

УДК: 621.039.58, 008.2, 001.891.3

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.002

© 2023. Все права защищены.

РАДИАЦИОННАЯ (РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ) ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ РАО И ПРИРОДНОГО УРАНОВОГО СЫРЬЯ: ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НЫНЕШНЕГО И БУДУЩИХ ПОКОЛЕНИЙ

Иванов В. К.*, чл.-корр. РАН, докт. техн. наук (ivk@proryv2020.ru),
Лопаткин А. В. *, докт. техн. наук (lav@proryv2020.ru),
Спирин Е. В.*, докт. биол. наук (sev@proryv2020.ru),
Соломатин В. М.*, канд. биол. наук (svm@proryv2020.ru)

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.

Аннотация

В журнале «Ядерная и радиационная безопасность» (№ 4 (106), 2022 г.) опубликована статья «К вопросу о достижимости радиационной (радиологической) эквивалентности радиоактивных отходов и природного урана». В работе рассмотрены теоретические и практические положения принципа радиологической эквивалентности. Отмечено, что статья публикуется в порядке дискуссии и редакция журнала будет признательна авторам с альтернативным мнением по данному вопросу.

В настоящей статье указаны основные замечания по ранее опубликованной в журнале статье (№ 4 (106), 2022 г.), в которой приводятся необоснованные ограничения по использованию принципа радиологической эквивалентности.

► **Ключевые слова:** радиационная безопасность, радиоактивные отходы, замкнутый ядерный топливный цикл, радиологическая эквивалентность, пожизненный обусловленный канцерогенный риск.

Статья публикуется в порядке дискуссии в авторской редакции.

Редакция журнала будет признательна авторам статей с альтернативными мнениями по данному вопросу.

* АО «Прорыв», Москва, Россия.

RADIATION (RADIOLOGICAL) EQUIVALENCE OF RADIOACTIVE WASTE AND NATURAL URANIUM ORE MATERIALS: SAFETY TECHNOLOGY FOR PRESENT AND FUTURE GENERATIONS

Ivanov V. K.*, Corr. Member of RAS, D. Sc.,
Lopatkin A. V.*, D. Sc.,
Spirin E. V.*, D. Sc.,
Solomatin V. M.*, Ph. D.

Article is received on February 15, 2023.

Abstract

The article “Achievability of radiation (radiological) equivalence of radioactive waste and natural uranium” was published in the Nuclear and Radiation Safety Journal (No. 4 (106), 2022). The paper considers the theoretical and practical provisions of the principle of radiological equivalence. It is noted that the article is published in the order of discussion and the editors of the journal will be grateful to the authors with an alternative opinion on this issue.

This article contains the main comments on a previously published article in the journal (No. 4 (106), 2022), which provides unreasonable restrictions on the use of the principle of radiological equivalence.

► **Keywords:** *radiation safety, radioactive waste, closed nuclear fuel cycle, radiological equivalence, lifetime attributable risk.*

* JSC “Proryv”, Moscow, Russia.

Введение

В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р подчеркивается, что «основные проблемы и риски развития атомной энергетики связаны со сравнительно высокими затратами на обеспечение ядерной и радиационной безопасности и с необходимостью обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами с учетом требований экологической безопасности». При этом в основополагающие принципы безопасности МАГАТЭ включен Принцип 7, в котором указано, что «нынешние и будущие население и окружающая среда должны быть защищены от радиационных рисков».

В литературе ранее рассматривался принцип радиационной эквивалентности – выравнивание потенциальной биологической опасности РАО и природного урана сырья за счет замыкания топливного цикла с сжиганием и трансмутацией долгоживущих актинидов. Понятие радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья при ЗЯТЦ на базе РБН по величине потенциального канцерогенного риска в настоящее время рассматривается как одна из основных технологий по обеспечению безопасности текущего и будущего поколений населения. Действительно установлено, что при трансмутации минорных актинидов (нептуний, америций, кюрий) на базе РБН канцерогенная токсичность РАО снижается более чем на два порядка.

В работе [1] проведен комплексный анализ эффекта радиационной (радиологической) эквивалентности. Рассмотрен ряд наших публикаций по этой теме [2–4]. Сделан вывод, с которым нельзя не согласиться, что данные по радиационной или радиологической эквивалентности «не могут служить единственным основанием для принятия решений о дальнейших направлениях развития ЯТЦ». Вместе с тем, в работе [1] сделан ряд принципиальных заключений, согласиться с которыми не представляется возможным. Рассмотрим некоторые из них с обоснованием их неприемлемости. Тем более, что редколлегия журнала «Ядерная и радиационная безопасность» отмечает публикацию статьи [1] в порядке дискуссии и призывает высказывать альтернативные мнения.

Критические замечания по публикации [1]

Статья [1] содержит не вполне корректную интерпретацию Публикации 103 МКРЗ [5]: «Использование в рамках принципа радиоэкви-

валентности LAR для перспективных оценок не соответствует концепции применения эффективных доз и органных доз [8], поскольку для перспективных оценок, к которым относятся и оценки, выполненные в [4–5], в соответствии с [8], должна использоваться именно эффективная доза. Согласно [8] дозы в органах и иные индивидуальные параметры, такие как пол, следует учитывать только при ретроспективных оценках дозы и особенно риска для отдельного индивидуума» (здесь [8] является ссылкой на МКРЗ [5]).

