



УДК: 621.039.58, 008.2, 001.891.34

DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.006

© 2022. Все права защищены.

## К ВОПРОСУ О ДОСТИЖИМОСТИ РАДИАЦИОННОЙ (РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ) ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ПРИРОДНОГО УРАНА

Кудрявцев Е. Г.\*, канд. хим. наук (egkudryavtsev@mail.ru),  
Шарафутдинов Р. Б.\*\*, канд. техн. наук (charafoutdinov@secnrs.ru),  
Курындин А. В.\*\*, канд. техн. наук (kuryndin@secnrs.ru),  
Шаповалов А. С.\*\* (shapovalov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2022 г.

### Аннотация

*В научной периодике по тематике перспективного развития атомной энергетики в качестве постулата вводится принцип радиационной эквивалентности природного уранового сырья и РАО, образующихся при переработке отработавшего ядерного топлива (далее – принцип радиоэквивалентности). При этом данный принцип используется как один из аргументов в пользу преимущественного использования АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, поскольку, как утверждает авторы соответствующих публикаций, использование реакторов на быстрых нейтронах позволяет достичь большей радиационной эквивалентности исходного природного уранового сырья и РАО, образующихся при переработке отработавшего ядерного топлива, чем это достижимо при преимущественном использовании АЭС с реакторами на тепловых нейтронах.*

*В настоящей статье рассмотрены основные теоретические и практические положения принципа радиоэквивалентности, показана недостаточность использования аргументации, основанной на данном принципе, как основы для формулирования вывода о необходимости преимущественного использования реакторов на быстрых нейтронах.*

► **Ключевые слова:** радиационная безопасность, радиоактивные отходы, закрытый ядерный топливный цикл, радиационная эквивалентность, реакторы на быстрых нейтронах.

Статья публикуется в порядке дискуссии. Редакция журнала будет признательна авторам статей с альтернативными мнениями по данному вопросу.

\* Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), Москва, Россия.

\*\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

## ACHIEVABILITY OF RADIATION (RADIOLOGICAL) EQUIVALENCE OF RADIOACTIVE WASTE AND NATURAL URANIUM

Kudryavtsev E. G.\*; Ph. D.,  
Sharafutdinov R. B.\*\*; Ph. D.,  
Kuryndin A. V.\*\*; Ph. D.,  
Shapovalov A. S.\*\*

Article is received on December 16, 2022

### *Abstract*

*In scientific periodicals on the subject of the prospective development of nuclear energy, the principle of radiation equivalence of natural uranium and radioactive waste generated during the processing of spent nuclear fuel (hereinafter referred to as the principle of radioequivalence) is introduced as a postulate.*

*At the same time, this principle is used as one of the arguments in favor of the predominant use of nuclear power plants with fast neutron reactors. The authors of relevant publications state that the use of fast neutron reactors makes it possible to achieve greater radioequivalence of the initial natural uranium and radioactive waste generated during the processing of spent nuclear fuel than it is achievable with the predominant use of nuclear power plants with thermal neutron reactors.*

*This paper discusses the main and practical provisions of the radioequivalence principle, shows the insufficiency of using arguments based on this principle as a basis to formulate a conclusion about the need for the predominant use of fast neutron reactors.*

► **Keywords:** radiation safety, radioactive waste, closed nuclear fuel cycle, radiation equivalence, fast neutron reactors.

\* Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service, Moscow, Russia.

\*\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

## Введение

Документами стратегического планирования Российской Федерации [1–2] предусмотрено увеличение генерации атомной электроэнергии. Для достижения данной цели [1–2] запланированы ввод в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС с реакторами на тепловых и на быстрых нейтронах при значительном количественном преимуществе выработки электроэнергии на реакторах на тепловых нейтронах, а также развитие мощностей по переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Проблема обеспечения приемлемых характеристик большого количества радиоактивных отходов (РАО), неизбежно образующихся при переработке ОЯТ АЭС, учитывается в рамках деятельности проектного направления «Прорыв» Госкорпорации «Росатом». При этом достижение радиационной (радиологической) эквивалентности РАО от переработки ОЯТ АЭС и так называемого природного уранового сырья (далее – радиоэквивалентность), потребляемого атомной энергетикой, поставлено данным проектным направлением в качестве приоритета и базового принципа [3], определяющего требования к объемам и качеству (радионуклидному составу образующихся РАО) переработки ОЯТ. На основе постулата о возможности достижения радиоэквивалентности разрабатываются сложные технологии радиохимической переработки, включающие операции глубокого извлечения всех трансурановых элементов и фракционирования жидких РАО с выделением короткоживущих радионуклидов (например,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ), направленные на достижение радиоэквивалентности.

