

# **Радиоэкологические аспекты современной ядерной энергетики**

**С.И. Спиридонов**

**ФГБНУ ВНИИРАЭ**

# Приоритетное направление развития ЯЭ в РФ

разработка ядерных энерготехнологий нового поколения на базе реакторов на быстрых нейтронах и замыкании топливного цикла

- проект “Прорыв”

## Различные концепции:

- Двухкомпонентная концепция – вовлечение быстрых реакторов в систему с тепловыми реакторами  
Перспективные реакторы с натриевым теплоносителем БН-1200 – с учетом опыта эксплуатации БН-600 и БН-800
- Реакторы со свинцовым теплоносителем – БРЕСТ-300 (ОДЭК), в перспективе – БР-1200 (ПЭК)

# Ключевые технологические развилки

- выбор теплоносителя: Na или Pb
- выбор типа топлива: нитрид или оксид
- удаление долгоживущих высокоактивных отходов :  
трансмутация МА или надежная изоляция ДВАО
- способ замыкания топливного цикла:  
пристанционный (ПЯТЦ) или централизованный (ЦЯТЦ)

## На площадке СХК – ОДЭК

ПЯТЦ - БРЕСТ-300,  
модуль переработки ОЯТ,  
модуль фабрикации / рефабрикации



# Необходимость радиоэкологических оценок

- повышенное внимание общественности к радиационному фактору (6 тяжелых аварий за 60 лет развития ЯЭ)
- наличие альтернативных решений в развитии ЯЭ
- создание новых технологий (ОДЭК - опытно-демонстрационный ЭК)
- широкий перечень поступающих в ОС радионуклидов
- необходимость развития подходов к радиационной защите биоты

# Важные радиоэкологические задачи современной ЯЭ

- Р. э. обоснование планируемых ЯЭ-систем на основе сравнения обобщенных показателей
- Оценка р. э. эквивалентности захораниваемых ДВАО и радиоактивного сырья
- Сопоставление сценариев постулируемых тяжелых аварий с точки зрения последствий для биоты
- Оценка соблюдения дозовых квот для АЭС с перспективными реакторами

# **Методы р.э. оценок (разная степень детализации) определяется:**

## **- постановкой задачи**

**задачи “обоснования” планируемых объектов и ЯЭ-систем (альтернативные варианты, новые технологии)**

**“сопровождения” (соблюдение нормативов и дозовых квот, обеспечение возможности оценок непредвиденных ситуаций)**

**“управления” (ликвидация последствий загрязнения)**

## **- особенностями радиоэкологической ситуации**

**(острое или хроническое радиационное воздействие, уровни воздействия и т.д.)**

## **- возможностью информационного обеспечения**

# 1. Задача “сопровождения” - оценка соблюдения квоты на облучение населения для функционирующих АЭС

## Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций СП АС-03:

- газоаэрозольные выбросы и жидкие сбросы строящихся и проектируемых АЭС – по 50 мкЗв/год
- газоаэрозольные выбросы действующих АЭС – 200 мкЗв/год
- нижняя граница дозы облучения – 10 мкЗв/год
- контролируемые радионуклиды –  $^{131}\text{I}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , ИРГ

Возможна недооценка суммарной дозы !

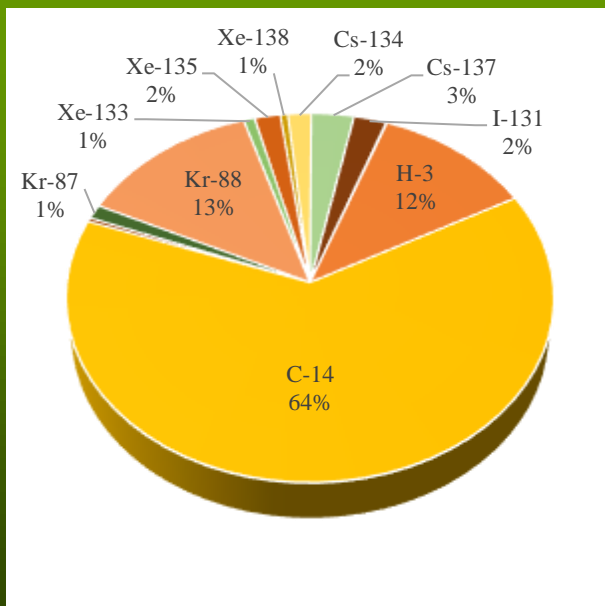
# Ранжирование р.н. по вкладам в дозовую нагрузку от газоаэрозольных выбросов перспективных реакторов

