

**РАСЧЕТ ЧИСЛА ПОТЕРЯННЫХ ЛЕТ ЗДОРОВОЙ ЖИЗНИ ВСЛЕДСТВИЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАСЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М.

*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, 197101, Санкт-Петербург*

Резюме. Эффективная доза используется в качестве меры радиационного риска для здоровья в области радиационной защиты при облучении в малых дозах. Эффективная доза вычисляется путем суммирования эквивалентных доз различных органов и тканей с применением взвешивающих коэффициентов, отражающих степень относительной радиочувствительности соответствующих органов или тканей. Это позволяет проводить количественное сравнение вреда для здоровья при различных геометриях облучения, используя для этого величину вреда, соответствующую равномерному облучению всего тела.

Такой подход к оценке риска применяется для грубой предварительной оценки риска в условиях существенной неопределенности возможных отдаленных последствий, когда математическая строгость оценки применительно к конкретному человеку не играет важной роли в принятии управленческих решений. Например, этот подход оправдан при учете индивидуальных доз персонала и контроле соблюдения установленных пределов доз. Международная комиссия по радиологической защите в своих рекомендациях привела значения взвешивающих коэффициентов для органов и тканей с учетом их радиочувствительности, рассчитанные для искусственно сформированной (номинальной) популяции. Рекомендованные значения коэффициентов получены путем группировки значений относительного вреда, рассчитанных для группы «все население» номинальной популяции. Между тем, хорошо известно, что в популяционном масштабе относительная радиочувствительность различных органов, тканей и систем организма меняется с возрастом и зависит от медико-демографических характеристик популяции, а значит и значения относительного вреда могут существенно отличаться для различных половозрастных групп населения.

В статье представлены результаты исследования, цель которого заключалась в оценке возможности и целесообразности использования альтернативных значений тканевых весовых множителей при расчете эффективной дозы.

Для этого проведены расчеты значений радиационного вреда и расчеты числа потерянных лет здоровой жизни вследствие возникновения онкологических заболеваний, вызываемых воздействием ионизирующего излучения, для разных возрастных групп российской популяции. Расчеты осуществлялись по методикам международной комиссии по радиологической защите и всемирной организации здравоохранения.

Показано, что тканевые весовые множители, рассчитанные по данным российской популяции на основании оценки числа потерянных лет здоровой жизни вследствие радиогенных раков, достаточно хорошо согласуется с весовыми тканевыми множителями, рекомендованными Международной комиссией по радиологической защите для расчета эффективной дозы облучения. Расчеты проведены для трех возрастных групп: «все население», «лица трудоспособного возраста» и «дети и подростки».

Сделан вывод о нецелесообразности усложнения системы радиационной защиты в Российской Федерации путем изменения тканевых весовых множителей или введения различных тканевых множителей для отдельных возрастных групп.

Ключевые слова: эффективная доза; радиационный риск; коэффициенты радиочувствительности; DALY

CALCULATION OF HEALTHY LIFE YEARS LOST DUE TO EXPOSURE TO IONIZING RADIATION FOR RUSSIAN POPULATION

Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M.

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

Summary. The effective dose is used, as a measure of radiation health risk due to low doses or/and low dose rates exposure in the field of radiation protection. The effective dose is calculated by summing the equivalent doses values in different organs and tissues using weighting factors that reflect the relative radiosensitivity of the organs or tissues concerned. This makes it possible to quantify the harm to health for different exposure geometries, using the harm value corresponding to a uniform exposure of the whole body. This approach to risk assessment is used for a rough preliminary risk assessment under conditions of significant uncertainty of possible long-term consequences, when the mathematical rigor of the assessment in relation to a particular person does not play an important role in making managerial decisions. For example, this approach is justified when taking into account individual doses of personnel and monitoring compliance with established