В настоящей статье рассмотрены основные теоретические и практические положения принципа радиоэквивалентности, а также вопрос достаточности аргументации [4–5] в пользу достижимости радиоэквивалентности и формулирования на ее основе вывода о необходимости преимущественного использования реакторов на быстрых нейтронах.

### Основные практические и теоретические положения принципа радиоэквивалентности

В [4–5] провозглашается принцип радиоэквивалентности, заключающийся в том, что РАО, образовавшиеся при переработке ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах, существенно быстрее станут радиационно (радиологически)<sup>1</sup> эквивалентны природному урановому сырью, из которого изготовлено

ядерное топливо, чем РАО, образовавшиеся при переработке ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах.

Из [4–5] следует, что принцип радиоэквивалентности базируется на следующих теоретических положениях:

- необходимо определять и сравнивать интервалы времени, за которые в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) с преимущественным использованием реакторов на тепловых нейтронах и цикле с преимущественным использованием реакторов на быстрых нейтронах будет достигнуто равенство величин пожизненного атрибутивного риска (Lifetime Attributable Risk – LAR) или ожидаемой эффективной дозы (ОЭД), характерные для РАО и для природного уранового сырья (далее – времена достижения радиоэквивалентности);

- для подтверждения достижимости радиоэквивалентности учитываются LAR (ОЭД), характерные для РАО, образовавшихся на стадии эксплуатации реакторов и после нее.

Также в основе принципа радиоэквивалентности [4–5] лежат следующие практические положения:

- потребное количество природного уранового сырья в ЯТЦ с преимущественным использованием реакторов на тепловых нейтронах и цикле с преимущественным использованием реакторов на быстрых нейтронах не учитывается при определении интервалов времени достижения радиоэквивалентности;

- вклад в LAR, обусловленный обедненным U, фабрикацией U-Pu топлива не учитывается, значимой является только активность, образовавшаяся на стадии эксплуатации реакторов и после нее.

Кроме того, авторами [4–5] не уточняется, какова доля (количество) реакторов на быстрых нейтронах, для которых при определении LAR (ОЭД) учитывается попадание в РАО Pu от технологических потерь при переработке их ОЯТ.

<sup>1</sup> В общем случае под радиационной (радиологической) эквивалентностью понимается равенство доз, обусловленных воздействием на человека сред и (или) материалов, содержащих радиоактивные вещества, различающиеся по активности и (или) радионуклидному составу. Понятие радиоэквивалентности используется, например, при определении количества РАО от переработки облученных тепловыделяющих сборок, подлежащих возврату в государство их поставщика [6], а также при определении уровней аварий или происшествий по Международной шкале ядерных и радиологических событий (ИНЕС) [7].

На основании применения принципа радиоэквивалентности в [4–5] делается вывод о том, что преимущественное использование реакторов на быстрых нейтронах позволит достичь существенно меньшей долговременной потенциальной радиационной опасности образовавшихся РАО, по сравнению с потенциальной опасностью РАО, которые образуются при преимущественном использовании реакторов на тепловых нейтронах.

### Рассмотрение теоретических положений принципа радиоэквивалентности

Применение LAR для обоснования выбора варианта реализации ЯТЦ, согласно [4–5], предусмотрено в [8]. В [4–5] утверждается, что, согласно [8], дозы в органах и тканях (или органные дозы, на которых основаны оценки LAR), а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облученных индивидуумов. При этом необходимость применения органных доз (эквивалентных доз) аргументируется в [9] тем, что использование эффективных доз недопустимо, поскольку эффективная доза не позволяет делать различий между отдельными органами, а риски, полученные исходя из эффективной и соответствующей органной (эквивалентной) дозы, могут существенно различаться.

Использование в рамках принципа радиоэквивалентности 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. Но эти дозы, как следует из [8], применяются для эпидемиологических или детальных ретроспективных оценок, которые не относятся к тематике выбора того или иного варианта развития ЯТЦ. Таким образом, использование величины LAR для сравнения характеристик безопасности ЯТЦ представляется избыточным по отношению к задаче сравнения ЯТЦ по характерным для них эффективным индивидуальным или даже коллективным дозам, поскольку дополнительно учитывает только характеристики, специфичные для облученных индивидуумов, а также поскольку нет оснований предполагать, что в ЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах данные характеристики будут отличны от таковых

в ЯТЦ с реакторами на тепловых нейтронах. Тем не менее следует признать, 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, как это сделано в [4–5]. Также важно обратить внимание на то, что в [3–4, 9] не объяснено, чем именно обусловлено полученное в [9] различие в показателях LAR и эффективной дозы, характерных для РАО ЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах и ЯТЦ с реакторами на тепловых нейтронах.

