

## Оценка радиационного ущерба для здоровья: о возможности использования эффективной дозы для расчета числа потерянных лет здоровой жизни

Л.В. Репин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

*Закон «О радиационной безопасности населения» Российской Федерации определяет эффективную дозу как «величину воздействия ионизирующего излучения, используемую как меру риска возникновения отдаленных последствий облучения организма человека...». В свою очередь, «Нормы радиационной безопасности» устанавливают процедуру оценки риска для здоровья, связанного с облучением в малых дозах, для 2 видов вредных последствий (онкологические заболевания и наследственные эффекты) и 2 половозрастных групп («Все население» и «Взрослые») путем умножения соответствующих линейных коэффициентов риска на эффективную дозу. В то же время указанные документы не исключают использование иных процедур оценки риска, не исключая использование каких-либо других показателей риска или выполнения оценки риска для иных половозрастных групп населения. Величина радиационного ущерба для здоровья, вычисляемая описанным в НРБ99/2009 способом для характеристики риска, в качестве единицы измерения использует 1 случай вызванного воздействием ионизирующего излучения средневзвешенного по числу потерянных лет жизни смертельного онкологического заболевания или приравненного к нему взвешенного по степени тяжести онкологического заболевания, не приводящего к смерти. В настоящее время величины, вычисляемые на основе показателей смертности, считаются недостаточно информативными характеристиками влияния внешних факторов на популяционное здоровье. Такие показатели слабо пригодны при сравнительном анализе рисков различной природы, особенно с учетом различного распределения последствий негативного воздействия во времени. В работе представлен прикладной подход, с помощью которого без внесения существенных изменений в сложившуюся практику радиационной защиты возможно расширить применение методологии оценки риска для здоровья. Рассматривается возможность использования в качестве показателя радиационного риска для здоровья величины DALY (числа потерянных вследствие облучения лет здоровой жизни, взвешенных с учетом нетрудоспособности); обсуждаются целесообразность изменения подходов к расчету эффективной дозы (путем использования различных значений взвешивающих коэффициентов для тканей и органов при расчете эффективной дозы применительно к различным половозрастным группам населения) и возможная сфера применения предлагаемых подходов к оценке риска на практике; предлагается подход к расчету значения DALY с помощью эффективной дозы и соответствующих коэффициентов риска ( $DALY \times Z_{в}^{-1}$ ).*

**Ключевые слова:** радиационный риск, радиационный ущерб, вред для здоровья, DALY, мера риска, популяционное здоровье, показатель риска.

### Введение

Оценка рисков, как правило, прямо или косвенно связана с процессом принятия решений в условиях неполноты информации о возможных последствиях какого-либо действия (бездействия) или события. Оценка рисков для здоровья, сопряженных с произошедшим, происходящим или предполагаемым негативным воздействием вредного фактора на человека, связана, таким образом, с принятием решений о допустимости (приемлемости) указанного воздействия. Также на основании количес-

твенной и качественной оценки возможных последствий могут приниматься решения о принятии/непринятии мер реагирования или иных решений, регулирующих деятельность, связанную с воздействием вредного фактора или распространением последствий такого воздействия.

По объективным причинам система показателей популяционного здоровья изначально начала развиваться на основе регистрации причин смерти, поэтому одна утраченная вследствие каких-либо причин человеческая жизнь стала естественной мерой популяционного вреда. По мере

Репин Леонид Викторович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева  
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: leonid\_repin@mail.ru

развития систем здравоохранения и медицинской статистики, систем сбора данных и классификации нарушений здоровья более надежной и информативной основой для характеристики популяционного здоровья стали показатели, рассчитываемые на основании регистрации не только случаев смерти, но и случаев заболеваний. На протяжении многих лет обобщенные показатели состояния популяционного здоровья основывались на оценке заболеваемости и смертности населения от различных причин. Однако уже в 1980-е гг. мировое научное сообщество пришло к пониманию, что показатели заболеваемости и смертности все же недостаточно информативны и не вполне соответствуют требованиям времени и решаемым задачам в области охраны здоровья людей. Так, П.В. Рамзаев в 1982 г. писал: «Предложение – выразить все богатство общества через величину здоровья, в виде, например, миллиардов человеко-лет полноценной жизни, как мы думаем, не такое уж бесперспективное, как может показаться на первый взгляд. Оно особенно привлекательно для сбалансированного подхода при разработке общегосударственных мер по здравоохранению. Вся пользу и весь вред (затраты) применительно к медицине надо учитывать в единицах величины здоровья, что, разумеется, не отменяет учета заболеваемости и других медицинских показателей».

Для планирования социально-экономического развития общества вряд ли кому-либо из ученых на сегодня удастся изыскать и предложить «экономический эквивалент» здоровью на 1 год полноценной жизни (чем и предлагается измерять здоровье как величину) больше, чем душевой национальный доход» [1].

Однако в те годы методология оценки числа «лет полноценной жизни» еще не была развита в достаточной степени для практической реализации подобных идей применительно к оценке воздействия вредных факторов среды обитания. Лишь десятилетие спустя в рамках развития проекта Всемирной организации здравоохранения «Глобальное бремя болезней» (ГББ) была разработана методология оценки вреда для здоровья на основе учета числа потерянных вследствие какой-то причины лет полноценной жизни. Были разработаны обобщенные показатели популяционного здоровья, учитывающие годы, утраченные вследствие преждевременной смерти, и годы, прожитые в состоянии «неполного здоровья» [2, 3].

К этому времени Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) был разработан и внедрен в практику собственный показатель для количественной оценки негативного воздействия малых доз ионизирующего излучения на здоровье людей, базирующийся на сведениях об онкологической смертности вследствие облучения, – радиационный ущерб [4]. Данный показатель включал в себя смертельные случаи радиационно-индуцированных злокачественных новообразований (ЗНО) и приравненные к ним несмертельные ЗНО, взвешенные с учетом их тяжести. Методология оценки тяжести заболеваний основывалась на данных о летальности отдельных нозологических форм ЗНО.

К моменту выхода 103-й Публикации МКРЗ [5] методология расчета показателя ущерба несколько изменилась,

т.к. по мере накопления эпидемиологических данных стало возможным получать более надежные оценки радиационного риска на основе регистрации данных об онкологической заболеваемости, однако сама суть единицы радиационного ущерба<sup>1</sup> не изменилась. Таким образом, используемая в настоящее время величина радиационного ущерба, с одной стороны, несколько опередила свое время, позволяя учитывать при оценке риска как вероятность возникновения негативных последствий воздействия радиации на здоровье, так и степень тяжести таких последствий. С другой стороны, указанная методология не позволяет напрямую использовать результаты оценки риска при решении задач сравнительного анализа рисков различной природы. Одним из путей решения указанной проблемы является выбор более универсального и широко используемого показателя популяционного здоровья в качестве меры радиационного ущерба.

С точки зрения оценки решаемых задач, можно выделить 2 основных направления развития методологии оценки радиационного риска для здоровья:

- разработка и совершенствование моделей риска, нацеленных на прогнозирование ожидаемых негативных последствий облучения (теоретическое или фундаментальное направление);

- разработка методических подходов, нацеленных на обоснование гигиенических нормативов, дозовых критериев и иных величин, используемых в области радиационной защиты (прикладное направление).

Задачи, решаемые в рамках первого направления, нацелены на повышение точности прогнозных моделей развития стохастических эффектов облучения; на решение задачи межпопуляционного переноса оценок риска; на создание биологических моделей радиационного риска, т.е. моделей риска, описывающих механизмы возникновения с течением времени нарушений здоровья вследствие облучения (в частности, на разработку математических моделей радиационного канцерогенеза). Главным критерием качества получаемых моделей, таким образом, можно считать их предсказательную точность.

