

**В.Ф. Демин<sup>1</sup>, А.П. Бирюков<sup>2</sup>, М.К. Седанкин<sup>2</sup>, В.Ю. Соловьев<sup>2</sup>****СПЕЦИФИКА РИСКА РАДИОГЕННОГО РАКА  
ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ**<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва<sup>2</sup> Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: В.Ф. Демин, vfdemin\_kiae@mail.ru

**РЕФЕРАТ**

**Цель:** Анализ зависимости вероятности смерти от радиогенного рака от уровня доз, от характера воздействия ионизирующего излучения (ИИ), от возраста при воздействии ИИ и возраста проявления его эффекта и других факторов для поддержки решений по медицинским и социальным мерам защиты работников производств с вредными условиями труда.

**Материал и методы:** Приведены расчетные формулы для оценки риска с использованием моделей мультипликативного и аддитивного риска для разового и протяженного воздействия ИИ. В качестве необходимых исходных данных для оценки риска взяты медико-демографические данные для городского населения Челябинской области за 1989 г. Расчет риска выполнен с использованием комбинированной модели BEIR VII и EPA.

**Результаты:** Риск рассчитан в показателях годового или пожизненного риска смерти от спонтанного и радиогенного солидного рака для двух сценариев профессионального воздействия ИИ (разовое и протяженное), для набора доз 0,5; 1; 2 Зв и разных возрастов дожития человека, начавшего работу на производстве в 20 лет.

**Выводы:**

1. Для малых и умеренных значений доз ( $D \leq 1$  Зв) протяженное облучение в возрастном диапазоне 20–30 лет приводит к меньшему риску, чем при кратковременном облучении в возрасте 20 лет с той же дозой. Этот эффект отсутствует при облучении после 30 лет.

2. Риск смерти от спонтанного солидного рака для облученных людей несколько меньше, чем для необлученных. Причина: радиогенный рак начинает конкурировать со спонтанным.

3. При относительно малых интегральных дозах ( $< 1$  Зв) радиогенный риск линейно зависит от дозы. При умеренных и больших дозах ( $\geq 1$  Зв) зависимость от дозы для непрерывного протяженного облучения становится нелинейной.

4. Вероятность причинной обусловленности смерти от радиогенного солидного рака для лиц старших возрастов и для доз  $D \geq 1$  Зв становится значимой, особенно для женщин (30 % и больше по отношению к спонтанному солидному раку).

5. Пожизненный риск радиогенного рака от дозы, полученной в трудовом возрасте, значительно уменьшается с возрастом при достижении 60 лет.

**Ключевые слова:** доза, профессиональное облучение, оценка риска, радиогенный риск, смертность, солидный рак, зависимость доза–эффект

Для цитирования: Демин В.Ф., Бирюков А.П., Седанкин М.К., Соловьев В.Ю. Специфика риска радиогенного рака для профессиональных работников. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(2):17–20.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-2-17-20

**Введение**

При современном уровне развития технологии в атомной промышленности и энергетике, включая методы и средства радиационной защиты, обеспечивается достаточно высокий уровень безопасности населения и профессиональных работников в нормальном режиме работы и при возможных авариях. Это выражается в недопущении воздействия ионизирующего излучения (ИИ) в дозах выше установленных норм радиационной безопасности. В принципе, возможны маловероятные гипотетические запроектные аварии на ядерных объектах, при которых в силу разного рода непредвиденных обстоятельств возможно получение профессиональными работниками сверхнормативных доз облучения.

В публикации [1] приведены рекомендации относительно принятия решений по социальной и медицинской защите в чрезвычайной ситуации. Конкретное рассмотрение таких ситуаций с позиции оценки радиационного риска носило бы слишком абстрактный характер.

Действительно актуальной проблемой является оценка радиационного риска для профессиональных работников, получивших в прошлом в силу разных причин относительно высокие дозы ИИ. Такowymi являются, например, когорты работников ПО «Маяк», отдельные группы ликвидаторов послед-

ствий Чернобыльской аварии, горнорабочие урановых рудников, участники испытаний ядерного оружия. Одной из причин получения доз выше современных норм были особые условия работы на ряде ядерных объектов и несовершенство норм радиационной безопасности в прошлом. В 50-х годах прошлого века они в сотни раз превышали современные нормативы.

Для решения ряда актуальных вопросов в отношении таких групп профессионалов необходима детальная оценка радиационного риска. Такowymi могут быть вопросы установления причинно-следственной связи между радиогенным заболеванием и полученной дозой ИИ, проведение мер медицинской и социальной защиты работников с выделением групп повышенного риска и др. Актуальной сохраняется проблема уточнения зависимости доза–эффект (ЗДЭ) по результатам эпидемиологических исследований (ЭИ) для этих групп [2].

