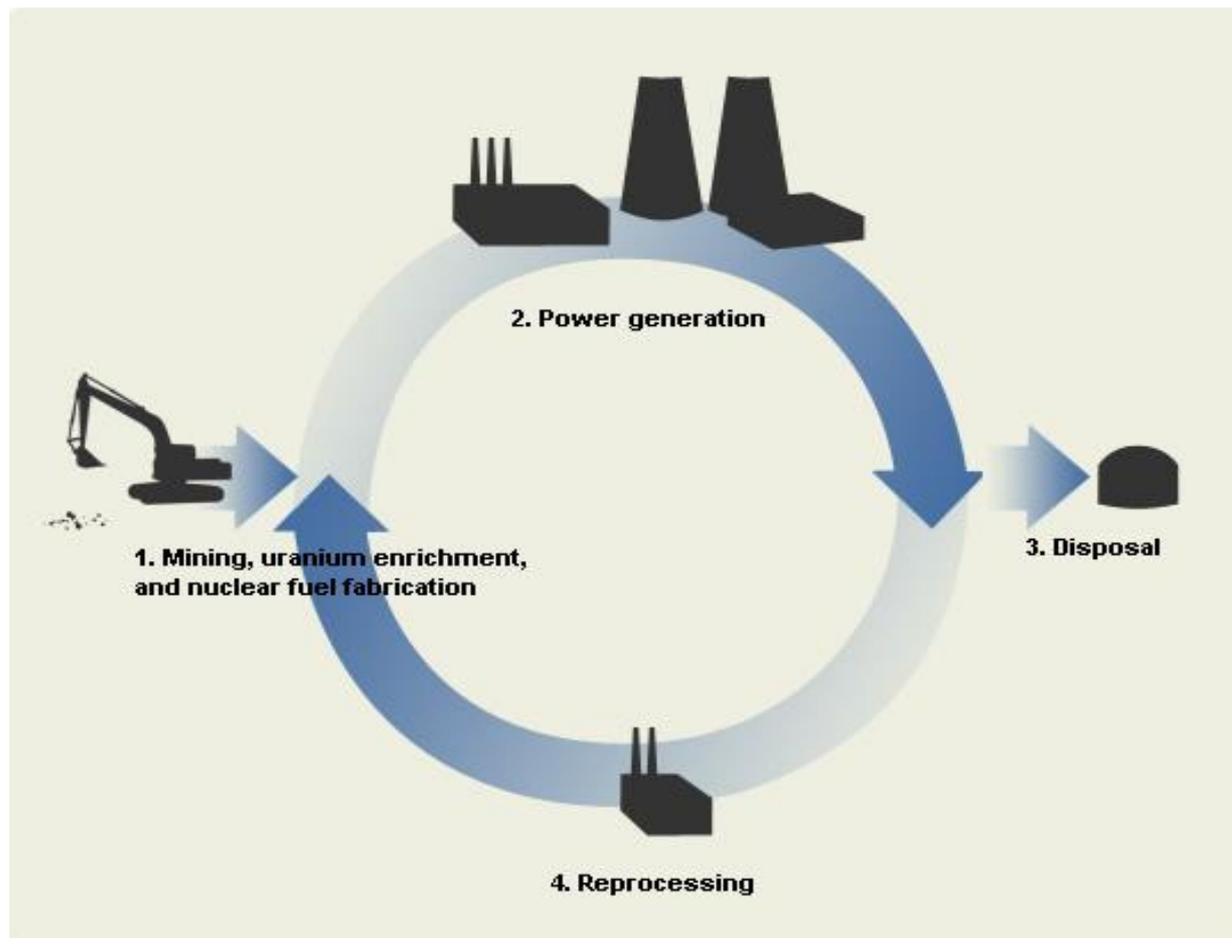


# Ядерный топливный цикл: ОСНОВЫ



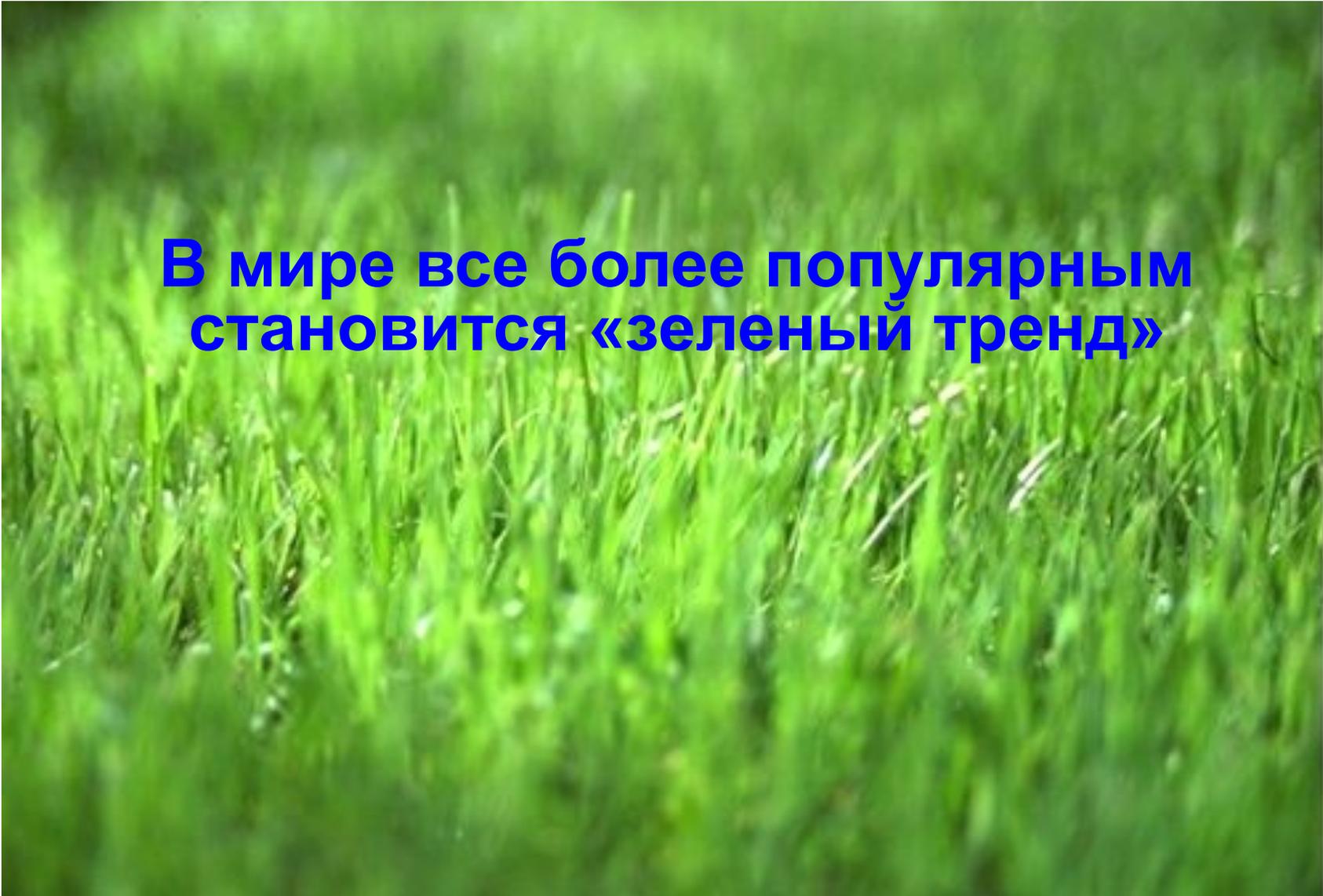
An aerial photograph of a nuclear power plant. Several large, white, conical cooling towers are visible, each emitting a thick plume of white steam that rises into the air. The plant itself is a complex of various structures, including buildings and piping, situated in a green, wooded area. A body of water is visible in the lower-left corner. The overall scene is captured from a high angle, providing a clear view of the industrial facility and its surroundings.

**Что понимают различные группы  
общественности,  
когда говорят:**

**«Ядерная энергетика»?**

# Совершенно **разное**:

- **«Ядерщики»:** высокотехнологичное и безопасное производство энергии
- **Правительство:** энергетическая безопасность страны
- **Лидеры общественных движений и население:** потенциальный риск и экологическая опасность, **тем более, что....**

A vibrant green field of grass, slightly out of focus, with a bright blue text overlay in the center. The text reads: "В мире все более популярным становится «зеленый тренд»".