Исходные данные - планируемые выбросы

Унифицированный расчетный инструментарий – CROM (модели SRS-19)

Точечная (консервативная) оценка

## Оценки для ВВЭР-1200



Наибольшие вклады радионуклидов в суммарную дозу:

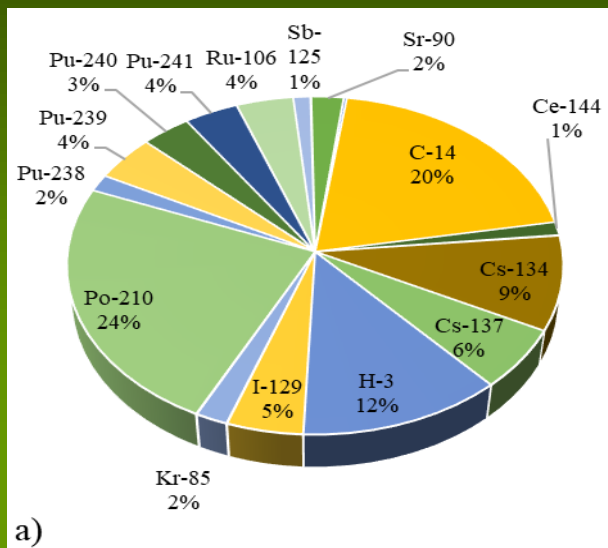
$^{14}\text{C}$  (64%),  $^{88}\text{Kr}$  (13%),  $^3\text{H}$  (12%),  $^{137}\text{Cs}$  (3%),  $^{131}\text{I}$  (2%)

Доля 4-х контролируемых р.н. в СП АС-03 ~ 6% (1-й год), ~ 8,6% (50-й год)

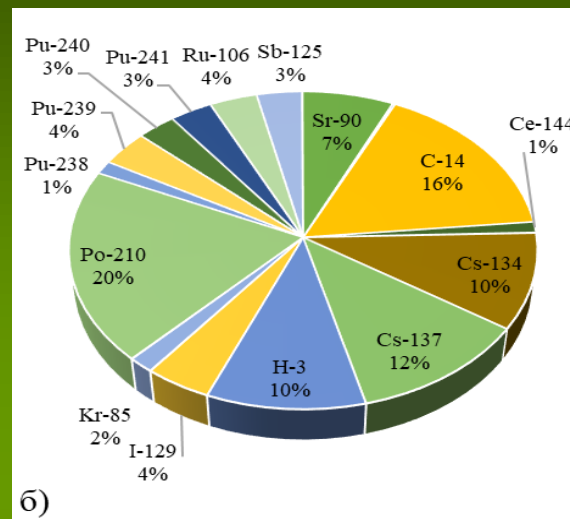


# Оценки для БРЕСТ-300 и предприятий ПЯТЦ (МП, МФ)

1-ый год



50-ый год



Наибольшие вклады в дозовую нагрузку от газоаэрозольных выбросов (1-ый год):  $^{210}\text{Po}$  (24%),  $^{14}\text{C}$  (20%),  $^3\text{H}$  (12%),  $^{134}\text{Cs}$  (9%) и  $^{137}\text{Cs}$  (6%)

Вклад 4-х контролируемых р.н. (СП АС) – 17% (1-ый год), 23% (50-ый год)

Основной источник облучения населения – потребление агропродукции

Методические указания по организации государственного РЭМ агроэкосистем в зоне воздействия РОО –  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$

## Выводы - 1

Контролируемые радионуклиды в перечне СП АС-03 не являются основными дозообразующими для АЭС с перспективными тепловыми и быстрыми реакторами

Полновесная оценка соблюдения квот на облучение населения возможна на основе данных РЭМ прилегающей к АЭС территории с учетом основных дозообразующих р.н.