Также при применении принципа радиоэквивалентности в [4–5] не учитывается, что только часть активности, содержащейся в РАО, способна попасть в среду обитания человека, поступить в организм и оказать радиационное воздействие. При этом радиационное воздействие, обусловленное выбросами и сбросами радиоактивных веществ на соответствующих стадиях ЯТЦ, авторами концепции радиоэквивалентности исключено из рассмотрения.

По мнению авторов настоящей статьи, характеристики безопасности ЯТЦ не могут быть сведены только к стадии захоронения РАО, что также следует из работ [10–11], а решение задачи выбора варианта реализации ЯТЦ должно основываться на сравнении характеристик безопасности всех стадий ЯТЦ, начиная от добычи природного U, используемого для изготовления ядерного топлива, и заканчивая завершающей стадией ЯТЦ, на которой осуществляется переработка ОЯТ и захоронение РАО, образовавшихся в ЯТЦ. Такой подход предложен Международной комиссией по радиационной защите [8] и применяется в международной практике [12]. Применение данного подхода в отношении ЯТЦ, реализация которых планируется в Российской Федерации, свидетельствует о том, что опасность, обусловленную радиационным воздействием, представляет не только стадия захоронения РАО, но и (причем в большей степени) выбросы (сбросы) радиоактивных веществ в окружающую среду на стадиях добычи U, эксплуатации АЭС и переработки ОЯТ [13]. Таким образом, сравнение ЯТЦ на основании концепции радиоэквивалентности может быть непредставительным и не учитывает все существенные источники радиационного воздействия.

Если задаться вопросом сравнения характеристик безопасности, обусловленных захоронением РАО, образовавшихся в ЯТЦ реакторов на быстрых

нейтронах и реакторов на тепловых нейтронах, то здесь принцип радиоэквивалентности не учитывает подходы к оценке безопасности при захоронении РАО, установленные федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии (ФНП). Так, оценки LAR, выполненные в [4–5], рассматриваются в качестве величин, полностью характеризующих радиационную опасность РАО, образованных при использовании природного U в ЯТЦ. Однако система требований ФНП, регламентирующих безопасное обращение с РАО, базируется на более реалистичном подходе, обусловленном положениями ст. 12 [14], в соответствии с которыми захоронение высокоактивных и среднеактивных долгоживущих РАО осуществляется в пунктах глубинного захоронения РАО, обеспечивающих их локализацию, а захоронение низкоактивных и среднеактивных короткоживущих РАО осуществляется в пунктах приповерхностного захоронения РАО. В связи с этим оценка безопасности такого ключевого этапа обращения с РАО, как захоронение, является комплексной и должна учитывать свойства упаковки РАО, инженерной конструкции пункта захоронения РАО и их отдельных частей или элементов природного геологического образования, препятствующего распространению радионуклидов в окружающую среду. Данный подход и положен в основу требований [15–17], но не учтен при выполнении оценок и формулировании выводов [4–5].

### Рассмотрение практических положений принципа радиоэквивалентности

Приведенный в [5] основной сценарий развития атомной энергетики России простирается за горизонты планирования, заданные [1–2], и вплоть до 2100 г. предполагает:

- продолжение эксплуатации АЭС с реакторами на тепловых нейтронах, включая РБМК-1000, до тех пор, пока не будут израсходованы 540 000 т природного U (по расчетам, при этом будет наработано 84 000 т ОЯТ);
- переработку ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах с использованием извлекаемого Pu для изготовления свежего топлива реакторов на быстрых нейтронах темпами ввода реакторов на быстрых нейтронах 1 блок/год и полным замещением к 2100 г. тепловых реакторов с достижением общей установленной мощности реакторов на быстрых нейтронах в 100 ГВт (эл.);

- извлечение U, Pu, Sr, Cs, Tc, I и минорных актинидов на 99,9 %, с тем чтобы в наработанных 7 500 т долгоживущих и высокоактивных РАО содержалось только 0,1 % от исходного количества этих радионуклидов, и именно для этих долгоживущих РАО доказываемость достижимости радиоэквивалентности с исходным урановым сырьем, что в дальнейшем исключает необходимость их глубокой геологической изоляции от биосферы. По-видимому, остальные относительно короткоживущие высокоактивные и среднеактивные РАО от переработки ОЯТ направляются на длительное контролируемое хранение (более 300 лет);

- вовлечение регенерированных U, Pu и минорных актинидов (Am, Cm) в ЯТЦ реакторов на быстрых нейтронах с целью их полной трансмутации.