**В мире все более популярным  
становится «зеленый тренд»**

# Зеленый- самый популярный

**В науке** – зеленые технологии,  
новые направления (зеленая  
химия, зеленая экономика,  
зеленая энергетика)

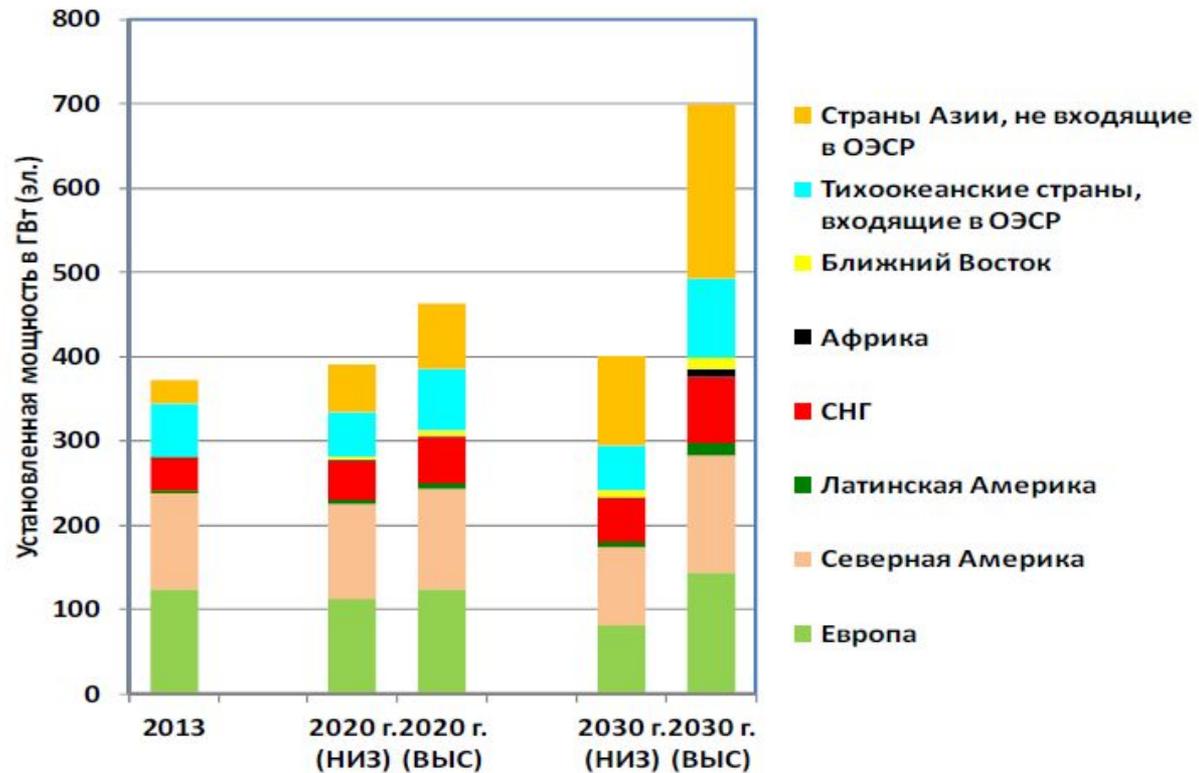
**В образовании** – зеленые университеты

**В повседневной жизни** – зеленые товары

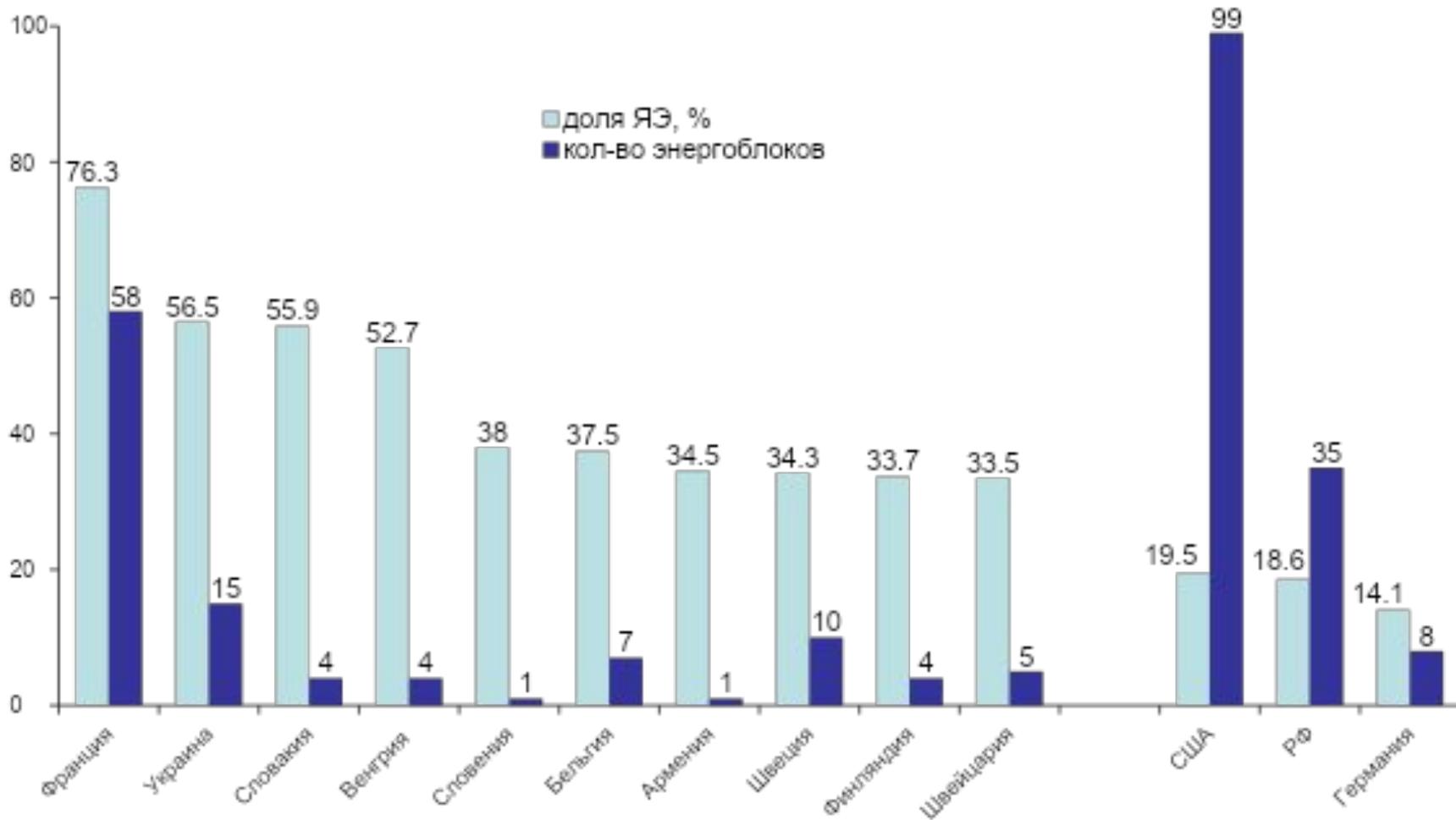
# Тенденции развития ядерной энергетики в мире

- По данным МАГАТЭ в мире функционирует **441 ядерный реактор** с суммарной мощностью **382,9 ГВт**, на стадии строительства находятся **68 реакторов в 15 странах** с установленной мощностью **67,4 ГВт**.

**Динамика изменения региональных мощностей согласно высокому и низкому прогнозам (МАГАТЭ, 2014)**



# Тенденции развития ядерной энергетики в мире



# После Фукусимы: 2015 г.

**Япония:** запущены реакторы «Сендай-1», «Сендай-2», одобрен запуск «Иката-3». Объявлено об остановке 5 энергоблоков.

**Германия:** Объявлено об остановке реактора АЭС «Графенрайнфельд»

**Соединенное Королевство:** объявлено об остановке «Уилфа-1».

**Китай:** подключено 8 новых энергоблоков и начато строительство 8.

**Республика Корея:** запущен 1 энергоблок.

**РФ:** запущен 1 энергоблок Белоярской АЭС.

**Пакистан:** начато строительство 1 энергоблока.

**ОАЭ:** начато строительство 1 энергоблока.

**Турция:** продолжает развитие инфраструктуры для ядерной программы.

**Польша:** планирует определиться с технологией и площадкой для первой АЭС к 2019 г.

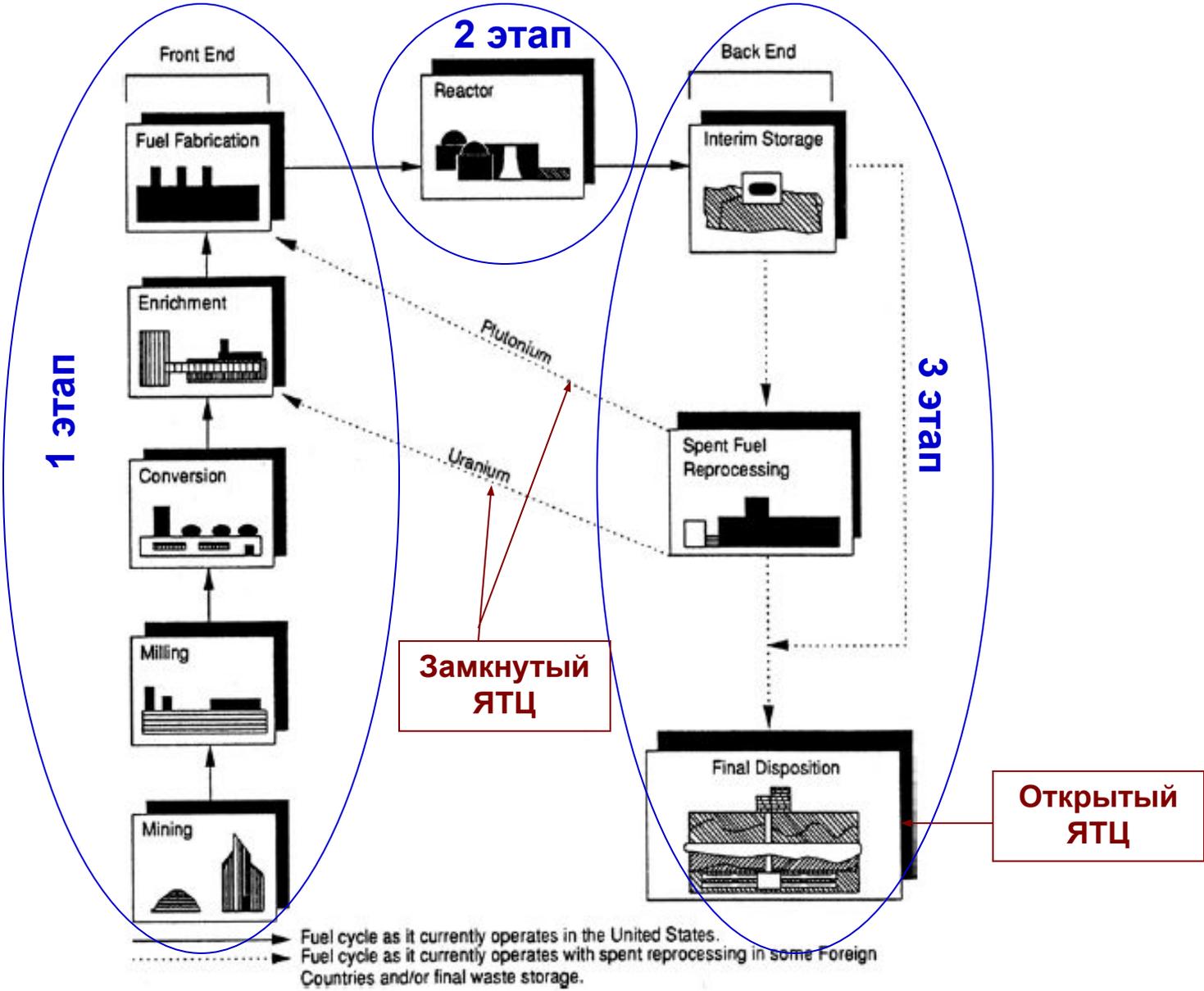
**Иордания:** учреждена Иорданская ядерно-энергетическая компания.



