

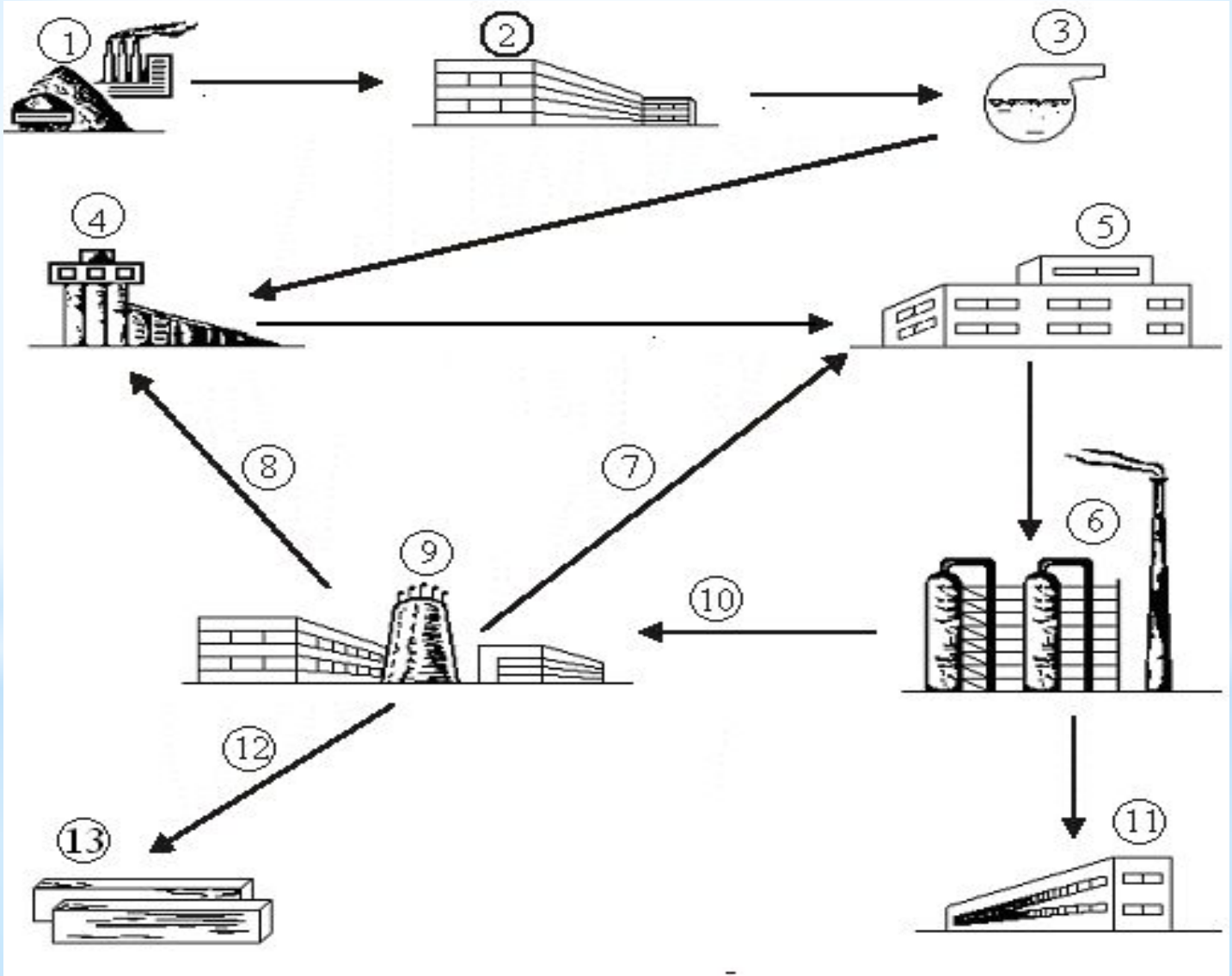


Рис. 1. Схема ядерно-энергетического топливного цикла

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.