Рассмотрим вопрос радиоактивности так называемого природного уранового сырья и соответствующих рисков, характерных для обращения с ним. Как следует из публикации [5], вклад самих изотопов природного U ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) в ОЭД облучения населения (1 мЗв) от такого сырья составляет 0,023, то есть всего 2,3 %. Вся остальная активность (97,7 %) связана с дочерними продуктами распада U, преимущественно с изотопами  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$ . Эта ОЭД в 1 мЗв, соответствующая законодательно установленному пределу годовой эффективной дозы [18], и принята в качестве реперной величины для сопоставления с дозами, ожидаемыми от компонентов РАО атомной энергетики.

Первое, что следует отметить, – это необоснованное утверждение о вовлечении в ЯТЦ природного уранового сырья. Если при шахтной добыче урановой руды и ее переработке следует учитывать воздействие всего набора радионуклидов природного уранового сырья на персонал горнодобывающего предприятия в рамках профессионального облучения, то конечный продукт, отправляемый на дальнейшие переделы ЯТЦ, – это достаточно чистый U, а все остальные радионуклиды (кроме Rn) иммобилизованы и изолированы от населения и окружающей среды в хвостохранилищах. Представляется также, что изотоп инертного газа радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) с периодом полураспада 3,8 дня крайне сложно рассматривать в качестве компонента природного уранового сырья, вовлекаемого в переделы ЯТЦ атомной энергетики, и фактора радиационного риска для населения при пероральном поступлении. А при добыче U методом подземного выщелачивания воздействие дочерних продуктов распада U на персонал и население практически полностью исключено в связи с особенностями этой технологии. Несмотря на очевидность

этих фактов, в публикации [5] потенциальное радиационное воздействие природного уранового сырья легко переводится в дозу от природного U.

Вместе с тем, согласно [19], годовая эффективная доза облучения критической группы населения при всех видах обращения с РАО до их захоронения не должна превышать 0,1 мЗв, а после захоронения – 0,01 мЗв.

Для того, чтобы население получило дозу в 0,01 мЗв при пероральном поступлении U из РАО, необходимо допустить его круглогодичную концентрацию в питьевой воде на уровне предельно допустимой концентрации (15 мкг/л) [20], что, очевидно, недопустимо. Если же взять допустимую концентрацию  $^{238}\text{U}$  в питьевой воде на уровне вмешательства по [20], то она установлена равной 3 Бк/л или  $\sim 240$  мкгU/л, для смеси  $^{238}\text{U} + ^{234}\text{U}$  это будет вдвое меньше  $\sim 120$  мкг/л. Расчетная ОЭД в этом случае составит 0,15 мЗв/год. Это говорит только о том, что химическая токсичность U, как тяжелого металла, на порядок выше его радиационной токсичности.

Кроме того, 1 т природного U, идущего в атомную энергетику с АЭС на тепловых нейтронах, при существующих технологиях обогащения превращается в  $\sim 0,84$  т обедненного U ( $U_{dep}$ ) и в  $\sim 0,16$  т U обогащенного по  $^{235}\text{U}$ , который идет на изготовление свежего ядерного топлива для АЭС. После выгрузки ОЯТ из реакторов на тепловых нейтронах и радиохимической переработки, с учетом технологических потерь и выгорания, образуется  $\sim 0,15$  т регенерированного U ( $U_{reg}$ ), радиоактивность которого будет определяться цепочкой распада новых изотопов  $^{232}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 72$  года) и  $^{236}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 2 \cdot 10^7$  лет). Таким образом, как бы израсходованные атомной энергетикой к 2100 г. 540 000 т  $U_{nat}$  по модели, предложенной в [5], замещаются 456 000 т  $U_{dep}$  и 80 000 т  $U_{reg}$  (с учетом выгорания  $^{235}\text{U}$  и технологических потерь). Усредненная ОЭД этих продуктов ЯТЦ ( $U_{dep} + U_{reg}$ ), которые в ряде зарубежных стран рассматриваются как РАО, практически на 100 % соответствует ОЭД исходного природного U, то есть эквивалентность радиационной опасности урановых потоков вполне сохраняется.

Остановимся теперь только на одном, но принципиально важном компоненте высокоактивных РАО атомной энергетики – на энергетическом Pu. В ходе радиохимической переработки заявленных 84 000 т ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах будет выделено и вовлечено в топливный цикл реакторов на быстрых нейтронах  $\sim 840$  т Pu, исходя из  $\sim 1$  % его среднего содержания в выгружаемом ОЯТ реак-

торов на тепловых нейтронах (хотя в ОЯТ РБМК его существенно меньше 1 %, при высоких выгораниях в ОЯТ ВВЭР может накапливаться и более 1 % Pu). При постулированных в [5] потерях Pu с РАО на уровне 0,1 % в долгоживущие и высокоактивные РАО попадет 840 кг Pu. При внедренных сегодня опробованных технологиях радиохимической переработки ОЯТ АЭС Pu извлекается не более чем на 99,0–99,5 %. Таким образом, реальные потери Pu с различными видами РАО составят до 0,5–1,0 %, а возможность их снижения, в том числе за счет ужесточения режимов растворения топливной матрицы для повышения степени извлечения ядерного материала, включая дополнительную переработку нерастворимых остатков, ограничена коррозионным износом технологического оборудования и повышением содержания Fe, Ni и Cr в жидких РАО.

