

РАЗДЕЛ 2

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-3-9-23

УДК 614.876+621.039.76)

Уровни радиологической защиты населения при реализации принципа радиационной эквивалентности: риск-ориентированный подход**Иванов В.К.^{1,2}, Чекин С.Ю.^{1,2}, Меняйло А.Н.^{1,2}, Максютов М.А.^{1,2}, Туманов К.А.^{1,2},
Кашеева П.В.^{1,2}, Ловачёв С.С.^{1,2}, Адамов Е.О.^{3,4}, Лопаткин А.В.^{3,4}**¹ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск;² ООО «НПК «Мединфо», Обнинск;³ АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежала Госкорпорации «Росатом», Москва;⁴ Частное учреждение «ИТЦП «Прорыв», Москва

В статье рассмотрены два подхода к расчёту времени выдержки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в условиях реализации принципа радиационной эквивалентности – по отношению ожидаемых эффективных доз от ОЯТ и природного урана и по отношению соответствующих пожизненных радиационных рисков, рассчитанных для российского населения. Представлен метод оценки пожизненного радиационного риска при внутреннем облучении человека с учётом его пола и возраста. Рассмотрено ОЯТ реакторов БРЕСТ и ВВЭР. Получены следующие основные результаты. Ожидаемая эффективная доза при внутреннем облучении человека за счёт различных радионуклидов является очень грубым индикатором радиационных рисков и их потенциальной биологической опасности. При применении принципа радиационной эквивалентности использование ожидаемой эффективной дозы в качестве меры потенциальной биологической опасности приемлемо, т.к. такой подход завышает необходимое время выдержки радиоактивных отходов по сравнению с использованием расчётов потенциальной биологической опасности в терминах пожизненного атрибутивного радиационного риска. ОЯТ ВВЭР опаснее, чем ОЯТ БРЕСТ. Максимальное различие в пожизненных атрибутивных радиационных рисках достигается при времени выдержки 100 лет и для женщин оно в среднем выше, чем для мужчин.

Ключевые слова: *внутреннее облучение, эквивалентная доза, ожидаемая эффективная доза, пожизненный атрибутивный риск, природный уран, отработавшее ядерное топливо, радиоактивные отходы, принцип радиационной эквивалентности, российская популяция, модели радиационного риска, дозовые коэффициенты.*

В Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утверждённых Президентом Российской Федерации, подчёркивается необходимость практической реализации «концепции социально приемлемого риска» [1].

В результате проведения многолетних крупномасштабных радиационно-эпидемиологических исследований после атомной бомбардировки в 1945 г. японских городов Хиросима и Нагасаки было, в частности, установлено, что смертность облучённого в дозе 0,23 Зв населения от радиационно-обусловленных дополнительных онкологических заболеваний возросла на 4-7%.

Иванов В.К. – зам. директора по научн. работе, Председатель РНКРЗ, чл.-корр. РАН; **Чекин С.Ю.*** – зав. лаб.; **Меняйло А.Н.** – ст. научн. сотр., к.б.н.; **Максютов М.А.** – зав. отд., к.т.н.; **Туманов К.А.** – зав. лаб., к.б.н.; **Кашеева П.В.** – ст. научн. сотр., к.б.н.; **Ловачёв С.С.** – мл. научн. сотр. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, ООО «НПК «Мединфо»; **Адамов Е.О.** – научн. рук. проекта «Прорыв», д.т.н.; **Лопаткин А.В.** – зам. директора, д.т.н. АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежала Госкорпорации «Росатом», частное учреждение «ИТЦП «Прорыв».

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 4. Тел.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

Эта базовая оценка радиационного риска в настоящее время уже вошла во все действующие международные и национальные стандарты и нормы радиационной безопасности [2, 3].

В действующих в стране Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [3] подчёркивается, что «в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года устанавливаются, исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска:

- для персонала $1,0 \times 10^{-3}$;
- для населения $5,0 \times 10^{-5}$ ».

Учитывая, что в настоящее время величина риска онкосмертности в России составляет 219×10^{-5} среди мужчин и 165×10^{-5} среди женщин [4], указанные выше ограничения для населения составляют порядка 3% от спонтанного уровня. В НРБ-99/2009 также указано, что «уровень пренебрежимо малого риска составляет 10^{-6} ».

Риск-ориентированный подход в области радиационной безопасности получил в настоящее время широкое распространение в базовых международных и национальных документах. Так, в Международных основных нормах безопасности МАГАТЭ [2] подчёркивается:

- принцип 6: «Меры по контролю за радиационными рисками должны обеспечивать, чтобы ни одно физическое лицо не подвергалось неприемлемому риску нанесения вреда»;
- принцип 7: «Нынешнее и будущее население и окружающая среда должны быть защищены от радиационных рисков».

В настоящее время при разработке концепции дальнейшего развития ядерной энергетики в России акцент сделан на разработке новых технологий, включающих замыкание топливного цикла [5-7]. При этом при реализации энерготехнологий нового поколения на базе быстрых реакторов с замкнутым ядерным топливным циклом особое значение приобретает реализация принципа радиационной эквивалентности, обеспечивающего сохранение природного радиационного баланса [7].

В представленной работе впервые даётся оценка уровней радиологической защиты населения на основе современных риск-ориентированных технологий при реализации принципа радиационной эквивалентности за счёт замыкания ядерного топливного цикла.

Работа включает три основных раздела.

В первой части показано, что использование эффективных доз облучения вместо органических приводит к значительным искажениям численных значений радиационных рисков внутреннего облучения. Действительно, в Публикации 103 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), являющейся основной при оценке радиационных рисков, подчёркивается, что «дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облучённых индивидуумов», п. 157 [8].

Вторая часть работы рассматривает технологию оценки величины пожизненного атрибутивного риска (Lifetime Attributable Risk – LAR) с использованием современных моделей МКРЗ [8] и национальных демографических данных [4].

В заключительной части работы приводятся оценки величины LAR на основе значений «потенциальной биологической опасности» (ПБО) с учётом влияния отдельных радионуклидов в долговременном радиационном балансе, полученных в рамках выполнения проектного направления «Прорыв» Госкорпорации «Росатом».

