

# Энергия замкнутого цикла



Радиологические преимущества замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) на базе реакторов на быстрых нейтронах (РБН) с учётом действующих стандартов МАГАТЭ по радиационной безопасности и практической реализации эффекта выравнивания онкотоксичности радиационных отходов (РАО) и природного уранового сырья обсудили участники совместного заседания Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС» и Секции 1. «Энергетические системы и объекты энергетики» Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы».

Мероприятие проходило в офлайн- и онлайн-режимах. В дискуссии приняли участие члены Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС», члены Секции 1. «Энергетические системы и объекты энергетики» Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы», представители НИУ «МЭИ», ИНЭИ РАН, НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, АО «Прорыв», АО «ВНИИАЭС», НП «КОНЦ ЕЭС», ГК «Росатом», АО «Техническая инспекция ЕЭС», а также представители Минэнерго России, Института систем энергетики СО РАН, ПАО «Россети», АО «Концерн Росэнергоатом», ООО «ИнЭнерджи», Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы», АО «Россети Тюмень», ПАО «Россети Центр», ПАО «Россети Ленэнерго», ООО «Газпром энергохолдинг», АО «Техснабэкспорт», ООО «СитиЭнерго», Института энергетики НАН Беларуси, ГГТУ им. П.О. Сухого (Беларусь), Бухарского инженерно-технологического института (Республика Узбекистан) и др.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ АТОМНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Открывая заседание, первый заместитель председателя Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС», заместитель председателя Секции 1. «Энергетические системы и объекты энергетики» Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы» д.т.н., профессор **В.В. Молодюк** отметил:

— ядерная энергетика является системным элементом устойчивого развития экономики России. В настоящее время атомная генерация в России составляет 20% всей выработки электроэнергии, и она будет расти до 25%. Ключевые задачи дальнейшего развития — создание новой технологической платформы ядерной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом и дальнейшее увеличение доли атомной генерации;

— практически всё оборудование для АЭС изготавливается в РФ по отечественным технологиям,

поэтому сооружение энергоблоков АЭС, развитие ядерной энергетики обеспечивают значительный мультипликативный эффект для российской экономики.

Только за последние три года в НТС ЕЭС проведено пять совместных заседаний по атомной тематике:

- Роль ядерной энергетики в последовательном обеспечении декарбонизации энергетики;
- Стратегия развития ядерной энергетики до 2050 года и перспективы на период до 2100 года (Стратегия-2021);
- Экономические аспекты конкурентоспособности АЭС и ЗЯТЦ;
- Энергоблок с реакторной установкой БН 1200М;
- Малая атомная электростанция с реакторной установкой РИТМ.

Всё это говорит о том, что в энергетике России ядерная составляющая выходит на выдающиеся позиции.

Отличительной и важной особенностью атомной генерации является то, что электроэнергия на АЭС производится без выбросов CO<sub>2</sub>, а ядерные реакторы функционируют и запроектированы целиком на отечественном оборудовании.

ГК «Росатом» остаётся лидером мирового атомного рынка. В портфеле зарубежных заказов на разной стадии реализации АЭС — 33 проекта в 10 странах, 22 из них находятся в стадии сооружения. В связи с этим чрезвычайно важно довести до населения и потенциальных заказчиков понятие, что ядерная энергетика является безопасной.

## ПРЕИМУЩЕСТВА ЗЯТЦ

С докладом «Радиологические преимущества ЗЯТЦ на базе РБН с учётом действующих стандартов МАГАТЭ по радиационной безопасности и практической реализации эффекта выравнивания онкотоксичности РАО и природного уранового сырья»

выступил начальник отдела Главного радиоэколога АО «Прорыв» канд. биол. наук В.М. Соломатин.

Он подчеркнул, что электроэнергия, производящаяся на атомных станциях, в настоящее время составляет небольшую часть её общемирового производства. Несмотря на то, что ядерное топливо характеризуется наиболее высокой удельной энергией на единицу массы, проблемы обращения с облучённым ядерным топливом (ОЯТ) современных реакторов на тепловых нейтронах (тепловых реакторов) в настоящее время тормозят дальнейшее развитие ядерной энергетики (ЯЭ). Неизбежное долговременное контролируемое хранение ОЯТ тепловых реакторов и захоронение долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО) приводят к накоплению ОЯТ и ДВАО в мировом масштабе, т.е. к росту глобальной экологической опасности ЯЭ.

