

УДК 621.039

## ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРЕБУЕТ КОРРЕКТНЫХ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Туков А. Р., к. м. н. (atukov40@mail.ru),  
Шафранский И. Л., к. м. н. (iljush@mail.ru),  
Бирюков А. П., д. м. н., профессор (mereg81@mail.ru),  
Прохорова О. Н. (proh19@gmail.com)  
(ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России)

*В статье показано несоответствие требований директивных документов фактической оценке радиационных рисков. В радиационной эпидемиологии нарушены принципы сбора данных о дозах от различных видов облучения, в связи с этим во всех медико-дозиметрических регистрах мира отсутствуют данные о суммарной дозе облучения человека, необходимой для корректного расчета риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний. Поэтому исследователи получают некорректные результаты расчета риска возникновения этих заболеваний, которые являются основой для оценки состояния радиационной безопасности.*

► **Ключевые слова:** радиационная безопасность, суммарная доза облучения, сбор эпидемиологических данных, оценка риска, радиационно-индуцированные заболевания, отраслевой регистр ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.94.4.003

## RADIATION SAFETY ASSESSMENT REQUIRES CORRECT EPIDEMIOLOGICAL DATA

Tukov A. R., Ph. D., Shafransky I. L., Ph. D.,  
Birukov A. P., Ph. D., professor, Prohorova O. N. (SRC – FMBC)

*The article shows the discrepancy between the requirements of the directive documents for the assessment of radiation risks. In radiation epidemiology the principles of collecting data on doses from various types of radiation are violated, and therefore all medical-dosimetric registers of the world do not have the total human dose needed to calculate correctly the risk of radiation induced diseases. Therefore, researchers get incorrect results of calculating the risk of these diseases, which are still the basis for assessing the state of radiation safety.*

► **Keywords:** radiation safety, total radiation dose, epidemiological data collection, risk assessment, radiation-induced diseases, industry register of Chernobyl disaster clean-up workers.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.94.4.003

## Введение

Уровень радиационного риска, который показывает вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта как результата облучения, во многом определяет состояние радиационной безопасности. В наибольшей степени этот риск характеризует суммарная накопленная эффективная доза от всех видов облучения [1].

Суммарная доза от всех видов облучения используется для оценки радиационной обстановки и ожидаемых медицинских последствий, а также для обоснования защитных мероприятий и оценки их эффективности [2, 3].

К настоящему времени в мире отсутствуют медико-дозиметрические регистры, отвечающие этим требованиям.

Основой международных рекомендаций по радиационной защите и современных норм радиационной безопасности являются результаты более чем полувекового наблюдения за когортой людей, переживших атомную бомбардировку в Японии, когда были получены важные сведения о долгосрочных последствиях воздействия ионизирующего излучения на человека [4, 5, 6, 7].

Однако даже регистр лиц, переживших атомную бомбардировку в Хиросиме и Нагасаки, не содержит суммарных доз облучения (от взрыва бомб, профессионального, медицинского и природного). Японские ученые измеряли дозы от диагностических радиологических исследований для оценки радиационных рисков выживших в этих городах после бомбардировки. Полученные результаты этих исследований указывают на то, что воздействие А-бомбы нельзя надежно оценить, если медицинские дозы не будут тщательно включены в эти долгосрочные оценки [8].

Таким образом, нарушается основной принцип радиационной эпидемиологии, а именно: отсутствует качественная база данных о дозах различных видов облучения (профессионального, аварийного, медицинского, природного), чтобы получить корректные результаты расчета риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний. Злокачественные новообразования (ЗНО) не обладают избирательными свойствами и могут возникнуть от любого вида облучения. Поэтому только использование суммарной дозы позволит получить корректный ответ, вреден ли тот или иной уровень облучения. И только этот показатель может быть принят для оценки состояния радиационной

безопасности, а также использован для нормирования радиационного облучения.

Большой интерес могут представлять данные по ликвидаторам последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), поскольку некоторые из них в прошлом были работниками предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом» и, помимо дозы, полученной при работе в 30-километровой зоне ЧАЭС, имеют еще и профессиональные дозы облучения при ионизирующем излучении.

