РАЗДЕЛ 2

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-1-8-21

УДК 614.876

Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки**Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максютов М.А., Корело А.М., Туманов К.А.,
Пряхин Е.А., Ловачев С.С., Карпенко С.В., Кашеева П.В., Иванов В.К.**

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

В статье представлен метод оценки пожизненного радиационного риска при внешнем и внутреннем облучении человека с учётом его пола и возраста, разработанный для осуществления принципа социально приемлемого риска. Согласно российским нормам радиационной безопасности при планируемом облучении приемлемый индивидуальный пожизненный риск для населения и персонала не должен превышать 5×10^{-5} и 1×10^{-3} соответственно. В этом документе для нормирования были использованы номинальные коэффициенты риска для так называемой композитной популяции, рекомендованные Международной комиссией по радиологической защите. Однако, эти коэффициенты неприменимы для прогноза радиологических последствий в какой-либо реальной популяции. Для обоснования пределов доз облучения, установленных в российских нормах радиационной безопасности, были использованы модели радиационных рисков, изложенные в Публикации 103, выпущенной Международной комиссией по радиологической защите. Поэтому для оценки радиационных рисков для российского населения целесообразно также использовать модели, рекомендованные этой организацией. Метод оценки пожизненного радиационного риска разработан на основе и в соответствии с международными рекомендациями и является научным обеспечением принципа социально приемлемого риска для населения России, что позволяет прогнозировать последствия для здоровья людей, подвергшихся воздействию ионизирующей радиации при планируемом, существующем или аварийном облучении. Результаты, представленные в статье, могут быть полезны для специалистов в области радиационной безопасности, радиационной гигиены и врачей-радиологов и радиобиологов.

Ключевые слова: *российская популяция, радиационная безопасность, НРБ-99/2009, принцип социально приемлемого риска, радиационный риск, радиобиологические эффекты, радиоиндуцированные онкологические заболевания, модели радиационного риска МКРЗ, дозовые коэффициенты МКРЗ, путь поступления радионуклидов в организм, внешнее облучение, внутреннее облучение, радионуклиды, AMAD, ожидаемая эффективная доза, эквивалентная доза.*

Введение

В государственной политике РФ [1] указывается на необходимость изменения законодательства в области радиационной безопасности.

В соответствии с Международными основными нормами безопасности МАГАТЭ (ОНБ МАГАТЭ) [2] риски для здоровья людей при облучении от источников ионизирующего излучения (ИИИ) должны быть оценены в зависимости от ситуации облучения: планируемого, существую-

Меняйло А.Н.* – ст. научн. сотр., к.б.н.; Чекин С.Ю. – зав. лаб., к.б.н.; Кашеев В.В. – зав. лаб., к.б.н.; Максютов М.А. – зав. отд., к.т.н.; Корело А.М. – ст. научн. сотр.; Туманов К.А. – зав. лаб., к.б.н.; Пряхин Е.А. – научн. сотр.; Ловачев С.С. – мл. научн. сотр.; Карпенко С.В. – инженер; Кашеева П.В. – ст. научн. сотр., к.б.н.; 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: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-32-81; e-mail: nrer@obninsk.com.

щего и аварийного. В параграфе 3.110 ОНБ МАГАТЭ подчёркивается, что работодатели обязаны предоставить работникам необходимую информацию о рисках для здоровья, связанных с их профессиональным облучением при нормальной эксплуатации ИИИ, планируемых при эксплуатации событиях и в аварийных условиях [2]. Кроме того, правительства обязаны информировать лиц, работающих в условиях постоянного облучения, о потенциальных рисках для здоровья. После завершения восстановительных или реабилитационных мероприятий должен быть установлен радиационный контроль и надлежащий учёт остаточных радиационных рисков (Требования 47 и 49 ОНБ МАГАТЭ) [2].

Согласно российским Нормам радиационной безопасности [3] в ситуациях планируемого облучения (в нормальных условиях эксплуатации источников ионизирующего излучения) приемлемый индивидуальный пожизненный риск для населения и персонала не должен превышать 5×10^{-5} и 1×10^{-3} соответственно. В действующих в России Нормах радиационной безопасности для нормирования пределов доз облучения были использованы номинальные коэффициенты риска, для так называемой композитной популяции, рекомендованные Международной комиссией по радиологической защите. Однако, эти коэффициенты неприменимы для прогноза медицинских и биологических последствий радиационного воздействия в любой реальной популяции, в частности, российской популяции. Для обоснования пределов доз облучения, установленных в [3], были использованы модели радиационных рисков, изложенные в Публикации 103 [4], выпущенной Международной комиссией по радиологической защите. Поэтому для оценки радиационных рисков для российской популяции целесообразно также использовать рекомендованные этой организацией модели [4].