Развитие двухкомпонентной ядерной энергетики в виде тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов), работающих в замкнутом ядерном топливном цикле (ЗЯТЦ), может существенно снизить опасность ЯЭ (рис. 1).

Большое внимание изучению радиоактивных отходов (РАО), которые могут образовываться в ЗЯТЦ, оказывает Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) в рамках Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), а международный форум «Поколение IV» отметил перспективность разработки быстрых реакторов (в частности, быстрых реакторов со свинцовым

теплоносителем) и соответствующих технологий ЗЯТЦ на ближайшие 15–25 лет.

При реализации ЗЯТЦ значительно сокращаются объёмы ОЯТ и ДВАО, однако полностью безотходного процесса добиться не удастся, и геологическое захоронение РАО по-прежнему является необходимым.

В настоящее время в России создаётся крупномасштабная ЯЭ на основе ЗЯТЦ, в которых проблема РАО решается на основе достижения такого состава и количества РАО (и их захоронения), для которых их потенциальная опасность для здоровья человека будет эквивалентна (или даже ниже) радиоактивности природного урана. Эта опасность рассчитывается на основе специальных баз данных и методических рекомендаций с учётом специфики рассматриваемого региона.

**Выравнивание пожизненных радиационно-обусловленных рисков возможной индукции онкозаболеваний от РАО и от природного сырья**

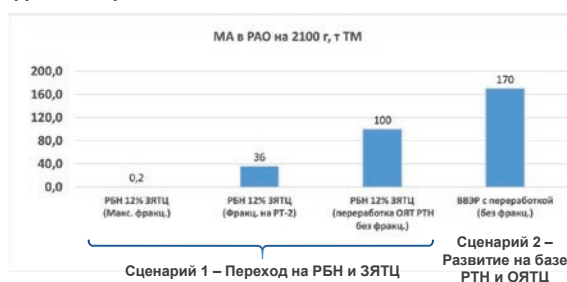
Потенциальную опасность для здоровья человека можно оценивать по ожидаемым эффективным дозам (в случае реализации принципа радиационной эквивалентности) или, более корректно, вычисляя пожизненный атрибутивный риск [LAR — от англ. lifetime attributable risk]) индукции онкологических заболеваний человека в результате поступления в организм радионуклидов на основе современных моделей радиационных рисков, рекомендованных Международной



Рис. 1.

## 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	$2,14 \cdot 10^6$	Незначительное	5	56	$1,10 \cdot 10^{-7}$
Am-241	433,6 (Np-237)	114	1900	60	$2,00 \cdot 10^{-7}$
Pu-239	24,119	1,9	550	13	$2,50 \cdot 10^{-7}$
U-235	$7,04 \cdot 10^8$	Незначительное	35	53	$4,70 \cdot 10^{-8}$

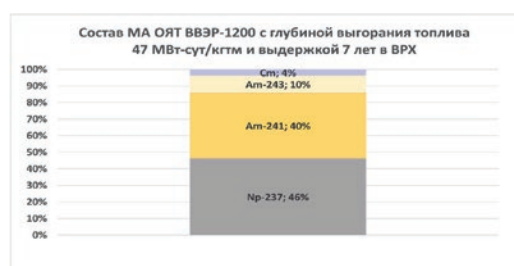


Рис. 2.

комиссией по радиологической защите (МКРЗ) (в случае реализации радиологической эквивалентности).

Согласно расчётному моделированию сценария развития в XXI веке ядерной энергетики России на основе АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах, реакторы на тепловых нейтронах развиваются и работают на базе топлива из обогащённого урана до тех пор, пока не исчерпан принятый в модели ресурс природного урана в РФ 540 тыс. т. Всё облучённое топливо из тепловых реакторов перерабатывается, из него извлекается плутоний, минорные актиниды (МА) и некоторые долгоживущие продукты деления (рис. 2). На базе извлечённого плутония развивается система реакторов на быстрых нейтронах.

Принято, что конечная отсечка в сценарии развития ЯЭ России, приведённом в актуализированной в 2021 году «Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года» (Стратегия-2021) — 2130-й год. Это примерный год окончания работы системы ВВЭР и переработки последней партии ОЯТ ВВЭР (рис. 3, 4).

