ПРОРЫВ
РОСАТОМ

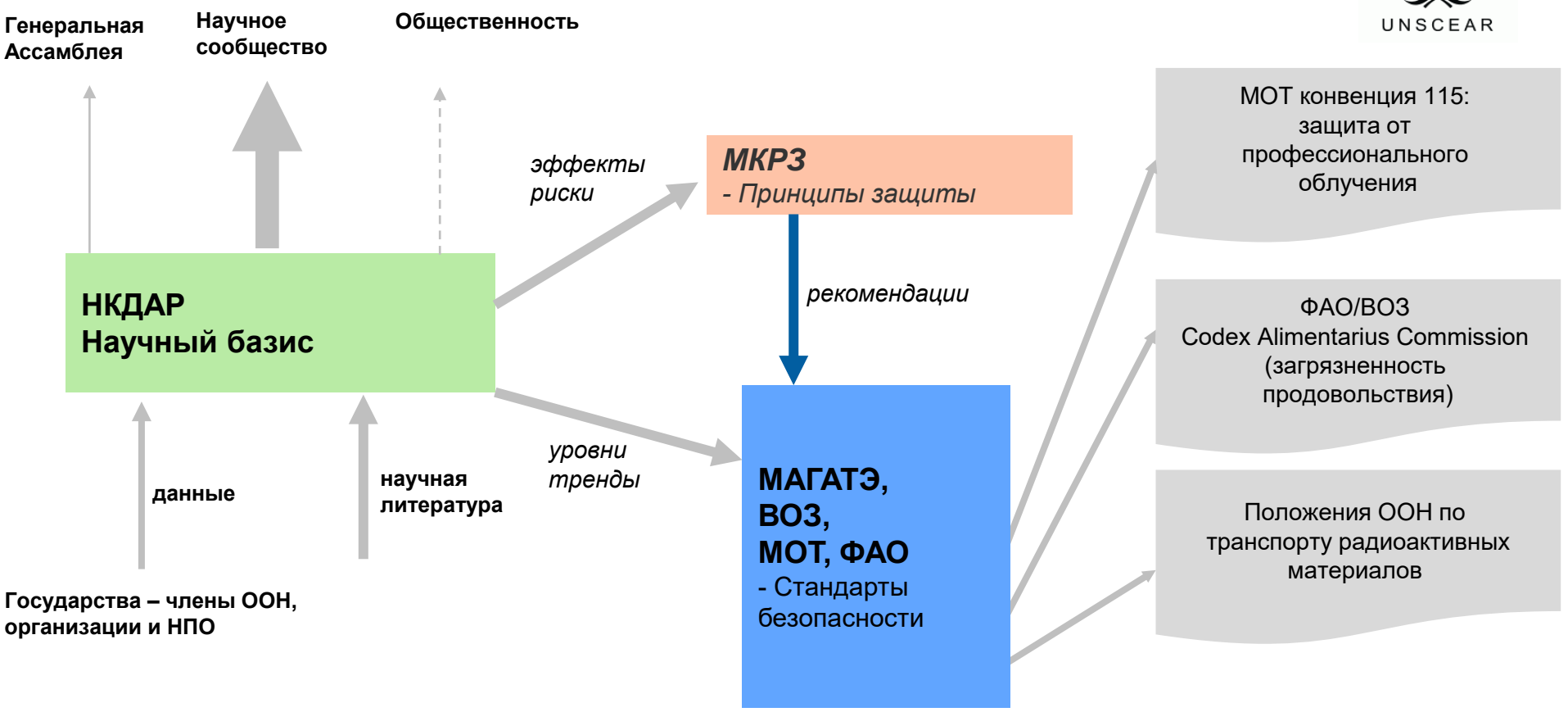
Радиологические преимущества ЗЯТЦ на базе РБН с учетом действующих стандартов МАГАТЭ по радиационной безопасности и практической реализации эффекта выравнивания онкотоксичности РАО и природного уранового сырья

Совместное заседание Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС» и Секции «Энергетические системы и объекты энергетики» Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы»

Соломатин Владимир Михайлович
Начальник отдела Главного радиоэколога ПН «Прорыв»,
канд. биол. наук

Нормативное регулирование

Функциональная среда



Международные требования

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Основополагающие принципы безопасности МАГАТЭ

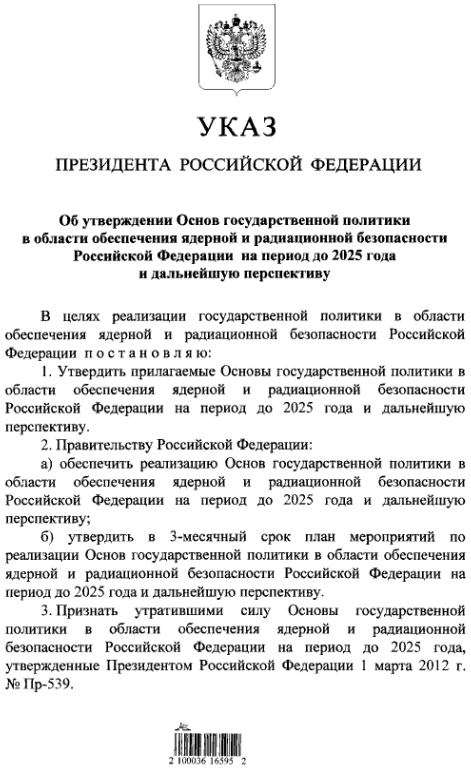
Принцип 7. Защита нынешнего и будущих поколений

Нынешние и будущие население и окружающая среда должны быть защищены от радиационных рисков.

Публикация 103 МКРЗ

(157) … Дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облученных индивидуумов.

Российское законодательство



УКАЗ

ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу

В целях реализации государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации п о с т а н о в л я ю:

1. Утвердить прилагаемые Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу.

2. Правительству Российской Федерации:

а) обеспечить реализацию Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу;

б) утвердить в 3-месячный срок план мероприятий по реализации Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу.

3. Признать утратившими силу Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденные Президентом Российской Федерации 1 марта 2012 г. № Пр-539.

