

**А.Р. Туков¹, И.Л. Шафранский¹, А.Г. Цовьянов¹, А.П. Бирюков¹, И.В. Сидорин¹, О.Н. Прохорова¹,
В.Е. Журавлева¹, В.В. Уйба²**

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ С УЧЕТОМ ДОЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОБЛУЧЕНИЯ У ЛИКВИДАТОРОВ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧАЭС – РАБОТНИКОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1. Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: atukov40@mail.ru;
2. Федеральное медико-биологическое агентство ФМБА, Москва

А.Р. Туков – зав. лаб., к.м.н.; И.Л. Шафранский – с.н.с., к.м.н.; А.Г. Цовьянов – зав. лаб.;
А.П. Бирюков – зав. отд., д.м.н., проф.; И.В. Сидорин – с.н.с., к.ф.-м.н.; О.Н. Прохорова – с.н.с.;
В.Е. Журавлева – инженер; В.В. Уйба – руководитель ФМБА России, д.м.н., проф.

Реферат

Цель: Оценка избыточного относительного риска заболевания злокачественными новообразованиями (ЗНО) с учетом доз различных видов облучения работников атомной промышленности – участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Материал и методы: Проведен эпидемиологический эксперимент, в котором использованы персональные данные информационной базы Отраслевого регистра лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на Чернобыльской АЭС, дозы профессионального облучения, а также табличные данные о дозах природного облучения, представленные в отчетах о радиационной обстановке в населенных пунктах (ЕСКИД, ф. № 4-ДЮЗ).

В исследовании был применен метод когортного анализа накопленной заболеваемости ЗНО, реализованный на базе пуассоновской регрессии. Оценки избыточного относительного риска (ERR – Excess Relative Risk) на 1 Зв были рассчитаны по традиционной схеме с использованием модуля AMFIT пакета прикладных программ EPICURE.

Результаты: Показано, что оценки риска заболевания ЗНО у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, полученные с использованием доз разных видов облучения, имеют различные показатели риска в единицах ERR на 1 Зв: дозы облучения ЧАЭС – 0,13, дозы ЧАЭС + профессиональные – 1,13 и дозы ЧАЭС + профессиональные + природные – 0,56.

Выводы: Используя какую-либо часть общей дозы облучения человека для расчета риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний, мы будем получать некорректные результаты с неконтролируемой неопределенностью.

Для надежной оценки риска возникновения радиационно-обусловленных ЗНО необходима суммарная доза, полученная человеком от всех видов облучения, согласно требованиям директивных документов по радиационной безопасности.

Ключевые слова: злокачественные новообразования, ликвидаторы, авария ЧАЭС, радиационный риск, дозы различных видов облучения, суммарная доза

Поступила: 12.09.2018. Принята к публикации: 23.04.2019

Введение

К настоящему времени накоплены значительные фактические статистические данные по оценке рисков возникновения радиационно-обусловленных заболеваний от внешнего облучения. Основным материалом в этой области исследований являются результаты наблюдений за пострадавшими при атомной бомбардировке городов Хиросимы и Нагасаки, которые подверглись острому гамма-нейтронному облучению [1]. Однако и японские исследователи считают, что использование для расчета риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний в эпидемиологических исследованиях доз только от атомной бомбардировки не достаточно. Авторы измеряли дозы от диагностических радиологических исследований для оценки радиационных рисков выживших при атомной бомбардировке в Хиросиме и Нагасаки, и они пришли к выводу, что воздействие А-бомбы нельзя надежно оценить, если медицинские дозы рентгеновских обследований не будут включены в долгосрочные оценки [2].

Существенный вклад в эту же область исследования был внесен наблюдениями за когортой ликвидаторов, принимавших участие в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС. За годы, прошедшие с момента аварии на ЧАЭС, получено большое количество данных о заболеваемости и смертности среди ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС [3–5]. К сожалению, при-

веденные результаты исследований были получены при использовании только дозы внешнего аварийного облучения при ликвидации аварии на ЧАЭС без учета доз от других видов облучения.