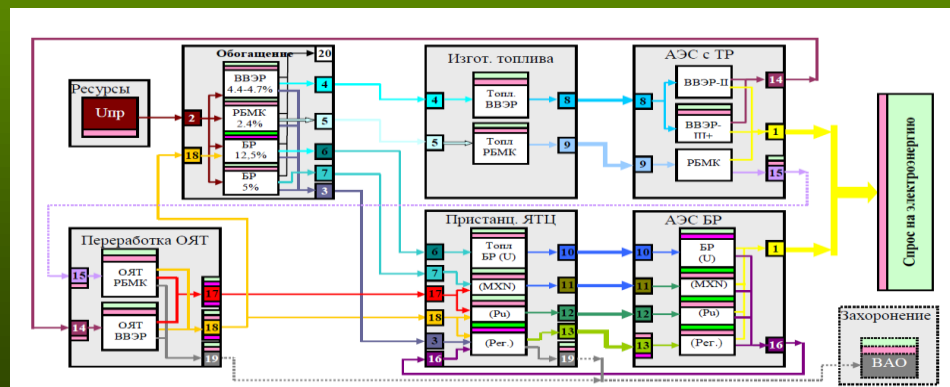
- сочетание расчетных и экспериментальных (проботбор, измерение) методов
- по результатам первичных расчетных оценок – программы РЭМ для конкретных ЯЭ-объектов

## 2. Задача радиоэкологического обоснования планируемых ЯЭ-систем

### Различные сценарии развития ЯЭ:

- реакторы – тепловые, быстрые (БН, БР)
- топливные циклы – открытый, замкнутый, двухкомпонентная система
- времена ввода и вывода из эксплуатации
- ПЯТЦ или ЦЯТЦ

### Системные исследования в обоснование развития ЯЭ на длительный период



Радиоэкологические показатели - ?

# Принцип интегральной сравнительной р.э. оценки ЯЭ-систем

Радиоэкологическая оценка ЯЭ-системы с учетом:

- совокупности объектов, входящих в состав ЯТЦ (от добычи сырья до захоронения отходов)
- жизненных циклов предприятий (до вывода из эксплуатации)
- штатного функционирования и постулируемых аварий (вероятность и р.э. последствия)
- потенциального воздействия не только на человека, но и на биоту

# Иерархия радиоэкологических показателей, характеризующих объекты в составе ЯЭ-систем

- удельные парциальные показатели - для отдельных радионуклидов с единичной выброшенной активностью
- *парциальные показатели* – для отдельных радионуклидов с учетом активности в составе выброса
- *обобщенные показатели* – для всех радионуклидов в составе выброса

Для каждого объекта – набор показателей :

- для нормализованных и аварийных выбросов (с учетом вероятности сценариев)
- для населения и биоты

**Р. э. сопоставление ЯЭ-систем – на основе совокупностей показателей для ЯЭ- объектов**

# Подходы к оценке обобщенных р.э. показателей

## Население - годовая коллективная доза

Основание – беспороговая концепция действия и.и. на человека

Унифицированный консервативный сценарий формирования дозовой нагрузки по всем путям облучения, включая производство и потребление агропродукции

## Биота – индекс радиационного воздействия для набора референтных организмов с учетом площади загрязнения

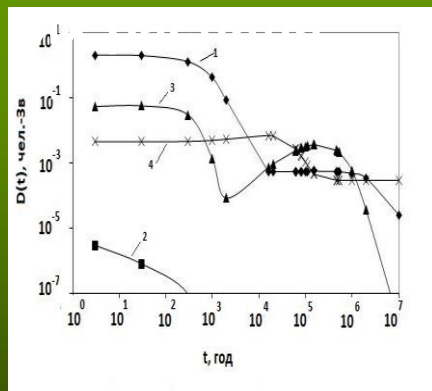
Основание – пороговый принцип действия и.и. на биоту  
Учет всех путей облучения

