DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-6-109-114

Е.В. Васильев, В.Ю. Соловьев, Л.И. Баранов, С.М. Думанский

ОЦЕНКА РАДИОГЕННОГО СОКРАЩЕНИЯ СРЕДНЕПОПУЛЯЦИОННОЙ ОЖИДАЕМОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНИ БЕЗ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ В УСЛОВИЯХ ОСТРОГО И ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Евгений Владимирович Васильев, e-mail: e.vasilyev.v@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка и сравнительный анализ радиогенного сокращения продолжительности здоровой (без онкологических заболеваний) жизни в условиях острого и хронического радиационного воздействия при варьировании достигнутого возраста и накопленной дозы, с целью поиска возможных направлений совершенствования систем поддержки принятия решений по медицинским и социальным мерам защиты работников производств с вредными условиями труда.
Материал и методы: В расчётах использованы модели радиационного риска МКРЗ-103 (2007) и методология структурных схем надёжности для обоснования вида функции «здорового дожития».
Результаты: Получены оценки сокращения продолжительности «здоровой жизни» за счет радиогенного фактора для двух сценариев профессионального воздействия ионизирующего излучения – острого и хронического (облучение в период от 20 до 40 лет).
Выводы:

1. В рассматриваемых расчетных сценариях максимальное сокращение среднепопуляционной ожидаемой продолжительности «здоровой жизни» без онкологических заболеваний за счет радиогенного фактора: у женщин – 1,08 года, у мужчин – 0,32 года (ниже более чем в 3 раза). Это связано с тем, что величина радиационно-обусловленного пожизненного риска онкологических заболеваний для женщин выше, чем для мужчин (заболеет большее количество) и с тем, что расчетная ожидаемая продолжительность «здоровой жизни» без онкологических заболеваний также выше для женщин.
2. При значении фактора эффективности дозы и мощности дозы, равном 1, выраженная в процентах разница между радиогенным сокращением ожидаемой продолжительности «здоровой жизни» при остром облучении и хроническом для возраста 40 лет составляет в среднем 26% у мужчин и 30% у женщин, для возраста 50 лет – 16% и 18%, для возраста 60 лет – 14% и 18%.
3. Применение фактора эффективности дозы и мощности дозы в значении 2 вместо 1 увеличивает разницу между радиогенным сокращением ожидаемой продолжительности здоровой жизни при остром и хроническом облучении в 2,17–2,67 раза.

Ключевые слова: *острое и хроническое облучение, сокращение ожидаемой продолжительность здоровой жизни, моделирование риска*

Для цитирования: Васильев Е.В., Соловьев В.Ю., Баранов Л.И., Думанский С.М. Оценка радиогенного сокращения среднепопуляционной ожидаемой продолжительности жизни без онкологических заболеваний в условиях острого и хронического радиационного воздействия // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 6. С. 109–114. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-6-109-114

DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-6-109-114

E.V. Vasiliev, V.Yu. Soloviev, L.I. Baranov, S.M. Dumansky

Assessment of Radiogenic Reduction in Average Population Cancer-Free Life Expectancy under Conditions of Acute and Chronic Radiation Exposure

A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: E.V. Vasiliev, e-mail: e.vasilyev.v@gmail.com

ABSTRACT

Purpose: Assessment and comparative analysis of the radiogenic reduction in healthy life expectancy (free from cancer) under conditions of acute and chronic radiation exposure with varying attained age and accumulated dose, with the aim of finding possible areas for improving decision support systems for medical and social measures to protect workers in industries with hazardous working conditions.
Material and methods: The calculations utilized ICRP-103 (2007) radiation risk models and the reliability block diagram methodology to substantiate the design of the «healthy survival» function.
Results: Estimates were obtained for the radiogenic reduction in “healthy life” expectancy for two scenarios of occupational exposure to ionizing radiation – acute and chronic (exposure over a period of 20 to 40 years).
Conclusions:

1. In the considered calculation scenarios, the maximum reduction in the average population-wide expected duration of «healthy life» without cancer due to the radiogenic factor is: 1.08 years for women, 0.32 years for men (more than 3 times lower). This is due to the fact that the magnitude of the radiation-induced lifetime risk of cancer for women is higher than for men (more will fall ill) and the fact that the estimated expected duration of «healthy life» without cancer is also higher for women.
2. With a Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor equal to 1, the percentage difference between the radiogenic reduction in the expected duration of “healthy life” from acute and chronic irradiation for the age of 40 is on average 26% for men and 30% for women, for the age of 50–16% and 18%, for the age of 60–14% and 18%.
3. Using a Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor of 2 instead of 1 increases the difference between the radiogenic reduction in healthy life expectancy due to acute and chronic irradiation by 2.17–2.67 times.