Тем не менее, за прошедшие 30 лет после аварии никем из исследователей не была предпринята попытка оценки рисков заболеваемости с использованием помимо доз внешнего облучения, полученных при аварии на ЧАЭС, а также в процессе профессиональной деятельности, доз медицинского и природного облучения. Поэтому актуальными будут работы по оценке радиационного риска, выполненные с применением для его расчета доз от различных видов облучения.

Материал и методы

С 1987 г. в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России функционирует Отраслевой регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ОРЧ) – работников атомной промышленности. В нем хранятся данные о здоровье этих ликвидаторов, дозах внешнего облучения, полученных во время работы по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

По просьбе ФМБА России, концерн «Росэнергоатом» предоставил ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России данные о дозах профессионального облучения работников 10 АЭС, состоящих на индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК), участвовавших в

ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. В разработку включены данные о дозах профессионального облучения ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, которые являются работниками Балаковской, Белоярской, Билибинской, Калининской, Кольской, Курской, Ленинградской, Нововоронежской, Ростовской и Смоленской АЭС.

Кроме того, данные о профессиональных дозах были получены от учреждений здравоохранения ФМБА России на работников некоторых предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом».

Профессиональное облучение имели примерно четверть лиц чернобыльской когорты. Информация о дозах профессионального внешнего облучения на данный момент удалось собрать только для 1300 ликвидаторов.

Дозы профессионального облучения были собраны по годам работы с радиоактивными веществами (РВ) и источниками ионизирующего излучения (ИИИ) на АЭС, предприятиях, организациях Госкорпорации «Росатом» от начала работы по 2013 г.

В структуре суммарных доз, полученных ликвидаторами последствий аварии на ЧАЭС при работе в 30-км зоне и в процессе профессиональной деятельности, 48 % составляют дозы до 100 мЗв, 6 % ликвидаторов имеют дозы, превышающие 500 мЗв.

Коллективная доза внешнего облучения, полученная ликвидаторами последствий аварии на ЧАЭС при работе в 30-км зоне, составила 700129,0 мЗв, что составляет 31,1 % от суммарной коллективной дозы облучения. Коллективная доза внешнего облучения, полученная ликвидаторами в процессе своей профессиональной деятельности, составила 193320,7 мЗв – 9,1 %, природная доза – 1224011,8 мЗв – 57,8 %.

Данные о дозах внешнего облучения ликвидаторов различных годов пребывания в 30-км зоне ЧАЭС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наличие данных о дозах внешнего облучения у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС

Годы въезда	Кол-во ликвидаторов	Из них имеются данные по дозе		Среднее значение, мЗв
		Число лиц	%	
1986–1990	20678	13420	64	55,2
1986	12122	7537	62	68,5
1987	5530	3748	67	29,0
1988	1950	1426	73	23,7
1989	834	605	72	14,4
1990	242	104	64	12,7

Среди участников ликвидации последствий аварии мужчины составляют 84,7 %. Средний возраст ликвидаторов на 2015 г. составил у мужчин 62,0 ± 0,1 года. Исследование проведено на данных о мужчинах.

Дозы природного облучения получены в результате эпидемиологического эксперимента, заключающего в том, что эти дозы взяты из Единой системы индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД), в которой

они находятся в табличной форме по территориям (27 территорий, дозы от 0,691 до 5,9 мЗв в год). Дозы природного облучения по территориям устойчивые по годам наблюдения. В эпидемиологическом эксперименте сделано допущение – территориальные дозы присвоены каждому ликвидатору последствий аварии на ЧАЭС, выехавшему в 30-км зону из конкретной территории [6].

В табл. 2 представлена информация о средних, минимальных и максимальных дозах внешнего облучения, полученных ликвидаторами в различных местах работы и территориях проживания.