В данном случае ссылка на Публикацию 103 МКРЗ [5] не вполне корректна. Во-первых, в данной публикации отсутствует утверждение о том, что дозы в органах следует учитывать только при ретроспективных оценках дозы и риска. Во-вторых, по запросу государств-членов, в 2021 г. были выпущены рекомендации МАГАТЭ, устанавливающие методику оценки именно перспективных радиационных рисков и именно по органным дозам [6]. Рекомендации по расчету перспективных рисков выпущены для поддержки принятия управленческих решений по ограничению и контролю облучения («to assist in managerial decisions on limiting and controlling exposure»). Кроме того, концепция недостаточности эффективных доз для оценки перспективных радиационных рисков населения еще в 1999 г. была принята Агентством защиты окружающей среды США на законодательном уровне [7]. В частности, при одной и той же ОЭД = 1 Зв радиационный риск населения США от потребления с пищей ^{238}U в 2,62 раза больше, чем от ^{241}Am . Для ^{210}Po радиационный риск (LAR) на 1 мЗв ОЭД в 7 раз больше, чем для ^{230}Th ($4,9 \cdot 10^{-5}$ против $7,2 \cdot 10^{-6}$).

Как показывают рис. 1 и 2, различия между радиационными рисками на единицу ОЭД от разных радионуклидов обусловлены, в основном, неравномерным распределением эквивалентных доз по органам и тканям. Поэтому утверждение в статье [1] о том, что величина LAR, по сравнению с ОЭД, «дополнительно учитывает только характеристики, специфичные для облученных индивидуумов», является не верным.

Как следствие, основанный на процитированном выше тезисе вывод в статье [1] о том, что «при условии равенства упомянутых индивидуальных характеристик сравнение LAR может рассматриваться как показатель, пропорциональный опасности (безопасности) каждого конкретного объекта использования атомной энергии, эксплуатируемого в ЯТЦ, но не ЯТЦ в целом» также не верен.

Следует отметить, что основные свойства «природного геологического образования, препятст-

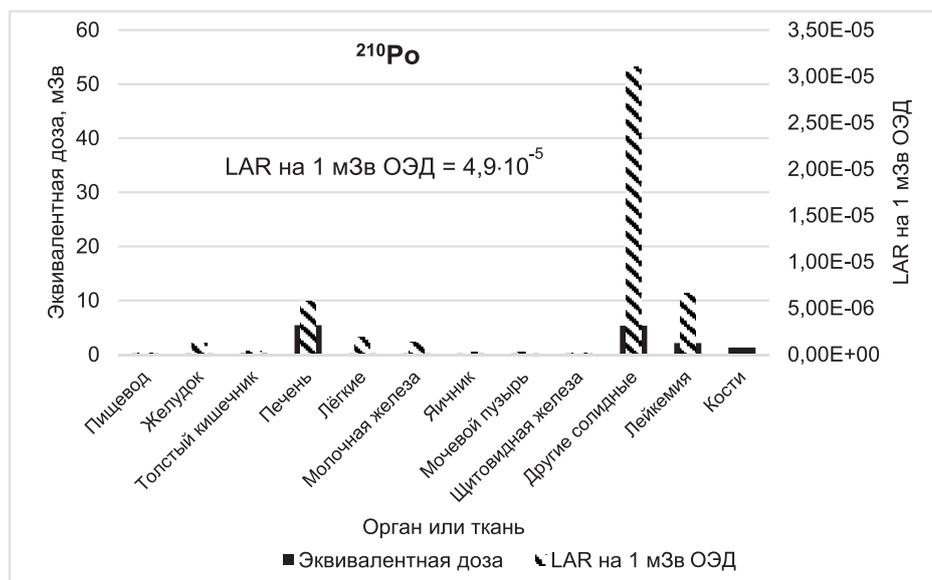


Рис. 1. Радиационный риск (LAR) при поступлении ²¹⁰Po с пищей и соответствующее распределение эквивалентных доз по органам и тканям человека
 [Fig. 1. Radiation risk (LAR) for ²¹⁰Po intake with food and the corresponding distribution of equivalent doses in human organs and tissues]

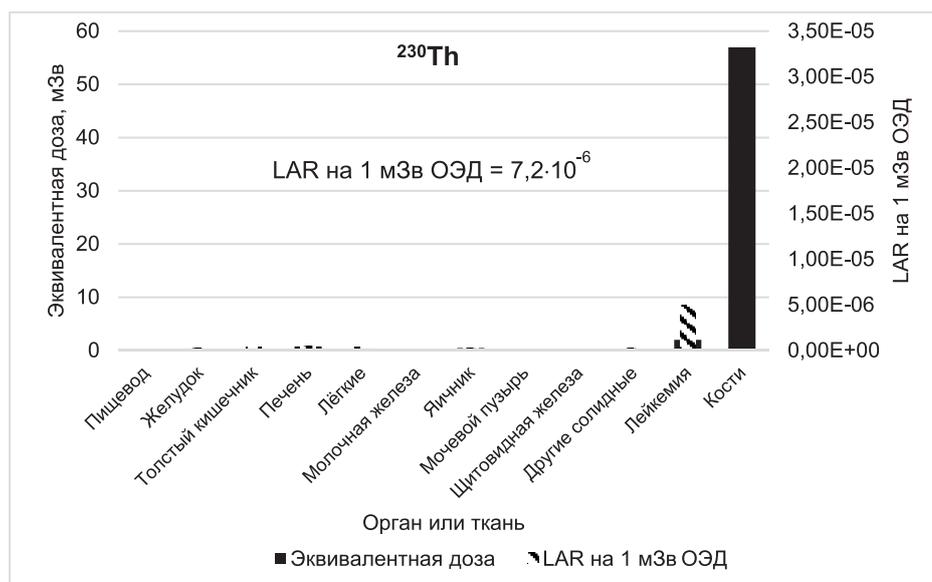


Рис. 2. Радиационный риск (LAR) при поступлении ²³⁰Th с пищей и соответствующее распределение эквивалентных доз по органам и тканям человека
 [Fig. 2. Radiation risk (LAR) for ²³⁰Th intake with food and the corresponding distribution of equivalent doses in human organs and tissues]