dose limits. The International Commission on Radiological Protection, in its recommendations, has given the values of weighting factors for organs and tissues, taking into account their radiosensitivity, calculated for an artificially formed (nominal) population. The recommended coefficient values are obtained by grouping the relative harm values calculated for the “whole population” group of the nominal population. Meanwhile, it’s well known, that, on a population scale, the relative radiosensitivity of various organs, tissues, and systems of the body changes with age and depends on the medical and demographic characteristics of the population, which means that the values of relative harm can vary significantly for different sex and age groups of the population. The article presents the results of the study, the aim of which was to assess the possibility and expediency of using alternative values of tissue weight factors when calculating the effective dose. For this, calculations of the values of radiation harm and calculations of the number of years of healthy life lost due to the occurrence of oncological diseases caused by exposure to ionizing radiation were carried out for different age groups of the Russian population. The calculations were carried out according to the methods of the International Commission on Radiological Protection and the World Health Organization. It’s shown, that the tissue weighting factors calculated from the data of the Russian population based on the estimated number of years of healthy life lost due to radiogenic cancers are in good agreement with the tissue weight factors recommended by the International Commission on Radiological Protection for calculating the effective dose. Calculations were made for three age groups: “general population”, “persons of working age” and “children”. It is concluded that it is inexpedient to complicate the system of radiation protection in the Russian Federation by changing tissue weight factors or introducing different tissue factors for individual age groups.

Key words: effective dose; radiation risk; radiosensitivity coefficients; DALY

Введение. Эффективная доза, как мера радиационного риска, не содержит в себе информации о риске, как таковом. Количественная оценка риска с использованием эффективной дозы осуществляется, как правило, с использованием коэффициентов риска, соответствующих выбранному показателю риска и группе населения. Международная комиссия по радиологической защите (далее – МКРЗ, Комиссия) привела значения четырех коэффициентов радиационного риска [1]. Комиссия рассчитала два показателя риска (риск развития радиогенного рака и риск возникновения наследственных эффектов) для двух возрастных групп населения (все население и лица трудоспособного возраста). Результаты расчетов были приведены для искусственно сформированной популяции, включающей в себя две субпопуляции – евро-американскую и азиатскую. Опубликованные методики

расчета названных показателей и методика межпопуляционного переноса оценок риска позволяют вычислить значения различных показателей риска для любой популяции (при наличии необходимых медико-демографических данных) и для любых половозрастных подгрупп выбранных популяций [2].

Задача же эффективной дозы, как меры риска, заключается в том, чтобы обеспечить представление различных по виду и степени тяжести негативных последствий воздействия радиации на здоровье человека в сравнимых между собой величинах. То есть учесть различия в радиочувствительности органов, тканей и систем организма и представить возможные негативные последствия с использованием каких-либо обобщенных показателей здоровья. Сама МКРЗ выбрала в качестве такого обобщенного показателя величину радиационного ущерба для здоровья, рассчитываемого по разработанной комиссией методике. Единицей измерения ущерба на популяционном уровне является один случай смертельного радиогенного злокачественного новообразования (далее – ЗНО), усредненный по двум характеристикам – средней потере времени жизни и степени тяжести ЗНО.

Концепция такого обобщенного показателя, как радиационный ущерб, начала формироваться еще во второй половине 70-х годов прошлого века и окончательно сформировалась к 1990-му году. Уточнение формулы расчета показателя в 2007-м году было связано с изменением модели оценки риска и рассчитываемых показателей риска, а не с изменением самой концепции ущерба.

К настоящему времени методика оценки радиационного ущерба несколько устарела. В научных публикациях [3–8] названы различные особенности и недостатки используемого показателя. Появились более современные, более информативные, более универсальные показатели популяционного здоровья [3, 10]. Однако, в силу широкого применения показателя радиационного ущерба в практике, отказ от его использования и переход к новым величинам в области радиационной защиты создал бы больше проблем, чем решил. Поэтому авторы работы считают, что более конструктивным является путь постепенного развития системы показателей радиационного риска и методологии их расчета с максимально возможной интеграцией в сложившуюся на международном уровне практику радиационной защиты.

Цель исследования. Целью настоящего исследования является разработка методического подхода, позволяющего рассчитывать зависимость некоторых показателей популяционного здоровья от дозы облучения на основе существующих методик ВОЗ и МКРЗ и расчет значений таких показателей для российской популяции. В статье также обсуждается

возможность применения таких показателей в рамках сложившейся практики радиационной защиты.