Материалы и методы

Эффективная доза

Понятие эффективной дозы было разработано МКРЗ с целью управления радиологической защитой с ориентацией на стохастические эффекты действия ионизирующих излучений. В терминах эффективной дозы, в частности, выражаются пределы, ограничения и контрольные уровни системы радиологической защиты.

Публикация 103 МКРЗ [8] даёт подробные объяснения по использованию эффективной дозы. Эффективная доза (E) определяется как взвешенное среднее эквивалентных доз в органах и тканях:

$$E = \sum w_T \cdot H_T, \quad (1)$$

где H_T – эквивалентная доза в органе или ткани T , w_T – относительный (безразмерный) вес радиационного вреда для органа или ткани T (взвешивающий тканевой коэффициент), причём $\sum w_T = 1$, а суммы берутся по всем органам и тканям тела, для которых определены величины радиационного вреда; единица эффективной дозы – Дж/кг – имеет специальное наименование зиверт (Зв).

Как приблизительный индикатор радиационного риска, E имеет ряд особенностей.

1) Для вычисления тканевых коэффициентов w_T радиационный вред здоровью МКРЗ представляет в виде определяемого экспертным путём баланса между радиационно-обусловленными онкологической заболеваемостью, онкологической смертностью, сокращением продолжительности жизни и наследственными эффектами действия радиации.

2) Тканевые коэффициенты w_T представляют вклад органа или ткани T в общий радиационный вред здоровью человека от стохастических эффектов облучения, усреднённый по полу и возрасту в модельной композитной (европейско-американо-азиатской) популяции.

3) Несмотря на то, что тканевые коэффициенты определены МКРЗ для 14 разных органов и тканей (включая ткани категории «остальные»), в выражение для E величины w_T входят в округлённом виде и имеют всего четыре разных значения.

4) Ожидаемая за жизнь суммарная эквивалентная доза H_T от поступления радионуклидов в организм приписывается году поступления этих радионуклидов.

В результате, отношение пожизненных радиационных рисков от двух разных радионуклидов, вычисленное по исходным моделям годового риска и для конкретной популяции, всегда отличается от отношения соответствующих ожидаемых эффективных доз.

В качестве примера можно привести оценки пожизненных радиационных рисков онкологической заболеваемости и смертности для взрослого населения США при внутреннем облучении за счёт потребления радионуклидов ^{238}U и ^{241}Am [9, 10]. Данные табл. 1 показывают, что при одной и той же эффективной дозе – 1 Зв – радиационный риск смертности от ^{238}U в 2,62 раза больше, чем от ^{241}Am , а для заболеваемости – в 2,87 раза больше.

Таблица 1

Отношение радиационных рисков на 1 Зв эффективной дозы при внутреннем облучении за счёт перорального поступления радионуклидов ^{238}U и ^{241}Am в организм для взрослого населения США [9, 10]

Радионуклид	Дозовый коэффициент [9], Зв/Бк	Риск смертности [10], 1/Бк	Риск заболеваемости [10], 1/Бк	Риск смертности, 1/Зв	Риск заболеваемости, 1/Зв
^{238}U	$4,50 \cdot 10^{-8}$	$1,51 \cdot 10^{-9}$	$2,34 \cdot 10^{-9}$	0,0336	0,0520
^{241}Am	$2,00 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-9}$	$3,63 \cdot 10^{-9}$	0,0128	0,0182
Отношение рисков на 1 Зв $^{238}\text{U}/^{241}\text{Am}$				2,62	2,87

В данном случае эффективные дозы 2,62 мЗв и 2,87 мЗв от ^{241}Am соответствуют радиационным рискам смертности и заболеваемости таким же, как от 1 мЗв ^{238}U .

Применительно к проблеме «радиационной эквивалентности» это означает, что расчётный период выдержки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), рассчитанный по отношению рисков, может отличаться от того, который рассчитан по отношению эффективных доз.

Оценка величины пожизненного атрибутивного риска

Под избыточным абсолютным риском (EAR) заболеваемости или смертности понимают приращение показателя риска λ в облучённой когорте над фоновым (в отсутствие облучения) показателем риска λ_0 в такой же когорте.

$$EAR = \lambda - \lambda_0. \quad (2)$$

Аддитивная модель МКРЗ годового радиационного риска для заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями (ЗНО) после однократного облучения представлена в формуле (3), а мультипликативная модель – в формуле (4).

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{аддит.}}(s, c, g, a, H_c) = H_c \cdot \beta_{EAR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{EAR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{EAR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}, \quad (3)$$

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{мульти.}} = \lambda_0^{3ab} \cdot ERR_{\text{однокр.}}(s, c, g, a, H_c) = \\ = \lambda_0^{3ab} \cdot H_c \cdot \beta_{ERR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{ERR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{ERR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}. \quad (4)$$

Здесь ERR – избыточный относительный риск, s – пол, c – локализация ЗНО (орган или ткань), g – возраст при облучении, a – возраст, на который рассчитывается риск (возраст дожития), H_c – эквивалентная доза однократного облучения в органе или ткани c , β_{EAR} , ω_{EAR} , γ_{EAR} – параметры аддитивной модели, β_{ERR} , ω_{ERR} , γ_{ERR} – параметры мультипликативной модели. Значения этих параметров представлены в [8].

В публикациях МКРЗ для ЗНО кости отсутствует в явном виде модель годового радиационного риска, поэтому в данной работе используется модель Научного комитета Организации Объединённых Наций по действию атомной радиации (НКДАР ООН) [11]. Аддитивная и мультипликативная модели избыточного риска заболеваемости ЗНО кости представлены ниже.

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{аддит.}}(c = \text{кост.}, a, H_c) = H_{\text{кост.}}^2 \cdot 6,90379 \cdot 10^7 \cdot a^{-4,472}, \quad (5)$$

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{мульти.}}(c = \text{кост.}, H_c) = \lambda_0 \cdot ERR(c = \text{кост.}, H_c) \cdot H_{\text{кост.}}^2 \cdot 9,3294 \cdot 10^{-6}. \quad (6)$$

Латентный период для избыточных радиационно-индуцированных солидных ЗНО T_{LS} принят равным 10-ти годам. В течение 10 лет после облучения, т.е. для возраста $a < g + T_{LS}$, избыточные риски, рассчитанные как по аддитивной (5), так и по мультипликативной (6) моделям, принимаются равными нулю.