вующего распространению радионуклидов в окружающей среде» были учтены в работах по радиационно-миграционной эквивалентности [8, 9]. В данной работе оценки потенциальной биологической опасности (ПБО) природного уранового сырья и РАО, используются с поправкой на миграционный фактор, определяемый коэффициентом распределения K_d для радионуклидов между жидкой и твердой фазами в горной породе. В работах показано, что теоретическая ценность радиационно-эквивалентного подхода по оценке опасности глубинных

захоронений состоит в том, что проводится сравнительная оценка ПБО РАО и эквивалентной массы уранового сырья для производства ядерного топлива при одинаковых исходных условиях. В этом случае можно пренебречь отдельными факторами, влияющими на реальные значения эффективных доз за весь период существования глубинного захоронения. В сравнительной оценке ПБО основным результатом является время наступления баланса между РАО и эквивалентной массой уранового сырья. Такая сравнительная оценка проводится между

составами РАО теплового и быстрого реактора в открытом и замкнутом ЯТЦ. Для крупномасштабной ЯЭ в качестве эквивалентной массы природного урана сейчас, до разработки динамической модели, используется вся добытая масса уранового сырья. Авторы статьи [1] прошли мимо этой теоретической особенности радиационной эквивалентности.

Авторы статьи [1] не увидели также практического приложения принципа радиационной эквивалентности. Между тем только этот принцип дает численные критерии для степени потерь в РАО долгоживущих нуклидов в ходе переработки ОЯТ и вырабатывает требования по составу долгоживущих радионуклидов для сжигания и трансмутации в быстром реакторе. Без этих требований все может ограничиться только сжиганием в быстрых реакторах наработанного плутония, а все актиноиды направляются на захоронение. Нормативы по приему РАО национальным оператором таких требований не выставляют.

Выполнение требований радиационной эквивалентности позволяет сократить время наступления баланса потенциальной биологической опасности до 300 лет и менее путем переработки отработавшего ядерного топлива и выделения минорных актиноидов для трансмутации в быстрых реакторах. Это доказывалось неоднократно путем сопоставления суммарной радиотоксичности долгоживущих высокоактивных отходов и эквивалентной массы природного урана для изготовления ядерного топлива, как отечественными исследованиями, так и зарубежными [10–12].

В дискуссиях с оппонентами радиационно-эквивалентного принципа захоронений РАО возникает упрек в том, что этот подход не учитывает те радионуклиды, которые остаются в окружающей среде в результате операций с сырьем, топливом, ОЯТ и РАО в течение всего жизненного цикла ЯТЦ. Оппоненты не обращают внимание на то, что радиационно-эквивалентный принцип обращения рассматривает потенциальное воздействие на окружающую среду и человека в ситуациях, когда РАО находятся в глубинном захоронении и не могут контролироваться бесконечно долго. Т. е. рассматривается максимально консервативный случай, когда все созданные человеком барьеры на пути радиоактивных элементов разрушены и их распространение определяется природными условиями. Поэтому сравнение ПБО проводится для неконтролируемых радиационных объектов. В контролируемых ситуациях радиационная безопасность на объектах использования ядерной энергетики основана

на выполнении норм и правил, обеспечивающих допустимый риск воздействия на персонал и население. Мониторинг выбросов и сбросов радионуклидов в окружающую среду при нормальной эксплуатации атомных станций также показывает, что радиационное воздействие на население не превышает допустимых уровней облучения и риска для здоровья [13–16].

Оппонентам не следует также противопоставлять оценки потенциальной опасности глубинных захоронений РАО с использованием радиационно-эквивалентного подхода модельным расчетам безопасности, учитывающих характеристики инженерных барьеров, свойства матриц, в которые помещают отходы, физико-химические свойства геологических пород, особенности распространения радионуклидов и т. д. Оба этих подхода должны дополнять друг друга, поскольку работают на разных уровнях агрегации информации по обеспечению экологической безопасности ядерной энергетики.

Следует заметить, что уже более 30 лет обсуждаются подходы к трансмутации долгоживущих актиноидов [17–19], образующихся в облученном ядерном топливе (ОЯТ). Под трансмутацией актиноидов понимается их перевод в продукты деления [20, 21]. Однако до сих пор не стихают споры на тему, а нужна ли она вообще, каков эффект от удаления актиноидов из направляемых на захоронение радиоактивных отходов (РАО), насколько меняется потенциальная биологическая активность (ПБО) [20] при удалении из ОЯТ актиноидов.

Ниже на простом численном примере показан масштаб изменения потенциальной биологической опасности (ПБО) при удалении актиноидов из ОЯТ реактора типа ВВЭР-1000 и эффект от трансмутации урана и трансурановых элементов. Расчеты проведены на примере годовой выгрузки ОЯТ реактора типа ВВЭР. В расчетах предполагалось, что отмеченные актиноиды удаляются из ОЯТ на момент химпереработки полностью. Такой подход можно рассматривать как «верхнюю» оценку, необходимую для выделения наибольшего эффекта от удаления того или иного актиноида.

