

Применение различных показателей радиационного риска при медицинском облучении

Репин Л.В.¹, Библин А.М.¹, Водоватов А.В.^{1,2}, Ахматдинов Р.Р.¹

¹ 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

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

В последние годы были утверждены несколько методических документов и опубликован ряд научных статей, касающихся оценки радиационных рисков, связанных с медицинским облучением. Оценка риска производится с использованием различных количественных и качественных показателей риска, при этом зачастую не раскрыт вопрос их корректного применения с учетом специфики конкретной ситуации облучения для решения прикладных задач в области управления рисками. Цель исследования – разработка схемы и обоснование метода выбора и применения показателей радиационного риска, связанного с проведением медицинских диагностических рентгенодиагностических процедур в зависимости от цели оценки риска, вида и параметров проведения процедуры, пола и возраста пациента и иных факторов. Материалы и методы: Выполнен анализ показателей радиационного риска на основе обзора литературных источников, сравнительного анализа определений и методов вычисления. Результаты исследования и обсуждение: Проанализированы основные показатели радиационного риска и их область применения; обоснован перечень показателей, рекомендуемых для решения прикладных задач при медицинском диагностическом облучении; предложена качественная шкала уровней риска и схема выбора показателей. Заключение: Разработанный подход позволяет согласовать выбор показателя риска с целью оценки, адресатом информации, дозовой нагрузкой и доступностью исходных данных.

Ключевые слова: радиационный риск, радиационный ущерб, медицинское облучение, оценка риска, стохастические эффекты, малые дозы.

Введение

Стремительное развитие в последние годы методов медицинской диагностики и лечения с использованием источников ионизирующего излучения (ИИ), привело к необходимости развития методологии оценки радиационных рисков, связанных с проведением рентгенодиагностических процедур (РРП).

Необходимость оценки радиационного риска при медицинском диагностическом облучении обусловлена следующими факторами: обоснование проведения РРП для отдельного пациента или группы пациентов со схожими патологическими состояниями должно основываться на сравнении ущерба для здоровья за счет проведения РРП (т.е. радиационного риска) с иными рисками нерадиационной природы, например с рисками ухудшения здоровья или смерти вследствие непроведения необходимой диагностики; оптимизация радиационной защиты пациентов должна проводиться после подтверждения эффективности снижения уровней облучения пациентов и оценки экономической эф-

фективности проводимых мероприятий, в том числе на основе оценки радиационных рисков; в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации¹, пациента или его законных представителей обязаны информировать о возможных вредных последствиях для здоровья вследствие выполнения РРП.

Одной из особенностей процедуры оценки рисков является возможность использования различных количественных показателей на этапе характеристики рисков [1-6], МР 2.6.1.0215-20². В настоящей статье представлены рекомендации по выбору, назначению и корректному применению различных показателей радиационного риска, связанного с проведением РРП.

Стандартная схема оценки рисков для здоровья включает четыре основных этапа [7]:

1. Идентификация опасности.
2. Оценка зависимости «экспозиция-ответ» («доза-эффект»).
3. Оценка экспозиции вредного фактора (дозы облучения).
4. Характеристика рисков.

¹ Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ (ред. от 18.03.2023) «О радиационной безопасности населения» [Federal Law No. 3-FZ dated 09.01.1996 (ed. 18.03.2023) "On Radiation Safety of the Public" (In Russ.)]

² Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований: Методические рекомендации МР 2.6.1.0215-20. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 21.09.2020. [Radiation risk assessment for patients undergoing X-ray radiological examinations. Guidelines MR 2.6.1.0215-20. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 21.09.2020. (In Russ.)]

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: l.repin@niirg.ru

Основную опасность, связанную с воздействием средних и малых доз ИИ на здоровье человека, представляет собой риск развития злокачественных новообразований (ЗНО) и наследственных повреждений в будущем. ЗНО, вызванные воздействием ИИ, не могут проявляться ранее, чем по прошествии минимального латентного периода, который для заболеваний лимфатической и кроветворной ткани составляет от 2 до 5 лет, для опухолей (солидных ЗНО) – примерно от 5 до 10 лет [8].

На этапе оценки зависимости «доза-эффект» количественная оценка возможных негативных для здоровья последствий воздействия ИИ на человека осуществляется на основе линейной беспороговой гипотезы. В настоящее время в области радиационной защиты чаще всего используются модели оценки и межпопуляционного переноса риска, представленные в Публикации 152 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [8]. Однако существуют и другие признанные в научном сообществе модели радиационного риска, пригодные для решения указанной задачи [9–11].

Этап оценки поглощенных доз в отдельных радиочувствительных органах и тканях организма при медицинском облучении представляет собой комплексную задачу в связи с невозможностью достоверно воспроизвести условия облучения для каждого конкретного пациента. Для оценки доз используют: прямые измерения поглощенных доз в антропоморфных фантомах с использованием термолюминесцентных или оптически стимулированных люминесцентных дозиметров; расчет поглощенных доз с использованием специальных калькуляторов доз и наборов коэффициентов перехода к органным дозам, а также упрощенные или полноценные методы Монте-Карло, реализованные в специализированных средах, таких как Geant4 и PENELOPE [12–14]. Определение поглощенных доз в органах и тканях независимо от выбранного метода обычно выполняется для стандартного фантома соответствующей возрастной категории, помещенного в те же условия облучения, что и конкретный пациент.

Наиболее важное значение в практическом смысле представляет завершающий этап оценки рисков – характеристика рисков. Применительно к медицинскому облучению на этапе характеристики радиационных рисков, в зависимости от задач оценки, проводятся: расчет рисков для среднего пациента или отдельных половозрастных групп пациентов; сравнительная оценка рисков различной природы; определение целесообразности и обоснованности применения конкретных методов медицинской диагностики и анализ соотношения выгод и рисков, связанных с применением или неприменением указанных методов.

При характеристике рисков в зависимости от целей оценки и доступности данных допускается использование различных количественных и качественных показателей для описания возможных негативных последствий воздействия ИИ. Неудачный выбор показателей для характеристики рисков в конкретной ситуации медицинского облучения может повлиять на принятие решений. Примером подобного решения может быть отказ пациента или его законного представителя от проведения РПП, сопряженной

с очень малой дозой, по причине того, что для характеристики риска использован показатель «риск развития смертельного ЗНО» без пояснения масштаба риска и ожидаемой диагностической пользы. Другой пример – применение сложного для понимания показателя радиационного ущерба при информировании пациентов и их законных представителей о риске, связанном с рекомендованным методом лучевой диагностики.

Цель исследования – разработка схемы и обоснование метода выбора и применения различных показателей радиационного риска, связанного с проведением медицинских диагностических РПП, в зависимости от цели оценки риска, вида и параметров проведения процедуры, пола и возраста пациента и иных факторов.