Если пересчитать 840 кг Pu на объем воды, требуемый для снижения его активности до уровня вмешательства<sup>2</sup> по содержанию в питьевой воде [20], то для обеспечения не превышения уровня вмешательства при полностью растворенных 840 кг Pu потребуется  $\sim 3\ 800$  км<sup>3</sup> воды. Можно отметить, что при периоде полураспада  $^{239}\text{Pu}$  в  $T_{1/2} = 24\ 100$  лет, этот наглядный показатель радиотоксичности на горизонте до 1 000 лет останется практически неизменным.

Для выполнения аналогичных оценок для природного U, пренебрегая его химической токсичностью, принимаем уровень вмешательства равным 3 Бк/л [20] по  $^{238}\text{U} + ^{234}\text{U}$  или  $\sim 0,12$  мгU/л. Для разбавления исходных 540 000 т природного U до уровня вмешательства потребуется  $\sim 4\ 500$  км<sup>3</sup> воды. На основании этого можно было бы сделать вывод о том, что полученные результаты свидетельствуют о радиационной эквивалентности рассмотренных количеств РАО и ядерного материала.

Однако рассматриваемая схема ЯТЦ будущей атомной энергетики, заявленная в [4–5], помимо реакторов на тепловых нейтронах, предусматривает ввод в эксплуатацию до 100 ГВт (эл.) мощности реакторов на быстрых нейтронах, топливо которых представляет собой смесь соединений U и Pu, и которые должны стать потребителями 99,9 % Pu, выделенного из ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах.

Базируясь на характеристиках реактора БН-800 в стационарном режиме, можно оценить минимальную годовую перегрузку U-Pu топлива реакторов

<sup>2</sup> Уровень вмешательства для  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  составляет 0,55 Бк/л, что соответствует  $2,2 \cdot 10^{-10}$  г/л.

на быстрых нейтронах в 2,5 т Pu на 1 ГВт (эл.) мощности реактора (без учета первоначальной загрузки реактора). На временном горизонте в 70 лет (2030–2100 гг.) предполагается довести мощности реакторов на быстрых нейтронах до 100 ГВт (эл.) [4–5], что соответствует ~ 1 750 реакторо-лет, и, соответственно, суммарным 4 375 т энергетического Pu, задействованного в замкнутом ЯТЦ реакторов на быстрых нейтронах. Переработка ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах, даже с заявленными и трудно-достижимыми потерями в 0,1 %, означает поступление в долгоживущие и высокоактивные РАО еще 4 375 кг Pu, которые должны быть учтены в обосновании радиоэквивалентности РАО. Исходя из расчетов, аналогичных приведенным выше для Pu из ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах, получаем, что значение радиотоксичности 4 375 кг Pu соответствует ~ 19 800 км<sup>3</sup>, а суммарно с Pu из ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах получим ~ 23 600 км<sup>3</sup>, что никоим образом не свидетельствует о принципиальной достижимости радиационной эквивалентности долгоживущих и высокоактивных РАО и заявленного исходного количества природного U. Очевидно, что наличие в долгоживущих и высокоактивных РАО других радиоактивных элементов, прежде всего изотопов Np, Am и Cm, в еще большей степени делает недостижимой радиационную эквивалентность заявленных количеств долгоживущих и высокоактивных РАО и природного U.

Справедливости ради следует отметить, что несколько тысяч тонн обедненного или регенерированного U в составе U-Pu топлива реакторов на быстрых нейтронах будут «сожжены» дляработки дополнительных количеств Pu и трансмутации минорных актинидов, что незначительно снизит потенциальную радиационную опасность уранового потока замкнутого ЯТЦ.