Ниже с использованием методов детальной оценки радиационного риска выполнен анализ зависимости вероятности смерти от радиогенного рака от уровня доз, от характера воздействия ИИ (разовое или протяженное), возраста при воздействии ИИ и возраста проявления его эффекта и других факторов.

Для расчета радиационного риска использовались формулы методики оценки радиационного риска [3–6] и наиболее развитая к настоящему времени комбинированная модель ЗДЭ BEIR VII — EPA [7, 8].

**Материал и методы**

**Модели мультипликативного и аддитивного риска для разового воздействия**

Результаты биологических и эпидемиологических исследований показывают, что для ряда источников риска вероятность проявления вызываемых ими эффектов может зависеть от уровня спонтанных заболеваний или смертности. С учетом наличия или отсутствия такой связи ЗДЭ выбираются в виде одной из трех моделей: модели мультипликативного, аддитивного или смешанного (некоторая комбинация первых двух) рисков.

В случае модели мультипликативного риска ЗДЭ записывается следующим образом:

$$\mu_i(e,a,D) = \lambda_i(a) \times ERR_i(e,a) \times D, \tag{1}$$

где индексом *i* обозначен орган тела человека и соответствующий ему вид рака;  $\lambda_i(a)$  ( $\mu_i(e,a,D)$ ) — повозрастной коэффициент спонтанной (радиогенной) смертности или заболеваемости *i*-го вида, его размерность: год<sup>-1</sup>;  $ERR_i(e,a)$  — коэффициент дополнительного относительного риска, зависящий от возраста *e* получения дозы *D*, и возраста проявления эффекта *a*; размерность Зв<sup>-1</sup>.

Если используется модель аддитивного риска, то

$$\mu_i(e,a,D) = EAR_i(e,a) \times D, \tag{2}$$

$EAR_i(e,a)$  — коэффициент дополнительного абсолютного риска; его размерность Зв<sup>-1</sup>×год<sup>-1</sup>.

Возможен и смешанный вариант ЗДЭ как комбинация этих двух описанных выше моделей со своими относительными взвешивающими коэффициентами. Последние выбираются по имеющимся данным медико-биологических и эпидемиологических исследований. Таковы, например, модели радиационного риска BEIR VII [7] и модели радиационного риска EPA [8].

**Модели мультипликативного и аддитивного риска для протяженного воздействия**

Как это следует из методики оценки риска, ЗДЭ для протяженного (хронического) воздействия математически строго определяется через ЗДЭ для разового воздействия. Для моделей мультипликативного и аддитивного риска эти интегральные ЗДЭ соответственно равны [3, 4]:

$$\mu_i(e,e'',a,\{p\}) = \lambda_i(a) [\exp \int_e^{e''} de' ERR(e',a) \times p(e')] - 1], \tag{3}$$

$$\mu_i(e,e'',a,\{p\}) = \int_e^{e''} de' EAR(e',a) \times p(e'), \tag{4}$$

$p(e')$  — мощность дозы для текущего возраста *e'* (для текущего момента времени  $t = e' - e$ );  $e(e')$  — начальный (текущий) возраст облучения;  $e''$  — возраст окончания облучения; *a* — возраст проявления эффекта,  $\{p\}$  означает протяженное воздействие ИИ с мощностью дозы  $p(e)$ .

Для протяженного фракционированного воздействия от возраста *e* до  $e''$  в качестве функций  $\mu_i(e,e'',a,\{p\})$  используются следующие выражения:

$$\mu_i(e,e'',a,\{p\}) = \lambda_i(a) \times [\sum_e^{e''} D(e_k) \times ERR(e_k,a)], \tag{5}$$

$$\mu_i(e,e'',a,\{p\}) = \sum_e^{e''} D(e_k) \times EAR(e_k,a). \tag{6}$$

Здесь суммирование ведется по годам возраста,  $e_k$  — текущий возрастной год.

Именно такое фракционированное воздействие (кратковременные воздействия со значительными интервалами между ними) характерно для профессионального облучения.

Как и для разового воздействия, ЗДЭ для протяженного воздействия может представлять собой комбинацию зависимостей (3) и (4) или (5) и (6).