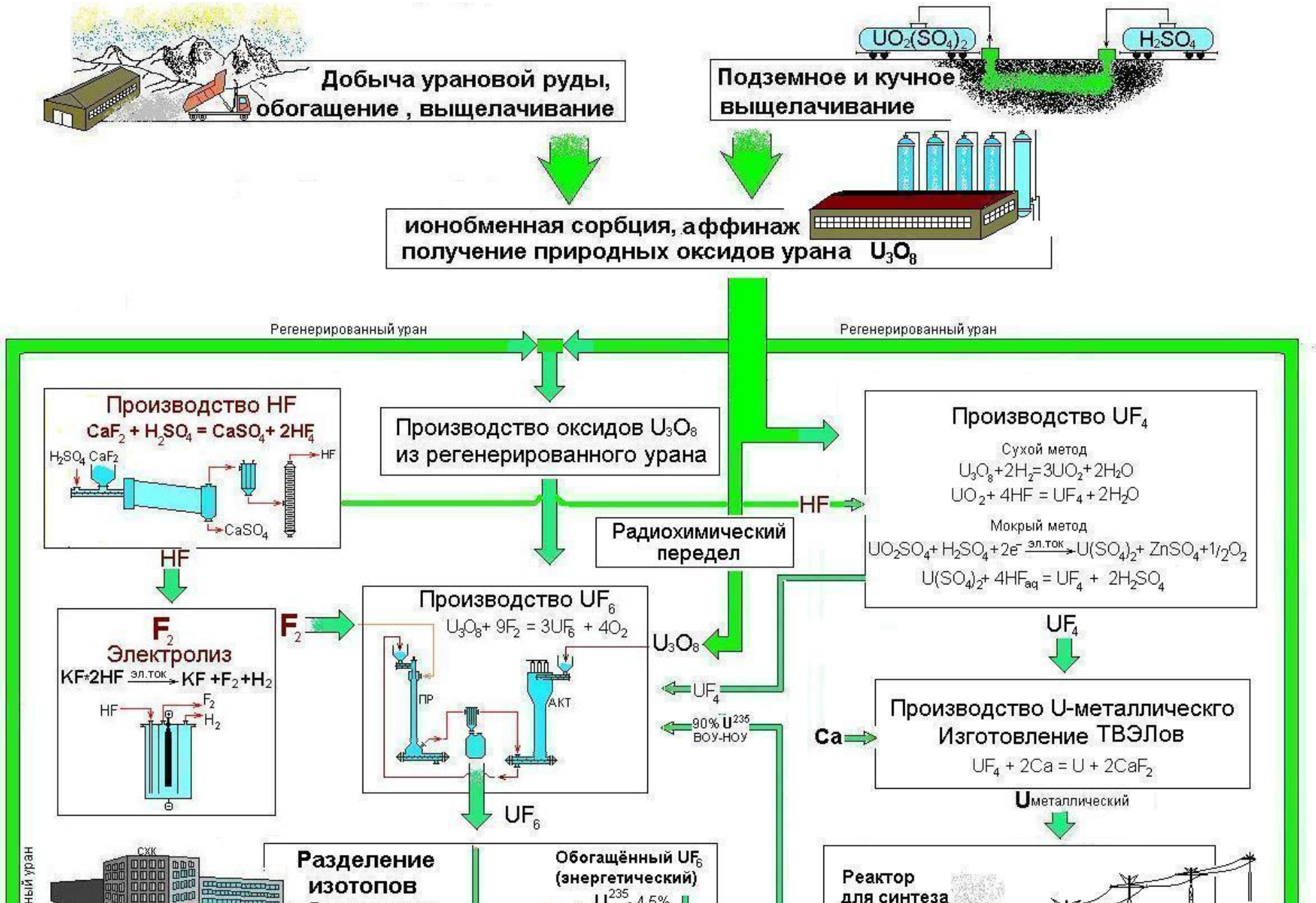
Первая стадия – приготовление ядерного топлива: добыча урана, обогащение, получение уранового концентрата и гексафторида урана, разделение изотопов, изготовление топливных композиций, ТВЭЛов.