12. Задачами в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности являются:

а) защита в соответствии с **принципом приемлемого риска…**, снижение риска отдаленных последствий техногенного радиационного облучения для здоровья человека…

Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование Российской Федерации

Государственные санитарно-эпидемиологические правила и нормативы

2.6.1. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)

Санитарные правила и нормативы

СанПиН 2.6.1.2523 – 09

ИЗДАНИЕ ОФИЦИАЛЬНОЕ

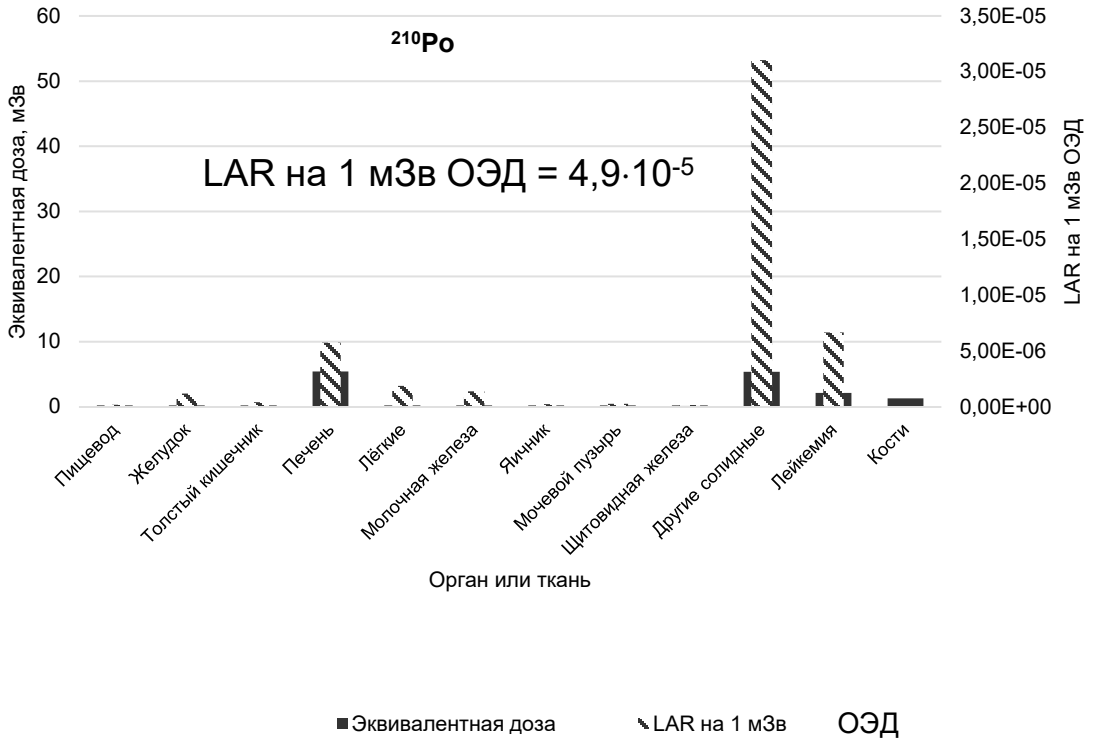
МОСКВА 2009

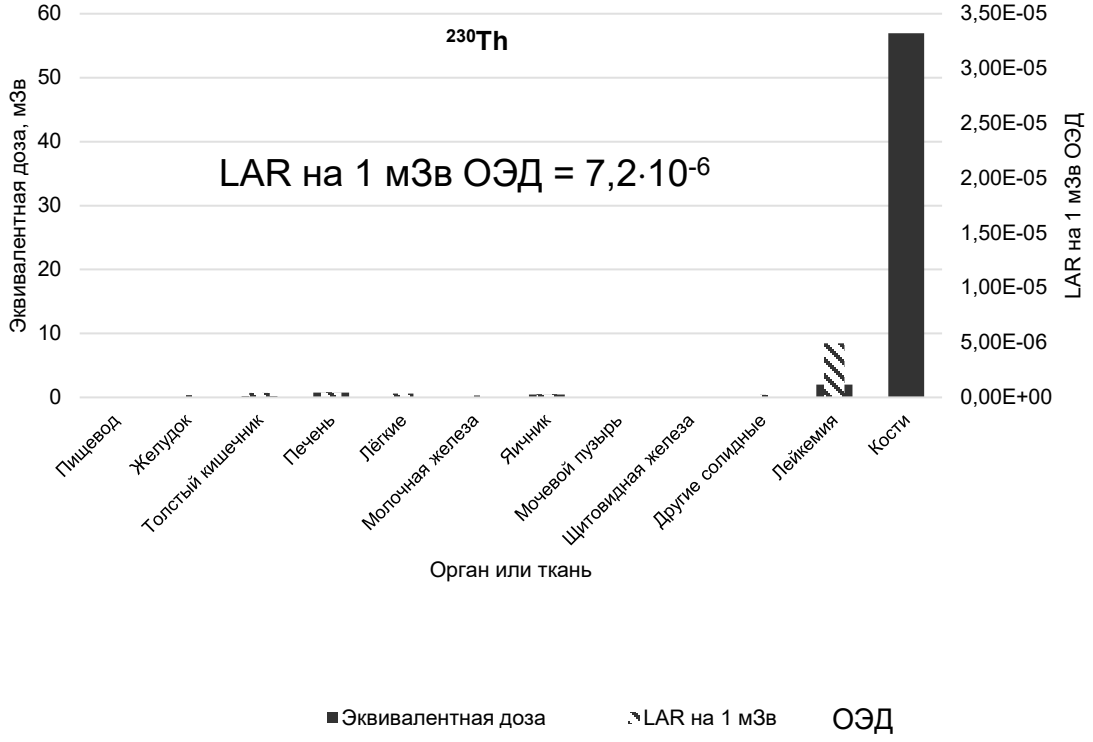
«2.3 В условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года устанавливаются исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска:

- для персонала – $1{,}0\times10^{-3}$;
- для населения – $5{,}0\times10^{-5}$.

Уровень пренебрежимо малого риска составляет 10^{-6} .

Пожизненный обусловленный риск (LAR)



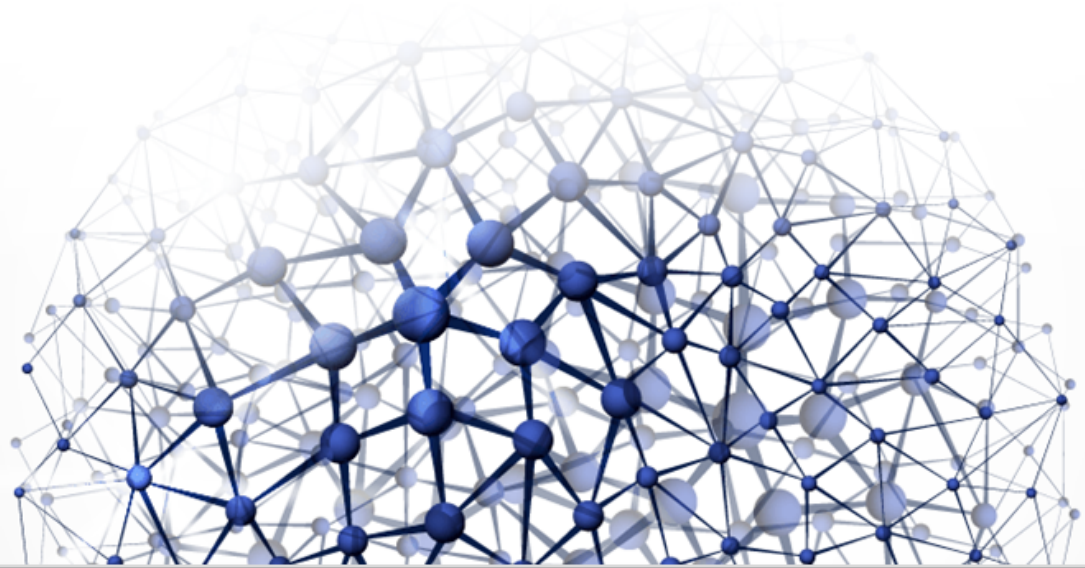


Радэквивалентности РАО

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Радиационная эквивалентность