При прогнозе EAR заболеваемости солидными ЗНО после однократного облучения вычисляется взвешенная сумма прогнозов по мультипликативной и аддитивной моделям.

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{сол.}}(s, c, g, a, d) = p(c) \cdot \lambda_0^{3ab}(s, c, a) \cdot ERR_{\text{однокр.}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, H_c) + \\ + (1 - p(c)) \cdot EAR_{\text{однокр.}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, H_c), \quad (7)$$

где веса $p(c)$ указаны в [8], а для ЗНО кости $p=0,5$.

Вычисление EAR для заболеваемости лейкозами после однократного облучения проводится по следующей формуле:

$$EAR_{однокр.}^{лейк.}(s, g, a, H_{км}) = \beta(s, g) \cdot H_{км} \cdot (1 + 0,79 \cdot H_{км}) \cdot \exp[\alpha(s, g) \cdot (a - g - 25)]. \quad (8)$$

Здесь, как и в случае с риском для солидных ЗНО, s – пол, g – возраст при облучении, a – возраст, на который рассчитывается риск, $H_{км}$ – эквивалентная доза однократного облучения костного мозга, β и α – параметры модели избыточного абсолютно риска заболеваемости лейкозами. Их значения, зависящие от возраста на момент облучения, приведены в [8]. Латентный период для заболеваемости лейкозами T_{LL} равен 2 годам, $EAR_{однокр.}^{лейк.} = 0$, если $a < g + T_{LL}$.

Для вычисления радиационных рисков смертности МКРЗ рекомендует использовать риски заболеваемости, умноженные на так называемую долю летальности. Доля летальности вычисляется следующим образом:

$$k(s, a, c) = \frac{\lambda_0^{смерт.}(s, a, c)}{\lambda_0^{заб.}(s, a, c)}, \quad (9)$$

$$\lambda_0^{заб.}(s, a, c) > 0$$

где $\lambda_0^{смерт.}$ – годовой показатель смертности для заданного пола s , возраста a и локализации c ;

$\lambda_0^{заб.}$ – годовой показатель заболеваемости для заданного пола s , возраста a и локализации c .

Таким образом, избыточный абсолютный риск смерти от рака после однократного облучения вычисляется по формуле (10).

$$EAR_{однокр.}^{смерт.}(s, c, g, a, H_c) = k(s, a, c) \cdot EAR_{однокр.}^{заб.}(s, c, g, a, H_c). \quad (10)$$

Для вычисления прогноза радиационного риска используется функция здорового дожития (в случае вычислений рисков заболеваемости) или функция дожития (в случае вычисления рисков смертности).

Функция дожития $S(s, e, a)$ характеризует вероятность для человека пола s и возраста e дожить до возраста a . Формула для вычисления S представлена ниже.

$$S(s, e, a) = \exp\left[-\sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{общ. смерт.}(s, k)\right]. \quad (11)$$

$$a > e$$

При этом в возрасте e и ранее функция дожития по определению принимается равной единице, то есть $S(s, e, a) = 1$ при $a \leq e$.

Здесь $\lambda_0^{общ. смерт.}(s, k)$ – показатель общей фоновой смертности в год от всех причин для лиц пола s и в возрасте k .

$S(s, e, a)$ может быть найдена при использовании формулы:

$$S(s, e, a) = \frac{S(s, 0, a)}{S(s, 0, e)}, \quad (12)$$

$$a > e$$

Функция здорового дожития $S'(s, c, e, a)$ характеризует вероятность для человека пола s и возраста e дожить до возраста a и не заболеть при этом ЗНО локализации c .

$$S'(s, c, e, a) = \exp \left[- \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{общ. смерт.} (s, k) + \lambda_0^{заб.} (s, k, c) - \lambda_0^{смерт.} (s, k, c) \right]. \quad (13)$$

$a > e$

Так же как и $S(s, e, a)$, функция $S'(s, c, e, a) = 1$ при $a \leq e$. И, аналогично, $S(s, e, a)$:

$$S'(s, c, e, a) = \frac{S'(s, c, 0, a)}{S'(s, c, 0, e)}. \quad (14)$$

$a > e$

Обозначим избыточный абсолютный риск с весом вероятности дожития (здорового дожития) от возраста e до возраста a как $EAR'(e, a)$:

$$EAR'_{однокр.}^{заб.} (s, c, g, e, a, H_c) = S'(s, c, e, a) \cdot EAR_{однокр.}^{заб.} (s, c, g, a, H_c), \quad (15)$$

$$EAR'_{однокр.}^{смерт.} (s, c, g, e, a, H_c) = S(s, e, a) \cdot EAR_{однокр.}^{смерт.} (s, c, g, a, H_c). \quad (16)$$

Для вычисления EAR в возрасте a , при условии дожития до текущего возраста e , от многократного облучения $\{H_c^i\}$ требуется провести суммирование $EAR_{однокр.}$ по n возрасту облучения g_i :

$$EAR'^{заб.} (s, c, e, a) = \sum_{i=1}^n EAR'_{однокр.}^{заб.} (s, c, g_i, e, a, H_c^i), \quad (17)$$

$$EAR'^{смерт.} (s, c, e, a) = \sum_{i=1}^n EAR'_{однокр.}^{смерт.} (s, c, g_i, e, a, H_c^i). \quad (18)$$

Пожизненный атрибутивный (радиационный) риск (LAR), при условии дожития до текущего возраста e , вычисляется путём суммирования EAR' по возрасту дожития a , начиная от текущего возраста e до максимального возраста дожития a_{max} .

$$LAR^{заб.} (s, c, e, a_{max}) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} [EAR'^{заб.} (s, c, e, a)], \quad (19)$$

$$LAR^{смерт.} (s, c, e, a_{max}) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} [EAR'^{смерт.} (s, c, e, a)]. \quad (20)$$

Здесь $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, равный 2 для солидных ЗНО и 1 – для лейкозов [8], $a_{max}=100$ лет – принятый в модели максимальный возраст дожития человека.

