РАЗДЕЛ 1**НАУЧНЫЕ СТАТЬИ**

DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15

УДК 616-006.04-02:614.876(470)

Эффект переноса моделей радиационного риска МКРЗ на популяцию РФ

**Горский А.И., Чекин С.Ю., Максютов М.А., Меняйло А.Н., Корело А.М.,
Туманов К.А., Зеленская Н.С., Лашкова О.Е., Иванов В.К.**

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

В соответствии с российскими Нормами радиационной безопасности для обоснования пределов доз облучения населения в течение года используется предельное значение индивидуального пожизненного радиационного риска $5 \cdot 10^{-5}$. При этом пожизненный риск радиационного рака для населения пропорционален дозе с коэффициентом номинального радиационного риска $5,5 \cdot 10^{-2}$ на 1 Зв. В настоящее время пожизненные радиационные риски определяются, исходя из моделей интенсивностей радиационных рисков, рекомендуемых Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) и содержащих параметры, модифицирующие радиационный риск в зависимости от пола и возраста облучённых лиц, а также от фоновых (в отсутствие облучения) показателей онкозаболеваемости и онкосмертности, характерных для этих облучённых лиц. В работе проведён расчёт коэффициентов пожизненных радиационных рисков населения РФ на основе современных моделей риска МКРЗ. В совокупности по всем локализациям рака коэффициенты пожизненных радиационных рисков для населения РФ в 1,5-1,6 раза меньше аналогичных коэффициентов МКРЗ. При одной и той же дозе облучения российское население характеризуется меньшими радиационными рисками, чем стандартные популяции МКРЗ и ВОЗ, хотя и за счёт конкуренции смертности от причин, не связанных с радиогенными раками. Поэтому дозовые ограничения и пределы, рекомендованные МКРЗ в целях радиационной защиты, для населения РФ можно рассматривать как приемлемые и достаточно консервативные.

Ключевые слова: *интенсивность радиационного риска, избыточный радиационный риск, функция дожития, пожизненный радиационный риск, модели радиационного риска, Публикация 103 МКРЗ, коэффициент номинального риска, локализация рака, перенос моделей риска, население РФ.*

Введение

В соответствии с российскими Нормами радиационной безопасности [1] для обоснования пределов доз облучения населения в течение года используется предельное значение индивидуального пожизненного радиационного риска $5 \cdot 10^{-5}$. При этом пожизненный риск радиационного рака для населения пропорционален дозе с коэффициентом номинального радиационного риска $5,5 \cdot 10^{-2}$ на 1 Зв [1].

В настоящее время пожизненные радиационные риски определяются, исходя из моделей интенсивностей радиационных рисков, рекомендуемых Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) [2]. Последние содержат параметры, модифицирующие радиационный риск при одной и той же дозе облучения, в зависимости от пола и возраста облучённых лиц,

Горский А.И.* – вед. научн. сотр., к.т.н.; Чекин С.Ю. – зав. лаб.; Максютов М.А. – зав. отд., к.т.н.; Меняйло А.Н. – вед. научн. сотр., к.б.н.; Корело А.М. – ст. научн. сотр.; Туманов К.А. – зав. лаб., к.б.н.; Зеленская Н.С. – научн. сотр.; Лашкова О.Е. – научн. сотр.; Иванов В.К. – зам. директора по научн. работе, Председатель РНКРЗ, чл.-корр. РАН. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

*Контакты: 249035, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 4. Тел.: (484) 399-32-60; e-mail: nrer@obninsk.com.

а также от фоновых (в отсутствие облучения) показателей онкозаболеваемости и онкосмертности, характерных для этих облучённых лиц. Модели интенсивностей радиационных рисков идентифицированы, в основном, на данных наблюдений за японской когортой лиц, переживших атомные бомбардировки в 1945 г. [3, 4]. Однако считается, что эти модели пригодны для прогноза пожизненных радиационных рисков в любой конкретной когорте или популяции при учёте специфических для неё фоновых показателей заболеваемости и смертности [5].