Еще один аспект рассматриваемой темы связан с вовлечением 4 375 т энергетического Pu в процессы фабрикации U-Pu топлива для заявленного количества реакторов на быстрых нейтронах. Эти технологические процессы также сопровождаются образованием РАО, содержащих в отдельных случаях значительные количества Pu (замена оборудования, печей прокаливания, фильтров и т. п.). Учитывая, что Pu в РАО является федеральной собственностью [14], предприятия по фабрикации U-Pu топлива не будут заинтересованы в глубокой переработке и минимизации количества образующихся РАО. В связи с этим полагая оптимистично, что потери Pu на фабрикации перделе можно оценить

в те же 0,1 %, что удваивает потенциальную радиационную опасность РАО замкнутого ЯТЦ реакторов на быстрых нейтронах, объем воды, необходимый для разбавления РАО с Pu до уровней вмешательства, может быть оценен величиной ~ 43 400 км<sup>3</sup>, что на порядок превышает приведенный выше объем воды, необходимый для разбавления до уровней вмешательства добытого природного U.

Кроме того, в [4–5, 9] не показано, как поведут себя интервалы времени достижения радиационной (радиологической) эквивалентности в ЯТЦ реакторов на быстрых нейтронах и реакторов на тепловых нейтронах при приведении данных оценок к единым условиям сравнения, учитывающим, что потребное количество природного U в ЯТЦ с преимущественным использованием реакторов на быстрых нейтронах и в ЯТЦ с преимущественным использованием реакторов на тепловых нейтронах, существенно различаются. Поэтому количество U, с радиационным (радиологическим) эквивалентом которого нужно сравнивать эквивалент РАО, при преимущественном использовании реакторов на быстрых нейтронах и при преимущественном использовании реакторов на тепловых нейтронах, также должно быть различно.

Отдельный вопрос обсуждаемого сценария развития атомной энергетики Российской Федерации связан с обеспечением безопасности длительного хранения долгоживущих и высокоактивных фракций РАО, образующихся в результате радиохимической переработки ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах и реакторов на быстрых нейтронах, как альтернативного геологическому захоронению варианта обращения с РАО атомной энергетики.

Требования безопасности к пунктам хранения в действующих нормативных документах [21–22] предусматривают, в частности, обеспечение работоспособности защитных барьеров (матрицы, упаковки, сооружения, вентиляции и др.) в течение проектного срока эксплуатации объекта. В настоящее время, как правило, проектный срок эксплуатации пунктов хранения устанавливается не более чем в 50 лет. Далее – комплексное обследование, ремонт или модернизация объекта, обоснование продления срока эксплуатации или вывод объекта из эксплуатации. Таким образом, обоснование безопасности длительной (на сотни лет) эксплуатации пунктов хранения высокоактивных РАО представляется трудноразрешимой задачей, требующей, в том числе, разработки соответствующих нормативных документов.

## Выводы

Основываясь на приведенных выше оценках, можно заключить, что, хотя принцип радиоэквивалентности может использоваться в качестве ценного аналитического инструмента, его следует применять с осторожностью.

Пропагандируемый в [4–5] принцип радиоэквивалентности:

- не учитывает существенные источники радиационного воздействия, например, выбросы и сбросы радиоактивных веществ на различных стадиях ЯТЦ;
- не учитывает удерживающие свойства барьеров на пути распространения радиоактивных

веществ из захороненных РАО к среде обитания человека, что не соответствует современным требованиям ФНП к оценке безопасности пунктов захоронения РАО;

- не обеспечивает единых условий сравнения ЯТЦ с преимущественным использованием реакторов на тепловых нейтронах и ЯТЦ с преимущественным использованием реакторов на быстрых нейтронах.

Таким образом, заявленный в [4–5] принцип радиоэквивалентности недостаточно проработан, а результаты его применения не могут служить единственным основанием для принятия решений о дальнейших направлениях развития ЯТЦ.

## Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р.
2. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2017 № 1209-р.
3. Хомяков Ю. С., Жеребцов А. А., Шадрин А. Ю., Хаперская А. В., Васильев Б. А., Фаракшин М. Р. Программа НИОКР по ЗЯТЦ с использованием БН-800 // Отраслевая конференция «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах»: сб. докладов. Томск, 11–12 октября 2018 г.
4. Иванов В. К., Лопаткин А. В., Меняйло А. Н. и др. 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 (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2021. Т. 30. № 2. С. 62–76. DOI 10.21870/0131-3878-2021-30-2-62-76. EDN ALWJGN.
5. Ivanov V. K., Chekin S. Yu., Lopatkin A. V., Menyajlo A. N., Maksioutov M. A., Tumanov K. A., Kashcheeva P. V. et al. 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. EDN TFSJEB.
6. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по обеспечению безопасности при возврате продуктов переработки облученных тепловыделяющих сборок в государство их поставщика. РБ-092-21: приказ Ростехнадзора от 29.12.2021 № 472.
7. International Atomic Energy Agency. The International Nuclear and Radiological Event Scale. User's Manual 2008 Edition. IAEA, Vienna, 2013.
8. Annals of the ICRP Publication no. 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
9. Иванов В. К. Достичь радиоэквивалентности // Атомный эксперт. 2020. № 4 (81).
10. Давиденко В. Д. Возможность радиационно-эквивалентного захоронения отходов при переработке / В. Д. Давиденко, Н. Н. Пономарев-Степной, В. Ф. Цибульский // Атомная энергия. 2014. Т. 116. № 1. С. 55–56. EDN RWTOZH.
11. Велихов Е. П., Гольцев А. О., Давиденко В. Д. и др. Приемлемость замыкания топливного цикла ядерной энергетики // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. 2021. Т. 44. № 1. С. 5–12. DOI 10.21517/0202-3822-2021-44-1-5-12. EDN TIZZAB.
12. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: a Comparative Study. Radiation Protection. NEA OECD, 2000, 126 p.
13. Курьиндин А. В., Поляков Р. М., Познизов А. В. и др. Комплексный сравнительный анализ безопасности реализации открытого и замкнутого ядерных топливных циклов в Российской Федерации.