Общая методика расчёта коэффициентов риска для российской популяции при внешнем облучении изложена в [5]. При вычислении радиационных рисков необходимо учитывать показатели фоновых (в отсутствие техногенного облучения) рисков возникновения злокачественных новообразований и фоновых показателей общей смертности для различных регионов России.

В данной статье представлен метод оценки пожизненного радиационного риска как при внешнем, так и при внутреннем облучении, учитывающий пол и возраст облучённых лиц. При этом учтены современные эпидемиологические данные по оценке радиационных рисков [6-8].

Материалы и методы

Модели радиационных рисков

Под избыточным абсолютным риском (EAR) развития злокачественного заболевания или в случае смерти от рака понимается приращение соответствующего фонового показателя риска λ_0 после радиационного воздействия (1).

$$EAR = \lambda - \lambda_0. \quad (1)$$

Кроме избыточного абсолютного риска в радиационной эпидемиологии применяется показатель избыточного относительного риска (ERR). Связь между этими двумя рисками представлена в (2).

$$EAR = ERR \cdot \lambda_0. \quad (2)$$

В данной работе условимся рассматривать «однократное облучение» или «однократное поступление радионуклида» в организм как облучение или поступление радионуклида в организм в течение одного года.

Модель МКРЗ [4] избыточного абсолютного риска (аддитивная модель) заболевания солидным раком после однократного облучения представлена в формуле (3), а модель МКРЗ избыточного относительного риска после однократного облучения (мультипликативная модель) заболеваемости раком представлена в формуле (4).

$$EAR_{\text{МКРЗ однокр}}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{EAR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{EAR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{EAR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}, \quad (3)$$

$$ERR_{\text{МКРЗ однокр}}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{ERR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{ERR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{ERR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}. \quad (4)$$

Здесь s – пол, c – локализация опухоли, g – возраст при облучении, a – возраст, на который рассчитывается риск (возраст дожития), d – доза облучения, β_{EAR} , ω_{EAR} , γ_{EAR} – параметры аддитивной модели, β_{ERR} , ω_{ERR} , γ_{ERR} – параметры мультипликативной модели. Значения этих параметров представлены в табл. 1.

В модели МКРЗ минимальный латентный период для солидных раков T_{LS} равен 10-ти годам. То есть, в течение 10 лет после облучения избыточные риски, рассчитанные как по мультипликативной, так и по аддитивной моделям, принимаются равными нулю. Другими словами:

$EAR_{\text{МКРЗ однокр}}$ и $ERR_{\text{МКРЗ однокр}}$ равны 0, если $a < g + T_{LS}$.

Таблица 1

Параметры моделей риска заболеваемости для различных локализаций солидных злокачественных новообразований, модели МКРЗ [4]

Локализация опухоли	Пол	β_{ERR} , Гр ⁻¹	γ_{ERR}	ω_{ERR}	β_{EAR} , 10 ⁻⁴ ×Гр ⁻¹	γ_{EAR}	ω_{EAR}
Все солидные	муж. жен.	0,35 0,58	-17	-1,65	43,20 59,83	-24	2,22
Пищевод	муж. жен.	0,40 0,65	-17	-1,65	0,48 0,66	64	2,38
Желудок	муж. жен.	0,23 0,38	-17	-1,65	6,63 9,18	-24	2,38
Толстая кишка	муж. жен.	0,68 0,33	-17	-1,65	5,76 2,40	-24	2,38
Печень	муж. жен.	0,25 0,40	-17	-1,65	4,18 1,30	-24	2,38
Лёгкие	муж. жен.	0,29 1,36	+17	-1,65	6,47 8,97	1	4,25
Молочная железа	жен.	0,87	0	-2,26	10,9	-39	3,5*
Яичник	жен.	0,32	-17	-1,65	1,47	-24	2,38
Мочевой пузырь	муж. жен.	0,67 1,10	-17	-1,65	2,00 2,77	-11	6,39
Щитовидная железа	муж. жен.	0,53 1,05	-56	0,00	0,69 2,33	-24	0,01
Остальные солидные	муж. жен.	0,22 0,17	-34	-1,65	7,55 10,45	-24	2,38

* Для рака молочной железы $\omega_{EAR}=1$ при возрасте дожития больше 50 лет.

Согласно модели МКРЗ для вычисления избыточного абсолютного риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями (ЗНО) после однократного облучения необходимо учитывать взвешивание мультипликативной и аддитивной моделей и связь (2) между избыточным относительным и абсолютным риском (5).

$$EAR_{\text{однокр}}^{\text{сол}}(s, c, g, a, d) = p(c) \cdot \lambda_0^{\text{заб}}(s, a, c) \cdot ERR_{\text{однокр}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, d) + (1 - p(c)) \cdot EAR_{\text{однокр}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, d) \quad (5)$$

Вычисление EAR заболеваемости лейкозами после однократного облучения производится по формуле (6).

$$EAR_{\text{однокр}}^{\text{лейк}}(s, g, a, d) = \beta(s, g) \cdot d \cdot (1 + 0,79 \cdot d) \cdot \exp[\alpha(s, g) \cdot (a - g - 25)] \quad (6)$$

Здесь, так же как и в случае с риском для солидных типов рака, s – пол, g – возраст при облучении, a – возраст, на который рассчитывается риск, d – доза однократного облучения в Гр, β и α – параметры модели избыточного абсолютно риска заболеваемости лейкозами. Их значения, зависящие от возраста на момент облучения, приведены в табл. 2.