В соответствии с принятой в целях нормирования линейной беспороговой моделью риска стохастических эффектов пожизненный радиационный риск при малых дозах облучения пропорционален дозе. Современные оценки коэффициентов пожизненных радиационных рисков на единицу дозы, рассчитанные для некоторой стандартной популяции, приведены в Публикации 103 МКРЗ [2].

Целью исследования является расчёт коэффициентов пожизненных радиационных рисков населения РФ на основе современных моделей риска МКРЗ [2], а также анализ применимости для российского населения соответствующих рекомендаций МКРЗ по величине дозовых ограничений и пределов облучения.

Материалы и методы

На рис. 1 приведено возрастное распределение стандартной мировой популяции ВОЗ, актуальное на период времени с 2000 по 2025 гг., которое используется мировыми канцер-регистрами, например SEER [6, 7]. Распределение одинаково для обоих полов.

Рис. 1. Возрастная структура популяции ВОЗ (2000-2025 гг.) [4].

При расчёте коэффициентов пожизненных радиационных рисков населения РФ использовались демографические [8] и медико-статистические данные [9] за 2017 г. Возрастные структуры мужского и женского населения РФ в 2017 г. приведены на рис. 2 и 3 соответственно. По сравнению со стандартной мировой популяцией ВОЗ, население РФ в среднем старше, с большей долей лиц в возрасте старше 55 лет.

Рис. 2. Возрастная структура популяции РФ (2017 г., мужчины).

Рис. 3. Возрастная структура популяции РФ (2017 г., женщины).

Для оценки радиационных рисков смерти по причине рака в Публикации 103 МКРЗ [2] использован подход, отличный от подходов, применённых ранее в Публикации 60 МКРЗ [10]: оценка риска смерти осуществляется через риск заболеваемости, умноженный на коэффициент летальности данного заболевания.

Как и ранее, для переноса оценок риска между популяциями используется взвешенная сумма оценок по мультипликативной и аддитивной моделям риска. При этом приращение к спонтанной заболеваемости за счёт облучения, интенсивность избыточного абсолютного риска (*EAR*) задаются следующим выражением:

$$EAR = EAR^{mult} \cdot p + EAR^{add} \cdot (1 - p), \quad (1)$$

где **mult** и **add** – индексы модели, мультипликативной и аддитивной соответственно; **EAR** обычно выражается в виде числа новых случаев заболеваний на 10 тыс. чел.-лет наблюдения.

Согласно [2], параметр **p** равен 0 для рака молочной железы и костного мозга, 1 – для рака щитовидной железы и кожи, 0,3 – для рака лёгкого и 0,5 – для всех остальных локализаций рака.

Для оценки последствий облучения МКРЗ [2] рекомендует к применению следующие модели радиационных рисков онкологической заболеваемости.

Для солидных раков определённой локализации (**T**) риск от однократного облучения дозой **d** в возрасте **g** даётся в виде **EAR** и имеет вид [2]:

для мультипликативной модели:

$$EAR^{mult}(g, a, T, s, d) = \lambda_{sol}(T, s, a) \cdot d \cdot \beta_{mult}(T, s) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{mult}(T)} \cdot \exp\left(\alpha_{mult}(T) \cdot \frac{g-30}{10}\right), \quad (2)$$

для аддитивной модели:

$$EAR^{add}(g, a, T, s, d) = d \cdot \beta_{add}(T, s) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{add}(T)} \cdot \exp\left(\alpha_{add}(T) \cdot \frac{g-30}{10}\right), \quad (3)$$

где λ_{sol} – показатель спонтанной заболеваемости; **T** – локализация опухоли (ткань); **s** – пол; **g** – возраст при облучении; **a** – возраст дожития; **d** – доза облучения; β_{mult} , ω_{mult} , α_{mult} – параметры мультипликативной модели; β_{add} , ω_{add} , α_{add} – параметры аддитивной модели. Параметры β зависят от пола и локализации опухоли, остальные только от локализации. β_{mult} представляет избыточный относительный риск (**ERR**) на единицу эквивалентной дозы (на 1 Зв) в возрасте 70 лет при облучении в 30 лет, β_{add} – избыточную заболеваемость на 10 тыс. человек в год в возрасте 70 лет после облучения дозой 1 Зв в возрасте 30 лет. Численные значения коэффициентов моделей риска приведены в Публикации 103 МКРЗ [2].