Keywords: *acute and chronic exposure, reduction in healthy life expectancy, risk modeling*

For citation: Vasiliev EV, Soloviev VYu, Baranov LI, Dumansky SM. Assessment of Radiogenic Reduction in Average Population Cancer-Free Life Expectancy under Conditions of Acute and Chronic Radiation Exposure. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(6):109–114. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-6-109-114

Введение

В работе [1] В.Ф. Дёмина и соавт., был проведен анализ зависимости вероятности смерти от радиогенного рака от уровня доз, характера воздействия ионизирующего излучения и других факторов. Рассчитывались показатели пожизненного риска смертности от спонтанного и радиогенного солидного рака для двух сценариев профессионального облучения: человек получил разовую дозу в возрасте 20 лет и человек хронически облучался с постоянной мощностью дозы в течении 10 лет, начиная с возраста 20 лет. В исследовании [1] показано, что пожизненный риск смерти от радиогенного солидного рака для женщин приблизительно в 1,5 раза выше, чем для мужчин, протяженное облучение приводит к меньшему риску по сравнению с кратковременным (риск меньше максимально на 21% для мужчин и на 18% для женщин), пожизненный риск смерти от радиогенного рака от дозы, полученной в трудовом возрасте, начинает значительно уменьшаться с возрастом после 60 лет («часть риска приняли на себя другие облученные люди»). В [1] обосновывалась необходимость таких исследований для совершенствования поддержки принятия решений по медицинским и социальным мерам защиты работников производств с вредными условиями труда.

Тем не менее, очевидно, что применение лишь оценок пожизненного риска радиогенной смерти не позволяет в полной мере реализовать поставленные задачи. При планировании медицинской помощи необходимо прогнозировать в первую очередь заболеваемость, т.е., в нашем случае, оценивать пожизненные радиогенные риски онкологической заболеваемости. Именно показатель заболеваемости позволяет определять потребности в финансировании, кадрах, коечном фонде, медицинском оборудовании, лекарственном обеспечении. Наряду с этим, в действующем национальном проекте «Продолжительная и активная жизнь» сформулирована цель: «увеличение ожидаемой продолжительности жизни до 78 лет к 2030 г. и до 81 года к 2036 г., в том числе опережающий рост показателей ожидаемой продолжительности здоровой жизни».

Как дополнение к вышеупомянутым показателям может служить показатель DALY (Disability-adjusted life year), разработанный при участии Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) – интегральный популяционный показатель ущерба здоровью (бремени болезней), измеряемый в единицах времени. В показателе DALY суммируются годы жизни, потерянные из-за преждевременной смертности (YLL) и «приведенные» годы жизни, прожитые с инвалидностью или в состоянии болезни (YLD). Коэффициент «приведения» (DW – Disability Weight) находится в пределах от 0 (идеальное здоровье) до 1 (смерть). Например, DW = 0,288 для злокачественной меланомы кожи означает, что бремя жизни с этой болезнью в течение одного года эквивалентно потере приблизительно 105 дней жизни из-за преждевременной смерти. При расчете DALY должна быть выбрана некоторая референсная, условно здоровая, популяция, относительно которой оценивается бремя болезней. Таким образом, показатель DALY может служить мерой потери здоровья популяции, подверженной действию любых факторов избыточного риска, включая радиационный.

Существуют определенные сложности, связанные с расчетом показателей, связанных с радиогенной онкологической заболеваемостью. Теория радиационного риска для них полностью не разработана. Используя аналогии с теорией надежности, в данной статье предлагается дополнить работу [1] оценками радиогенного сокращения среднепопуляционной ожидаемой продолжительности жизни без онкологических заболеваний. Такие оценки необходимы для подсчета YLD. Также учитывалось, что согласно современным представлениям [2], оценки риска зависят не только от величины дозы, но и от характера облучения: острого/кратковременного (высокая доза за короткое время) или хронического/пролонгированного (доза накапливается за длительное время). Как и в [1], предполагается придерживаться того, что кумулятивные показатели риска (пожизненный риск, потерянные годы жизни и т.д.) математически строго определяется через зависимость доза–эффект для разового воздействия. Здесь нет противоречия с «феноменом Рамсара» [3], этот феномен говорит лишь о несовершенстве зависимости доза–эффект [4].