Минимальный латентный период для заболеваемости лейкозами T_{LL} равен 2 годам, и:

$$EAR_{\text{однокр}}^{\text{лейк}}(s, g, a, d) = 0, \text{ если } a < g + T_{LL}.$$

Таблица 2

Параметры модели для вычисления избыточного абсолютно риска заболеваемости лейкозами после однократного облучения

Возраст при облучении	β		α	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины
0-19 лет	3,3	6,6	-0,17	-0,07
20-39 лет	4,8	9,7	-0,13	-0,03
> 40 лет	13,1	26,4	-0,07	0,03

В итоге, можно записать общее выражение (7) для вычисления избыточного абсолютно риска заболеваемости раком различных локализаций после однократного облучения:

$$EAR_{\text{однокр}}^{\text{заб}}(s, c, g, a, d) = \begin{cases} EAR_{\text{однокр}}^{\text{сол}}(s, c, g, a, d), & \text{для } c = \text{солидная локализация опухоли} \\ EAR_{\text{однокр}}^{\text{лейк}}(s, g, a, d), & \text{для } c = \text{лейкоз} \end{cases} \quad (7)$$

где c – одна из локализаций солидных ЗНО из табл. 1, или лейкоз.

Для вычисления радиационных рисков смертности МКРЗ рекомендует использовать риски заболеваемости раком, умноженные на так называемую долю летальности. Доля летальности вычисляется следующим образом:

$$k(s, a, c) = \frac{\lambda_0^{\text{смерт}}(s, a, c)}{\lambda_0^{\text{заб}}(s, a, c)}, \quad \lambda_0^{\text{заб}}(s, a, c) > 0 \quad (8)$$

где $\lambda_0^{\text{смерт}}$ – показатель смертности от рака в год для заданного пола s , возраста a и локализации c ; $\lambda_0^{\text{заб}}$ – показатель заболеваемости раком в год для заданного пола s , возраста a и локализации c .

Таким образом, избыточный абсолютно риск смерти от рака после однократного облучения вычисляется по формуле (9).

$$EAR_{\text{однокр}}^{\text{смерт}}(s, c, g, a, d) = k(s, a, c) \cdot EAR_{\text{однокр}}^{\text{заб}}(s, c, g, a, d). \quad (9)$$

Для вычисления прогноза радиационного риска используется так называемая функция здорового дожития (в случае вычислений рисков заболеваемости) или функция дожития (в случае вычисления рисков смертности).

Функция дожития $S(s, e, a)$ характеризует вероятность для человека пола s и возраста e дожить до возраста a . Формула для вычисления S представлена ниже.

$$S(s, e, a) = \exp \left[- \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{\text{общ. смерт}}(s, k) \right]. \quad (10)$$

$$a > e$$

При этом в возрасте e и ранее функция дожития по определению принимается равной единице, то есть $S(s, e, a) = 1$ при $a \leq e$.

Здесь $\lambda_0^{\text{общ. смерт}}(s, k)$ – показатель общей фоновой смертности в год от всех причин для лиц пола s и в возрасте k .

$S(s, e, a)$ может быть найдена при использовании формулы:

$$S(s, e, a) = \frac{S(s, 0, a)}{S(s, 0, e)}. \quad (11)$$

$$a > e$$

Эту формулу можно получить, исходя из теоремы Байеса.

Функция здорового дожития $S'(s, c, e, a)$ характеризует вероятность для человека пола s и возраста e дожить до возраста a и не заболеть при этом раком локализации c .

$$S'(s, c, e, a) = \exp \left[- \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{\text{общ. смерт}}(s, k) + \lambda_0^{\text{заб}}(s, k, c) - \lambda_0^{\text{смерт}}(s, k, c) \right]. \quad (12)$$

$$a > e$$

Так же как и $S(s, e, a)$, функция $S'(s, c, e, a) = 1$ при $a \leq e$. И, аналогично, $S(s, e, a)$:

$$S'(s, c, e, a) = \frac{S'(s, c, 0, a)}{S'(s, c, 0, e)}. \quad (13)$$

$$a > e$$

Обозначим избыточный абсолютный риск с весом вероятности дожития (здорового дожития) как EAR' . Тогда:

$$EAR'_{\text{однокр}}^{\text{заб}}(s, c, g, a, d) = S'(s, c, e, a) \cdot EAR_{\text{однокр}}^{\text{заб}}(s, c, g, a, d), \quad (14)$$

$$EAR'_{\text{однокр}}^{\text{смерт}}(s, c, g, a, d) = S(s, e, a) \cdot EAR_{\text{однокр}}^{\text{смерт}}(s, c, g, a, d). \quad (15)$$