Методология и результаты / Труды НТЦ ЯРБ. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2021. – 59 с.: ил. – ISBN 978-5-907011-34-2. – EDN WKRIVV.

14. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ.

15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14: приказ Ростехнадзора от 22.08.2014 № 379.

16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: приказ Ростехнадзора от 15.12.2014 № 572.

17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. НП-100-17: приказ Ростехнадзора от 23.06.2017 № 218.

18. О радиационной безопасности населения: Федер. закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ.

19. Санитарные правила и нормативы. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 № 40.

20. Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47.

21. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла. НП-016-05: постановление Ростехнадзора от 02.12.2005 № 11.

22. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-020-15: приказ Ростехнадзора от 25.06.2015 № 243.

## References

1. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda: utv. Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 09.06.2020 no. 1523-r [Energy Strategy of Russia for the period up to 2035, approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 09.06.2020 no. 1523-r]. 2020.

2. General'naya skhema razmeshcheniya ob'yektov elektroenergetiki do 2035 goda: utv. Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 09.06.2017 № 1209-r [The general scheme for the placement of electric power facilities until 2035, approved by the order of the Government of the Russian Federation dated 09.06.2017 no. 1209-r]. 2017.

3. Khomyakov Yu. S., Zhrebtsov A. A., Shadrin A. Yu., Khaperskaya A. V., Vasil'yev B. A., Farakshin M. R. Programma NIOKR po ZYATTS s ispol'zovaniyem BN-800 [R&D program for CNFC using BN-800]. Sb. dokladov Otrasleyevoy konferentsii "Zamykaniye toplivnogo tsikla yadernoy energetiki na baze reaktorov na bystrykh neytronakh" (11–12 oktyabrya 2018 g.) – Collection of reports of the industry conference "Closing the fuel cycle of nuclear energy based on fast neutron reactors" (October 11–12, 2018), Tomsk, 2018. [in Russian].

4. Ivanov V. K., Lopatkin A. V., Menyaylo A. N., et al. Dostizhimost' radiologicheskoy ekvivalentnosti v ZYATTS na baze BR s uchotom faktorov neopredelonnosti stsenariyev razvitiya yadernoy energetiki v Rossii do 2100 g. Chast' 1. Moshchnost' TR i BR [Achievability of radiological equivalence in the FR-based CNFC taking into account the uncertainty factors of scenarios for the development of nuclear power in Russia up to 2100. Part 1. Capacity of TR and FR]. Radiatsiya i risk – Radiation and risk. 2021. Vol. 30, no. 2, pp. 62–76. [in Russian].

5. Ivanov V. K., Chekin S. Yu., Lopatkin A. V., Menyajlo A. N., Maksoutov M. A., Tumanov K. A., Kashcheeva P. V. et al. 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. EDN TFSJEB.

6. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti pri vozvrate produktov pererabotki obluchennykh teplovydelyayushchikh sborok v gosudarstvo ikh postavshchika" (RB-092-21) [Safety guides in the field of atomic energy use "Recommendations for Ensuring Safety when Returning the Processed Products of Irradiated Fuel Assemblies to their Supplier State" (RB-092-21)]. 2021.