Как утверждается в [3], жители Рамсара (Иран), проживающие в условиях самого высокого уровня естественного радиационного фона в мире (до 240–260 мЗв/год), не демонстрируют значительного увеличения риска рака, повреждений ДНК или ускоренного старения по сравнению с населением регионов с нормальным фоном. Тем не менее, комитеты МКРЗ и НКДАР ООН не спешат обновлять модели, т.к. они, прежде всего, инструмент управления рисками, и здесь переоценка опасности предпочтительнее её недооценки (этические основы системы радиологической защиты изложены в [5]). Однако модели корректируются коэффициентом DDREF. DDREF (Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor / фактор эффективности дозы и мощности дозы) – это математический коэффициент, используемый в радиационной защите для снижения расчетного риска рака, если доза получена не мгновенно, а пролонгировано с низкой мощностью дозы. В официальных документах МКРЗ значение DDREF принято равным 2.

В настоящее время в МКРЗ сформирована рабочая группа № 91 «Оценка радиационного риска при низких дозах и низких мощностях облучения в целях радиологической защиты». Одна из её целей – ответить на вопрос: целесообразно ли продолжать оценивать риск при низких дозах, анализируя наклон кривой зависимости доза–эффект при высоких дозах и затем применяя коэффициент снижения DDREF или использовать альтернативный вариант НКДАР ООН, заключающийся в определении коэффициентов риска при низких дозах с использованием всей доступной информации и методов байесовского анализа. Нам ближе подход НКДАР ООН, но пока нет официальных решений, при планировании вычислительных экспериментов было решено использовать DDREF 1 и 2 и модели радиационного риска МКРЗ 2007 [2].

Материал и методы

Алгоритм оценки радиогенного сокращения среднепопуляционной ожидаемой продолжительности жизни без онкологических заболеваний разработан на основании общей теории радиационного риска, изложенной в [6–10] и других работах, а также ГОСТ Р МЭК 61078 – 2021 [11] из смежной для теории радиационного риска

области – теории надежности с применением техники структурных схем надежности. Основа алгоритма – следующая формула:

$$\Delta(a) = \text{ОПЗЖ}_c - \text{ОПЗЖ}_{cr} = \int_a^{a_{max}} S_c^*(a,t)dt - \int_a^{a_{max}} S_{cr}^*(a,t)dt, \quad (1)$$

где ОПЗЖ$_c$ – среднепопуляционная ожидаемая продолжительность здоровой жизни от достигнутого возраста (a) до возникновения первичного онкологического заболевания; ОПЗЖ$_{cr}$ – среднепопуляционная ожидаемая продолжительность здоровой жизни в условиях действия радиации от достигнутого возраста (a) до возникновения первичного онкологического заболевания; $S^*(a, t)$ или $S^*(t|a)$ – вероятность того, что онкологическое заболевание не произойдет в интервале времени [a, t). Если рассматривается смерть, а не заболевание, то эта вероятностная функция имеет специальное название – функция дожития и обозначается как $S(a, t)$. Будем условно называть функцию $S^*(a, t)$ функцией «здорового» дожития.

Таким образом, алгоритм сводится к формированию функций «здорового» дожития. При расчетах использовались следующие составляющие этих функций.

Функция риска

Функция риска $\mu(t)$ (также встречается обозначение $\lambda(t)$) – интенсивность вероятности наступления нежелательного события в течение короткого интервала времени [t, $t + \Delta t$), $\Delta t \to 0$, при условии, что оно не произошло ранее, определяется выражением:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \to 0} P(t \le t_{наст} < t + \Delta t \mid t_{наст} \ge t)/\Delta t, \quad (2)$$

где $t_{наст}$ – время наступления нежелательного события (смерти или бесповторного заболевания).

В теории надежности аналог функции риска – мгновенная интенсивность отказов или просто интенсивность отказов $\lambda(t)$. Для работы алгоритма необходимы аналитически заданные функции риска смерти от всех причин, фоновых и радиационных рисков онкологической заболеваемости, фоновых рисков онкологической смертности. Ниже приведены конкретные функции, используемые для расчетов.