Для вычисления избыточного абсолютного риска заболеваемости раком или смертности от рака с весом функции здорового дожития или функции дожития, соответственно, от многократного облучения, требуется провести суммирование $EAR_{\text{однокр}}$ по возрасту на момент облучения с соответствующей дозой облучения:

$$EAR'^{\text{заб}}(s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \sum_{i=1}^n EAR'_{\text{однокр}}^{\text{заб}}(s, c, g_i, a, d_i), \quad (16)$$

$$EA R'_{смерт} \cdot (s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \sum_{i=1}^n EA R'_{однокр}^{смерт} \cdot (s, c, g_i, a, d_i). \quad (17)$$

Здесь n – количество облучений, $g_1, \dots, g_n$ – возраст на момент облучения, $d_1, \dots, d_n$ – соответствующие дозы облучения, полученные органом или тканью c . В совокупности $g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n$ определяют дозовую историю облучения для данного органа или ткани.

Пожизненный радиационный риск применяют для расчёта риска возникновения онкологического заболевания или смерти от онкологического заболевания (в результате радиационного облучения) в течение всей жизни человека. Иными словами, это интегральный показатель риска, характеризующий радиационные последствия в целом за период оставшейся жизни.

Пожизненный атрибутивный риск (LAR) характеризует число радиационно-индуцированных онкологических заболеваний или смертей, превышающих фоновое число, которые могут возникнуть в течение всей последующей жизни после облучения группы лиц, у которых одинаковы модифицирующие риск факторы (пол, возраст при облучении и др.).

Величина LAR вычисляется путём суммирования EAR с весом вероятности дожития (здорового дожития) по всем возможным возрастам дожития, начиная от текущего возраста (18), (19).

$$LAR^{заб} (s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} [EA R'^{заб} \cdot (s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)]. \quad (18)$$

$$LAR^{смерт} \cdot (s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} [EA R'^{смерт} \cdot (s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)]. \quad (19)$$

Здесь $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, равный 2 для солидных типов опухолей и 1 – для лейкозов, $EA R'^{заб}$ – избыточный абсолютный риск заболеваемости раком с весом вероятности здорового дожития от возраста e до a , $EA R'^{смерт}$ – избыточный абсолютный риск смертности от рака с весом вероятности дожития от возраста e до a , n – количество облучений, $g_1, \dots, g_n$ – возраст на момент облучения, $d_1, \dots, d_n$ – соответствующие дозы облучения, полученные органом или тканью c , e – текущий возраст человека, в котором он жив, a_{max} – максимальный возраст дожития, равный 100 лет.

Согласно МКРЗ, DDREF – это «экспертно оценённый параметр, который объясняет обычно сниженную биологическую эффективность (на единицу дозы) радиационного воздействия низких доз и низких мощностей доз, если сравнивать её с эффективностью высоких доз и высоких мощностей доз» [4].

Различие в вычислении рисков для внешнего и внутреннего облучения заключается в том, что внешнее облучение по умолчанию распределяется на всё тело человека, поэтому в расчётах можно использовать значение эквивалентной дозы, применяя её в моделях риска для всех солидных раков и лейкозов. Внутреннее облучение распределено неравномерно по телу человека. Для расчёта радиационных рисков от внутреннего облучения требуется учитывать эквивалентные дозы в отдельных органах и тканях. Если известна только ожидаемая эффективная доза (ОЭД) внутреннего облучения (и дозообразующие радионуклиды), значение ОЭД

требуется перевести в набор эквивалентных доз в отдельных органах и тканях, используя для этого базу данных (БД) тканевых коэффициентов МКРЗ [9]. Если известна объёмная активность радионуклидов, она также переводится в набор эквивалентных доз по органам и тканям, с учётом возрастной зависимости годового объёма вдыхаемого человеком воздуха [3] в случае поступления радионуклидов ингаляционным путём.

Значения **LAR** для всех типов рака в целом после внешнего облучения получают путём суммирования значений **LAR** для локализации «все солидные раки» и «лейкозы». Этот подход является общим при расчёте рисков смертности и заболеваемости.

$$LAR_{\text{внешн. все раки}}(s, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \left[LAR(s, c = \text{все солидные}, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) + \right. \\ \left. + LAR(s, c = \text{лейкоз}, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) \right]. \quad (20)$$

Величина **LAR** для всех типов рака в целом после внутреннего облучения определяется путём суммирования величин **LAR** по всем органам и тканям **c** из табл. 1, кроме локализации «все солидные раки», плюс величина **LAR** для лейкозов.

$$LAR_{\text{внутр. все раки}}(s, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \sum_{c \neq \text{все солид.}} LAR(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n). \quad (21)$$

Дозовая история $g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n$ определяется, исходя из ОЭД внутреннего облучения или объёмной активности.