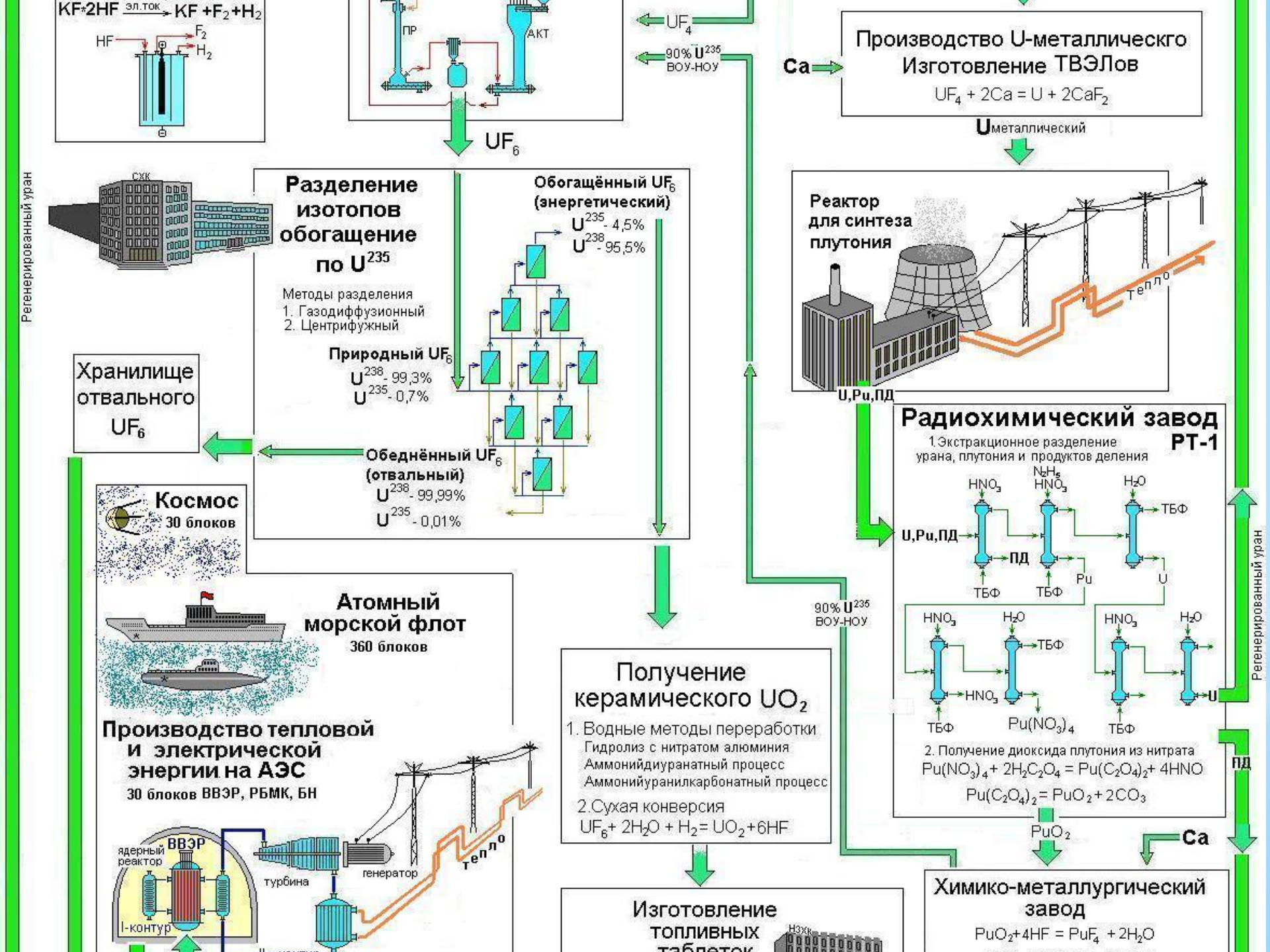
Вторая стадия – сжигание ядерного топлива в реакторах.