Материалы и методы. Для достижения указанной цели работы были изучены современные обобщенные показатели популяционного здоровья, разработанные в рамках проекта ВОЗ «Глобальное бремя болезней» [9], а также другие показатели на основе расчета сокращения продолжительности жизни и ухудшения качества жизни в связи с различными заболеваниями и воздействием негативных факторов внешней среды на здоровье.

В качестве альтернативы радиационному ущербу был выбран показатель DALY (disability-adjusted life years – англ., годы жизни, взвешенные с учетом нетрудоспособности), а точнее значение DALY на единицу дозы облучения.

В расчетах использованы сведения о половозрастном составе населения Российской Федерации [10], сведения о половозрастной структуре онкологической заболеваемости и половозрастной структуре онкологической и общей смертности [11] за 2018-й год.

Расчет показателей радиационного вреда осуществлен с использованием методики МКРЗ, описанной в [2].

Расчет значений показателя DALY осуществлен с помощью методики, описанной в [8], но расчеты осуществлялись не при дозе облучения 1 Грей на орган или ткань, а при дозе 0,01 Грей после чего результат умножался на 100. Поскольку модели риска для большинства органов линейны по отношению к дозе облучения, значение DALY/Гр изменилось только для лейкозов. Этот методический момент имеет важное значение, т.к. при расчете линейных коэффициентов расчет для лейкозов разумнее производить в диапазоне доз, типичном для ситуаций облучения в области радиационной защиты.

Значения относительной выживаемости онкологических больных взяты из [12].

В ходе выполнения работы были рассчитаны значения радиационного вреда и значения DALY на 1 Грей поглощенной дозы в органе/ткани для следующих органов/тканей: пищевод, желудок, толстая кишка, печень, легкое, молочная железа у женщин, яичник, мочевого пузыря, щитовидная железа, красный костный мозг, другие солидные ЗНО. Для обеспечения сопоставимости результатов также были использованы приведенные в [1, 2] оценки риска для поверхности кости, кожи, слюнных желез, головного мозга и наследственных заболеваний. На основании приведенных в указанных публикациях оценок рассчитано число потерянных лет жизни. Суммарный вклад указанных органов в общий радиационный ущерб крайне незначителен, поэтому погрешность в оценке DALY для названных органов/эффектов, оценивается авторами как несущественная.

Результаты исследования. На первом этапе работы по моделям МКРЗ были рассчитаны значения пожизненного риска возникновения ЗНО на 1 Грей поглощенной дозы для различных органов и тканей с использованием данных российской популяции и данных номинальной популяции МКРЗ. Результаты расчетов для группы «все население» представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициенты радиационного риска возникновения злокачественных новообразований для всего населения

Орган/ткань	Коэффициенты номинального риска (случаев на 10 000 человек на 1 Гр)	
	Собственный расчет по данным РФ	Собственный расчет по данным 152-й публикации МКРЗ [2] для номинальной популяции
Пищевод	9	14
Желудок	50	79
Толстая кишка	41	66
Печень	15	31
Легкое	68	104
Молочная железа	79	111
Яичник	9	11
Мочевой пузырь	24	40
Щитовидная железа	43	32
Костный мозг	39	142
Другие солидные	76	43
Всего:	453	673

Как видно из представленных в табл. 1 результатов, значения пожизненных радиационных рисков для российской популяции примерно в полтора раза меньше, чем для номинальной популяции МКРЗ, при суммировании по всем органам, и отличаются в большую сторону лишь для щитовидной железы и группы «другие солидные». Такие результаты в целом хорошо согласуются с [13, 14]. Некоторые отличия в оценке риска лейкозов связаны, по-видимому, с нелинейным характером модели, различными значениями доз облучения, применявшихся в расчетах и уточнением модели для риска лейкозов в [2] по

сравнению с [1]. Главная причина такого различия в суммарных рисках кроется, по-видимому, в существенной разнице функций дожития российской и номинальной популяций МКРЗ (см. рис.).