Реконструкция динамики эквивалентных доз внутреннего облучения по ожидаемой эффективной дозе и объёмным активностям

Рассмотрим методику определения дозовой истории $g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n$, впервые введенной в (17), по ОЭД и по известной объёмной активности.

Исходными данными для построения такой динамики эквивалентных доз являются дозовые коэффициенты, позволяющие переводить активность различных радиоизотопов в распределение накопленных эквивалентных доз облучения в зависимости от времени после поступления радиоизотопов в организм человека. Эта информация берётся из базы данных МКРЗ [9] (БД МКРЗ) о дозовых коэффициентах (Зв/Бк). Обширная база данных содержит дозовые коэффициенты для 738 различных радионуклидов. Имеются данные как для ингаляционного, так и перорального поступления радионуклидов. Для ингаляционного поступления – по каждому радионуклиду имеются дозовые коэффициенты для 10 различных значений медианного по активности аэродинамического диаметра (AMAD), мкм: (0,001, 0,003, 0,01, 0,03, 0,1, 0,3, 1,0, 3,0, 5,0, 10,0) и трёх вариантов растворимости: медленная (S), промежуточная (M) и быстрая (F). Кроме того, в базе данных учитывается возраст поступления радионуклидов. Имеется шесть возрастных групп: от 0 до 1 года, от 1 до 2 лет, от 2 до 7 лет, от 7 до 12 лет, от 12 до 17 лет, старше 17 лет. Также отдельно имеются коэффициенты для работающих и населения. Для работы с этой базой данных МКРЗ разработала специальную программу «ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public».

В качестве примера в табл. 3 представлены дозовые коэффициенты для взрослого населения для изотопа ^{232}U и AMAD=5 промежуточной растворимости.

Таблица 3

Дозовые коэффициенты (Зв/Бк), соответствующие распределению ожидаемых накопленных эквивалентных доз по органам и ожидаемых накопленных эффективных доз на 50 лет вперёд после поступления в организм взрослого (старше 17 лет) человека, принадлежащего к группе «население», радионуклида ^{232}U с AMAD 5,0, промежуточной растворимости (по данным [9])

Орган	Время после поступления радионуклида, лет						
	1	5	10	20	30	45	50
Надпочечники	2,00E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	7,00E-07
Стенки мочевого пузыря	2,00E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	7,00E-07
Поверхность кости	4,30E-06	2,70E-05	3,90E-05	4,70E-05	5,00E-05	5,30E-05	5,40E-05
Мозг	1,90E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Молочная железа	2,00E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Пищевод	2,00E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Стенки желудка	2,00E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Стенки тонкой кишки	2,10E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	7,00E-07
Толстый кишечник	4,10E-08	1,80E-07	3,00E-07	4,60E-07	5,90E-07	7,50E-07	7,90E-07
Почки	7,50E-07	1,80E-06	2,50E-06	3,00E-06	3,20E-06	3,30E-06	3,30E-06
Печень	2,10E-07	1,50E-06	2,30E-06	3,20E-06	3,60E-06	3,80E-06	3,90E-06
Мышцы	1,90E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Яичники	3,60E-08	2,50E-07	3,90E-07	5,70E-07	7,00E-07	8,50E-07	9,00E-07
Поджелудочная железа	2,00E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Красный костный мозг	4,00E-07	2,50E-06	3,50E-06	4,20E-06	4,40E-06	4,70E-06	4,70E-06
Экстраторакальные дыхательные пути	1,70E-05	2,20E-05	2,20E-05	2,20E-05	2,20E-05	2,20E-05	2,20E-05
Лёгкие	2,90E-05	3,10E-05	3,10E-05	3,10E-05	3,10E-05	3,20E-05	3,20E-05
Кожа	1,90E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Селезёнка	1,90E-08	1,20E-07	2,10E-07	3,60E-07	4,90E-07	6,40E-07	6,80E-07
Яички	3,60E-08	2,50E-07	3,90E-07	5,70E-07	7,00E-07	8,60E-07	9,00E-07
Тимус	2,00E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Щитовидная железа	1,90E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Матка	1,90E-08	1,20E-07	2,20E-07	3,70E-07	5,00E-07	6,50E-07	6,90E-07
Остальные	3,50E-08	1,50E-07	2,50E-07	4,10E-07	5,30E-07	6,90E-07	7,30E-07
Эффективная доза	3,70E-06	4,50E-06	4,90E-06	5,20E-06	5,40E-06	5,60E-06	5,60E-06

Обозначим ожидаемую накопленную эквивалентную дозу для органа T как $H_T(\tau)$, дозовый коэффициент для эквивалентной дозы из БД МКРЗ как $C_T(\tau)$, ожидаемую накопленную эффективную дозу как $E(\tau)$, дозовый коэффициент из БД МКРЗ для эффективной дозы как $C(\tau)$, где τ – время после поступления радионуклида в организм. В базе данных МКРЗ [9] максимальное τ варьирует от 50 до 70 лет в зависимости от радионуклида и возраста на момент поступления. Пусть для определённости в дальнейших рассуждениях максимальное τ будет равно 50 годам.