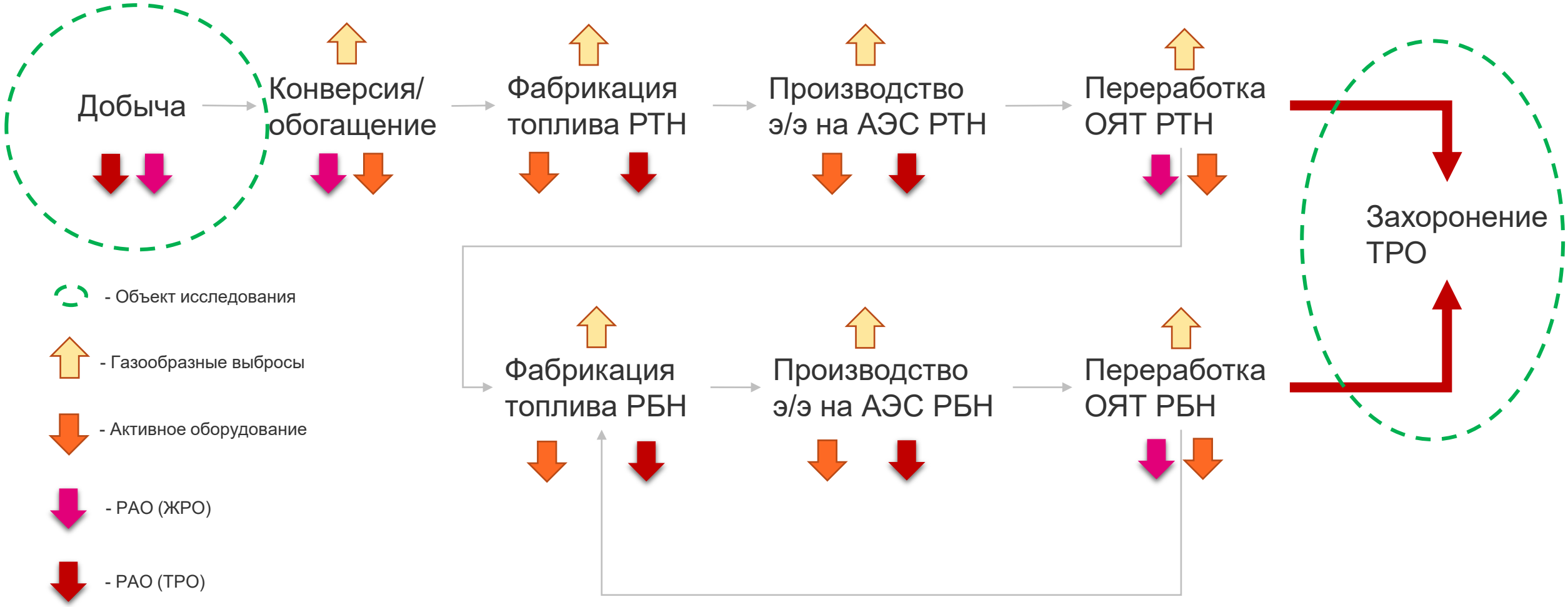
Выравнивание потенциальной биологической опасности РАО и природного уранового сырья за счет замыкания топливного цикла с трансмутацией минорных актинидов



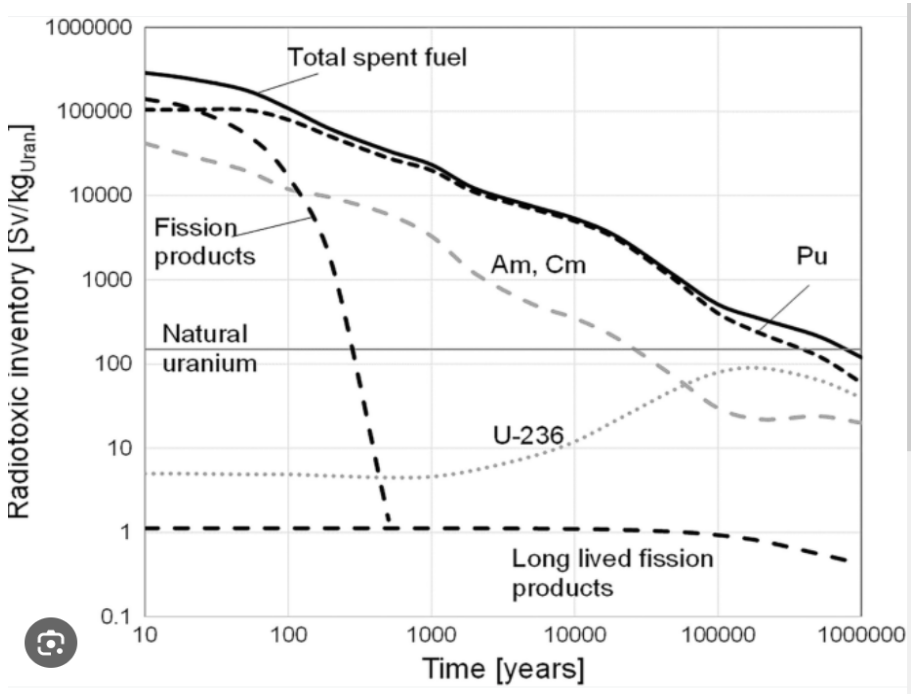
Объект исследования

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

ЗЯТЦ двухкомпонентной ЯЭ



Примеры из зарубежной литературы



Название: The fourth generation of nuclear reactors Fundamentals, Types, and Benefits Explained, 2022

https://media.springernature.com/full/springer-static/cover-hires/book/978-3-662-64919-0?as=webp

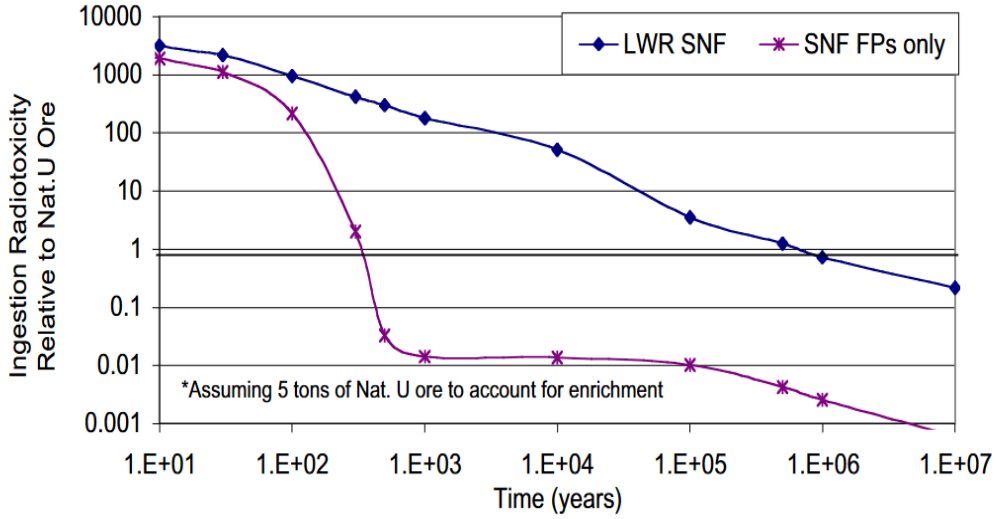


Fig. 1-1. High-Level Waste Ingestion Radiotoxicity Relative to Natural Uranium Ore