Величина LAR для всех ЗНО в целом определяется путём суммирования величин LAR по всем облучённым органам и тканям:

$$LAR^*(s, e, a_{max}) = \sum_c LAR^*(s, c, e, a_{max}), \quad (21)$$

где $*$ – тип риска: заболеваемость или смертность, остальные обозначения соответствуют вышеприведённым формулам.

При внутреннем облучении дозы распределяются по телу человека неравномерно. Для расчёта радиационных рисков от внутреннего облучения существенным является знание динамики эквивалентных доз H_T в отдельных органах и тканях, которую можно восстановить по базе

данных дозовых коэффициентов МКРЗ [12], при известной ожидаемой эффективной дозе заданного радионуклида и пути его поступления в организм человека.

В табл. 2 и 3 представлены относительные вклады основных радионуклидов в потенциальную биологическую опасность (ПБО) ОЯТ реакторов БРЕСТ (табл. 2) и ВВЭР (табл. 3), выраженную в виде ожидаемой эффективной дозы, после определённого времени выдержки ОЯТ, по данным [7].

Таблица 2

Вклад изотопов ОЯТ реактора БРЕСТ в потенциальную биологическую опасность (ПБО) при различном времени выдержки [7]

Время выдержки, лет	Изотоп	Вклад изотопа, %	Время выдержки, лет	Изотоп	Вклад изотопа, %
10	²⁴¹ Am	7,94	1000	²⁴¹ Am	53,3
	²⁴⁴ Cm	1,7		²⁴³ Am	0,68
	¹³⁴ Cs	2,2		²³⁷ Np	0,033
	¹³⁷ Cs	25,9		²³⁸ Pu	0,067
	²³⁸ Pu	11,96		²³⁹ Pu	20,3
	²³⁹ Pu	1,6		²⁴⁰ Pu	25,4
	²⁴⁰ Pu	2,2		²⁴² Pu	0,108
	²⁴¹ Pu	8,48		²³⁴ U	0,032
	⁹⁰ Sr	33		²⁴¹ Am	0,024
	⁹⁰ Y	3,18		²⁴³ Am	1,11
100	²⁴¹ Am	50	10 000	²³⁷ Np	0,15
	²⁴³ Am	0,16		²³⁹ Pu	60,1
	²⁴⁴ Cm	0,16		²⁴⁰ Pu	37,5
	¹³⁷ Cs	9,3		²⁴² Pu	0,4
	²³⁸ Pu	16,9		²²⁶ Ra	0,047
	²³⁹ Pu	4,6		²²² Rn	0,42
	²⁴⁰ Pu	6,26		²³⁰ Th	0,045
	²⁴¹ Pu	0,32		²³⁴ U	0,12
	⁹⁰ Sr	11,09			
	⁹⁰ Y	1,07			

Таблица 3

Вклад изотопов ОЯТ реактора ВВЭР в потенциальную биологическую опасность (ПБО) при различном времени выдержки [7]

Время выдержки, лет	Изотоп	Вклад изотопа, %	Время выдержки, лет	Изотоп	Вклад изотопа, %
10	⁹⁰ Sr	40,8	1000	²⁴¹ Am	40,39
	¹³⁷ Cs	34,1		²⁴⁶ Cm	23,92
	²⁴⁴ Cm	8,7		²⁴⁰ Pu	15,47
	¹³⁴ Cs	5,1		²³⁹ Pu	9,24
	⁹⁰ Y	3,9		²⁴³ Am	5,9
	²³⁸ Pu	2		²⁴⁵ Cm	2,5
	²⁴¹ Pu	1,3		¹⁴ C	1,8
	⁸⁵ Kr	1,3		²⁴² Pu	0,32
	²⁴¹ Am	1,18		²⁴⁸ Cm	0,21
	²⁴⁶ Cm	0,54		²⁴¹ Pu	0,056
100	⁹⁰ Sr	32,38	10 000	²³⁹ Pu	29,77
	¹³⁷ Cs	28,82		²⁴⁶ Cm	23,07
	²⁴¹ Am	18,16		²⁴⁰ Pu	21,56
	²³⁸ Pu	6,7		²⁴³ Am	9,1
	²⁴⁶ Cm	3,6		²⁴¹ Am	6,6
	⁹⁰ Y	3,1		²⁴⁵ Cm	4,3
	²⁴⁰ Pu	2,26		¹⁴ C	2,2
	²⁴⁴ Cm	1,88		²⁴² Pu	2
	²³⁹ Pu	1,2		²⁴⁸ Cm	0,76
	²⁴³ Am	0,86		²²² Rn	0,1

Результаты и обсуждение

Рассмотрим радиационные риски для здоровья населения России в рамках принципа радиационной эквивалентности [5], обусловленные потенциальным пероральным поступлением изотопов природного урана, ОЯТ реактора БРЕСТ и ОЯТ реактора ВВЭР при различном времени выдержки последних.

Для расчёта рисков использовалась методика вычисления LAR, приведённая выше в разделе «Оценка величины пожизненного атрибутивного риска». Исключение составили радиоактивные газы радон и криптон, для которых принималось, что облучение этими газами производится путём их ингаляции, при этом доза поглощается только лёгкими.

На рис. 1 и 2 приведена зависимость LAR заболеваемости мужского (рис. 1) и женского (рис. 2) населения России [4] от возраста при поступлении радионуклидов в организм для ОЯТ БРЕСТ различного времени выдержки и изотопов природного урана с ожидаемой эффективной дозой 1 мЗв.

Рис. 1 и 2 показывают, что радиационный риск для женского населения России всегда больше, чем для мужского при одной и той же ожидаемой эффективной дозе 1 мЗв.

Пожизненные радиационные риски закономерно снижаются с увеличением возраста при поступлении радионуклидов в организм. В частности, LAR для женского населения от 1 мЗв радионуклидов ОЯТ БРЕСТ после 100 лет выдержки становится ниже $5 \cdot 10^{-5}$ уже при возрасте старше 5 лет при поступлении радионуклидов.