# Удельные показатели для актиноидов (население, разовый выброс)

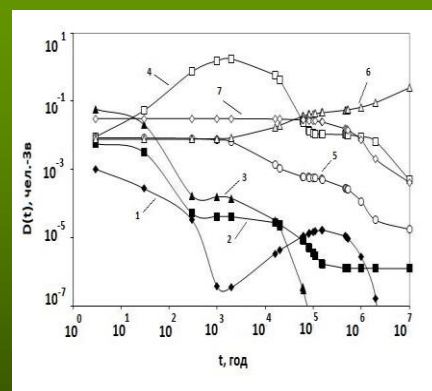
## Актиноиды:

- воздействуют длительное время
- источники альфа-излучения
- формируют радиоактивные цепочки
- объекты технологических операций в ЗТЦ (извлечение изотопов, трансмутация)

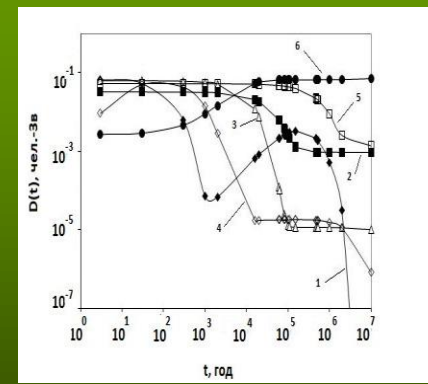
## Динамика годовых коллективных доз, формируемых актиноидами с начальными активностями 1 ТБк и продуктами



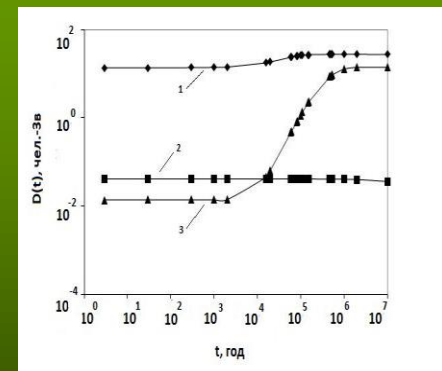
1 –  $^{241}\text{Am}$ , 2 –  $^{242}\text{Am}$ , 3 –  $^{242\text{m}}\text{Am}$ ,  
4 –  $^{243}\text{Am}$



1 –  $^{242}\text{Cm}$ , 2 –  $^{243}\text{Cm}$ , 3 –  $^{244}\text{Cm}$ ,  
4 –  $^{245}\text{Cm}$ , 5 –  $^{246}\text{Cm}$ , 6 –  $^{247}\text{Cm}$ ,  
7 –  $^{248}\text{Cm}$

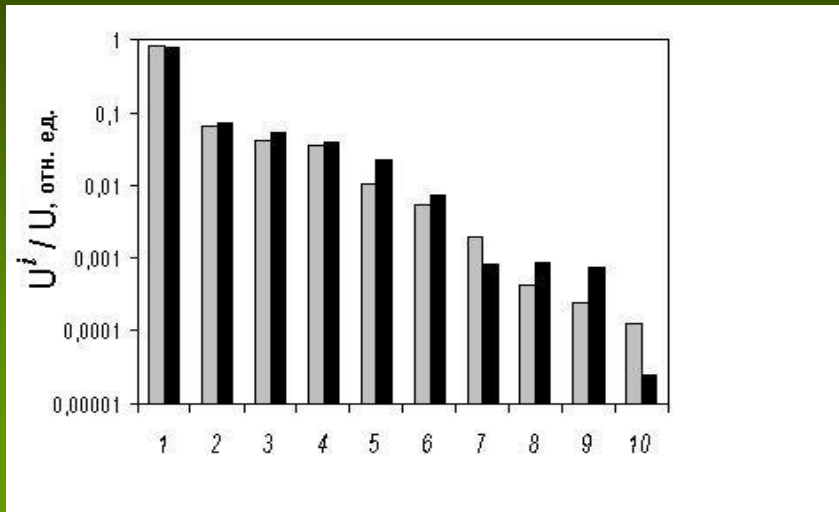


1 –  $^{238}\text{Pu}$ , 2 –  $^{239}\text{Pu}$ , 3 –  $^{240}\text{Pu}$ ,  
4 –  $^{241}\text{Pu}$ , 5 –  $^{242}\text{Pu}$ , 6 –  $^{244}\text{Pu}$



