РАЗДЕЛ 2

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-8-27

УДК 621.039.59:539.163:614.87

Сравнительный анализ уровней «радиотоксичности» отдельных радионуклидов ОЯТ реакторов БРЕСТ и ВВЭР при различных временах выдержки на основе современных моделей «доза-эффект» МКРЗ

Иванов В.К.^{1,2}, Чекин С.Ю.^{1,2}, Меньяйло А.Н.^{1,2}, Максютлов 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 представлен сравнительный анализ вклада в пожизненный атрибутивный (обусловленный облучением) риск (LAR) индукции онкологических заболеваний человека в результате поступления в организм отдельных радионуклидов, содержащихся в облучённом ядерном топливе (ОЯТ) реакторов БРЕСТ и ВВЭР. При этом используются модели радиационных рисков Публикации 103 МКРЗ с учётом основных радиологических и демографических характеристик облучённого контингента. Рассмотрены основные дозо-риск-образующие радионуклиды при различных интервалах выдержки ОЯТ (от 10 лет до 10⁷ лет). Критической группой населения с максимальными значениями пожизненного атрибутивного риска являются девочки в возрасте 5 лет при поступлении радионуклидов внутрь организма. Для ОЯТ БРЕСТ на временном интервале до 10000 лет основными риск-образующими изотопами являются: ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr (выдержка 10 лет); ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu и ⁹⁰Sr (выдержка 100 лет); ²⁴¹Am, ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu (выдержка 1000 лет); ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu (выдержка 10000 лет). Определены также основные риск-образующие радионуклиды для ОЯТ реактора ВВЭР. В частности, для интервала выдержки 1000 лет наибольшие значения риска прогнозируются для ²⁴¹Am, ²⁴⁶Cm и ²⁴⁰Pu. Относительный вклад этих изотопов в радиационный риск превышает 10%. Показано, что LAR ОЯТ реактора ВВЭР превышает LAR ОЯТ реактора БРЕСТ. Это означает, что «радиотоксичность» ОЯТ ВВЭР выше, чем ОЯТ БРЕСТ. Полученные данные имеют принципиальное значение при обращении с ОЯТ и реализации в ядерной энергетике трансмутационного топливного цикла.

Ключевые слова: *пожизненный атрибутивный риск (LAR), облучённое ядерное топливо (ОЯТ) реакторов БРЕСТ и ВВЭР, основные дозо-риск-образующие радионуклиды, 103 Публикация МКРЗ, время выдержки радионуклидов, половозрастная зависимость радиационных рисков, трансмутации долгоживущих радионуклидов.*

В работе [1] было показано, что принцип радиационной эквивалентности, обеспечивающий равенство потенциальной биологической опасности для человека радиоактивных отходов ядерной энергетики и потреблённого природного урана [2-4], в принципе может быть реализован и для реактора БРЕСТ и для реактора ВВЭР. При этом было установлено, что для облучённого ядерного топлива (ОЯТ) реактора БРЕСТ при выдержке свыше 100 лет значение радиационного риска становится меньше аналогичного показателя для изотопов природного ура-

Иванов В.К. – зам. директора по научн. работе, Председатель РНКРЗ, чл.-корр. РАН; Чекин С.Ю.* – зав. лаб.; Меньяйло А.Н. – вед. научн. сотр., к.б.н.; Максютлов 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. Королева, 4. Тел.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

на при равных эффективных дозах. Для ОЯТ ВВЭР аналогичный эффект достигается при выдержке более 1000 лет.

Хорошо известно, что в ОЯТ действующих в настоящее время ядерных реакторов содержится большое количество долгоживущих радиоактивных отходов (плутоний, младшие актиниды и продукты деления). Поэтому важнейшей задачей атомной энергетики в перспективе своего развития является в максимальной степени обеспечение безопасности человека и обезвреживание природной среды от этих отходов.

В настоящее время одним из основных приоритетов дальнейшего развития ядерной энергетики в России является реализация новых технологий, обеспечивающих замыкание ядерного топливного цикла, в частности – переработку ОЯТ для изготовления новых партий ядерного топлива. Эта технология предполагает возможность трансмутации долгоживущих и наиболее опасных для здоровья человека радионуклидов, а именно, перевода их в продукты деления менее опасные, быстрораспадающиеся или стабильные нуклиды [4]. Возникает естественный вопрос – какие радионуклиды в ОЯТ БРЕСТ и ОЯТ ВВЭР следует отнести к наиболее опасным с учётом всех современных представлений радиационной эпидемиологии, международных и национальных стандартов радиационной безопасности [5, 6]. Ответ на этот вопрос имеет принципиальное значение для практической реализации технологий трансмутации долгоживущих радионуклидов.

Материалы и методы

Воздействие радиации на здоровье человека проявляется, в частности, как увеличение вероятности или риска заболевания от злокачественного новообразования (ЗНО). Обозначим λ_0 величину показателя фоновой заболеваемости раком. Эта величина зависит от возраста, пола и локализации опухоли. Воздействие радиации приводит к увеличению λ_0 на дополнительную величину, называемую избыточным абсолютным риском (EAR). Таким образом, полный показатель λ будет суммой фонового и радиационного показателей:

$$\lambda = \lambda_0 + EAR, \quad (1)$$

где **EAR** – избыточный абсолютный риск (Excess Absolute Risk), обусловленный только радиационным облучением.

Для вычисления радиационных рисков заболеваемости ЗНО существуют математические модели, разработанные различными международными организациями.

Научный базис обеспечивает Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН). НКДАР ООН привёл описание своих моделей радиационного риска в отчёте 2006 г. [7]. Другой организацией, занимающейся разработкой моделей радиационного риска, является Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ). В своей Публикации 103 от 2007 г. [8] МКРЗ привела модели радиационного риска для 11 локализаций опухолей: все солидные раки, пищевод, желудок, толстая кишка, печень, лёгкое, молочная железа, яичник, мочевого пузыря, щитовидная железа и остальные солидные. Описание включает в себя значения параметров этих моделей и др. Для рисков заболеваемости лейкозами МКРЗ предлагает использовать модели EAR D.L. Preston [9]. Эта же модель заболеваемости лейкозами была использована в отчёте НКДАР ООН от 1994 г.

Подробная методика вычисления избыточного абсолютного риска, основанная на моделях радиационного риска МКРЗ, изложена в работе [10].

Последствия облучения для здоровья населения оцениваются величиной пожизненного атрибутивного (обусловленного облучением) риска индукции онкологических заболеваний, LAR (Lifetime Attributable Risk) [7, 8].

Существуют несколько видов пожизненных радиационных рисков смерти. Так в НКДАР ООН [7] введено понятие «риск радиационно-индуцированной смерти» (REID). В Публикации 103 МКРЗ [8] даётся такое определение этого риска: «разность между уровнями смертности по данной причине в облучённой и необлучённой популяциях для заданного пола и возраста на момент облучения, становящегося дополнительной причиной смерти в облучённой популяции». В то же время в МКРЗ для оценки пожизненных рисков выбран другой показатель: пожизненный атрибутивный риск (lifetime attributable risk – LAR) заболеваемости раком, который является аппроксимацией величины REID. LAR характеризует количество избыточных над фоновым числом раковых заболеваний, которые могут произойти в течение всей последующей жизни после облучения группы лиц, у которых одинаковы модифицирующие риск факторы (пол, возраст при облучении и др.).

Величина LAR вычисляется следующим образом:

$$LAR(s, e) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} [S(s, e, a) \cdot EAR_{s,a}] . \quad (2)$$

Здесь $EAR_{s,a}$ – избыточный абсолютный риск заболеваемости раком, вычисленный для заданных доз облучения и облучённых органов и тканей отдельно для пола s и возраста дожития a ; $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, равный 2; e – текущий возраст человека, в котором он жив; a – возраст, на который вычисляется риск EAR (возраст дожития); S – функция дожития; a_{max} – максимальный возраст дожития, равный 100 лет.

Согласно МКРЗ [8] $DDREF$ – это «Экспертно оцененный параметр, который объясняет обычно сниженную биологическую эффективность (на единицу дозы) радиационного воздействия малых доз и малых мощностей доз, если сравнивать её с эффективностью высоких доз и высоких мощностей доз».

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.

$$S(s, e, a) = \exp \left[- \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{общ.смерт.}(s, k) \right] . \quad (3)$$

$$a > e$$

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

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

Различие величин риска LAR и REID заключается в том, что при вычислении LAR используется функция дожития S без учёта дозы облучения, а для вычисления REID – функция дожития с учётом полученной дозы облучения. А так же, для вычисления LAR МКРЗ вводит дополнительный коэффициент $DDREF$, который вдвое уменьшает значение пожизненного риска.

Величина LAR даёт менее точный результат, чем REID, но обладает другим преимуществом – более простым способом вычисления. Также LAR (без учёта $DDREF$) завышает значение пожизненного риска по сравнению с REID, то есть является более консервативной оценкой рис-

ка. Опираясь на позицию МКРЗ, где величина LAR принята в качестве основной, в данной работе оценки пожизненного риска тоже будут основаны на LAR.