Функция риска смерти от всех причин μ_{0F} (a) и функции фонового онкологического риска заболеваемости и смертности

Для построения регрессионной функций риска использовались табличные данные: таблица смертности населения России для календарного года 2014 [12] и таблицы A.4.10/A.4.11 Female/male Euro-American cancer incidence rates by age and site [2] (столбцы All solid и Non-CLL leukemia). Для получения непрерывных функций риска был использован метод структурной минимизации риска [13] в своей разновидности – алгоритме полиномиального приближения регрессии и выбора его степени (ПР). В алгоритме ПР в качестве искомой функции $\varphi(x)$ берется алгебраический полином степени k, который представляется в виде:

$$\varphi(x) = \sum_{j=0}^{k} \alpha_j Q_j(x), \quad (3)$$

где $Q_j(x)$ – полином Чебышева степени j. Выражение алгебраического полинома через полиномы Чебышева [14] эффективно с точки зрения построения вычислительных процедур. Значения независимой переменной должны быть приведены к отрезку [–1,1].

В табл. 1 сведены все необходимые вычисленные коэффициенты при полиномах Чебышева.

Таблица 1

Коэффициенты моделей риска
Coefficients of risk models

Риск смерти от всех причин	муж.		(1,25596E-01; 2,05821E-01; 1,17349E-01; 4,23869E-02; 5,10237E-03; –8,42867E-03; –6,08908E-03; –3,40955E-03; 4,90373E-04; 1,14326E-03; 1,44060E-03; –5,30678E-04; –2,20751E-04; –4,69826E-04; 2,66382E-04; –1,20312E-04; 6,73012E-04; 1,63465E-04; –1,65574E-04; –7,03068E-04; –4,71376E-04)
	жен.		(1,29071E-01; 2,21516E-01; 1,42513E-01; 6,04043E-02; 9,00456E-03; –1,28720E-02; –1,13483E-02; –5,35966E-03; 5,03109E-04; 1,21907E-03; 1,16933E-03; –2,62482E-04)
Фоновый риск смерти от онкологических заболеваний	муж.	все солид.	(8,20887E-03; 1,28330E-02; 5,49284E-03; –3,11907E-04; –1,87562E-03; –1,13776E-03; –1,86989E-04)
		лейкозы	(2,56920E-04; 3,97069E-04; 1,86913E-04; 1,69278E-05; –5,08174E-05; –3,94951E-05; –1,35147E-05)
	жен.	все солид.	(4,29701E-03; 6,47490E-03; 2,34938E-03; –4,06210E-04; –8,31192E-04; –3,60906E-04)
		лейкозы	(1,70582E-04; 2,66372E-04; 1,39943E-04; 3,89724E-05; –4,09431E-07; –3,77396E-07; 6,98741E-06; 5,29406E-06; –1,91464E-06; –9,72281E-06; –1,33358E-05; –9,53829E-06; –6,14385E-06; 8,71568E-06; 1,01327E-05; 7,36445E-06; 2,28701E-06; –2,19669E-06; –5,83060E-06; –5,79650E-06; –5,21996E-06)
Фоновый риск онкологических заболеваний	муж.	все солид.	(1,26709E-02; 1,88064E-02; 6,11965E-03; –2,25482E-03; –3,02912E-03; –5,28320E-04; 9,18103E-04; 4,80689E-04; –1,88930E-04; –2,46358E-04)
		лейкозы	(1,94610E-04; 2,25824E-04; 8,82489E-05; –4,81286E-05; –4,15920E-05; –1,24085E-05; 2,12343E-05; 2,38390E-05; 6,20724E-06; –6,84123E-06; –1,62968E-05; –7,26488E-06; –1,43571E-06; 1,03005E-05; 9,74097E-06; 4,94369E-06; –2,67288E-07; –8,30378E-06; –7,49172E-06; –7,08054E-06)
	жен.	все солид.	(7,23085E-03; 9,87623E-03; 2,00936E-03; –1,55843E-03; –9,51364E-04)
		лейкозы	(1,49632E-04; 1,79784E-04; 1,03859E-04; 7,35241E-06; 8,64888E-06; 5,72771E-06; 1,39295E-05; 8,27953E-06; –1,46401E-06; –5,60156E-06; –1,15381E-05; –4,93785E-06; –6,80463E-06; 7,89683E-06; 7,68708E-06; 5,56009E-06; 2,57954E-06; –2,58531E-06; –3,63517E-06; –5,21848E-06; –3,61896E-06)

Функция радиационного онкологического риска заболеваемости

Использовались модели заболеваемости МКРЗ 2007 для всех солидных раков и лейкемии (50% EAR + 50% ERR).