Для второго направления главными критериями оценки являются простота практического использования моделей, информационная емкость показателей и наглядность представления результатов расчета и характеристики риска, даже если они вступают в некоторое противоречие с математической строгостью расчетов. Такой подход типичен в условиях наличия существенных неопределенностей при оценке риска (например, при оценке радиационных рисков в области малых доз или при малых мощностях дозы).

Наибольшее распространение в области обеспечения радиационной безопасности получил подход к оценке радиационного риска в области малых доз или мощностей дозы на основе значения коллективной эффективной дозы с использованием линейных коэффициентов радиационного ущерба. Данный подход повсеместно используется на протяжении 30 лет, хотя и обладает известными недостатками, сужающими возможную сферу его приме-

<sup>1</sup> Здесь и далее под радиационным ущербом понимается радиационный ущерб для здоровья, если не сказано иное.

нения<sup>2</sup>. К числу наиболее значимых особенностей названной методологии относятся следующие:

- значения коэффициентов ущерба рассчитаны МКРЗ только для 2 возрастных групп населения (все население и лица трудоспособного возраста);

- значения взвешивающих множителей для органов и тканей ( $W_T$ ) определены на основании расчета значений относительного вреда для группы «Все население», хотя для ряда локализаций (например, легкого) значения относительного вреда существенно меняются с возрастом;

- оценка риска по такой методике осуществляется для искусственно сформированной популяции (номинальной популяции МКРЗ), не существующей в реальности;

- медико-демографические показатели, использованные для расчета радиационного ущерба, несколько устарели к настоящему времени.

Названные и некоторые другие особенности методологии оценки радиационного ущерба для здоровья заставляют достаточно осторожно относиться к результатам оценки риска и сфере их возможного использования, хотя на практике даже специалисты зачастую воспринимают полученные таким образом результаты оценки риска чуть ли не как прогнозные.

**Цель исследования** – изучение возможности применения эффективной дозы для оценки предполагаемого числа потерянных лет здоровой жизни в качестве меры риска от воздействия малых доз ионизирующих излучений на здоровье человека.

#### Задачи исследования

- изучена методология [5–13], использованная МКРЗ для оценки радиационного ущерба и вычисления значений взвешивающих коэффициентов для органов и тканей с учетом их радиочувствительности;

- изучена методология, используемая ВОЗ [14] при вычислении показателя DALY для оценки числа лет здоровой жизни, потерянных вследствие заболевания;

- методология ВОЗ применена для расчета числа лет здоровой жизни, теряемых вследствие воздействия ионизирующего излучения в малых дозах;

- методология МКРЗ применена для расчета значений взвешивающих коэффициентов органов и тканей с учетом их радиочувствительности на основе значений DALY на единицу дозы облучения;

- проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами расчетов МКРЗ и результатами расчетов, приводимыми в работах других авторов.

#### Материалы и методы

Для расчета показателей риска в настоящей работе были использованы медико-демографические показате-

ли 3 различных популяций: 1) азиатской популяции МКРЗ; 2) евро-американской популяции МКРЗ; 3) российской популяции. Источниками медико-демографических данных (т.е. сведений о половозрастном составе, а также возрастных показателей онкологической заболеваемости и возрастных показателей онкологической и общей смертности) популяций МКРЗ стали 103-я [5, 6] и 152-я [8] публикации МКРЗ. Номинальная популяция МКРЗ включает в себя обе вышеназванные популяции МКРЗ, а результаты оценки рисков для номинальной популяции получаются путем усреднения результатов расчета, полученных для каждой из указанных популяций в отдельности.

Сведения о половозрастном составе населения Российской Федерации были получены из базы данных Росстата за 2018 г. [16], а данные о заболеваемости и смертности в российской популяции – из сборника «Злокачественные новообразования в России в 2018 г.» [16].

Для расчета показателей радиационного ущерба МКРЗ применялась методика, описанная в 152-й публикации МКРЗ [8]. Показатели DALY рассчитывались с использованием методики, описанной в [17].

Для расчета показателей радиационного ущерба для здоровья российской популяции применялись данные об относительной выживаемости после возникновения онкологических заболеваний, приведенные в [18]. При этом в процессе анализа результатов также применялся метод оценки летальности, применимый к стационарным популяциям (к которым не может быть отнесена российская), представляющий собой частное от деления возрастных показателей онкологической смертности на соответствующие возрастные показатели выявляемости онкологических заболеваний (mortality incidence ratio).

Компьютерные программы, использованные для собственных расчетов, написаны с использованием систем Wolfram Mathematica и 1С: Предприятие 8.3 [19].

#### Результаты и обсуждение

##### *Результаты расчетов по модели радиационного риска МКРЗ*

Первым шагом в решении поставленных задач стала реализация модели радиационного риска МКРЗ в виде компьютерной программы на языке Wolfram Mathematica. Между выходом 103-й публикации МКРЗ [5, 6], в которой в общих чертах описана методология, использованная для расчета радиационного ущерба, и выходом 152-й публикации МКРЗ [8], в которой была детально описана указанная методология и представлены все использованные для расчетов медико-демографические данные, прошло 15 лет. К выходу 152-й публикации МКРЗ в методологию оценки риска были внесены некоторые изменения и исправлены некоторые ошибки 103-й публикации в части

<sup>2</sup> Важно отметить, что МКРЗ предлагает использовать эффективную дозу для решения задач в области планирования и оптимизации радиационной защиты, а также для контроля за соблюдением пределов доз. При этом величина коллективной эффективной дозы с точки зрения МКРЗ «является инструментом для оптимизации и для сравнения различных радиационных технологий и процедур защиты, преимущественно в контексте профессионального облучения» [6]. НКДАР ООН занимает еще более жесткую позицию по данному вопросу: «Коллективная доза должна использоваться только в сравнительных целях» и «Не рекомендуется агрегировать очень низкие дозы в течение продолжительных периодов времени для большого числа людей с целью оценки абсолютных показателей радиационно-индуцированных последствий для здоровья населения, подвергающегося возрастающим дозам на уровнях, сравнимых с нормальным уровнем природного фона или ниже» [7]. Однако на практике позиция МКРЗ и НКДАР ООН очень часто игнорируется.

описания методологии. Основные изменения коснулись оценки риска радиационно-индуцированных лейкозов и раков молочной железы. Кроме того, в обеих публикациях некоторые коэффициенты моделей и результаты расчетов представлялись с различной точностью, что несколько затрудняло отладку программы, однако в итоге удалось добиться очень высокой согласованности результатов. Степень согласованности результатов расчета, сделанного авторами, с результатами, представленными в 152-й публикации МКРЗ, можно оценить по данным, представленным в таблице 1. Для справки приводятся аналогичные результаты, представленные в 103-й публикации. Приведенные коэффициенты рассчитаны путем усреднения по полу и по 2 популяциям – евро-американской и азиатской.

Полученные результаты позволили уверенно использовать программу для дальнейших расчетов, обеспечивая очень высокий уровень сопоставимости оценок риска и корректность сравнительного анализа.

На следующем этапе работы с использованием разработанной программы были рассчитаны значе-

ния коэффициентов риска для группы «Все население» применительно к номинальной популяции, половозрастной состав и медико-демографические характеристики которой представлены в 103-й и 152-й публикациях МКРЗ, и к российской популяции, с использованием данных за 2018 г. [15, 16]. Результаты расчета представлены в таблице 2. Здесь, как и в таблице 1, результаты усреднены по полу<sup>3</sup>, а для справки приведены результаты расчетов МКРЗ, представленные в 103-й публикации.

Как видно из таблицы 2, расчеты авторов настоящей работы для номинальной популяции согласуются с данными 103-й публикации МКРЗ с суммарной погрешностью не более 2–3% (и погрешностью для отдельных органов не более 10%)<sup>4</sup>.