Различие в вычислении рисков для внешнего и внутреннего облучения заключается в том, что внешнее облучение по умолчанию распределяется на всё тело человека, поэтому в расчётах можно использовать значение эквивалентной дозы, применяя её в моделях риска для всех солидных раков и лейкозов. Внутреннее облучение распределено неравномерно по телу человека. Для расчёта радиационных рисков от внутреннего облучения требуется учитывать эквивалентные дозы в отдельных органах и тканях. Если известна только ожидаемая эффективная доза (ОЭД) внутреннего облучения (и дозо-образующие радионуклиды), значение ОЭД требуется перевести в набор эквивалентных доз в отдельных органах и тканях, используя для этого базу данных (БД) тканевых коэффициентов МКРЗ [11]. Если известна объёмная активность радионуклидов, она так же переводится в набор эквивалентных доз по органам и тканям, с учётом возрастной зависимости годового объёма вдыхаемого человеком воздуха [12] в случае поступления радионуклидов ингаляционным путём.

Схематически методика оценки пожизненного радиационного риска от внутреннего облучения представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схематическое описание технологии оценки пожизненного атрибутивного риска от внутреннего облучения.

Важно отметить, что модели оценки радиационных рисков МКРЗ базируются на заключениях НКДАР ООН, которые, в свою очередь, учитывают итоги крупномасштабных радиационно-эпидемиологических исследований после аварии на Чернобыльской АЭС [13-17].

Результаты и обсуждение

В табл. 1-28 в Приложении приведены оценки величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) онкозаболеваемости для женщин и мужчин в возрастных группах (на момент поступления изотопа) 5, 20 и 50 лет после однократного перорального, а для инертных газов – ингаляционного поступления в организм суммарного набора изотопов от ОЯТ БРЕСТ с ожидаемой эффективной дозой 1 мЗв при различных временах выдержки (от 10 до 10^7 лет). Значения активного медианного аэродинамического диаметра (АМАД) и типа соединения радионуклида при ингаляции выбирались таким образом, чтобы LAR был максимальным. Основные радионуклиды ОЯТ реакторов БРЕСТ и ВВЭР приведены в работе [4]. Какие можно сделать основные выводы?

При выдержке 10 лет основными дозо-образующими, а, следовательно, и риск-образующими радионуклидами являются ^{137}Cs и ^{90}Sr . LAR для девочек (табл. 1) равен $7,45 \cdot 10^{-5}$, что в 3,1 раза выше чем для женщин ($2,31 \cdot 10^{-5}$).

Через 100 лет выдержки наибольший вклад в риск дают ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{238}Pu и ^{90}Sr . Важно отметить, что для возрастной группы 5 лет (девочки и мальчики) значение LAR уже меньше $5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ (введённое в действующие НРБ-99/2009) [12].

При времени выдержки 1000 лет наибольшую «радиотоксичность» показывают ^{241}Am , ^{239}Pu и ^{240}Pu .

Через 10000 лет наибольший риск обусловлен ^{239}Pu и ^{240}Pu . Для женщин (табл. 4) эти радионуклиды дают 96,9% вклада в пожизненный риск, а для мужчин (табл. 11) – 97,7%.

При выдержке 100000 лет, как видно из табл. 5, 12, наряду с ^{239}Pu высокий вклад в радиационный риск даёт ^{222}Rn . В частности, для возрастной группы 50 лет этот радионуклид даёт вклад в радиационные риски 85,66% для женщин и 74,95% для мужчин.

Этот радионуклид (^{222}Rn) является также основным дозо-риск-образующим и при выдержке 1 млн лет и 10 млн лет (табл. 6, 7, 13, 14).

В табл. 15-27 приведены оценки величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) онкозаболеваемости для различных половых и возрастных групп после поступления радионуклидов от ОЯТ ВВЭР.

При выдержке 10 лет основными дозо-риск-образующими изотопами являются ^{137}Cs и ^{90}Sr . При этом величина LAR превышает аналогичный показатель для реактора БРЕСТ в 1,24 раза (женщины) и 1,14 раза (мужчины).

Через 100 лет выдержки наибольший вклад в риск дают ^{90}Sr и ^{137}Cs . Необходимо отметить, что для ОЯТ реактора БРЕСТ на этом временном интервале наибольший вклад в радиационный риск давал ^{241}Am . Важно также отметить, что величина LAR для ОЯТ реактора ВВЭР превышает аналогичный показатель ОЯТ реактора БРЕСТ (контрольная группа – девочки в возрасте 5 лет) в 1,64 раза.

При времени выдержки 1000 лет наибольшую «радиотоксичность» (вклад в LAR выше 10%) показывают ^{241}Am , ^{246}Cm , ^{240}Pu . Величина LAR для ОЯТ реактора ВВЭР превышает аналогичный показатель ОЯТ реактора БРЕСТ только на 7%.

При выдержке 10000 лет наибольший риск (табл. 18, 25) обусловлен ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{246}Cm и ^{14}C .

Через 100000 лет основное влияние на радиационный риск от ОЯТ реактора ВВЭР обеспечивают следующие изотопы: ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{222}Rn .

При выдержке 1 млн лет радиационный риск обусловлен радионуклидами ^{229}Th , ^{222}Rn , ^{223}Fr и ^{242}Pu .

Через 10 млн лет радиационный риск определяется в основном ^{222}Rn .

На рис. 2, 3 показан вклад указанных выше дозо-риск-образующих радионуклидов (ДРОР) в пожизненный атрибутивный риск онкозаболеваемости (LAR) ОЯТ БРЕСТ и ОЯТ ВВЭР.

Рис. 2. Вклад в пожизненный атрибутивный риск онкозаболеваемости (LAR) после однократного попадания в организм человека доза-риск-образующих радионуклидов (ДРОР) ОЯТ реактора **БРЕСТ** различного времени выдержки (контрольная группа – девочки, возраст 5 лет).

Рис. 3. Вклад в пожизненный атрибутивный риск онкозаболеваемости (LAR) после однократного попадания в организм человека доза-риск-определяющих радионуклидов (ДРОР) ОЯТ реактора **ВВЭР-1000** различного времени выдержки (контрольная группа – девочки, возраст 5 лет).

Рис. 4. Отношение R пожизненного атрибутивного риска онкозаболеваемости (LAR) после однократного попадания в организм человека радионуклидов ОЯТ реактора **ВВЭР-1000** к пожизненному атрибутивному риску онкозаболеваемости (LAR) после однократного попадания в организм человека радионуклидов ОЯТ реактора **БРЕСТ** при различном времени выдержки
 $(R = LAR_{\text{ВВЭР-1000}} / LAR_{\text{БРЕСТ}}; \text{контрольная группа – девочки, возраст 5 лет}).$

На рис. 4 показано отношение LAR ОЯТ реактора ВВЭР к LAR ОЯТ реактора БРЕСТ ($R = LAR_{\text{ВВЭР}} / LAR_{\text{БРЕСТ}}$, девочки, возраст при поступлении изотопов 5 лет). Контрольная группа (девочки, возраст 5 лет) выбрана из условия максимального отношения зависимости «доза-эффект» для этой категории облучённых [8]. На рисунке видно, что на интервалах выдержки до 10^4 лет $R > 1$, т.е. «радиотоксичность» ОЯТ ВВЭР выше, чем ОЯТ БРЕСТ. Поэтому, как было показано в [1], при выдержке более 100 лет радиационный риск ОЯТ БРЕСТ уже становится ниже риска изотопов природного урана, а для ОЯТ ВВЭР такой эффект достигается только при сроках выдержки более 1000 лет. Максимального значения R достигает при сроке выдержки 100 лет.

Выводы

1. Проведён сравнительный анализ уровней «радиотоксичности» отдельных радионуклидов ОЯТ реакторов БРЕСТ и ВВЭР в терминах пожизненного атрибутивного (обусловленного) риска возможной индукции онкологических заболеваний с учётом половозрастных характеристик облучённого контингента и различных времён выдержки изотопов (от 10 лет до 10^7 лет).
2. Приводится перечень радионуклидов ОЯТ реактора БРЕСТ и ОЯТ реактора ВВЭР, составляющих основные дозо-риск-образующие изотопы (относительный вклад в величину радиационного риска более 10%) с учётом половозрастных особенностей облучённого контингента и различных времён выдержки ОЯТ.
3. Полученные основные заключения риск-ориентированного анализа возможных радиологических последствий воздействия изотопов ОЯТ имеют принципиальное значение для реализации практической технологии трансмутации долгоживущих радионуклидов.