Функции радиационного риска при кратковременном и пролонгированном облучении

Обозначим через μ_c (*s, a, g, D*) функцию радиационно-обусловленного онкологического риска (*s* – пол, *a* – возраст в годах и долях года, *g* – возраст при облучении в годах и долях года и *D* – доза единичного (острого) облучения, подиндекс с означает cancer). При пролонгированном (растянутом во времени) облучении необходимо знать мощность дозы – $D'(t) = dD(t) / dt$. Тогда бесконечно малое приращение дозы можно представить в виде следующего выражения $dD(t) = D'(t)dt$. Это приращение будем считать единичной дозой облучения. Тогда функция риска при пролонгированном облучении примет вид $\hat{\mu}_c(t) = \int_a^t \mu_c(s, a, u, dD(u))du$. В нашей задаче предполагается равномерное облучение, т.е. $dD(t) = const$. Математическое представление возрастной зависимости в функции μ_c обычно не позволяет выразить интеграл в элементарных функциях. Приближенно вычислить интеграл можно любым методом численного интегрирования, например методом средних прямоугольников.

Когда все компоненты функций «здорового» дожития подготовлены, можно перейти к их алгоритмической сборке.

В теории надежности функции дожития (и функции «здорового» дожития) соответствует функция вероятности безотказной работы системы, обозначенная в ГОСТ [11] как $R_s(t)$ причем $R_s(t) = e^{-\int_0^t \lambda(u)du}$, где $\lambda(u)$ – интенсивность отказов системы в момент времени $t = u$. В ГОСТ приведены методы построения структурной схемы надежности (RBD – Reliability block diagram), облегчающие оценку показателей надежности. На рис. 1 приведена RBD-диаграмма для смертности при наличии факторов избыточного риска и известных функциях риска по определенным причинам.

Такая схема с последовательным соединением блоков в теории надежности означает, что для функционирования системы необходимо, чтобы функционировали все блоки, при этом отказы отдельных блоков являются статистически независимыми событиями. Наиболее просто такая схема рассматривается в случае, если критическим событием является смерть На рис. 1 блок – это какой-либо орган или система организма, с которого началась цепочка событий, приведших к смерти. В этом случае вероятность безотказной работы системы до времени *t* (вероятность дожить до возраста *t*) вычисляется как произведение вероятностей безотказной работы элементов системы. Таким образом, под знаком интеграла должна стоять сумма всех функций риска. Обозначим эту сумму через μ_F (риск смерти по всем причинам в условиях действия факторов риска).

Очевидно, более сложно выглядит функция дожития для заболеваемости. Это связано с тем, что в отличие от смерти, заболеть в течении жизни можно множеством болезней, одной болезнью многократно и одновременно несколькими болезнями. Функция «здорового» дожития (S^* (*a*, *t*)) будет иметь свой вид, в зависимости от решаемой задачи. Вид функции также можно получить с помощью последовательно-параллельных RBD-диаграмм. ГОСТ также предлагает использовать менее наглядную, но компактную технику логических функций. Если в последовательной структуре, изображенной на рис. 1, обозначить блоки как A, B, C … Z, то эта структура будет моделировать логическую функцию $s = a \cdot b \cdot c \cdot \ldots \cdot z$, где *a*, *b*, *c* и *z* описывают состояния успехов соответствующих блоков, а *s* – состояние успеха соответствующей системы.

Разберем частный случай, лежащий в основе расчетов: требуется найти вероятность того, что в интервале времени [*a*, *t*) не наступит смерть и произвольное первичное онкологическое заболевание *l*, при условии действия вредного фактора *m* радиации (других вредных факторов нет, радиация увеличивает риск только онкологической заболеваемости и смертности). При этом у нас есть функции рисков для всех солидных раков (μ_{0Fs}, μ^*_{Fs})) и лейкозов (μ_{0Fl}, μ^*_{Fl})) и риска смерти от всех причин μ_{0F}. Тогда можно с учетом DDREF записать следующее:

$$a = e^{-\int_a^t (\mu_{0F} - \mu_{0Fs} - \mu_{0Fl})du}, \quad (4)$$

а фоновые риски смерти, связанные с солидными раками и лейкозами, необходимо вычесть из функции риска смерти от всех причин (заболевание наступает раньше смерти от него самого):

$$b = e^{-\int_a^t \mathrm{DDREF}^{-1} \cdot \mu^*_{Fs} du}; \quad (5)$$

$$c = \mathrm{e}^{-\int_a^t \mu^*_{Fl}\,\mathrm{du}} \text{ и } s = a \cdot b \cdot c. \quad (6)$$

Разбор более сложных случаев выходит за рамки цели данной статьи, но ГОСТ [11] позволяет с помощью разного типа соединений между блоками моделировать гораздо более сложные ситуации, изучаемые теорией надежности и эти технологии могут использоваться и в теории риска.