По известной суммарной величине ОЭД внутреннего облучения ($E(50)$) можно рассчитать эквивалентные ожидаемые дозы при внутреннем облучении $H_T(\tau)$ в зависимости от времени с использованием таблиц, аналогичных табл. 3. Для этого необходимо:

1. Получить по данным таблицы из БД МКРЗ парциальный вклад каждого дозового коэффициента для эквивалентных доз $H_T(\tau)$ и величину дозового коэффициента для эффективной дозы $E(50)$ на 50 лет после облучения, при заданном τ (парциальный вклад $H_T(\tau)$ в $E(50)$) по формуле:

$$P_T(\tau) = \frac{C_T(\tau) \cdot W_T}{C(50)}, \quad (22)$$

где $C(50)$ – величина дозового коэффициента для получения $E(50)$, W_T – весовой коэффициент органа или ткани T , согласно [4].

2. Рассчитать эквивалентные ожидаемые дозы при внутреннем облучении $H_T(\tau)$ по формуле:

$$H_T(\tau) = \frac{P_T(\tau) \cdot E(50)}{W_T}. \quad (23)$$

При использовании формул (22) и (23) можно получить итоговую формулу для вычисления динамики накопления эквивалентной дозы для заданного органа по известной ОЭД внутреннего облучения (24).

$$H_T(\tau) = \frac{C_T(\tau) \cdot E(50)}{C(50)}. \quad (24)$$

Для формирования дозовой истории по известной объёмной активности радионуклида в среде (воздух) требуется перевести эту объёмную активность в активность, поступившую в тело человека в течение года. При ингаляционном поступлении радионуклида для этого можно воспользоваться данными НРБ-99/2009 [3] о количестве вдыхаемого воздуха в год человеком в зависимости от его возраста. В табл. 4 представлены эти данные.

Таблица 4

Количество вдыхаемого воздуха в год для разных возрастных групп населения по данным НРБ-99/2009 [3]

Возраст, лет	до 1	1-2	2-7	7-12	12-17	Взрослые (старше 17 лет)
V, тыс. м ³ в год	1,0	1,9	3,2	5,2	7,3	8,1

Для получения $H_T(\tau)$ из объёмной активности в теле человека по данным таблицы дозовых коэффициентов, аналогичной табл. 3, нужно воспользоваться следующей формулой (25):

$$H_T(\tau) = C_T(\tau) \cdot A \cdot V. \quad (25)$$

Здесь A – объёмная активность, V – годовой объём вдыхаемого воздуха по данным табл. 4 или годовой объём потребляемой пищи.

Так как в базе данных МКРЗ величины дозовых коэффициентов для расчёта эквивалентных ожидаемых доз при внутреннем облучении $H_T(\tau)$ даны не для всех значений τ , то производится линейная интерполяция по существующим значениям $H_T(\tau)$ для нахождения промежуточных. Накопленные эквивалентные дозы для каждого года после поступления радионуклида переводятся в годовые эквивалентные дозы, формируя дозовую историю облучения.

Результаты

В качестве примера расчётов пожизненных атрибутивных рисков (LAR) смертности от злокачественных новообразований ниже рассмотрены следующие варианты облучения: внешнее однократное облучение, облучение от однократного перорального поступления в организм человека радионуклида ^{137}Cs , а также облучение от однократного ингаляционного поступления в организм человека радионуклидов ^{90}Sr с AMAD=1,0 быстрой растворимости, ^{232}U с AMAD=5,0 промежуточной растворимости и ^{234}U с AMAD=1,0 промежуточной растворимости.

В расчётах в качестве фоновых показателей использовались фоновые показатели смертности от онкологических заболеваний и показатели смертности от всех причин, полученные по

данным российской статистики [10]. Величины LAR рассчитаны для 1 мЗв эквивалентной дозы внешнего облучения, а также для 1 мЗв ОЭД внутреннего облучения.