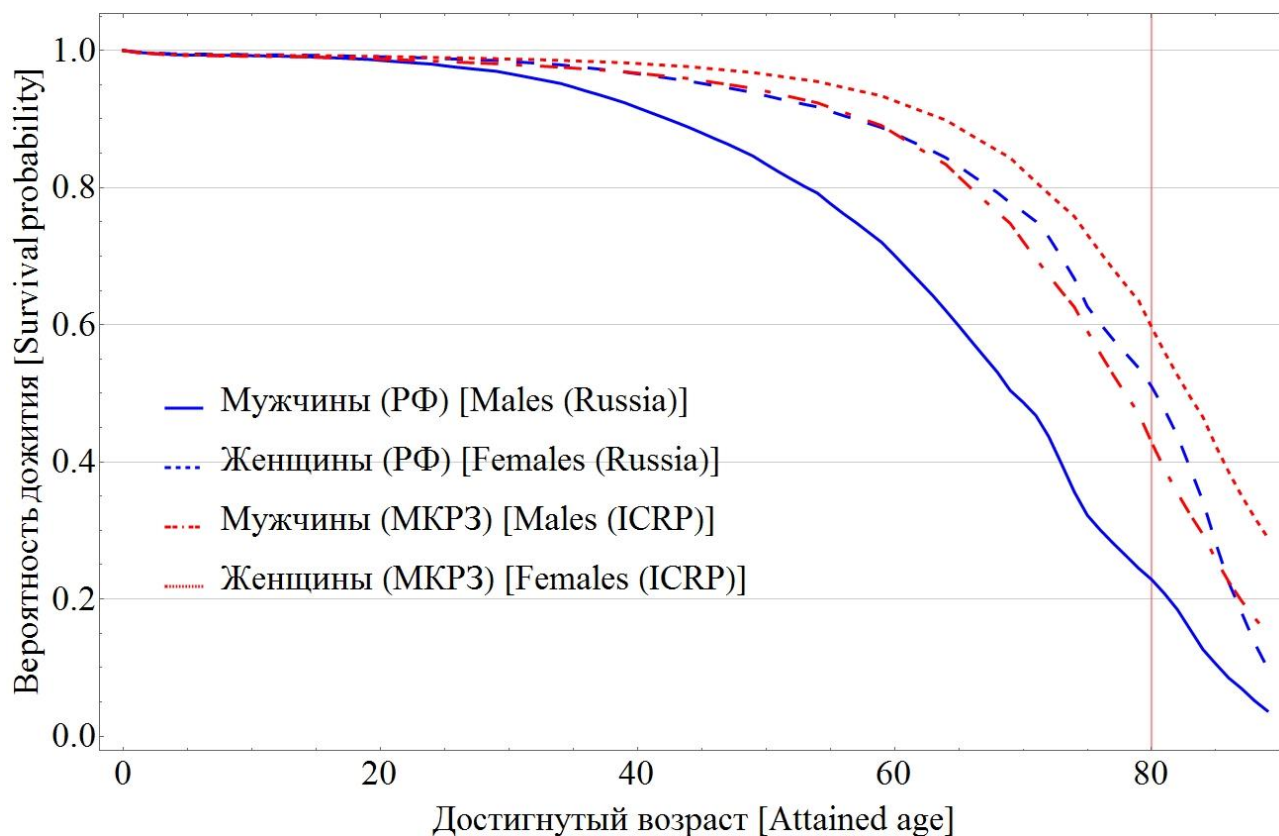


Рисунок - Различие функций дожития российской популяции и номинальной популяции МКРЗ

Обращает на себя внимание очевидная разница в относительном вкладе ЗНО щитовидной железы, группы «другие солидные» и красного костного мозга в общее число ЗНО у российской популяции по сравнению с номинальной популяцией МКРЗ.