# В защиту ядерной энергетики

- ЯЭ вносит существенный вклад в смягчение последствий изменения климата: ежегодно на 2 млрд тонн меньше  $\text{CO}_2$  поступает в атмосферу.
- На 21-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (КС-21) принято Парижское соглашение, в котором не предписывается и не запрещается никакая конкретная форма энергии.
- ЯЭ способствует достижению цели 7 в области устойчивого развития “обеспечения доступа к недорогостоящим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех” и цели 13 “принятия срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями”.

# Схема ЯТЦ



# Топливные циклы

- **Урановый**

Делящийся материал –  $^{235}\text{U}$ , воспроизводящий –  $^{238}\text{U}$

- **Уран-плутониевый**

Делящийся материал –  $^{235}\text{U}$  +  $^{239}\text{Pu}$ , воспроизводящий –  $^{238}\text{U}$

- **Уран-ториевый**

Делящийся материал –  $^{235}\text{U}$  или  $^{233}\text{U}$ , воспроизводящий –  $^{232}\text{Th}$

- **Торий-плутониевый**

Торий и оружейный плутоний.

- **Открытый (разомкнутый),**

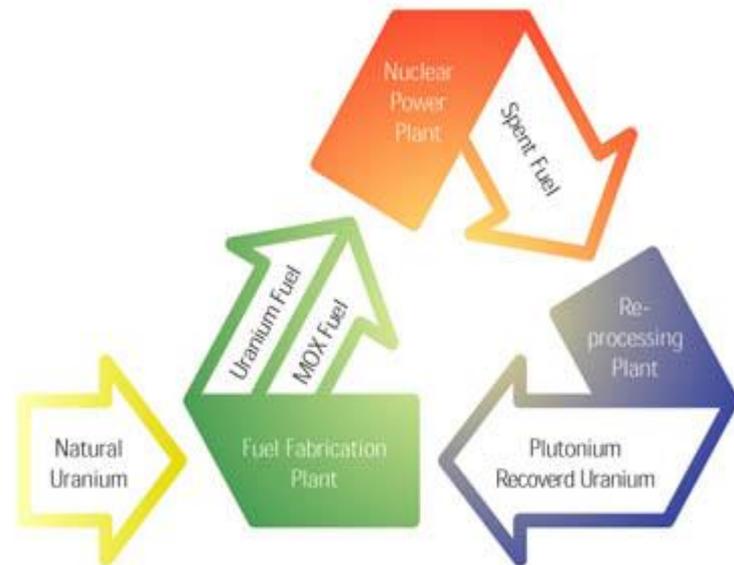
- **Закрытый (замкнутый).**

# Преимущества и недостатки различных типов ЯТЦ

## Замкнутый:

### Преимущества

- Возврат в энергетику урана и плутония.
- Уменьшение объёмов высокорadioактивных отходов, предназначенных для захоронения.



### Недостатки

- Наличие радиохимического производства.
- Вероятность неконтролируемого распространения плутония-239 и других делящихся компонентов.

# Преимущества и недостатки различных типов ЯТЦ

## Открытый:

### *Преимущества*

- Короче и проще.

### *Недостатки*

- Большая стоимость хранилищ и полигонов для захоронения,
- Трудности обеспечения долговременной изоляции ТВС от окружающей среды,
- Необходимость постоянной охраны и контроля за состоянием хранимых материалов.



# ЯТЦ в разных странах



- **Франция** – заводы UP-2 и UP-3 на мысе Ля Аг с общей производительностью 1600 тонн в год.
- **Великобритания** – завод «Торп» («Thorp»), 1200 тонн в год.
- **Россия** – РТ-1 на ПО «Маяк»,  
проектная производительность 400 тонн ОЯТ в год.
- **Индия** – заводы в Тромбее (60 тонн в год), Тарапуре (100 тонн в год), Калпаккаме (100 тонн в год).
- **Китай** – экспериментальный завод (50 тонн в год).
- **Япония** – предприятие в Роккасё-Мура (800 тонн в год);  
опытный завод в Токай-Мура (90 тонн в год).

# ЯТЦ в разных странах

- Большинство стран либо хранят ОЯТ, либо передают ОЯТ на переработку другим странам.
- **Германия** - ОЯТ перерабатывается на мощностях SOGEMA (Франция) и BNFL (Великобритания), 50:50.
- **Швеция** ориентирована на открытый цикл.



# Уран в природе

Гранит	4 ppm U
Скальные породы	2 ppm U
Среднее количество в земной коре	1.4 ppm U
Морская вода	0.003 ppm U



Минералы, содержащие уран: карнотит, отенит, уранинит, торбернит, тьюмунит ( $\text{UO}_2$  до  $\text{UO}_{2.67}$ ).

Урановые руды: высокое содержание (1–4% U), среднее (0.1–0.5% U) и низкое (менее 0.1% U).

# Уран в природе



25 стран мира добывают уран.

8 стран - 85%: Казахстан, Канада, Австралия, Россия, Нигерия, Намибия, Узбекистан, ЮАР.

# Добыча урана

- Цена – 77-86 \$/кг U,
- Производство урана в 2015 г. около 57 000 т,
- В мае 2015 г. началась коммерческая добыча на руднике с самыми богатыми рудами в мире «Сигар-Лейк» (Канада),
- В США изучается возможность использования морской воды как нетрадиционного источника урана.

# Способы добычи урана

- **Открытый (карьерный):**  
рудник Актау (Казахстан)
- **Подземный (шахтный).**
- **Метод подземного выщелачивания** (закачивание растворителя «in situ»).
- **Способ растворения отходов.**



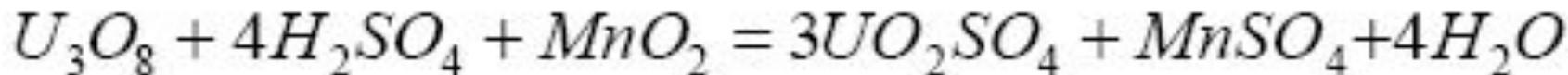
# Переработка урановой руды

Запасы и коммерческие сделки выражаются в эквивалентных массах  $U_3O_8$ .



Смешанный оксид урана,  $U_3O_8$ , (жёлтый порошок, жёлтый пирог, кекс, жёлтый кек).

1. Концентрирование.
2. Обжиг руды.
2. Выщелачивание концентратов, перевод урана в раствор.



3. Избирательное выделение урана из раствора.

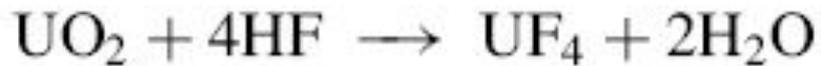
Ионный обмен или экстракция

Экстракция трибутилфосфатом.

$UO_2(NO_3)_2$  кристаллизуют и прокаливают, образуется  $UO_3$ .

# Получение ядерного топлива

## 4. Получение тетрафторида урана



## 5. Преобразование $\text{UF}_4$ в $\text{UF}_6$



## 6. Обогащение по изотопу $^{235}\text{U}$



# Обогащение

Коммерческие услуги оказывают:

НЯКК (Китай),

«АРЕВА» (Франция),

«Росатом» (Российская Федерация),

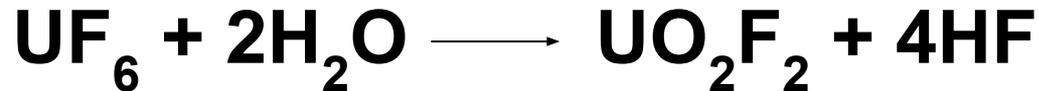
«ЮСЭК» (США),

«Уренко» (в Европе и США).