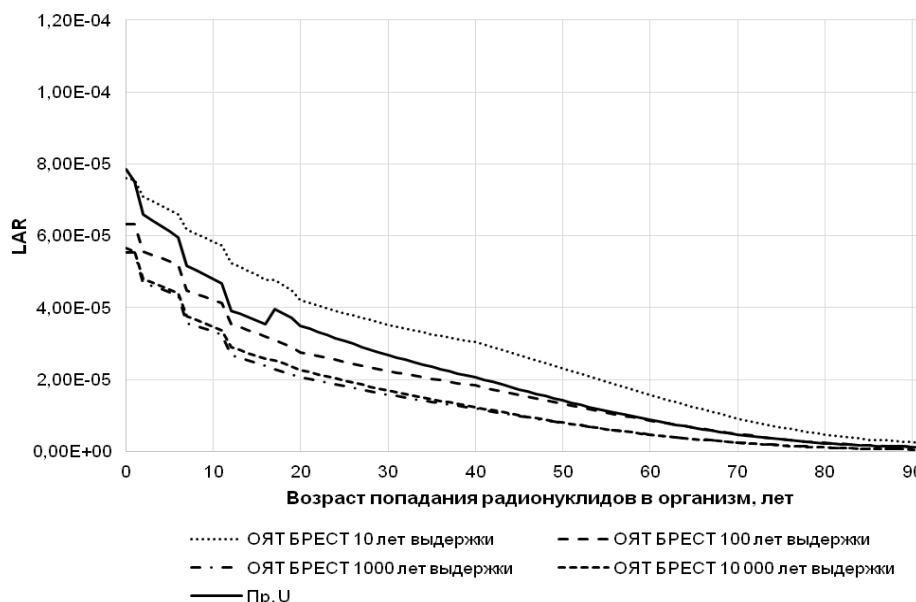


Рис. 1. Зависимость пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **мужчин** от возраста при поступлении радионуклидов в организм для ОЯТ **БРЕСТ** различного времени выдержки и изотопов природного урана с ожидаемой эффективной дозой 1 мЗв.

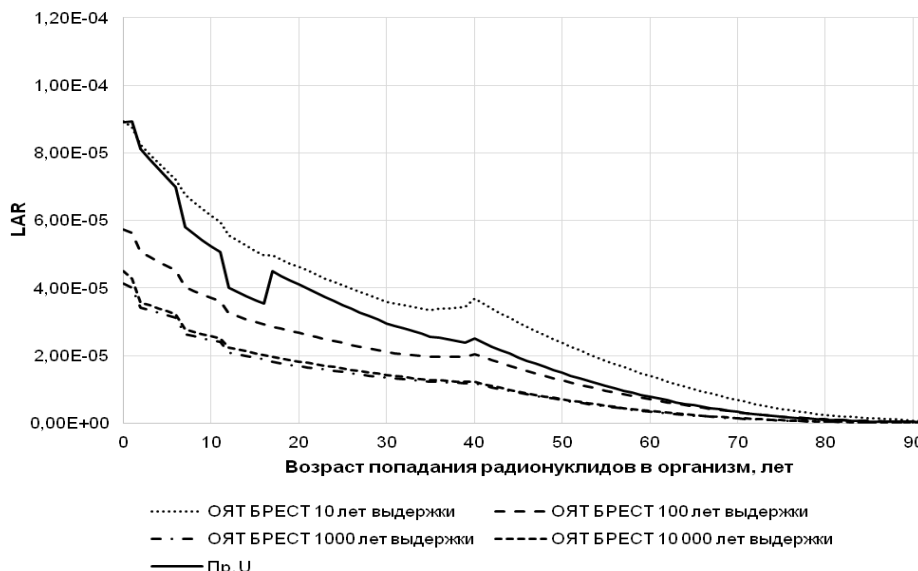


Рис. 2. Зависимость пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **женщин** от возраста при поступлении радионуклидов в организм для ОЯТ **БРЕСТ** различного времени выдержки или изотопов природного урана с ожидаемой эффективной дозой 1 мЗв.

Соответствующие рис. 1 и рис. 2 отношения величин LAR от ОЯТ БРЕСТ и от изотопов природного урана показаны на рис. 3 (для мужчин) и рис. 4 (для женщин). Данные рисунки показывают, что коэффициенты радиационного риска LAR/мЗв для ОЯТ БРЕСТ при выдержке свыше 100 лет становятся меньше коэффициентов радиационного риска LAR/мЗв для изотопов природного урана, для всех возрастов при поступлении радионуклидов и для обоих полов.

Рис. 5-8 аналогичны рис. 1-4, но только построены для ОЯТ реактора ВВЭР.

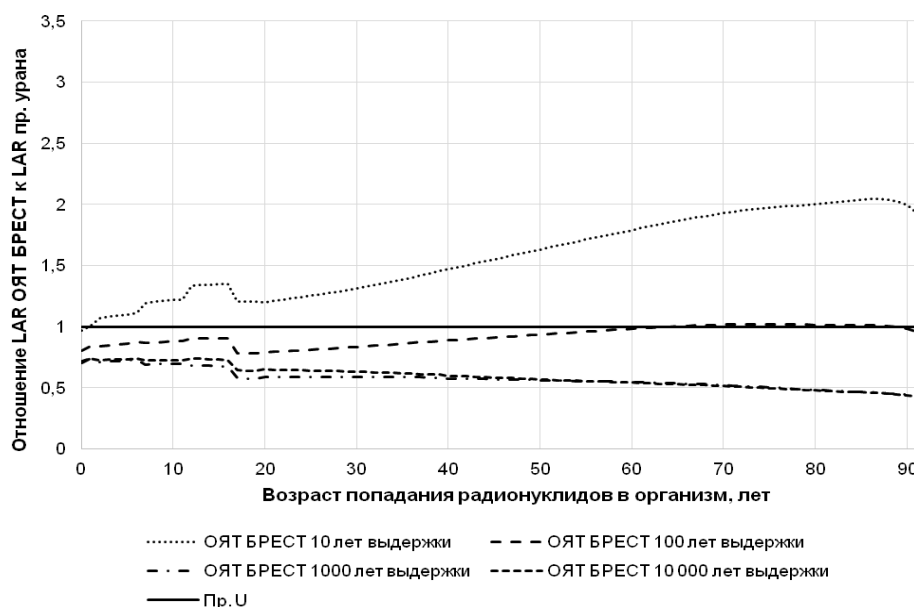


Рис. 3. Отношение величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **мужчин** от ОЯТ **БРЕСТ** различного времени выдержки к аналогичной величине LAR от изотопов природного урана (в зависимости от возраста при поступлении радионуклидов в организм) для ожидаемой эффективной дозы 1 мЗв.