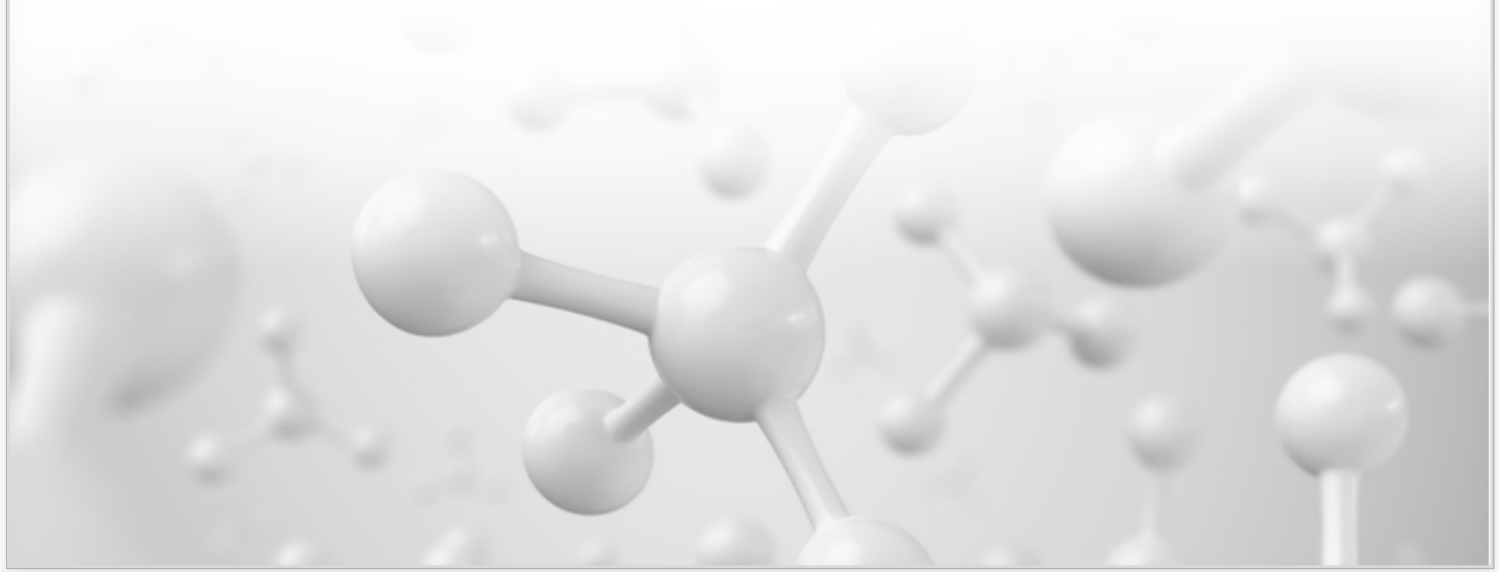
Название: Reduction of the Radiotoxicity of Spent Nuclear Fuel Using a Two-Tiered System Comprising Light Water Reactors and Accelerator-Driven Systems

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/068/34068238.pdf

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Радиологическая эквивалентность

Выравнивание пожизненных радиационно обусловленных рисков потенциальной индукции онкологических заболеваний РАО и природного уранового сырья с учетом динамики эквивалентных (органных) доз облучения