На рис. 1 и 2 (для мужчин и женщин соответственно) приведены графики зависимости пожизненного атрибутивного риска смертности от онкологических заболеваний от возраста на момент облучения (при внешнем облучении) или возраста на момент поступления радионуклида в организм (при внутреннем облучении). Из графиков на рис. 1 и 2 видно, что примерно до 50 лет при поступлении в организм ^{232}U и ^{234}U зависимость LAR от возраста незначительная. Это связано с тем, что аэрозоли этих радионуклидов в основном облучают лёгкие. Величина LAR для детей незначительно зависит от возраста при облучении. Следует отметить, что для ^{232}U наблюдаются высокие расчётные значения LAR в возрасте 0 и 1 год на момент поступления радионуклида. Это связано с тем, что для ^{232}U в младшем возрасте дозовые коэффициенты из БД МКРЗ [9] очень отличаются от дозовых коэффициентов для старших возрастов.

Рис. 1. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) онкосмертности мужчин после однократного внешнего облучения и однократных поступлений в организм радионуклидов в зависимости от возраста при облучении или поступлении радионуклида в организм.

Рис. 2. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) онкосмертности женщин после однократного внешнего облучения и однократных поступлений в организм радионуклидов в зависимости от возраста при облучении или поступлении радионуклида в организм.

Значения LAR для мужчин в молодом возрасте меньше, чем значения LAR для женщин, кроме внутреннего облучения от ^{90}Sr , где до 34 лет риск для мужчин выше риска для женщин.

Среди всех рассмотренных техногенных радионуклидов наибольшие значения LAR на 1 мЗв ОЭД при ингаляционном поступлении даёт радионуклид ^{234}U с AMAD=1,0 промежуточной растворимости. Поэтому при неизвестном составе вдыхаемых радиоактивных аэрозолей консервативная оценка LAR может быть получена в предположении, что именно этот радионуклид является дозообразующим.

Расчёты показали, что радиационный риск для женского населения России от облучения за счёт ингаляционного поступления радиоизотопов урана превышает номинальный коэффициент риска 5×10^{-5} на 1 мЗв, заложенный в обоснование пределов и ограничений НРБ-99/2009 [3]. Кроме того, радиационный риск от внешнего облучения или от перорального поступления ^{137}Cs превышает номинальный коэффициент риска НРБ-99/2009 [3] для молодых возрастов: для женщин младше 20 лет и для мужчин младше 10 лет. Эти результаты следует учитывать при реализации принципа социально приемлемого риска в России.

Обсуждение результатов

В представленной статье рассматривается метод оценки радиационных рисков на основе моделей, предложенных МКРЗ. Однако, следует упомянуть, что существуют и другие международные модели радиационных рисков, предложенные, например, Научным комитетом по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) или Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ). Существенным отличием этих моделей от моделей МКРЗ является вопрос об использовании DDREF. Модели МКРЗ являются менее консервативными, чем модели НКДАР ООН и ВОЗ, в которых DDREF не используется.

Общей особенностью международных моделей радиационного риска является то, что они в основном идентифицировались по данным когорты выживших после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки в 1945 г. Для оценки применимости этих моделей для расчёта радиационных рисков для жителей Российской Федерации требуются дополнительные исследования.

Заключение

Представленный метод расчёта пожизненного радиационного риска позволяет прогнозировать последствия для здоровья людей, подвергшихся воздействию ионизирующей радиации при планируемом, существующем или аварийном облучении.

Метод разработан на основе и в соответствии с международными рекомендациями и является научным обеспечением реализации принципа социально приемлемого риска в Российской Федерации.

Результаты, представленные в статье, могут быть полезны для специалистов в области радиационной безопасности, радиационной гигиены и врачей-радиологов и радиобиологов.

Литература

1. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утв. приказом Президента РФ 1 марта 2012 г. № Пр-539). ГАРАНТ.РУ информационно-правовой портал [Офиц. сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70190228/> (дата обращения 30.01.2018).
2. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Промежуточное издание. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности № GSR Part 3 (Interim). Вена: МАГАТЭ, 2011. 311 с.
3. 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.
4. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ): пер. с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (дата обращения 30.01.2018).
5. МУ 2.1.10.3014-12. Оценка радиационного риска у населения за счёт длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2012.
6. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Konogorov A.P., Rastopchin E.M., Khait S.E.** Case-control analysis of leukaemia among Chernobyl accident emergency workers residing in the Russian Federation, 1986-1993 //J. Radiol. Prot. 1997. V. 17, N 3. P. 137-157.
7. **Kesminiene A., Evrard A-S., Ivanov V.K., Malakhova I.V., Kurtinaitise J., Stengrevics A., Tekkel M., Chekin S., Drozdovitch V., Gavrilin Y., Golovanov I., Kryuchkov V.P., Maceika E., Mirkhaidarov A.K., Polyakov S., Tenet V., Turov A.R., Byrnes G., Cardis E.** Risk of thyroid cancer among Chernobyl liquidators //Radiat. Res. 2012. V. 178. P. 425-436.
8. **Konogorov A.P., Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Khait S.E.** A case-control analysis of leukemia in accident emergency workers of Chernobyl //J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol. 2000. V. 19, N 1-2. P. 143-151.
9. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0 [Офиц. сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.icrp.org/page.asp?id=145> (дата обращения 30.01.2018).
10. Злокачественные новообразования в России в 2014 году (заболеваемость и смертность) /Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2016. 250 с.