Приложение

Таблица 1

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 10 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	7,94	2,47E-06	3,31	0,42	1,28E-06	2,76	0,35	5,50E-07	2,31	0,29
²⁴⁴ Cm	1,7	6,02E-07	0,81	0,47	3,20E-07	0,69	0,41	1,63E-07	0,69	0,40
¹³⁴ Cs	2,2	3,62E-06	4,86	2,21	2,10E-06	4,53	2,06	7,91E-07	3,33	1,51
¹³⁷ Cs	25,9	4,34E-05	58,21	2,25	2,48E-05	53,49	2,07	9,49E-06	39,91	1,54
²³⁸ Pu	11,96	4,20E-06	5,63	0,47	2,22E-06	4,78	0,40	8,80E-07	3,70	0,31
²³⁹ Pu	1,6	5,27E-07	0,71	0,44	2,88E-07	0,62	0,39	1,08E-07	0,45	0,28
²⁴⁰ Pu	2,2	7,25E-07	0,97	0,44	3,96E-07	0,85	0,39	1,48E-07	0,62	0,28
²⁴¹ Pu	8,48	2,04E-06	2,74	0,32	1,22E-06	2,64	0,31	2,88E-07	1,21	0,14
⁹⁰ Sr	33	1,50E-05	20,11	0,61	1,24E-05	26,71	0,81	1,09E-05	45,67	1,38
⁹⁰ Y	3,18	1,97E-06	2,64	0,83	1,36E-06	2,94	0,92	5,01E-07	2,11	0,66
LAR		7,45E-05			4,64E-05			2,38E-05		

Таблица 2

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 100 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	50	1,56E-05	33,44	0,67	8,05E-06	30,08	0,60	3,46E-06	27,26	0,55
²⁴³ Am	0,16	4,94E-08	0,11	0,66	2,56E-08	0,10	0,60	1,09E-08	0,09	0,53
²⁴⁴ Cm	0,16	5,66E-08	0,12	0,76	3,01E-08	0,11	0,70	1,53E-08	0,12	0,75
¹³⁷ Cs	9,3	1,56E-05	33,49	3,60	8,91E-06	33,28	3,58	3,41E-06	26,83	2,88
²³⁸ Pu	16,9	5,93E-06	12,75	0,75	3,13E-06	11,71	0,69	1,24E-06	9,79	0,58
²³⁹ Pu	4,6	1,52E-06	3,26	0,71	8,27E-07	3,09	0,67	3,10E-07	2,44	0,53
²⁴⁰ Pu	6,26	2,06E-06	4,43	0,71	1,13E-06	4,21	0,67	4,22E-07	3,32	0,53
²⁴¹ Pu	0,32	7,71E-08	0,17	0,52	4,61E-08	0,17	0,54	1,09E-08	0,09	0,27
⁹⁰ Sr	11,09	5,03E-06	10,81	0,98	4,16E-06	15,55	1,40	3,65E-06	28,73	2,59
⁹⁰ Y	1,07	6,62E-07	1,42	1,33	4,59E-07	1,71	1,60	1,68E-07	1,33	1,24
LAR		4,65E-05			2,68E-05			1,27E-05		

Таблица 3

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 1000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	53,3	1,66E-05	51,92	0,97	8,58E-06	50,61	0,95	3,69E-06	53,97	1,01
²⁴³ Am	0,68	2,10E-07	0,66	0,97	1,09E-07	0,64	0,94	4,61E-08	0,67	0,99
²³⁷ Np	0,033	1,12E-08	0,04	1,07	5,33E-09	0,03	0,95	3,04E-09	0,04	1,35
²³⁸ Pu	0,067	2,35E-08	0,07	1,10	1,24E-08	0,07	1,09	4,93E-09	0,07	1,08
²³⁹ Pu	20,3	6,69E-06	20,93	1,03	3,65E-06	21,52	1,06	1,37E-06	20,01	0,99
²⁴⁰ Pu	25,4	8,37E-06	26,20	1,03	4,57E-06	26,93	1,06	1,71E-06	25,05	0,99
²⁴² Pu	0,108	3,54E-08	0,11	1,03	1,95E-08	0,11	1,06	7,33E-09	0,11	0,99
²³⁴ U	0,032	2,30E-08	0,07	2,25	1,32E-08	0,08	2,43	4,73E-09	0,07	2,16
LAR		3,20E-05			1,70E-05			6,84E-06		

Таблица 4

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 10 000 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	0,024	7,46E-09	0,02	0,94	3,86E-09	0,02	0,88	1,66E-09	0,02	0,97
²⁴³ Am	1,11	3,42E-07	1,03	0,93	1,78E-07	0,97	0,88	7,53E-08	1,06	0,95
²³⁷ Np	0,15	5,11E-08	0,15	1,03	2,42E-08	0,13	0,88	1,38E-08	0,19	1,30
²³⁹ Pu	60,1	1,98E-05	59,67	0,99	1,08E-05	59,06	0,98	4,05E-06	57,01	0,95
²⁴⁰ Pu	37,5	1,24E-05	37,22	0,99	6,74E-06	36,86	0,98	2,53E-06	35,59	0,95
²⁴² Pu	0,4	1,31E-07	0,40	0,99	7,21E-08	0,39	0,99	2,72E-08	0,38	0,96
²²⁶ Ra	0,047	2,47E-08	0,07	1,58	1,38E-08	0,08	1,60	9,27E-09	0,13	2,77
²²² Rn	0,42	3,79E-07	1,14	2,72	3,98E-07	2,18	5,18	3,78E-07	5,32	12,66
²³⁰ Th	0,045	1,25E-08	0,04	0,83	6,77E-09	0,04	0,82	3,21E-09	0,05	1,01
²³⁴ U	0,12	8,63E-08	0,26	2,17	4,95E-08	0,27	2,25	1,78E-08	0,25	2,08
LAR		3,32E-05			1,83E-05			7,11E-06		

Таблица 5

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 100 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²³ Fr	0,66	1,24E-06	2,28	3,45	6,85E-07	1,50	2,27	2,55E-07	0,70	1,06
²³⁷ Np	1,5	5,11E-07	0,94	0,63	2,42E-07	0,53	0,35	1,38E-07	0,38	0,25
²³⁹ Pu	47,6	1,57E-05	28,87	0,61	8,56E-06	18,76	0,39	3,21E-06	8,79	0,18
²⁴² Pu	3,56	1,17E-06	2,15	0,60	6,42E-07	1,41	0,40	2,42E-07	0,66	0,19
²²⁵ Ra	0,42	1,45E-07	0,27	0,63	1,41E-07	0,31	0,74	1,15E-07	0,31	0,75
²²⁶ Ra	3,89	2,05E-06	3,77	0,97	1,14E-06	2,49	0,64	7,67E-07	2,10	0,54
²²² Rn	34,77	3,13E-05	57,69	1,66	3,30E-05	72,25	2,08	3,13E-05	85,66	2,46
²²⁹ Th	2,1	6,77E-07	1,25	0,59	4,11E-07	0,90	0,43	1,59E-07	0,43	0,21
²³⁰ Th	2,86	7,92E-07	1,46	0,51	4,30E-07	0,94	0,33	2,04E-07	0,56	0,20
²³⁴ U	1	7,19E-07	1,32	1,32	4,12E-07	0,90	0,90	1,48E-07	0,41	0,41
LAR		5,43E-05			4,56E-05			3,65E-05		

Таблица 6

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 1 000 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²⁷ Ac	1,56	4,30E-07	0,62	0,40	3,18E-07	0,53	0,34	1,34E-07	0,27	0,17
²²³ Fr	5,9	1,11E-05	16,00	2,71	6,12E-06	10,12	1,71	2,28E-06	4,57	0,77
²³⁷ Np	3,9	1,33E-06	1,92	0,49	6,30E-07	1,04	0,27	3,60E-07	0,72	0,19
²⁴² Pu	2,37	7,77E-07	1,12	0,47	4,27E-07	0,71	0,30	1,61E-07	0,32	0,14
²²⁵ Ra	3,78	1,33E-06	1,92	0,51	1,27E-06	2,10	0,56	1,03E-06	2,07	0,55
²²⁶ Ra	5,3	2,80E-06	4,04	0,76	1,55E-06	2,56	0,48	1,04E-06	2,10	0,40
²²² Rn	47,53	4,29E-05	61,94	1,30	4,51E-05	74,49	1,57	4,28E-05	85,92	1,81
²²⁹ Th	19,13	6,17E-06	8,92	0,47	3,75E-06	6,19	0,32	1,45E-06	2,90	0,15
²³⁰ Th	3,9	1,08E-06	1,56	0,40	5,87E-07	0,97	0,25	2,79E-07	0,56	0,14
²³³ U	1,9	1,36E-06	1,96	1,03	7,78E-07	1,29	0,68	2,79E-07	0,56	0,30
LAR		6,92E-05			6,05E-05			4,98E-05		