Материалы и методы

Работа представляла собой анализ показателей радиационного риска с элементами обзора литературы и сравнительного анализа определений и разработки алгоритма выбора показателей риска для ситуаций медицинского диагностического облучения.

Поиск публикаций выполнялся в базах научных публикаций PubMed, Scopus, Google Scholar и на сайтах международных научных и медицинских организаций. Для поиска использовались ключевые слова: “radiation risk”, “diagnostic exposure”, “lifetime attributable risk”, “LAR”, “excess lifetime risk”, “ELR”, “REID”, “REIC”, “ECI”, “ECD”, “RUD”, “loss of life expectancy”, “years of life lost”, “DALY”, “radiation detriment”, “medical exposure”, “nuclear medicine”, “risk communication”.

Найденные источники включались в обзор при выполнении следующих условий: наличие определения или формул для расчета показателя риска; отношение источника к ИИ, радиационной защите, медицинскому облучению или общим показателям риска для здоровья; возможность определить, какой исход характеризует показатель: заболеваемость, смертность, потерянные годы жизни, качество жизни; возможность оценить применимость показателя к РПП.

Источники исключались из обзора, если они только упоминали показатель без формального определения или формулы для расчета.

Для анализа материалов, посвященных показателям риска, были сформированы три группы источников.

Первую группу составили нормативно-методические и научно-методические документы международных научных организаций и национальных органов, регламентирующих радиационную защиту, оценку радиационного ущерба и оценку рисков при медицинском облучении [8–11, 14–20], а также МР 2.6.1.0098-15³ и МР 2.6.1.0215-20.

Вторую группу составили публикации, в которых вводились, формализовывались или сопоставлялись показатели пожизненного риска. При анализе использовались источники, определяющие расчет таких показателей риска, как excess lifetime risk (ELR; избыточный пожизненный риск), lifetime attributable risk (LAR; пожизненный атрибутивный риск), risk of untimely death (RUD; риск преждевременной смерти), lifetime risk of exposure-induced death (LRED; пожизненный риск смерти, индуцированной воздействием), risk of

³ Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований: Методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 06.04.2015. [Radiation risk assessment for patients undergoing X-ray radiological examinations. Guidelines MR 2.6.1.0098-15. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 06.04.2015. (In Russ.)]

exposure-induced death (REID; риск смерти, индуцированной воздействием), risk of exposure-induced cancer incidence (REIC; риск заболеваемости раком, индуцированной воздействием), loss of life expectancy (LLE; потеря ожидаемой продолжительности жизни), years of life lost (YLL; потерянные годы жизни) и производные от них показатели. Основными источниками для этой группы являлись работы M. Vaeth и D.A. Pierce по ELR и RUD [21], D. Thomas и соавт. по определению и оценке пожизненного ущерба (lifetime detriment) [22], A.M. Kellerer и соавт. по преобразованию excess relative risk (ERR; избыточный относительный риск) в LAR [23], M. Andersson и соавт. по применению LAR в диагностической и терапевтической ядерной медицине [24], а также документы Исследовательского центра по оценке защиты в ядерной области (CEPN), Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (UNSCEAR) и МКРЗ, в которых эти показатели соотношены с LRED/REID, LLE, YLL и радиационным ущербом [8, 10, 18].

Третью группу составили современные публикации и руководства, в которых радиационный риск рассматривается в клиническом, коммуникационном или межфакторном контексте. В эту группу были включены работы с использованием DALY (числа потерянных лет здоровой жизни) как показателя радиационного риска [25], обсуждением DALY и иных интегральных показателей как возможного дополнения к radiation detriment (радиационному ущербу) [26], сопоставлению радиационных и химических рисков в единой шкале DALY [27], применению DALY при обосновании медицинского облучения [3], межпопуляционному сравнению пожизненных радиационных рисков и DALY [4, 5], а также материалы по риск-коммуникации [28].

Для формирования качественной шкалы уровней радиационного риска, связанного с проведением РПП, использовались методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15, МР 2.6.1.0215-20, публикации МКРЗ [8, 17, 18, 29, 30], Агентства по охране окружающей среды США (EPA) [11], Национального совета по радиационной защите и измерениям США (NCRP) [20], а также источники из смежных областей оценки медицинского риска и риска для здоровья при воздействии факторов риска, отличных от ИИ. Для гармонизации терминологии и границ числовых диапазонов риска было

проанализировано руководство по оценке канцерогенного риска при воздействии химических веществ⁴ и иные научные публикации [28, 31–34]. Выбранный подход обусловлен тем, что диагностические РПП связаны не только с радиационным риском развития стохастических эффектов, но и с иными рисками медицинского вмешательства: аллергическими и физиологическими реакциями на контрастные вещества, осложнениями при выполнении инвазивных или интервенционных процедур, рисками при проведении седации и анестезии, а также рисками, связанными с отказом от исследования, отсрочкой диагностики и ложноположительными или ложноотрицательными результатами, которые должны обсуждаться в рамках сопоставления пользы и возможного вреда.

Результаты и обсуждение

Выполнение медицинских РПП может быть связано с решением различных прикладных задач в области анализа рисков:

1. Обоснование метода исследования: сравнительный анализ выгод и рисков, связанных с применением метода диагностики при различных патологических состояниях.

2. Информирование пациентов и их законных представителей о возможном риске, связанном с применением методов лучевой диагностики.

3. Оценка последствий радиационной аварии или непреднамеренного медицинского облучения.

4. Оценка популяционных рисков от медицинского облучения в системе радиационно-гигиенической паспортизации.

5. Обоснование целесообразности и оценка эффективности проведения мероприятий по оптимизации радиационной защиты пациентов с использованием риск-ориентированных подходов.

В настоящее время используется несколько групп интегральных показателей риска, различающихся по смыслу, области применения и степени методологической строгости. Для целей статьи они были объединены в три группы: показатели, основанные на числе случаев ЗНО или смертей; показатели, выражающие вред в потерянных годах жизни или здоровой жизни; интегральные показатели радиационного ущерба. Сводная характеристика показателей приведена в таблице 1.

Таблица 1. Сводная характеристика показателей радиационного риска

[Table 1. Summary of radiation risk indicator characteristics]

Аббревиатура [Abbreviation]	Английское название [English term]	Русскоязычный эквивалент [Equivalent in Russian]	Смысл показателя [Meaning of the indicator]	Источники [Sources]
ELR	Excess lifetime risk	Избыточный пожизненный риск	Разность пожизненных рисков негативного исхода в облученной и сопоставимой необлученной популяции [The difference in lifetime risks of an negative outcome between an exposed population and a comparable unexposed population.]	[21, 22]
ECI / ECD	Excess cancer incidence / excess cancer deaths	Избыточная онкологическая заболеваемость / избыточная онкологическая смертность	Исход-специфические варианты ELR для заболеваемости раком и смертности от рака. [Outcome-specific variants of ELR for cancer incidence and cancer mortality.]	[17]

⁴ Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания. Р 2.1.10.3968-23. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. [Guidelines for Human Health Risk Assessment of Chemical Contaminants in the Environment. R 2.1.10.3968-23. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being; 2023. (In Russ.)]