Было принято, что ВВЭР вырабатывает электрическую мощность 1 000 МВт (тепловая мощность 3 000 МВт), глубина выгорания топлива 5 % т. а., коэффициент использования мощности 100 %. В расчете по программе FISPACT [22] моделировалась кампания топлива до заданной глубины выгорания и послереакторная выдержка 10 лет. После выдержки ОЯТ направляется на захоронение либо на переработку с отделением заданных актиноидов. Для

этих составов рассчитывается изменение радиационных характеристик оставшейся части облученного топлива (РАО) за период до 10^7 лет. Время переработки в расчете не учитывалось и предполагалось, что на захоронение РАО после отделения актинидов направляется в тот же момент времени, что и не переработанное ОЯТ.

Масса выгрузки ОЯТ за эффективный год работы определялась следующим соотношением:

$$M_{\text{ОЯТ}} = W_t \cdot q_f \cdot 365 / B,$$

где W_t – тепловая мощность реактора, МВт;

q_f – 1 г разделившегося ядерного топлива на 1 МВт*сут;

B – глубина выгорания топлива в предположении, что выгорание 1 % т. а. = 10 МВт*сут/кт топлива.

Соответственно, на выработанный 1 ГВт*года электроэнергии для открытого топливного цикла ВВЭР имеем 21,9 т ОЯТ. Изменение ПБО указанного количества ОЯТ при длительной выдержке показано на рис. 3.

Сравним полученные результаты с ПБО использованного природного уранового сырья [20]. Для производства указанного количества исходного уранового топлива с обогащением 5 % потребуется 159 т природного уранового сырья при потерях в отвал 0,1 % ^{235}U . Полная величина ПБО для этого количества уранового сырья $8,2 \cdot 10^6$ Зв. ПБО ОЯТ снижается до ПБО потребленного уранового сырья примерно через 90 тыс. лет выдержки, т. е. достигается радиационная эквивалентность (РЭ).

Рассмотрим, что будет с радиационными характеристиками РАО при последовательном удалении из ОЯТ трансурановых элементов и урана (рис. 3). При удалении плутония время достижения РЭ уменьшается до 3 000 лет, если извлечь и америций – РЭ снижается до 250 лет. Если из ОЯТ извлечь еще и кюрий, нептуний и уран, то время достижения РЭ практически не изменится и будет составлять примерно 250 лет, в наименьшей степени оно зависит от нептуния. Приведенные на рис. 3 временные зависимости ПБО для вариантов извлечения из ОЯТ Pu и Am а также Pu, Am и Np практически сливаются.

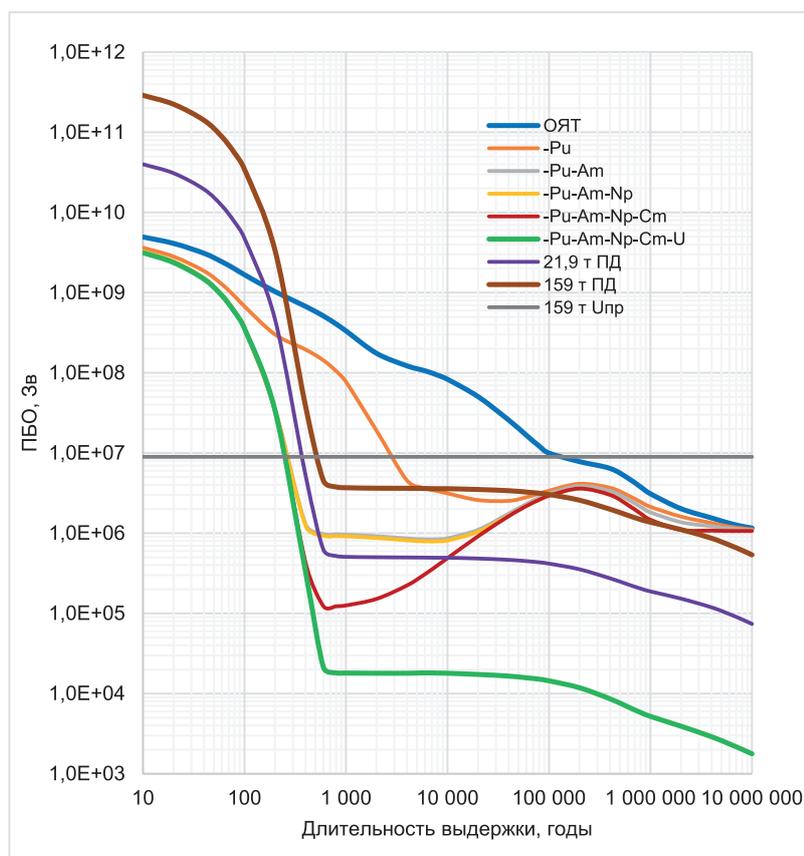


Рис. 3. Изменение при выдержке ПБО ОЯТ ВВЭР и РАО, сформированных из ОЯТ извлечением урана и трансурановых элементов. Обозначение на графике -U-Np-Pu и т. д. означает, что из ОЯТ полностью выделены уран, плутоний, нептуний и т. д.

[Fig. 3. Change in the PBO exposure of VVER SNF and RAO formed from SNF by extraction of uranium and transuranium elements. Designation on the chart -U-Np-Pu, etc. means that uranium, plutonium, neptunium, etc. have been completely separated from spent nuclear fuel]

При извлечении из ОЯТ плутония и МА время достижения РЭ определяется временем распада до требуемого уровня ^{90}Sr и ^{137}Cs с дочерними нуклидами.