Таблица 2

Распределение доз облучения в зависимости от места работы

Место получения дозы	Средняя доза, мЗв	Минимальная доза, мЗв	Максимальная доза, мЗв
ЧАЭС	55,2	0,1	1478,5
АЭС и другие предприятия ГК «Росатом»	188,8	0,1	1832,4
Природное облучение	171,0	15,7	484,8
Суммарная доза	249,9	18,9	2390,6

Структура представленных в статье материалов отвечает требованиям когортного анализа данных наблюдений за заболеваемостью лиц, принимавших участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, с целью оценки, в первую очередь, риска развития дополнительных ЗНО от воздействия внешнего гамма-облучения.

В анализ включены данные о ликвидаторах последствий аварии на ЧАЭС 1986–1990 гг., работавших в 30-км зоне. Аргумент такого выбора – максимальная возрастная однородность по дозовым группам этой когорты (средний возраст мужчин на дату въезда в 30-км зону – 36,0 лет).

Для расчета рисков возникновения радиационно-индуцированных заболеваний когорты ликвидаторов была распределена на следующие возрастные страты, начиная со времени первого посещения 30-км зоны: до 30 лет – 27,2 %; 30–39 лет – 42,7 %; 40–49 лет – 21,9 %; 50–59 лет – 7,8 %; 60 лет и старше – 0,5 %.

Данные были стратифицированы по дозе внешнего облучения (ДВО) и выделены две группы страт – возраст на момент первого посещения 30-км зоны ЧАЭС и возраст на момент заболевания. Дозы внешнего облучения (ЧАЭС и профессиональные) у контингента лиц, включенных в ОРЧ, были измерены инструментально. Границы страт определялись путем варьирования дозовых интервалов с целью получить страты, максимально близкие по числу человеко-лет наблюдений.

Изучение формирования доз ионизирующего излучения при различных сценариях облучения и совершенствование методик их расчета, а также оценки риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний представляют собой важную задачу. Наиболее актуальным является изучение влияния суммы отдельных компонент дозовых нагрузок на че-

ловека при проведении радиационно-эпидемиологического анализа.

На данном этапе работы проведена оценка риска развития ЗНО работников предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом», принимавших участие в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС с учетом суммы доз, полученных при работе в 30-км зоне, а также доз, полученных при профессиональном и природном облучении.

Для оценок риска по группированным данным, объединенным в возрастные, дозовые и страты «возраст на момент первого посещения 30 км зоны ЧАЭС и на момент заболевания», был использован пакет прикладных статистических программ EPICURE (модуль AMFIT), широко применяемый в современной радиационно-эпидемиологической практике [7]. Программа AMFIT является признанным стандартом для проведения радиационно-эпидемиологических исследований. Оценки радиационного риска среди персонала предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом», участвовавших в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, были выполнены с использованием этой программы. Модель избыточного относительного риска в общем виде представлена как:

$$\lambda_d = \lambda_0 \times (1 + \beta \times d), \quad (1)$$

где λ – показатель заболеваемости; β – избыточный относительный риск; d – доза внешнего облучения, стратифицированная по циклам исследования.

Функция правдоподобия строится, исходя из предположения, что числа случаев заболевания являются независимыми пуассоновскими случайными величинами. Функция правдоподобия в общем виде имеет следующий вид [7]:

$$L = \sum \{Y_i \times \ln(P_i \times \lambda_i) - P_i \times \lambda_i\}. \quad (2)$$

Для расчетов по программе AMFIT выполнена группировка данных в виде специальной таблицы и написан специальный командный файл (скрипт), содержащий выполняемые команды.

Отсутствие в настоящее время дозиметрических данных по медицинскому облучению персонала предприятий атомной промышленности России не позволяет провести такие исследования с хорошей статистической достоверностью. Тем не менее, представляется полезным, как предварительный этап, проведение таких исследований в рамках отдельного анализа риска заболевания радиационно-индуцированными болезнями персонала предприятий и организаций атомной промышленности с учетом данных по профессиональному, аварийному и природному облучению.

Результаты и обсуждение

В табл. 3 представлены данные расчета ERR/Зв для заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями, рассчитанные по AMFIT, для когорты ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1986–2015 гг. от различных видов облучения.