Именно коэффициенты риска возникновения ЗНО, рассчитанные для номинальной популяции МКРЗ, лежат в основе вычисления радиационного ущерба, относительного вреда, коэффициентов риска и значений взвешивающих множителей  $W_T$  для органов и тканей с учетом их радиочувствительности.

Таблица 1

**Коэффициенты номинального риска для лиц трудоспособного возраста**

[Table 1

**Nominal risk coefficients for the working age population]**

Орган/ткань* ** [Organ/tissue]**	Коэффициенты номинального риска (случаев на 10 000 человек на 1 Гр) [Nominal risk coefficients (cases per 10,000 persons per Gy)]		
	Собственные расчеты [Own calculations]	152-я публикация МКРЗ [ICRP 152 Publication]	103-я публикация МКРЗ [ICRP 103 Publication]
Пищевод [Oesophagus]	13	13	16
Желудок [Stomach]	63	64	60
Толстая кишка [Colon]	55	55	50
Печень [Liver]	25	25	21
Легкое [Lung]	115	117	127
Молочная железа [Female breast]	65	66	49
Яичник [Ovary]	9	9	7
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	37	38	42
Щитовидная железа [Thyroid]	10	10	9
Костный мозг [Bone marrow]	45	44	23
Другие солидные [Other solid]	98	98	88
Всего [Total]:	535	539	492

\* Названия органов и тканей приводятся в соответствии с русским переводом 103-й публикации МКРЗ [6] [\*the names of organs and tissues are given accordingly the ICRP 103 Publication in Russian translation];

\*\* В таблицу 1 не включены наследственные эффекты, раки поверхности кости и раки кожи, т.к. для них в указанных публикациях МКРЗ не представлены модели и не производились отдельные вычисления [\*\*the table does not include hereditary effects, bone surface cancers, and skin cancers, because specified ICRP publications don't contain any models for these organs/tissues].

<sup>3</sup> В зависимости от целей расчета вклад мужского и женского населения в общую численность можно также учитывать исходя из реальных демографических данных, однако для целей настоящей работы усреднение по полу производилось в соотношении по 50% мужского и женского населения.

<sup>4</sup> Указанные различия (прежде всего, по раку легкого) объясняются изменениями, внесенными в методологию МКРЗ в рамках 152-й публикации [8]. К сожалению, результаты оценки представлены в указанной публикации недостаточно подробно, что не позволило сравнивать результаты нашего расчета напрямую, однако для решения задач настоящего исследования полученная точность оценки более чем достаточна.

Коэффициенты радиационного риска возникновения злокачественных новообразований для всего населения

Таблица 2

[Table 2]

**Nominal risk coefficients for the whole population**

Орган/ткань* [Organ/tissue]	Коэффициенты номинального риска (случаев на 10 000 человек на 1 Гр) [Nominal risk coefficients (cases per 10,000 persons per Gy)]		
	Собственный расчет по данным РФ [Own calculations using Russian population data]	Собственный расчет по данным 152-й публикации МКРЗ [Own calculations using ICRP 152 Publication's data]	Данные 103-й публикации МКРЗ [ICRP 103 Publication's data]
Пищевод [Oesophagus]	9	14	15
Желудок [Stomach]	50	79	79
Толстая кишка [Colon]	41	66	65
Печень [Liver]	15	31	30
Легкое [Lung]	68	104	114
Молочная железа [Female breast]	79	111	112
Яичник [Ovary]	9	11	11
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	24	40	43
Щитовидная железа [Thyroid]	43	32	33
Костный мозг [Bone marrow]	39	142	144
Другие солидные [Other solid]	76	43	42
Всего [Total]:	453	673	688

\* См. примечание к таблице 1 [see note to Table 1]

*Расчет взвешивающих множителей для органов и тканей*

Один из центральных вопросов настоящего исследования заключался в том, насколько чувствительны значения взвешивающих коэффициентов органов и тканей к выбираемым для их расчета половозрастным группам. Значения коэффициентов  $W_T$ , приведенные в 103-й публикации МКРЗ, были получены путем группировки значений относительного вреда, рассчитанных для группы «Все население», с выполнением 2 основных условий:

- усреднение значений по полу и возрасту при облучении;
- отличие коэффициентов относительного вреда для органов, которым приписывалось одинаковое значение коэффициента  $W_T$ , не более чем в 2 раза.

Выбор именно группы «Все население» для установления значений  $W_T$  представляется не бесспорным, поскольку, хотя численность указанной когорты существенно превосходит численность персонала радиационных объектов, состоящего на индивидуальном дозиметрическом контроле, тем не менее, предел дозы, установленный для персонала, существенно выше, чем для населения, что в некотором смысле делает указанную группу населения подверженной более высокому среднему индивидуальному риску, а значит, точность оценки для этой группы имеет достаточно важное гигиеническое значение. В таблице 3 представлены значения коэффициентов  $W_T$  и значения показателей относительного вреда для 4 половозрастных групп населения по данным 103-й пу-

Таблица 3

**Значения относительного вреда и взвешивающих коэффициентов органов и тканей ( $W_T$ )**

[Table 3]

**Relative detriment and tissue weighting factors ( $W_T$ )**

Орган/ткань [Organ/tissue]	Номинальная популяция МКРЗ [ICRP's nominal population]				$W_T$
	Все население [Whole population]	Лица трудоспособного возраста [Working age population]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]	
Пищевод [Oesophagus]	0,023	0,034	0,026	0,020	0,04
Желудок [Stomach]	0,118	0,123	0,120	0,117	0,12
Толстая кишка [Colon]	0,083	0,102	0,138	<b>0,044</b>	0,12
Печень [Liver]	0,046	0,047	0,075	0,026	0,04
Легкое [Lung]	0,157	<b>0,286</b>	0,124	0,182	0,12
Кость [Bone surface]	0,009	0,008	0,011	0,008	0,01

Орган/ткань [Organ/tissue]	Номинальная популяция МКРЗ [ICRP's nominal population]				$W_T$
	Все население [Whole population]	Лица трудоспособного возраста [Working age population]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]	
Кожа [Non-melanoma skin cancer]	0,007	0,006	0,008	0,006	0,01
Молочная железа [Female breast]	0,139	0,077	–	<b>0,240*</b>	0,12
Яичник [Ovary]	0,017	0,016	–	0,030	–**
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,029	0,046	0,036	0,024	0,04
Щитовидная железа [Thyroid]	0,022	<b>0,008</b>	<b>0,010</b>	0,031	0,04
Костный мозг [Bone marrow]	0,107	<b>0,057</b>	0,144	0,080	0,12
Другие солидные [Other solid]	0,198	0,155	<b>0,256</b>	0,155	0,12
Гонады (наследственные заболевания) [Gonads (Heritable)]	0,044	<b>0,036</b>	0,053	<b>0,038</b>	0,08
Головной мозг [Brain]	–	–	–	–	0,01**
Слюнные железы [Salivary glands]	–	–	–	–	0,01**
				Сумма [Total]:	1,00

\* Значение в таблице превышает значение  $W_T$  ровно в 2 раза только благодаря округлению. Без округления различие более чем двукратно [the value in this table is exactly twice the  $W_T$  value only due to rounding. Without rounding, the difference is more than twice];

\*\* В 103-й публикации МКРЗ не приведены значения относительного вреда для головного мозга и слюнных желез, но приведены значения  $W_T$ . Для яичников, напротив, приведены значения относительного вреда, но не приведено значение  $W_T$ . Однако сумма значений  $W_T$  указанных органов составляет всего 2% от общей суммы, и это не оказывает никакого влияния на дальнейшие рассуждения и выводы [the ICRP Publication 103 does not contain relative harm values for the brain and the salivary glands, but contains  $W_T$  values. For ovary, on the contrary, relative harm values is given, but  $W_T$  value is not given. However, the sum of the  $W_T$  values of these organs is only 2% of the total sum, and this does not have any effect on further reasoning and conclusions].