Развитие показателей оценки радэквивалентности

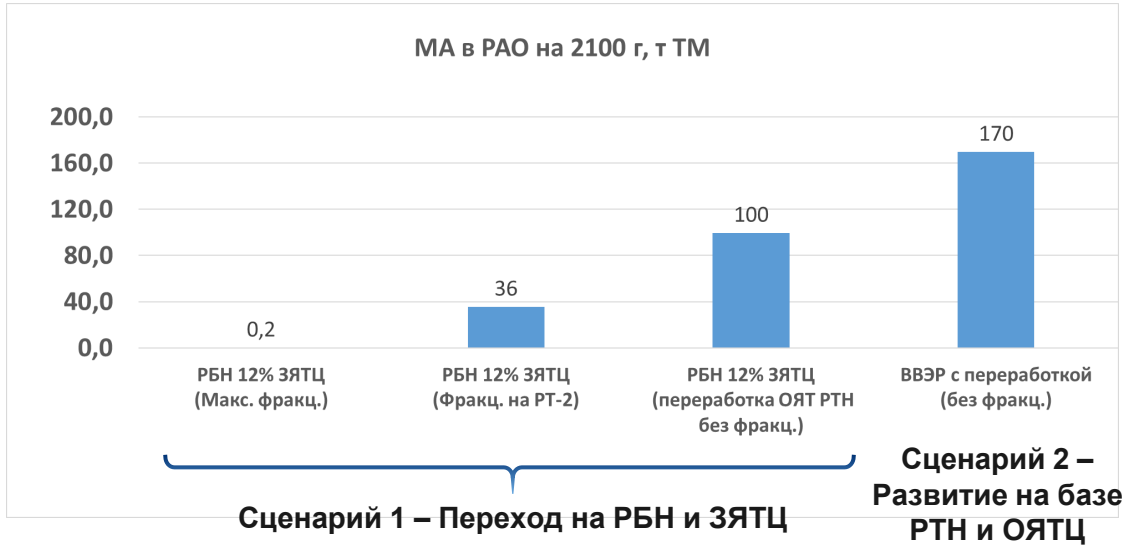
ПРОРЫВ
РОСАТОМ

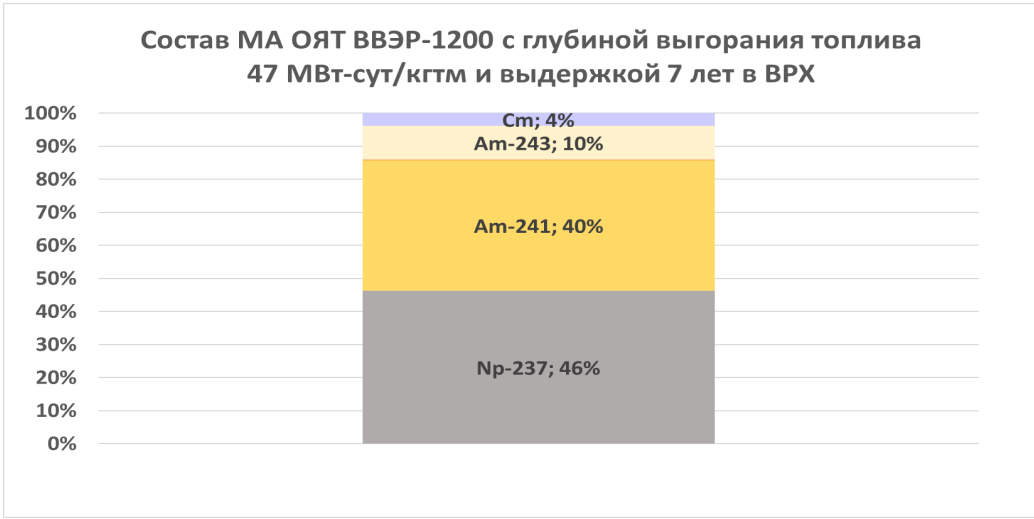
Название	Описание	Расчет
Радиационная эквивалентность	Выравнивание потенциальной биологической опасности РАО и природного уранового сырья за счет замыкания топливного цикла с трансмутацией минорных актинидов	ПБО = A_i * D_i (Зв), где A_i – активность i-го радионуклида, Бк; D_i – дозовый коэффициент i-го радионуклида, Зв/Бк
Радиационно-миграционная эквивалентность	Выравнивание потенциальной биологической опасности РАО и природного уранового сырья за счет замыкания топливного цикла с трансмутацией минорных актинидов с учетом диффузии радионуклидов к биосфере	$A_{уд} \cong \frac{Q}{M \cdot K_d}$, где $A_{уд}$ – объемная активность радионуклида в воде, Бк/л; Q – активность радионуклида в массе породы M, Бк; M – масса загрязненной радионуклидами горной породы, кг; K_d – коэффициент распределения радионуклида между твердой и жидкой фазой, л/кг; $ОЭД = \sum_i A_{уд} \cdot D_i \cdot 2 \cdot 365$ D_i – дозовый коэффициент при потреблении i-го радионуклида с водой, мкЗв/Бк;
Радиологическая эквивалентность	Выравнивание пожизненных радиационно обусловленных рисков потенциальной индукции онкологических заболеваний РАО и природного уранового сырья с учетом динамики эквивалентных (органных) доз облучения	$$LAR(s,e,H_T) = \sum_{a=e}^{100} \left[EAR\left(s,e,a,H_T\right) \cdot S_T\left(e,a\right) \right],$$ где s – пол; e – возраст при облучении; H_T – эквивалентная доза в органе или ткани T; EAR – избыточный абсолютный риск смерти в возрасте a при облучении ткани T дозой H_T в возрасте e для лиц пола s; S_T – функция здорового дожития (без ЗНО с локализацией в T) от возраста e до возраста a.

Проблема МА

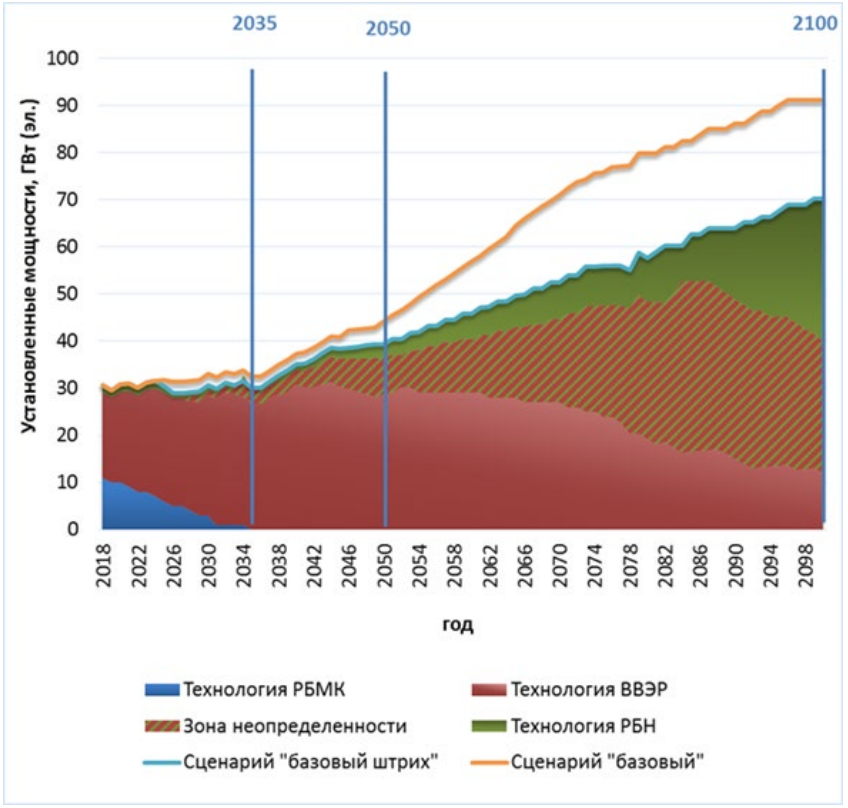
- 35-170 т ТМ МА может быть накоплено к 2100 г. в РАО из-за отложенных решений по внедрению технологий фракционирования.
- Захоронение РАО с относительно большим количеством МА гарантированно приведет к необходимости строительства контролируемого хранилища и пункта глубинного захоронения отходов.
- **Достижение радиационной эквивалентности РАО в приемлемые сроки (100-300 лет) с содержанием МА в сценариях с отсутствием или неполным фракционированием МА невозможно.**

	$T_{1/2}$	Тепловы деление, ватт/кг	k_d, л/кг	Крит. масса	ДК взрослые Зв/Бк
Np-237	$2{,}14*10^6$	Незначит ельное	5	56	1.10E-07
Am-241	433,6 (Np-237)	114	1900	60	2.00E-07
Pu-239	24,119	1,9	550	13	2.50E-07
U-235	$7{,}04*10^8$	Незначит ельное	35	53	4.70E-08

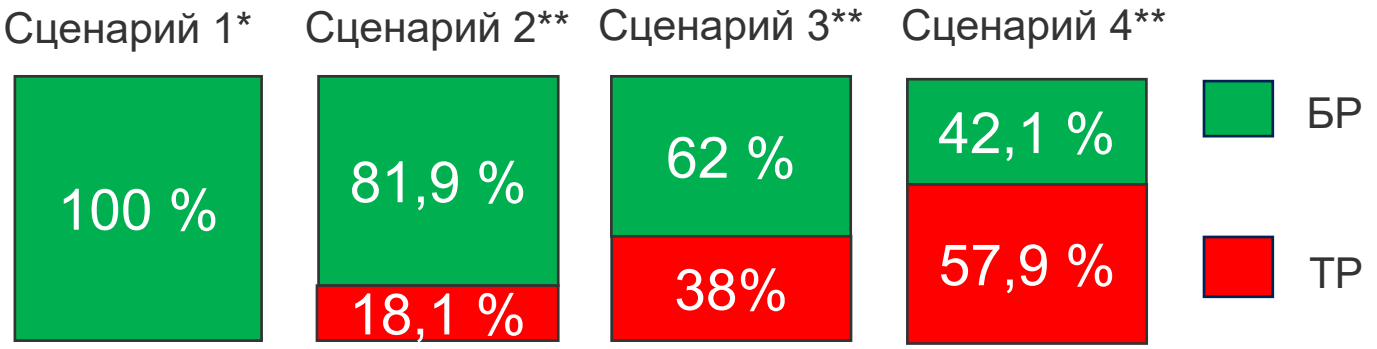




Ключевые сценарии для оценки приемлемых сроков достижения радэквивалентности РАО и исходного уранового сырья на основе Стратегий развития ЯЭ