Если из ОЯТ извлечены плутоний и МА, то для оставшейся части РАО после выдержки примерно 700 лет начинается рост ПБО. Он достигает максимума примерно через 250 тыс. лет и по величине этот максимум примерно в 3 раза ниже, чем ПБО уранового сырья. Далее идет падение. Этот рост обусловлен цепочкой распадов ^{234}U [20], содержание которого повышается при облучении уранового топлива. Из этого следует, что и уран из захораниваемых РАО надо извлекать. В этом случае после выдержки примерно 700 лет ПБО оставшейся части ОЯТ примерно в 400 раз ниже, чем ПБО уранового сырья. И в дальнейшем ПБО оставшейся части ОЯТ (все продукты деления и малые количества тория, протактиния, берклия, калифорния и продуктов их распадов) монотонно уменьшается.

Количество кюрия в ОЯТ не велико, но если из ОЯТ извлечь плутоний, америций и нептуний, а кюрий не извлекать, то это дает рост ПБО при выдержке 700–1 000 лет примерно в 10 раз по причине распада изотопов кюрия в изотопы плутония. При выдержке примерно 20 000 лет эта разница нивелируется. Таким образом, для снижения ПБО ОЯТ наибольший эффект дает удаление урана, плутония, америция и кюрия. Если длительность выдержки 250 лет до достижения РЭ приемлема, то из ОЯТ можно больше ничего извлекать. Т. е. продукты деления, нептуний и малые количества протактиния, тория, берклия и калифорния можно направлять целиком на захоронение.

Уран и трансураниевые элементы мы извлекли из ОЯТ ВВЭР. В рассматриваемом выше подходе они не направляются на захоронения и остаются в системе ядерной энергетики. Рассмотрим последствия их полной трансмутации, т. е. предположим, что все извлеченные из ОЯТ ВВЭР значимые актиниды (U, Np, Pu, Am, Cm) полностью разделились, например, в составе топлива реакторов на быстрых нейтронах и перешли в продукты деления. В этом случае в рассматриваемом первоначально количестве ОЯТ ВВЭР не осталось актинидов, кроме малых количеств Pa, Th, Bk Cf и продуктов их распадов, а количество продуктов деления увеличилось в 20 раз – с 5 % до 100 % от массы ОЯТ. И для полностью трансмутируемого количества актинидов из ОЯТ в начальный период выдержки (до 100 лет) ПБО всех продуктов деления вырастет примерно в 20 раз, однако время достижения РЭ увеличится незначительно – с 250 лет до 380 лет. Т. е. время дости-

жения РЭ для всего объема ОЯТ уменьшится с 90 тысяч лет до 380 лет для ПД от «сжигания» всех актиноидов из ОЯТ. Если предположить, что все добытые из земли 159 т природного уранового сырья «сгорели», например, в замкнутом топливном цикле реакторов на быстрых нейтронах, и трансмутированы ^{230}Th и ^{226}Ra , то время достижения РЭ увеличивается примерно до 600 лет. Согласно [20] в одной тонне природного урана содержится 0,36 г ^{226}Ra и 16,9 г ^{230}Th . Соответственно, в 159 тоннах природного уранового сырья содержится 57,2 г ^{226}Ra и 2,69 кг ^{230}Th . Трансмутация столь малых количеств не представляет существенной трудности и может быть осуществлена в ЗТЦ БР.

В последних двух случаях цезий и стронций от ПД не отделялись. На момент отделения всех основных актинидов от ОЯТ ^{137}Cs и ^{90}Sr с их дочерними нуклидами дают вклад 88,2 % в активность, 77,5 % в энерговыделение и 90 % в ПБО. Если из РАО дополнительно удалить стронций и цезий, то радиационная эквивалентность всех оставшихся ПД и остатков актинидов достигалась бы через 75 лет и 150 лет выдержки 21,9 т ПД и 150 т ПД соответственно. Иными словами, если в захораниваемые РАО не попадают элементы от урана до кюрия, а также цезий и стронций и трансмутируются сопутствующие природному урану торий и радий, то радиационная эквивалентность достигается при полном сгорании всего объема добытого уранового сырья за время выдержки РАО примерно 150 лет.

Таким образом, в рассмотренном численном примере радиационные характеристики ОЯТ ВВЭР достигают эквивалентности с радиационными характеристиками потребленного уранового сырья через 90 тыс. лет выдержки. При удалении из ОЯТ плутония время достижения РЭ уменьшается до 3 000 лет, если извлечь и америций – РЭ снижается до 250 лет. Если из ОЯТ извлечь еще и кюрий, нептуний и уран, то время достижения РЭ практически не изменится и будет составлять примерно 250 лет. Если из ОЯТ извлечены плутоний и америций, а остальные актиниды остались, то после выдержки примерно 700 лет начинается рост ПБО. Он достигает максимума примерно через 250 тыс. лет и по величине в максимуме примерно в 3 раза ниже, чем ПБО потребленного уранового сырья. Далее идет падение. Если из ОЯТ извлечь еще и уран – роста ПБО не будет. Если из ОЯТ извлечь плутоний, америций и нептуний, а кюрий не извлекать, то это дает рост ПБО при выдержке 700–1 000 лет примерно в 10 раз по причине распада изотопов кюрия в изотопы плутония. Если все актиниды