В 2038 году энергосистема с ТР достигает максимальной мощности 32,28 ГВт и затем постепенно снижается. Работа АЭС с ТР к 2030 году осуществляется в основном на ВВЭР электрической мощностью 1150 и 1200 МВт с увеличенным сроком службы до 80 лет.

По референтному сценарию система ТР действует до 2127 года, при этом до 2100 года общая выработка электроэнергии оценивается в 2,82 ТВт·лет, в последующие 27 лет — 0,194 ТВт·лет до окончания службы

последнего реактора ВВЭР-С мощностью 655 МВт (пять таких ТР будут введены с 2034 по 2048 год). Реакторы РБМК выводятся из эксплуатации.

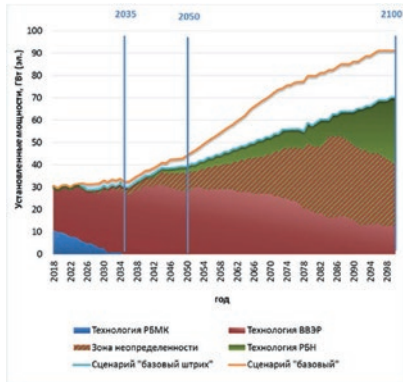
ПБО отходов ядерной энергетики (РАО) и потребляемого ядерной энергетикой природного сырья (урана) различна. Для обоснования безопасности развития ЯЭ в соответствии со стратегией лежит задача по определению времени, через которое наступит равенство ПБО РАО и ПБО исходного природного сырья. В решении этой задачи существует два подхода: определение времени достижения равенства ожидаемых эффективных доз (радиационная эквивалентность) и определение времени достижения равенства пожизненных радиационных рисков (радиологическая эквивалентность).

Понятие эффективной дозы было разработано МКРЗ с целью управления радиационной защитой. В терминах «эффективной дозы» выражаются пределы, ограничения и контрольные уровни системы норм и правил радиационной защиты.

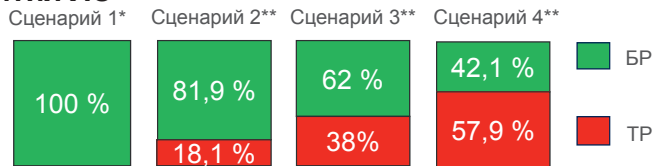
Эффективная доза определяется как взвешенное среднее эквивалентных доз в органах и тканях. В Публикации 103 МКРЗ отмечается: «(157) ... Дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облучённых индивидуумов».

Для оценки радиологической эквивалентности в качестве меры ПБО принимается LAR заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО), который представляет ожидаемое пожизненное чис-

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



Стратегия-2018  
Расчеты балансов до 2100 г.



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

\* 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

Рис. 3.

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

- 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;



Рост установленной мощности АЭС с развитием только на базе ВВЭР

- Без фракционирования МА (негде дожигать);

Рис. 4.

ло радиационно-индуцированных ЗНО в облучённой группе лиц, нормированное на её численность.

Отношение LAR от двух разных радионуклидов, вычисленное по исходным моделям годового риска для конкретной популяции, отличается от отношения соответствующих ОЭД.

Применительно к проблеме радиационной и радиологической эквивалентности это означает, что расчётный период выдержки РАО перед их захоронением, рассчитанный по отношению пожизненных рисков, может отличаться от того, который рассчитан по отношению ОЭД (рис. 5).

### Сроки достижения радэквивалентности (сценарные расчеты)\*

	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

Рис. 5.

Исходными данными для определения радиационной и радиологической эквивалентности являются ПБО в виде ОЭД от основных радионуклидов РАО для различных периодов их выдержки и ОЭД от изотопов природного урана. Эти данные получены при моделировании сценария развития ЯЭ на тепловых реакторах и быстрых реакторах до 2130 года, из расчёта, что к 2130 году на развитие крупномасштабной ЯЭ, согласно рассмотренному сценарию, затрачивается 541,7 тыс. т природного урана и накапливается 7,523 тыс. т РАО в виде долгоживущих радионуклидов.

В случае применения критерия радиационной эквивалентности определяется период выдержки РАО, за который ОЭД от РАО (за счёт радиоактивного распада) сравнивается с ОЭД от природного урана.