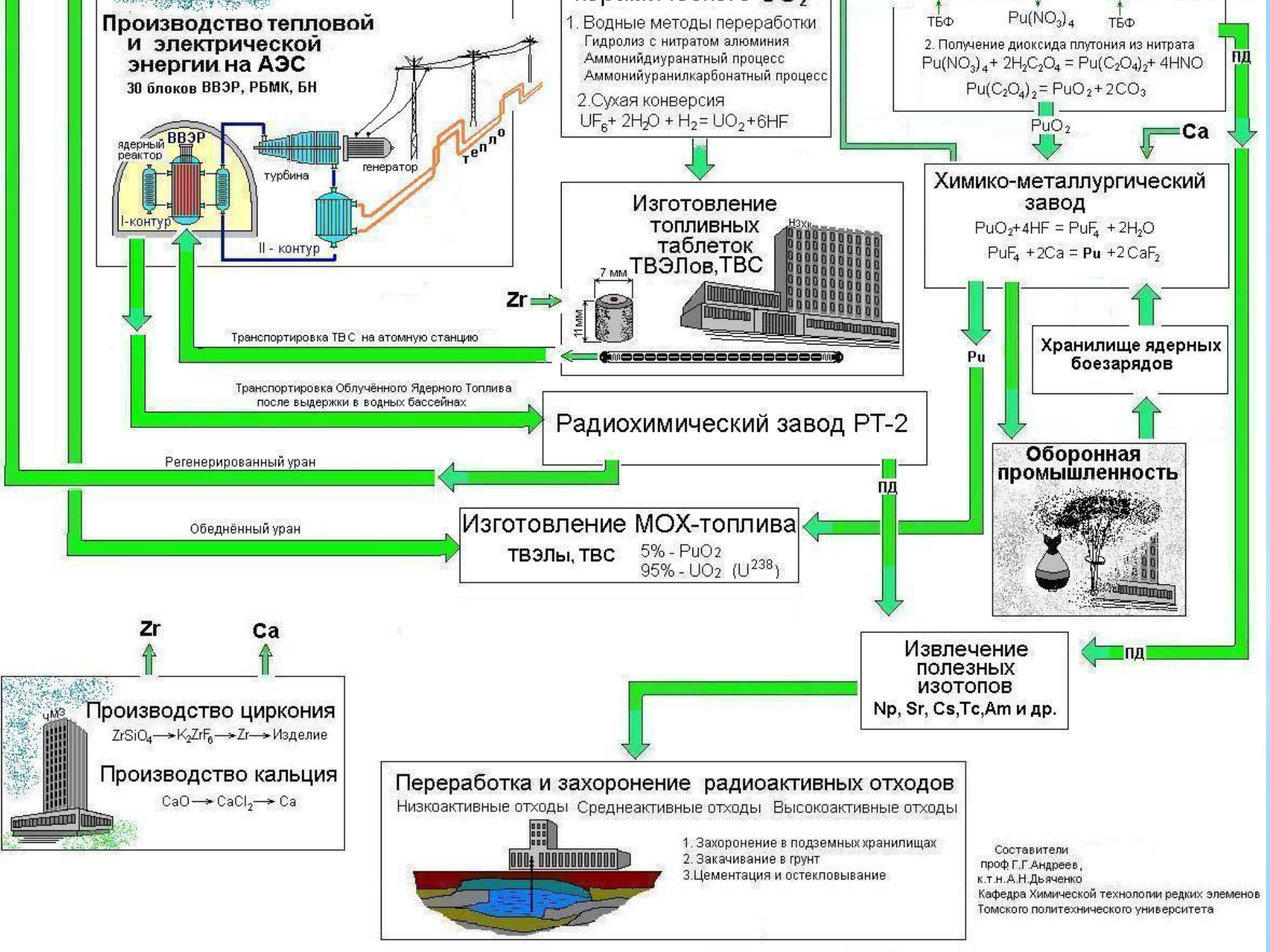
Третья стадия – выдержка отработанного ядерного топлива и его транспортирование к месту регенерации.