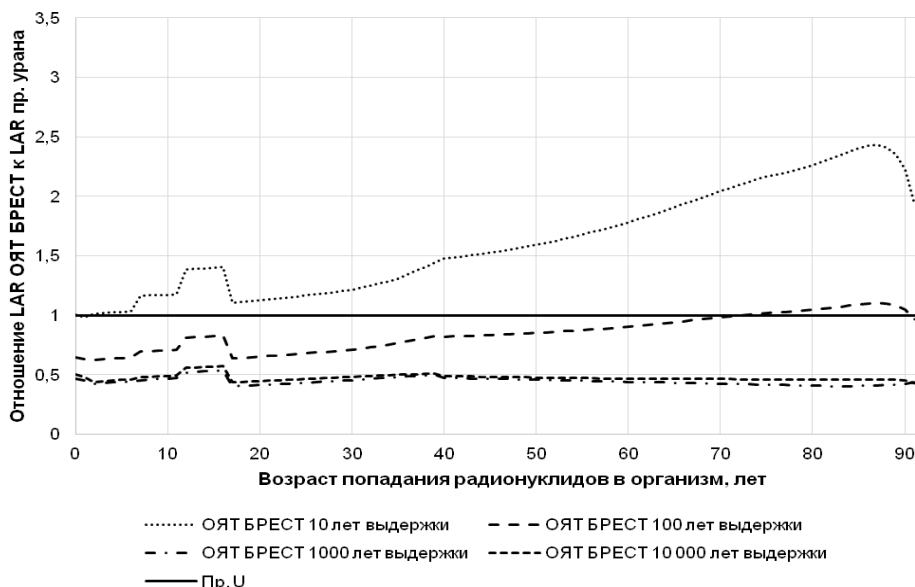


Рис. 4. Отношение величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **женщин** от ОЯТ **БРЕСТ** различного времени выдержки к аналогичной величине LAR от изотопов природного урана (в зависимости от возраста при поступлении радионуклидов в организм) для ожидаемой эффективной дозы 1 мЗв.

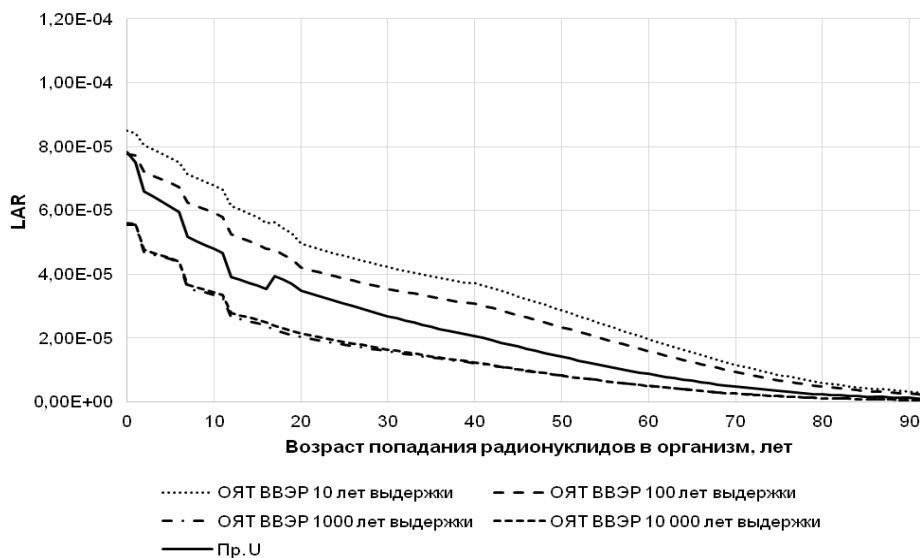


Рис. 5. Зависимость пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **мужчин** от возраста при поступлении радионуклидов в организм для ОЯТ **ВВЭР** различного времени выдержки и изотопов природного урана с ожидаемой эффективной дозой 1 мЗв.

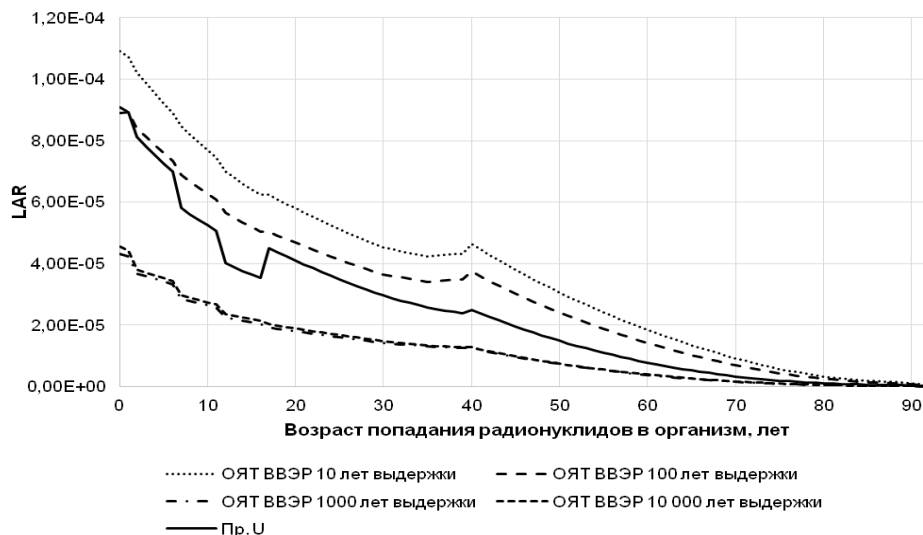


Рис. 6. Зависимость пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **женщин** от возраста при поступлении радионуклидов в организм для ОЯТ **ВВЭР** различного времени выдержки и изотопов природного урана с ожидаемой эффективной дозой 1 мЗв.