Задачей следующего этапа работы стало вычисление значений показателя DALY для злокачественных новообразований органов и тканей, приведенных в таблице 1 в расчете на 1 Грей органной дозы. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

**Значения показателя DALY на 1 Гр поглощенной дозы в органе или ткани,
вычисленные для российской популяции, лет**

Орган/ткань	Половозрастная группа населения					
	Все население		Дети и подростки (0–17 лет)		Лица трудоспособного возраста (18–64 лет)	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
Пищевод	0,012	0,010	0,016	0,009	0,011	0,012
Желудок	0,055	0,085	0,119	0,21	0,041	0,068
Толстая кишка	0,045	0,025	0,09	0,056	0,036	0,021
Печень	0,042	0,020	0,094	0,049	0,03	0,016
Легкое	0,059	0,094	0,06	0,109	0,064	0,105
Молочная железа	—	0,101	—	0,325	—	0,061
Яичник	—	0,018	—	0,042	—	0,016
Мочевой пузырь	0,012	0,009	0,02	0,016	0,011	0,009
Щитовидная железа	0,003	0,014	0,011	0,056	0,001	0,005
Другие солидные ЗНО	0,030	0,036	0,073	0,098	0,02	0,026
Красный костный мозг	0,124	0,113	0,149	0,131	0,127	0,124
Поверхность кости*	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Головной мозг*	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Слюнные железы*	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Кожа*,**	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Наследственные заболевания*	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Всего:	0,43	0,56	0,68	1,11	0,39	0,50

Орган/ткань	Половозрастная группа населения					
	Все население		Дети и подростки (0–17 лет)		Лица трудоспособного возраста (18–64 лет)	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
* – для указанных локализаций использованы оценки числа потерянных лет жизни из [1] для группы «все население», что не оказывает значимого влияния на конечный результат и выводы; ** – за исключением меланомы.						

Результаты расчетов, представленные в таблице 2 могут применяться для оценки возможных негативных последствий облучения при известных значениях органных доз. Например, такой подход может применяться при оценке рисков, связанных с медицинским облучением пациентов в различных половозрастных группах.

Последним этапом исследования стала оценка относительного вклада риска развития радиогенных заболеваний отдельных органов и тканей в общую сумму ущерба, т.е. расчет показателей относительного радиационного вреда с использованием показателя DALY/Гр. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Сравнение относительного вклада DALY для заболеваний отдельных органов и тканей в общую сумму DALY со значениями тканевых взвешивающих множителей МКРЗ

Орган/ткань	Номинальная популяция МКРЗ	Российская популяция, данные за 2018 год		
		Относительный вклад в суммарное значение DALY		
	Значения тканевых весовых множителей	Дети и подростки (0–17 лет)	Лица трудоспособного возраста (18–64 лет)	Все население
Пищевод	0,04	0,02	0,03	0,03
Желудок	0,12	0,21	0,15	0,17
Толстая кишка	0,12	0,11	0,09	0,09
Печень	0,04	0,11	0,07	0,08

Легкое	0,12	0,11	0,24	0,19
Молочная железа*	0,12	0,16	0,08	0,12
Яичник	—	0,02	0,02	0,00
Мочевой пузырь	0,04	0,03	0,03	0,03
Щитовидная железа	0,04	0,04	0,01	0,02
Другие солидные ЗНО	0,12	0,11	0,07	0,08
Красный костный мозг (лейкозы)	0,12	0,05	0,10	0,08
Поверхность кости**	0,01	0,01	0,01	0,01
Головной мозг**	0,01	0,01	0,01	0,01
Слюнные железы**	0,01	0,01	0,01	0,01
Кожа**,***	0,01	0,00	0,01	0,01
Наследственные заболевания**	0,08	0,04	0,09	0,08

* оценки для ЗНО молочной железы усреднены по полу, т.е. фактическая доля DALY ЗНО молочной железы в общей сумме несколько выше для женщин;

** для указанных локализаций использованы оценки числа потерянных лет жизни из [1] для группы «все население», что не оказывает значимого влияния на конечный результат и выводы;

*** за исключением меланомы.

Обсуждение. Эффективная доза являет собой удачный пример обобщенной меры популяционного радиационного риска, предназначенной для решения широкого круга задач в области радиационной защиты. Доказательством этого факта стало повсеместное применение данной величины далеко за пределами сферы, для которой данная величина была разработана. Однако широкое применение эффективной дозы в практической деятельности заострило внимание специалистов на некоторых особенностях данной величины, делающих ее не вполне пригодной для решения ряда задач.