Аббревиатура [Abbreviation]	Английское название [English term]	Русскоязычный эквивалент [Equivalent in Russian]	Смысл показателя [Meaning of the indicator]	Источники [Sources]
RUD	Risk of untimely death	Риск преждевременной смерти	Ранний термин для риска смерти, наступившей раньше вследствие воздействия; по смыслу близок к LAR для смертности. [An early term for the risk of death occurring earlier as a result of exposure; similar in meaning to LAR for mortality.]	[21]
LAR	Lifetime attributable risk	Пожизненный атрибутивный риск	Пожизненный риск исхода, приписанного воздействию, включая «ускоренные» случаи ЗНО или смерти; обычно использует функцию дожития для необлученной популяции. [Lifetime risk of an outcome attributed to exposure, including “accelerated” cancer cases or deaths; typically uses the survival function of the unexposed population.]	[23, 24]
REIC / REID	Risk of exposure-induced cancer incidence / risk of exposure-induced death	Риск радиационно-индуцированной заболеваемости раком / риск смерти, индуцированной воздействием	Показатели риска учитывают изменение функции дожития в облученной популяции [Risk indicators account for changes in the survival function of the exposed population.].	[8, 22]
YLL / YLD	Years of life lost / years lived with disability	Потерянные годы жизни / годы жизни с ухудшением здоровья	Компоненты оценки бремени болезни: преждевременная смертность и годы жизни в состоянии неполного здоровья. [Components of burden of disease assessment: premature mortality and years lived with disability]	[35]
LLE / YLLRIC	Loss of life expectancy / years of life lost per radiation-induced cancer	Потеря ожидаемой продолжительности жизни / годы жизни, теряемые при радиационно-индуцированном раке	Показатели тяжести последствий в годах жизни; YLLRIC выражает среднюю потерю лет на одну радиационно-индуцированную смерть. [Indicators of consequence severity in life-years lost; YLLRIC expresses the average life-years lost per radiation-induced death.]	[26]
DALY	Disability-adjusted life year	Годы жизни, скорректированные по нетрудоспособности; потерянные годы здоровой жизни	Интегральный показатель бремени болезни: DALY = YLL + YLD; пригоден для сопоставления радиационного вреда с иными факторами риска. [Integrated burden of disease indicator: DALY = YLL + YLD; suitable for comparing radiation harm with other risk factors.]	[25, 27, 34]
Radiation detriment	Radiation detriment	Радиационный ущерб	Интегральный показатель МКРЗ, учитывающий вероятность и тяжесть стохастических эффектов для номинальной популяции. [ICRP integrated indicator accounting for the probability and severity of stochastic effects in a nominal population.]	[8, 16]
DAR	Detriment-adjusted risk	Риск, взвешенный с учетом ущерба	Аналог радиационного ущерба, рассчитываемый с использованием современных медико-демографических данных и коэффициентов относительного вреда для конкретной популяции. [An analogue of radiation detriment, calculated using current medical and demographic data and population-specific relative harm coefficients.]	MP 2.6.1.0215-20, [8]

Показатели ELR, ECI и ECD отражают чистый прирост пожизненного риска соответствующего исхода в облученной популяции по сравнению с аналогичной необлученной. LAR, RUD, REID и REIC базируются на более сложной концепции: они включают также случаи ЗНО или смерти от ЗНО, которые без облучения могли бы произойти позднее, но вследствие облучения произошли раньше. Различие между LAR и REIC/REID состоит главным образом в используемой функции дожития: LAR обычно использует нормальную, не измененную воздействием, функцию дожития, тогда как REIC и REID используют

функцию дожития или функцию жизни без рака, измененную воздействием [8, 22, 23].

Показатели LLE, YLL, YLD, YLLRIC и DALY позволяют перейти от выражения риска в вероятностях или числе случаев к выражению вреда в потерянных годах жизни или здоровой жизни. Это особенно важно при популяционных оценках малых индивидуальных доз, когда пересчет коллективной дозы в ожидаемое число смертей может создавать неоправданно натурализованное представление о масштабе риска [10, 16, 25, 35].

В связи с тем, что в поле облучения при выполнении медицинской РПП могут попасть различные органы, ткани и системы организма, подробное описание риска всех возможных негативных последствий облучения стало бы слишком громоздким и при этом лишенным практического смысла. Поэтому при решении многих прикладных задач для характеристики радиационных рисков, связанных с медицинским облучением, гораздо эффективнее пользоваться обобщенными показателями, т.е. количественными и/или качественными показателями, которые отражают совокупный вред для здоровья, обусловленный облучением, без его раздельного описания применительно к отдельным органам, тканям, системам организма, нозологическим формам и возможным исходам.

При этом чем меньшее число обобщенных показателей используется для характеристики риска, тем менее детальное представление о масштабе и характере возможных последствий они дают. Поэтому при выборе базового перечня показателей для использования в контексте медицинского облучения учитывались три вида возможных негативных последствий вредного воздействия на здоровье: количество или частота негативных исходов (рисков развития смертельных и несмертельных заболеваний); длительность негативных состояний (заболеваний); тяжесть негативных состояний (заболеваний и инвалидностей). Формируемый перечень показателей должен позволять при необходимости описывать все три указанные характеристики, но не создавать неоправданную сложность в ситуациях, когда подобная детализация не влияет на принятие решений.

Из приведенного выше перечня для характеристики радиационных рисков в настоящей работе были выбраны пять показателей: эффективная доза, радиационный ущерб, DAR, DALY и характеристика риска в соответствии с качественной шкалой уровней риска. Выбор указанных показателей обусловлен следующими соображениями:

1. Эффективная доза – мера риска возникновения отдаленных последствий облучения организма человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности¹. Указанная величина с момента ее внедрения в практику более чем 35 лет назад хорошо знакома специалистам в области радиационной защиты и позволяет быстро сопоставлять возможные риски с повседневным уровнем облучения граждан от воздействия природных и иных источников ИИ. Эффективная доза, как мера риска, зачастую вычисляется при проведении исследования и сообщается пациентам.

2. Эффективная доза сама по себе не является показателем риска, но с ее помощью вычисляется значение радиационного ущерба, который позволяет грубо оценить порядок величины радиационного риска [8, 15].

3. Качественная шкала риска, как инструмент для наиболее грубой оценки риска, удобна в ситуациях, когда отсутствует необходимость использования точного значения риска, и достаточно указать диапазон рисков или даже просто название диапазона.