Результаты и обсуждение

В расчётах, результаты которых сведены в табл. 2 и 3, как и в [1], рассматривалось 2 сценария:

- Сценарий 1 – человек получил разовую (кратковременную) дозу *D* в возрасте 20 лет.
- Сценарий 2 – человек хронически облучался со среднегодовой мощностью дозы D/20 в течении 20 лет, начиная с возраста 20 лет.

Набор доз – 200, 400 мЗв (не более 20 мЗв/год при хроническом облучении), набор возрастов, для которых



Функции избыточного риска

μ_{0F} $\mu_{F_{1,1}}$ $\mu_{F_{1,2}}$ $\mu_{F_{N,K}}$

$$S(a, t) = e^{-\int_a^t \mu_{0F}(u)\,du} \cdot \prod_{i,j} e^{-\int_a^t \mu_{F_{i,j}}(u)du} = e^{-\int_a^t \mu_{0F}(u) + \sum_{i,j} \mu_{F_{i,j}}(u)\,du} = \mathrm{e}^{-\int_a^t \mu_F(u)\,du}$$

Рис. 1. RBD-смертность

Рис. 1. RBD-mortality

оценивались радиогенные сокращения «здоровой» жизни при дожитии до возраста – 40, 50, 60 лет.

В процентах оценивалось на сколько больше сокращается «здоровая» жизнь при остром облучении относительно хронического.

В табл. 2 и 3 приведены оценки $\Delta(a)$ – средние значения для группы из N человек определенного возраста, пола, подвергшейся радиационному воздействию с характеристиками, приведенными выше. Произведение $\Delta(a)\cdot N$ – добавочные человеко-годы, проведенные в состоянии радиационно-обусловленных онкологических заболеваний.

Таблица 2

Оценка радиогенного сокращения среднепопуляционной ожидаемой продолжительности жизни без онкологических заболеваний у мужчин в условиях острого (Δос) и хронического (Δхр) радиационного воздействия

Assessment of the radiogenic reduction in the average population-based life expectancy without oncological diseases in men under conditions of acute (Δac) and chronic (Δch) radiation exposure.

Накопленная доза, мЗв	DDREF	Возраст (ОПЗЖ*c*), год								
		40 (27,88)			50 (20,50)			60 (14,42)		
Мужчины										
		Δос	Δхр	%	Δос	Δхр	%	Δос	Δхр	%
200	1	0,16	0,13	23	0,13	0,11	18	0,08	0,07	14
	2		0,06	167		0,06	117		0,03	167
400	1	0,32	0,25	28	0,25	0,22	14	0,16	0,14	14
	2		0,13	146		0,11	127		0,07	129

Примечание: К сожалению, радиационно-эпидемиологические исследования имеют свой предел, что видно по зоне неопределенности, которую создает DDREF (табл. 2 и 3). Обзорная статья [15] содержит описание направлений совершенствования моделей риска. Отмечается, что для решения проблем оценки и управления радиационными рисками необходим междисциплинарный подход. «Сотрудничество между эпидемиологами, биостатистиками, специалистами по анализу данных, врачами и политиками будет иметь ключевое значение для разработки комплексных моделей, учитывающих как биологические эффекты радиации, так и ее социальные последствия»[15]. Из новых направлений, конечно, указывается и искусственный интеллект: «интеграция машинного обучения и искусственного интеллекта открывает многообещающие возможности для улучшения оценки радиационного риска. Эти технологии могут выявлять тонкие закономерности в больших массивах данных, обнаруживать биомаркеры радиационного облучения и поддерживать более индивидуализированные прогнозы риска. Такие инновации могут коренным образом изменить подход к оценке радиационного риска, перейдя от обобщенных оценок к персонализированным».