1 –  $^{235}\text{U}$ , 2 –  $^{236}\text{U}$ , 3 –  $^{238}\text{U}$

# Пример использования обобщенного показателя для актиноидов (биота, разовый выброс)



Вклады в показатель радиационного воздействия на биоту ( $U$ ) актиноидов в составе ОЯТ ВВЭР-1000 (□) и РБМК-1000 (■) через 300 лет после поступления в окружающую среду:  
1 –  $^{241}\text{Pu}$ , 2 –  $^{239}\text{Pu}$ , 3 –  $^{238}\text{Pu}$ , 4 –  $^{241}\text{Am}$ ,  
5 –  $^{240}\text{Pu}$  6 –  $^{243}\text{Am}$ , 7 –  $^{244}\text{Cm}$ , 8 –  $^{242}\text{Pu}$ ,  
9 –  $^{242\text{m}}\text{Am}$ , 10 –  $^{245}\text{Cm}$

## Выводы - 2

Для реализации принципа сравнительной р. э. оценки ЯЭ-систем - разработаны удельные показатели

Входная информация для расчетов – активности радионуклидов в выбросах ЯЭ-объектов (различные сценарии)



### 3. Захоронение долгоживущих отходов

**Проблема ДВАО – основная при условии соблюдения естественной безопасности ядерных установок проекта “Прорыв”**

**Особенности ЗТЦ с БР:**

- **рецикл делящихся материалов (извлечение ДМ из ОЯТ)**
- **извлечение и трансмутация долгоживущих радионуклидов с целью снижения активности**
  - **отличие от подходов к обращению с отходами перед захоронением (Нормы МАГАТЭ, 2010): “выдерживание и распад”, “концентрация и локализация”, “разбавление и рассеяние”**

## Изначальный постулат радиационно-эквивалентного захоронения отходов

- максимальное приближение к балансу в системе “ДВАО-сырье”:  
ПБО захораниваемых отходов = ПБО радиоактивного сырья

## Эволюция концепции радиационно-миграционной эквивалентности

ПБО – умножение активностей радионуклидов на дозовые коэффициенты для перорального пути поступления (Зв/Бк)

Активность отдельных радионуклидов модифицируется с использованием коэффициентов:

- радиационного
- миграционного

## Концепция радиоэкологической эквивалентности

- сопоставление дозовых нагрузок на человека (и биоту) - от ДВАО и эквивалентного количества природного урана
- учет всех путей облучения

### При расчетах учитывается:

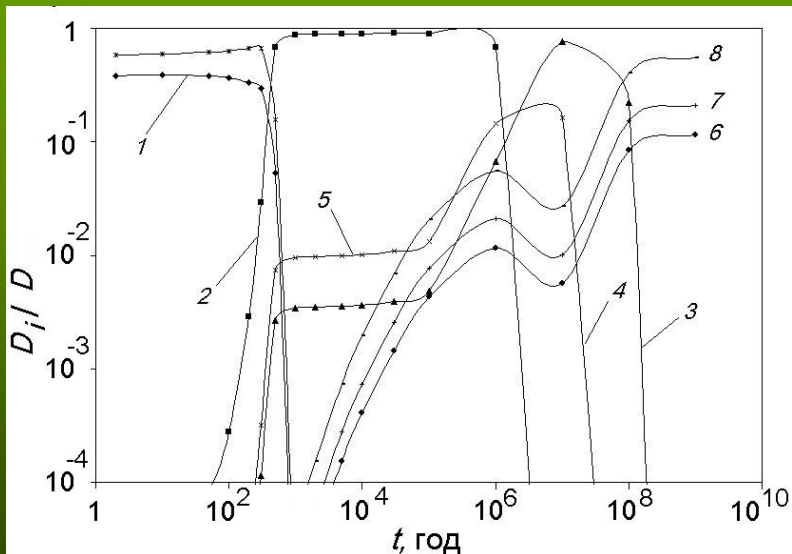
- способность радионуклидов к миграции из мест захоронения к поверхности почвы
- накопление радионуклидов в компонентах экосистем и пищевой продукции
- формирование доз внутреннего и внешнего облучения