Таблица 7

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 10 000 000 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²⁷ Ac	3,7	1,02E-06	1,34	0,36	7,55E-07	1,02	0,27	3,17E-07	0,47	0,13
²²³ Fr	0,7	1,31E-06	1,73	2,47	7,26E-07	0,98	1,40	2,70E-07	0,40	0,57
²³¹ Pa	2,4	5,04E-07	0,66	0,28	4,78E-07	0,64	0,27	1,31E-07	0,19	0,08
²²⁶ Ra	7,9	4,18E-06	5,49	0,70	2,31E-06	3,11	0,39	1,56E-06	2,32	0,29
²²² Rn	70,77	6,38E-05	83,92	1,19	6,71E-05	90,27	1,28	6,37E-05	94,85	1,34
²²⁹ Th	2,2	7,09E-07	0,93	0,42	4,31E-07	0,58	0,26	1,66E-07	0,25	0,11
²³⁰ Th	5,9	1,63E-06	2,15	0,36	8,88E-07	1,19	0,20	4,21E-07	0,63	0,11
²³⁴ U	1,38	9,92E-07	1,31	0,95	5,69E-07	0,77	0,55	2,04E-07	0,30	0,22
²³⁶ U	1,4	1,01E-06	1,33	0,95	5,80E-07	0,78	0,56	2,08E-07	0,31	0,22
²³⁸ U	1,2	8,61E-07	1,13	0,94	4,93E-07	0,66	0,55	1,79E-07	0,27	0,22
LAR		7,60E-05			7,43E-05			6,71E-05		

Таблица 8

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 10 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	7,94	3,48E-06	5,17	0,65	1,49E-06	3,55	0,45	6,39E-07	2,76	0,35
²⁴⁴ Cm	1,7	9,05E-07	1,34	0,79	4,04E-07	0,96	0,56	1,90E-07	0,82	0,48
¹³⁴ Cs	2,2	1,94E-06	2,88	1,31	1,29E-06	3,06	1,39	6,03E-07	2,61	1,18
¹³⁷ Cs	25,9	2,29E-05	34,06	1,31	1,46E-05	34,84	1,35	7,06E-06	30,55	1,18
²³⁸ Pu	11,96	5,80E-06	8,62	0,72	2,82E-06	6,71	0,56	1,02E-06	4,42	0,37
²³⁹ Pu	1,6	7,20E-07	1,07	0,67	3,63E-07	0,86	0,54	1,26E-07	0,54	0,34
²⁴⁰ Pu	2,2	9,89E-07	1,47	0,67	4,99E-07	1,19	0,54	1,73E-07	0,75	0,34
²⁴¹ Pu	8,48	2,62E-06	3,90	0,46	1,43E-06	3,40	0,40	3,38E-07	1,46	0,17
⁹⁰ Sr	33	2,50E-05	37,11	1,12	1,71E-05	40,61	1,23	1,22E-05	52,65	1,60
⁹⁰ Y	3,18	2,95E-06	4,38	1,38	2,03E-06	4,82	1,51	7,94E-07	3,43	1,08
LAR		6,73E-05			4,20E-05			2,31E-05		

Таблица 9

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 100 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	50	2,19E-05	41,50	0,83	9,40E-06	34,01	0,68	4,02E-06	30,33	0,61
²⁴³ Am	0,16	6,93E-08	0,13	0,82	2,95E-08	0,11	0,67	1,25E-08	0,09	0,59
²⁴⁴ Cm	0,16	8,52E-08	0,16	1,01	3,80E-08	0,14	0,86	1,78E-08	0,13	0,84
¹³⁷ Cs	9,3	8,23E-06	15,56	1,67	5,26E-06	19,02	2,04	2,54E-06	19,13	2,06
²³⁸ Pu	16,9	8,20E-06	15,50	0,92	3,99E-06	14,41	0,85	1,45E-06	10,90	0,64
²³⁹ Pu	4,6	2,07E-06	3,91	0,85	1,04E-06	3,77	0,82	3,62E-07	2,73	0,59
²⁴⁰ Pu	6,26	2,82E-06	5,32	0,85	1,42E-06	5,14	0,82	4,93E-07	3,72	0,59
²⁴¹ Pu	0,32	9,89E-08	0,19	0,58	5,40E-08	0,20	0,61	1,28E-08	0,10	0,30
⁹⁰ Sr	11,09	8,38E-06	15,85	1,43	5,74E-06	20,75	1,87	4,09E-06	30,86	2,78
⁹⁰ Y	1,07	9,92E-07	1,88	1,75	6,81E-07	2,46	2,30	2,67E-07	2,01	1,88
LAR		5,29E-05			2,77E-05			1,33E-05		

Таблица 10

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 1000 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	53,3	2,34E-05	52,73	0,99	1,00E-05	48,72	0,91	4,29E-06	53,87	1,01
²⁴³ Am	0,68	2,95E-07	0,66	0,98	1,25E-07	0,61	0,90	5,30E-08	0,67	0,98
²³⁷ Np	0,033	1,53E-08	0,03	1,05	6,25E-09	0,03	0,92	3,41E-09	0,04	1,30
²³⁸ Pu	0,067	3,25E-08	0,07	1,09	1,58E-08	0,08	1,15	5,73E-09	0,07	1,07
²³⁹ Pu	20,3	9,13E-06	20,58	1,01	4,60E-06	22,38	1,10	1,60E-06	20,06	0,99
²⁴⁰ Pu	25,4	1,14E-05	25,76	1,01	5,76E-06	28,01	1,10	2,00E-06	25,12	0,99
²⁴² Pu	0,108	4,83E-08	0,11	1,01	2,45E-08	0,12	1,10	8,56E-09	0,11	1,00
²³⁴ U	0,032	1,93E-08	0,04	1,36	1,12E-08	0,05	1,69	4,47E-09	0,06	1,76
LAR		4,44E-05			2,06E-05			7,96E-06		

Таблица 11

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 10 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	0,024	1,05E-08	0,02	0,97	4,51E-09	0,02	0,83	1,93E-09	0,02	1,00
²⁴³ Am	1,11	4,81E-07	1,07	0,96	2,05E-07	0,90	0,81	8,66E-08	1,07	0,97
²³⁷ Np	0,15	6,97E-08	0,16	1,03	2,84E-08	0,12	0,83	1,55E-08	0,19	1,28
²³⁹ Pu	60,1	2,71E-05	60,16	1,00	1,36E-05	59,96	1,00	4,73E-06	58,69	0,98
²⁴⁰ Pu	37,5	1,69E-05	37,52	1,00	8,51E-06	37,42	1,00	2,95E-06	36,64	0,98
²⁴² Pu	0,4	1,79E-07	0,40	0,99	9,07E-08	0,40	1,00	3,17E-08	0,39	0,98
²²⁶ Ra	0,047	2,51E-08	0,06	1,19	1,52E-08	0,07	1,42	9,69E-09	0,12	2,56
²²² Rn	0,42	1,86E-07	0,41	0,98	2,03E-07	0,89	2,12	2,10E-07	2,61	6,22
²³⁰ Th	0,045	1,67E-08	0,04	0,83	7,40E-09	0,03	0,72	3,58E-09	0,04	0,99
²³⁴ U	0,12	7,23E-08	0,16	1,34	4,19E-08	0,18	1,53	1,68E-08	0,21	1,74
LAR		4,50E-05			2,27E-05			8,05E-06		

Таблица 12

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 100 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²³ Fr	0,66	5,82E-07	1,31	1,99	3,75E-07	1,18	1,79	1,80E-07	0,77	1,17
²³⁷ Np	1,5	6,97E-07	1,57	1,05	2,84E-07	0,90	0,60	1,55E-07	0,67	0,45
²³⁹ Pu	47,6	2,14E-05	48,22	1,01	1,08E-05	34,07	0,72	3,74E-06	16,12	0,34
²⁴² Pu	3,56	1,59E-06	3,58	1,01	8,07E-07	2,55	0,72	2,82E-07	1,21	0,34
²²⁵ Ra	0,42	1,92E-07	0,43	1,03	1,65E-07	0,52	1,24	1,18E-07	0,51	1,21
²²⁶ Ra	3,89	2,09E-06	4,70	1,21	1,26E-06	3,96	1,02	8,02E-07	3,46	0,89
²²² Rn	34,77	1,54E-05	34,56	0,99	1,68E-05	52,90	1,52	1,74E-05	74,95	2,16
²²⁹ Th	2,1	8,32E-07	1,87	0,89	4,24E-07	1,34	0,64	1,71E-07	0,74	0,35
²³⁰ Th	2,86	1,06E-06	2,39	0,84	4,70E-07	1,48	0,52	2,27E-07	0,98	0,34
²³⁴ U	1	6,03E-07	1,36	1,36	3,49E-07	1,10	1,10	1,40E-07	0,60	0,60
LAR		4,44E-05			3,17E-05			2,32E-05		