бликации МКРЗ: все население, лица трудоспособного возраста, все мужчины и все женщины. Жирным шрифтом выделены значения показателей относительного вреда, отличающиеся от коэффициентов  $W_T$  более чем вдвое. Между собой внутри одной группы значения относительного вреда отличаются еще больше.

Как видно из таблицы 3, для 3 половозрастных групп условие о не более чем двукратном отличии значений относительного вреда от коэффициентов  $W_T$  нарушается суммарно в 9 случаях. Отличия же значений относительного вреда между собой внутри групп с одинаковым  $W_T$  еще больше (в группе «Трудоспособный возраст» значения относительного вреда для рака легкого и для костного мозга отличаются более чем в 5 раз, хотя им приписывается одинаковое значение  $W_T = 0,12$ ).

Первый вопрос, вставший перед авторами исследования после анализа данных, представленных в таблице 3, заключался в том, можно ли подобрать значения коэффициентов  $W_T$ , которые лучше удовлетворят данным для всех 4 когорт без существенного изменения подхода и без повышения числа значащих цифр коэффициентов  $W_T$ . Положительный ответ на данный вопрос означал бы, что возможно некоторое повышение математической строгости расчета эффективной дозы с тем, чтобы она лучше отвечала своей главной роли как меры риска от воздействия малых доз при неравномерном по телу облучении.

Для решения данной задачи был разработан алгоритм и написана программа [20] в системе Wolfram Mathematica [21], в результате выполнения которой были получены альтернативные значения коэффициентов  $W_T$ , представленные в таблице 4.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании альтернативных значений  $W_T$  лишь 5 значений относительного вреда не будут удовлетворять поставленному условию, при этом в 3 случаях различие будет меньше, чем в таблице 3, а в 1 из 2 оставшихся разницу значений можно увидеть, только увеличив число значащих цифр. Таким образом, полученные значения  $W_T$  значительно точнее удовлетворяют сформулированным условиям.

Тем не менее, была проведена еще одна проверка рассчитанных значений  $W_T$ , чтобы получить ответ на следующий вопрос: какова сумма модулей разности между показателем относительного вреда и соответствующим взвешивающим множителем для всех 4 половозрастных групп и для суммы органов в целом. Результаты этой проверки представлены в таблице 5.

В таблице 5, как и прежде, жирным шрифтом выделены худшие значения в каждой паре. Как видно, альтернативные значения  $W_T$  существенно ближе к значениям относительного вреда для каждой половозрастной группы как по сумме, так и по количеству органов. Лишь 2–3 значения (в основном, для ЗНО желудка, мочевого пузыря и

Таблица 4

Альтернативные значения взвешивающих коэффициентов для органов и тканей  $W_T$ , рассчитанные в рамках настоящего исследования

[Table 4]

Alternative tissue weighting factors values  $W_T$ , obtained in this study

Орган/ткань [Organ/tissue]	$W_T$	$W_T$	Значения относительного вреда для номинальной популяции МКРЗ [Relative detriment values for ICRP's nominal population]			
			Все население [Whole population]	Лица трудоспособного возраста [Working age population]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]
Пищевод [Oesophagus]	0,04	0,02	0,023	0,034	0,026	0,020
Желудок [Stomach]	0,12	0,11	0,118	0,123	0,120	0,117
Толстая кишка [Colon]	0,12	0,11	0,083	0,102	0,138	<b>0,044</b>
Печень [Liver]	0,04	0,04	0,046	0,047	0,075	0,026
Легкое [Lung]	0,12	0,19	0,157	0,286	0,124	0,182
Кость [Bone surface]	0,01	0,01	0,009	0,008	0,011	0,008
Кожа [Non-melanoma skin cancer]	0,01	0,01	0,007	0,006	0,008	0,006
Молочная железа [Female breast]	0,12	0,11	0,139	0,077	–	<b>0,240</b>
Яичник [Ovary]	–*	0,02	0,017	0,016	–	0,030
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,04	0,02	0,029	<b>0,046</b>	0,036	0,024
Щитовидная железа [Thyroid]	0,04	0,02	0,022	<b>0,008</b>	<b>0,010</b>	0,031
Костный мозг [Bone marrow]	0,12	0,11	0,107	0,057	0,144	0,080
Другие солидные [Other solid]	0,12	0,19	0,198	0,155	0,256	0,155
Гонады (наследственные заболевания) [Gonads (Heritable)]	0,08	0,04	0,044	0,036	0,053	0,038
Головной мозг [Brain]	0,01*	–	–	–	–	–
<b>Слюнные железы [Salivary glands]</b>	0,01*	–	–	–	–	–
<b>Сумма [Total]:</b>	1,00	1,00				

\* См. Примечание \*\* к таблице 3 [see the note \*\* to Table 3].

Таблица 5

Сравнительная оценка отклонения значений относительного вреда от взвешивающих множителей органов и тканей, вычисленных по данным 103-й публикации МКРЗ и полученных в ходе выполнения данной работы\*

[Table 5]

Comparative assessment of the deviation of relative harm values from the tissue weighting factors calculated according to the ICRP's 103rd publication and those obtained in this study\*

Орган/ткань [Organ/tissue]	Все когорты [All age groups]		Все население [Whole population]		Трудоспособные [Working age population]		Мужчины [All males]		Женщины [All females]	
	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]
Пищевод [Oesophagus]	<b>0,057</b>	0,023	<b>0,017</b>	0,003	0,006	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	0,006	<b>0,020</b>	0,000
Желудок [Stomach]	0,009	<b>0,037</b>	0,002	<b>0,008</b>	0,003	<b>0,013</b>	0,000	<b>0,010</b>	0,003	<b>0,007</b>
Толстая кишка [Colon]	<b>0,149</b>	0,129	<b>0,037</b>	0,027	<b>0,018</b>	0,008	0,018	<b>0,028</b>	<b>0,076</b>	0,066
Печень [Liver]	0,062	0,062	0,006	0,006	0,007	0,007	0,035	0,035	0,014	0,014
Легкое [Lung]	<b>0,269</b>	0,203	<b>0,037</b>	0,033	<b>0,166</b>	0,096	0,004	<b>0,066</b>	<b>0,062</b>	0,008
Кость [Bone surface]	0,006	0,006	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002

Орган/ткань [Organ/tissue]	Все когорты [All age groups]		Все население [Whole population]		Трудоспособные [Working age population]		Мужчины [All males]		Женщины [All females]	
	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]
Кожа [Non-melanoma skin cancer]	0,012	0,012	0,003	0,003	0,004	0,004	0,002	0,002	0,004	0,004
Молочная железа [Female breast]	0,302	0,302	0,019	<b>0,029</b>	<b>0,043</b>	0,033	<b>0,120</b>	0,110	0,120	<b>0,130</b>
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,037	<b>0,055</b>	<b>0,011</b>	0,009	0,006	<b>0,026</b>	0,004	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>	0,004
Щитовидная железа [Thyroid]	<b>0,089</b>	0,035	<b>0,018</b>	0,002	<b>0,032</b>	0,012	<b>0,030</b>	0,010	0,009	<b>0,011</b>
Костный мозг [Bone marrow]	<b>0,140</b>	0,120	<b>0,013</b>	0,003	<b>0,063</b>	0,053	0,024	<b>0,034</b>	<b>0,040</b>	0,030
Другие солидные [Other solid]	<b>0,284</b>	0,144	<b>0,078</b>	0,008	0,035	0,035	<b>0,136</b>	0,066	0,035	0,035
Гонады (наследственные заболевания) [Gonads (Heritable)]	<b>0,149</b>	0,022	<b>0,036</b>	0,004	<b>0,044</b>	0,004	<b>0,027</b>	0,013	<b>0,042</b>	0,002
Сумма [Total]:	<b>1,565</b>	1,151	<b>0,278</b>	0,135	<b>0,428</b>	0,305	<b>0,415</b>	0,396	<b>0,444</b>	0,314

\* Значения для яичников, головного мозга и слюнных желез в таблице не приводятся, т.к. не могут быть вычислены. См. примечание \*\* к таблице 3 [values for the ovary, brain and salivary glands are not given in the table, because they can't be calculated. See note \*\* to Table. 3].