из состава ОЯТ ВВЭР будут трансмутированы (переведены в продукты деления, например, в составе топлива быстрых реакторов), то в начальный период выдержки (до 100 лет) ПБО РАО (продуктов деления) вырастет примерно в 20 раз, однако время достижения РЭ увеличится незначительно – с 250 лет до 380 лет. Т. е. время достижения РЭ для всего объема ОЯТ уменьшится с 90 тысяч лет до 380 лет для всего объема продуктов деления от «сжигания» актинидов из ОЯТ. В этом случае предполагается, что цезий, стронций, технеций и йод от ПД не отделяются. Если все добытые из земли 159 т природного уранового сырья, использованные для изготовления топлива ВВЭР, «сгорели», например, в замкнутом топливном цикле реакторов на быстрых нейтронах, а также трансмутированы ^{230}Th и ^{226}Ra , то время достижения РЭ увеличивается примерно до 600 лет. Если из всей массы образовавшихся в этом случае ПД будут удалены ^{137}Cs и ^{90}Sr с их дочерними нуклидами, то время достижения радиационной эквивалентности уменьшится до 150 лет.

В результатах указанных выше заключений предполагалось, что из ОЯТ удаляются полностью указанные элементы. Это «верхняя, наиболее

оптимистическая» оценка длительности выдержки до достижения радиационной эквивалентности.

Выводы

В недавно опубликованном Техдоке МАГАТЭ [23] сделаны выводы:

Использование ЗЯТЦ на базе РБН позволяет:

- снизить радиотоксичность РАО в 100–200 раз;
- сократить время выдержки РАО с более чем 100 000 лет до менее чем 1 000 лет.

Эти выводы находятся в хорошем согласии с результатами исследований радиационной (радиологической) эквивалентности, представленных ранее в наших работах. Поэтому вопрос о достижимости радиационной (радиологической) эквивалентности РАО и природного уранового сырья при ЗЯТЦ на базе РБН, поставленный в статье [1], уже по сути снят с рассмотрения. Вместе с тем, практическая реализация достижения радиационной (радиологической) эквивалентности является сложной комплексной задачей, которая требует безусловно отдельного рассмотрения.

Литература

1. Кудрявцев Е. Г., Шарафутдинов Р. Б., Курындин А. В., Шаповалов А. С. К вопросу о достижимости радиационной (радиологической) эквивалентности радиоактивных отходов и природного урана // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 4 (106). С. 73–83. DOI 10.26277/SECNRS.2022.106.4.006.
2. Иванов В. К., Лопаткин А. В., Меняйло А. Н., Спирин Е. В., Чекин С. Ю., Ловачев С. С., Корело А. М., Соломатин В. М. Достижимость радиологической эквивалентности в ЗЯТЦ на базе БР с учетом факторов неопределенности сценариев развития ядерной энергетики в России до 2100 г. Часть 1. Мощность ТР и БР // Радиация и риск. 2021. Т. 30. № 2. С. 62–76. DOI 10.21870/0131-3878-2021-30-2-62-76.
3. Ivanov V. K., Chekin S. Yu., Lopatkin A. V., Menyajlo A. N., Maksioutov M. A., Tumanov K. A., Kashcheeva P. V., Lovachev S. S. Assessment of Radiological Hazard of Radioactive Waste Using Effective or Organ Doses: How This May Affect Final Waste Disposal // Health Physics. 2022. V. 122. N. 3. P. 402–408. DOI 10.1097/HP.0000000000001511.
4. Иванов В. К. Достичь радиоэквивалентности // Атомный эксперт. 2020. № 4 (81). С. 30–35.
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Ann. ICRP. 2007. V. 37. N 2–4. P. 1–332.
6. Assessment of prospective cancer risks from occupational exposure to ionizing radiation. IAEA-TECDOC-1985. Vienna: IAEA, 2021.
7. Eckerman K. F., Leggett R. W., Nelson C. B., Puskin J. S., Richardson A. C. B. Federal Guidance Report 13. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. EPA 402-C-99-001. Oak Ridge National Laboratory. Office of radiation and indoor air United States Environmental Protection Agency. Washington, DC 20460, 1999.
8. Ivanov V. K., Spirin E. V., Menyajlo A. N., Chekin S. Y., Lovachev S. S., Korelo A. M., Tumanov K. A., Solomatin V. M. Evaluation of Migration Radiological Equivalence for Dual Component Nuclear Waste in a Deep Geological Repository // Health Physics. 2021. V. 121. N 3. P. 193–201. DOI 10.1097/HP.0000000000001464.
9. Иванов В. К., Спирин Е. В., Лопаткин А. В., Меняйло А. Н., Чекин С. Ю., Соломатин В. М., Корело А. М., Туманов К. А. Соотношение радиационно-обусловленных потенциальных канцерогенных

рисков ОЯТ реактора ВВЭР-1000 и РАО реактора БРЕСТ-1200 при выработке 1 ГВт*год электроэнергии. Часть 2. Радиологическая миграционная эквивалентность // Радиация и риск. 2022. Т. 31. № 2. С. 5–20. DOI 10.21870/0131-3878-2022-31-2-5-20.

10. Magill J., Berthou V., Haas D., Galy J., Schenkel R., Wiese H.-W., Heusener G., Tommasi J., Youinou G. Impact limits of partitioning and transmutation scenarios on the radiotoxicity of actinides in radioactive waste // Nucl. Energ. 2003. V. 42. N 5. P. 263–277.

11. Radionuclide retention in geologic media. Workshop Proceedings, Oskarshamn, Sweden, 7–9 May 2001. OECD/NEA Report No. 3061. Nuclear Energy Agency, 2002. 269 p.

12. Physics and safety of transmutation systems: a status report. OECD/NEA Report No. 6090. Nuclear Energy Agency, 2006. 120 p.

13. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 г. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2019. 324 с.

14. Крышев И. И., Рязанцев Е. П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАт, 2010. 496 с.

15. Радиоактивность районов АЭС / Под ред. И. И. Крышева. М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1991. 126 с.

16. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / Под общей ред. И. И. Линге и И. И. Крышева. М.: «САМ полиграфист», 2015. 296 с.

17. Адамов Е. О., Ганев И. Х., Орлов В. В. Достижение радиационной эквивалентности при обращении с радиоактивными отходами ядерной энергетики // Атомная энергия. 1992. Т. 73. Вып. 1. С. 44–50.

18. Адамов Е. О., Ганев И. Х., Лопаткин А. В., Муратов В. Г., Орлов В. В. Влияние трансмутационного топливного цикла на достижение радиационной эквивалентности высокоактивных отходов и урана ядерной энергетике России // Атомная энергия. 1996. Т. 81. Вып. 6. С. 409–415.

19. Габараев Б. А., Ганев И. Х., Лопаткин А. В., Муратов В. Г., Орлов В. В., Смирнов В. Г. Обращение с облученным топливом РБМК-1000 и ВВЭР-1000 при развитии ядерной энергетики // Атомная энергия. 2001. Т. 90. Вып. 2. С. 121–132.

20. Габараев Б. А., Ганев И. Х., Лопаткин А. В. Потенциальная биологическая опасность урана, используемого в ядерном топливном цикле // Атомная энергия. 2004. Т. 96. Вып. 6. С. 462–468.

21. Лопаткин А. В., Орлов В. В. Влияние спектра нейтронов на характеристики трансмутационных цепочек Np, Am и Cm // Атомная энергия. 2006. Т. 100. Вып. 6. С. 452–458.

22. Forrest R. A., Sublet J.-Ch. FISPACT 4. User manual. UKAEA FUS 287. 1995.

23. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles. A preliminary study. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.7. Vienna: IAEA, 2019.

References

1. Kudryavtsev E. G., Sharafutdinov R. B., Kuryndin A. V., Shapovalov A. S. K voprosu o dostizhimosti radiatsionnoy (radiologicheskoy) ekvivalentnosti radioaktivnykh otkhodov i prirodnogo urana [Achievability of radiation (radiological) equivalence of radioactive waste and natural uranium]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety*, 2022, no. 4 (106), pp. 73–83. [in Russian]. DOI 10.26277/SECNRS.2022.106.4.006.

2. Ivanov V. K., Lopatkin A. V., Menyajlo A. N., Spirin E. V., Chekin S. Yu., Lovachev S. S., Korelo A. M., Solomatin V. M. Dostizhimost' radiologicheskoy ekvivalentnosti v ZYaTTs na baze BR s uchetom faktorov neopredelennosti stsenariyev razvitiya yadernoy energetiki v Rossii do 2100 g. Chast' 1. Moshchnost' TR i BR [Achievability of radiological equivalence associated with closed nuclear fuel cycle with fast reactors: impact of uncertainty factors in scenarios of Russian nuclear power development through to 2100. Part 1. Fast and thermal reactors]. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 62–76. [in Russian]. DOI 10.21870/0131-3878-2021-30-2-62-76.

3. Ivanov V. K., Chekin S. Yu., Lopatkin A. V., Menyajlo A. N., Maksoutov M. A., Tumanov K. A., Kashcheeva P. V., Lovachev S. S. Assessment of Radiological Hazard of Radioactive Waste Using Effective or Organ Doses: How This May Affect Final Waste Disposal. *Health Physics*, 2022, vol. 122, no. 3, pp. 402–408. DOI 10.1097/HP.0000000000001511.