Как следует из моделей (2, 3), помимо локализации опухоли, пола и дозы приращение к спонтанной онкологической заболеваемости, обусловленное облучением, зависит от достигнутого возраста и возраста при облучении.

Рассмотрим распределение радиационного риска в двумерном пространстве этих переменных. Для примера выберем такие социально значимые онкологические заболевания как рак желудка, рак лёгких и рак молочной железы для женщин.

Произведём расчёт динамики **EAR** от однократного облучения в зависимости от возраста при облучении и достигнутого возраста с учётом конкуренции рисков умереть от других причин кроме рака, посредством использования функции здорового дожития **S(g,a)**, которая представляет вероятность дожития от возраста **g** до возраста **a** без проявления новых случаев рака. Формула для расчёта такого риска **LR(g,a,d)** при облучении в дозе **d** в соответствии с выражением (1) будет иметь вид:

$$LR(g, a, d) = (EAR^{mult}(g, a, d) \cdot (1 - p) + EAR^{add}(g, a, d) \cdot p) \cdot S(g, a) \cdot \Phi(a - g - lp), \quad (4)$$

где $a \geq g$, функция $\Phi(a - g - lp)$ представляет собой ступенчатую функцию Хэвисайда для учёта минимального латентного периода индукции радиогенных солидных раков $lp=10$ лет. Если аргумент функции Хэвисайда равен нулю, значение функции равно 0,5, если больше нуля, то значение функции равно 1 и равно нулю в противоположном случае.

Пожизненный радиационный риск рака рассчитывается как сумма рисков для отдельных локализаций рака, в предположении, что возникновение множественных радиогенных раков маловероятно.

Результаты и обсуждение

Рак желудка

На рис. 4 приведена карта изолиний годового радиационного риска рака желудка $LR(g,a,d)$ в зависимости от возраста при облучении (абсцисса) и достигнутого возраста (ордината) при однократной дозе $d=1$ мЗв, рассчитанная по формулам (1-4) с учётом минимального латентного периода индукции радиогенных раков данной локализации. Расчёты проведены с возрастным распределением ВОЗ [6] (рис. 1, 2) и показателями смертности и заболеваемости МКРЗ [2].

Рис. 4. Карта зависимости годовых радиационных рисков от возраста при облучении и достигнутого возраста (рак желудка).

Прокомментируем данный рисунок. Для примера рассмотрим возраст при облучении 20 лет (мужчины). В соответствии с принятым латентным периодом 10 лет первые радиогенные раки ожидаются в возрасте больше 30 лет. Максимум годового приращения к спонтанной заболеваемости ожидается в 65-75 лет при возрасте при облучении 0-1 год. Цветовая палитра «радуга» отражает эту зависимость (первая синяя шкала – нулевой риск). Цифровые значения на шкале означают значения риска на изолиниях. Максимум годового риска не превышает 10^{-6} , то есть 1 случай на миллион человек.

Если для мужчин максимум годового риска при достигнутом возрасте 60-70 лет, для женщин – 65-75 лет.

Пожизненный радиационный риск $LAR(g)$ на 10000 человек при облучении в возрасте g определяется суммированием LR по достигнутому возрасту с учётом корректировки на малые дозы DDREF (коэффициента дозы и мощности дозы):

$$LAR(g, d) = 10^4 \cdot \delta \cdot \sum_{k=g}^{amax} LR(g, k, d), \quad (5)$$

где $amax$ – максимальный возраст дожития в популяции, $\delta=1/DDREF=0,5$.

Зависимость $LAR(g)$ иллюстрирует рис. 5.

Рис. 5. Пожизненные радиационные риски рака желудка в зависимости от возраста при облучении.

Пожизненные риски максимальны для минимальных возрастов при облучении.