молочной железы), полученных в результате нашего расчета, против 6–7 у МКРЗ в каждой половозрастной группе отличаются в худшую сторону (исключение составляет группа «Все мужчины», для которой результаты расчетов с использованием альтернативных тканевых множителей лишь немногим лучше, чем при использовании тканевых множителей, рекомендованных МКРЗ). При этом для группы «Все население» суммарная разница значений более чем двукратна.

Представленный подход к расчету значений взвешивающих коэффициентов органов и тканей с учетом их радиочувствительности показал, что даже незначительные изменения в расчете эффективной дозы позволяют достичь примерно в полтора раза более математически строгого результата при ее использовании в качестве меры риска при неравномерном облучении в различных половозрастных группах населения. Полученные результаты представляют определенный теоретический интерес и были призваны коротко продемонстрировать потенциал для возможных усовершенствований используемой методологии оценки радиационного ущерба, дабы заложить прочное основание дальнейших исследований.

#### Величина радиационного ущерба МКРЗ

Коллективная эффективная доза облучения, как было сказано выше, используется в качестве меры коллектив-

ного радиационного риска с учетом различий в видах и геометриях облучения, а также в радиочувствительности органов, тканей и систем организма. Показателем же риска, значение которого рассчитывается на основании эффективной дозы, является величина радиационного ущерба. Единица измерения радиационного ущерба рассчитывается на основе оценки пожизненной вероятности возникновения радиационно-индуцированного онкологического заболевания (или наследственного эффекта) на единицу дозы облучения и представляет собой 1 случай взвешенного по среднему сокращению продолжительности жизни смертельного онкологического заболевания или приравненного к нему несмертельного заболевания, взвешенного с учетом его тяжести.

Радиационный ущерб для конкретного органа/ткани рассчитывается по формуле [8]:

$$D=R(k+q(1-k))I, \quad (1)$$

где  $D$  – радиационный ущерб для здоровья;  
 $R$  – коэффициент номинального риска (возникновения ЗНО);

$I$  – множитель, выражающий отношение среднего числа лет здоровой жизни, потерянных вследствие возникновения рака конкретной локализации (при облучении конкретного органа/ткани), к среднему числу лет здоровой жизни, потерянных вследствие всех ЗНО;

$k$  – доля летальности конкретного ЗНО;

$q$  – множитель, отражающий степень тяжести онкологического заболевания.

По сути в формуле (1) при внесении  $R$  в скобки произведение  $R \times k$  выражает риск возникновения смертельного ЗНО, а  $R \times (1-k) \times q$  – риск нелетального рака, умноженный на коэффициент  $q$  (меньше 1), отражающий степень тяжести нелетального заболевания. Полученное таким образом выражение представляет собой радиационный вред для конкретного заболевания, а при умножении на  $l$  получается значение относительного вреда конкретного ЗНО, т.е. с его помощью происходит взвешивание между собой различных ЗНО по числу потерянных лет жизни.

Наиболее дискуссионным здесь представляется подход к вычислению множителя  $q$ , отражающего степень тяжести заболевания. Он вычисляется по следующей формуле:

$$q = k + q_{\min} (1 - k), \quad (2)$$

где  $k$  – доля летальности ЗНО;

а  $q_{\min}$  – определенный экспертно минимальный вес для несмертельных ЗНО (для большинства ЗНО его значение принято равным 0,1, для рака кожи – 0, для рака щитовидной железы – 0,2).

Как видно из формулы (2), единственная характеристика ЗНО, учитываемая при определении степени тяжести заболевания, – это доля его летальности. Это не вполне согласуется с позицией МКРЗ, выраженной следующим образом: «(А 144) *Вред по снижению качества жизни*. Больные раком обычно ощущают ухудшение качества своей жизни. Таким образом, Комиссия считает, что рак должен оцениваться не только по летальности, но и по боли, страданиям и любым побочным эффектам лечения рака» [6]. Именно для решения этой задачи и вводится коэффициент  $q_{\min}$ , но, как видно, определяется он довольно субъективно. А главное, подобный подход к оценке тяжести заболеваний не используется при характеристике рисков иной природы. При этом более объективный показатель (множитель  $l$  в формуле (1)) используется при взвешивании показателей вреда и тоже косвенно участвует в определении степени популяционного урона, связанного с риском возникновения конкретного заболевания, вызванного воздействием ионизирующего излучения.

#### *Оценка числа потерянных лет здоровой жизни*

Причина описанного выше подхода к оценке вклада несмертельных заболеваний в суммарный радиационный ущерб заключается в том, что концепция оценки тяжести заболеваний на основе показателей летальности была разработана к моменту выхода 60-й публикации МКРЗ, т.е. за несколько лет до разработки более универсальной методологии оценки тяжести различных нарушений здоровья в рамках проекта ГББ. Продолжение же использования данной концепции после выхода 103-й публикации МКРЗ [5, 6] объясняется некоторой инертностью международной системы радиационной защиты. Однако возможность изменения действующих подходов уже рассматривается в рамках 152-й публикации МКРЗ [8] и в публикациях 102-й рабочей

группы МКРЗ [9–11]. Пророческими в этом смысле стали слова П.В. Рамзаева: «В реализации этого самого высокого закона жизни – взвешивания пользы и вреда, в отличие от Фемиды, врачи должны с открытыми глазами видеть обе чаши весов, на которые кладется величина здоровья народа. Самой надежной единицей ее измерения, отражающей все разнообразие болезней, оказался год (время) полноценной жизни. В ней учитывается и работоспособность, и самочувствие, и воспроизводство потомства. Эта величина и будет использоваться далее в расшифровке риска, вреда и пользы радиации, сопоставления ее с другими факторами риска, которыми, к несчастью, весьма «богата» жизнь человека» [22].

Реализация данной идеи стала возможной благодаря развитию в рамках проекта ГББ системы показателей популяционного здоровья [2, 3]. В настоящей работе в качестве меры радиационного риска был выбран показатель DALY<sup>5</sup>, т.е. показатель, отражающий число потерянных лет здоровой жизни. В зависимости от целей оценки риска похожим образом возможно применение и других обобщенных показателей популяционного здоровья.

Показатель DALY в наиболее общем виде можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$DALY = YLL + YLD, \quad (3)$$

где YLL – число лет, потерянных вследствие преждевременной смерти;

YLD – число лет, прожитых в состоянии «неполного здоровья», взвешенных по степени тяжести заболевания.

В рамках настоящей статьи мы не будем подробно останавливаться на описании методических подходов к оценке тяжести заболеваний. Важно лишь то, что данные подходы широко используются при оценке популяционного здоровья с использованием показателя DALY как в России, так и за рубежом, и применение данного показателя постоянно растет [23–26].

Как видно из такого определения, показатель DALY может использоваться для оценки негативного вклада в состояние популяционного здоровья различных заболеваний или причин смерти, в том числе и вызванных воздействием вредных факторов. Нами были рассчитаны значения DALY на единицу дозы облучения различных органов, тканей и систем организма с использованием медико-демографических показателей российской популяции для нескольких половозрастных групп населения. Результаты расчетов представлены в таблице 6.

Как видно из таблицы 6, усредненные по полу значения коэффициентов риска  $DALY \times Gr^{-1}$  приблизительно равны 0,5 года<sup>6</sup> для группы «Все население»; 0,9 года для группы «Дети и подростки» и 0,45 года для группы «Лица трудоспособного возраста».