Таблица 13

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 1 000 000 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²⁷ Ac	1,56	6,26E-07	1,41	0,90	4,39E-07	1,21	0,77	1,65E-07	0,54	0,35
²²³ Fr	5,9	5,21E-06	11,70	1,98	3,35E-06	9,23	1,56	1,61E-06	5,28	0,90
²³⁷ Np	3,9	1,81E-06	4,08	1,05	7,39E-07	2,03	0,52	4,03E-07	1,32	0,34
²⁴² Pu	2,37	1,06E-06	2,38	1,01	5,38E-07	1,48	0,62	1,88E-07	0,62	0,26
²²⁶ Ra	3,78	1,77E-06	3,98	1,05	1,49E-06	4,10	1,08	1,06E-06	3,48	0,92
²²⁶ Ra	5,3	2,85E-06	6,41	1,21	1,71E-06	4,71	0,89	1,09E-06	3,59	0,68
²²² Rn	47,53	2,10E-05	47,21	0,99	2,29E-05	63,05	1,33	2,38E-05	78,17	1,64
²³⁰ Th	19,13	7,59E-06	17,06	0,89	3,86E-06	10,63	0,56	1,56E-06	5,11	0,27
²³⁰ Th	3,9	1,45E-06	3,26	0,84	6,42E-07	1,77	0,45	3,10E-07	1,02	0,26
²³³ U	1,9	1,12E-06	2,51	1,32	6,55E-07	1,80	0,95	2,62E-07	0,86	0,45
LAR		4,45E-05			3,64E-05			3,04E-05		

Таблица 14

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ БРЕСТ с временем выдержки 10 000 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²⁷ Ac	3,7	1,48E-06	3,39	0,92	1,04E-06	2,51	0,68	3,92E-07	1,00	0,27
²²³ Fr	0,7	6,18E-07	1,41	2,01	3,98E-07	0,96	1,37	1,91E-07	0,49	0,70
²³¹ Pa	2,4	6,96E-07	1,59	0,66	5,19E-07	1,25	0,52	1,63E-07	0,42	0,17
²²⁶ Ra	7,9	4,27E-06	9,74	1,23	2,55E-06	6,16	0,78	1,63E-06	4,18	0,53
²²² Rn	70,77	3,13E-05	71,39	1,01	3,41E-05	82,35	1,16	3,54E-05	90,82	1,28
²²⁹ Th	2,2	8,72E-07	1,99	0,90	4,44E-07	1,07	0,49	1,79E-07	0,46	0,21
²³⁰ Th	5,9	2,19E-06	5,01	0,85	9,71E-07	2,34	0,40	4,69E-07	1,20	0,20
²³⁴ U	1,38	8,32E-07	1,90	1,38	4,81E-07	1,16	0,84	1,93E-07	0,49	0,36
²³⁶ U	1,4	8,46E-07	1,93	1,38	4,90E-07	1,18	0,85	1,96E-07	0,50	0,36
²³⁸ U	1,2	7,18E-07	1,64	1,37	4,20E-07	1,01	0,84	1,70E-07	0,44	0,36
LAR		4,38E-05			4,14E-05			3,90E-05		

Таблица 15

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 10 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
⁹⁰ Sr	40,8	1,85E-05	20,10	0,49	1,53E-05	26,30	0,64	1,34E-05	43,76	1,07
¹³⁷ Cs	34,1	5,71E-05	61,91	1,82	3,27E-05	56,11	1,65	1,25E-05	40,72	1,19
²⁴⁴ Cm	8,7	3,08E-06	3,34	0,38	1,64E-06	2,81	0,32	8,34E-07	2,72	0,31
¹³⁴ Cs	5,1	8,39E-06	9,09	1,78	4,86E-06	8,36	1,64	1,83E-06	5,97	1,17
⁹⁰ Y	3,9	2,41E-06	2,62	0,67	1,67E-06	2,87	0,74	6,14E-07	2,00	0,51
²³⁸ Pu	2	7,02E-07	0,76	0,38	3,71E-07	0,64	0,32	1,47E-07	0,48	0,24
²⁴¹ Pu	1,3	3,13E-07	0,34	0,26	1,87E-07	0,32	0,25	4,42E-08	0,14	0,11
⁸⁵ Kr	1,3	1,17E-06	1,27	0,98	1,23E-06	2,12	1,63	1,17E-06	3,81	2,93
²⁴¹ Am	1,18	3,67E-07	0,40	0,34	1,90E-07	0,33	0,28	8,17E-08	0,27	0,23
²⁴⁶ Cm	0,54	1,67E-07	0,18	0,33	8,58E-08	0,15	0,27	3,68E-08	0,12	0,22
LAR		9,23E-05			5,82E-05			3,07E-05		

Таблица 16

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 100 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
⁹⁰ Sr	32,38	1,47E-05	19,33	0,60	1,22E-05	25,89	0,80	1,07E-05	44,09	1,36
¹³⁷ Cs	28,82	4,83E-05	63,45	2,20	2,76E-05	58,81	2,04	1,06E-05	43,68	1,52
²⁴¹ Am	18,16	5,65E-06	7,42	0,41	2,92E-06	6,23	0,34	1,26E-06	5,20	0,29
²³⁸ Pu	6,7	2,35E-06	3,09	0,46	1,24E-06	2,65	0,39	4,93E-07	2,04	0,30
²⁴⁰ Cm	3,6	1,11E-06	1,46	0,41	5,72E-07	1,22	0,34	2,45E-07	1,02	0,28
⁹⁰ Y	3,1	1,92E-06	2,52	0,81	1,33E-06	2,83	0,91	4,88E-07	2,02	0,65
²⁴⁰ Pu	2,26	7,44E-07	0,98	0,43	4,06E-07	0,87	0,38	1,52E-07	0,63	0,28
²⁴⁴ Cm	1,88	6,65E-07	0,87	0,47	3,54E-07	0,75	0,40	1,80E-07	0,75	0,40
²³⁹ Pu	1,2	3,95E-07	0,52	0,43	2,16E-07	0,46	0,38	8,09E-08	0,33	0,28
²⁴³ Am	0,86	2,65E-07	0,35	0,41	1,38E-07	0,29	0,34	5,83E-08	0,24	0,28
LAR		7,61E-05			4,69E-05			2,42E-05		

Таблица 17

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 1000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	40,39	1,26E-05	36,71	0,91	6,50E-06	36,02	0,89	2,80E-06	37,83	0,94
²⁴⁶ Cm	23,92	7,39E-06	21,60	0,90	3,80E-06	21,07	0,88	1,63E-06	22,05	0,92
²⁴⁰ Pu	15,47	5,10E-06	14,89	0,96	2,78E-06	15,41	1,00	1,04E-06	14,11	0,91
²³⁹ Pu	9,24	3,04E-06	8,89	0,96	1,66E-06	9,20	1,00	6,23E-07	8,42	0,91
²⁴³ Am	5,9	1,82E-06	5,32	0,90	9,45E-07	5,23	0,89	4,00E-07	5,41	0,92
²⁴⁵ Cm	2,5	7,71E-07	2,25	0,90	3,95E-07	2,19	0,88	1,69E-07	2,29	0,92
¹⁴ C	1,8	3,36E-06	9,80	5,45	1,86E-06	10,31	5,73	6,92E-07	9,36	5,20
²⁴² Pu	0,32	1,05E-07	0,31	0,96	5,77E-08	0,32	1,00	2,17E-08	0,29	0,92
²⁴⁸ Cm	0,21	6,70E-08	0,20	0,93	3,43E-08	0,19	0,91	1,46E-08	0,20	0,94
²⁴¹ Pu	0,056	1,35E-08	0,04	0,70	8,07E-09	0,04	0,80	1,90E-09	0,03	0,46
LAR		3,42E-05			1,81E-05			7,39E-06		

Таблица 18

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 10 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²³⁹ Pu	29,77	9,81E-06	27,77	0,93	5,35E-06	28,24	0,95	2,01E-06	26,68	0,90
²⁴⁶ Cm	23,07	7,13E-06	20,19	0,87	3,67E-06	19,36	0,84	1,57E-06	20,90	0,91
²⁴⁰ Pu	21,56	7,10E-06	20,12	0,93	3,88E-06	20,46	0,95	1,45E-06	19,33	0,90
²⁴³ Am	9,1	2,81E-06	7,95	0,87	1,46E-06	7,69	0,84	6,17E-07	8,20	0,90
²⁴¹ Am	6,6	2,05E-06	5,81	0,88	1,06E-06	5,61	0,85	4,57E-07	6,07	0,92
²⁴⁵ Cm	4,3	1,33E-06	3,76	0,87	6,80E-07	3,59	0,83	2,91E-07	3,87	0,90
¹⁴ C	2,2	4,10E-06	11,61	5,28	2,28E-06	12,01	5,46	8,46E-07	11,25	5,11
²⁴² Pu	2	6,56E-07	1,86	0,93	3,61E-07	1,90	0,95	1,36E-07	1,81	0,90
²⁴⁸ Cm	0,76	2,43E-07	0,69	0,90	1,24E-07	0,66	0,86	5,28E-08	0,70	0,92
²²² Rn	0,1	9,02E-08	0,26	2,55	9,48E-08	0,50	5,00	9,00E-08	1,20	11,96
LAR		3,53E-05			1,90E-05			7,52E-06		