Lifetime attributable risks from external and internal exposure to radiation: method for estimating

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.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

The article presents the method for estimating lifetime attributable risk from external and internal exposure to radiation with account of the sex and age of an exposed person. The method was developed to adhere to the principle of socially acceptable risk. By the Russian radiation safety standards the acceptable individual lifetime risk in the population and workers from planned exposure to radiation should not exceed 5×10^{-5} and 1×10^{-3} respectively; limits and constraints were standardized using ICRP nominal risk coefficients, calculated for a composite population. However, these coefficients cannot be used for making prediction of effects of radiological events on a real population. To justify radiation dose limits, established in valid Russian safety standards, ICRP models, described in the Publication 103, were used. Therefore, it is reasonable to use the models recommended by ICRP for estimating radiation risks in the Russian population. The presented method for estimating lifetime attributable risk developed in accordance with international recommendations is the scientific support to the principle of socially acceptable radiation risk in the Russian population. Calculated risk assessments are used for predicting radiation effects on human health as a result of planned, existing and emergency exposure. The method can be useful tool for radiological protection and radiation hygiene experts, referring medical practitioners and radiologists, medical physicists and radiobiologists.

Key words: Russian population, radiation safety, RSS-99/2009, principle of socially acceptable risk, radiation risk, radiobiological effects, radiation associated cancer diseases, ICRP radiation risk models, ICRP dose coefficients, route of radionuclides entry into a human body, external exposure, internal exposure, radionuclides, AMAD, committed effective dose, equivalent dose.

References

1. *State Policy Fundamentals of the Russian Federation in the Field of Nuclear and Radiation Safety up to 2025* (approved by the Order of the President of the Russian Federation on March 1, 2012, No Pr-539). GARANT.RU informative and lawful portal, official website. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70190228/> (Accessed 30.01.2018). (In Russian).
2. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources*. International Basic Safety Standards, GSR Part 3 (Interim), General Safety Requirements. Vienna, IAEA, 2011. 311 p. (In Russian).
3. *Radiation safety standards (RSS-99/2009)*. Sanitary-epidemiological rules and standards. SP2.6.1.252309. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russian).
4. *ICRP Publication 103*. Eds.: M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow, PKF «Alana», 2009. 312 p. Available at: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (Accessed 30.01.2018). (In Russian).
5. MU 2.1.10.3014-12. Assessment of radiation risk for the population due to prolonged uniform technogenic exposure in low doses. Moscow, Rospotrebnadzor, 2012. (In Russian).
6. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Konogorov A.P., Rastopchin E.M., Khait S.E.** Case-control analysis of leukaemia among Chernobyl accident emergency workers residing in the Russian Federation, 1986-1993. *J. Radiol. Prot.*, 1997, vol. 17, no. 3, pp. 137-157.

Menyajlo A.N.* – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; **Chekin S.Yu.** – Head of Lab.; **Kashcheev V.V.** – Head of Lab., C. Sc., Biol.; **Maksioutov M.A.** – Head of Dep., C. Sc., Tech.; **Korelo A.M.** – Senior Researcher; **Tumanov K.A.** – Head of Lab., C. Sc., Biol.; **Pryakhin E.A.** – Researcher; **Lovachev S.S.** – Research Assistant; **Karpenko S.V.** – Engineer; **Kashcheeva P.V.** – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; **Ivanov V.K.** – Deputy Director, Chairman of RSCR, Corresponding Member of RAS. A. Tsyb MRRC.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-32-60; e-mail: nrer@obninsk.com.

7. **Kesminiene A., Evrard A-S., Ivanov V.K., Malakhova I.V., Kurtinaitise J., Stengrevics A., Tekkel M., Chekin S., Drozdovitch V., Gavrilin Y., Golovanov I., Kryuchkov V.P., Maceika E., Mirkhaidarov A.K., Polyakov S., Tenet V., Turov A.R., Byrnes G., Cardis E.** Risk of thyroid cancer among Chernobyl liquidators. *Radiat. Res.*, 2012, vol. 178, pp. 425-436.
8. **Konogorov A.P., Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Khait S.E.** A case-control analysis of leukemia in accident emergency workers of Chernobyl. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.*, 2000, vol. 19, no. 1-2, pp. 143-151.
9. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0, official website. Available at: <http://www.icrp.org/page.asp?id=145> (Accessed 30.01.2018).
10. *Malignant neoplasms in Russia in 2014 (morbidity and mortality)*. Eds.: A.D. Kaprin, V.V. Starinskiy, G.V. Petrova. Moscow, P. Hertsen MORI, 2016. 250 p. (In Russian).