Полученные значения DALY существенно меньше значений, получаемых для номинальных популяций МКРЗ, что хорошо согласуется с результатами сравнительной оценки риска для российской и номинальной популяций, выполненной в рамках [12]. Анализ причин упомянутых отличий показал, что основной вклад в уменьшение риска вносит

<sup>5</sup> Disability-adjusted life years (англ. – годы жизни, взвешенные по нетрудоспособности).

<sup>6</sup> Здесь и далее важно помнить, что единицей измерения DALY является потерянный год здоровой жизни, взвешенный с учетом утраты трудоспособности [Here and below, it is important to remember that the unit of measure for DALY is the year of healthy life lost, weighted by disability].

Значения показателя DALY на 1 Гр поглощенной дозы в органе или ткани, вычисленные для российской популяции, лет [Table 6]

Орган/ткань [Organ/tissue]	Половозрастная группа населения [Age group of population]					
	Все население [Whole population]		Дети и подростки (0–17 лет) [Children]		Лица трудоспособного возраста (18–64 лет) [Working age population]	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
Пищевод [Oesophagus]	0,012	0,010	0,016	0,009	0,011	0,012
Желудок [Stomach]	0,055	0,085	0,119	0,21	0,041	0,068
Толстая кишка [Colon]	0,045	0,025	0,09	0,056	0,036	0,021
Печень [Liver]	0,042	0,020	0,094	0,049	0,03	0,016
Легкое [Lung]	0,059	0,094	0,06	0,109	0,064	0,105
Молочная железа у женщин [Female breast]	–	0,101	–	0,325	–	0,061
Яичник [Ovary]	–	0,018	–	0,042	–	0,016
Мочевой пузырь [Bladder]	0,012	0,009	0,02	0,016	0,011	0,009
Щитовидная железа [Thyroid]	0,003	0,014	0,011	0,056	0,001	0,005
Другие солидные ЗНО [Other solid]	0,030	0,036	0,073	0,098	0,02	0,026
Красный костный мозг [Bone marrow]	0,124	0,113	0,149	0,131	0,127	0,124
Поверхность кости [Bone]*	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Головной мозг* [Brain]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Слюнные железы* [Salivary glands]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Кожа [Skin]*, **	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Наследственные заболевания [Gonads]*	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Всего [Total]	0,43	0,56	0,68	1,11	0,39	0,50

\* Для указанных локализаций использованы оценки числа потерянных лет жизни из 103-й публикации МКРЗ для группы «Все население», что не оказывает значимого влияния на конечный результат и выводы [\* for these localizations, estimates of the number of years of life lost from the ICRP Publication 103 for the “whole population” group were used. It doesn't significantly affect the final result and conclusions];

\*\* За исключением меланомы [\*\* excepting melanoma skin cancers].

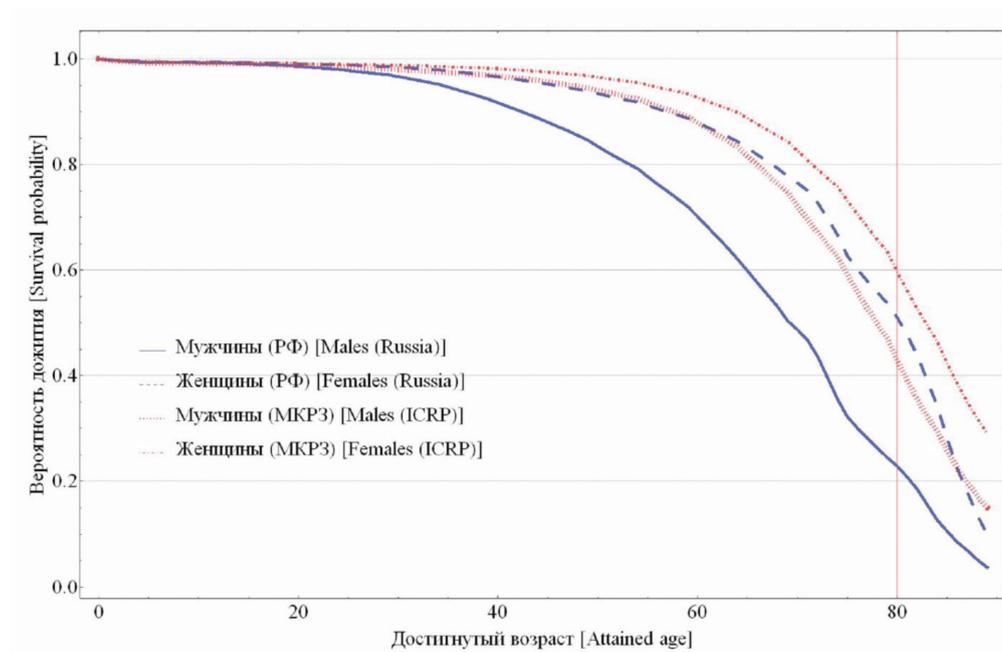
меньшая ожидаемая продолжительность жизни в российской популяции, особенно среди мужчин (рис.). Т.е. возникающие в российской популяции радиационно-индуцированные ЗНО реже успевают становиться причиной смерти.

Последний вопрос, ответ на который мы попытались получить в рамках настоящей работы, заключался в том, насколько сильно значения «относительного вреда» (т.е. доля вклада вреда для отдельных органов или тканей в общий вред), рассчитанные на основе DALY, отличаются от значений взвешивающих коэффициентов  $W_T$ , рекомендованных МКРЗ. Т.е. нас интересовал ответ на вопрос, можно ли использовать рассчитанные ранее значения коллективной эффективной дозы для грубой оценки числа потерянных лет здоровой жизни в российской популя-

ции в результате воздействия ионизирующих излучений. Результаты оценки представлены в таблице 7.

Как видно из таблицы 7, ни для одного органа или ткани не нарушается требование о не более чем двукратном отличии относительного вреда от значения соответствующего коэффициента  $W_T$ . Это свидетельствует о том, что коллективная эффективная доза может использоваться для грубой оценки числа потерянных вследствие облучения лет здоровой жизни.

Представленные в настоящей статье результаты показывают, что развитие методологии оценки радиационного ущерба с использованием современных обобщенных показателей популяционного здоровья открывает широкие возможности для более полной оценки рисков для здоровья, связанных с воздействием ионизирующих излучений.



**Рис.** Вероятность дожития от рождения до заданного возраста в различных популяциях  
**[Fig.** Probability of surviving from birth to a given age in different populations]

Таблица 7

**Значения взвешивающих коэффициентов ( $W_T$ ) для органов и тканей, используемые для расчета эффективной дозы, и значения относительной радиочувствительности, рассчитанные с помощью показателя DALY на единицу дозы облучения для группы «Все население», вычисленные для российской популяции, отн. ед.**

[Table 7]

**ICRP's tissue's weighting factors ( $W_T$ ) and relative radiosensitivity values, calculated as a part of total DALY for the group "whole population" using Russian population data, rel. unit]**

Локализация [Tissue]	$W_T$	Относительная радиочувствительность органа или ткани в суммарной оценке DALY [Relative DALY for tissue]
Пищевод [Oesophagus]	0,04	0,02
Желудок [Stomach]	0,12	0,14
Толстая кишка [Colon]	0,12	0,07
Печень [Liver]	0,04	0,06
Легкое [Lung]	0,12	0,16
Молочная железа [Female breast]	0,12	0,10
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,04	0,02
Щитовидная железа [Thyroid]	0,04	0,02
Другие солидные ЗНО [Other solid malignant neoplasms]	0,12	0,07
Красный костный мозг [Leukaemias]	0,12	0,24
Поверхность кости [Bone]	0,01	0,01
Головной мозг и ЦНС [Brain]	0,01	0,01
Слюнные железы [Salivary glands]	0,01	0,01
Рак кожи, за исключением меланомы [Non-melanoma skin cancer]	0,01	0,01
Наследственные заболевания [Hereditary diseases]	0,08	0,06

**Выводы**

1. Величина DALY может использоваться в качестве меры риска для здоровья человека, связанного с воздействием ионизирующих излучений.
2. Радиационный ущерб для здоровья можно оценивать с помощью показателя DALY. Данный показатель об-

ладает существенно большей универсальностью при решении задач сравнительного анализа рисков различной природы, чем используемый в настоящее время показатель радиационного ущерба МКРЗ.