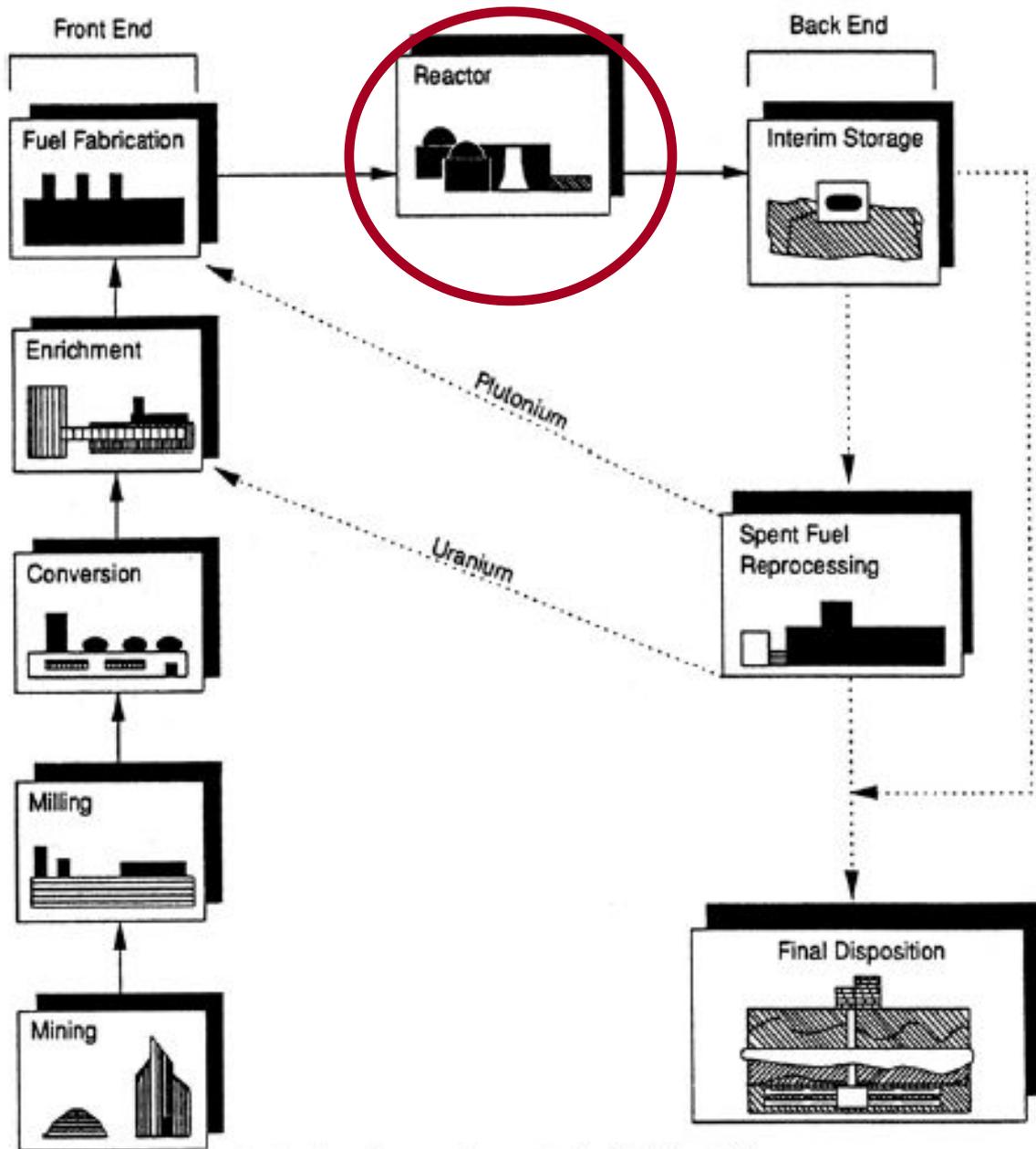
Небольшие установки эксплуатируются в Аргентине, Бразилии, Индии, Иране, Пакистане и Японии.

# Получение ядерного топлива

## 7. Изготовление твэлов



- Обжиг диураната аммония и получение  $\text{UO}_2$
- Прессование и спекание в виде небольших керамических таблеток.
- **Изготовление тепловыделяющих элементов (твэлов)**, которые объединяют примерно по 200 штук в топливные сборки, готовые для использования на АЭС.



—————> Fuel cycle as it currently operates in the United States.  
 .....> Fuel cycle as it currently operates with spent reprocessing in some Foreign Countries and/or final waste storage.

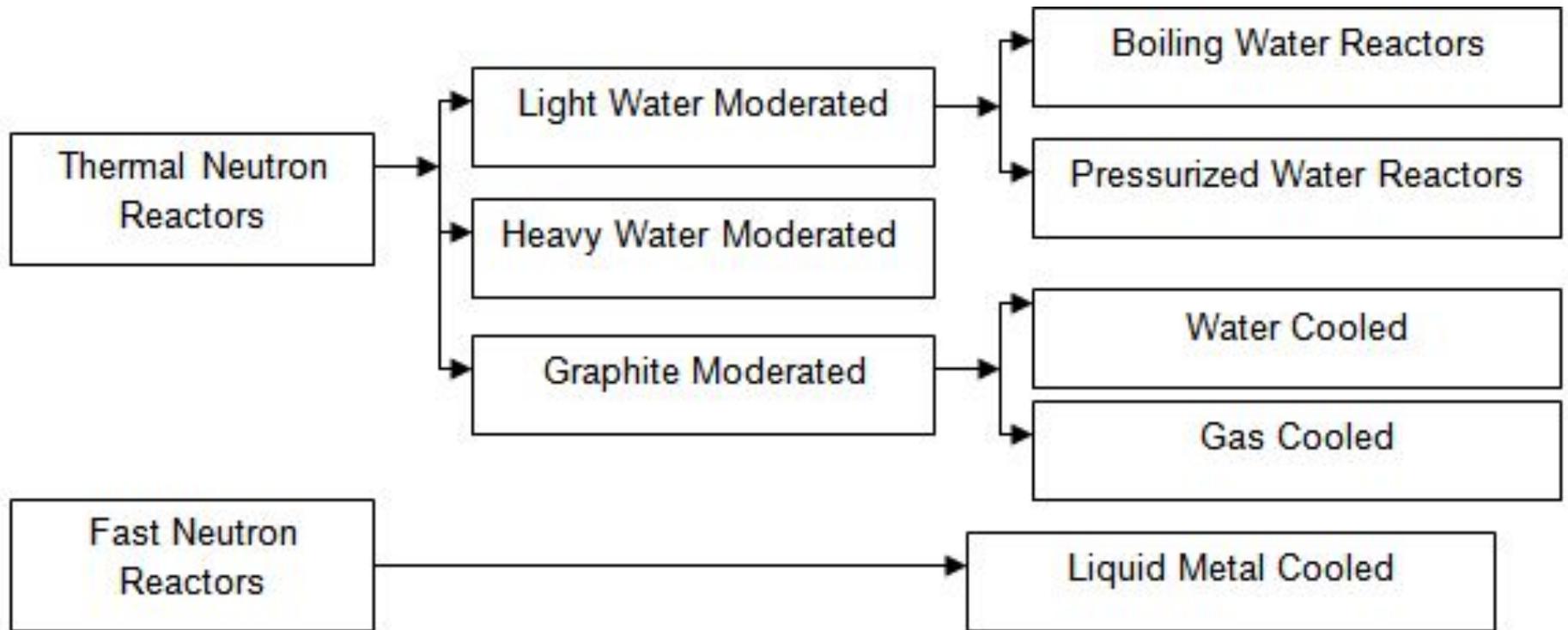
# Ядерный реактор

Устройство, в активной зоне которого осуществляется контролируемая самоподдерживающаяся цепная реакция деления ядер некоторых тяжелых элементов под действием нейтронов.

Первый ядерный реактор - декабрь 1942 года в США под руководством Э. Ферми.

В Европе первый ядерный реактор - установка Ф-1 (25 декабря 1946 года в Москве под руководством И. В. Курчатова)

# Типы реакторов



# Типы реакторов

Из общего числа находящихся в эксплуатации реакторов:

- 81,6% - реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем,
- 11,1% – реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем,
- 3,4% – легководные реакторы с графитовым замедлителем,
- 3,2% – газоохлаждаемые реакторы.
- Две установки - быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем.

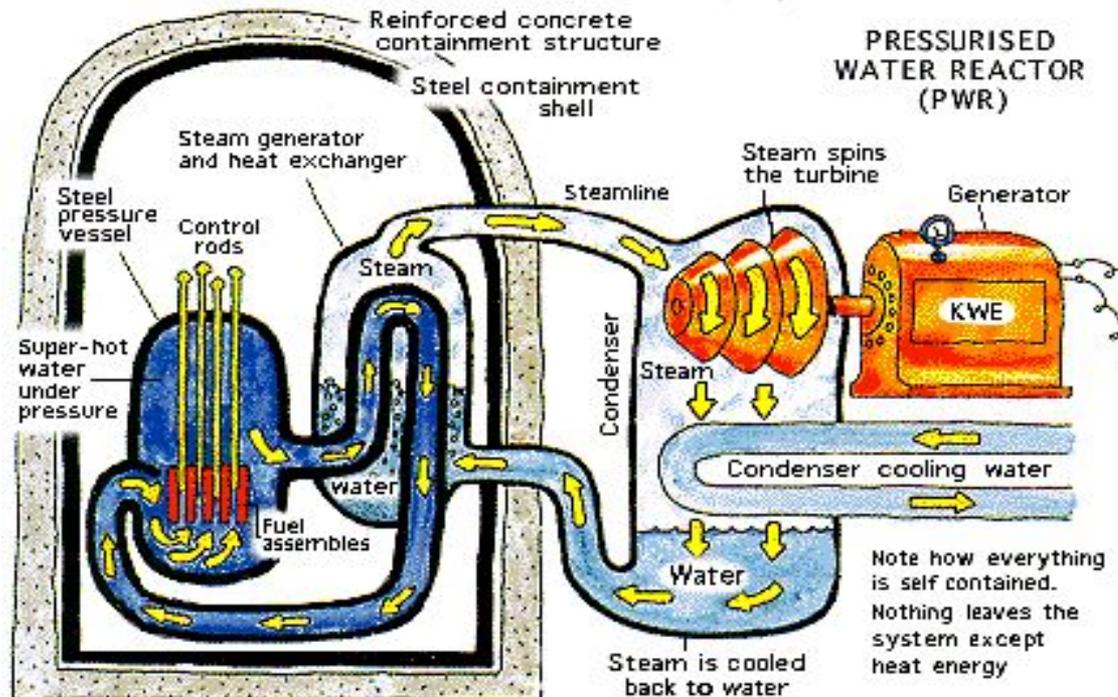
# Реакторы с водой под давлением

В России — ВВЭР. В других странах — PWR.

