DOI: 10.21870/0131-3878-2020-29-4-48-68

УДК 614.876

Оценка потенциальных радиологических рисков населения при реализации проекта «Прорыв» Госкорпорации «Росатом».

Часть 2. Определение радиологического ущерба

Иванов В.К.^{1,2,3}, Чекин С.Ю.^{1,2}, Меньяйло А.Н.^{1,2}, Ловачёв С.С.^{1,2}, Селёва Н.Г.^{1,2}, Бакин Р.И.⁴, Ильичев Е.А.⁴, Киселёв А.А.⁴, Соломатин В.М.³, Адамов Е.О.³, Лемехов В.В.³, Проухин А.В.⁵

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

² ООО «НПК «Мединфо», Обнинск;

³ АО «Прорыв», Москва;

⁴ ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва;

⁵ АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежала Госкорпорации «Росатом», Москва

Атомная энергетика является эффективным и безопасным источником электроэнергии, однако при развитии традиционной ядерной энергетики запасов урана в земной коре хватит не более чем на 100 лет. Реализация проекта «Прорыв» Госкорпорации «Росатом» позволит многократно расширить топливную базу атомной энергетики нового поколения за счёт замыкания топливного цикла. Радиационная безопасность новой атомной энергетики должна обосновываться в соответствии с самыми современными российскими и международными требованиями, включая прогноз доз облучения, потенциальных радиологических рисков и радиологического ущерба для населения. Разработанные авторами методы расчётного анализа возможных доз, радиологических рисков и ущерба для населения, обусловленных атмосферными выбросами радиоактивных веществ реакторной установки (РУ) БРЕСТ-ОД-300, отвечают самым современным международным подходам в области оценки безопасности объектов использования атомной энергии. Разработанный метод оценки величины радиологического ущерба на основе рекомендаций МКРЗ позволяет давать оценку радиологических последствий облучения для здоровья российского населения с учётом качества жизни пациентов, обеспечиваемого действующей системой здравоохранения. Проведённый анализ прогнозируемых доз облучения и радиологических рисков показал, что даже в случае запроектной аварии РУ БРЕСТ-ОД-300 для критической группы населения г. Северска (девочки в возрасте 5 лет) 95% верхняя доверительная граница радиологического ущерба равна $1,16 \times 10^{-5}$ год⁻¹, что не превышает предела риска 5×10^{-5} год⁻¹, установленного НРБ-99/2009 для населения в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения. Средние значения радиологических рисков населения, проживающего в 30-км зоне АО «СХК», в случае аварийных ситуаций на РУ БРЕСТ-ОД-300 будут находиться, как правило, в диапазоне «пренебрежимо малых» значений риска, менее 10^{-6} год⁻¹.

Ключевые слова: моделирование метеорологических полей, эффективная доза, эквивалентная доза, МКРЗ, пожизненный атрибутивный риск, риск радиационно-индуцированного случая рака, потерянные годы жизни, коэффициент летальности, радиологический ущерб, нормы радиационной безопасности.

Введение

В настоящее время атомная энергетика в России является эффективным и безопасным источником электроэнергии. Атомные электростанции вырабатывают около 19% всей производимой в стране электроэнергии, а в европейской части России, где проживает более 70% населения страны, – около 40%.

Основу атомной электрогенерации сегодня составляют ядерные реакторы на тепловых нейтронах, использующие для своей работы ²³⁵U, являющийся редким изотопом с содержанием в природном уране не более 0,7%. По оценкам экспертов, при современных темпах роста элек-

Иванов В.К. – зам. директора по научн. работе МРНЦ им. А.Ф. Цыба, гл. радиозоолог ПН «Прорыв», Председатель РНКРЗ, чл.-корр. РАН, д.т.н.; Чекин С.Ю.* – зав. лаб.; Меньяйло А.Н. – вед. научн. сотр., к.б.н.; Ловачёв С.С. – мл. научн. сотр.; Селёва Н.Г. – инженер, к.б.н. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, ООО «НПК «Мединфо». Соломатин В.М. – нач. отдела Гл. радиозоолога ПН «Прорыв», к.б.н.; Адамов Е.О. – научн. рук. ПН «Прорыв», д.т.н., проф.; Лемехов В.В. – гл. конструктор ПН «Прорыв». АО «Прорыв». Бакин Р.И. – зав. лаб.; Ильичев Е.А. – мл. научн. сотр.; Киселёв А.А. – и.о. зав. отд., к.т.н. ИБРАЭ РАН. Проухин А.В. – гл. специалист. АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежала Госкорпорации «Росатом».

*Контакты: 249035, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

тропотребления в мире и соответствующем развитии ядерной энергетики запасов ^{235}U в земной коре хватит не более чем на 100 лет. Поэтому в ведущих по технологическому развитию странах мира в настоящее время проводятся интенсивные научные исследования, направленные на выработку практических решений по преодолению возможного энергетического кризиса в долгосрочной перспективе, в том числе с помощью ядерной энергетики. Наиболее многообещающим с этой точки зрения техническим решением является замыкание ядерного топливного цикла, позволяющее в сотни раз расширить топливную базу атомной энергетики за счёт полного вовлечения в топливный цикл природного урана.

13 октября 2018 г. был подписан Указ Президента РФ «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу». В этом Указе подчёркивается (п. 12), что основной задачей в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности является «защита в соответствии с принципом приемлемого риска». Указанная задача полностью согласуется с современными Требованиями Международных основных норм безопасности МАГАТЭ (Требование 29), где подчёркивается необходимость постоянного контроля у населения не только доз облучения, но и рисков возможной индукции радиационно-обусловленной онкозаболеваемости. Понятно, что эти требования в полной мере относятся и к развитию атомной энергетики нового поколения, включающего одновременное использование тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах.

В базовом документе МКРЗ по радиационной безопасности (Публикация 103) подчёркиваются два основных положения: во-первых, показана технология оценки величины пожизненного атрибутивного радиационного риска (LAR, от англ. Lifetime Attributable Risk) с учётом основных характеристик облучённого контингента; во-вторых, вводится понятие радиационного ущерба (radiation detriment), корректирующее значение LAR путём формализованного учёта качества жизни после диагностики рака в терминах летальности и потери продолжительности жизни.

Целью данной статьи является разработка метода прогноза и оценка возможных радиологических рисков населения 30-км зоны вокруг АО «СХК», где планируется ввод в эксплуатацию реакторной установки (РУ) на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300, в случае аварийных ситуаций на РУ. Метод прогноза радиологического ущерба для этого населения разрабатывается на основе метода расчёта коэффициентов номинального радиационного ущерба для стандартных популяций МКРЗ с учётом эпидемиологических показателей конкретной популяции. Далее в статье термины «радиационный риск» и «радиационный ущерб» будут применяться к исходным моделям риска и величинам номинального ущерба МКРЗ (для стандартных популяций МКРЗ), а термины «радиологический риск» и «радиологический ущерб» – для расчётных значений риска и ущерба в конкретной популяции, отличающейся от стандартной.

Материалы и методы

Оценка эффективных и эквивалентных доз населения

Существующая международная практика проведения расчётов атмосферного переноса радиоактивных веществ и возможных доз облучения населения для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) опирается на применение метеорологических рядов, построенных на основе данных наблюдений за несколько лет [1, 2], или, что является более современным и практичным, с использованием численных региональных моделей прогноза погоды [3, 4], с помощью которых выполняется моделирование метеорологичес-

ких полей высокого пространственно-временного разрешения за такой же период. В последнем случае учитываются общая циркуляция атмосферы, климатические особенности региона, данные синоптического и аэрологического мониторинга в рассматриваемом регионе, а также неоднородность подстилающей поверхности и рельеф; кроме того, исключаются ошибки, связанные с не репрезентативностью данных метеорологического мониторинга в одной точке для рассматриваемого региона в целом. Учёт исторических метеорологических данных позволяет говорить о не превышении пороговых значений с заданным уровнем доверия с учётом возможных метеорологических условий в данном регионе. Такой подход позволяет проводить расчёты в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [5].