Таблица 3

Значения ERR/Sv заболеваний солидными ЗНО, рассчитанные по AMFIT, для когорты ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС 1986–2015 гг. от различных видов облучения

Дозы облучения	ERR на 1 Зв	Нижний уровень	Верхний уровень
ЧАЭС	0,13	0,99	1,19
ЧАЭС + профессиональные	1,13	0,13	2,12
ЧАЭС + профессиональные + природные	0,56	0,4	5,9

Оценки ERR на 1 Зв для ликвидаторов, полученные на основе данных о дозах от разных видов внешнего облучения, дают различные результаты, которые необходимо считать предварительными, и поэтому они не могут быть корректно использованы для нормирования с целью обеспечения радиационной безопасности, т.к. в суммарную дозу еще не входят дозы медицинского облучения, а персональная доза природного облучения получена из табличных данных.

По вопросу использования медицинских доз облучения при расчете радиационных рисков существует два мнения. Одни авторы считают, что результаты исследований медицинских последствий аварии на ЧАЭС позволяют оценить дозовые нагрузки при лучевой диагностике, как не критические, с позиций популяционной радиационной эпидемиологии [8].

Японские же авторы считают, что дозы медицинского облучения, в частности, от лучевой терапии членам когорты ANS, позволяют получить необходимую информацию для более точного анализа зависимости возникновения ЗНО от дозы радиационного облучения в этой популяции [9].

Заключение

В настоящее время особую актуальность в анализе риска приобретают суммарные дозы облучения, полученные работниками как при работе в 30-км зоне ЧАЭС, так и процессе своей основной работы, а также медицинские и природные дозы облучения. Впервые с использованием эпидемиологического эксперимента нами получены результаты по оценке риска облучения от совокупной дозы трех видов облучения, которые необходимо считать как предварительными из-за отсутствия корректных значений доз медицинского и природного облучения. Однако на данный момент процесс сбора полной информации находится в самом начале и далее будет показано, насколько учет индивидуальных доз медицинского и природного облучения позволит получать в рамках анализа популяционного риска корректные результаты.

Проведенный анализ показал:

1. Используя какую-либо часть общей дозы облучения человека для расчета риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний, мы получаем различные некорректные результаты с неконтролируемой неопределенностью.

2. Актуальной остается проблема расчета риска возникновения радиационно-обусловленных заболеваний с использованием суммарной дозы, полученной человеком от всех видов облучения.

Для цитирования: Туков А.Р., Шафранский И.Л., Цовьянов А.Г., Бирюков А.П., Сидорин И.В., Прохорова О.Н., Журавлева

В.Е., Уйба В.В. Оценка радиационного риска возникновения злокачественных новообразований с учетом доз различных видов облучения у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС – работников атомной промышленности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64. № 3. С. 54–57.

DOI: 10.12737/article_5cf239edd98586.89544179

Medical Radiology and Radiation Safety. 2019. Vol. 64. No. 3. P. 54–57

Radiation Epidemiology

DOI: 10.12737/article_5cf239edd98586.89544179

Estimation of Radiation Risk of the Initiation of Malignant Novelties in the Liquidators of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, Workers of the Nuclear Industry, with the Account of Doses of Various Types of Irradiation

**A.R. Tukov¹, I.L. Shafransky¹, A.G. Tsovyanov¹, A.P. Biriukov¹, I.V. Sidorin¹,
O.N. Prokhorova¹, V.E. Zhuravleva¹, V.V. Uiba²**

1. A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia. E-mail: atukov40@mail.ru;
2. Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

A.R. Tukov – Head of Lab., PhD Med.; I.L. Shafransky – Senior Researcher, PhD Med.; A.G. Tsovyanov – Head of Lab.; A.P. Biriukov – Head of Dep., Dr. Sci. Med., Prof.; I.V. Sidorin – Senior Researcher, PhD Phys-Math.; O.N. Prokhorova – Senior Researcher; V.E. Zhuravleva – Engineer; V.V. Uiba – Head of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Dr. Sci. Med, Prof.