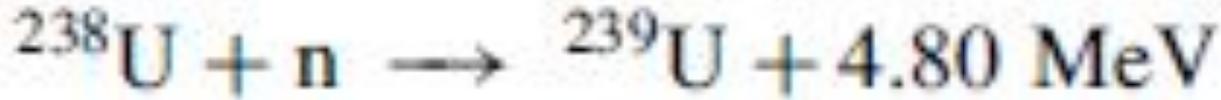
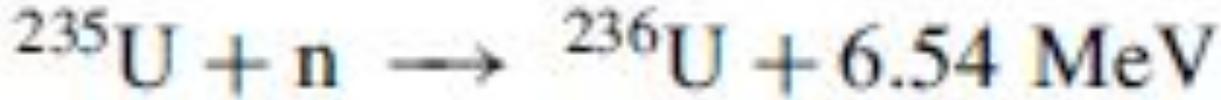
Первая станция — в США в 1957 году (АЭС Шиппингпорт).

Первый советский ВВЭР-210 — в 1964 г. на первом энергоблоке Нововоронежской АЭС.

Двухконтурная схема.



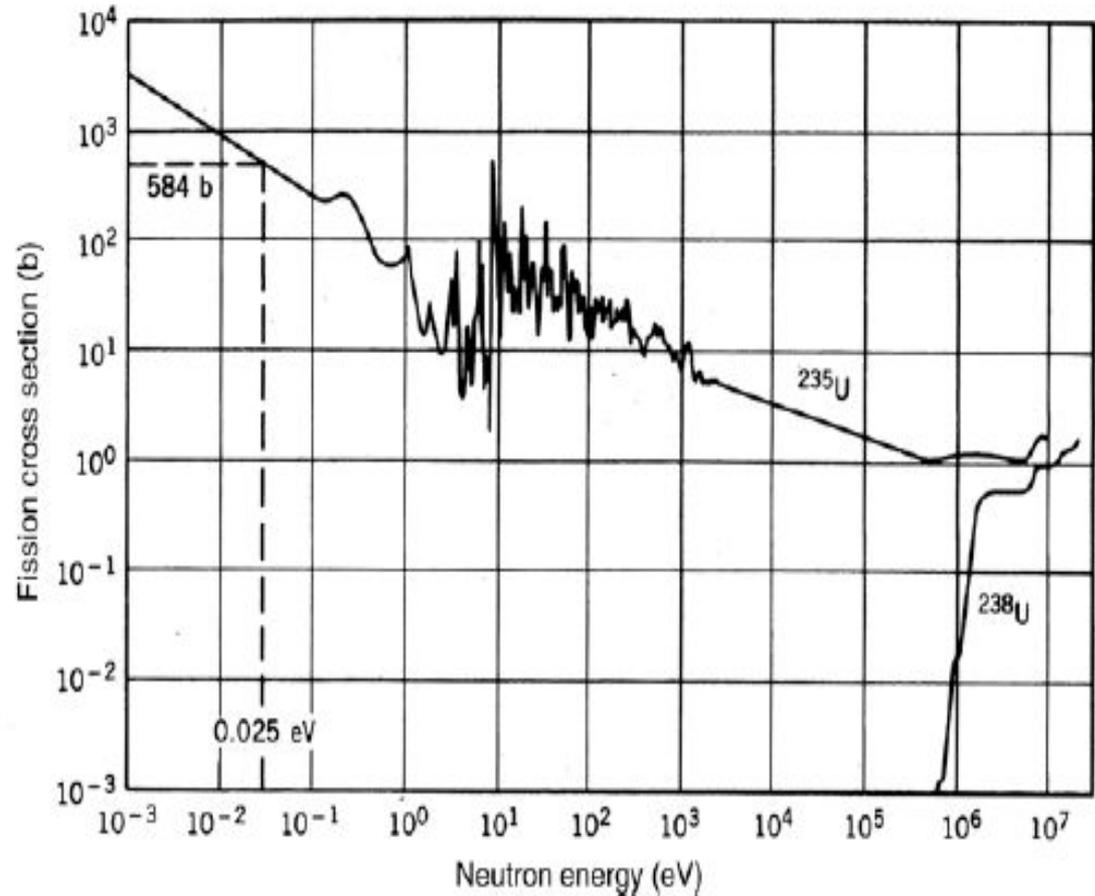
# Ядерная реакция деления



- 1 реакция – образование четно-четного ядра,  
2 реакция – четно-нечетного ядра.
- Энергия для деления  ${}^{235}\text{U}$  и  ${}^{238}\text{U} \approx 6.2 \text{ MeV}$ .
- Ядра, способные к делению (“thermally fissionable”) – все четно-нечетные ядра, у которых количество выделяемой энергии превышает потенциальный барьер деления.
- Наиболее значимые (“big three”) –  ${}^{233}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$  и  ${}^{239}\text{Pu}$ .

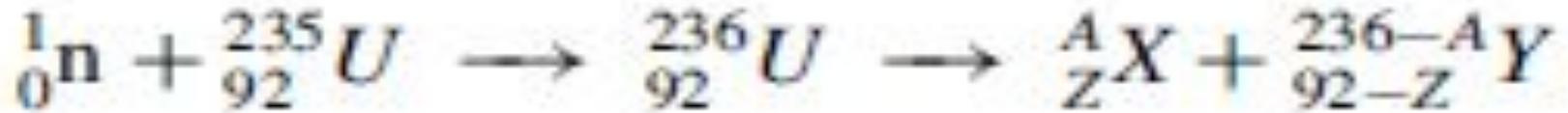
# Ядерная реакция деления

- Нейтроны с энергией до 1 eV – тепловые (медленные) нейтроны.
- Промежуточные нейтроны: 1 - 100 eV, реакция характеризуется большим резонансом.
- Нейтроны с энергией 100 eV -1 MeV: отсутствие резонанса.
- Нейтроны с энергией более 1 MeV – быстрые нейтроны, деление  $^{238}\text{U}$ .



Деление  $^{235}\text{U}$  нейтронами любой энергии,  
Деление  $^{238}\text{U}$  – нейтронами с энергией 1.4 MeV.

# Ядерная реакция деления



Наиболее вероятно – «ассиметричное» деление ( $A_{\text{heavy}}/A_{\text{light}} = 1.3 - 1.4$ ).

Образование 2-3 нейтронов.

При делении  ${}^{235}\text{U}$  количество энергии - 195 MeV.

При делении  ${}^{239}\text{Pu}$  - 202 MeV.

**1 г  ${}^{235}\text{U}$ : энергия = 1 MW.**

При сгорании 1 тонны ( $10^6$  г) угля - энергия = 0.36 MW.

# Продукты деления

- **Группа 1**, щелочные металлы - **Rb и Cs**. Долгоживущий  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30$  лет) – наиболее важный.  
Химия степени окисления +1.
- **Группа 2**, щелочноземельные металлы -  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{91}\text{Sr}$  (высокий выход).  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2} = 28$  лет) – наибольшая радиационная опасность в отработавшем топливе,  $^{140}\text{Ba}$  ( $T_{1/2} = 12,8$  дней) – в 10-100-дневный период.
- **Группа 3** – **Y** и лантаноиды (**La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd**).  
Химически подобны.
- **Группа 4** – **Zr**, химия состояния окисления +4.  $^{95}\text{Zr}$  ( $T_{1/2} = 63$  дня) – наиболее важный.
- **Группа 5** – изотоп  $^{95}\text{Nb}$  ( $T_{1/2} = 35$  дней) – дочерний изотоп  $^{95}\text{Zr}$ .

# Продукты деления

- **Группа 6** – изотоп  $^{99}\text{Mo}$  ( $T_{1/2} = 67$  часов), высокий выход, имеет значение в начальный период.
- **Группа 7** - долгоживущий ( $2.1 \cdot 10^5$  лет)  $^{99}\text{Tc}$ . Химия иона  $\text{TcO}_4^-$ .
- **Группы 8, 9, 10** – высокая активность. **Ru** – несколько степеней окисления.
- **Группа 11** - **Ag** (+1).
- **Группы 12 и 13** - **Zn, Ga, Cd, In** – малый выход и низкая активность.
- **Группы 14 и 15** - **Ge, As, Sn, Sb** – низкая активность.

# Продукты деления

- **Группа 16** – **Te** имеет значение в 30-100-дневный период. Наибольший интерес - 78-ч  $^{132}\text{Te}$  ( $T_{1/2} = 78$  часов), распадается до короткоживущего  $^{132}\text{I}$  (летуч).
- **Группа 17** - **Br и I**, короткоживущие, имеют значение в период работы АЭС и в аварийных ситуациях.
- **Группа 18**, инертные газы – изотопы **Kr и Xe**. Короткоживущие, быстро распадаются, неактивны.

# Энергетическая стратегия в Республике Беларусь

- Реализация проекта по строительству Белорусской атомной электростанции является **НОВЫМ ИМПУЛЬСОМ** в развитии экономики страны.