В случае применения критерия радиологической эквивалентности определяется период выдержки РАО, за который LAR от РАО (за счёт радиоактивного распада) сравнивается с LAR от природного урана. Вычисление LAR производится следующим образом:

- для различных периодов выдержки РАО, для каждого из основных радионуклидов, входящих в состав РАО в этом периоде, по базе данных дозовых коэффициентов МКРЗ определяется динамика годовых эквивалентных доз в органах и тканях человека;

- с применением моделей радиационных рисков МКРЗ, российских показателей заболеваемости ЗНО по локализациям и российских показателей смертности для каждого органа и ткани вычисляется LAR от каждого радионуклида;

- величины LAR от основных радионуклидов, входящих в состав РАО в конкретном временном периоде, складываются для получения общего LAR от РАО для этого периода выдержки.

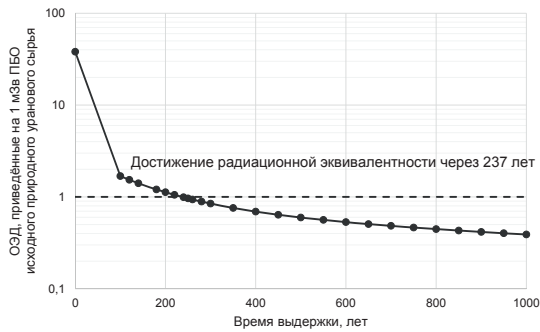
Постоянный уровень LAR от природного урана, полагая неизменность его радионуклидного состава во времени, вычисляется таким же образом.

Вычисление пожизненного атрибутивного риска производится по эквивалентным дозам, полученным из ОЭД. Прямой расчёт по ОЭД недопустим, так как эффективная доза не позволяет делать различий между отдельными органами. При сравнении риска, полученного по эффективной дозе, и риска, полученного по соответствующей эквивалентной дозе, различие может быть более чем в 5,5 раза.

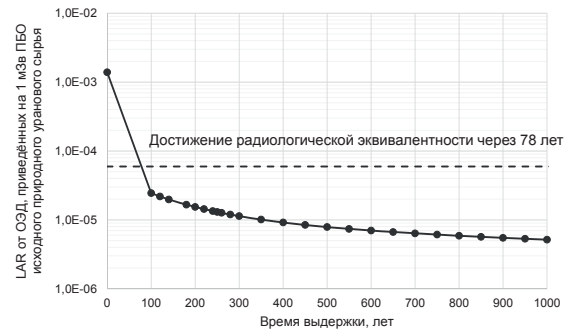
Расчёт рисков только по эффективной дозе подразумевает, что произошло облучение всего тела в целом. Также нужно учитывать, что при внутреннем облучении ОЭД не учитывает распределение эквивалентных доз во времени, что может существенно влиять на итоговое значение пожизненного атрибутивного риска. Отношение пожизненного атрибутивного риска, полученного по эффективной дозе (ОЭД), равной 1 мЗв, к пожизненным атрибутивным рискам от поступления в организм различных радионуклидов с ОЭД, равной 1 мЗв, может превышать 4 раза.

Для решения проблемы использования ОЭД применяется база данных МКРЗ, где дана динамика накопления эквивалентных доз во времени для различных органов и типов радионуклидов.

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



Радиационная эквивалентность РАО и природного уранового сырья (технология ПБО)



Радиологической эквивалентности РАО и природного уранового сырья (технология LAR)

Рис. 6.

### Оценка достижения радиационной и радиологической эквивалентности

Расчёты производились на программном модуле (ПМ) РОЗА-РАО версии 2.0, реализующем оценку динамики достижения радиологической эквивалентности, с учётом факторов неопределённости, рекомендованных НКДАР ООН при расчётах радиационных рисков.

Для решения этой задачи в коде ПМ РОЗА-РАО версии 2.0 реализовано вычисление случайных реализаций усреднённых по полу и возрасту (на момент поступления) пожизненных атрибутивных рисков (LAR) возникновения злокачественных новообразований (ЗНО) после однократного поступления в организм человека радионуклидного состава РАО и исходного природного уранового сырья в зависимости от времени выдержки. На основе полученных случайных реализаций LAR определяются доверительные границы времени наступления эквивалентности.

Для расчёта LAR используется эффективная доза, полученная путём приведения потенциальной биологической опасности (ПБО) РАО к 1 мЗв ПБО исходного природного уранового сырья. Под ПБО понимается суммарная для всего РАО ожидаемая за жизнь эффективная доза (ОЭД) от поступления радионуклидов в организм.