Рис. 5 и 6 показывают, что ОЯТ ВВЭР опаснее, чем ОЯТ БРЕСТ. В частности, LAR для женского населения от 1 мЗв радионуклидов ОЯТ ВВЭР после 100 лет выдержки становится ниже $5 \cdot 10^{-5}$ при возрасте старше 15 лет при поступлении радионуклидов (для ОЯТ БРЕСТ – при возрасте старше 5 лет). Отношение LAR от ОЯТ ВВЭР к LAR от ОЯТ БРЕСТ достигают максимума при времени выдержки 100 лет и в среднем по всем возрастам попадания радионуклидов в организм равны 1,75 для мужчин и 1,92 для женщин.

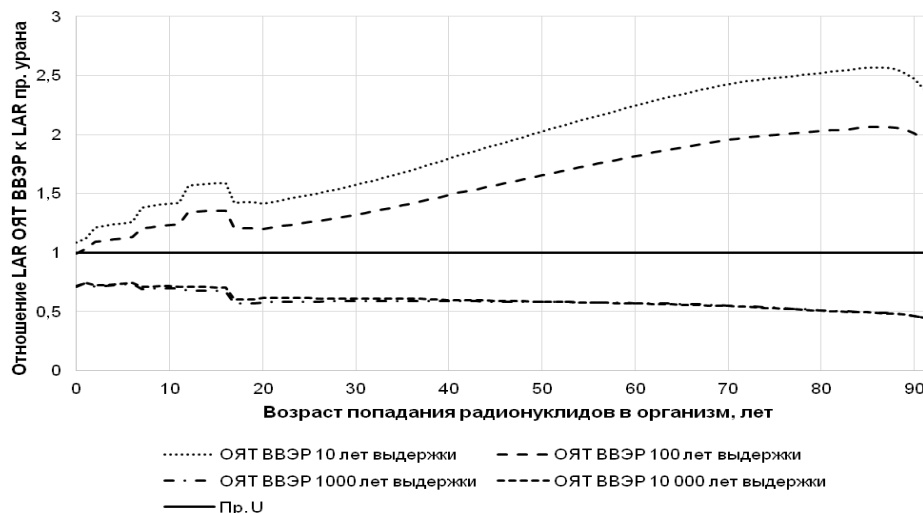


Рис. 7. Отношение величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **мужчин** от ОЯТ **ВВЭР** различного времени выдержки к аналогичной величине LAR от изотопов природного урана (в зависимости от возраста при поступлении радионуклидов в организм) для ожидаемой эффективной дозы 1 мЗв.

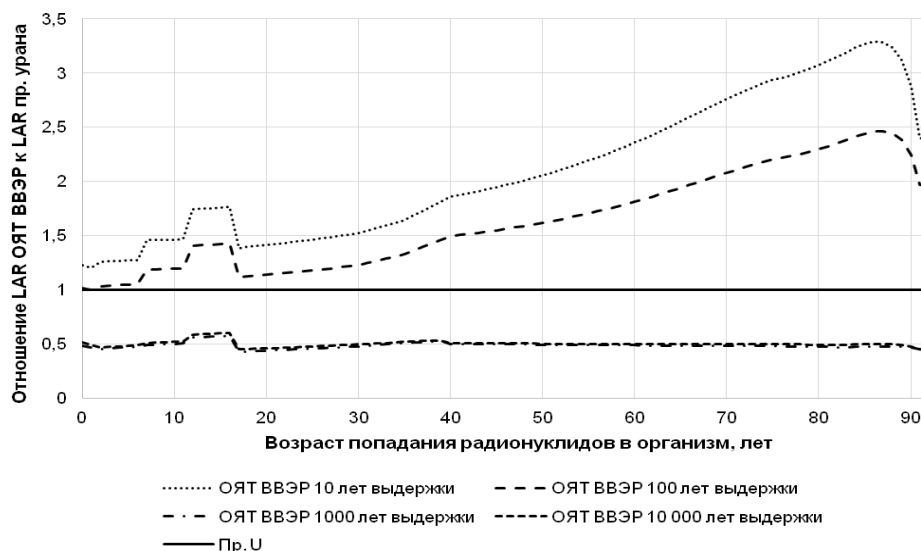


Рис. 8. Отношение величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) заболеваемости ЗНО **женщин** от ОЯТ **ВВЭР** различного времени выдержки к аналогичной величине LAR от изотопов природного урана (в зависимости от возраста при поступлении радионуклидов в организм) для ожидаемой эффективной дозы 1 мЗв.

Рис. 7 и 8 показывают, что коэффициенты радиационного риска LAR/мЗв для ОЯТ ВВЭР при выдержке 100 лет намного больше (до 2,5 раз) коэффициентов радиационного риска LAR/мЗв для изотопов природного урана. Для реакторов ВВЭР LAR/мЗв становится меньше риска от природного урана при времени выдержки порядка 1000 лет.

Таким образом, подход вычисления ПБО в терминах ожидаемой эффективной дозы можно считать консервативным на время выдержки свыше 100 лет для ОЯТ реакторов БРЕСТ и порядка 1000 лет для ОЯТ реакторов ВВЭР.

Выводы

1. Ожидаемая эффективная доза при внутреннем облучении человека за счёт различных радионуклидов является приближённым индикатором радиационных рисков и их потенциальной биологической опасности.

2. При применении принципа радиационной эквивалентности [5] между РАО, подлежащими захоронению, и природным урановым сырьём использование ожидаемой эффективной дозы в качестве меры потенциальной биологической опасности приемлемо. При этом следует учитывать, что радиологические риски различных составов смесей радиоактивных нуклидов при одинаковых эффективных дозах могут существенно различаться. Например, при одинаковой эффективной дозе 1 мЗв, пожизненный атрибутивный радиационный риск ОЯТ БРЕСТ и ОЯТ ВВЭР снижаются до показателя природного урана после выдержки 100 лет и 1000 лет соответственно.

3. Радионуклидный состав ОЯТ ВВЭР при равных значениях ожидаемой эффективной дозы даёт в целом больший пожизненный атрибутивный радиационный риск, чем ОЯТ БРЕСТ. Максимальное различие достигается при времени выдержки 100 лет, и для женщин оно выше, чем для мужчин.