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

Структурная схема предприятий Ядерно-топливного цикла




KF·2HF эл.ток KF +F2+H2
HF
F2
H2
ПР
АКТ
UF4
90% U235 ВОУ-НОУ
UF6
Ca
Производство U-металлическго
Изготовление ТВЭЛов
UF4 + 2Ca = U + 2CaF2
Uметаллический
Регенерированный уран
СХК
Разделение изотопов обогащение по U235
Методы разделения
1. Газодиффузионный
2. Центрифужный
Обогащённый UF6 (энергетический)
U235 - 4,5%
U238 - 95,5%
Природный UF6
U238 - 99,3%
U235 - 0,7%
Обеднённый UF6 (отвальный)
U238 - 99,99%
U235 - 0,01%
Хранилище отвального UF6
Реактор для синтеза плутония
тепло
U,Pu,ПД
Радиохимический завод РТ-1
1.Экстракционное разделение урана, плутония и продуктов деления
HNO3
N2H5
H2O
ТБФ
U,Pu,ПД
ПД
Pu
U
2. Получение диоксида плутония из нитрата
Pu(NO3)4 + 2H2C2O4 = Pu(C2O4)2 + 4HNO
Pu(C2O4)2 = PuO2 + 2CO3
Pu(NO3)4
PuO2
Ca
Регенерированный уран
Космос
30 блоков
Атомный морской флот
360 блоков
Производство тепловой и электрической энергии на АЭС
30 блоков ВВЭР, РБМК, БН
ВВЭР
ядерный реактор
I-контур
турбина
генератор
тепло
Получение керамического UO2
1. Водные методы переработки
Гидролиз с нитратом алюминия
Аммонийдиуранатный процесс
Аммонийуранилкарбонатный процесс
2.Сухая конверсия
UF6 + 2H2O + H2 = UO2 + 6HF
Изготовление топливных таблеток
Химико-металлургический завод
PuO2 + 4HF = PuF4 + 2H2O


Производство тепловой и электрической энергии на АЭС
30 блоков ВВЭР, РБМК, БН
ВВЭР
ядерный реактор
I-контур
II - контур
турбина
генератор
тепло
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
$Pu(NO_3)_4 + 2H_2C_2O_4 = Pu(C_2O_4)_2 + 4HNO$
$Pu(C_2O_4)_2 = PuO_2 + 2CO_3$
пд
PuO_2
Ca
Химико-металлургический завод
$PuO_2 + 4HF = PuF_4 + 2H_2O$
$PuF_4 + 2Ca = Pu + 2CaF_2$
Изготовление топливных таблеток ТВЭЛов,ТВС
7 мм
11 мм
Zr
Транспортировка ТВС на атомную станцию
Pu
Хранилище ядерных боезарядов
Транспортировка Облучённого Ядерного Топлива после выдержки в водных бассейнах
Радиохимический завод РТ-2
Регенерированный уран
пд
Оборонная промышленность
Обеднённый уран
Изготовление МОХ-топлива
ТВЭЛы, ТВС
5% - PuO_2
95% - UO_2 (U^{238})
Zr
Ca
Производство циркония
$ZrSiO_4 \rightarrow K_2ZrF_6 \rightarrow Zr \rightarrow$ Изделие
Производство кальция
$CaO \rightarrow CaCl_2 \rightarrow Ca$
пд
Извлечение полезных изотопов
Np, Sr, Cs,Tc,Am и др.
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 технолоии редких элеменов
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).