ПМ РОЗА-РАО версии 2.0 позволяет определять как время наступления радиационной эквивалентности (по ПБО), так и время наступления радиологической эквивалентности (по LAR).

Оценка времени достижения радиационной эквивалентности РАО и природного уранового сырья (технология ОЭД) по сценарию развития ЯЭ с полным замещением тепловых реакторов быстрыми реакторами в 2130 году показала, что срок выравнивания ПБО наступает через 237 лет после окончания описанного сценария.

Оценка времени достижения радиологической эквивалентности РАО и природного уранового сырья (технология LAR) по сценарию развития ЯЭ с полным замещением тепловых реакторов быстрыми реакторами в 2130 году показала, что срок выравнивания по показателю LAR наступает через 78 лет после окончания описанного сценария (рис. 6).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для базового сценария развития ЯЭ радиационная эквивалентность долгоживущих РАО, накопленных к 2130 году, и природного уранового сырья достигается через 237 лет выдержки при степени потерь в РАО актинидов и высокоактивной части ПД, равной 0,1 % от их содержания в перерабатываемом ОЯТ.

Радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья (технология LAR), при этих же исходных условиях, наступает уже через 78 лет.

Полученные сроки радиационной и радиологической эквивалентности в масштабах ЯЭ России возможны только на базе развития парка РБН. Масштаб возможного образования минорных актинидов (МА) от переработки ОЯТ РТН, который может привести

к значительному увеличению полученных сроков, подтверждает необходимость внедрения технологий фракционирования МА на всех планируемых к вводу предприятиях переработки ОЯТ для их последующей трансмутации в РБН.

Новые 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.

В обсуждении доклада и прениях приняли участие научный руководитель АО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала», доктор техн. наук, профессор **Е.О. Адамов**; академик РАН, директор ИСЭМ СО РАН **В.А. Стенников**; руководитель отдела Системного анализа надёжности АЭС АО «ВНИИАЭС» **В.В. Таратунин**; советник генерального директора АО «Техническая инспекция ЕЭС», профессор НИУ «МЭИ» **Р.М. Хазиахметов**.

### СОВМЕСТНОЕ ЗАСЕДАНИЕ ОТМЕЧАЕТ

В настоящее время в России создаётся крупномасштабная ядерная энергетика на основе замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), в котором проблема радиоактивных отходов (РАО) решается на основе достижения такого состава и количества РАО (и их захоронения), когда потенциальная опасность радиоактивных отходов для здоровья человека снижается до природного радиационного воздействия. Для обоснования безопасности используется критерий времени, через которое наступает такое равенство.

Развитие двухкомпонентной ядерной энергетике в виде тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах, работающих в замкнутом ядерном топливном цикле, может существенно повысить безопасность ядерной энергетике.

Вычисление случайных реализаций пожизненных атрибутивных рисков (LAR) возникновения злокачественных новообразований после однократного поступления в организм человека радионуклидного состава РАО и исходного природного уранового сырья показали, что радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья при равных исходных условиях наступает уже через 78 лет. Полученные сроки радиационной и радиологической эквивалентности в масштабах ядерной энергетики России возможны только на базе развития парка РБН.

Полученные данные свидетельствуют о сокращении радиационных и радиологических рисков РАО в случае реализации замкнутого ЯТЦ с РБН и могут служить основанием для снижения финансовой нагрузки отрасли в части создания инфраструктуры по захоронению отходов атомной промышленности.

### СОВМЕСТНОЕ ЗАСЕДАНИЕ РЕШИЛО

1. Рекомендовать Минэнерго России, Минэкономразвития России, Минобрнауки России и другим заинтересованным министерствам и организациям учитывать при формировании соответствующих национальных проектов представленные результаты научно-исследовательских работ по радиологическим преимуществам ЗЯТЦ на базе РБН,

2. Рекомендовать РАН и ГК «Росатом» продолжить работы по исследованию радиологических преимуществ ЗЯТЦ на базе РБН и практической реализации эффекта выравнивания онкотоксичности РАО и природного уранового сырья.

3. Рекомендовать Минобрнауки России рассмотреть целесообразность включения концептуальных подходов к реализации ЗЯТЦ и радиоэквивалентному обращению с РАО в соответствующие учебные программы. ■