Чтобы обеспечить статистическую значимость результатов расчётов используются различные длины метеорологического ряда, например, в проекте SOARCA [6] для задач оценки предполагается использование годовых метеорологических рядов. В данной работе с помощью численной модели прогноза погоды WRF-ARW на основе начальных и краевых условий из данных повторного анализа NCEP [7] (National Centers for Environmental Prediction) в 0,5 градусной сетке строились метеорологические ряды на основе анализа трёхлетнего периода (в данном случае 2014-2017 гг.), что соответствует последним европейским рекомендациям и практикам [3, 8]. Прогнозы рассчитывались 4 раза в сутки на 12 ч, при этом использовали последние 6 ч для корректного моделирования осадков. В рамках данной работы расчёты проводились с оптимальным вариантом параметризации физических процессов атмосферы в регионе расположения площадки РУ БРЕСТ-ОД-300, полученные как результат статистического анализа данных метеорологического мониторинга и прогнозов по метеорологической модели (конфигурация параметризации физических процессов представлена в табл. 1).

Таблица 1

Параметризации физических процессов, использованные для трёхлетних расчётов метеорологических параметров в регионе расположения площадки РУ БРЕСТ-ОД-300

Физический процесс	Название параметризации [9]
Пограничный слой	Mellor-Yamada Nakanishi Niino (MYNN) Level 2.5 Schemes
Приземный слой	MYNN Scheme
Микрофизика	NSSL 2-moment Scheme and 2-moment Scheme with CCN Prediction
Длинноволновая радиация	RRTMG Shortwave and Longwave Schemes
Коротковолновая радиация	RRTMG Shortwave and Longwave Schemes
Процессы в почве	Noah-MP Land Surface Model
Конвекция (только для области 18 км)	Betts-Miller-Janjic Scheme

С учётом вышеизложенного выполнены расчёты трёхмерных метеорологических полей с разрешением 2 км и временным шагом 1 ч. Они включают в себя всю необходимую информацию для проведения моделирования атмосферного переноса, включая скорости и направления ветра, осадки, коэффициенты диффузии и др. Эти данные являются исходными для расчётов атмосферного переноса и доз облучения населения, которые выполнялись в соответствии с общими подходами, заложенными в код POM [10], адаптированными для работы с четырёхмерными метеорологическими рядами (3 координаты и время).

В такой постановке, например, для аварийного выброса с заданными характеристиками длительности, не превышающей 10 суток, производилась серия расчётов параметров радиационной обстановки в 30-км зоне вокруг РУ БРЕСТ-ОД-300 для 13153 метеорологических сценариев, соответствующих разбиению трёхлетних метеорологических условий на двухчасовые ин-

тервалы. Отдельные расчёты сценариев отличались друг от друга только последовательным сдвигом времени начала выброса на 2 ч. Это сделано для того, чтобы перекрыть все возможные погодные условия, наблюдавшиеся в данном регионе за длительный предшествующий срок. Использование метеорологических данных за последние несколько лет позволяет учесть сезонный ход метеопараметров, а сдвиг между последовательными расчётами на 2 ч даёт возможность учесть их суточный ход. В каждом расчёте вычислялись 10-суточные (относительно начала действия источника) значения доз внешнего облучения, плотности поверхностных выпадений и проинтегрированные по времени концентрации в каждом узле расчётной сетки. Эта совокупность расчётных данных позволяет оценить распределение дозы в каждой точке и её статистические характеристики. Тем самым получается реалистичная оценка радиационной обстановки, включающая оценку неопределённости результата за счёт метеорологического фактора. Для оценок доз облучения с заданным уровнем доверия для каждой точки предварительно строился вариационный ряд для всех узлов расчётной сетки, находящихся в 30-км зоне вокруг площадки РУ БРЕСТ-ОД-300. После этого отсекались максимальные значения в вариационном ряду и определялись значения функционалов с уровнями доверия 10-95%, на основе которых для каждой возрастной группы проводился расчёт эквивалентных доз на 23 органа с шагом 1 год от поступления в организм до 100 лет по формуле:

$$H_{T,i}(\Delta) = H_{T,i}(10 \text{ сым}) + h_{T,i}^s \int_{10 \text{ сым}}^{1000} D_i^s(t) dt + I_{inh,i} \cdot h_{T,i}^{inh}(\Delta) + I_{ing,i} \cdot h_{T,i}^{ing}(\Delta), \quad (1)$$

где $H_{T,i}(10 \text{ сым})$ – рассчитанная с использованием кода POM эквивалентная доза на орган или ткань T для радионуклида i при внешнем облучении от проходящего облака и поверхностных выпадений за 10 сут; $h_{T,i}^s$ – дозовый коэффициент по эквивалентной дозе на орган или ткань T для радионуклида i при внешнем облучении; $D_i^s(t)$ – плотность поверхностных выпадений i -го радионуклида как функция времени t , полученная с использованием кода POM; $I_{inh,i}$, $I_{ing,i}$ – поступление радионуклида i (поступившая в организм активность) ингаляционным и пероральным путём, рассчитанные с помощью кода POM; $h_{T,i}^{inh}(\Delta)$, $h_{T,i}^{ing}(\Delta)$ – дозовые коэффициенты для ингаляционного и перорального поступления в организм радионуклида i для периода интегрирования Δ (доза от единичного поступления активности в организм человека за период Δ после поступления).

Для оценки доз внутреннего облучения с помощью (1) необходимо наличие рассчитанных дозовых коэффициентов для различных периодов интегрирования. Для получения базы с такими коэффициентами была проведена адаптация алгоритмов из работ [11-13], которые первоначально использовались для расчёта коэффициентов для пересчёта на ОБЭ-взвешенные дозы. На рис. 1 в качестве примера приведён график значений построенного дозового коэффициента при ингаляционном поступлении ^{90}Sr для периодов Δ от 1 года до 100 лет, а также приведены значения, полученные из материалов МКРЗ [14]. Видно, что полученная динамика лежит в пределах точности данных МКРЗ. Такие данные были получены и проверены для всех радионуклидов из Публикации 38 МКРЗ, что позволяет в дальнейшем использовать результаты для широкого круга задач.

Рис. 1. Динамика эквивалентной дозы на красный костный мозг от ингаляционного поступления ^{90}Sr , полученная расчётным образом до 100 лет (линия «database») и по данным МКРЗ [14] (точки «ICRP»).

Таким образом, результатом расчётов, на основе которых проводился дальнейший анализ, являлась динамика эквивалентных доз на 23 органа для 6 возрастных групп в узлах расчётной сетки и в населённых пунктах (как результат интерполяции), полученная с уровнями доверия 10-95% с шагом 10%.

Оценка радиологических рисков

Пусть λ_0 — показатель фоновой заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) или смертности от них (отношение числа случаев за один год к полному числу лиц, находящихся под наблюдением за этот год). Воздействие радиации приводит к увеличению λ_0 на некоторую дополнительную величину $\delta\lambda$. Согласно МКРЗ [15] радиогенный риск $\delta\lambda$ математически может быть представлен в виде двух форм: аддитивной и мультипликативной. В аддитивной форме EAR не зависит от фоновой заболеваемости, т.е. $\delta\lambda = EAR$, где EAR — избыточный абсолютный риск (от англ. Excess Absolute Risk). В мультипликативной модели $\delta\lambda = \lambda_0 \cdot ERR$, где безразмерная величина ERR — избыточный относительный риск (от англ. Excess Relative Risk).