4. Ivanov V. K. Dostich' radioekvivalentnosti [Achieve radiological equivalence]. *Atomnyy ekspert – Atomic Expert*, 2020, no. 4 (81), pp. C. 30–35. [in Russian].
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 2–4, pp. 1–332.
6. Assessment of prospective cancer risks from occupational exposure to ionizing radiation. IAEA-TECDOC-1985. Vienna, IAEA, 2021.
7. Eckerman K. F., Leggett R. W., Nelson C. B., Puskin J. S., Richardson A. C. B. Federal Guidance Report 13. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. EPA 402-C-99-001. Oak Ridge National Laboratory. Office of radiation and indoor air United States Environmental Protection Agency. Washington, DC 20460, 1999.
8. Ivanov V. K., Spirin E. V., Menyajlo A. N., Chekin S. Y., Lovachev S. S., Korelo A. M., Tumanov K. A., Solomatin V. M. Evaluation of Migration Radiological Equivalence for Dual Component Nuclear Waste in a Deep Geological Repository. *Health Physics*, 2021, vol. 121, no. 3, pp. 193–201. DOI 10.1097/HP.0000000000001464.
9. Ivanov V. K., Spirin E. V., Lopatkin A. V., Menyajlo A. N., Chekin S. Yu., Solomatin V. M., Korelo A. M., Tumanov K. A. Sootnosheniye radiatsionno-obuslovlennykh potentsial'nykh kantserogennykh riskov OYaT reaktora VV·ER-1000 i RAO reaktora BREST-1200 pri vyrobotke 1 GVt*god elektroenergii. Chast' 2. Radiologicheskaya migratsionnaya ekvivalentnost' [Correlation between potential radiation-induced carcinogenic risks associated with WWER-1000 spent nuclear fuel and BREST-1200 radiation waste in case of annual generation of 1 GW of electricity. Part 2. Radiological migration equivalence]. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2022, vol. 31, no. 2, pp. 5–20. [in Russian]. DOI 10.21870/0131-3878-2022-31-2-5-20.
10. Magill J., Berthou V., Haas D., Galy J., Schenkel R., Wiese H.-W., Heusener G., Tommasi J., Youinou G. Impact limits of partitioning and transmutation scenarios on the radiotoxicity of actinides in radioactive waste. *Nucl. Energ.*, 2003, vol. 42, no. 5, pp. 263–277.
11. Radionuclide retention in geologic media. Workshop Proceedings, Oskarshamn, Sweden, 7–9 May 2001. OECD/NEA Report No. 3061. Nuclear Energy Agency, 2002. 269 p.
12. Physics and safety of transmutation systems: a status report. OECD/NEA Report No. 6090. Nuclear Energy Agency, 2006. 120 p.
13. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2018 g. Ezhegodnik [Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2018. Yearbook]. Obninsk, RPA “Typhoon, 2019. 324 p. [in Russian].
14. Kryshev I. I., Ryazantsev E. P. Ekologicheskaya bezopasnost' yaderno-energeticheskogo kompleksa Rossii [Environmental safety of the Russian nuclear power complex]. Moscow, IzdAt, 2010. 496 p. [in Russian].
15. Radioaktivnost' rayonov AES [Radioactivity of NPP areas]. Ed.: I. I. Kryshev. Moscow, I. B. Kurchatov IAE, 1991. 126 p. [in Russian].
16. Radioekologicheskaya obstanovka v regionakh raspolozheniya predpriyatij Rosatoma [Radioecological situation in the regions where Rosatom enterprises are located]. Eds.: I. I. Linge and I. I. Kryshev. Moscow, “SAM poligrafist”, 2015. 296 p. [in Russian].
17. Adamov E. O., Ganev I. Kh., Orlov V. V. Dostizheniye radiatsionnoy ekvivalentnosti pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami yadernoy energetiki [Achieving radiation equivalence in the management of radioactive waste from nuclear power]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 1992, vol. 73, no. 1, pp. 44–50. [in Russian].
18. Adamov E. O., Ganev I. Kh., Lopatkin A. V., Muratov V. G., Orlov V. V. Vliyaniye transmutatsionnogo toplivnogo tsikla na dostizheniye radiatsionnoy ekvivalentnosti vysokoaktivnykh otkhodov i urana yadernoy energetike Rossii [Influence of the transmutation fuel cycle on achieving the radiation equivalence of high-level waste and uranium to the Russian nuclear power industry]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 1996, vol. 81, no. 6, pp. 409–415. [in Russian].
19. Gabarayev B. A., Ganev I. Kh., Lopatkin A. V., Muratov V. G., Orlov V. V., Smirnov V. G. Obrashcheniye s obluchennym toplivom RBMK-1000 i VV·ER-1000 pri razvitii yadernoy energetiki [Handling irradiated RBMK-1000 and VVER-1000 fuel in the development of nuclear power engineering]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2001, vol. 90, no. 2, pp. 121–132. [in Russian].
20. Gabarayev B. A., Ganev I. Kh., Lopatkin A. V. Potentsial'naya biologicheskaya opasnost' urana, ispol'zuyemogo v yadernom toplivnom tsikle [Potential biohazard of uranium used in the nuclear fuel cycle]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2004, vol. 96, no. 6, pp. 462–468. [in Russian].

21. Lopatkin A. V., Orlov V. V. Vliyaniye spektra neytronov na kharakteristiki transmutatsionnykh tseпочek Np, Am i Cm [Influence of the neutron spectrum on the characteristics of Np, Am, and Cm transmutation chains]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2006, vol. 100, no. 6, pp. 452–458. [in Russian].
22. Forrest R. A., Sublet J.-Ch. FISPACT 4. User manual. UKAEA FUS 287. 1995.
23. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles. A preliminary study. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.7. Vienna, IAEA, 2019.

Сведения об авторах

Иванов Виктор Константинович, главный радиоэколог АО «Прорыв» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 7).

Лопаткин Александр Викторович, научный руководитель работ по радиационной эквивалентности АО «Прорыв» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 7).

Спирин Евгений Викторович, главный научный сотрудник АО «Прорыв» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 7).

Соломатин Владимир Михайлович, начальник отдела АО «Прорыв» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 7).

Authors credentials

Ivanov Viktor Konstantinovich, Chief Radioecologist, JSC “Proryv” (2/8, bld. 7, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: ivk@proryv2020.ru.

Lopatkin Alexander Viktorovich, Scientific Supervisor on Radiation Equivalence, JSC “Proryv” (2/8, bld. 7, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: lav@proryv2020.ru.

Spirin Evgeniy Viktorovich, Chief Researcher, JSC “Proryv” (2/8, bld. 7, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: sev@proryv2020.ru.

Solomatin Vladimir Mikhailovich, Head of Department, JSC “Proryv” (2/8, bld. 7, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: svm@proryv2020.ru.

Для цитирования

Иванов В. К., Лопаткин А. В., Спирин Е. В., Соломатин В. М. Радиационная (радиологическая) эквивалентность РАО и природного уранового сырья: технология обеспечения безопасности нынешнего и будущих поколений // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2023. № 2 (108). С. 31–41. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.002.

For citation

Ivanov V. K., Lopatkin A. V., Spirin E. V., Solomatin V. M. Radiation (radiological) equivalence of radioactive waste and natural uranium ore materials: safety technology for present and future generations. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2023, No. 2 (108), pp. 31–41. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.002.