*М. Михадюк, заместитель министра энергетики*

**2007 г. – решение о строительстве  
Белорусской АЭС с мощностью 2400 МВт  
и реактором поколения 3 типа ВВЭР-1200  
(проект АЭС-2006)**

**«АЭС-2006» - эволюционный проект,  
созданный с учетом рекомендаций МАГАТЭ и  
ЕС, соответствующий «постфукусимским»  
требованиям безопасности.**



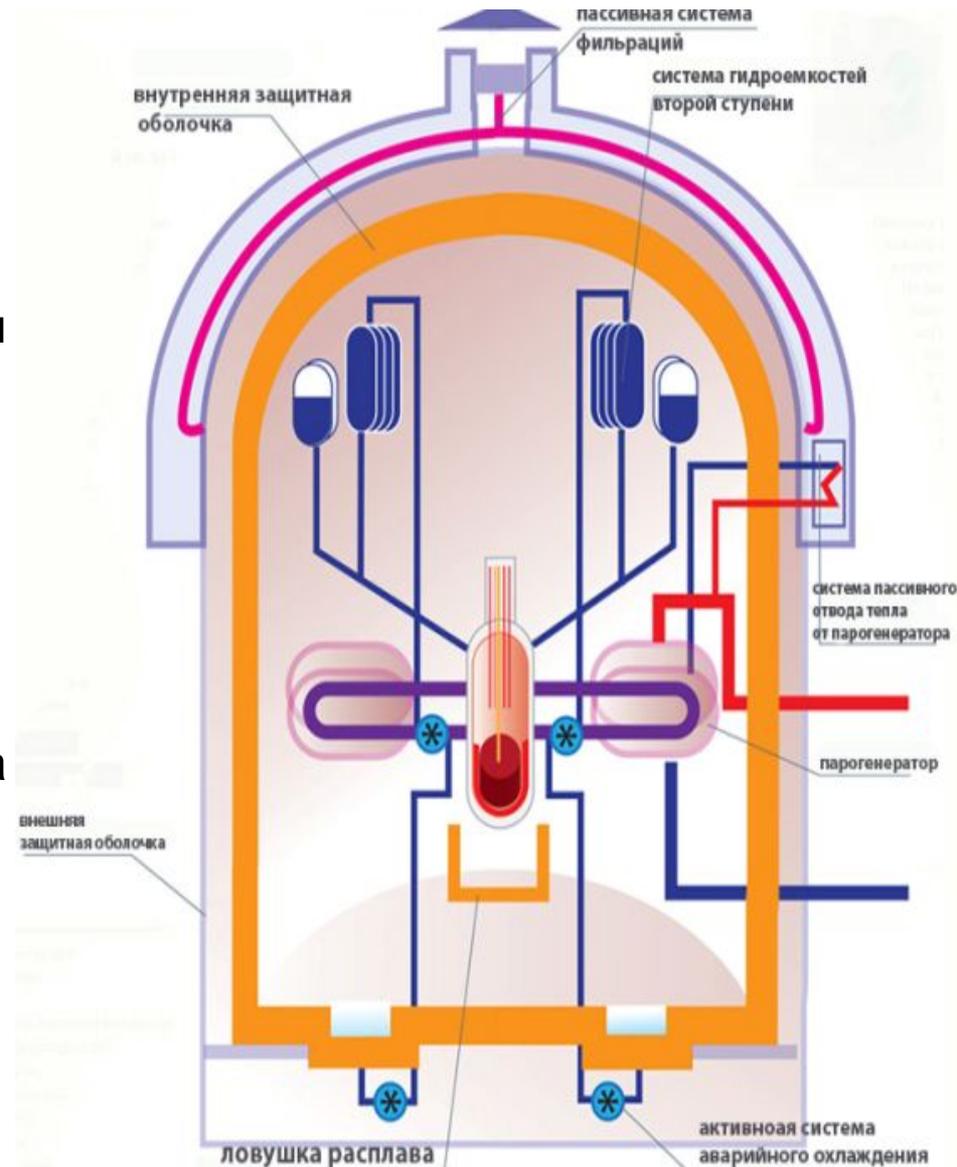
# Белорусская АЭС



- Доля АЭС в производстве электроэнергии – 25% мощности энергосистемы Беларуси.
- Строительство АЭС - экономия около 1 млрд. долларов на закупке газа в год.

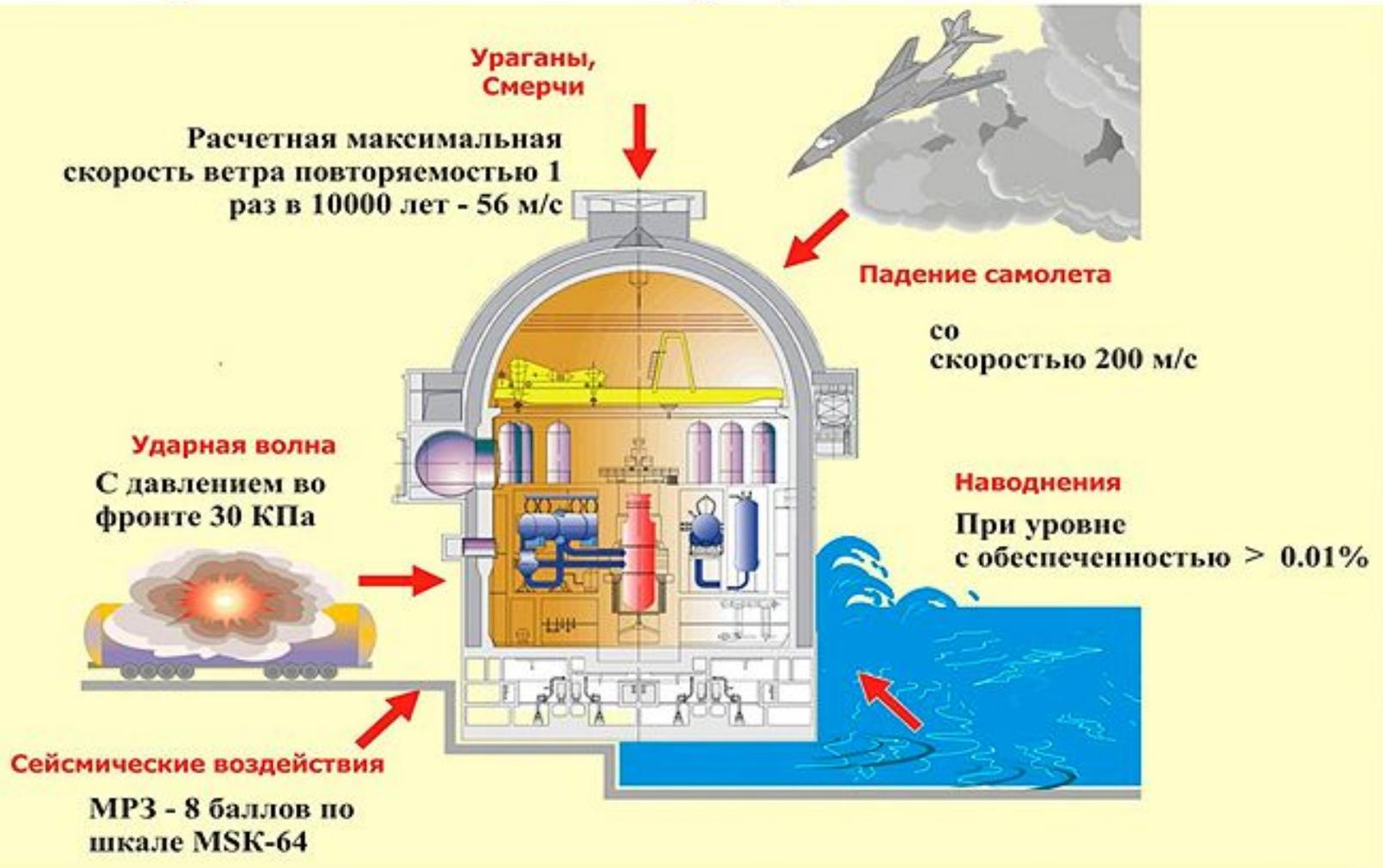
# Особенности проекта

- Двойная защитная оболочка реакторного зала.
- Дополнительные пассивные системы безопасности в сочетании с активными традиционными системами.
- «Ловушка» расплава активной зоны, расположенная под корпусом реактора.
- Увеличение срока службы энергоблока до 60 лет.
- Увеличение срока службы ядерного реактора за счёт ужесточения требований к химическому составу стали.