Два этих подхода в определении величины $\delta\lambda$ дают разный численный результат для популяций, отличных от тех, на которых строились модели радиационного риска. В этом случае МКРЗ [15] рекомендует вычислять $\delta\lambda$ как взвешенную сумму аддитивного и мультипликативного подходов. Далее под EAR будем понимать величину $\delta\lambda$, полученную с учётом такого взвешивания.

Модель МКРЗ [15] избыточного абсолютного риска (аддитивная модель) заболеваемости солидным раком после однократного облучения представлена в формуле (2), а модель МКРЗ избыточного относительного риска после однократного облучения (мультипликативная модель) заболеваемости раком представлена в формуле (3).

$$EAR_{\text{однокр.}}^{МКРЗ}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{EAR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\alpha_{EAR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{EAR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}, \quad (2)$$

$$ERR_{однокр.}^{МКРЗ}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{ERR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{ERR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{ERR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}. \quad (3)$$

Здесь s – пол; c – локализация опухоли; g – возраст при облучении; a – возраст, на который рассчитывается риск (возраст дожития); d – эквивалентная доза облучения; β_{EAR} , ω_{EAR} , γ_{EAR} – параметры аддитивной модели [15]; β_{ERR} , ω_{ERR} , γ_{ERR} – параметры мультипликативной модели [15].

Латентный период для солидных раков в модели МКРЗ T_{LS} равен 10-ти годам. То есть, в течение 10 лет после облучения избыточные риски как по мультипликативной, так и по аддитивной моделям, принимаются равными нулю. Другими словами: $EAR_{однокр.}^{МКРЗ}$ и $ERR_{однокр.}^{МКРЗ}$.

равны 0, если $a < g + T_{LS}$.

Прогноз величины EAR для заболеваемости солидными ЗНО локализации c в какой-либо конкретной облучённой популяции задаётся взвешенным средним прогнозов по аддитивной и мультипликативной моделям МКРЗ (2) и (3), с весами $1-p(c)$ и $p(c)$ соответственно [15]:

$$EAR_{однокр.}^{сол.}(s, c, g, a, d) = (1 - p(c)) \cdot EAR_{однокр.}^{МКРЗ}(s, c, g, a, d) + p(c) \cdot \lambda_0^{заб.}(s, a, c) \cdot ERR_{однокр.}^{МКРЗ}(s, c, g, a, d) \quad (4)$$

Для вычисления радиационных рисков смертности МКРЗ [15] рекомендует использовать риски заболеваемости ЗНО, умноженные на долю летальности k .

$$k(s, a, c) = \frac{\lambda_0^{смерт.}(s, a, c)}{\lambda_0^{заб.}(a, c)}, \quad \lambda_0^{заб.}(s, a, c) > 0 \quad (5)$$

где $\lambda_0^{смерт.}$ – показатель смертности от ЗНО в год для заданного пола s , возраста a и локализации c ; $\lambda_0^{заб.}$ – показатель заболеваемости ЗНО в год для заданного пола s , возраста a и локализации c .

Таким образом, избыточный абсолютный риск смерти от рака после однократного облучения будет вычисляться по формуле (6):

$$EAR_{однокр.}^{смерт.}(s, c, g, a, d) = k(s, a, c) \cdot EAR_{однокр.}^{заб.}(s, c, g, a, d). \quad (6)$$

Вычисление EAR заболеваемости лейкозами после однократного облучения, согласно рекомендациям МКРЗ, производится по формуле (7). Под однократным облучением здесь и далее понимается облучение в течение года.

$$EAR_{однокр.}^{лейк.}(s, g, a, d) = \beta(s, g) \cdot d \cdot (1 + 0,79 \cdot d) \cdot \exp[\alpha(s, g) \cdot (a - g - 25)]. \quad (7)$$

Здесь, так же, как и в случае с риском для солидных типов рака, g – возраст при облучении; a – возраст, на который рассчитывается риск; d – доза однократного облучения в Гр; β и α – параметры модели избыточного абсолютно риска заболеваемости лейкозами [15].

Латентный период для заболеваемости лейкозами T_{LL} равен 2 годам, т.е. $EAR_{однокр.}^{лейк.}(s, g, a, d) = 0$, если $a < g + T_{LL}$.

Для вычисления избыточного абсолютного риска заболеваемости раком от многократного облучения требуется провести суммирование $EAR_{однокр.}$ по возрасту на момент облучения с соответствующей дозой облучения:

$$EAR(s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \sum_{i=1}^n EAR_{однокр.}(s, c, g_i, a, d_i). \quad (8)$$

Здесь n – количество облучений; $g_1, \dots, g_n$ – возрасты на момент облучения; $d_1, \dots, d_n$ – соответствующие дозы облучения, полученные органом или тканью c . В совокупности $g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n$ определяют дозовую историю облучения для данного органа или ткани.

Далее, в формулах для указания того, что риски вычисляются по заболеваемости, будем применять индекс «заб.», для указания того, что риски вычисляются по смертности, – индекс «смерт.». Если формулы для заболеваемости и смертности аналогичны, то индексы «заб.» или «смерт.» указывать не будем.

Пожизненный радиационный риск – это интегральный показатель риска, описывающий влияние радиационного воздействия на период будущей жизни. Одной из метрик пожизненного радиационного риска является пожизненный атрибутивный риск LAR, использующийся в системе радиологической защиты МКРЗ [15].

Для вычисления пожизненного радиационного риска используется либо функция здорового дожития (в случае вычислений рисков заболеваемости – дожитие без рака), либо 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.

$$S(s, e, a) = \exp \left[- \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{общ. смерт.}(s, k) \right]. \quad (9)$$

$$a > e$$

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 a .

$S(s, e, a)$ может быть найдена, используя следующую формулу:

$$S(s, e, a) = \frac{S(s, 0, a)}{S(s, 0, e)}. \quad (10)$$

$$a > e$$

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 раком локализации c .

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

$$a > e$$

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

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

$$a > e$$

Для смертности используется аналогичная формула, только вместо функции здорового дожития применяется просто функция дожития и используется EAR для смертности от рака.

Пожизненный атрибутивный риск (LAR) характеризует количество избыточных над фоновым числом раковых заболеваний или смертей, которые могут произойти в течение всей последующей жизни после облучения группы лиц, у которых одинаковы модифицирующие риск факторы (пол, возраст при облучении и др.) [16].

Величина **LAR** вычисляется путём суммирования **EAR** с весом вероятности здорового дожития (или просто дожития при расчёте рисков смерти) по всем возможным возрастам дожития, начиная от текущего возраста, в котором исследуемое лицо или группа лиц считаются живыми. Формула (12) отражает вычисления пожизненного атрибутивного риска заболеваемости ЗНО.

$$LAR^{заб.}(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} [S'(s, c, e, a) \cdot EAR^{заб.}(s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)] \cdot (13)$$

Здесь **DDREF** – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы; **e** – текущий возраст человека, в котором он жив; **S** – функция здорового дожития; **a_{max}** – максимальный возраст дожития. МКРЗ в качестве **a_{max}** принимает 100 лет.

Для LAR смертности используется аналогичная формула, только вместо функции здорового дожития применяется просто функция дожития и используется EAR для смертности от ЗНО.

Согласно МКРЗ [15], DDREF – это «экспертно-оценённый 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». МКРЗ принимает величину DDREF, равной 2.

Другими величинами пожизненного риска выступает риск радиационно-индуцированного случая рака REIC (от англ. Risk of Exposure-Induced Cancer) или риск радиационно-индуцированной смерти REID (от англ. Risk of Exposure-Induced Death). Данные виды риска были введены НКДАР ООН [17].

Величина REID, согласно НКДАР ООН [17], определяется как разность между пожизненными рисками смертности по данной причине в облучённой и необлучённой популяциях для заданного пола и возраста на момент облучения.