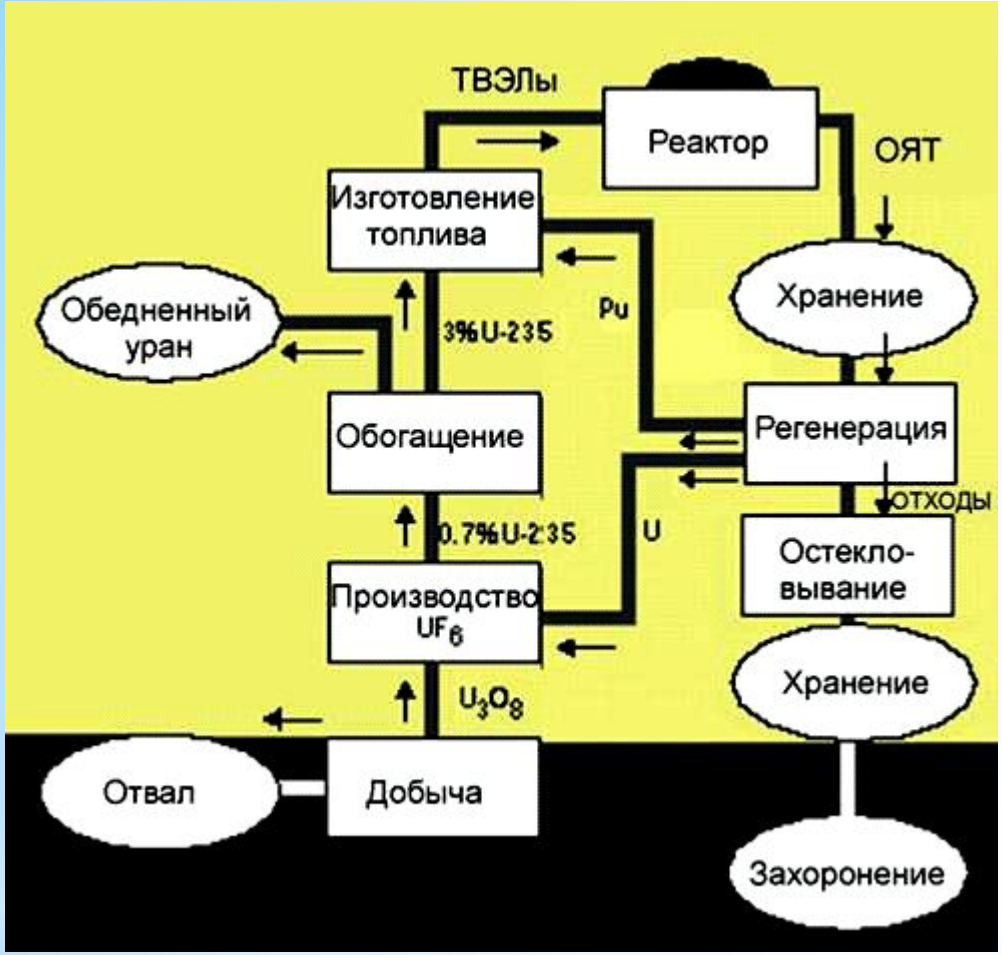


Рис. 1. 3
Замкнутый урановый топливный цикл.

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

Основным ядерным топливом является $^{235}U_{92}$, 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, тюямунит;
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.