92 ГВт



Сценарии развития ЯЭ	Достижение радэквивалентности, лет	
	LAR	ПБО
Сценарий 1	**99**	287
Сценарий 2	**412**	3 373
Сценарий 3	1 966	23 058
Сценарий 4	12 277	46 856

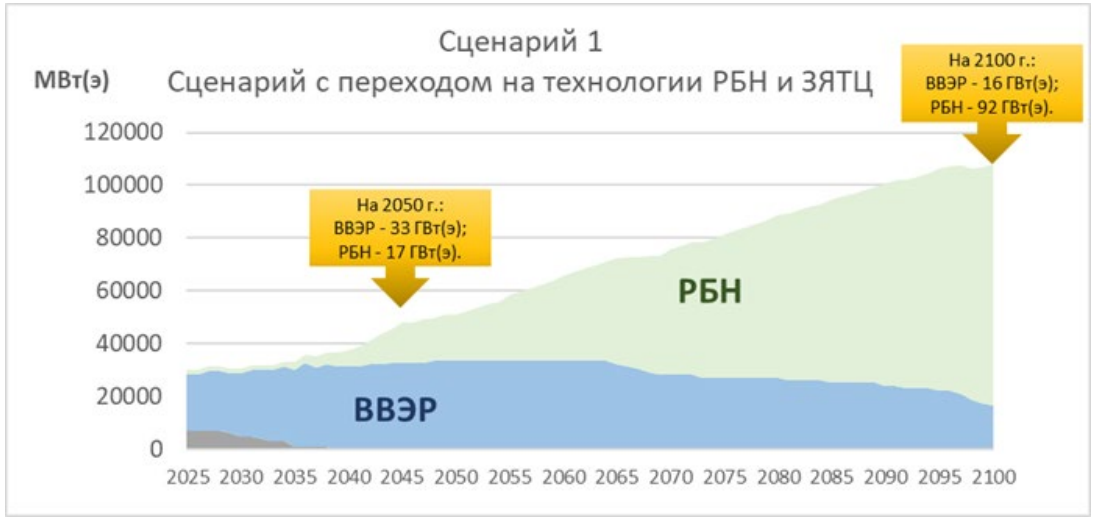
Стратегия-2018

Расчеты балансов до 2100 г.

* При полном дожигании МА к 2100 г. в замкнутом ЯТЦ на БР

** При условии захоронения накопленного к 2100 г. ОЯТ и РАО когда не все U, Pu и МА рециклируются в замкнутом ЯТЦ

Ключевые сценарии для оценки приемлемых сроков достижения радэквивалентности РАО и исходного уранового сырья на основе Стратегии-2021



Рост установленной мощности АЭС в РФ с переходом ЯЭ на технологии РБН и ЗЯТЦ

Рост установленной мощности АЭС с развитием только на базе ВВЭР

- **Вариант «Целевой» - в РАО только потери МА (0,1%);**
- **Вариант «консервативный» - в РАО МА от РТ-1 и ОДЦ + потери;**
- **Вариант без фракционирования при переработке ОЯТ РТН;**

- **Без фракционирования МА (негде дожигать);**

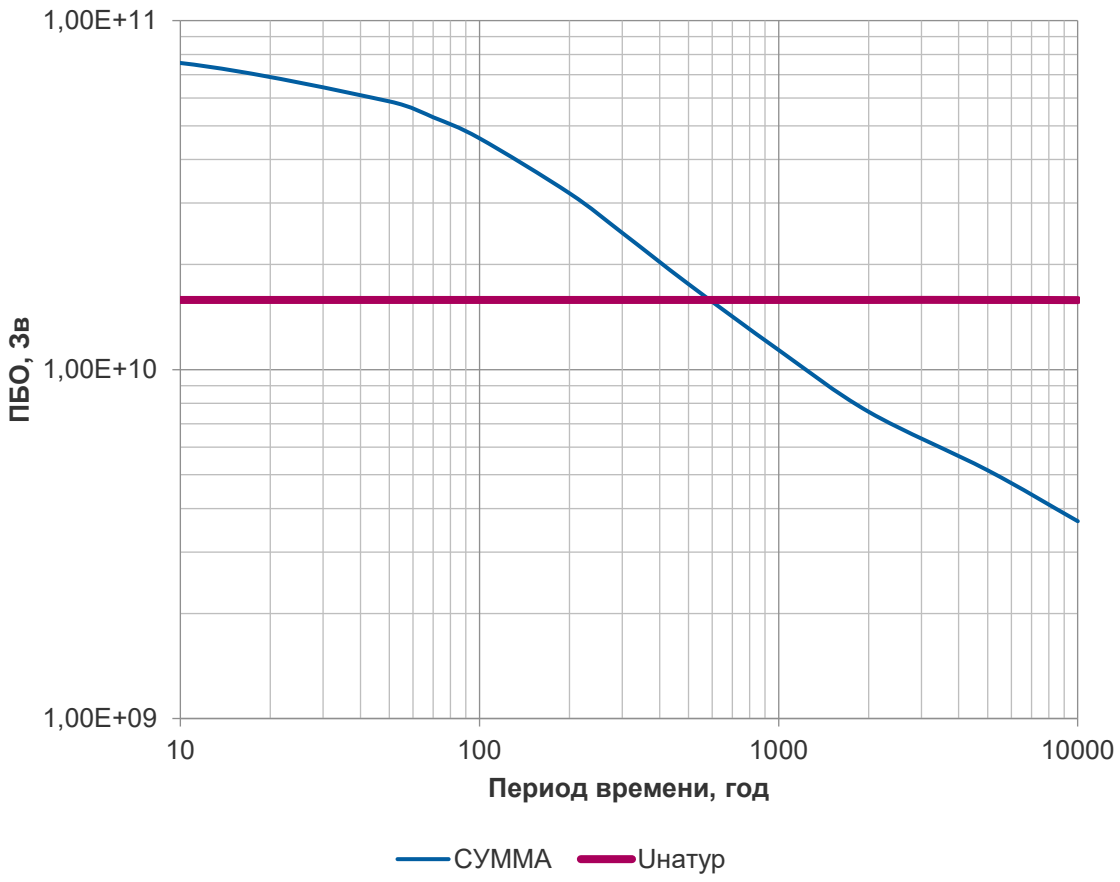
Сроки достижения радэквивалентности (сценарные расчеты)*