**Функция дожития и пожизненный риск**

Для разового облучения в возрасте *e* дозой *D* пожизненный риск смерти от спонтанного и радиогенного рака вида *i* рассчитывается по формуле:

$$R_i(e,D) = \int_e^{\infty} S(e,a,D) \times \mu_i(e,a,D) da, \tag{7}$$

где  $\mu_i(e,a,D)$  — ЗДЭ — одна из функций (1) или (2),  $S(e,a,D)$  — функция дожития до возраста *a* для облученного человека:

$$S(e,a,D) = \exp\{- \int_e^a [\lambda(a') + \sum_i \mu_i(e,a',D)] da'\}, \tag{8}$$

$\lambda(a')$  — повозрастной коэффициент смерти от всех причин необлученного человека,

$\sum_i$  — сумма по всем видам радиогенного рака.

Пусть после облучения в возрасте *e* человек дожил до некоторого возраста  $a_1$ .

Пожизненный риск смерти от *i*-го радиогенного рака для него равен

$$R_i(e,a_1,D) = \int_{a_1}^{\infty} da S(e,a_1,a,D) \times \mu_i(e,a,D), \tag{9}$$

$$S(e,a_1,a,D) = \exp\{- \int_{a_1}^a da' [\lambda(a') + \sum_i \mu_i(e,a',D)]\}. \tag{10}$$

Для протяженного воздействия от возраста *e* до  $e''$  с мощностью дозы  $p(e')$  ( $e'$  — текущий возраст) формулы (9) и (10) переписываются следующим образом:

$$R_i(e,e'',a_1,\{p\}) = \int_{a_1}^{\infty} da S(e,e'',a_1,a,\{p\}) \times \mu_i(e,e'',a,\{p\}), \tag{11}$$

$$S(e,a_1,a,D) = \exp\{- \int_{a_1}^a da' [\lambda(a') + \sum_i \mu_i(e,e'',a',\{p\})]\}, \tag{12}$$

$\mu_i(e,e'',a,\{p\})$  — одна из функций (3) или (4), (5) или (6).

**Результаты**

Для анализа зависимости вероятности смерти от радиогенного рака от уровня доз, характера воздействия ИИ (разовое или протяженное), возраста при воздействии ИИ и возраста проявления его эффекта и др. выполнены тестовые расчеты для двух сценариев облучения:

сценарий 1 — человек получил разовую (кратковременную) дозу *D* в возрасте 20 лет;

сценарий 2 — человек хронически облучался с мощностью дозы в  $p(e) = D/10$  в течение 10 лет, начиная с возраста 20 лет (суммарная доза равна *D*).

В этих сценариях расчет выполнен для набора доз  $D = 0,2; 0,5; 1; 2$  Зв и для возрастов дожития  $a_1 = 40, 60$  и 70 лет. Протяженное воздействие рассматривалось как фракционированное, что характерно для профессионального облучения. Для краткости представлены только результаты расчета смертности от спонтанных и радиогенных солидных раков.

Для расчета риска необходимы исходные медико-демографические данные (МДД) о людях, для которых проводится эта оценка риска. В качестве таковых взя-

ты МДД для городского населения Челябинской области за 1989 г.

Расчет выполнен с использованием комбинированной модели BEIR VII [7] и EPA [8]: коэффициенты риска взяты из модели BEIR VII, а смешивание мультипликативной и аддитивной моделей произведено по рекомендации модели EPA.

Результаты расчета риска смерти от солидного рака представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

**Пожизненный риск смерти от солидного рака в % для 4 разных доз и 2 сценариев облучения человека в возрасте 40 лет**

Lifetime risk of death from solid cancer in % for 4 different doses and 2 radiation scenarios of a person aged 40 years

Необлученные		Облученные							
Спонтанный рак		Спонтанный рак				Радиогенный рак			
		Сценарий 1		Сценарий 2		Сценарий 1		Сценарий 2	
м	ж	м	ж	м	ж	м	ж	м	ж
<i>D</i> = 0,2 Зв									
21,7	15,0	21,5	14,9	21,5	14,9	1,4	2,0	1,2	1,7
<i>D</i> = 0,5 Зв									
21,7	15,0	21,2	14,5	21,4	14,7	3,5	5,1	2,9	4,6
<i>D</i> = 1 Зв									
21,7	15,0	21,0	13,7	21,3	13,8	6,6	9,3	5,6	8,0
<i>D</i> = 2 Зв									
21,7	15,0	19,9	12,8	20,0	13,0	12,5	17,5	10,8	15,0

Таблица 2

**Вероятность причинной обусловленности смерти (ВПО) в % от солидного рака в старших возрастах при разовом облучении дозой *D* в возрасте 20 лет**  
Probability of cause of death (VPO) in % from solid cancer in older ages with a single dose of *D* radiation at the age of 20 years