Пожизненный риск для популяции (с учётом возрастной структуры) **LARP** для больших и стабильных во времени популяций рассчитывается путём суммирования годовых рисков от возраста при облучении **g** до максимального возраста дожития с весом численности возрастных групп:

$$LARP = \sum_{g=0}^{a \max} LAR(g) \cdot \varepsilon_g, \quad (6)$$

где ε – доля группы возраста **g** от полной численности популяции.

В формуле (6) латентный период учтён посредством введения функции Хэвисайда в соответствии с (4).

Если просуммировать зависимости на рис. 5 в соответствии с (6), получим **LARP=0,073** (73 при дозе 1 Зв) для мужчин и **LARP=0,1** (100 при 1 Зв) для женщин, значения, приведённые в табл. 1, 2 на 10000 человек.

Рак лёгких

Карты годовых радиационных рисков для рака лёгких приведены на рис. 6. Максимум годового риска наблюдается для возраста при облучении 60-65 лет.

Рис. 6. Карта зависимости годовых радиационных рисков от возраста при облучении и достигнутого возраста (рак лёгких).

Зависимость пожизненного риска от возраста при облучении иллюстрирует рис. 7. Максимум пожизненного риска, согласно модели, в возрасте при облучении 35-40 лет.

Рис. 7. Пожизненные радиационные риски рака лёгких в зависимости от возраста при облучении.

Рак молочной железы (женщины)

Результаты оценок риска индукции радиогенного рака молочной железы приведены на рис. 8, где в левой части рисунка – карта годовых рисков, а на правой – зависимость пожизненного риска от возраста при облучении.

Рис. 8. Карта зависимости годовых радиационных рисков от возраста при облучении и достигнутого возраста (рак молочной железы) и пожизненный радиационный риск в зависимости от возраста при облучении.

Коэффициенты пожизненного радиационного риска для различных популяций в сравнении со стандартной популяцией МКРЗ [2] приведены в табл. 1 и 2. Во второй колонке таблиц приведены номинальные коэффициенты риска с учётом летальности для стандартной (референтной) популяции МКРЗ, по данным таблицы А.4.18 из Публикации 103 МКРЗ [2]. В третьей и четвёртой колонках – аналогичные коэффициенты риска для стандартной мировой популяции ВОЗ [8] и популяции РФ 2017 г. [6], рассчитанные с применением эпидемиологических показате-

телей (заболеваемости и смертности) европейско-американо-азиатской популяции по данным МКРЗ [2], в пятой колонке – коэффициенты риска для популяции РФ 2017 г. по данным российской медико-демографической статистики [6, 7].

Таблица 1

**Коэффициенты пожизненного радиационного риска мужского населения
для различных популяций (случаев на 10000 человек на 1 Зв)**

Локализация рака	Стандартная популяция МКРЗ	Стандартная популяция ВОЗ, эпидем. показатели МКРЗ	Популяция РФ 2017 г., эпидем. показатели МКРЗ	Популяция РФ 2017 г., эпидем. показатели РФ 2017 г.
Пищевод	14	15	14	8
Желудок	66	73	33	35
Толстая кишка	69	80	40	33
Печень	41	45	30	24
Лёгкие	75	72	71	51
Мочевой пузырь	25	29	15	13
Щитовидная железа	4	2	2	2
Красный костный мозг (лейкозы)	43	55	73	75
Другие солидные	120	107	63	66
Суммарный риск	457	477	342	308

Таблица 2

**Коэффициенты пожизненного радиационного риска женского населения
для различных популяций (случаев на 10000 человек на 1 Зв)**

Локализация рака	Стандартная популяция МКРЗ	Стандартная популяция ВОЗ, эпидем. показатели МКРЗ	Популяция РФ 2017 г., эпидем. показатели МКРЗ	Популяция РФ 2017 г., эпидем. показатели РФ 2017 г.
Пищевод	16	13	14	8
Желудок	88	101	42	53
Толстая кишка	30	36	17	17
Печень	19	23	13	11
Лёгкие	151	145	133	82
Молочная железа	124	127	55	61
Яичники	18	21	11	11
Мочевой пузырь	22	24	16	12
Щитовидная железа	16	14	9	7
Красный костный мозг (лейкозы)	33	35	54	54
Другие солидные	100	68	50	60
Суммарный риск	617	605	414	376