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

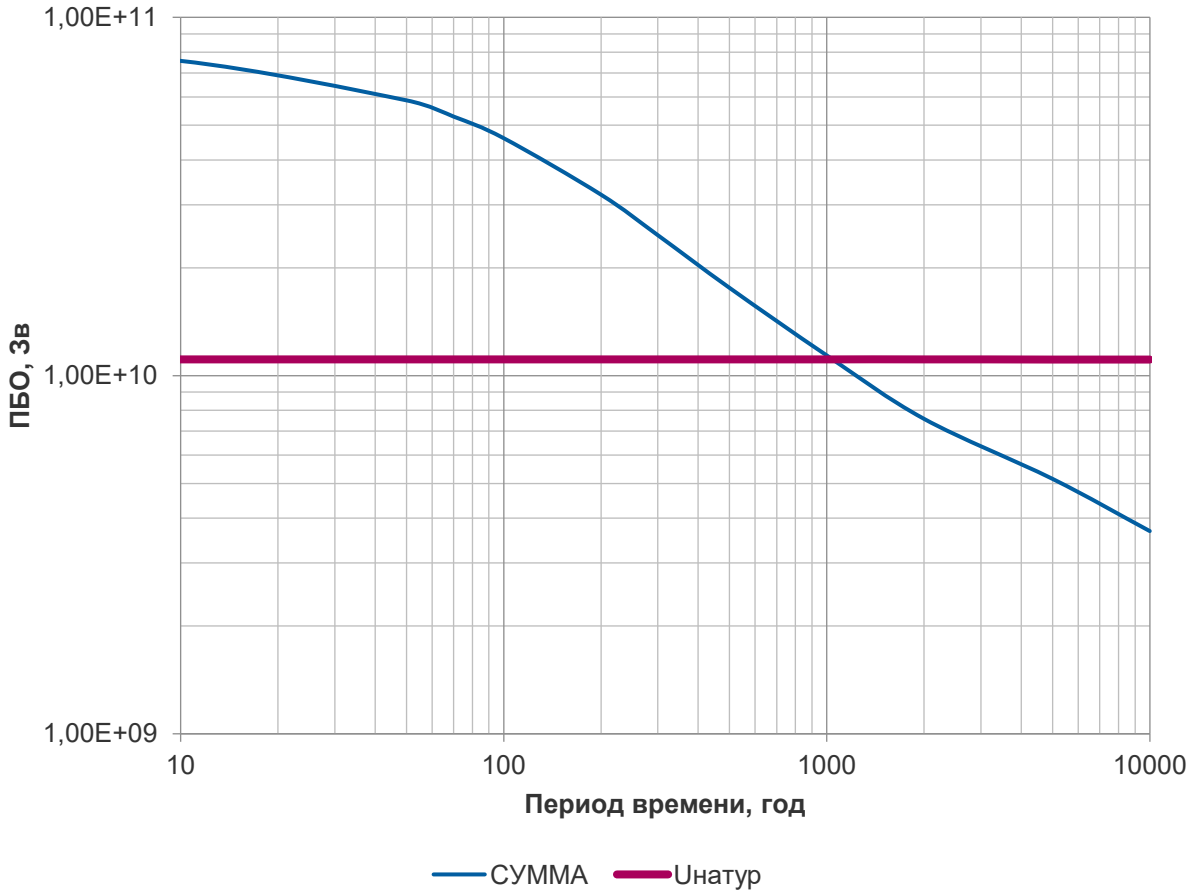
	ЗЯТЦ (200 кг МА в РАО)**	ЗЯТЦ (100 т МА в РАО)**	ОЯТЦ
Потребление природного урана 2023-2100	350 000	350 000	824 000
Радиационная эквивалентность	714 лет	71 000 лет	215 тыс. лет
Радиологическая эквивалентность (LAR радиационной эквивалентности)	99 лет	11 тыс. лет	67 тыс. лет
Радиационно-миграционная эквивалентность	190 лет	6,2 млн. лет (4,5 млн. лет при выделении только Np)	4,1 млн. лет
Радиологическая эквивалентность с учетом миграции (LAR радиационно-миграционной эквивалентности	77 лет	2,8 млн. лет (1,2 млн. лет при выделении только Np)	966 тыс. лет

*Сценарии 2023 года (Системное обоснование развития двухкомпонентной ЯЭ на основании технологических и экономических преимуществ ЗЯТЦ с учетом радиационно-эквивалентного подхода к обращению с РАО. Этап 2023.)
** Расчеты выполнялись с использованием ПМ РОЗА-РАО версия 2.0