Риск REID аналогичен риску LAR для смертности от рака. Различие заключается в том, что при вычислении LAR используется функция дожития **S** необлучённой популяции, а для вычисления REID – функция дожития **S_{dose}** облучённой популяции:

$$REID(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \sum_{a=e}^{a_{max}} [S_{dose}(s, c, e, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) \cdot EAR(s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)]. \quad (14)$$

S_{dose} – функция дожития, учитывающая увеличение смертности за счёт радиационного облучения. Она вычисляется аналогично функции дожития (8), но к показателю общей смертности добавляется избыточный абсолютный риск (EAR) смертности от онкологических заболеваний:

$$S_{dose}(s, c, e, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \exp \left[- \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_{общ. смерт.}(s, k) + EAR_{смерт.}(s, c, k, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) \right]. \quad (15)$$

$$a > e$$

Величина REIC вычисляется аналогично REID (13), но вместо функции дожития используется функция здорового дожития (вероятность дожития без развития ЗНО локализации c):

$$S'_{dose}(s, c, e, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \exp \left[- \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_{общ. смерт.}^{(s, k)} + \lambda_{аб.}^{(s, k, c)} - \lambda_{смерт.}^{(s, k, c)} + \right] \cdot (16)$$

$a > e$

Далее рассмотрим величины пожизненного риска, описывающие радиационно-обусловленное уменьшение продолжительности жизни. Такие величины были введены в отчёте НКДАР ООН [17]. Там приводятся два вида величин: YLL (от англ. Years of Life Lost) – потерянные годы жизни, и YLLRIC (от англ. Years of Life Lost per Radiation-Induced Cancer) – потерянные годы жизни, приведённые на радиационно-индуцированный случай рака. Рассмотрим подробнее вычисление каждой из них. В отчёте НКДАР ООН [17] даны формулы при однократном облучении, здесь же рассматривается более общий случай многократного облучения.

Формула для вычисления **YLL** без нормировки на дозу согласно НКДАР ООН [17] выглядит следующим образом:

$$YLL(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \sum_{a=e}^{a_{max}} [S(s, e, a) - S_{dose}(s, c, e, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)] \cdot (17)$$

Согласно НКДАР ООН [17] **YLLRIC** вычисляется по следующей формуле:

$$YLLRIC(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{YLL(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}{REID(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}. \quad (18)$$

В системе радиологической защиты МКРЗ используется модификация пожизненного радиационного риска – радиационный ущерб. Согласно рекомендациям МКРЗ [15], радиационный ущерб здоровью человека за счёт рака локализации c определяется следующим образом:

$$PAU = R_{l;c} \cdot [k_c + q_c \cdot (1 - k_c)] \cdot I_c. \quad (19)$$

Здесь $R_{l;c}$ – номинальный пожизненный радиационный риск заболеваемости раком локализации c ; q_c – весовой множитель (от 0 до 1), отражающий снижение качества жизни из-за серьёзного заболевания; I_c – средняя потеря времени жизни из-за заболевания в сравнении с нормальной продолжительностью жизни, выражаемая как отношение к среднему для всех раков; k_c – доля летальности. $R_{l;c}$ равен $R_{l;c}^{CM} / k$, где $R_{l;c}^{CM}$ – номинальный риск смертности.

В свою очередь коэффициент q_c определяется следующим образом:

$$q_c = q_{min} + k_c \cdot (1 - q_{min}). \quad (20)$$

Здесь q_{min} – минимальный весовой множитель для не смертельных раков. МКРЗ в Публикации 103 установила, что для всех локализаций опухолей, кроме рака щитовидной железы и кожи, данный коэффициент принимается равным 0,1.

В МКРЗ оценивались номинальные риски, таким образом, все приведённые коэффициенты брались усреднёнными по полу, возрасту и используемым популяциям. Однако для вычисления индивидуализированных рисков следует брать не усреднённые коэффициенты. Поэтому вместо номинального риска заболеваемости используется величина LAR для заболеваемости, вычисленная с весом коэффициентов летальности и функции здорового дожития. Доля летальности вычисляется по формуле (5).

Величина I вычисляется как отношение $YLLRIC$ для ЗНО локализации c к значению $YLLRIC$, полученному по всем локализациям ЗНО (все солидные раки плюс лейкозы):

$$I(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{YLLRIC(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}{YLLRIC_{\text{все раки}}(s, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}. \quad (21)$$

Величина $YLLRIC$ для всех ЗНО вычисляется по следующей формуле:

$$YLLRIC_{\text{все раки}}(s, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{\sum_c YLL(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}{\sum_c REID(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}. \quad (22)$$

В итоге, с учётом (20) и (21), получим следующую формулу для вычисления радиационного ущерба:

$$PAU(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{I(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}{DDREF} \cdot \sum_{a=0}^{a_{max}} [S'(s, c, e, a) \cdot EAR^{заб.}(s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) \cdot [q_{min} + k(s, a, c) \cdot (2 - k(s, a, c)) \cdot (1 - q_{min})]] \quad (23)$$

Из (22) и (23) видно, что радиационный ущерб (PAU) для заданной локализации ЗНО может быть больше, чем LAR смерти от ЗНО данной локализации, если потеря лет жизни на один случай заболевания этим ЗНО будет выше, чем средняя потеря лет жизни на один случай от всех ЗНО в целом.

Результаты и обсуждение

В данной работе рассмотрены два конкретных сценария облучения населения, приведённые в табл. 2: при проектной аварии (ПА) и при запроектной аварии (ЗПА).

Таблица 2

Сценарии атмосферных выбросов радиоактивных веществ в случае аварийных ситуаций РУ БРЕСТ-ОД-300

Ситуация облучения	Сценарий атмосферного выброса радиоактивных веществ
Проектная авария (ПА)	Разгерметизация газовой полости блока реакторного/выход защитного газа первого контура под ГО/мгновенный выброс без учёта работы фильтров
Запроектная авария (ЗПА)	Разгерметизация трубы парогенератора с полным отказом на отключение вентиляции помещений СЛТП

ГО – герметичное ограждение; СЛТП – система локализации течи парогенератора.

В качестве примера на рис. 2 приведена картограмма полной эффективной дозы на всё тело для рассмотренной ЗПА.

Наибольшие величины ожидаемых эффективных доз (ОЭД) для населения, проживающего вблизи АО «СХК», по населённым пунктам приведены в табл. 3.

Для оценки радиологических рисков населения использовалась соответствующая динамика эквивалентных доз по органам и тканям, рассчитанная с помощью компьютерного кода РОМ [10], с возможностью учёта трёхмерных метеорологических полей и расчёта динамики эквивалентных доз на 23 органа для 6 возрастных групп.

На рис. 3-6 показаны значения LAR для ЗПА и ПА для женского и мужского населения в зависимости от возраста на момент аварии.

Рис. 2. Картграмма полной эффективной дозы на всё тело для взрослых за 10 суток, с уровнем доверия 95%. Сценарий ЗПА.

Таблица 3

Населённые пункты вблизи АО «СХК», для которых оценивается величина радиологического ущерба населения и ожидаемые эффективные дозы (ОЭД) от однократных аварийных выбросов для группы населения младше 1 года

Населённый пункт	ОЭД ЗПА, мкЗв	ОЭД ПА, мкЗв
с. Михайловка	15,80	1,14
д. Надежда	17,94	1,15
д. Попадейкино	15,99	0,81
г. Северск	26,84	1,43

Рис. 3. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) смертности при реализации сценария ЗПА для женского населения.

Рис. 4. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) смертности при реализации сценария ЗПА для мужского населения.

Рис. 5. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) смертности при реализации сценария ПА для женского населения.

Рис. 6. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) смертности при реализации сценария ПА для мужского населения.