Вид солидного рака	ВПО, %			
	<i>D</i> = 1 Зв		<i>D</i> = 2 Зв	
	м	ж	м	ж
Возраст смерти от солидного рака 60 лет				
Спонтанный	75	57	60	40
Радиогенный	25	43	40	60
Возраст смерти от солидного рака 70 лет				
Спонтанный	76	60	62	43
Радиогенный	24	40	38	57

Таблица 3

**Пожизненный риск смерти мужчин в % от солидного рака в разных возрастах *a*<sub>1</sub> при облучении в возрасте 20 лет разовой дозой 1 Зв**  
Lifetime risk of death of men in % from solid cancer at different ages *a*<sub>1</sub> when irradiated at the age of 20 years with a single dose of 1 SV

<i>a</i> <sub>1</sub> , год	<i>R(a)</i> <sub>1</sub> , %	
	Спонтанный	Радиогенный
40	21,0	6,6
60	20,3	6,4
70	13,3	4,2

**Обсуждение**

1. Уровень риска смерти и пожизненный риск смерти от радиогенного солидного рака для женщин значительно выше, чем для мужчин (примерно в 1,5 раза).

2. Для малых и умеренных значений доз *D* ≤ 1 Зв протяженное облучение в возрастном диапазоне 20–30 лет приводит к меньшему риску, чем при кратковременном облучении в возрасте 20 лет с той же дозой. Этот эффект отсутствует при облучении после 30 лет. Таковы свойства моделей BEIRVII, построенных по результатам исследования японской когорты LSS.

3. Риск смерти от спонтанного солидного рака для облученных людей несколько меньше, чем для необлученных. Причина: радиогенный рак начинает конкурировать со спонтанным.

4. Для мультипликативной зависимости и непрерывного протяженного воздействия дозовый интеграл стоит в экспоненте, см. формулу (3). Это означает, что в принципе зависимость от дозы нелинейна. Она линеаризуется только при относительно малых интегральных дозах (меньших 1 Зв): экспоненту в формуле (3) достаточно разложить до первого члена. При умеренных и больших дозах (> 1 Зв) начинают быть значимыми и другие члены разложения экспоненты, в частности, второй член разложения, квадратичный по дозе. Это утверждение подтверждается результатами расчета, представленными в табл. 1. При дозе 2 Зв радиогенный риск протяженного облучения становится больше риска разового облучения при одинаковых дозах, особенно для женщин: это соотношение становится обратным по сравнению с облучением умеренными и малыми дозами (см. п. 1).

5. Вероятность причинной обусловленности смерти от радиогенного солидного рака для лиц старших возрастов и для доз *D* ≥ 1 Зв становится значимой, особенно для женщин (табл. 2).

6. Пожизненный риск смерти от радиогенного рака от дозы, полученной в трудовом возрасте, уменьшается с возрастом после 60 лет, т.е., человек, проживший долгую жизнь после профессионального облучения, избежал части радиогенного риска: для него он не реализовался в умеренных возрастах (см. табл. 3). Так как категория риска является статистической характеристикой, то условно это можно интерпретировать как «эту часть риска приняли на себя другие облученные люди».

7. Пункты 5 и 6 полезно учитывать в рамках работы экспертных советов по установлению причинно-следственной связи рака с облучением.

**Заключение**

Результаты оценки риска необходимы для установления причинно-следственной связи между радиогенным заболеванием и полученной дозой ИИ, проведения мер медицинской и социальной защиты работников опасных производств, сотрудников органов МЧС с выделением групп повышенного риска и др.

Для проведения оценки риска в некоторой реальной ситуации полезно знать особенности зависимости показателей риска от величины доз и характера облучения, от возраста облучения и проявления эффекта

и др. Эти особенности продемонстрированы выполненными расчетами радиационного риска для ряда гипотетических ситуаций, но достаточно близких к

существующим (см., например, [9]) и возможным будущим нештатным ситуациям.

## Specific Risk of Radiogenic Cancer for Professionals

V.F. Demin<sup>1</sup>, A.P. Biryukov<sup>2</sup>, M.K. Sedankin<sup>2</sup>, V.Yu. Soloviev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Center "Kurchatov institute", Moscow, Russia, vfdemin\_kiae@mail.ru

<sup>2</sup> A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

### ABSTRACT

**Purpose:** Analysis of the dependence of the probability of death due to radiogenic cancer on the dose level, on the nature of exposure to ionizing radiation (IR), on age when exposed to IR and on the age of its effect, etc., to support decisions on medical and social measures to protect workers in hazardous industries.