4. Показатель DAR рассчитывается с использованием REIC и наиболее математически строго позволяет учесть влияние популяционной принадлежности, пола и возраста пациента на величину риска. В отличие от показателей ELR, ECI и ECD, указанный показатель учитывает не только такие негативные исходы, которые полностью вызваны воздействием радиации, но и такие, которые произошли бы с человеком по иным причинам, но наступят раньше вследствие воздействия ИИ. В отличие от показателей LAR и RUD, расчет значений DAR происходит с использованием функции дожития, скорректированной для облученной популяции. Наконец, показатель DAR напрямую математически сопоставим с радиационным ущербом, в отличие от REIC и REID. Таким образом, DAR является наиболее математически строгой и информативной метрикой радиационного риска из применяемых в настоящее время в области управления рисками, если негативные последствия необходимо выразить, оценивая число случаев негативного исхода (заболеваний или смертей).

5. Показатель DALY – наиболее современный обобщенный показатель популяционного здоровья, применяемый для оценки бремени болезней, а в последние годы все чаще применяемый для оценки риска для здоровья в связи с воздействием вредных факторов среды обитания. DALY, в отличие от LLE и YLLRIC, позволяет существенно более методически строго оценить вклад несмертельных заболеваний в общий радиационный вред для здоровья, что приобретает особую важность в связи с успехами в лечении рака и общим улучшением качества медицинской помощи. Время, проведенное в состоянии неполного здоровья, учитывается по универсальной методике, в отличие от того, как учитывается вклад несмертельных заболеваний при оценке радиационного ущерба [24, 26, 34].

Качественная шкала уровней радиационного риска (табл. 2) была сформирована как адаптированная гибридная шкала, предназначенная для описания величины индивидуального пожизненного дополнительного риска, связанного с выполнением РПП. Основой для формирования шкалы послужили МР 2.6.1.0098-15 и МР 2.6.1.0215-20. Шкала оценки химического канцерогенного риска из руководства Р 2.1.10.3968-23 использовалась для гармонизации границ диапазонов риска.

В отличие от МР 2.6.1.0098-15, для диапазона $3 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$ предложено использовать термин «повышенный» вместо «существенный». Такая замена является терминологической адаптацией для клинического контекста: она описывает величину риска, но не создает впечатления автоматической недопустимости процедуры. Дополнительно шкала была расширена выше 1×10^{-2} , что необходимо для единообразного описания редких ситуаций повторных высокодозовых процедур, сложных интервенционных вмешательств или аварийного (нештатного) облучения.

Таблица 2. Сопоставление предлагаемой шкалы с существующими шкалами риска
[Table 2. Comparison of the proposed scale with existing risk scales]

Диапазон пожизненного риска R [Lifetime risk range R]	Предлагаемая шкала [Proposed Scale]	МР 2.6.1.0098-15	МР 2.6.1.0215-20	ICRP 62	Р 2.1.10.1920-04 Р 2.1.10.3968-23
$R < 10^{-6}$	Пренебрежимый [Negligible]	Пренебрежимый [Negligible]	Пренебрежимо малый [De minimis risk]	Category I / trivial	De minimis / минимальный [De minimis / Minimal]
$10^{-6} \leq R < 10^{-5}$	Минимальный [Minimal]	Минимальный [Minimal]	Минимальный [Minimal]	Category IIa	Допустимый / приемлемый [Tolerable / Acceptable]

Диапазон пожизненного риска R [Lifetime risk range R]	Предлагаемая шкала [Proposed Scale]	MP 2.6.1.0098-15	MP 2.6.1.0215-20	ICRP 62	P 2.1.10.1920-04 P 2.1.10.3968-23
$10^{-5} \leq R < 10^{-4}$	Очень низкий [Very low]	Очень низкий [Very low]	Очень низкий [Very low]	Category IIb	Допустимый / приемлемый [Tolerable / Acceptable]
$10^{-4} \leq R < 10^{-3}$	Низкий [Low]	Низкий [Low]	Низкий [Low]	–	Настораживающий [Alert]
$10^{-3} \leq R < 3 \times 10^{-3}$	Умеренный [Moderate]	Умеренный [Moderate]	Умеренный [Moderate]	Category III	Высокий (неприемлемый для факторов среды обитания) [High (unacceptable for environmental factors)]
$10^{-3} \leq R < 10^{-2}$		– *	–	–	
$3 \times 10^{-3} \leq R < 10^{-2}$		Существенный [Substantial]			
$10^{-2} \leq R < 10^{-1}$	Повышенный [Elevated]	–	–	Category III	
$R \geq 10^{-1}$	Высокий [High]	–			

* Данная специфическая категория в источнике отсутствует. [This specific category is not included in the source.]

Выбор одного или нескольких показателей для характеристики рисков зависит от дозы облучения, доступности половозрастных и дозиметрических данных, масштаба оценки и адресата результата. В настоящей работе предложен следующий порядок выбора показателей.

1. Для нижнего уровня качественной шкалы риска в настоящей работе был обоснован выбор консервативной дозовой границы, выраженной через эффективную дозу. Базовый расчет выполнен по номинальному коэффициенту радиационного ущерба для всего населения из Публикации 103 МКРЗ [16]: $k = 5,7 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ [6]. При условии $R < 10^{-6}$ и $R = k \times E$ (где R – радиационный ущерб, безразмерная величина, k – коэффициент номинального радиационного ущерба, Зв^{-1} , E – эффективная доза, Зв) получаем значение эффективной дозы E_0 , соответствующее данному уровню риска: $E_0 = R / k = 10^{-6} / (5,7 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}) = 1,75 \times 10^{-5} \text{ Зв} = 0,0175 \text{ мЗв} = 17,5 \text{ мкЗв}$. Однако данная оценка не является возраст-специфической. С учетом более высокой радиочувствительности детей, возможного наличия чувствительных групп и особенностей восприятия риска пациентами и законными представителями для целей настоящей методики нижняя граница эффективной дозы $E_{\text{мет}}$ была дополнительно снижена примерно на порядок: $E_{\text{мет}} = E_0 / 10 = 1,75 \text{ мкЗв} \approx 2 \text{ мкЗв}$. Следовательно, при $E \leq 2 \text{ мкЗв}$ оценка радиационного ущерба по номинальному коэффициенту из Публикации 103 МКРЗ составляет $R = 5,7 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1} \times 2 \times 10^{-6} \text{ Зв} = 1,14 \times 10^{-7}$, то есть остается ниже 1×10^{-6} с запасом примерно в 8,8 раза. Данный результат хорошо соотносится с требованиями п. 1.4 НРБ-99/2009⁵, предусматривающими исключение из-под регулирующего контроля источников, ассоциированных с индивидуальной годовой эффективной дозой менее

10 мкЗв. Для РРП с эффективной дозой менее 2 мкЗв за процедуру проводить отдельную оценку радиационного риска нецелесообразно; для характеристики риска достаточно указать эффективную дозу и качественную категорию риска.