В настоящее время в научной литературе широко обсуждается вопрос использования в практике радиологической защиты населения и персонала оценок РАУ, выполненных с использованием рекомендаций МКРЗ [15]. Помимо величины пожизненного атрибутивного риска (LAR), оценка РАУ зависит от летальности рака той или иной локализации и от параметра, характеризующего снижение качества жизни человека при заболевании этим раком. В частности, численное значение РАУ становится меньше, когда растёт средняя продолжительность жизни онкологических больных.

В табл. 4-7 приведены средние значения LAR, радиологического ущерба (РАУ) и их 95% верхние доверительные границы (95% ВДГ) по основным локализациям рака для мужского и женского населения, проживающего в 30-км зоне АО «СХК», по сценариям ЗПА и ПА для разных возрастных групп.

Таблица 4

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) смертности, радиологический ущерб (РАУ) и их отношение R* для различных локализаций рака среди мужского населения, проживающего в г. Северске, при реализации сценария запроектной аварии «Выброс газовой подушки при достижении ПБЭ по негерметичным твэлам»

Локализация рака	Возраст при поступлении радионуклидов в организм, лет								
	5			20			50		
	LAR (95% ВДГ)	РАУ (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	РАУ (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	РАУ (95% ВДГ)	R
Желудок	1,08E-07 (5,05E-07)	1,45E-07 (7,47E-07)	1,34	3,91E-08 (2,22E-07)	5,16E-08 (2,98E-07)	1,32	1,45E-08 (7,90E-08)	1,93E-08 (1,00E-07)	1,33
Лёгкие	1,93E-07 (8,83E-07)	1,60E-07 (9,73E-07)	0,83	1,57E-07 (6,89E-07)	1,34E-07 (8,41E-07)	0,86	1,68E-07 (8,72E-07)	1,70E-07 (9,43E-07)	1,01
Лейкемия	4,89E-08 (3,53E-07)	2,70E-07 (1,59E-06)	5,52	4,11E-08 (3,13E-07)	1,40E-07 (8,16E-07)	3,41	3,37E-08 (2,34E-07)	7,26E-08 (4,11E-07)	2,15
Мочевой пузырь	3,15E-08 (1,06E-07)	3,33E-08 (1,79E-07)	1,06	1,49E-08 (7,50E-08)	1,61E-08 (9,59E-08)	1,08	9,24E-09 (4,78E-08)	1,23E-08 (6,83E-08)	1,33
Печень	8,88E-08 (4,33E-07)	8,89E-08 (4,75E-07)	1,00	3,58E-08 (2,20E-07)	3,47E-08 (2,00E-07)	0,97	1,22E-08 (6,69E-08)	1,18E-08 (6,07E-08)	0,97
Пищевод	1,56E-08 (8,22E-08)	1,82E-08 (9,98E-08)	1,17	7,79E-09 (4,65E-08)	9,31E-09 (5,64E-08)	1,20	6,13E-09 (1,75E-08)	7,80E-09 (4,24E-08)	1,27

Продолжение таблицы 4

Локализация рака	Возраст при поступлении радионуклидов в организм, лет								
	5			20			50		
	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R
Толстый кишечник	1,06E-07 (5,13E-07)	1,41E-07 (7,72E-07)	1,34	4,33E-08 (1,82E-07)	5,66E-08 (3,29E-07)	1,31	1,95E-08 (8,57E-08)	2,75E-08 (1,47E-07)	1,41
Щитовидная железа	1,26E-08 (3,97E-08)	1,69E-08 (8,11E-08)	1,34	2,21E-09 (9,32E-09)	2,91E-09 (1,52E-08)	1,32	1,69E-10 (8,77E-10)	2,26E-10 (1,02E-09)	1,33
Все указанные солидные	6,48E-07 (3,79E-06)	9,86E-07 (5,52E-06)	1,52	3,36E-07 (2,00E-06)	4,88E-07 (2,89E-06)	1,45	2,42E-07 (1,22E-06)	3,35E-07 (1,84E-06)	1,39
Другие солидные	9,35E-08 (3,83E-07)	1,12E-07 (5,97E-07)	1,20	3,58E-08 (1,94E-07)	4,22E-08 (2,41E-07)	1,18	1,18E-08 (6,80E-08)	1,36E-08 (7,02E-08)	1,15
Все раки	6,97E-07 (3,93E-06)	1,26E-06 (7,11E-06)	1,80	3,77E-07 (2,24E-06)	6,28E-07 (3,71E-06)	1,67	2,75E-07 (1,53E-06)	4,08E-07 (2,26E-06)	1,48

*Отношение R=PAY/LAR.

Таблица 5

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) смертности, радиологический ущерб (PAY) и их отношение R* для различных локализаций рака среди женского населения, проживающего в г. Северске, при реализации сценария запроектной аварии «Выброс газовой подушки при достижении ПБЭ по негерметичным твэлам»

Локализация рака	Возраст при поступлении радионуклидов в организм, лет								
	5			20			50		
	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R
Желудок	1,98E-07 (1,21E-06)	3,24E-07 (1,77E-06)	1,64	7,01E-08 (3,87E-07)	1,11E-07 (6,83E-07)	1,59	2,52E-08 (1,50E-07)	3,57E-08 (1,84E-07)	1,42
Лёгкие	4,00E-07 (1,69E-06)	3,90E-07 (2,51E-06)	0,97	3,17E-07 (2,07E-06)	3,19E-07 (2,10E-06)	1,01	3,21E-07 (2,15E-06)	3,44E-07 (1,90E-06)	1,07
Лейкемия	2,22E-08 (9,55E-08)	1,40E-07 (8,67E-07)	6,28	2,10E-08 (1,32E-07)	8,37E-08 (5,24E-07)	3,98	3,44E-08 (1,91E-07)	5,43E-08 (2,87E-07)	1,58
Молочная железа	3,09E-07 (9,83E-07)	4,53E-07 (2,48E-06)	1,47	8,93E-08 (4,16E-07)	1,34E-07 (7,95E-07)	1,50	1,73E-08 (6,98E-08)	2,57E-08 (1,27E-07)	1,49
Мочевой пузырь	3,04E-08 (1,12E-07)	2,91E-08 (1,72E-07)	0,96	1,51E-08 (8,97E-08)	1,46E-08 (9,24E-08)	0,97	1,02E-08 (4,65E-08)	1,17E-08 (6,57E-08)	1,15
Печень	5,52E-08 (2,84E-07)	6,53E-08 (3,75E-07)	1,18	2,31E-08 (1,23E-07)	2,68E-08 (1,65E-07)	1,16	9,02E-09 (5,60E-08)	1,00E-08 (5,19E-08)	1,11
Пищевод	7,09E-09 (3,17E-08)	1,08E-08 (6,43E-08)	1,52	4,45E-09 (1,86E-08)	6,81E-09 (4,39E-08)	1,53	7,59E-09 (3,52E-08)	1,05E-08 (6,38E-08)	1,38
Толстый кишечник	7,19E-08 (3,63E-07)	1,07E-07 (6,22E-07)	1,49	2,96E-08 (1,88E-07)	4,40E-08 (2,74E-07)	1,49	1,30E-08 (5,77E-08)	1,94E-08 (1,00E-07)	1,49
Щитовидная железа	3,59E-08 (1,63E-07)	1,25E-07 (6,51E-07)	3,48	6,36E-09 (2,91E-08)	2,16E-08 (1,20E-07)	3,39	5,17E-10 (1,68E-09)	1,32E-09 (6,12E-09)	2,56
Яичник	3,73E-08 (2,10E-07)	5,84E-08 (3,38E-07)	1,57	1,56E-08 (8,53E-08)	2,47E-08 (1,52E-07)	1,58	5,74E-09 (3,09E-08)	7,99E-09 (4,01E-08)	1,39
Все указанные солидные	1,23E-06 (7,27E-06)	1,86E-06 (1,07E-05)	1,51	6,03E-07 (3,92E-06)	8,44E-07 (5,31E-06)	1,40	4,21E-07 (2,34E-06)	5,40E-07 (2,93E-06)	1,28
Другие солидные	8,36E-08 (3,72E-07)	1,54E-07 (8,77E-07)	1,85	3,23E-08 (1,63E-07)	5,79E-08 (3,56E-07)	1,79	1,16E-08 (4,15E-08)	1,91E-08 (9,95E-08)	1,65
Все раки	1,25E-06 (7,30E-06)	2,00E-06 (1,16E-05)	1,60	6,24E-07 (3,96E-06)	9,28E-07 (5,84E-06)	1,49	4,55E-07 (2,49E-06)	5,94E-07 (3,21E-06)	1,31

*Отношение R=PAY/LAR.