В табл. 1 и 2 вторая, третья и четвёртая колонки соответствуют варианту расчёта рисков, в котором используются эпидемиологические показатели МКРЗ [2], поэтому различия в коэффициентах пожизненных радиационных рисков между этими колонками обусловлены только различиями в демографическом составе соответствующих популяций. Вследствие только демографических отличий суммарный риск для населения РФ меньше, чем для стандартной популяции МКРЗ (на 25% для мужчин и на 33% для женщин), и меньше, чем для стандартной популяции ВОЗ (на 28% для мужчин и на 32% для женщин). Этот эффект обусловлен тем, что российская популяция более возрастная, чем стандартные популяции ВОЗ или МКРЗ (рис. 1-3), а пожизненный риск для большинства локализаций рака уменьшается с возрастом при облучении, как показано примерами расчётов на рис. 5 и 8.

При использовании российских эпидемиологических показателей заболеваемости и смертности [7] коэффициенты риска для населения РФ становятся ещё меньше: по сравнению

со стандартной популяцией МКРЗ – на 23% для мужчин и на 39% для женщин. Это связано с большими показателями общей смертности российского населения по сравнению с показателями, используемыми МКРЗ [2]. Ранняя смерть от причин, не связанных с радиогенными раками, уменьшает пожизненный радиационный риск последних.

Выводы

Коэффициенты пожизненных радиационных рисков солидных раков для населения РФ, рассчитанные по моделям МКРЗ [2] с использованием медико-демографических данных РФ, существенно меньше (до двух раз) аналогичных коэффициентов МКРЗ, а коэффициенты пожизненного радиационного риска лейкозов для населения РФ в 1,6-1,7 раза превышают аналогичные коэффициенты МКРЗ.

Коэффициенты риска по локализациям рака используются МКРЗ для определения тканевых коэффициентов при вычислении эффективных доз и дозовых коэффициентов. Приведённые в данной работе вычисления показывают, что существенные неопределённости оценки эффективных доз могут быть связаны с медико-демографическими особенностями конкретных популяций.

В совокупности по всем локализациям рака коэффициенты пожизненных радиационных рисков для населения РФ в 1,5-1,6 раза меньше аналогичных коэффициентов МКРЗ. При одной и той же дозе облучения российское население характеризуется меньшими радиационными рисками, чем стандартные популяции МКРЗ и ВОЗ, хотя и за счёт конкуренции смертности от причин, не связанных с радиогенными раками.

Поэтому дозовые ограничения и пределы, рекомендованные МКРЗ в целях радиационной защиты, для населения РФ можно рассматривать как приемлемые и достаточно консервативные.

Литература

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
2. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 2-4. 332 p.
3. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998 //Radiat. Res. 2007. V. 168, N 1. P. 1-64.
4. Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsui T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987 //Radiat. Res. 1994. V. 137 (Suppl. 1). P. S68-S97.
5. Меньяло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максюттов М.А., Корело А.М., Туманов К.А., Пряхин Е.А., Ловачев С.С., Карпенко С.В., Кашеева П.В., Иванов В.К. Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки //Радиация и риск. 2018. Т. 27. № 1. С. 8-21.
6. The Surveillance, Epidemiology, and End Results (SEER). [Электронный ресурс]. URL: <https://seer.cancer.gov/stdpopulations/world.who.html> (дата обращения 11.11.2019).
7. Report of the NCI-CDC Working Group to Revise the 1985 NIH. Radioepidemiological Tables. NIH Publication No. 03-5387. Bethesda, MD: National Cancer Institute, 2003.
8. Демографический ежегодник России. 2017. Статистический сборник. М.: Росстат, 2017. 265 с.
9. Злокачественные новообразования в России в 2017 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, 2018. 250 с.
10. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 //Ann. ICRP. 1991. V. 21, N 1-3. 215 p.