Одной из таких особенностей эффективной дозы является способ определения взвешивающих коэффициентов для органов и тканей с учетом их радиочувствительности.

Рассчитанные для группы «все население» номинальной популяции МКРЗ данные весовые множители не учитывают, что относительная радиочувствительность органов и тканей в некоторых случаях может существенно меняться с возрастом. Даже для номинальной популяции МКРЗ значения относительного вреда в группе «лица трудоспособного возраста» для ряда органов достаточно существенно отличаются от рекомендованных значений тканевых множителей.

В связи с этим, специалистами обсуждается возможность использования альтернативных значений тканевых множителей, которые лучше соответствуют главному назначению эффективной дозы – сравнению рисков при различных геометриях облучения. В частности, путем использования различных значений тканевых множителей для различных половозрастных групп населения.

Однако целесообразность такого решения не вполне очевидна, т.к. любые существенные изменения в сложившейся за десятилетия системе радиационной защиты, могут нанести больше вреда, чем принести пользы. Представляется крайне важным сохранять баланс между точностью теоретических расчетов и практической пользой от внесения изменений в сложившуюся практику.

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

Методология оценки радиационного ущерба, разработанная МКРЗ, предоставляет возможности для более широкого, чем в настоящее время, применения эффективной дозы в качестве меры количественной оценки радиационного риска возникновения отдаленных последствий облучения в малых дозах, в том числе при неравномерной геометрии облучения с учетом различий в радиочувствительности органов, тканей и систем организма в разных половозрастных группах.

Результаты анализа взвешивающих множителей для органов и тканей, рассчитанных по данным трех возрастных групп российской популяции с использованием разработанной авторами исследования методики, показали, что для большинства органов и тканей рассчитанные значения хорошо согласуются с тканевыми весовыми множителями, рассчитанными МКРЗ. Это указывает на нецелесообразность внедрения альтернативных значений тканевых весовых множителей для различных возрастных групп на данном этапе развития системы радиационной защиты.

В то же время результаты исследования позволяют получить более точное представление о радиационном риске для ситуаций неравномерного облучения и применить полученные результаты при решении задач по обоснованию назначения медицинских рентгенорадиологических исследований пациентам различных возрастных групп с учетом различий в сопутствующих радиационных рисках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ICRP. *Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103*. 2007.
2. ICRP. *ICRP Publication 152. Radiation detriment calculation methodology*. 2022.
3. 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: 170-183.
4. Ban N., Cléro E., Vaillant L. et al. Radiation detriment calculation methodology: summary of ICRP Publication 152. *Journal of Radiological Protection*. 2022; 42 (2). DOI: 10.1088/1361-6498/ac670d
5. 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; 39 (3):R19-R36. DOI: 10.1088/1361-6498/ab294a
6. Репин Л.В. Об использовании коэффициентов ущерба для количественной оценки последствий воздействия ионизирующего излучения. *Радиационная гигиена*. 2011; 4(1): 35-37
7. 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; 96 (5): 596-605. DOI: 10.1080/09553002.2020.1708499
8. 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
9. Mathers C.D. History of global burden of disease assessment at the World Health Organization. *Archives of Public Health*. 2020; 78 (77). DOI: 10.1186/s13690-020-00458-3
10. Витрина статистических данных. URL: <https://showdata.gks.ru/finder/> (дата обращения: 10.11.2022).

11. Каприн А.Д., Старинский В.В., Петровой Г.В. ред. *Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность)*. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019.
12. Беляев А.М., Манихас Г.М., Мерабишвили В.М. ред. *Злокачественные новообразования в Санкт-Петербурге и других административных территориях Северо-Западного федерального округа России (заболеваемость, смертность, контингенты, выживаемость больных)*. СПб. 2016.
13. Горский А.И., Чекин С.Ю., Максютлов М.А. и др. Эффект переноса моделей радиационного риска МКРЗ на популяцию РФ. *Радиация и риск*. 2019. 28 (4): 5-15. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15
14. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Кащеев 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; 22 (3): 40-56