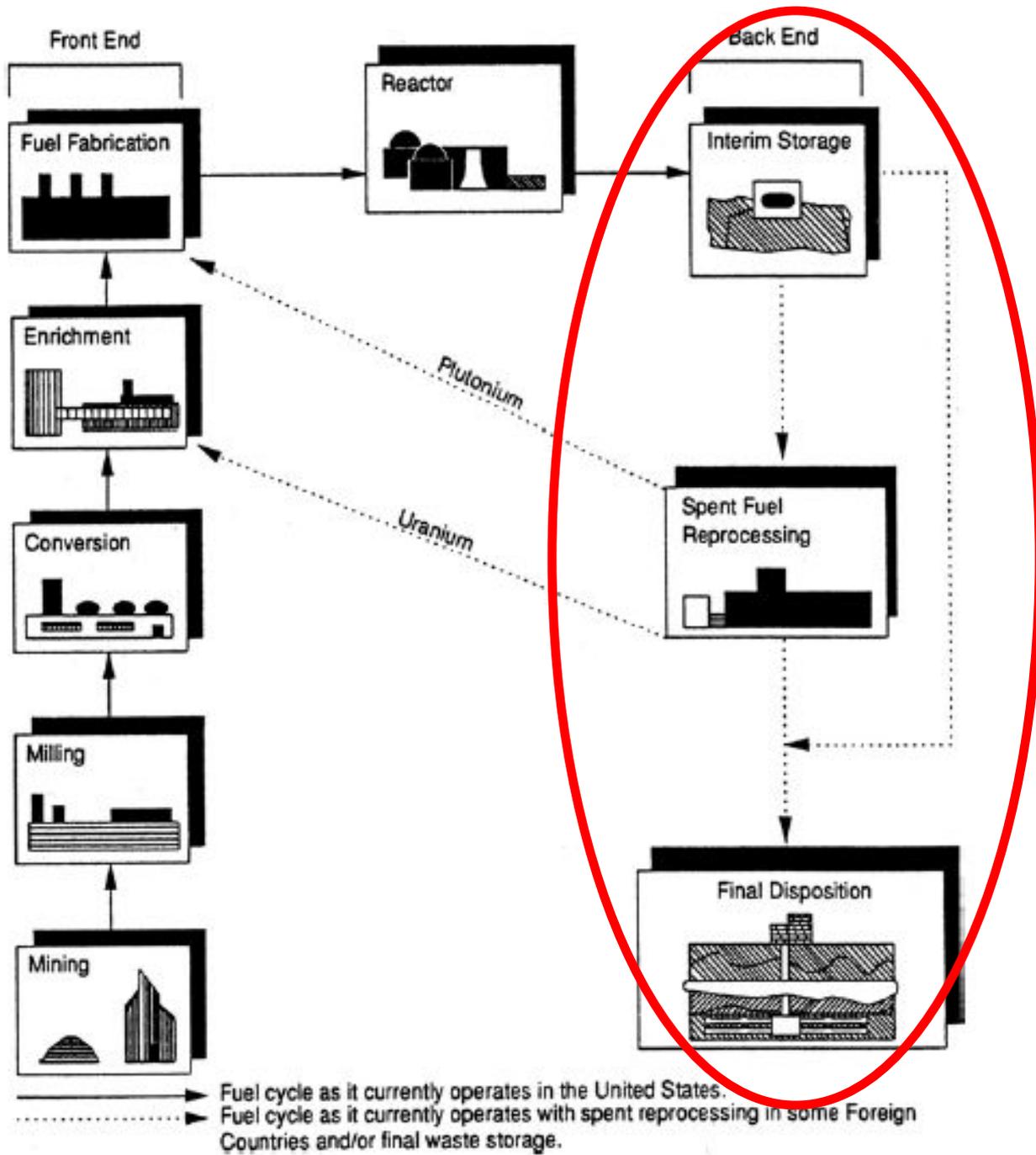
# Особенности проекта

## Усовершенствование локализующих систем безопасности



- **Сергей Бояркин, директор программ Госкорпорации «Росатом»:**  
«Повторение на Белорусской АЭС Чернобыльской катастрофы или аварии на японской Фукусиме абсолютно невозможно».
  
- **Александр Бычков, советник генерального директора ГК "Росатом», зам. Генерального директора МАГАТЭ (2010-2015 гг.):**  
«Беларусь выгодно отличается от других стран-новичков, развивающих атомную энергетику, является одной из передовых. Инфраструктура для реализации атомного проекта полностью отвечает всем требованиям МАГАТЭ и соответствует лучшим мировым стандартам».



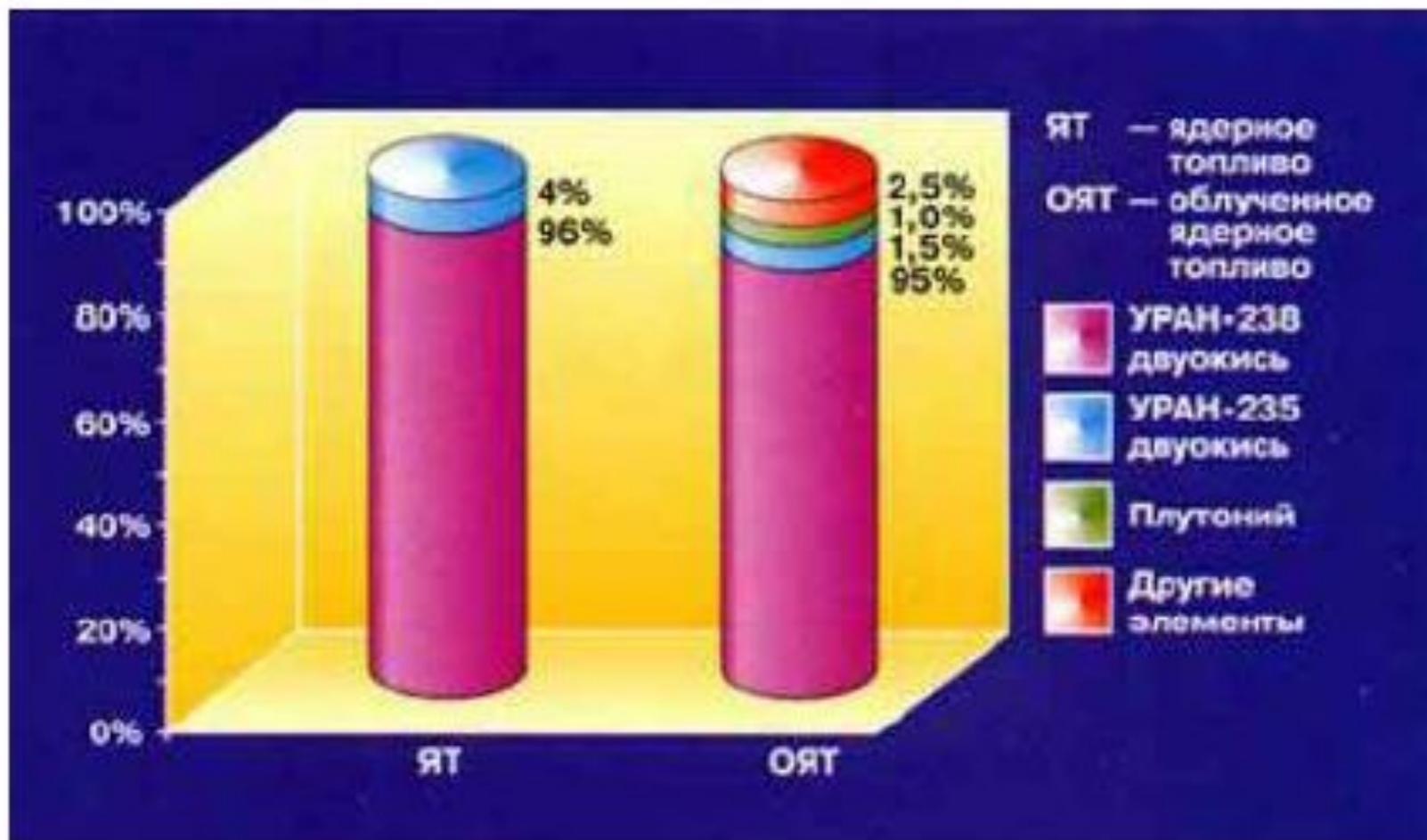


# Отработанное ядерное топливо

## Накопление ОЯТ в мире

Год	Количество образовавшегося ОЯТ (тонн)	Количество делящихся материалов в ОЯТ	
		Плутоний (тонн)	Уран-235 (тонн)
2000	200 000	1 500	2 200
2010	300 000	2 300	3 450
2025	550 000	4 000	6 000
2050	800 000	6 000	9 000

# ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СВЕЖЕГО И ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА



# Временное хранение ОЯТ

- Операция, обязательная для всех АЭС.
- Хранение в бассейне выдержки на АЭС в течение 5-10 лет для снижения тепловыделения и распада короткоживущих радионуклидов.
- Альтернатива: хранение на поверхности земли в бетонных или стальных контейнерах («сухие контейнеры»).



# Транспортировка ОЯТ

Вагон для перевозки ОЯТ по железной дороге



Выгрузка из железнодорожного вагона контейнера с ОЯТ на радиохимическом заводе



# Радиохимическая переработка ОЯТ

## Задачи:

- Получение урана и плутония для производства нового топлива;
- Получение делящихся материалов (урана и плутония) для производства ядерных боеприпасов;
- Получение разнообразных радиоизотопов, находящих применение в медицине, промышленности и науке;
- Получение доходов от других стран, которые либо заинтересованы в первом и втором, либо не хотят хранить у себя большие объемы ОЯТ;
- Решение экологических проблем, связанных с захоронением РАО.

# Радиохимическая переработка ОЯТ

## Основные стадии

- **Подготовка топлива** (освобождение его от конструкционных деталей сборок и разрушение защитных оболочек ТВЭЛОВ).
- **Перевод ЯТ в фазу**, из которой будет производиться химическая обработка: в раствор, расплав, газовую фазу.
- **Выделение и очистка ценных компонентов.**
- **Конечный продукт.**

# Радиохимическая переработка ОЯТ

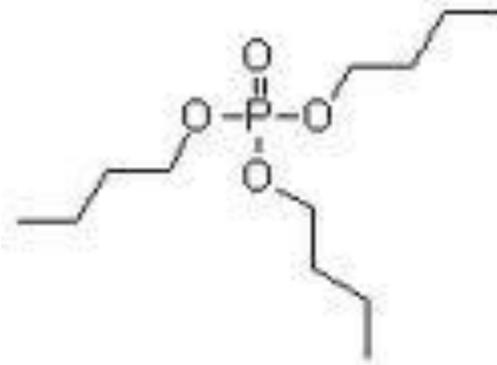
## Пурекс-процесс (PUREX)

Преимущества трибутилфосфата:

- Малая растворимость в воде,
- Отличная от воды плотность,
- Высокая точка кипения,
- Устойчивость к радиации и химическим реагентам,
- Легкая регенерируемость.

Недостатки трибутилфосфата:

- Дорог,
- Образование дибутилфосфорной, монобутилфосфорной кислоты и фосфорной кислот.