2. При процедурах с эффективной дозой в диапазоне 0,002–0,1 мЗв, основными показателями остаются эффективная доза и качественная шкала; DAR рассчитывается только для лиц с повышенной радиочувствительностью (беременных женщин и детей).

3. При процедурах с эффективной дозой порядка 0,1–1 мЗв и выше, при сериях РРП, проведении процедур КТ, радионуклидной диагностике и интервенционных РРП предпочтительно использовать DAR для индивидуальной или групповой оценки риска.

4. При решении задач на популяционном уровне, где индивидуальные дозы недоступны, средние индивидуальные дозы малы, а численность экспонированных лиц велика, расчет ожидаемого числа радиационно-индуцированных смертей или случаев заболевания рассматривался как методически нежелательный. Это согласуется с рекомендациями МКРЗ: коллективная эффективная доза не предназначена для эпидемиологической оценки риска, и следует избегать расчета числа случаев рака или смертей на основе коллективных эффективных доз при тривиальных индивидуальных дозах и больших популяциях [15]. Для таких популяционных ситуаций более предпочтительным считается использование показателей, выражающих вред не в ожидаемом числе случаев или смертей, а в потерянных годах здоровой жизни, прежде всего DALY [4, 24, 26, 34]. При этом возможно сопоставление радиационного вреда с вредом от химических, медицинских и иных факторов.

⁵ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

При возникновении ситуации аварийного облучения пациента или проведении РРП, ассоциированных с эффективной дозой выше 100 мЗв, требуется детальный анализ риска на основе поглощенных доз в органах и тканях, пола и возраста пациента, параметров процедуры и выбранной модели радиационного риска. Детальный анализ риска в данном контексте означает не простое умножение эффективной дозы на номинальный коэффициент ущерба, а расчет органных доз, выбор половозрастной модели риска, оценку пожизненного риска для отдельных локализаций или групп ЗНО, а затем, при необходимости, агрегирование результата в DAR, DALY или иной обобщенный показатель. Выполнять такую оценку должны специалисты, имеющие подготовку в области радиационной гигиены, медицинской физики, дозиметрии или радиационной эпидемиологии, совместно с клиническими специалистами, отвечающими за обоснование процедуры и интерпретацию ее пользы.

При решении практических задач выбор показателя риска является не только технической операцией. Один и тот же расчетный результат может по-разному влиять на решение в зависимости от того, представлен он как доза, вероятность заболевания, риск смерти, качественная категория или потерянные годы здоровой жизни. Поэтому форма представления риска должна соответствовать цели оценки, адресату информации, величине дозы и доступности исходных данных. При обсуждении медицинской процедуры риск необходимо рассматривать вместе с диагностической пользой, альтернативами и последствиями отказа или отсрочки исследования [29].

При информировании пациентов и их законных представителей важно избегать двух крайностей: излишней натурализации малых вероятностей, когда очень малый расчетный риск описывается только как риск «смерти от рака», и чрезмерного сглаживания риска, когда вероятностный вред переводится в малую среднюю потерю времени жизни на одного обследованного. В обоих случаях математически корректная величина может быть коммуникативно неполной, если не объяснены ее смысл, неопределенности и клинический контекст.

Для чувствительных групп, прежде всего родителей маленьких детей, формального указания порядка вероятности недостаточно. Риск порядка 10^{-6} или 10^{-5} специалист обычно воспринимает как крайне малый, тогда как пациент или родитель может воспринимать не порядок величины, а саму возможность неблагоприятного исхода. Поэтому качественную категорию риска целесообразно сопровождать абсолютной вероятностью или натуральной частотой, например «менее 1 случая ЗНО на миллион обследованных» или «примерно 1 случай ЗНО на 100 000 обследованных», одновременно указывая ожидаемую пользу процедуры и возможные альтернативы [32, 33].

Показатели, выраженные в годах жизни, требуют отдельного пояснения. Если для группы рассчитано значение 10 DALY, это не означает фактическое равномерное сокращение жизни всех обследованных на малую долю времени. Такой результат является математическим ожиданием суммарного популяционного бремени; реальные потери, если

радиационно-индуцированные исходы возникнут, будут сосредоточены у небольшой части лиц. Поэтому формулировки вида «в среднем каждый пациент потеряет несколько минут жизни» без пояснения вероятностной природы показателя могут быть методически и этически некорректны.

Эффективная доза в настоящем подходе рассматривается как мера риска, но не как самостоятельный показатель индивидуального риска. Она удобна для специалистов при первичном описании радиационной нагрузки, сравнении процедур и оптимизации протоколов, а также необходима как понятная исходная величина при информировании пациента. Однако эффективная доза не должна представляться как точная индивидуальная вероятность вреда, поскольку рассчитывается для референтного человека и использует усредненные тканевые взвешивающие множители [16, 30].

Радиационный ущерб позволяет оценить порядок величины стохастического вреда в логике радиационной защиты и, при необходимости, отнести риск к качественной категории. Его основное назначение – грубая групповая или управленческая оценка риска в диапазоне малых доз. Поскольку радиационный ущерб рассчитывается для номинальной популяции, он не является оптимальным средством персонализированной коммуникации с конкретным пациентом [8, 26].

Качественная шкала риска предназначена для описания уровня возможных последствий без необходимости детального анализа числовых значений показателей риска. Она особенно полезна для низкодозовых процедур, предварительного сравнения вариантов исследования и коммуникации с пациентами. При этом качественная категория не является критерием допустимости или недопустимости РРП: решение о выполнении процедуры определяется соотношением пользы и риска в конкретной клинической ситуации.

DAR следует использовать в тех случаях, когда требуется оценить риск с учетом пола, возраста и медико-демографических характеристик конкретной популяции. В практическом смысле этот показатель позволяет представить стохастический риск в терминах риска развития смертельного заболевания с поправкой на тяжесть последствий. Поэтому DAR целесообразен для оценки риска у детей и молодых пациентов, при повторных исследованиях, сравнении протоколов для конкретных половозрастных групп и анализе нештатного облучения.

DALY дает представление о характере и размере возможных популяционных потерь, поскольку объединяет преждевременную смертность и годы жизни с ухудшением здоровья. Он наиболее удобен при анализе риска для массовых РРП, программ обследования, радиационно-гигиенической паспортизации и межфакторных сравнений, например при сопоставлении радиационного вреда с вредом от химических факторов, реакций на контрастные вещества, осложнений вмешательства или последствий отказа от диагностики [3, 4, 24].

Практическое применение выбранных показателей целесообразно строить не по принципу универсального «лучшего» показателя, а по принципу соответствия показателя задаче (табл. 3). В большинстве ситуаций достаточно сочетать один количественный показатель для специалиста и одну качественную интерпретацию для пациента или лица, принимающего решение.