Выводы

1. Показано, что максимальное сокращение среднепопуляционной ожидаемой продолжительности «здоровой» жизни без онкологических заболеваний (ОПСЖ*c*) за счет радиогенного фактора: составляет у женщин 1,08 года, у мужчин – 0,32 года (более чем в 3 раза ниже).Это связано с тем, что величина радиационно-обусловленного пожизненного риска онкологических заболеваний для женщин выше, чем для мужчин (заболеет большее количество) и с тем, что расчетное ОПСЖ*c* также выше для женщин.
2. При DDREF=1 (DDREF – фактор эффективности дозы и мощности дозы) выраженная в процентах разница между радиогенным сокращением ожидаемой продолжительности «здоровой» жизни при остром облучении и хроническом для возраста 40 лет составляет в среднем 26% у мужчин и 30% у женщин, для возраста 50 лет – 16% и 18%, для возраста 60 лет – 14% и 18%.
3. Применение коэффициента DDREF=2 вместо 1 увеличивает разницу между радиогенным сокращением ожидаемой продолжительности здоровой жизни при остром и хроническом облучении в 2,17–2,67 раза.

Таблица 3

Оценка радиогенного сокращения среднепопуляционной ожидаемой продолжительности жизни без онкологических заболеваний у женщин в условиях острого (Δос) и хронического (Δхр) радиационного воздействия

Assessment of the radiogenic reduction in the average population life expectancy without cancer in women under conditions of acute (Dos) and chronic (Δch) radiation exposure

Накопленная доза, мЗв	DDREF	Возраст, год (ОПЗЖ*c*) , год)								
		40 (35,07)			50 (27,18)			60 (19,82)		
Женщины										
		Δос	Δхр	%	Δос	Δхр	%	Δос	Δхр	%
200	1	0,55	0,42	31	0,35	0,3	17	0,19	0,16	19
	2		0,21	162		0,15	133		0,08	138
400	1	1,08	0,84	29	0,70	0,59	19	0,37	0,32	16
	2		0,42	157		0,3	133		0,16	131

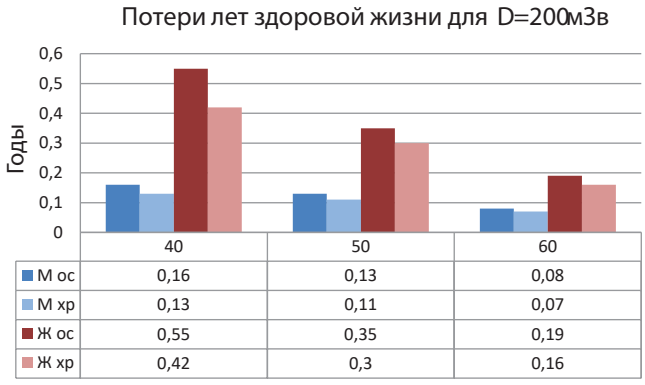


Рис. 2. Графическое представление табл. 2 и 3 для D = 200 мЗв
Fig. 2. Graphical representation of tables 2 and 3 for D = 200 mSv

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дёмин В.Ф., Бирюков А.П., Седанкин М.К., Соловьев В.Ю. Специфика риска радиогенного рака для профессиональных работников // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т.2. №65. С. 17-20.
2. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Oxford: ICRP, 2007. 332 p.
3. Karam P.A., Mortazavi S.M.J. The Very High Background Radiation Area in Ramsar, Iran: Public Health Risk or Signal for a Regulatory Paradigm Shift? // VALDOR Symposium Addressing Transparency in Risk Assessment and Decision Making. Stockholm, 10-14 June 2001. Stockholm: Swedish Nuclear Power Inspectoratet, 2001. P.495–502.
4. Котеров А.Н. От очень малых до очень больших доз радиации: новые данные по установлению диапазонов и их экспериментально-эпидемиологические обоснования // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2013. Т.2. №58. С. 5–21.
5. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 138. Oxford: ICRP, 2018. 68 p.
6. Дёмин В.Ф., Захарченко И.Е. Риск воздействия ионизирующего излучения и других вредных факторов на здоровье человека: методы оценки и практическое применение // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т.1. №53. С. 77–89.