Таблица 19

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 100 000 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²³⁹ Pu	38,25	1,26E-05	30,86	0,81	6,88E-06	24,57	0,64	2,58E-06	14,63	0,38
²⁴² Pu	29,49	9,68E-06	23,70	0,80	5,32E-06	19,00	0,64	2,00E-06	11,36	0,39
²²² Rn	12,42	1,12E-05	27,42	2,21	1,18E-05	42,07	3,39	1,12E-05	63,41	5,11
²⁴⁸ Cm	9,28	2,96E-06	7,25	0,78	1,52E-06	5,42	0,58	6,45E-07	3,66	0,39
²²³ Th	2,7	8,71E-07	2,13	0,79	5,29E-07	1,89	0,70	2,04E-07	1,16	0,43
²³⁷ Np	2,1	7,15E-07	1,75	0,83	3,39E-07	1,21	0,58	1,94E-07	1,10	0,52
²²⁶ Ra	1,4	7,36E-07	1,80	1,29	4,10E-07	1,46	1,05	2,76E-07	1,57	1,12
²³⁰ Th	1	2,77E-07	0,68	0,68	1,51E-07	0,54	0,54	7,14E-08	0,41	0,41
²²³ Fr	0,86	1,61E-06	3,95	4,59	8,92E-07	3,19	3,71	3,32E-07	1,88	2,19
²²⁵ Ra	0,54	1,86E-07	0,46	0,84	1,81E-07	0,65	1,20	1,47E-07	0,84	1,55
LAR		4,08E-05			2,80E-05			1,76E-05		

Таблица 20

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 1 000 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²³ Th	25,79	8,32E-06	14,51	0,56	5,05E-06	11,97	0,46	1,95E-06	6,83	0,26
²²² Rn	21,16	1,91E-05	33,26	1,57	2,01E-05	47,53	2,25	1,90E-05	66,68	3,15
²⁴² Pu	18,9	6,20E-06	10,81	0,57	3,41E-06	8,07	0,43	1,28E-06	4,49	0,24
²²³ Fr	8	1,50E-05	26,16	3,27	8,30E-06	19,66	2,46	3,09E-06	10,81	1,35
²³⁷ Np	5,3	1,81E-06	3,15	0,59	8,56E-07	2,03	0,38	4,89E-07	1,71	0,32
²²⁵ Ra	5,1	1,80E-06	3,14	0,62	1,71E-06	4,06	0,80	1,39E-06	4,88	0,96
²⁴⁸ Cm	5	1,60E-06	2,78	0,56	8,18E-07	1,94	0,39	3,47E-07	1,22	0,24
²³³ U	2,56	1,83E-06	3,19	1,25	1,05E-06	2,48	0,97	3,76E-07	1,32	0,51
²²⁶ Ra	2,37	1,25E-06	2,17	0,92	6,93E-07	1,64	0,69	4,67E-07	1,64	0,69
²³⁰ Th	1,74	4,82E-07	0,84	0,48	2,62E-07	0,62	0,36	1,24E-07	0,44	0,25
LAR		5,74E-05			4,22E-05			2,86E-05		

Таблица 21

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; женщины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 10 000 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²² Rn	67,78	6,11E-05	74,04	1,09	6,43E-05	86,90	1,28	6,10E-05	94,29	1,39
²²⁶ Ra	7,6	4,02E-06	4,87	0,64	2,22E-06	3,01	0,40	1,50E-06	2,32	0,30
²³⁰ Th	5,7	1,58E-06	1,91	0,34	8,58E-07	1,16	0,20	4,07E-07	0,63	0,11
²²³ Th	5,55	1,79E-06	2,17	0,39	1,09E-06	1,47	0,26	4,19E-07	0,65	0,12
²²³ Fr	1,74	3,26E-06	3,95	2,27	1,80E-06	2,44	1,40	6,71E-07	1,04	0,60
²²⁷ Ac	1,43	3,95E-07	0,48	0,33	2,92E-07	0,39	0,28	1,23E-07	0,19	0,13
²³⁴ U	1,3	9,35E-07	1,13	0,87	5,36E-07	0,72	0,56	1,92E-07	0,30	0,23
¹²⁹ I	1,29	8,16E-06	9,89	7,66	2,19E-06	2,96	2,29	8,48E-08	0,13	0,10
²³⁷ Np	1,27	4,32E-07	0,52	0,41	2,05E-07	0,28	0,22	1,17E-07	0,18	0,14
²³⁸ U	1,2	8,61E-07	1,04	0,87	4,93E-07	0,67	0,56	1,79E-07	0,28	0,23
LAR		8,25E-05			7,39E-05			6,47E-05		

Таблица 22

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 10 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
⁹⁰ Sr	40,8	3,09E-05	40,37	0,99	2,11E-05	42,59	1,04	1,51E-05	52,44	1,29
¹³⁷ Cs	34,1	3,02E-05	39,44	1,16	1,93E-05	38,90	1,14	9,30E-06	32,40	0,95
²⁴¹ Am	8,7	4,63E-06	6,06	0,70	2,07E-06	4,17	0,48	9,70E-07	3,38	0,39
¹³⁴ Cs	5,1	4,50E-06	5,88	1,15	2,98E-06	6,02	1,18	1,40E-06	4,87	0,95
⁹⁰ Y	3,9	3,62E-06	4,73	1,21	2,48E-06	5,01	1,28	9,73E-07	3,39	0,87
²³⁸ Pu	2	9,70E-07	1,27	0,63	4,72E-07	0,95	0,48	1,71E-07	0,60	0,30
²⁴¹ Pu	1,3	4,02E-07	0,53	0,40	2,19E-07	0,44	0,34	5,18E-08	0,18	0,14
⁸⁵ Kr	1,3	5,74E-07	0,75	0,58	6,27E-07	1,26	0,97	6,51E-07	2,27	1,74
²⁴¹ Am	1,18	5,17E-07	0,68	0,57	2,22E-07	0,45	0,38	9,49E-08	0,33	0,28
²⁴⁶ Cm	0,54	2,34E-07	0,31	0,57	9,90E-08	0,20	0,37	4,23E-08	0,15	0,27
LAR		7,65E-05			4,96E-05			2,87E-05		

Таблица 23

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 100 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
⁹⁰ Sr	32,38	2,45E-05	35,73	1,10	1,68E-05	39,82	1,23	1,19E-05	50,96	1,57
¹³⁷ Cs	28,82	2,55E-05	37,19	1,29	1,63E-05	38,74	1,34	7,86E-06	33,52	1,16
²⁴¹ Am	18,16	7,96E-06	11,61	0,64	3,42E-06	8,12	0,45	1,46E-06	6,23	0,34
²³⁸ Pu	6,7	3,25E-06	4,74	0,71	1,58E-06	3,76	0,56	5,73E-07	2,44	0,36
²⁴⁶ Cm	3,6	1,56E-06	2,28	0,63	6,60E-07	1,57	0,44	2,82E-07	1,20	0,33
⁹⁰ Y	3,1	2,87E-06	4,19	1,35	1,97E-06	4,69	1,51	7,74E-07	3,30	1,06
²⁴⁰ Pu	2,26	1,02E-06	1,48	0,66	5,13E-07	1,22	0,54	1,78E-07	0,76	0,34
²⁴⁴ Cm	1,88	1,00E-06	1,46	0,78	4,46E-07	1,06	0,56	2,10E-07	0,89	0,48
²³⁹ Pu	1,2	5,40E-07	0,79	0,66	2,72E-07	0,65	0,54	9,44E-08	0,40	0,34
²⁴³ Am	0,86	3,73E-07	0,54	0,63	1,59E-07	0,38	0,44	6,71E-08	0,29	0,33
LAR		6,86E-05			4,21E-05			2,34E-05		

Таблица 24

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 1000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²⁴¹ Am	40,39	1,77E-05	39,65	0,98	7,60E-06	37,46	0,93	3,25E-06	39,36	0,97
²⁴⁶ Cm	23,92	1,04E-05	23,22	0,97	4,39E-06	21,63	0,90	1,87E-06	22,69	0,95
²⁴⁰ Pu	15,47	6,96E-06	15,57	1,01	3,51E-06	17,31	1,12	1,22E-06	14,75	0,95
²³⁹ Pu	9,24	4,16E-06	9,30	1,01	2,10E-06	10,33	1,12	7,27E-07	8,80	0,95
²⁴³ Am	5,9	2,56E-06	5,72	0,97	1,09E-06	5,37	0,91	4,60E-07	5,57	0,94
²⁴⁵ Cm	2,5	1,08E-06	2,41	0,97	4,56E-07	2,25	0,90	1,94E-07	2,36	0,94
¹⁴ C	1,8	1,59E-06	3,55	1,97	1,02E-06	5,05	2,80	4,90E-07	5,93	3,30
²⁴² Pu	0,32	1,43E-07	0,32	1,00	7,26E-08	0,36	1,12	2,54E-08	0,31	0,96
²⁴⁸ Cm	0,21	9,35E-08	0,21	1,00	3,96E-08	0,20	0,93	1,69E-08	0,20	0,97
²⁴¹ Pu	0,056	1,73E-08	0,04	0,69	9,44E-09	0,05	0,83	2,23E-09	0,03	0,48
LAR		4,47E-05			2,03E-05			8,25E-06		