Таблица 6

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) смертности, радиологический ущерб (PAU) и их отношение (R*) для различных локализаций рака среди мужского населения, проживающего в г. Северске, при реализации сценария проектной аварии «Разгерметизация газовой полости блока реакторного/выход защитного газа первого контура под ГО/мгновенный выброс без учёта работы фильтров»

Локализация рака	Возраст при поступлении радионуклидов в организм, лет								
	5			20			50		
	LAR (95% ВДГ)	PAU (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAU (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAU (95% ВДГ)	R
Желудок	5,74E-09 (3,50E-08)	7,69E-09 (5,97E-08)	1,34	2,19E-09 (1,42E-08)	2,88E-09 (2,11E-08)	1,31	8,12E-10 (2,43E-09)	1,08E-09 (8,71E-09)	1,33
Легкие	1,02E-08 (3,44E-08)	8,45E-09 (7,60E-08)	0,83	8,39E-09 (4,54E-08)	7,15E-09 (5,61E-08)	0,85	8,98E-09 (6,88E-08)	9,08E-09 (7,94E-08)	1,01
Лейкемия	2,63E-09 (1,63E-08)	1,45E-08 (1,16E-07)	5,49	2,34E-09 (1,17E-08)	7,91E-09 (5,95E-08)	3,38	1,92E-09 (4,05E-09)	4,11E-09 (3,60E-08)	2,14
Мочевой пузырь	1,70E-09 (8,75E-09)	1,79E-09 (1,46E-08)	1,06	8,55E-10 (1,57E-09)	9,16E-10 (6,93E-09)	1,07	5,28E-10 (1,63E-09)	6,98E-10 (5,87E-09)	1,32
Печень	4,76E-09 (3,39E-08)	4,76E-09 (3,82E-08)	1,00	2,04E-09 (6,12E-09)	1,96E-09 (1,43E-08)	0,96	6,93E-10 (3,85E-09)	6,68E-10 (5,49E-09)	0,96
Пищевод	8,37E-10 (2,74E-09)	9,74E-10 (8,08E-09)	1,16	4,44E-10 (1,63E-09)	5,27E-10 (4,15E-09)	1,19	3,48E-10 (4,28E-10)	4,41E-10 (3,86E-09)	1,27
Толстый кишечник	5,69E-09 (7,87E-09)	7,60E-09 (6,21E-08)	1,34	2,44E-09 (8,47E-09)	3,17E-09 (2,31E-08)	1,30	1,09E-09 (3,85E-09)	1,54E-09 (1,28E-08)	1,41
Щитовидная железа	7,11E-10 (1,81E-09)	9,55E-10 (6,89E-09)	1,34	1,29E-10 (5,67E-10)	1,68E-10 (1,08E-09)	1,31	9,82E-12 (1,12E-11)	1,31E-11 (9,50E-11)	1,33
Все указанные солидные	3,46E-08 (3,09E-07)	5,27E-08 (4,30E-07)	1,52	1,85E-08 (1,52E-07)	2,71E-08 (2,05E-07)	1,46	1,31E-08 (9,77E-08)	1,84E-08 (1,58E-07)	1,40
Другие солидные	5,01E-09 (1,33E-08)	6,01E-09 (4,76E-08)	1,20	2,03E-09 (4,53E-09)	2,37E-09 (1,69E-08)	1,17	6,64E-10 (2,47E-09)	7,64E-10 (6,13E-09)	1,15
Все раки	3,72E-08 (3,17E-07)	6,71E-08 (5,43E-07)	1,80	2,09E-08 (1,58E-07)	3,50E-08 (2,65E-07)	1,68	1,50E-08 (1,32E-07)	2,25E-08 (1,95E-07)	1,49

*Отношение R=PAU/LAR.

Таблица 7

Пожизненные атрибутивные риски (LAR) смертности, радиологический ущерб (PAU) и их отношение (R*) для различных локализаций рака среди женского населения, проживающего в г. Северске, при реализации сценария проектной аварии «Разгерметизация газовой полости блока реакторного/выход защитного газа первого контура под ГО/мгновенный выброс без учета работы фильтров»

Локализация рака	Возраст при поступлении радионуклидов в организм, лет								
	5			20			50		
	LAR (95% ВДГ)	PAU (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAU (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAU (95% ВДГ)	R
Желудок	1,05E-08 (5,41E-08)	1,72E-08 (1,58E-07)	1,64	3,94E-09 (5,69E-09)	6,23E-09 (5,08E-08)	1,58	1,41E-09 (5,39E-09)	2,00E-09 (1,12E-08)	1,42
Лёгкие	2,11E-08 (9,73E-08)	2,06E-08 (2,18E-07)	0,97	1,70E-08 (1,31E-07)	1,71E-08 (1,50E-07)	1,00	1,71E-08 (9,85E-08)	1,84E-08 (1,11E-07)	1,07
Лейкемия	1,20E-09 (4,77E-09)	7,48E-09 (7,14E-08)	6,22	1,20E-09 (5,57E-09)	4,75E-09 (3,81E-08)	3,94	1,95E-09 (1,54E-08)	3,08E-09 (1,74E-08)	1,58
Молочная железа	1,65E-08 (4,70E-08)	2,42E-08 (2,20E-07)	1,47	5,00E-09 (1,82E-08)	7,47E-09 (5,92E-08)	1,49	9,65E-10 (1,96E-09)	1,44E-09 (7,56E-09)	1,49
Мочевой пузырь	1,64E-09 (7,44E-09)	1,57E-09 (1,54E-08)	0,96	8,64E-10 (3,88E-09)	8,34E-10 (7,03E-09)	0,96	5,81E-10 (6,18E-10)	6,69E-10 (4,11E-09)	1,15
Печень	2,96E-09 (8,12E-09)	3,50E-09 (3,34E-08)	1,18	1,32E-09 (4,30E-09)	1,52E-09 (1,26E-08)	1,16	5,13E-10 (1,27E-09)	5,68E-10 (3,23E-09)	1,11
Пищевод	3,82E-10 (1,98E-09)	5,80E-10 (5,83E-09)	1,52	2,55E-10 (1,04E-09)	3,88E-10 (3,48E-09)	1,52	4,32E-10 (5,55E-10)	5,95E-10 (4,01E-09)	1,38
Толстый кишечник	3,87E-09 (1,76E-08)	5,75E-09 (5,60E-08)	1,49	1,66E-09 (3,16E-09)	2,47E-09 (2,04E-08)	1,48	7,27E-10 (3,63E-09)	1,09E-09 (5,93E-09)	1,49
Щитовидная железа	2,03E-09 (3,55E-09)	7,08E-09 (5,99E-08)	3,48	3,70E-10 (1,94E-09)	1,25E-09 (8,61E-09)	3,38	3,00E-11 (7,75E-11)	7,69E-11 (3,47E-10)	2,57

Продолжение таблицы 7

Локализация рака	Возраст при поступлении радионуклидов в организм, лет								
	5			20			50		
	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R	LAR (95% ВДГ)	PAY (95% ВДГ)	R
Яичник	2,00E-09 (6,05E-09)	3,14E-09 (3,06E-08)	1,57	8,95E-10 (2,68E-09)	1,41E-09 (1,15E-08)	1,58	3,28E-10 (1,71E-09)	4,56E-10 (2,48E-09)	1,39
Все указанные солидные	6,55E-08 (6,52E-07)	9,93E-08 (9,45E-07)	1,52	3,31E-08 (2,89E-07)	4,67E-08 (3,88E-07)	1,41	2,28E-08 (1,30E-07)	2,94E-08 (1,74E-07)	1,29
Другие солидные	4,48E-09 (1,38E-08)	8,27E-09 (7,78E-08)	1,85	1,83E-09 (1,17E-08)	3,27E-09 (2,63E-08)	1,79	6,54E-10 (1,68E-09)	1,08E-09 (6,03E-09)	1,65
Все раки	6,67E-08 (6,52E-07)	1,07E-07 (1,02E-06)	1,60	3,43E-08 (2,92E-07)	5,14E-08 (4,25E-07)	1,50	2,47E-08 (1,49E-07)	3,25E-08 (1,92E-07)	1,31

*Отношение $R = PAY/LAR$.