Таблица 3. Предпочтительные показатели риска для основных практических задач

[Table 3. Preferred risk indicators for major practical tasks]

Ситуация / задача [Situation / Task]	Основной показатель [Primary Indicator]	Дополнительные показатели [Additional Indicators]	Комментарий к применению [Comment on Application]
Низкодозовая диагностическая процедура [Low-dose diagnostic procedure]	Эффективная доза; качественная шкала [Effective dose; qualitative scale]	DAR при необходимости индивидуального пояснения [DAR when individual explanation is needed]	Достаточно простого описания уровня риска; расчет ожидаемых смертей нецелесообразен. [A simple description of the risk level is sufficient; calculating expected deaths is not appropriate.]

Ситуация / задача [Situation / Task]	Основной показатель [Primary Indicator]	Дополнительные показатели [Additional Indicators]	Комментарий к применению [Comment on Application]
Информирование пациента или родителей ребенка [Informing a patient or a child's parent]	Качественная шкала риска [Qualitative risk scale]	DAR в натуральных частотах; эффективная доза [DAR in natural frequencies; effective dose]	Сообщение должно включать пользу, альтернативы и риск отказа или отсрочки диагностики. [The communication should include benefit, alternatives, and the risk of refusal or delay of diagnosis.]
Сравнение протоколов или методов визуализации [Comparison of protocols or imaging methods]	Эффективная доза; DAR [Effective dose; DAR]	DALY при групповом анализе [DALY for group-level analysis]	Эффективная доза описывает нагрузку, DAR учитывает популяционную структуру пациентов. [Effective dose describes the burden; DAR accounts for the age- and sex-specific structure of the patient population.]
Дети и беременные женщины [Children and pregnant women]	DAR	Качественная шкала; DALY при групповом анализе [Qualitative scale; DALY for group-level analysis]	Возраст и ожидаемая продолжительность жизни существенно влияют на пожизненный риск. [Age and life expectancy significantly influence lifetime risk.]
Ситуация аварийного облучения пациента [Patient emergency exposure situation]	DAR; расчет по органным дозам [DAR; organ-dose-based calculation]	DALY; качественная шкала; оценка тканевых реакций при соответствующих дозах [DALY; qualitative scale; assessment of tissue reactions at relevant doses]	Требуется восстановление условий облучения и расчет органых или тканевых доз. [Reconstruction of exposure conditions and calculation of organ or tissue doses are required.]
Популяционная оценка, массовые программы, паспортизация [Population-based assessment, mass screening programs, radiation certification]	Эффективная доза; радиационный ущерб; DALY [Effective dose; radiation detriment; DALY]	Качественная шкала для краткого представления [Qualitative scale for concise presentation]	При очень малых индивидуальных дозах нежелательно переводить коллективную дозу в число смертей. [When individual doses are very small, converting collective dose into the number of deaths is discouraged.]
Сопоставление с нерадикационными рисками [Comparison with non-radiation risks]	DALY	DAR; качественная шкала [DAR; qualitative scale]	Позволяет сравнивать последствия разной природы в общей единице бремени здоровья. [Allows comparison of consequences of different natures using a common unit of health burden.]

Заключение

Оценка риска представляет собой начальный этап стандартной схемы анализа риска, предваряющий управление риском и информирование о риске. Оценка радиационного риска является инструментом информационной поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределенности точной оценки возможных последствий негативного воздействия ИИ на здоровье. Принятие управленческих решений о радиационных рисках в зависимости от характера и масштаба возможных негативных последствий радиационного воздействия требует наличия информации о рисках, собирающейся на последнем этапе оценки – характеристике рисков. Степень детализации информации о рисках определяется, в частности, выбранными показателями

количественной и качественной оценки.

Выбор показателей радиационного риска для представления результатов оценки риска должен соответствовать цели оценки и учитывать целевую аудиторию, для которой предназначена информация о риске: медицинские работники, пациенты и их законные представители, управленческий персонал и сотрудники надзорных органов. Обобщенные показатели риска различаются по сложности и информативности. Для РРП с очень малыми дозами зачастую достаточно ограничиться качественной оценкой риска и эффективной дозой как мерой риска, тогда как при высокодозовых процедурах, повторных исследованиях или нештатном облучении может потребоваться детальный анализ рисков с учетом органых доз, пола, возраста и медико-демографических характеристик популяции.

Предложенная схема выбора показателей риска охватывает большинство типичных ситуаций медицинского диагностического облучения и позволяет согласовать форму представления риска с задачей оценки. Эффективная доза удобна как мера риска и дозовой нагрузки; радиационный ущерб позволяет оценить порядок величины риска и выполнить его качественную классификацию; качественная шкала облегчает интерпретацию уровня риска без детального анализа числовых значений; DAR предназначен для оценки риска с учетом пола, возраста и популяционных характеристик; DALY позволяет представить характер и размер популяционных потерь и удобен при анализе массовых РПП и межфакторных сопоставлениях.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин Л.В. разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, написал черновик рукописи.

Библин А.М. провел поиск и анализ литературных данных, редактировал промежуточный вариант рукописи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Водоватов А.В. провел поиск и анализ литературных данных, редактировал промежуточный вариант рукописи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Ахматдинов Р.Р. провел поиск и анализ литературных данных, создал иллюстрацию, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР «Разработка и научное обоснование практических подходов к оценке радиационных рисков и риск-коммуникации в ситуациях медицинского, природного и техногенного облучения».