Для корректной оценки риска возникновения радиационно-индуцированных заболеваний у лиц, не только подвергшихся аварийному радиационному воздействию (авария на ЧАЭС и другие радиационные инциденты), но и имеющих (имевших) контакт с радиоактивными веществами (РВ) или работающими (работавшими) с источниками ионизирующих излучений (ИИИ), необходимо использовать суммарную дозу от всех видов источников излучения [2].

Нами был осуществлен сбор данных о дозах профессионального облучения работников предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом», принимавших участие в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, и оценка риска заболевания солидными раками этого контингента лиц с учетом доз, полученных не только при работе в 30-километровой зоне, но и доз, полученных на своих рабочих местах.

## Материалы и методы

В исследовании были использованы персональные значения двух для данной выборки видов источников излучения:

- дозы внешнего облучения, полученные ликвидаторами последствий аварии на ЧАЭС при работе в 30-километровой зоне;
- дозы профессионального внешнего облучения работников основного производства – лиц, состоящих (состоявших) на индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК), участвовавших в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Дозы профессионального облучения работников АЭС были представлены АО «Концерн Росэнергоатом» по просьбе ФМБА России. Также были собраны данные о дозах профессионального облучения работников других предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом», на которых работают (работали) ликвидаторы последствий аварии на ЧАЭС.

Дозы профессионального облучения были представлены по годам работы с РВ и ИИИ от начала работы на предприятиях и организациях Госкорпорации «Росатом» по 2012 год. Рассчитаны кумулятивные дозы, которые были привязаны к участникам ликвидации аварии, включенным в Отраслевой регистр. Для работы в «Excel – 2000» была сформирована база данных ликвидаторов с дозами облучения и заболеваниями солидными раками.

Всего в работу включена информация о 12 698 ликвидаторах последствий аварии на ЧАЭС – мужчинах, имеющих данные о дозах, полученных во время работы в 30-километровой зоне. В первых документах регистра было указано, что профессиональному облучению подвергались 20 – 25 % работников предприятий и организаций атомной промышленности, принимавших участие в ликви-

дации последствий аварии на ЧАЭС (в последующих документах эта информация была исключена). Дозу профессионального облучения для этой работы удалось собрать у 1 333 человек (10,5 %).

Данные о дозах внешнего облучения ликвидаторов различных годов пребывания в 30-километровой зоне представлены в таблице 1.

Средний возраст мужчин-ликвидаторов составил на 2013 г.  $61,5 \pm 0,1$  лет. В таблице 2 представлены некоторые характеристики обобщенной базы данных по пяти дозовым группам. Группы формировали из расчета примерно равного количества лиц и с учетом полученных доз облучения.

В таблице 3 представлена информация о средних, минимальных и максимальных дозах внешнего облучения, полученных ликвидаторами в различных местах работы.

Таблица 1

**Распределение доз внешнего облучения у мужчин-ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, полученных при работе в 30-километровой зоне**

Годы въезда	Кол-во ликвидаторов	Из них с данными о дозе		Среднее значение, (мЗв)
		число лиц	%	
1986 – 1990	18 450	12 698	68,8	55,3
1986	10 790	7 276	67,4	74,8
1987	4 738	3 365	71,0	33,1
1988	1 868	1 389	74,4	25,7
1989	798	571	71,6	16,8
1990	266	97	36,5	11,9

Таблица 2

**Характеристика базы данных мужчин-ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС (дозы ЧАЭС, профессиональные дозы)**

Дозовая группа (ЧАЭС), мЗв	Число ликвидаторов	Средняя доза, мЗв	Дозовая группа (проф.), мЗв	Число ликвидаторов с проф. облучением	Средняя доза, мЗв
0,1 – 4,9	2 929	2,23	0,1 – 5,9	2 983	2,60
5,0 – 12,9	2 270	7,96	6,0 – 16,7	2 248	10,33
13,0 – 35,1	2 497	21,73	17,0 – 48,8	2 478	30,45
36,0 – 98,8	2 509	62,25	49,0 – 120,5	2 485	80,39
99,0 – 1478,5	2 493	180,42	121 – 1 985,6	2 504	229,07