# Оценки для ОЯТ реактора БРЕСТ-ОД-300 (приоритет - оценки для человека)

Исходные условия - планируемые варианты переработки ОЯТ :

- извлечение ДМ и МА для трансмутации,
- различные времена выдержки ОЯТ

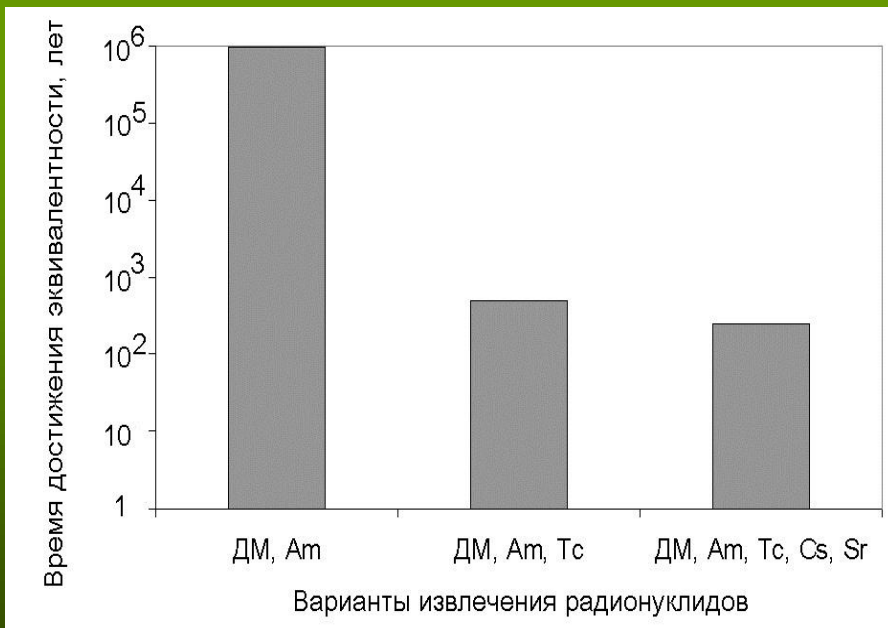
Статический подход - на основе коэффициентов, отражающих способность перемещения в геосредах



Вклады  $^{90}\text{Sr}$  (1),  $^{99}\text{Tc}$  (2),  $^{129}\text{I}$  (3),  $^{135}\text{Cs}$  (4),  $^{137}\text{Cs}$  (5),  $^{210}\text{Pb}+^{210}\text{Bi}$  (6),  $^{210}\text{Po}$  (7),  $^{226}\text{Ra}+\dots^{214}\text{Po}$  (8) в дозовую нагрузку на человека при извлечении ДМ и америция с остаточным содержанием 0,1% от их исходного содержания в ОЯТ и выдержке 1 год

## По результатам применения стат. подхода :

- без извлечения ПД нельзя достичь р.э. эквивалентности в период времени 300-500 лет при выделении только ДМ и Am
- наиболее значимый ПД –  $^{99}\text{Tc}$
- основные “регуляторы” Tc и Am, дополнительные “регуляторы” – Cs и Sr