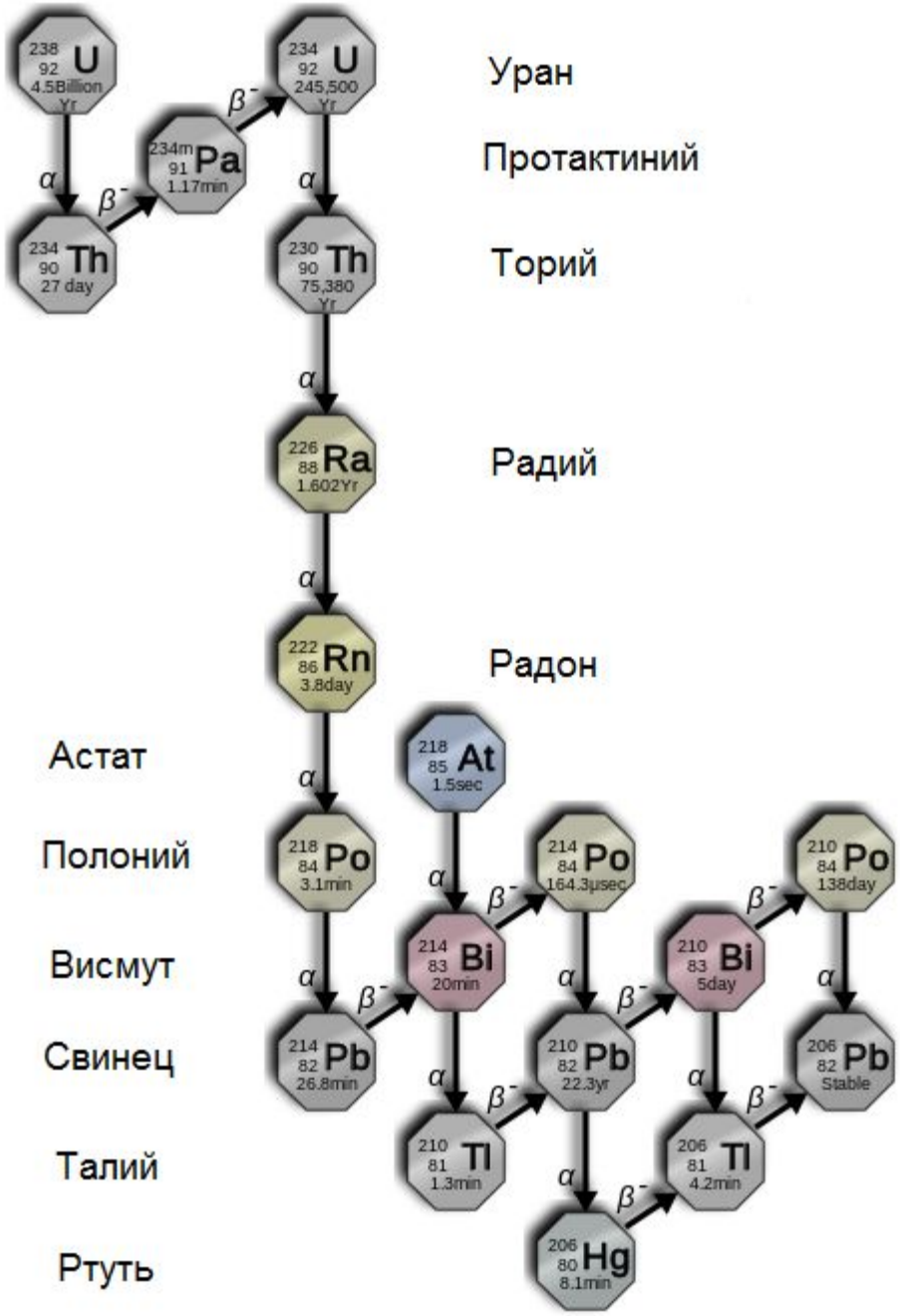
Обычно различаются урановые руды: супербогатые (более 0,3 % U), богатые (0,1-0,3%), рядовые (0,05-0,10%), убогие (0,03-0,05%) и забалансовые (0,01-0,03%).

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 так же 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 г/см^3, твердость 5–7,6 по десятибалльной шкале Мооса.

Ряд распада ^{238}U



Настуран (урановая смолка) – основной минерал урана в гидротермальных месторождениях. Состав минерала отвечает той же формуле: $xUO_2 \cdot yUO_3 \cdot zPbO$, но с несколько большим значением «y», соотношение U^{4+} и U^{6+} близко к U_3O_8. Цвет минерала – черный, плотность 5−7,7 г/см^3 , твердость 4–6,3.

Давидит (примерный состав: ~52%TiO_2 , 17%FeO, 18% Fe_2O_3, 2% UO_3 , 5% $РЗ_2O_3$, 1% SiO_2 , немного V, Th и др.) – титанат железа, урана, РЗЭ. Цвет от серовато-черного до черного, плотность 4,8 г/см^3 , 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 –гидролизованный силикат четырехвалентного урана – $U(SiO_4)_{1-x} \cdot (OH)_{4x}$.

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 / см^3, 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/см^3 , 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/см^3 , твердость 1–2.

Карбонатная группа.

Шрекингерит – $Na_2Ca_3(UO_2)(\mathbf{CO_3})_3(SO_4)F(OH) \cdot 10H_2O$. \

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 (~$10^{-8\%}$), в морской воде (~2 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.