3. Эффективная доза может использоваться для грубой предварительной оценки числа потерянных вслед-

ствии облучения лет здоровой жизни в качестве меры радиационного риска для здоровья в различных половозрастных группах населения Российской Федерации.

4. Число потерянных лет здоровой жизни на 1 чел. -Зв коллективной эффективной дозы (при облучении в малых дозах и/или с малой мощностью дозы) для группы «Все население» по российским медико-демографическим данным оценивается приблизительно в 0,5 года.

5. Пожизненные риски возникновения онкологических заболеваний на единицу дозы облучения в Российской Федерации примерно в полтора раза ниже, чем оцененные аналогичным образом риски в номинальной популяции МКРЗ.

6. Указанные различия еще больше (примерно в 1,75 раза) при оценке радиационного риска с помощью величины DALY.

7. Методология расчета зависимости DALY от дозы облучения для российской популяции нуждается в дальнейшем усовершенствовании.

8. Методика расчета эффективной дозы может быть скорректирована с учетом ее изначального назначения для использования в качестве меры риска при неравномерном облучении органов, тканей и систем организма.

#### Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовке данной статьи.

#### Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения отраслевой НИР «Разработка и научное обоснование прикладных методов оценки радиационных рисков для здоровья населения при различных ситуациях и сценариях облучения на основе современных подходов к оценке радиационного ущерба».

#### Литература

1. Рамзаев П.В., Либерман А.Н. Принцип взвешивания «польза-вред» и его применение в радиационной гигиене // Сб. трудов «Радиационная гигиена». – Л.: ЛНИИРГ, 1982. С. 22–29.
2. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин В.С. О гармонизации показателей радиационного риска для здоровья и риска от воздействия иных вредных факторов на основе оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Анализ риска здоровью. 2022. № 1. С. 170–183. DOI 10.21668/health.risk/2022.1.18.
3. Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Repin V.S. On harmonization of health risk indicators caused by ionizing radiation exposure and other harmful factors based on DALY estimates // Health Risk Analysis. 2022. No 1. P. 162–175. DOI 10.21668/health.risk/2022.1.18.eng.
4. Публикация 60 МКРЗ, часть 1, 61 МКРЗ. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Пер. с англ. Т.Д. Кузьминой; под ред. И.Б. Кеирим-Маркуса. М.: Энергоатомиздат, 1994. 192 с.
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4. 332 p.
6. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. Пер. с англ. И.А. Гусева; под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М.: ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
7. United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic

- Radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly with scientific annexes. New York, N.Y.: United Nations, 2017.
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // Annals of the ICRP. 2022. Vol. 51, No 3. 103 p.
9. Ban N., Cléro E., Vaillant L., et al. Radiation detriment calculation methodology: summary of ICRP Publication 152 // Journal of Radiological Protection. 2022. Vol. 42, № 2. DOI: 10.1088/1361-6498/ac670d.
10. Cléro E., Vaillant L., Hamada N., et al. History of radiation detriment and its calculation methodology used in ICRP Publication 103 // Journal of Radiological Protection. 2019. Vol. 39, № 3. P. R19–R36. DOI: 10.1088/1361-6498/ab294a.
11. Zhang W., Laurier D., Cléro E., et al. Sensitivity analysis of parameters and methodological choices used in calculation of radiation detriment for solid cancer // International Journal of Radiation Biology. 2021. Vol. 96, № 5. P. 596–605. DOI: 10.1080/09553002.2020.1708499.
12. Горский А.И., Чекин С.Ю., Максютов М.А., и др. Эффект переноса моделей радиационного риска МКРЗ на популяцию РФ // Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 4. С. 5–15. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
13. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., и др. Исследование влияния неопределённости фоновых показателей заболеваемости на прогноз радиационных рисков по моделям МКРЗ для российских популяций при однократном облучении // Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 3. С. 40–56.
14. Mathers C.D. History of global burden of disease assessment at the World Health Organization // Archives of Public Health. 2020, Vol. 78. DOI: 10.1186/s13690-020-00458-3.
15. Витрина статистических данных. URL: <https://showdata.gks.ru/finder/> (Дата обращения: 10.11.2022).
16. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность). Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой М.: МНИОИ им. П.А. Герцена филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. 250 с.
17. Shimada K., Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, № 4. P. 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
18. Злокачественные новообразования в Санкт-Петербурге и других административных территориях Северо-Западного федерального округа России (заболеваемость, смертность, контингенты, выживаемость больных). Под ред. проф. А.М. Беляева, проф. Г.М. Манихаса, проф. В.М. Мерабишвили. СПб, 2016. 208 с.
19. Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681915. Анализ пожизненных рисков возникновения радиационно-индуцированных раков в зависимости от пола и возраста при облучении у населения Российской Федерации по модели МКРЗ: № 2021681461: заявл. 22.12.2021; опублик. 27.12.2021.
20. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Репин В.С., Библин А.М. Реализация альтернативного метода определения значений взвешивающих множителей для тканей и органов при расчете эффективной дозы. Хроническое радиационное воздействие: отдаленные медико-биологические эффекты: материалы VII науч. конф. с междунар. участием, 6–8 декабря 2022 [сетевое научное издание] / Редкол.: А.В. Аклеев (отв. ред.) и др. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2022. С.129–130.
21. Ахматдинов Р.Р., Репин В.С., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668256 Российская Федерация. Расчет коэффициентов радиочувствительности: № 2022667643: заявл. 29.09.2022; опублик. 04.10.2022; заявитель Федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

22. Рамзаев П.В. Риск реальный и мнимый // Сб. трудов «Радиационная гигиена». Л.: ЛНИИРГ, 1990. С. 7–19.
23. Кондрова Н.С., Шайхлисламова Э.Р., Ларионова Т.К., и др. Потерянные годы здоровой жизни вследствие профессиональных заболеваний у работников сельского хозяйства // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101, № 1. С. 53-61. – DOI 10.47470/0016-9900-2022-101-1-53-61.
24. Thomsen S.T., Jakobsen L.S., Redondo H.G., et al. Burden of Disease of Dietary Exposure to Four Chemical Contaminants in Denmark, 2019 // Exposure and Health. 2022. Vol. 14. P. 871-883. DOI: 10.1007/s12403-022-00461-9.
25. Павлова С.С., Корнеев А.А., Дворянчиков В.В., и др. Оценка потерь здоровья населения в результате назальной обструкции на основе концепции глобального бремени болезни: общие подходы и направления исследований // Медицинский совет. 2021. № 12. С. 138-145. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-12-138-145.
26. Velders G.J.M., Maas R.J.M., De Leeuw F.A.A.M., et al. Effects of European emission reductions on air quality in the Netherlands and the associated health effects // Atmospheric Environment. 2020. Vol. 221. P. 117109. DOI 10.1016/j.atmosenv.2019.117109.

Поступила: 07.02.2023 г.