Transfer of ICRP models of radiation risk to the population of the Russian Federation

Gorski A.I., Chekin S.Yu., Maksoutov M.A., Menyajlo A.N., Korelo A.M.,
Tumanov K.A., Zelenskaya N.S., Lashkova O.E., Ivanov V.K.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

According to the Russian radiation safety standards, the maximum value of the individual lifetime radiation risk of $5 \cdot 10^{-5}$ is used to justify the limits of radiation doses to the population during the year. At the same time, the lifetime radiation risk of cancer for the population is proportional to the dose with a nominal radiation risk factor of $5.5 \cdot 10^{-2}$ per 1 Sv. Currently, the assessment of lifetime attributable risks is based on models of radiation risk intensities recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The models contain parameters that allow estimating sex- and age-specific risk of exposed individuals, as well as background cancer incidence and cancer mortality rates specific to exposed people. In aggregate, lifetime radiation risk coefficients for the population of the Russian Federation are 1.5-1.6 times lower than the ICRP risk coefficients for all cancer sites. Cancer radiation risks of the Russian population are lower than the risks of the standard ICRP and WHO populations got the same radiation dose as the Russian people. In reality, it is the result of increased mortality caused by non-radiation-induced cancers. Therefore, radiation dose constraints and dose limits recommended by ICRP for radiation protection can be considered as acceptable and rather conservative for the population of the Russian Federation.

Key words: *radiation risk intensity, excess radiation risk, survival function, lifetime radiation risk, models of radiation risk, Publication 103 ICRP, nominal risk coefficient, cancer localization, transfer risk models, population of the Russian Federation.*

Gorski A.I.* – Lead. Researcher, C. Sc., Tech.; Chekin S.Yu.* – Head of Lab.; Maksoutov M.A. – Head of Dep., C. Sc., Tech.; Menyajlo A.N. – Lead. Researcher, C. Sc., Biol.; Korelo A.M. – Senior Researcher; Tumanov K.A. – Head of Lab., C. Sc., Biol.; Zelenskaya N.S. – Researcher; Lashkova O.E. – Researcher; Ivanov V.K. – Deputy Director, Chairman of RSCR, Corresponding Member of RAS. A. Tsyb MRRC.

*Contacts: 4 Korozyov str., Obninsk, Kaluga region, 249035, Russia. Tel: (484) 399-32-60; e-mail: nrer@obninsk.com.

References

1. *Radiation Safety Standards* (RSS-99/2009): Sanitary epidemiological rules and standards SanPin 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal Centre of Hygiene and Epidemiology Rospotrebnadzora, 2009, 100 p. (In Russian).
2. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 2-4, 332 p.
3. **Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K.** Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat. Res.*, 2007, vol. 168, no. 1, pp. 1-64.
4. **Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsui T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K.** Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat. Res.*, 1994, vol. 137 (Suppl. 1), pp. S68-S97.
5. **Menyajlo A.N., Chekin S.Yu., Kashcheev V.V., Maksioutov M.A., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin E.A., Lovachev S.S., Karpenko S.V., Kashcheeva P.V., Ivanov V.K.** Lifetime attributable risks from external and internal exposure to radiation: method for estimating. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 8-21. (In Russian).
6. The Surveillance, Epidemiology, and End Results (SEER). Available at: <https://seer.cancer.gov/stdpopulations/world.who.html> (Accessed 11.11.2019).
7. Report of the NCI-CDC Working Group to Revise the 1985 NIH. Radioepidemiological Tables. NIH Publication No. 03-5387. Bethesda, MD, National Cancer Institute, 2003.
8. *Demographic year-book of Russia*. 2017. Statistical collection. Moscow, Rosstat, 2017, 265 p. (In Russian).
9. *Malignant neoplasms in Russia in 2017 (morbidity and mortality)*. Eds.: A.D. Kaprin, V.V. Starinskiy, G.V. Petrova. Moscow, P. Hertsen MORI, 2018. 250 p. (In Russian).
10. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP*, 1991, vol. 21, no. 1-3, 215 p.