**Material and methods:** Calculation formulas for risk assessment are given using the multiplicative and additive risk models for one-time and extended exposure to IR. Medical and demographic data for the urban population of the Chelyabinsk region for 1989 were taken as necessary baseline data for risk assessment. The risk was calculated using the combined BEIR VII and EPA models.

**Results:** The risk is calculated in terms of annual or lifetime risk of death from spontaneous and radiogenic solid cancer for two scenarios of occupational exposure to IR (single and extended), for a set dose of 0.5; 1; 2 Sv and different ages of survival of a person who started work in production at the age of 20.

**Conclusions:** 1. For small and moderate doses ( $D \leq 1$  Sv), prolonged exposure in the age range of 20–30 years leads to less risk than with short-term exposure at the age of 20 years with the same dose. This effect is absent for irradiation after 30 years. 2. The risk of death from spontaneous solid cancer is somewhat less for exposed people than for non-exposed people. Reason: radiogenic cancer begins to compete with spontaneous one. 3. With relatively small integral doses ( $< 1$  Sv), the radiogenic risk linearly depends on the dose. At moderate and high doses ( $\geq 1$  Sv), for continuous extended exposure the dose dependence becomes nonlinear. 4. The probability of causation of death from radiogenic solid cancer for older people and for doses of  $D \geq 1$  Sv becomes significant, especially for women (30 % and more in relation to spontaneous solid cancer). 5. The lifetime risk of radiogenic cancer from the dose received at working age decreases significantly with age when it reaches 60 years of age.

**Key words:** dose, occupational exposure, risk assessment, radiogenic risk, mortality, solid cancer, dose–response relationship.

**For citation:** Demin VF, Biryukov AP, Sedankin MK, Soloviev VYu. Specific Risk of Radiogenic Cancer for Professionals. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(2):17–20. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-2-17-20

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Соловьёв ВЮ, Дёмин ВФ, Краснюк ВИ. Алгоритм принятия решений по социальной и медицинской защите в чрезвычайной ситуации. Гигиена и санитария. 2019;98(1):33–5. [Soloviev VYu, Demin VF, Krasnyuk VI. Algorithm of decision making on social and medical protection in an emergency. Gygiena and Sanitaria. 2019;98(1):33–5. (in Russ.).]
2. Демин ВФ, Бирюков АП, Забелин МВ, Соловьёв ВЮ. Проблемы установления зависимости доза — эффект для радиационного канцерогенеза. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018;63(3):25–33. [Demin VF, Biryukov AP, Zabelin MV, Soloviev VYu. Problems of identifying dose — effect dependence for ionizing radiation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2018;63(3):25–33. (in Russ.).]
3. Рахманин ЮА, Демин ВФ, Иванов СИ. Общий подход к оценке, сравнению и нормированию риска здоровью человека от разных источников вреда. Вестник РАМН, 2006;4:5–8. [Rakhmanin YuA, Demin VF, Ivanov SI. General approach to the assessment, comparison and normalization of the risk to human health from various sources of harm. Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences. 2006;4:5–8. (in Russ.).]
4. Демин ВФ, Захарченко ИЕ. Риск воздействия ионизирующего излучения и других вредных факторов на здоровье

- человека: методы оценки и практическое применение. Радиационная биология. Радиоэкология. 2012;52(1):77–89. [Demin VF, Zakharchenko IE. The risk of exposure to ionizing radiation and other harmful factors on human health: assessment methods and practical application. Radiation Biology. Radioecology. 2012;52(1):77–89. (in Russ.).]
5. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP. 2007;37(2–4).
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2006 Report, Volume I, Annex A, NY: United Nations, 2008.
7. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIRVII). National Academy Press. Washington DC. 2005. 710 p.
8. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. April 2011, U.S. EPA, Washington DC. 2011. 164 p.
9. Ильин ЛА, Киселев МВ, Панфилов АП. Медико-дозиметрический регистр работников атомной промышленности России. Состояние и перспективы. Бюллетень сибирской медицины. 2005;4(2):6–13. [Il'in LA, Kiselev MV, Panfilov AP. Medical and dosimetric register of nuclear industry workers in Russia. State and prospects. Bulletin of Siberian medicine. 2005;4 (2):6–13. (in Russ.).]

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ №1363 от 25.06.2019 г.)

**Financing.** The work was carried out with the support of National Research Center "Kurchatov Institute" (order №1363 25.06.2019)

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.

**Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

**Поступила:** 05.08.2019. **Принята к публикации:** 12.03.2020.

**Article received:** 05.08.2019. **Accepted for publication:** 12.03.2020.