**Репин Леонид Викторович** – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: leonid\_repin@mail.ru

**Для цитирования:** Репин Л.В. Оценка радиационного ущерба для здоровья: о возможности использования эффективной дозы для расчета числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 52-65. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-52-65

## Radiation detriment estimation: on the possibility of effective dose usage to assess the number of years of the healthy life lost

Leonid V. Repin

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

*The Russian Law “On Radiation Safety of the Population” defines the effective dose as “the amount of exposure to ionizing radiation used as a measure of the risk of long-term consequences of human’s body exposure...” In turn, the Russian “Radiation Safety Standards” (RSS 99/2009) establish a procedure for assessing the health risk, associated with exposure to low doses, for two types of harmful effects (oncological diseases and hereditary effects) and two age and sex groups (“whole population” and “adults”) by multiplying corresponding linear risk coefficients per effective dose. At the same time, these documents do not impose restrictions on the risk assessment procedure, without excluding the use of any other risk indicators or risk assessment for other sex and age groups of the population. The value of radiation detriment to health, calculated by the method described in RSS 99/2009 to characterize the risk, as a unit of measurement, uses the fatal oncological disease caused by exposure to ionizing radiation, weighted by the number of years of life lost, or weighted by the severity of non-fatal cancer. Currently, mortality-based health measures are considered insufficiently informative characteristics of the impact of external factors on population health. Such indicators are poorly suited for a comparative analysis of risks, especially taking into account the different distribution of negative consequences over time. The paper presents an applied approach to expand the application of the radiation risk assessment methodology, without making significant changes to the established practice of radiation protection. The possibility of using the DALY value (disability-adjusted life years) as a measure of radiation risk is being considered; the expediency of changing approaches to calculating the effective dose (by using different values of weighting factors for tissues and organs during effective dose calculation for different age and sex groups of the population) and the possible scope of the proposed approaches to risk assessment in practice are discussed; an approach is proposed for calculating the DALY value using the effective dose and the corresponding risk factors ( $DALY \times Sv^{-1}$ ).*

**Key words:** radiation risk, radiation detriment, harm to health, DALY, risk measure, population health, risk indicator.

**Leonid V. Repin**

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

**Address for correspondence:** Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: leonid\_repin@mail.ru

References

- Ramzaev PV, Liberman AN. The principle of weighing "benefit-harm" and its application in radiation hygiene. Proceedings "Radiation hygiene". Leningrad: LNIIRG; 1982. P. 22-29. (In Russian).
- Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Repin VS. On harmonization of health risk indicators caused by ionizing radiation exposure and other harmful factors based on DALY estimates. *Analiz riska zdorovyu = Health Risk Analysis*. 2022; 1: 170–183. DOI: 10.21668/health.risk/2022.1.18 (In Russian).
- Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Repin VS. On harmonization of health risk indicators caused by ionizing radiation exposure and other harmful factors based on DALY estimates. *Analiz riska zdorovyu = Health Risk Analysis*. 2022; 1:162-175. DOI 10.21668/health.risk/2022.1.18.eng.
- The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP* (1-3). Pergamon Press; 1991. 202 p.
- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 332.
- Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP): trans. from English. Eds.: M.F. Kiselyov, N.K. Shandala. Moscow, LLC PKF "Alana"; 2009. 312 p. (In Russian).
- United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly with scientific annexes. New York, N.Y.: United Nations; 2017.
- Radiation detriment calculation methodology. ICRP. ICRP Publication 152. 2022. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3): 103.
- Ban N, Cléro E, Vaillant L, Zhang W, Hamada N, Preston D, et al. Radiation detriment calculation methodology: summary of ICRP Publication 152. *Journal of Radiological Protection*. 2022;42(2). doi: 10.1088/1361-6498/ac670d.
- Cléro E, Vaillant L, Hamada N, Zhang W, Preston D, Laurier D, et al. History of radiation detriment and its calculation methodology used in ICRP Publication 103. *Journal of Radiological Protection*. 2019;39(3): R19-R36. doi: 10.1088/1361-6498/ab294a.
- Zhang W, Laurier D, Cléro E, Hamada N, Preston D, Vaillant L, et al. Sensitivity analysis of parameters and methodological choices used in calculation of radiation detriment for solid cancer. *International Journal of Radiation Biology*. 2020;96(5): 596-605. DOI: 10.1080/09553002.2020.1708499.
- Gorski AI, Chekin SYu, Maksyutov MA, Menyaylo AN, Korelo AM, Tumanov KA, et al. Transfer of ICRP models of radiation risk to the population of the Russian Federation. "Radiation and Risk" *Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry*. 2019;28(4): 5–15. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
- Ivanov VK, Chekin SYu, Kashcheev VV, Maksyutov MA, Korelo AM, Menyaylo AN. Effect of uncertainty of baseline incidence rates on estimating radiation risks with ICRP models for Russian populations following single exposure to radiation. "Radiation and Risk" *Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry*. 2013;22(4): 40-56.
- Mathers CD. History of global burden of disease assessment at the World Health Organization. *Archives of Public Health*. 2020;78(1). DOI: 10.1186/s13690-020-00458-3.
- Federal state statistics service, Showcase of statistical data. URL: <https://showdata.gks.ru/report/278932> (Accessed 10.11.2022). (In Russian).
- Malignant tumors in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Moscow; 2019. 250 p. (In Russian).
- Shimada K, Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
- Belyaev AM, Manikhas GM, Merabishvili VM. Malignant tumors in St. Petersburg and other administrative territories of the North-West Federal District of Russia (morbidity, mortality, prevalence rate, survival). *Express informatio*. Second Issue. Saint-Petersburg; 2016; 208 p. (In Russian).
- Analysis of lifetime risks of radiation-induced cancers depending on sex and age at exposure for Russian population according to the ICRP model. Certificate of state registration of the computer program, no. 2021681461 to 27.12.2021.
- Repin LV, Akhmatdinov RR, Repin VS, Biblin AM. Implementation of alternative method of tissue weighting factors specification for effective dose calculation. In: A.V. Akleyev et al. (eds.) *Chronic Radiation Exposure: late medical and biological effects Proceedings of the 7 th Scientific Conference with International Participation, 6–8 December 2022, Chelyabinsk: Chelyabinsk State University Publishing House; 2022. P.129-130 (In Russian)*.
- Radiosensitivity coefficients calculation. Certificate of state registration of the computer program, no. 2022667643 to 04.10.2022.
- Ramzaev PV. Risk real and imaginary. Proceedings "Radiation hygiene". Leningrad: LNIIRG; 1990. P. 7–19 (In Russian).
- Kondrova NS, Shaykhlislamova ER, Larionova TK, Stepanov EG, Frants MV, Simonova NI. Disability-adjusted life years due to occupational diseases in agriculture workers. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2022;101(1): 53–61. DOI 10.47470/0016-9900-2022-101-1-53-61 (In Russian).
- Thomsen ST, Jakobsen LS, Redondo HG, Outzen M, Fagt S, Devleeschauwer B, et al. Burden of Disease of Dietary Exposure to Four Chemical Contaminants in Denmark, 2019. *Exposure and Health*. 2022;14(4): 871-883. DOI: 10.1007/s12403-022-00461-9.
- Pavlova SS, Korneenkov AA, Dvoryanchikov VV, Ryazantsev SV, Ryazantseva ES, Donskaya OS. Assessment of population health losses due to nasal obstruction based on the concept of the global burden of disease: general approaches and research directions. *Meditsinskiy sovet = Medical Council*. 2021;(12): 138-145. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-12-138-145 (In Russian).
- Velders GJM, Maas RJM, Geilenkirchen GP, de Leeuw FAAM, Ligterink NE, Ruysenaars P, et al. Effects of European emission reductions on air quality in the Netherlands and the associated health effects. *Atmospheric Environment*. 2020;221: 117109. DOI 10.1016/j.atmosenv.2019.117109.

Received: February 07, 2023

**For correspondence: Leonid V. Repin** – Junior Researcher, Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: leonid\_repin@mail.ru)

**For citation: Repin L.V. Radiation detriment estimation: on the possibility of effective dose usage to assess the number of years of healthy life lost. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 52-65. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-52-65**