Значения 95% ВДГ прогнозных радиологических рисков (LAR и PAY) получены методом численного имитационного моделирования и соответствуют 95% уровням доверия в расчётах эквивалентных доз на органы и ткани различных половозрастных групп населения. Источником неопределённости доз являются метеорологические факторы, как это изложено выше в подразделе «Оценка эффективных и эквивалентных доз населения». Помимо неопределённости доз при расчётах 95% ВДГ учитывались и неопределённости радиологических рисков, обусловленные статистическими ошибками параметров использовавшихся моделей риска. Методы оценки неопределённости прогноза радиологических рисков изложены ранее в работах Меняйло А.Н. и соавт. [18], а также Иванова В.К. и соавт. [19].

Здесь следует отметить, что значения 95% ВДГ LAR и PAY в табл. 4-7 практически полностью определяются большим разбросом доз облучения. Значения 95% ВДГ для всех раков примерно в 10 раз больше, чем средние значения LAR и PAY, в то время как учёт статистического разброса параметров моделей обычно приводит к тому, что 95% ВДГ LAR превышает среднее значение не более, чем на 20% [19]. Поэтому именно моделирование метеорологических условий в районе выброса радионуклидов [10] оказывает основное влияние на прогноз радиологических рисков населения.

Выводы

Разработанные методы прогноза возможных доз облучения и радиологических рисков населения, обусловленных атмосферными выбросами радиоактивных веществ из РУ БРЕСТ-ОД-300, отвечают самым современным международным подходам в области оценки безопасности ОИАЭ. Они опираются на лучший опыт Европы и Америки решения задач оценки радиологического воздействия на население.

Использование метеорологических рядов, современных моделей атмосферной дисперсии, дозиметрических моделей и алгоритмов для оценки динамики эквивалентных доз позволили сделать вывод не только о средних значениях показателей, характеризующих безопасность, но и о неопределённостях этих оценок. Разработанная технология оценки величины радиологического ущерба на основе рекомендаций МКРЗ [15] позволяет давать оценку радиологических

последствий облучения для здоровья конкретных групп населения с учётом качества жизни пациентов, обеспечиваемого действующей системой здравоохранения.

Проведённый анализ прогнозируемых доз облучения и радиологических рисков показал, что даже в случае запроектной аварии РУ БРЕСТ-ОД-300 («Выброс газовой подушки при достижении ПБЭ по негерметичным твэлам») для критической группы населения г. Северска (девочки в возрасте 5 лет) 95% ВДГ радиологического ущерба равна $1,16 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ (табл. 5), что не превышает предела риска $5 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, установленного НРБ-99/2009 [20] для населения в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения. Средние значения радиологических рисков населения, проживающего в 30-км зоне АО «СХК», в рассмотренных аварийных ситуациях (при проектной и запроектной авариях) на РУ БРЕСТ-ОД-300 находятся, как правило, в диапазоне «пренебрежимо малых» значений (менее 10^{-6} год^{-1} в соответствии с НРБ-99/2009 [20]).

Настоящая работа выполнена в рамках ПН «Прорыв» Госкорпорации «Росатом».

Литература

1. Assessment of radiation doses to the public in the vicinity of a nuclear facility, 15.3.2019 (YVL C.4). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLC-4> (дата обращения 07.09.2020).
2. NRC Regulatory Guide 1.145. Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants. Rev. 1. Washington, DC, 1982. 15 p.
3. **Raskob W., Trybushnyi D., Ievdin I., Zheleznyak M.** JRODOS: Platform for improved long term countermeasures modelling and management //Radioprotection. 2011. V. 46, N 6. P. S731-S736.
4. **Rossi J., Ilvoinen M.** Dose estimates at long distances from severe accidents. Research report VTT-R-00589-16. VTT, 2016. 41 p.
5. Dispersion of radioactive material in air and water and consideration of population distribution in site evaluation for nuclear power plant. IAEA Safety standards series No. NS-G-3.2. Safety Guide. Vienna: IAEA, 2002. 32 p.
6. **Ross K., Phillips J., Gauntt R.O.** MELCOR best practices as applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) project (NUREG/CR-7008). Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2014.
7. NCEP Office Note 442. The GFS atmospheric model. Camp Springs, Maryland: Global Climate and Weather Modeling Branch, EMC, 2003.
8. **Walter H., Gering F., Arnold K., Gerich B., Heinrich G., Welte U.** RODOS-based simulation of potential accident scenarios for emergency response management in the vicinity of nuclear power plants. Salzgitte, 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016091214084/3/BfS-SCHR-60-16.pdf> (дата обращения 07.09.2020).
9. **Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.** A description of the advanced research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). Boulder, Colorado, USA, 2008. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
10. **Dzama D., Semenov V., Sorokovikova O.** The code ROM for assessment of radiation situation on a regional scale during atmosphere radioactivity releases //Fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development FR17. Proceedings of an International Conference, Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/publications/13414/fast-reactors-and-related-fuel-cycles-next-generation-nuclear-systems-for-sustainable-development-fr17> (дата обращения 07.09.2020).
11. **Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Киселёв А.А., Краснощёров С.Н., Шведов А.М., Шикин А.В., Шинкарёв С.М.** Константное обеспечение для расчёта доз облучения населения. Обзор //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 3. С. 91-103.
12. **Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Киселёв А.А., Краснощёров С.Н., Шведов А.М., Шикин А.В., Шинкарёв С.М.** Об использовании дозовых коэффициентов в программных комплексах оценки и прогнозирования радиационной обстановки при аварийных ситуациях //Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 1. С. 92-102.
13. **Бакин Р.И., Киселёв А.А., Шведов А.М., Шикин А.В.** О вычислительных ошибках при расчёте длинных цепочек радиоактивного распада //Атомная энергия. 2017. Т. 123, № 6. С. 334-338.
14. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. Ver. 3.0, official website. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.icrp.org/page.asp?id=145> (дата обращения 07.09.2020).
15. ICRP, 2007. The 2007 International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 2-4. P. 1-332.
16. Атомная энергетика нового поколения: радиологическая состоятельность и экологические преимущества /Под общ. ред. В.К. Иванова, Е.О. Адамова. М.: Изд-во «Перо», 2019. 379 с.
17. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Effects of ionizing radiation. Vol. 1. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, Scientific annexes A and B. New York: United Nations, 2008.

18. **Меняйло А.Н., Ловачёв С.С., Чекин С.Ю., Иванов В.К.** Технология оценки радиационных рисков ОЯТ с учётом состава смесей радионуклидов и распределений органных доз облучения //Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 1. С. 26-36.
19. **Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Максютков М.А., Туманов К.А., Кашеева П.В., Ловачёв С.С., Спирин Е.В., Соломатин В.М.** Радиотоксичность долгоживущих высокоактивных отходов быстрых реакторов в сценариях обращения с облучённым ядерным топливом для достижения радиационной и радиологической эквивалентности с природным ураном //Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 2. С. 8-24.
20. 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.