Литература

1. Репин Л.В., Чипига Л.А., Библин А.М. и др. Характеристика радиационного риска, связанного с проведением радионуклидной диагностики для российских пациентов путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2024. Т. 14, № 4. С. 189–203. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-4-189-203.
2. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М. и др. Характеристика радиационного риска от рентгеноскопических исследований путем оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17.
3. Kotre C.J. Comparing benefit and detriment from medical diagnostic radiation exposure using disability-adjusted life years: towards quantitative justification // Journal of Radiological Protection. 2023. Vol. 43, No. 4. Article 04512. DOI: 10.1088/1361-6498/ad1159.
4. Hirouchi J., Kujiraoka I., Takahara S. et al. Comparison of lifetime mortality risk, incidence risk, and DALYs of baseline cancer rates among countries as a benchmark for radiation-related cancer risk // Journal of Radiological Protection. 2024. Vol. 44, No. 2. Article 021510. DOI: 10.1088/1361-6498/ad4043.
5. Hirouchi J., Kujiraoka I., Takahara S. et al. Comparison of radiation-related cancer risk against baseline cancer rates in 33 countries using disability-adjusted life years (DALYs), lifetime incidence risk and lifetime mortality risks // Journal of Radiological Protection. 2025. Vol. 45, No. 1. Article 011508. DOI: 10.1088/1361-6498/adba6f.
6. Репин Л.В., Библин А.М. Разработка мобильного приложения для оценки радиационного риска, связанного с проведением медицинских рентгенорадиологических исследований // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 112–119. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-112-119.
7. Онищенко Г.Г., Зайцева Н. В., Попова А.Ю. и др. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография: в 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Пермь, 2024. Т. 1. 580 с.
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // Annals of the ICRP. 2022. Vol. 51, No. 3. p.103.
9. National Research Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press, 2006. 424 p.
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I. New York: United Nations, 2008. 383 p.
11. U.S. Environmental Protection Agency. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. EPA 402-R-11-001. Washington, DC: EPA, 2011. 164 p.
12. Lee C., Kim K.P., Bolch W.E. et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, No. 4. P. 891–909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891.
13. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. GEANT4 — a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2003. Vol. 506, No. 3. P. 250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
14. Salvat F. PENELOPE-2014: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2015. 386 p.
15. ICRP. Radiological Protection in Biomedical Research. ICRP Publication 62 // Annals of the ICRP. 1992. Vol. 22, No. 3. p. 73.
16. ICRP. 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. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
17. Advisory Group on Ionising Radiation. Risk of Solid Cancers following Radiation Exposure: Estimates for the UK Population. Documents of the Health Protection Agency. Radiation, Chemical and Environmental Hazards. RCE-19. Chilton: Health Protection Agency, 2011. 258 p.
18. Measures of lifetime detriment from radiation exposures: principles and methods. CEPN Report No. 175. Paris: Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire, 1990.
19. McElvenny D.M. ASQRAD // Journal of Radiological Protection. 1997. Vol. 17, No. 3. P. 223–228.
20. National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. Bethesda, MD: NCRP, 2010. 325 p.
21. Vaeth M., Pierce D.A. Calculating excess lifetime risk in relative risk models // Environmental Health Perspectives. 1990. Vol. 87. P. 83–94. DOI: 10.1289/ehp.908783.
22. Thomas D., Darby S., Fagnani F. et al. Definition and estimation of lifetime detriment from radiation exposures: Principles and methods // Health Physics. 1992. Vol. 63, No. 3. P. 259–272. DOI: 10.1097/00004032-199209000-00001.
23. Kellerer A.M., Nekolla E.A., Walsh L. On the conversion of solid cancer excess relative risk into lifetime attributable risk // Radiation and Environmental Biophysics. 2001. Vol. 40, No. 4. P. 249–257. DOI: 10.1007/s004110100106.
24. Andersson M., Eckerman K., Mattsson S. Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine // Physics in Medicine and Biology. 2017. Vol. 62, No. 24. P. 9177–9188. DOI: 10.1088/1361-6560/aa959c.

25. 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, No. 4. P. 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
26. Clement C., Rühm W., Harrison J.D. et al. Keeping the ICRP recommendations fit for purpose // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, No. 4. P. 1390. DOI: 10.1088/1361-6498/ac1611.
27. Vaillant L., Maitre M., Lafranque E. et al. Proposal of a quantitative approach integrating radioactive and chemical risks // Radioprotection. 2023. Vol. 58, No. 2. P. 147–155. DOI: 10.1051/radiopro/2023012.
28. World Health Organization. Communicating radiation risks in paediatric imaging: information to support health care discussions about benefit and risk. Geneva: World Health Organization, 2016. 88 p.
29. ICRP Publication 147: Use of Dose Quantities in Radiological Protection // Annals of the ICRP. 2021. Vol. 50, No. 1. P. 9–82.
30. Martin C.J. Effective dose in medicine // Annals of the ICRP. 2020. Vol. 49, No. 1_suppl. P. 126–142. DOI: 10.1177/0146645320927849.
31. American College of Radiology. ACR Appropriateness Criteria Radiation Dose Assessment Introduction. Reston, VA: American College of Radiology, 2020.
32. National Cancer Institute. Common Terminology Criteria for Adverse Events (CTCAE). Version 6.0. Bethesda, MD: National Cancer Institute, 2025. 312 p.
33. Royal College of Anaesthetists. Anaesthesia and risk: communicating risk to patients. London: Royal College of Anaesthetists, 2019.
34. National Institute for Health and Care Excellence. Shared decision making. NICE guideline NG197. London: NICE, 2021.
35. World Health Organization. WHO methods and data sources for global burden of disease estimates 2000–2021. Geneva: World Health Organization, 2024. 47 p.

Поступила: 15.04.2026

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: l.repin@niirg.ru; ORCID: 0000-0002-4857-6792, РИНЦ Author ID: 653792

Библин Артем Михайлович – руководитель информационно-аналитического центра, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-3139-2479, РИНЦ Author ID: 698045

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-5191-7535, РИНЦ Author ID: 859255

Ахматдинов Рустам Расимович – ведущий инженер-исследователь 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, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-4151-5380, РИНЦ Author ID: 1114459

Для цитирования: Репин Л.В., Библин А.М., Водоватов А.В., Ахматдинов Р.Р. Применение различных показателей радиационного риска для здоровья при медицинском облучении // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 95–106. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-95-106

Application of different radiation health risk metrics in medical exposure

Leonid V. Repin¹, Artem M. Biblin¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Rustam R. Akhmatdinov¹

¹ Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

In recent years, several methodological documents have been approved and a number of scientific articles have been published concerning the assessment of radiation risks associated with medical exposure. Risk

Leonid V. Repin

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

Address for correspondence: 8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: l.repin@niirg.ru

assessment is performed using various quantitative and qualitative risk indicators; however, the issue of their correct application, taking into account the specifics of a particular exposure scenario for solving applied problems in risk management, often remains unresolved. The aim of this study is to develop a framework and to substantiate a method for selecting and applying radiation risk indicators associated with diagnostic medical X-ray and radiological procedures, depending on the purpose of risk assessment, the type and parameters of the procedure, patient sex and age, and other factors. **Materials and Methods:** An analysis of radiation risk indicators was carried out based on a literature review, comparative analysis of definitions, and calculation methods. **Results and Discussion:** The main radiation risk indicators and their scope of application were analyzed; a list of indicators recommended for solving applied problems in medical diagnostic exposure was substantiated; a qualitative risk level scale and a scheme for selecting indicators are proposed. **Conclusion:** The developed approach allows for the alignment of the choice of risk indicator with the assessment purpose, target audience, dose burden, and availability of initial data.

Key words: radiation risk, radiation detriment, medical exposure, risk assessment, stochastic effects, low doses.

Authors' personal contribution

Repin L.V. developed design of the study, determined aims and objectives, prepared draft of the manuscript.

Biblin A.M. searched and analyzed literature data, edited the draft versions of the manuscript, presented the final version of manuscript for submission.

Vodovatov A.V. searched and analyzed literature data, edited the draft versions of the manuscript, presented the final version of manuscript for submission.

Akhmatdinov R.R. searched and analyzed literature data, created figure, edited the draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was performed within framework of research project "Development and scientific rationale for practical approaches to radiation risk assessment and risk communication in medical, natural, and technogenic exposure scenarios".