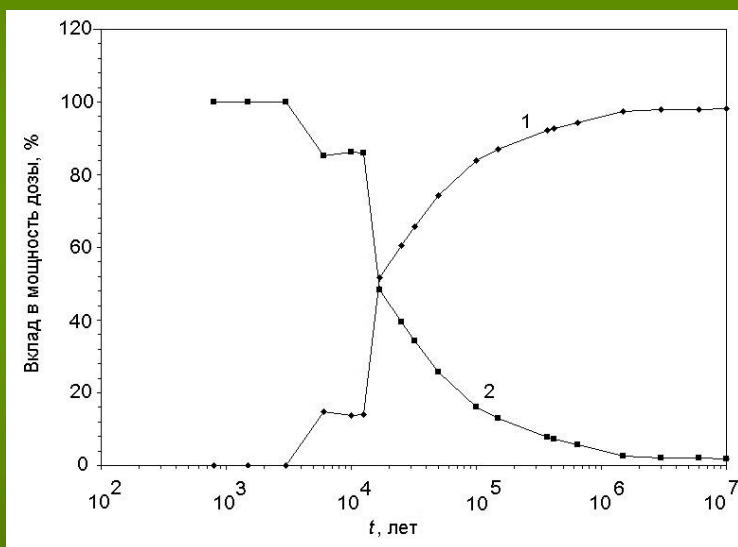
Время достижения радиоэкологической эквивалентности при различных вариантах переработки ОЯТ:

- извлечении делящихся материалов и Am с остатками 0,1% и 10% соответственно (вариант 1);
- дополнительном к варианту 1 выделении Tc с остатком 1% (вариант 2);
- дополнительном к варианту 2 выделении Cs и Sr с остатками 1% (вариант 3)

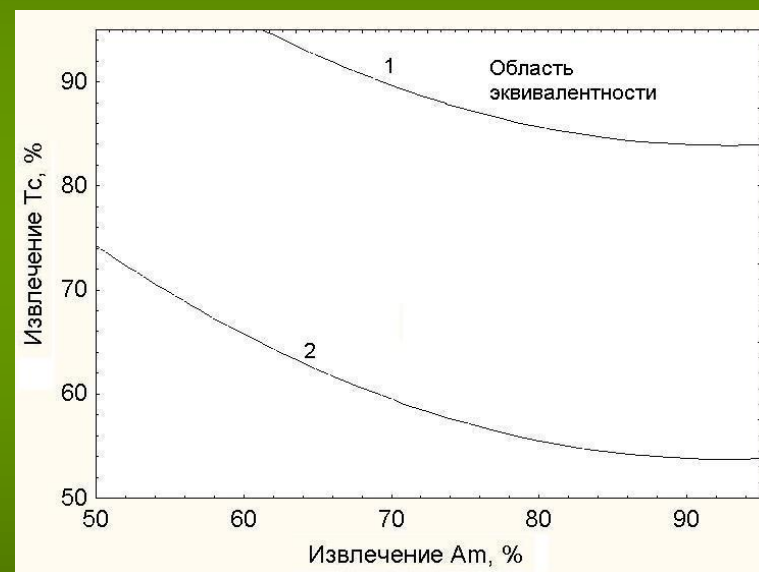
# Оценки для ОЯТ реактора БРЕСТ-ОД-300

**Динамический подход** - различия во временах достижения радионуклидами земной поверхности

**Сценарий** - конвективный перенос из могильника



Вклад актиноидов (1) и продуктов деления (2) в составе ОЯТ в суммарную дозовую нагрузку на население



Параметры извлечения Tс и Am из ОЯТ, обеспечивающие достижение р.э. эквивалентности на всем возможном временном диапазоне (1)  
Извлечение ДМ – 99,9%

## Основные выводы - 3:

- преимущество динамического подхода – учитывается время “включения в дозообразование” ПД, актиноидов и дочерних радионуклидов;  
недостаток – неопределенность сценария миграции в геосредах
- ПБО актиноидов формируется опосредовано – за счет дочерних радионуклидов
- ПБО ПД превышает ПБО актиноидов в течение длительного времени; основной ПД -  $^{99}\text{Tc}$
- $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  не оказывают заметного влияния на достижение эквивалентности в силу небольшого периода полураспада (глубинное захоронение)
- **выбор оптимальных параметров переработки ОЯТ зависит от совокупности технологических и экономических факторов**

## **4. Радиоэкологическое сопоставление постулируемых аварийных сценариев (для биоты)**

**Работа ЯЭ-объектов в штатном режиме представляется безопасной (при условии соблюдения нормативов и дозовых квот)**

**Проект “Прорыв” – решается основная проблема безопасности АЭС – исключение тяжелых аварий**

**Зарубежные АЭС - разрабатываются сценарии тяжелых аварий для реакторов нового поколения (например EPR-1600 – ввод в эксплуатацию в 2020 г.)**