Potential radiological risk for the population during implementation of the Rosatom Proryv project. Part 2. Radiation detriment assessment

Ivanov V.K.^{1,2,3}, Chekin S.Yu.^{1,2}, Menyajlo A.N.^{1,2}, Lovachev S.S.^{1,2}, Seleva N.G.^{1,2}, Bakin R.I.⁴, Ilchev E.A.⁴, Kiselev A.A.⁴, Solomatin V.M.³, Adamov E.O.³, Lemekhov V.V.³, Proukhin A.V.⁵

¹ A. Tsyb MRRC, Obninsk;

² Medinfo LLC, Obninsk;

³ Joint Stock Company PRORYV, Moscow;

⁴ Nuclear Safety Institute of the RAS, Moscow;

⁵ N. Dollezhal Power Engineering Research and Design Institute, Moscow

Nuclear power is effective and safe source of electricity. Meanwhile, uranium reserves in the earth's crust will run out in 100 years with the development of traditional nuclear reactors. The Rosatom "Proryv" project implementation will allow multiplying fuel sources for the new generation nuclear power through the closing fuel cycle. Radiation safety of the new nuclear powers should be based on the state of the art Russian national and international regulations, as well as on predicted radiation doses, estimates of potential radiation risks and radiation detriment of the public. Developed methods for computational analysis of possible doses of estimates of radiation risks and population-based detriment, associated with atmospheric fallouts of radioactive substances from the BREST-OD-300 reactor, corresponds to the currently recognized approaches to evaluating safety of nuclear energy facilities. Developed method for radiation detriment estimating is in accordance with ICRP recommendations. It allows making assessment of radiation-associated health effects for Russian population with account of patients' quality of life provided by the current health care system. The analysis of possible radiation doses and potential radiation risks shows that the upper 95% confidence bound of radiation detriment for the critical group of population in the town of Seversk (girls of 5 years of age) even in the event of beyond design basis accident at the reactor equals $1.16 \times 10^{-5} \text{ year}^{-1}$, and does not exceed the radiation risk limit of $5 \times 10^{-5} \text{ years}^{-1}$, established by Russian national radiation safety regulations NRB-99/2009 for the population during normal operation of ionizing radiation sources. In the event of an accidental situation on the Brest-OD-300 reactor, the average estimates of radiation risks for the population living within the 30-km zone around the JSC "Siberian Chemical Combine" will generally remain in the range of negligible risk and will not exceed the level of $10^{-6} \text{ year}^{-1}$.

Key words: modeling meteorological fields, effective dose, equivalent dose, ICRP, lifetime attributable risk, risk of radiation-induced cancer, years of life lost, lethality fraction, radiation detriment, radiation safety regulations.

Ivanov V.K. – Deputy Director of A. Tsyb MRRC, Chief Radioecologist of Project PRORYV, Chairman of RSCRP, Corresponding Member of RAS, D. Sc., Tech.; **Chekin S.Yu.*** – Head of Lab.; **Menyajlo A.N.** – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; **Lovachev S.S.** – Research Assistant; **Seleva N.G.** – Engineer, C. Sc., Biol. A. Tsyb MRRC, Medinfo. **Solomatin V.M.** – Head of Dep. of the Chief Radioecologist, Project PRORYV, C. Sc., Biol.; **Adamov E.O.** – Research Advisor, Project PRORYV, D. Sc., Tech., Prof.; **Lemekhov V.V.** – Chief Constructor, Project PRORYV. JSC PRORYV. **Bakin R.I.** – Head of Lab.; **Ilchev E.A.** – Research Assistant; **Kiselev A.A.** – Head of Dep., C. Sc., Tech. IBRAE RAN. **Proukhin A.V.** – Chief Specialist. N. Dollezhal PERDI.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249035. Tel.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

References

1. Assessment of radiation doses to the public in the vicinity of a nuclear facility, 15.3.2019 (YVL C.4). Available at: <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLC-4> (Accessed 07.09.2020).
2. NRC Regulatory Guide 1.145. Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants. Rev. 1. Washington, DC, 1982. 15 p.
3. **Raskob W., Trybushnyi D., Ievdin I., Zheleznyak M.** JRODOS: Platform for improved long term countermeasures modelling and management. *Radioprotection*, 2011, vol. 46, no. 6, pp. S731-S736.
4. **Rossi J., Ilvoinen M.** Dose estimates at long distances from severe accidents. Research report VTT-R-00589-16. VTT, 2016. 41 p.
5. Dispersion of radioactive material in air and water and consideration of population distribution in site evaluation for nuclear power plant. IAEA Safety standards series No. NS-G-3.2. Safety Guide. Vienna, IAEA, 2002. 32 p.
6. **Ross K., Phillips J., Gauntt R.O.** MELCOR best practices as applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) project (NUREG/CR-7008). Albuquerque, New Mexico, Sandia National Laboratories, 2014.
7. NCEP Office Note 442. The GFS atmospheric model. Camp Springs, Maryland: Global Climate and Weather Modeling Branch, EMC, 2003.
8. **Walter H., Gering F., Arnold K., Gerich B., Heinrich G., Welte U.** RODOS-based simulation of potential accident scenarios for emergency response management in the vicinity of nuclear power plants. Salzgitte, 2016. Available at: <https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016091214084/3/BfS-SCHR-60-16.pdf> (Accessed 07.09.2019).
9. **Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.** A description of the advanced research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). Boulder, Colorado, USA, 2008. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
10. **Dzama D., Semenov V., Sorokovikova O.** The code ROM for assessment of radiation situation on a regional scale during atmosphere radioactivity releases. Fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development FR17. Proceedings of an International Conference, Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. Available at: <https://www.iaea.org/publications/13414/fast-reactors-and-related-fuel-cycles-next-generation-nuclear-systems-for-sustainable-development-fr17> (Accessed 07.09.2020).
11. **Arutunyan R.V., Bakin R.I., Kiselev A.A., Krasnoperov S.N., Shvedov A.M., Shikin A.V., Shinkarev S.M.** Availability of constants data for estimating radiation doses to the general population. Review. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 91-103. (In Russian).
12. **Arutunyan R.V., Bakin R.I., Kiselev A.A., Krasnoperov S.N., Shvedov A.M., Shikin A.V., Shinkarev S.M.** The use of dose coefficients in the software engineering platform for estimation and prediction of radiation situation following radiation emergency. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 92-102. (In Russian).
13. **Bakin R.I., Kiselev A.A., Shvedov A.M., Shikin A.V.** Computational errors in the calculation of long radioactive decay chains. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2017, vol. 123, no. 6, pp. 334-338.
14. 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 07.09.2020).
15. ICRP, 2007. The 2007 International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 2-4, pp. 1-332.

16. New generation nuclear power: radiological viability and environmental benefits. Eds.: V.K. Ivanov, E.O. Adamov. Moscow, Pero, 2019. 379 p. (In Russian).
17. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Effects of ionizing radiation. Vol. 1. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, Scientific annexes A and B. New York, United Nations, 2008.
18. **Menyajlo A.N., Lovachev S.S., Chekin S.Yu., Ivanov V.K.** Assessment of radiation risks from spent nuclear fuel depending on composition of radionuclides and radiation dose distribution in organs. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 26-36. (In Russian).
19. **Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyajlo A.N., Maksioutov M.A., Tumanov K.A., Kashcheeva P.V., Lovachev S.S., Spirin E.V., Solomatin V.M.** Spent nuclear fuel management: new approaches to evaluating radiotoxicity of long-lived high-level nuclear wastes of fast reactors. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 8-24. (In Russian).
20. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russian).