7. International Atomic Energy Agency. The International Nuclear and Radiological Event Scale. User's Manual 2008 Edition. IAEA, Vienna, 2013.
8. Annals of the ICRP Publication no. 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
9. Ivanov V. K. Dostich' radioekvivalentnosti [Achieve radiological equivalence]. Atomnyy ekspert – Atomic Expert, 2020, no. 4 (81). [in Russian].
10. Davidenko V. D. Vozmozhnost' radiatsionno-ekvivalentnogo zakhroneniya otkhodov pri pererabotke [Possibility of radiation-equivalent disposal of waste during processing (Eds Davidenko V. D., Ponomarev-Stepnoy N. N., Tsibul'skiy V. F.)]. Atomnaya energiya – Atomic Energy, 2014, vol. 116, issue 1, pp. 55–56. [in Russian].
11. Velikhov Ye. P., Gol'tsev A. O., Davidenko V. D., et al. Priyemlost' zamykaniya toplivnogo tsikla yadernoy energetiki [The admissibility of the closed fuel cycle of nuclear power engineering]. VANT: seriya "Termoyadernyy sintez" – VANT: series "Nuclear fusion", 2021, vol. 44, issue 1, pp. 5–12. [in Russian].
12. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: a Comparative Study. Radiation Protection. NEA OECD, 2000, 126 p.
13. Kuryndin A. V., Polyakov R. M., Ponizov A. V. et al. (2021). Kompleksnyy sravnitel'nyy analiz bezopasnosti realizatsii otkrytogo i zamknutogo yadernykh toplivnykh tsiklov v Rossiyskoy Federatsii. Metodologiya i rezul'taty [Comprehensive comparative analysis of the safety of the implementation of open and closed nuclear fuel cycles in the Russian Federation. Methodology and results]. Trudy "NTTS YARB". Moscow: SEC NRS. 59 p. [in Russian].
14. Federal'nyy zakon "Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vnesenii izmeneniy v otchel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii" ot 11.07.2011 no. 190-FZ [Federal law "On the management of radioactive waste and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation" dated 11.07.2011 no. 190-FZ]. 2011.
15. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. "Zakhroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti" (NP-055-14) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements" (NP-055-14)]. 2014.
16. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Kriterii priyemlosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhroneniya" (NP-093-14) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Criteria for acceptance of radioactive waste for disposal" (NP-093-14)]. 2014.
17. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov" (NP-100-17) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Requirements for the composition and content of the safety analysis report for radioactive waste disposal sites" (NP-100-17)]. 2017.
18. Federal'nyy zakon ot 09.01.1996 no. 3-FZ "O radiatsionnoy bezopasnosti naseleniya" [Federal law no. 3-FZ of 09.01.1996 "On radiation safety of the population"]. 1996.
19. Sanitarnye pravila i normativy. SP 2.6.1.2612-10 "Osnovnyye sanitarnyye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti (OSPORB-99/2010)" [SP 2.6.1.2612-10 "Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99/2010)"]. 2010.
20. Sanitarnye pravila i normativy. SanPiN 2.6.1.2523-09 "Normy radiatsionnoy bezopasnosti. Sanitarnyye pravila i normativy (NRB-99/2009)" [SanPiN 2.6.1.2523-09 "Radiation safety standards. Sanitary rules and regulations (NRB-99/2009)"]. 2009.
21. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Obshchiye polozheniya obespecheniya bezopasnosti ob'yektov yadernogo toplivnogo tsikla" (NP-016-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "General provisions for ensuring the safety of nuclear fuel cycle facilities" (NP-016-05)]. 2005.
22. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Sbor, pererabotka, khraneniye i konditsionirovaniye tverdykh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti" (NP-020-15) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Collection, processing, storage and conditioning of solid radioactive waste. Safety Requirements" (NP-020-15)]. 2015.

### Сведения об авторах

*Кудрявцев Евгений Георгиевич*, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (2013–2022 гг.) (105066, Москва, ул. А. Лукьянова, д. 4, стр. 1).

*Шарафутдинов Рашет Борисович*, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Курындин Антон Владимирович*, руководитель отделения ядерной и радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Шаповалов Альберт Сергеевич*, начальник отдела аварийной готовности и радиационной защиты отделения ядерной и радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

### Authors credentials

*Kudryavtsev Evgeny Georgievich*, Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (2013–2022) (4, bld. 1, Lukyanova str., Moscow, 105066), e-mail: egkudryavtsev@mail.ru.

*Sharafutdinov Rashet Borisovich*, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

*Kuryndin Anton Vladimirovich*, Head of Nuclear and Radiation Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: kuryndin@secnrs.ru.

*Shapovalov Al'bert Sergeevich*, Head of Division for Emergency Preparedness and Radiation Protection of Nuclear and Radiation Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: shapovalov@secnrs.ru.

### Для цитирования

*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.

### For citation

*Kudryavtsev E. G., Sharafutdinov R. B., Kuryndin A. V., Shapovalov A. S.* Achievability of radiation (radiological) equivalence of radioactive waste and natural uranium. Nuclear and Radiation Safety, 2022, no. 4 (106), pp. 73–83. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.006.