# Радиохимическая переработка ОЯТ

Очистка и выделение урана, плутония и нептуния

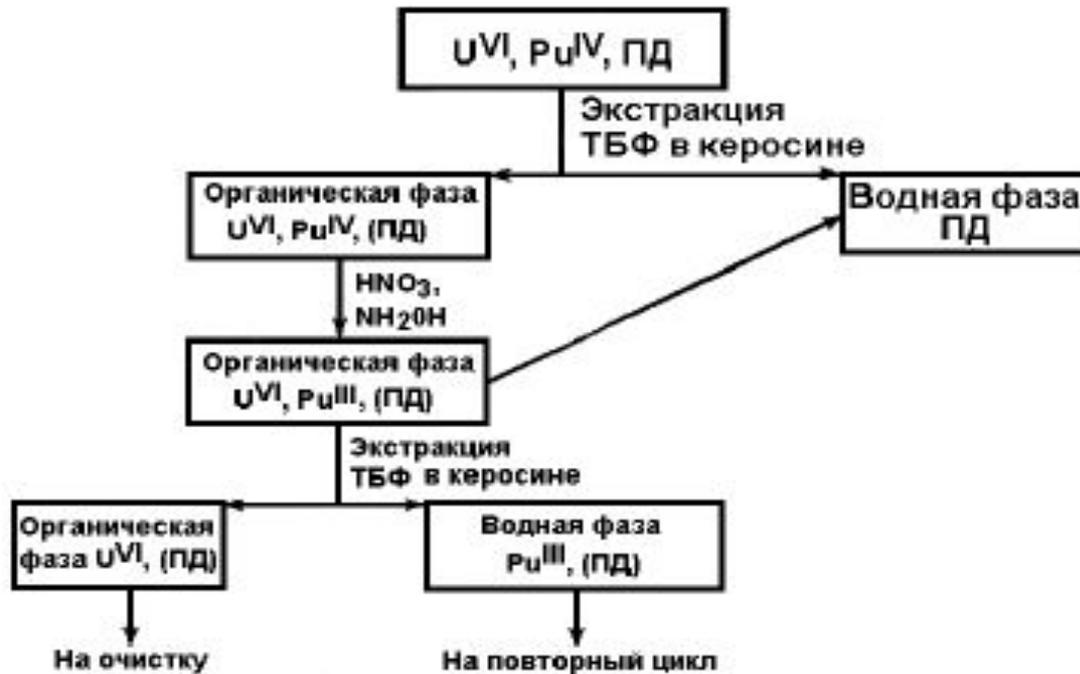
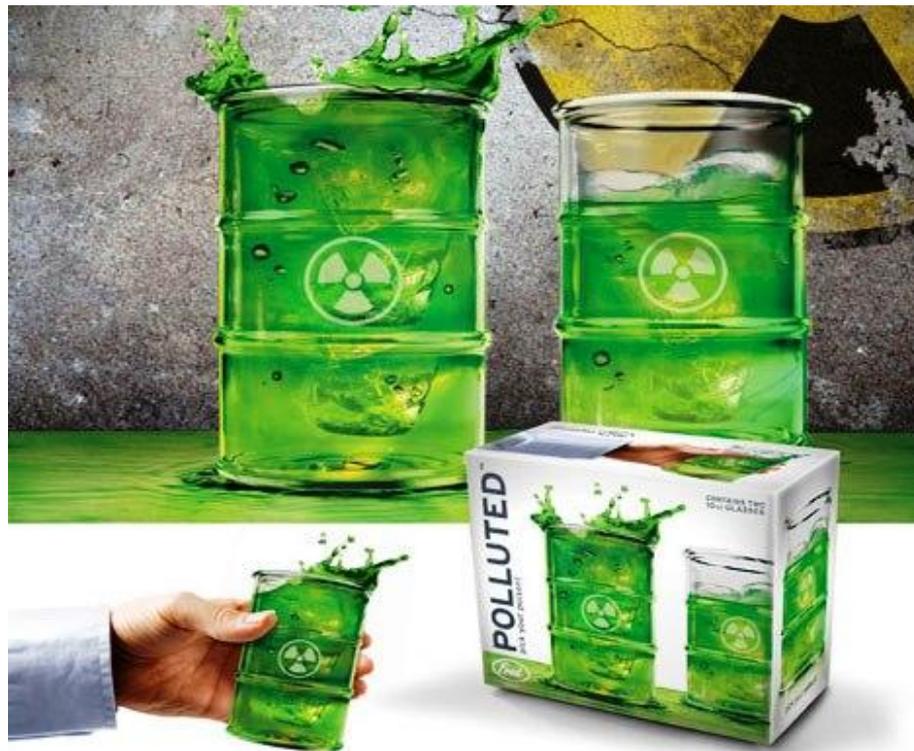


Схема пурекс-процесса

# РАО

Согласно «Закону об использовании атомной энергии» РФ (от 21 ноября 1995 года № 170-ФЗ) радиоактивные отходы – это ядерные материалы и радиоактивные вещества, дальнейшее использование которых не предусматривается.



# Классификация РАО

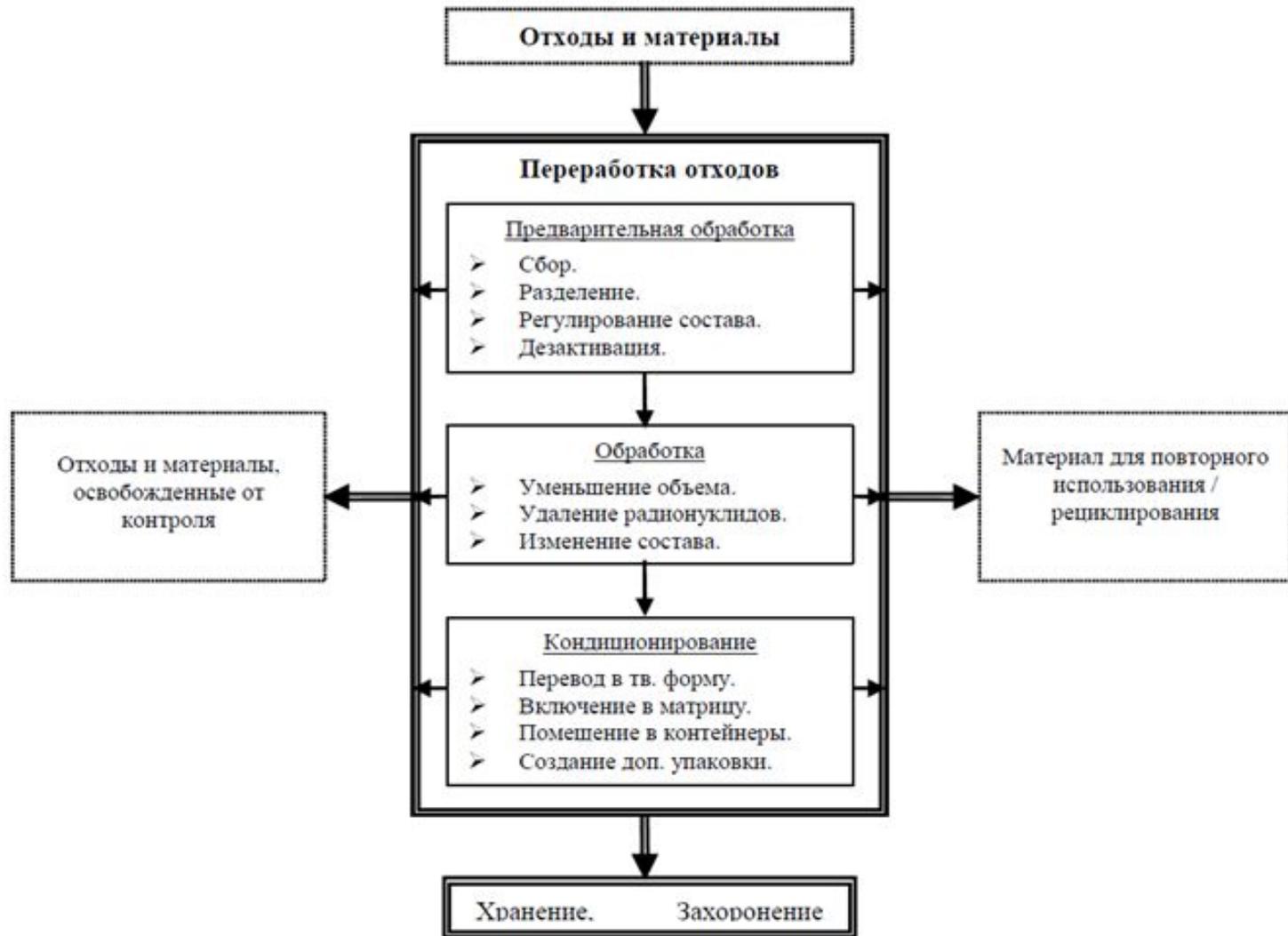
(согласно МАГАТЭ)

- **Отходы, освобожденные от контроля**  
(радиологическая опасность отходов незначительна). Уровни освобождения рассчитываются из условия, что при всех сценариях облучения индивидуальная доза не должна превышать 10 мкЗв в год.
- **Низко- и среднеактивные отходы**  
(необходимы меры для защиты персонала и населения).
- **Высокоактивные отходы**  
(в течение значительного периода времени необходима их надежная изоляция от биосферы).

# РАО

- **Низкоактивные отходы:** больницы, лаборатории, предприятия ядерного топливного цикла (бумага, ветошь, инструменты, одежда, фильтры и т.д.), 90% объема и 1% активности всех РАО.
- **Среднеактивные отходы:** отработанные ионообменные смолы, химические реагенты, загрязненные расходные материалы, 7% объема и 4% активности всех РАО.
- **Высокоактивные отходы:** 3% объема и 95% активности всех РАО.

# Схема обращения с РАО, предлагаемая МАГАТЭ



# Захоронение РАО

- **“Приповерхностное захоронение”** - захоронение в технических сооружениях на грунте, в траншеях глубиной несколько метров, в технических бетонных хранилищах типа “шахта”, в пустотах горных пород на глубине нескольких десятков метров.
- **“Захоронение в геологических формациях”** - захоронение на глубинах в несколько сотен метров.

# Глубинное захоронение

- Общепризнано (в том числе и МАГАТЭ),
- Изоляцию РАО от окружающей среды можно обеспечить путем захоронения в геологических формациях трех типов:
  - магматические и метаморфические породы;
  - глины;
  - каменные соли.

# Глубинное захоронение

- В Германии национальная комиссия по выбору площадки должна рекомендовать критерии отбора площадки, а также возможные альтернативы геологическому захоронению.
- США выбрали местом захоронения Юкка-Маунтин (штат Невада), однако данный проект встретил сильное противодействие.
- В Финляндии началось строительство глубокого геологического захоронения Onkalo.
- В Российской Федерации идет проектирование глубинного геологического хранилища в Красноярске.
- В Китае ведется строительство экспериментального туннеля на площадке Бейшан в рамках подготовки к сооружению первой подземной исследовательской установки по программе геологического захоронения.