Пример разного объема природного уранового сырья

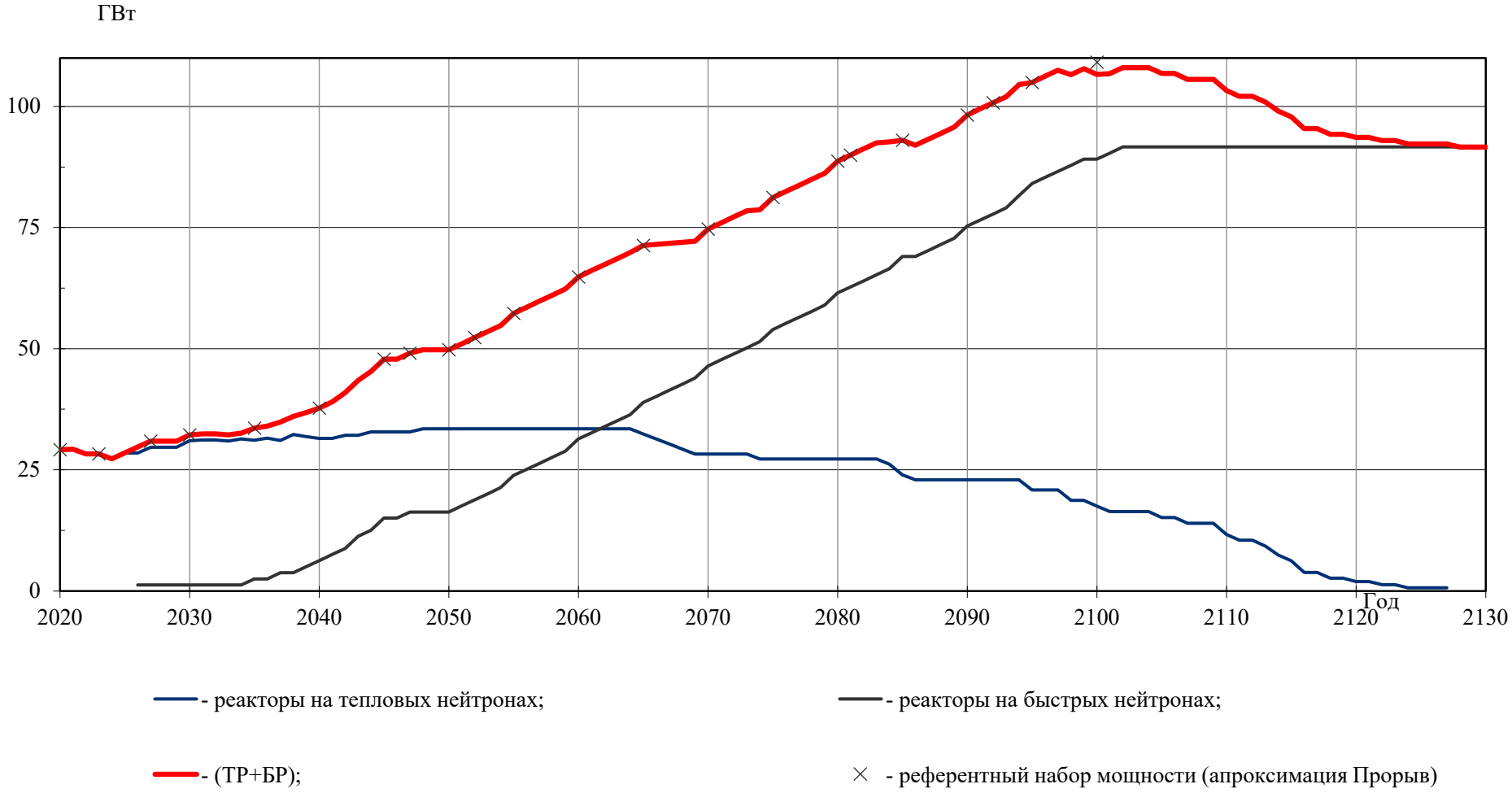


500 000 т природного уранового сырья



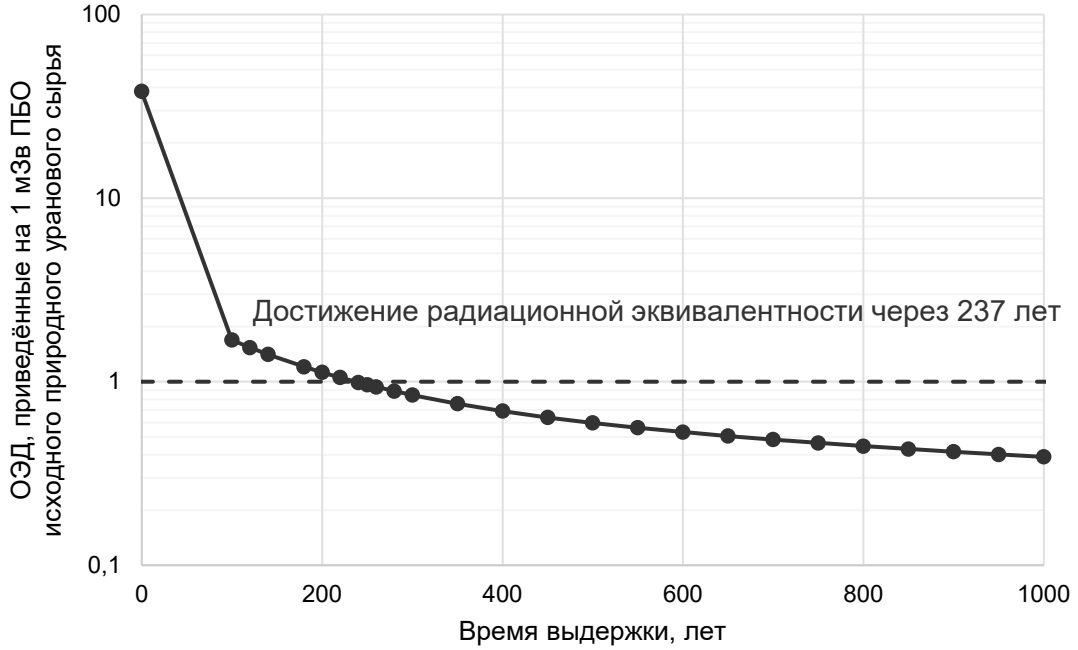
350 000 т природного уранового сырья

Мощность АЭС в реакторных системах на основе Стратегии-2021, до полного замещения ТР

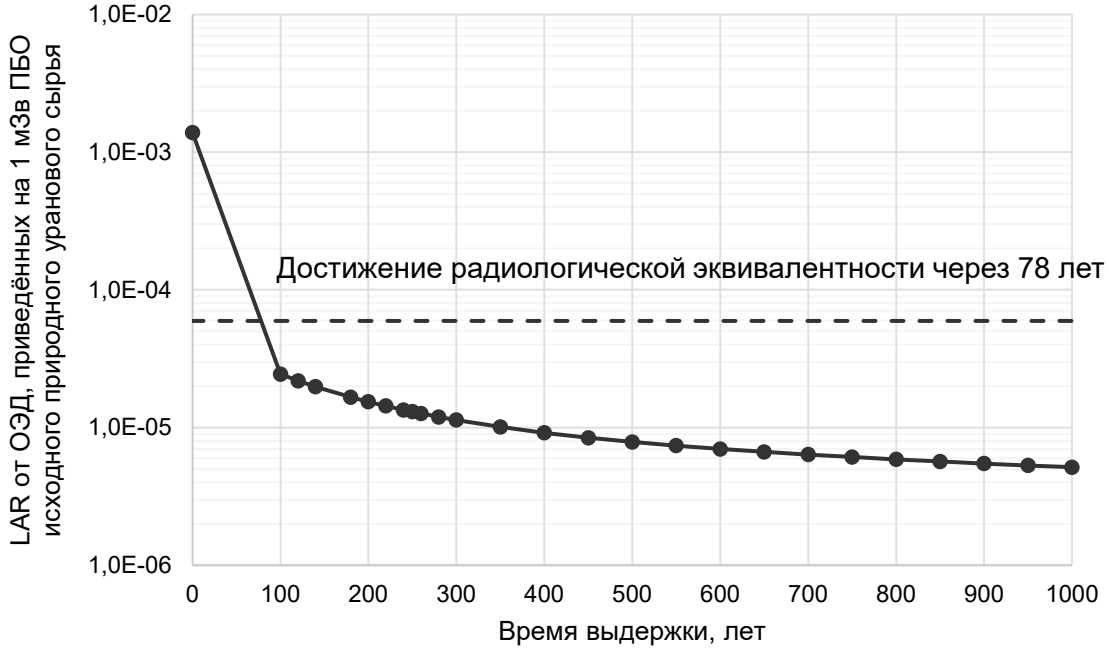


Сроки достижения радэквивалентности РАО и природного уранового сырья по сценарию развития ЯЭ с полным замещением ТР в 2130 году

ПРОРЫВ
РОСАТОМ



Радиационная эквивалентность РАО и природного уранового сырья (технология ПБО)



Радиологической эквивалентности РАО и природного уранового сырья (технология LAR)

Заключение

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

1. Полученные сроки радиационной и радиологической эквивалентности в масштабах ЯЭ России возможны только на базе развития парка РБН.
2. Масштаб возможного образования МА от переработки ОЯТ РТН, который может привести к значительному увеличению полученных сроков, подтверждают необходимость внедрения технологий фракционирование МА на всех планируемых к вводу предприятиях переработки ОЯТ для их последующей трансмутации в РБН.
3. Полученные данные, свидетельствующие о сокращении радиационных и радиологических рисков РАО, получаемых в случае реализации замкнутого ЯТЦ с РБН в сравнении с ЯТЦ РТН, могут служить основанием для снижения финансовой нагрузки отрасли в части создания инфраструктуры по захоронению отходов атомной промышленности.

Спасибо
за внимание

Соломатин Владимир Михайлович
Моб. тел.: +7 (910) 916 11 23
E-mail: svm@pnproryv.ru

04.04.2024