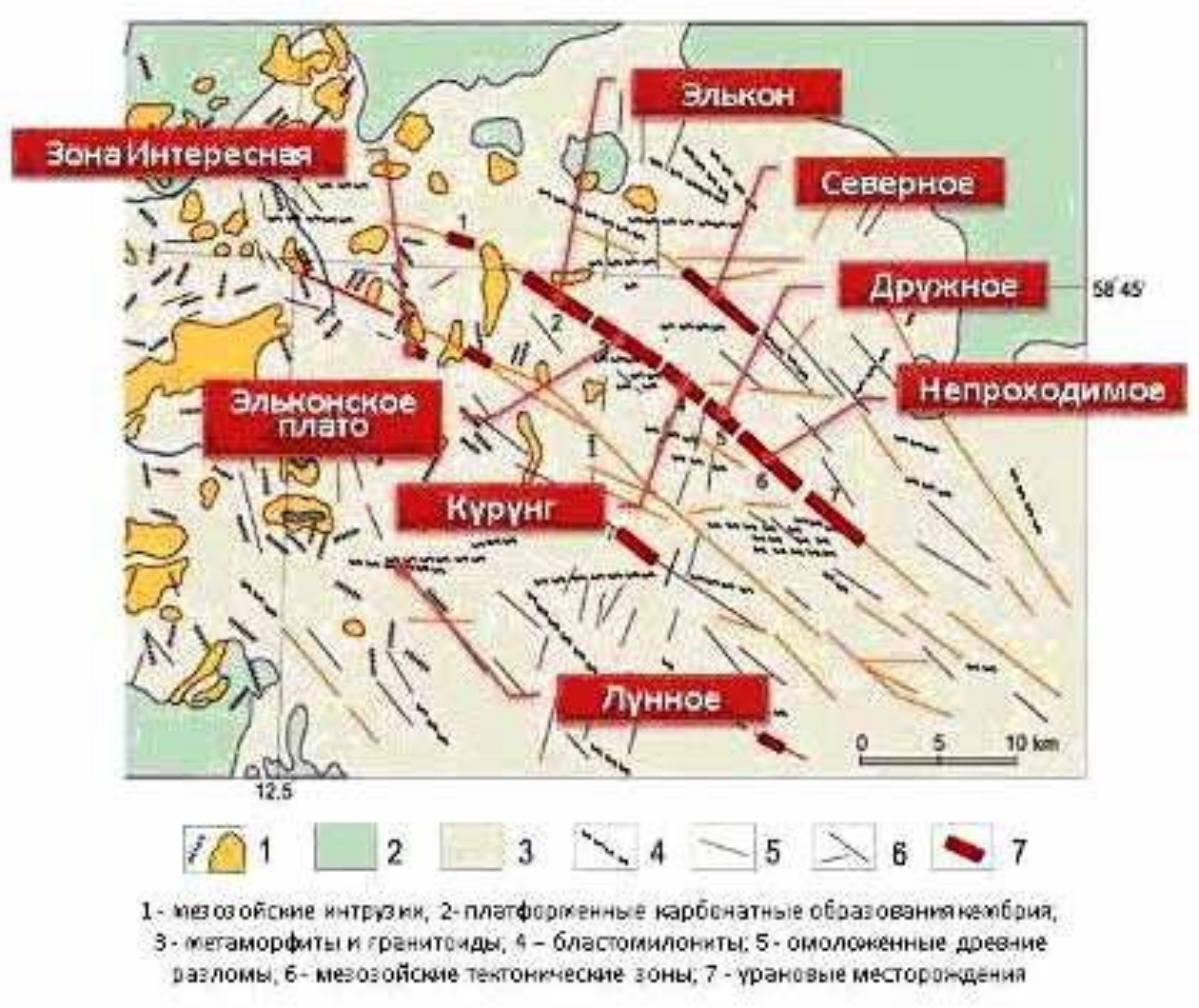
Азия. Казахстан. В недрах Казахстана сосредоточены около 19% мировых достоверно разведанных запасов, что составляет около 900 тыс. тонн урана. Из них 70% запасов пригодны для подземного выщелачивания. Важнейшее промышленное значение имеют пластово-инфильтрационные месторождения на границах артезианских 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, Читинской обл.

Урановая шахта.

Урандобывающие 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