References

1. Repin LV, Chipiga LA, Biblin AM, Akhmatdinov RR, Vazhenina DA. Characterization of radiation risk associated with radionuclide diagnostics for the Russian patients using disability-adjusted life years measure. *Rossiyskiy elektronnyy zhurnal luchevoy diagnostiki = Russian Electronic Journal of Radiology*. 2024;14(4): 189–203. (In Russian) DOI:10.21569/2222-7415-2024-14-4-189-203.
2. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Vodovatov AV, Shatskiy IG. Using disability-adjusted life years measure for characterization of radiation risk from fluoroscopy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 7–17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-7-17.
3. Kotre CJ. Comparing benefit and detriment from medical diagnostic radiation exposure using disability-adjusted life years: towards quantitative justification. *Journal of Radiological Protection*. 2023;43(4): 041512. DOI: 10.1088/1361-6498/ad1159.
4. Hirouchi J, Kujiraoka I, Takahara S, Takada M, Schneider T, Kai M. Comparison of lifetime mortality risk, incidence risk, and DALYs of baseline cancer rates among countries as a benchmark for radiation-related cancer risk. *Journal of Radiological Protection*. 2024;44(2): 021510. DOI: 10.1088/1361-6498/ad4043.
5. Hirouchi J, Kujiraoka I, Takahara S, Takada M, Schneider T, Kai M. Comparison of radiation-related cancer risk against baseline cancer rates in 33 countries using disability-adjusted life years (DALYs), lifetime incidence risk and lifetime mortality risks. *Journal of Radiological Protection*. 2025;45(1): 011508. DOI: 10.1088/1361-6498/adba6f.
6. Repin LV, Biblin AM. Development of a mobile application for assessing radiation risk associated with medical X-ray radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(3): 112–119. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-112-119.
7. Onishchenko GG, Zaitseva NV, Popova AY, Mai IV, Ustinova Oyu, Trusov PV et al. Health risk analysis in the strategy of state socio-economic development. Monograph: in 2 volumes. Edited by G.G. Onishchenko and N.V. Zaitseva. 2nd ed., revised and additional. Moscow; Perm; 2024. Vol. 1. 580 p. (In Russian)
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3): 103.
9. NAS (National Academy of Sciences). Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR VII - Phase 2). Washington D.C.: National Academy Press; 2006. 424 p.
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I. New York: United Nations; 2008. 383 p.
11. U.S. Environmental Protection Agency. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. EPA 402-R-11-001. Washington, DC: EPA; 2011. 164 p.
12. Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891–909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891.
13. Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo HM, Arce P, et al. GEANT4 — a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2003;506(3): 250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
14. PENELOPE-2014: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Paris: OECD Nuclear Energy Agency; 2015. 386 p.
15. Radiological Protection in Biomedical Research. ICRP Publication 62. *Annals of the ICRP*. 1992;22(3): 73.
16. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;7(2–4): 332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
17. Advisory Group on Ionising Radiation. Risk of Solid Cancers following Radiation Exposure: Estimates for the UK Population. Documents of the Health Protection Agency. Radiation, Chemical and Environmental Hazards. RCE-19. Chilton: Health Protection Agency; 2011. 258 p.
18. Darby S, Fagnani F, Hubert P, Schneider T, Thomas D, Vaeth M, et al. Measures of lifetime detriment from radiation

- exposures: principles and methods. CEPN Report No. 175. Paris: Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire; 1990.
19. McElvenny DM. ASQRAD. *Journal of Radiological Protection*. 1997;17(3): 223–228.
 20. National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. Bethesda, MD: NCRP; 2010. 325 p.
 21. Vaeth M, Pierce DA. Calculating excess lifetime risk in relative risk models. *Environmental Health Perspectives*. 1990;87: 83–94. DOI: 10.1289/ehp.908783.
 22. Thomas D, Darby S, Fagnani F, Hubert P, Vaeth M, Weiss K. Definition and Estimation of Lifetime Detriment from Radiation Exposures. *Health Physics*. 1992;63(3): 259–272. DOI: 10.1097/00004032-199209000-00001.
 23. Kellerer AM, Nekolla EA, Walsh L. On the conversion of solid cancer excess relative risk into lifetime attributable risk. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40(4): 249–257. DOI: 10.1007/s004110100106.
 24. Andersson M, Eckerman K, Mattsson S. Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine. *Physics in Medicine and Biology*. 2017;62(24): 9177–9188. DOI: 10.1088/1361-6560/aa959c.
 25. 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.
 26. Clement C, Rühm W, Harrison JD, Applegate K, Cool D, Larsson CM et al. Keeping the ICRP recommendations fit for purpose. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(4): 1390–1409. DOI: 10.1088/1361-6498/ac1611.
 27. Vaillant L, Maitre M, Lafranque E, Schneider T, Wasselin V. Proposal of a quantitative approach integrating radioactive and chemical risks. *Radioprotection*. 2023;58(2): 147–155. DOI: 10.1051/radiopro/2023012.
 28. World Health Organization. Communicating radiation risks in paediatric imaging: information to support health care discussions about benefit and risk. Geneva: World Health Organization; 2016. 88 p.
 29. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. *Annals of the ICRP*. 2021;50(1): 82.
 30. Martin C. Effective dose in medicine. *Annals of the ICRP*. 2020;49(1_suppl): 126–140. DOI: 10.1177/0146645320927849.
 31. American College of Radiology. ACR Appropriateness Criteria Radiation Dose Assessment Introduction. Reston, VA: American College of Radiology; 2020.
 32. National Cancer Institute. Common Terminology Criteria for Adverse Events (CTCAE). Version 6.0. Bethesda, MD: National Cancer Institute; 2025. 312 p.
 33. Royal College of Anaesthetists. Anaesthesia and risk: communicating risk to patients. London: Royal College of Anaesthetists; 2019.
 34. National Institute for Health and Care Excellence. Shared decision making. NICE guideline NG197. London: NICE; 2021.
 35. World Health Organization. WHO methods and data sources for global burden of disease estimates 2000–2021. Geneva: World Health Organization; 2024. 47 p.

Received: April 15, 2026

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 Wellbeing (8, Mira Str., Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: l.repin@niirg.ru); ORCID: 0000-0002-4857-6792, PIHL Author ID: 653792

Artem M. Biblin – Head of 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 Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-3139-2479, PIHL Author ID: 698045

Aleksandr V. Vodovатов – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory of Radiation Hygiene of Medical Facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-5191-7535, PIHL Author ID: 859255

Rustam R. Akhmatdinov – Engineer-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 Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-4151-5380, PIHL Author ID: 1114459

For citation: Repin L.V., Biblin A.M., Vodovатов A.V., Akhmatdinov R.R. Application of different radiation health risk metrics in medical exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 95–106. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-95-106