Литература

1. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утв. приказом Президента РФ 1 марта 2012 г. № Пр-539). ГАРАНТ.РУ Информационно-правовой портал [Официальный сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70190228/> (дата обращения 20.06.2018).
2. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Промежуточное издание. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности № GSR Part 3 (Interim). Вена: МАГАТЭ, 2011. 311 с.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
4. Злокачественные новообразования в России в 2014 году (заболеваемость и смертность) /Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2016. 250 с.
5. **Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В., Молоканов Н.А., Муравьев Е.В., Орлов В.В., Калякин С.Г., Рачков В.И., Троянов В.М., Авронин Е.Н., Иванов В.Б., Алексахин Р.М.** Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. //Атомная энергия. 2012. Т. 112, вып. 6. С. 319-330.
6. **Адамов Е.О., Ганев И.Х.** Экологически безупречная ядерная энергетика. М.: НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалева, 2007. 145 с.
7. Радиационно-эквивалентное обращение с РАО. Техническая справка 01.2017 НРПЭ. Научный руководитель по РЭ А.В. Лопаткин.
8. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ): пер. с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (дата обращения 20.06.2018).
9. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119 //Ann. ICRP. 2012. V. 41. 130 p.
10. **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.
11. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report. Vol. I, Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. New York: United Nation, 2008.
12. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0, official website. Available at: <http://www.icrp.org/page.asp?id=145> (Accessed 20.06.2018).

Application of the radiation equivalence principle to estimation of levels of radiological protection of the population: risk-oriented approach

Ivanov V.K.^{1,2}, Chekin S.Yu.^{1,2}, Menyajlo A.N.^{1,2}, Maksioutov M.A.^{1,2}, Tumanov K.A.^{1,2}, Kashcheeva P.V.^{1,2}, Lovachev S.S.^{1,2}, Adamov E.O.^{3,4}, Lopatkin A.V.^{3,4}

¹ A. Tsyb MRRC, Obninsk;

² Medinfo LLC, Obninsk;

³ N. Dollezhal Power Engineering Research and Design Institute, Moscow;

⁴ Innovation and Technology Center for the PRORYV, Moscow

The present concept of the development of nuclear energy is based on the use of fast nuclear reactors with closed nuclear fuel cycle and new technologies, ensuring nuclear safety and radiological protection of present and future generations of people and the environment from ionizing radiation. For these purposes it is important to keep the natural radiation balance, it means that in some time the total radiotoxicity of the spent nuclear fuel will not exceed the total radiotoxicity of natural raw uranium ore. In this connection it is necessary to adhere to the radiation equivalence principle that allows estimation of levels of radiological protection of the population while storing spent nuclear fuel. The article presents methods for calculation of the decay time of spent nuclear fuel (SNF) in the compliance with the radiation equivalence principle. The first method is based on the comparison of committed effective doses from SNF and natural uranium and, the second method is based on comparison of corresponding lifetime attributable radiation risks calculated for the Russian population. The decay time of spent nuclear fuel from the BREST and VVER reactors is calculated. The following main results are obtained. The committed effective dose from internal exposure to various radionuclides is a rough indicator of possible radiation risk and potential radiotoxicity of the radionuclides. While adhering to the radiation equivalence principle, the use of the committed effective dose as a measure of potential radiotoxicity is acceptable, because this approach overestimates the necessary decay time of SNF as compared with potential radiotoxicity estimate based on lifetime attributable risk. Radiotoxicity of SNF from VVER is higher than radiotoxicity of SNF from BREST. The maximum difference in lifetime attributable risks from exposure to VVER SNF and BREST SNF will be when the decay of spent fuel time is 100 years on average, the difference is higher for women than for men.

Key words: *internal exposure, equivalent dose, committed effective dose, lifetime attributable risk, natural uranium, spent nuclear fuel, radioactive waste, radiation equivalence principle, Russian population, radiation risk models, dose coefficients.*

References

1. *State Policy Fundamentals of the Russian Federation in the Field of Nuclear and Radiation Safety up to 2025* (approved by the Order of the President of the Russian Federation on March 1, 2012, No Pr-539). GARANT.RU Informative and lawful portal, official website. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70190228/> (Accessed 20.06.2018). (In Russian).
2. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources*. International Basic Safety Standards, GSR Part 3 (Interim), General Safety Requirements. Vienna, IAEA, 2011. 311 p. (In Russian).
3. *Radiation safety standards (RSS-99/2009)*. Sanitary-epidemiological rules and standards. SP2.6.1.252309. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russian).
4. *Malignant neoplasms in Russia in 2014 (morbidity and mortality)*. Eds.: A.D. Kaprin, V.V. Starinskiy, G.V. Petrova. Moscow, P. Hertsen MORI, 2016. 250 p. (In Russian).
5. **Adamov E.O., Dzhalyan A.V., Lopatkin A.V., Molokanov N.A., Muravyov E.V., Orlov V.V., Kalyakin S.G., Rachkov V.I., Troyanov V.M., Avrorin E.N., Ivanov V.B., Aleksakhin R.M.** Conceptual framework of

Ivanov V.K. – Deputy Director, Chairman of RSCRP, Corresponding Member of RAS; Chekin S.Yu.* – Head of Lab.; Menyajlo A.N. – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; Maksioutov M.A. – Head of Dep., C. Sc., Tech.; Tumanov K.A. – Head of Lab., C. Sc., Biol.; Kashcheeva P.V. – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; Lovachev S.S. – Research Assistant. A. Tsyb MRRC, Medinfo. Adamov E.O. – Research Advisor, Project PRORYV Advisor, D. Sc., Tech.; Lopatkin A.V. – Deputy Director, D. Sc., Tech. N. Dollezhal PERDI, ITC for the PRORYV.

*Contacts: 4 Korolev str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

- a strategy for the development of nuclear power in Russia to 2100. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2012, vol. 112, no. 6, pp. 319-330. (In Russian).
6. **Adamov E.O., Ganev I.Kh.** Environmentally pure nuclear power. Moscow, N. Dollezhal PERDI, 2007. 145 p. (In Russian).
 7. Radiation-equivalent treatment of radioactive waste. Technical reference 01.2017 NRRE. Supervisor of RE A.V. Lopatkin. (In Russian).
 8. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP 37 (2-4)*.
 9. ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. *Ann. ICRP 41 (Suppl.)*.
 10. **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.
 11. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report Vol. I, Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. New York, United Nation, 2008.
 12. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0, official website. Available at: <http://www.icrp.org/page.asp?id=145> (Accessed 20.06.2018).