**Вопросы, связанные с оценками для биоты, проработаны в меньшей степени, по сравнению с человеком**



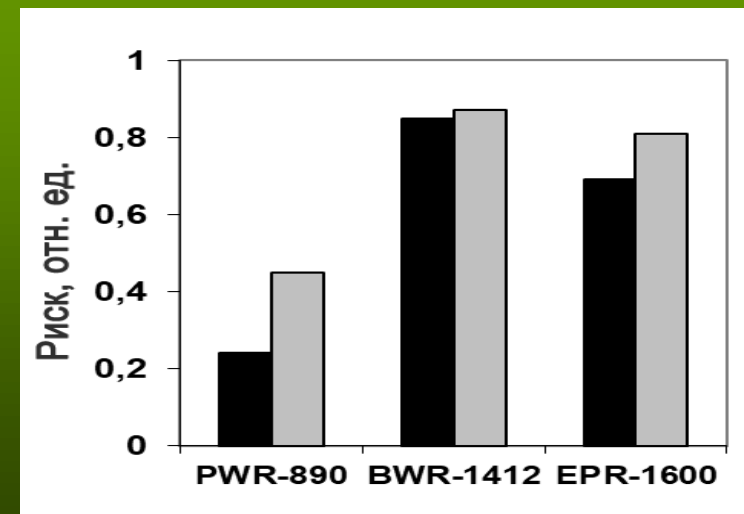
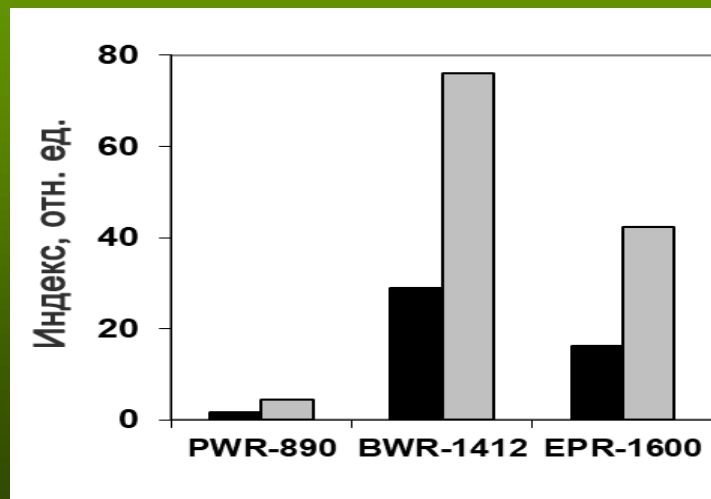
# Сравнительная р.э. оценка сценариев тяжелых аварий для природных сообществ

Исходные данные – сценарии запроектных аварий на реакторах PWR-890, BWR-1412, EPR-1600

Референтный природный объект – древесный ярус соснового леса

Период оценки – 1 год

На выходе - индексы радиационного воздействия и риски превышения критериев LD100 (■) и LD50 (□) на территории радиоактивного следа



# Выводы – 4

## Задача обоснования :

(сопоставление постулируемых сценариев - “р. э. рейтинг”)

- разработаны подходы к решению

## Задача прогнозирования:

### Проблема критериев

- для прогнозирования последствий аварийных выбросов необходимы критерии риска для биоты с учетом динамики дозовых нагрузок (острое и, в дальнейшем, пролонгированное облучение)

### При высоких уровнях загрязнения

- необходим прогноз развития природных сообществ с учетом вторичных экологических эффектов и восстановления

# Резюме

## Этап планирования и разработки:

целесообразна сравнительная оценка ЯЭ-объектов на основе обобщенных р.э. показателей

р.э. сопоставление и обоснование ЯЭ-систем с использованием

- принципа интегральной р. э. оценки
- и концепции р.э. эквивалентности

## Этап функционирования:

совершенствование нормативной и методической документации

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**