Таблица 25

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 10 000 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²³⁹ Pu	29,77	1,34E-05	29,76	1,00	6,75E-06	31,44	1,06	2,34E-06	28,25	0,95
²⁴⁰ Pu	23,07	1,00E-05	22,24	0,96	4,23E-06	19,70	0,85	1,81E-06	21,79	0,94
²⁴¹ Pu	21,56	9,70E-06	21,55	1,00	4,89E-06	22,78	1,06	1,70E-06	20,47	0,95
²⁴³ Am	9,1	3,94E-06	8,76	0,96	1,68E-06	7,82	0,86	7,10E-07	8,56	0,94
²⁴¹ Am	6,6	2,89E-06	6,43	0,97	1,24E-06	5,78	0,88	5,31E-07	6,41	0,97
²⁴⁵ Cm	4,3	1,86E-06	4,12	0,96	7,84E-07	3,65	0,85	3,34E-07	4,04	0,94
¹⁴ C	2,2	1,94E-06	4,30	1,96	1,25E-06	5,82	2,65	5,99E-07	7,22	3,28
²⁴² Pu	2	8,95E-07	1,99	0,99	4,54E-07	2,11	1,06	1,58E-07	1,91	0,96
²⁴⁸ Cm	0,76	3,38E-07	0,75	0,99	1,43E-07	0,67	0,88	6,10E-08	0,74	0,97
²²² Rn	0,1	4,42E-08	0,10	0,98	4,82E-08	0,22	2,25	5,01E-08	0,60	6,04
LAR		4,50E-05			2,15E-05			8,29E-06		

Таблица 26

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 100 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²³⁹ Pu	38,25	1,72E-05	38,94	1,02	8,68E-06	34,21	0,89	3,01E-06	22,28	0,58
²⁴² Pu	29,49	1,32E-05	29,86	1,01	6,69E-06	26,37	0,89	2,34E-06	17,32	0,59
²²² Rn	12,42	5,49E-06	12,41	1,00	5,99E-06	23,61	1,90	6,22E-06	46,06	3,71
²⁴⁵ Cm	9,28	4,13E-06	9,35	1,01	1,75E-06	6,90	0,74	7,45E-07	5,52	0,59
²²⁹ Th	2,7	1,07E-06	2,42	0,90	5,45E-07	2,15	0,80	2,20E-07	1,63	0,60
²³⁷ Np	2,1	9,76E-07	2,21	1,05	3,98E-07	1,57	0,75	2,17E-07	1,61	0,77
²²⁶ Ra	1,4	7,50E-07	1,70	1,21	4,52E-07	1,78	1,27	2,89E-07	2,14	1,53
²³⁰ Th	1	3,72E-07	0,84	0,84	1,65E-07	0,65	0,65	7,95E-08	0,59	0,59
²²³ Fr	0,86	7,59E-07	1,72	2,00	4,89E-07	1,93	2,24	2,34E-07	1,74	2,02
²²⁶ Ra	0,54	2,47E-07	0,56	1,04	2,13E-07	0,84	1,55	1,51E-07	1,12	2,08
LAR		4,42E-05			2,54E-05			1,35E-05		

Таблица 27

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 1 000 000 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²⁹ Th	25,79	1,02E-05	22,43	0,87	5,21E-06	17,28	0,67	2,10E-06	10,63	0,41
²²² Rn	21,16	9,35E-06	20,49	0,97	1,02E-05	33,86	1,60	1,06E-05	53,69	2,54
²⁴² Pu	18,9	8,46E-06	18,54	0,98	4,29E-06	14,22	0,75	1,50E-06	7,59	0,40
²²³ Fr	8	7,06E-06	15,47	1,93	4,55E-06	15,09	1,89	2,18E-06	11,05	1,38
²³⁷ Np	5,3	2,47E-06	5,40	1,02	1,00E-06	3,33	0,63	5,48E-07	2,78	0,52
²²⁶ Ra	5,1	2,41E-06	5,27	1,03	2,01E-06	6,67	1,31	1,43E-06	7,25	1,42
²⁴⁸ Cm	5	2,23E-06	4,88	0,98	9,43E-07	3,13	0,63	4,01E-07	2,03	0,41
²³³ U	2,56	1,51E-06	3,30	1,29	8,82E-07	2,93	1,14	3,53E-07	1,79	0,70
²²⁶ Ra	2,37	1,27E-06	2,79	1,18	7,65E-07	2,54	1,07	4,89E-07	2,48	1,05
²³⁰ Th	1,74	6,47E-07	1,42	0,81	2,86E-07	0,95	0,55	1,38E-07	0,70	0,40
LAR		4,56E-05			3,01E-05			1,97E-05		

Таблица 28

Вклады изотопов и пожизненные атрибутивные риски (LAR) онкозаболеваемости после однократного поступления в организм суммарного набора изотопов (возраст при поступлении изотопов: 5 лет, 20 лет, 50 лет; мужчины; ОЭД=1 мЗв) и отдельных изотопов от ОЯТ ВВЭР-1000 с временем выдержки 10 000 000 лет

Изотоп	Вклад изотопа в ОЭД, %	LAR (5 лет)	Вклад изотопа в LAR (5 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (5 лет)	LAR (20 лет)	Вклад изотопа в LAR (20 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (20 лет)	LAR (50 лет)	Вклад изотопа в LAR (50 лет), %	Отношение вклада изотопа в риск ко вкладу изотопа в ОЭД (50 лет)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
²²² Rn	67,78	2,99E-05	69,03	1,02	3,27E-05	81,87	1,21	3,39E-05	90,43	1,33
²²⁶ Ra	7,6	4,10E-06	9,46	1,24	2,45E-06	6,15	0,81	1,57E-06	4,18	0,55
²³⁰ Th	5,7	2,12E-06	4,89	0,86	9,38E-07	2,35	0,41	4,53E-07	1,21	0,21
²²⁹ Th	5,55	2,20E-06	5,07	0,91	1,12E-06	2,81	0,51	4,51E-07	1,20	0,22
²²³ Fr	1,74	1,54E-06	3,54	2,03	9,89E-07	2,48	1,42	4,74E-07	1,26	0,73
²²⁷ Ac	1,43	5,74E-07	1,32	0,92	4,03E-07	1,01	0,71	1,51E-07	0,40	0,28
²³⁴ U	1,3	7,84E-07	1,81	1,39	4,53E-07	1,14	0,87	1,82E-07	0,48	0,37
¹²⁹ I	1,29	8,13E-07	1,87	1,45	2,19E-07	0,55	0,42	1,06E-08	0,03	0,02
²³⁷ Np	1,27	5,90E-07	1,36	1,07	2,41E-07	0,60	0,47	1,31E-07	0,35	0,28
²³⁸ U	1,2	7,18E-07	1,66	1,38	4,20E-07	1,05	0,88	1,70E-07	0,45	0,38
LAR		4,34E-05			3,99E-05			3,75E-05		

Литература

1. **Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Максютлов М.А., Туманов К.А., Кашеева П.В., Ловачев С.С., Адамов Е.О., Лопаткин А.В.** Уровни радиологической защиты населения при реализации принципа радиационной эквивалентности: риск-ориентированный подход //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 3. С. 9-23.
2. **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.
3. **Адамов Е.О., Ганев И.Х.** Экологически безупречная ядерная энергетика. М.: НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля, 2007. 145 с.
4. Радиационно-эквивалентное обращение с РАО. Техническая справка 01.2017 НРРЭ. Научный руководитель по РЭ А.В. Лопаткин.
5. 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 [Офиц. сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70190228/> (дата обращения 20.10.2018).
6. 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.
7. 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.
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. 344 с.
9. **Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsuo T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K.** Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987 //Radiat. Res. 1994. V. 137. P. 68-97.
10. **Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максютлов М.А., Корело А.М., Туманов К.А., Пряхин Е.А., Ловачев С.С., Карпенко С.В., Кашеева П.В., Иванов В.К.** Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 1. С. 8-21.
11. 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 20.10.2018).
12. 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.
13. **Konogorov A.P., Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Khait S.E.** A case-control analysis of leukemia in accident emergency workers of Chernobyl //J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol. 2000. V. 19, N 1-2. P. 143-151.
14. **Rogounovitch T.I., Saenko V.A., Ashizawa K., Sedliarou I.A., Namba H., Abrosimov A.Y., Lushnikov E.F., Roumiantsev P.O., Konova M.V., Petoukhova N.S., Tchegotareva I.V., Ivanov V.K., Chekin S.Y., Bogdanova T.I., Tronko M.D., Tsyb A.F., Thomas G.A., Yamashita S.** TP53 codon 72 polymorphism in radiation-associated human papillary thyroid cancer //Oncology Reports. 2006. V. 15, N 4. P. 949-956.
15. **Ivanov V.K., Gorski A.I., Tsyb A.F., Ivanov S.I., Naumenko R.N., Ivanova L.V.** Solid cancer incidence among the Chernobyl emergency workers residing in Russia: estimation of radiation risks //Radiat. Environ. Biophys. 2004. V. 43, N 1. P. 35-42.

16. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Maksioutov M.A., Tumanov K.A., Vlasov O.K., Shchukina N.V., Tsyb A.F.** Radiation-epidemiological studies of thyroid cancer incidence in Russia after the Chernobyl accident (estimation of radiation risks, 1991-2008 follow-up period) //Radiat. Prot. Dosimetry. 2012. V. 151, N 3. P. 489-499. DOI: 10.1093/rpd/ncs019.
17. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Khait S.E., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Maksioutov M.A., Tumanov K.A.** Leukemia incidence in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers //Radiat. Environ. Biophys. 2012. V. 51, N 2. P. 143-149. DOI: 10.1007/s00411-011-0400-y.

“Radiotoxicity” of some radionuclides of the spent nuclear fuel from WWER and BREST reactors in different storage time periods, evaluated with ICRP models

**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 paper presents results of analysis of lifetime attributable risk (LAR) of cancer as a result of radiation exposure due to intake of some radionuclides, components of the nuclear fuel irradiated in BREST and WWER reactors. For risk calculation models described in ICRP 103 publication and identified groups of people exposed to internal radiation, specified by radiation dose, age and sex were used. Different time periods of storage of the spent fuel from 10 to 10⁷ years were used, as well. 5-year old girls will be the most vulnerable group of the exposed people, they will have the highest LAR value. Within storage period to 10000 years the primary radionuclides of the nuclear fuel irradiated in the BREST reactor, contributors to LAR, will be ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr (storage period – 10 y); ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu and ⁹⁰Sr (storage period – 100 y); ²⁴¹Am, ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu (storage period – 1000 y); ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu (storage period – 10000 y). The primary radionuclides of the nuclear fuel irradiated in the WWER reactor, contributors to LAR within time period of 1000 y will be ²⁴¹Am, ²⁴⁶Cm and ²⁴⁰Pu. The relative contribution of the radionuclides to LAR value will exceed 10%. The LAR value of the primary contributors from the fuel irradiated in the WWER reactor will be higher than LAR value of the primary contributors from the fuel irradiated in the BREST reactor. It means that “radiotoxicity” of the spent nuclear fuel from WWER is higher as compared with “radiotoxicity” of the used fuel from the BREST. The obtained data are very important for SNF management and implementation of transmutation fuel cycle.

Key words: lifetime attributable risk (LAR), spent nuclear fuel (SNF) from BREST and WWER reactors, main dose-risk-forming radionuclides, 103 Publication ICRP, decay time of radionuclides, sex and age dependence of radiation risks, transmutation of long-lived radionuclides.

References

1. **Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyajlo A.N., Maksioutov M.A., Tumanov K.A., Kashcheeva P.V., Lovachev S.S., Adamov E.O., Lopatkin A.V.** Application of the radiation equivalence principle to estimation of levels of radiological protection of the population: risk-oriented approach. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 9-23. (In Russian).
2. **Adamov E.O., Dzhilavyan 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.** – Lead. 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).
3. **Adamov E.O., Ganev I.Kh.** Environmentally pure nuclear power. Moscow, N. Dollezhal PERDI, 2007. 145 p. (In Russian).
 4. Radiation-equivalent treatment of radioactive waste. Technical reference 01.2017 NRRE. Supervisor of RE A.V. Lopatkin. (In Russian).
 5. *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 20.10.2018). (In Russian).
 6. *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).
 7. 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.
 8. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4).
 9. **Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsuo T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K.** Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat. Res.*, 1994, vol. 137, pp. 68-97.
 10. **Menyajlo A.N., Chekin S.Yu., Kashcheev V.V., Maksioutov M.A., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin E.A., Lovachev S.S., Karpenko S.V., Kashcheeva P.V., Ivanov V.K.** Lifetime attributable risks from external and internal exposure to radiation: method for estimating. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 8-21. (In Russian).
 11. 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 20.10.2018).
 12. *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).
 13. **Konogorov A.P., Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Khait S.E.** A case-control analysis of leukemia in accident emergency workers of Chernobyl. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.*, 2000, vol. 19, no. 1-2, pp. 143-151.
 14. **Rogounovitch T.I., Saenko V.A., Ashizawa K., Sedliarou I.A., Namba H., Abrosimov A.Y., Lushnikov E.F., Roumiantsev P.O., Konova M.V., Petoukhova N.S., Tchegotareva I.V., Ivanov V.K., Chekin S.Y., Bogdanova T.I., Tronko M.D., Tsyb A.F., Thomas G.A., Yamashita S.** TP53 codon 72 polymorphism in radiation-associated human papillary thyroid cancer. *Oncology Reports*, 2006, vol. 15, no. 4, pp. 949-956.
 15. **Ivanov V.K., Gorski A.I., Tsyb A.F., Ivanov S.I., Naumenko R.N., Ivanova L.V.** Solid cancer incidence among the Chernobyl emergency workers residing in Russia: estimation of radiation risks. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2004, vol. 43, no. 1, pp. 35-42.
 16. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Maksioutov M.A., Tumanov K.A., Vlasov O.K., Shchukina N.V., Tsyb A.F.** Radiation-epidemiological studies of thyroid cancer incidence in Russia after the Chernobyl accident (estimation of radiation risks, 1991-2008 follow-up period). *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2012, vol. 151, no. 3, pp. 489-499. DOI: 10.1093/rpd/ncs019.
 17. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Khait S.E., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Maksioutov M.A., Tumanov K.A.** Leukemia incidence in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2012, vol. 51, no. 2, pp. 143-149. DOI: 10.1007/s00411-011-0400-y.

DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-28-48

УДК 621.311.25:621.039:614.876

Уровень радиационной безопасности населения: действующие в стране АЭС и прогнозные оценки для реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ в условиях нормальной эксплуатации

Иванов В.К.^{1,2}, Чекин С.Ю.^{1,2}, Меньяйло А.Н.^{1,2}, Ловачёв С.С.^{1,2}, Корело А.М.^{1,2}

¹ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск;

² ООО «НПК «Мединфо», Обнинск

В международных основных нормах безопасности МАГАТЭ (Требование 29) подчёркивается необходимость установления для населения граничных значений не только по величине полученной дозы облучения, но и по значению радиационного риска индукции онкологических заболеваний. Это требование стало выполнимо в связи с завершением крупномасштабных эпидемиологических исследований, прежде всего, в Хиросиме и Нагасаки после атомной бомбардировки этих городов в 1945 г. В действующих в РФ Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) утверждены три основных ограничения по величине радиационного риска населения: $5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ – условия нормальной эксплуатации; $1 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ – источники потенциального облучения; $1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ – уровень пренебрежимо малого риска. В терминах величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) на основе модели МКРЗ (Публикация 103) проведена оценка уровней радиационной безопасности населения, проживающего вблизи действующих в стране АЭС. Технология оценки величины LAR применена для прогнозных оценок уровней безопасности реактора БРЕСТ. Установлено, что значения пожизненного атрибутивного риска онкозаболеваний среди населения, проживающего в регионах размещения действующих в стране АЭС, а также прогнозные оценки для реактора БРЕСТ соответствуют текущим требованиям НРБ-99/2009.

Ключевые слова: доза облучения; радиационный риск; требования МАГАТЭ; модель «доза-эффект»; эпидемиологические данные Хиросимы и Нагасаки; требования НРБ-99/2009; пожизненный атрибутивный риск; население, проживающее вблизи АЭС; реактор БРЕСТ; пренебрежимо малый риск.

В 2015 г. МАГАТЭ после всестороннего обсуждения в Научном комитете ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) утвердила свой базовый документ в области радиационной защиты – Международные основные нормы безопасности (МОНБ) [1]. В этом документе впервые подчёркивается (Требование 29), что «Правительство или регулирующий орган устанавливает или утверждает граничные значения дозы и риска, используемые при оптимизации защиты и безопасности лиц из населения». Введение граничных значений не только по дозе облучения, но и по величине радиационного риска возможной индукции онкологических заболеваний обусловлено современной разработкой МКРЗ (Публикация 103) математических моделей «доза-эффект» по итогам крупномасштабных радиационно-эпидемиологических исследований в Хиросиме и Нагасаки после атомной бомбардировки в 1945 г. жителей этих японских городов [2].

В настоящее время при разработке концепции дальнейшего развития ядерной энергетики в России акцент сделан на создании новых технологий, включающих замыкание топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах [3, 4].

Важное значение в практической реализации этой технологии отводится инициированному Госкорпорацией «Росатом» крупномасштабному проекту «Прорыв». В свою очередь, в рам-

Иванов В.К. – зам. директора по научн. работе, Председатель РНКРЗ, чл.-корр. РАН; Чекин С.Ю.* – зав. лаб.; Меньяйло А.Н. – вед. научн. сотр., к.б.н.; Ловачёв С.С. – мл. научн. сотр.; Корело А.М. – ст. научн. сотр. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, ООО «НПК «Мединфо».

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