Abstract

Purpose: Estimate of the excess relative risk of malignant neoplasm disease (MND) in nuclear industry workers, participants in the elimination of the consequences of the Chernobyl accident, taking into account the doses of various types of irradiation.

Material and methods: An epidemiological experiment was conducted in which the personal data of the information base of the Industry Register of persons exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident, the doses of occupational exposure, and tabular data on the dose of natural exposure, presented in the reports on the radiation situation in populated areas ESKID, No. 4-DOZ) were used.

Results: It is shown that the risk assessment of the disease in the Chernobyl accident liquidators, obtained with the use of doses of different types of exposure, has different risk indicators (ERR at 1 Sv: the Chernobyl NPP radiation dose is 0.13, the ChNPP + professional dose is 1.13 and the ChNPP dose + professional + natural – 0.56).

Conclusions: Using any part of the total radiation dose of a person to calculate the risk of dose-induced diseases, we will get incorrect results is unknown how far from the truth. For a reliable assessment of the risk of the disease, an overall dose is required from a person from all types of radiation, which is required by the radiation safety directives.

Key words: cancer, liquidators, Chernobyl nuclear power plant accident, radiation risk, doses of various types of irradiation, total dose

Article received: 12.09.2018. Accepted for publication: 23.04.2019

REFERENCES

1. Pierce D, Preston DL. Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. *Radiat Res.* 2000 Aug;154(2):178-86.
2. Kato Kazuo, Sawada Shozo. Medical X-ray Doses' Contributions to the Ionizing Radiation Exposures of Atomic-Bomb Survivors. *J Radiat Res.* 2016 Nov;57(6):583-95.
3. Chekin SYu, Maksyutov MA, Kashcheev VV, Menyajlo AN, Vlasov OK, Shchukina NV, et al. Prognosis of the long-term medical radiological consequences of the Chernobyl disaster for citizens of Russia and the Republic of Belarus on the main radiation-related diseases. *Radiation and Risk.* 2016;25(4):7-19. (Russian).
4. Ivanov VK, Rastopchin EM, Chekin SYu, Ryvkin VB. Oncological morbidity and mortality among participants in the liquidation of the consequences of the Chernobyl disaster: an assessment of radiation risks. *Radiation and Risk.* 1995;6:123-55. (Russian).
5. Tukov AR, Biryukov AP, Shafranskij IL. The use of data on the doses of various types of irradiation in radiation epidemiology. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2014;59(1):43-9. (Russian).
6. Tsovyanov AG, Kosterev VV, Kryuchkov VP, Romanov VV, Pocyapun NP, Kuhta BA, Sivenkov AG. Informational and analytical reference book "Doses of exposure of personnel of organizations and the population in the territories served by FMBA of Russia and the Ministry of Defense of Russia in 2010". Moscow. 2012. 86 p. (Russian).
7. EPICURE, Users Guide. Preston DL, Lubin JH, Pierce DA, McConney ME. HiroSoft International Corporation. Seattle, WA 98112, USA. 1993. 329 p.
8. Tsyb AF, Ivanov VK, Biryukov AP. Possibilities of radiation epidemiology in solving radiation safety problems of medical exposure. *Radiation and Risk.* 2008;17(2):50-62. (Russian).
9. Kato K, Antoku S, Russell WJ, Fujita S, Pinkston JA, Hayabuchi N, et al. Radiation therapy among atomic bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki. *Radiat Res.* 1998 Jun;149(6):614-24.

For citation: Tukov AR, Shafransky IL, Tsovyanov AG, Biriukov AP, Sidorin IV, Prokhorova ON, Zhuravleva VE, Uiba VV. Estimation of Radiation Risk of the Initiation of Malignant Novelties in the Liquidators of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, Workers of the Nuclear Industry, with the Account of Doses of Different Irradiation Species. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2019;64(3):54-7. (Russian).

DOI: 10.12737/article_5cf239edd98586.89544179