7. Демин В.Ф. Научно-методические аспекты оценки риска // Атомная энергия. 1999. №1. С. 46–63.
8. Demin V.F. Health Risk Assessment and Management: Some Directions of R&D and Practical Use in Russia // PSAM 5 – Probabilistic Safety Assessment and Management: Proceedings of the Intern. Conf. Osaka, Japan, 27.11–01.12.2000 / Ed. by S. Kondo, K. Funita. Tokyo: Universal Academy Press, 2000. V.1. P. 281–287.
9. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report, Vol. I. Annex A. New York: UNSCEAR, 2006. 390 p.
10. Белых Л.Н., Бирюков А.П., Васильев Е.В., Невзоров В.П. Оценки пожизненного радиогенного риска онкологической смертности и заболеваемости // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т.6. №60. С. 20-25.
11. ГОСТ Р МЭК 61078-2021. Надежность в технике. Структурная схема надежности. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 118 с.
12. Таблица смертности населения России для календарного года 2014 // Демоскоп Weekly. Электронный ресурс: https://www.demoscope.ru/weekly/ssp/rus_lt.php?year=56 (Дата обращения: 10.05.2026).
13. Вапник В.Н., Глазкова Т.Г., Кощеев В.А. и др. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей. М.: Наука, 1984. 816 с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
15. Jafarian-Dehkordi Forough, Christoph Hoeschen. Low-Dose Radiation Risk in Medicine: a Look at Risk Models, Challenges, and Future Prospects // Zeitschrift fur Medizinische Physik. 2025. V.35. No.4. P. 393-400. Doi: 10.1016/j.zemedi.2025.07.002.

REFERENCES

1. Dyemin V.F., Biryukov A.P., Sedankin M.K., Solov'yev V.Yu. Specifics of the Risk of Radiogenic Cancer for Professionals. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;2;65:17-20 (In Russ.).
2. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Oxford, ICRP, 2007. 332 p.
3. Karam P.A., Mortazavi S.M.J. The Very High Background Radiation Area in Ramsar, Iran: Public Health Risk or Signal for a Regulatory Paradigm Shift? VALDOR Symposium Addressing Transparency in Risk Assessment and Decision Making. Stockholm, 10-14 June 2001. Stockholm, Swedish Nuclear Power Inspectoratet, 2001. P. 495–502.
4. Koterov A.N. From Very Low to Very High Radiation Doses: New Data on Establishing Ranges and their Experimental and Epidemiological Justifications. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2013;2;58:5-21 (In Russ.).
5. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 138. Oxford, ICRP, 2018. 68 p.
6. Demin V.F., Zakharchenko I.Ye. The Risk of Exposure to Ionizing Radiation and other Harmful Factors on Human Health: Assessment Methods and Practical Application. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2012;1;53:77-89 (In Russ.).
7. Dyemin V.F. Scientific and Methodological Aspects of Risk Assessment. *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 1999;1:46–63 (In Russ.).
8. Dyemin V.F. Health Risk Assessment and Management: Some Directions of R&D and Practical Use in Russia. PSAM 5 – Probabilistic Safety Assessment and Management. Proceedings of the Intern. Conf. Osaka, Japan, 27.11–01.12.2000. Ed. by S. Kondo, K. Funita. Tokyo, Universal Academy Press, 2000. V.1. P. 281–287.
9. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report, Vol. I. Annex A. New York, UNSCEAR, 2006. 390 p.
10. Belykh L.N., Biryukov A.P., Vasil'yev Ye.V., Nevzorov V.P. Estimates of Lifelong Radiogenic Risk of Cancer Mortality and Morbidity. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2015;6;60:20–25 (In Russ.).
11. *Nadezhnost' v Tekhnike. Strukturnaya Skhema Nadezhnosti* = Reliability in Engineering. Structural Diagram of Reliability. GOST R IEC 61078-2021. Moscow, Rossiyskiy Institut Standartizatsii Publ., 2023. 118 p. (In Russ.).
12. *Tablitsa Smertnosti Naseleniya Rossii dlya Kalendarnogo Goda 2014* = Russian Institute of Standardization, 2023. Mortality Table of the Population of Russia for the Calendar Year 2014. Demoscope Weekly (In Russ.). URL: https://www.demoscope.ru/weekly/ssp/rus_lt.php?year=56 (Date of Access: 10.05.2026).
13. Vapnik V.N., Glazkova T.G., Koshcheyev V.A., et al. *Algoritmy i Programmy Vosstanovleniya Zavisimostey* = Algorithms and Programs for Dependency Recovery. Moscow, Nauka Publ., 1984. 816 p. (In Russ.).
14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po Matematike dlya Nauchnykh Rabotnikov i Inzhenerov* = Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (In Russ.).
15. Jafarian-Dehkordi Forough, Christoph Hoeschen. Low-Dose Radiation Risk in Medicine: a Look at Risk Models, Challenges, and Future Prospects. Zeitschrift fur Medizinische Physik. 2025;35;4:393-400. Doi: 10.1016/j.zemedi.2025.07.002.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.06.2026. Принята к публикации: 25.07.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.06.2026. Accepted for publication: 25.07.2026.