Таблица 3

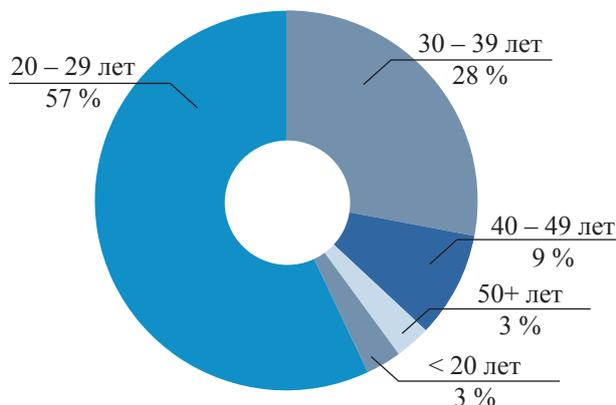
**Распределение доз облучения в зависимости от места работы**

Место получения дозы	Минимальная доза, мЗв	Средняя доза, мЗв	Максимальная доза, мЗв
ЧАЭС	0,1	54,0	1 478,5
Предприятия	0,1	171,3	1 580,0
Сумма доз	0,2	147,97	1 985,6

У ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, работников предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом» за период наблюдения было выявлено 805 солидных злокачественных новообразований.

В структуре злокачественных новообразований у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС преобладают рак бронхов и легкого – 20,3 % и рак желудка – 14,9 %. В исследование включены только солидные раки.

Как видно из рисунка, возраст 85 % ликвидаторов на начало работы в 30-километровой зоне ЧАЭС составил 20 – 39 лет.



Распределение ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, состоящих на ИДК, по возрасту на начало работы в 30-километровой зоне ЧАЭС

Для оценок риска по группированным данным, объединенным в возрастные, дозовые группы, был использован пакет прикладных статистических программ «EPICURE» (модуль «AMFIT»), широко применяемый в современной радиационно-эпидемиологической практике. В этом пакете программно реализована методика оценки радиационных рисков. Программа «AMFIT» является признанным стандартом для проведения радиационно-эпидемиологических исследований. Оценки радиационного риска среди персонала предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом» были выполнены с использованием этой программы.

Модель избыточного относительного риска в общем виде представлена как:

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

где:

- $\lambda$  – показатель заболеваемости;
- $\beta$  – избыточный относительный риск;
- $d$  – доза облучения.

$$\lambda_0 = \exp\left(c_0 + c_1 \cdot \ln \frac{age}{age_0} + c_2 \cdot \ln^2 \frac{age}{age_0}\right), \quad (2)$$

где  $c$  – константа.

Функция правдоподобия строится исходя из предположения, что число случаев заболевания является независимыми пуассоновскими случайными величинами с математическим ожиданием  $Y_i = \lambda_i \cdot P_i$ , где  $P_i$  – число человеко-лет. Функция правдоподобия в общем виде имеет следующий вид:

$$L = \sum \{Y_i \cdot \ln(P_i \cdot \lambda_i) - P_i \cdot \lambda_i\}. \quad (3)$$

Для расчетов по программе «AMFIT» данные были сгруппированы в виде специальной таблицы и написан специальный командный файл (скрипт), содержащий выполняемые команды.

**Результаты и обсуждение**

Исследуемая когорта была сформирована по следующим критериям. Для случаев заболеваний, если человек продолжал работать после заболевания, год окончания наблюдения приравнивался к году диагноза заболевания. Для лиц, не заболевших злокачественными новообразованиями, окончанием наблюдения был 2012 год или дата снятия с учета (смерти).

Для расчетов риска возникновения радиационно-индуцированных солидных раков у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС по программе «AMFIT» данные были разделены на 5 дозовых групп, полученных в результате ликвидации аварии на ЧАЭС, и по суммарной дозе (таблицы 4, 5).

Отмечается рост риска заболеваемости злокачественными новообразованиями ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС (точечные риски) по группам возрастающих доз внешнего облучения, более выраженный при использовании для случая суммарных доз.

Результаты оценки радиационных рисков с использованием программы «AMFIT» для различных дозовых нагрузок приведены в таблице 6.

Наблюдается положительный тренд зависимости заболеваемости от суммарной дозы облучения, и этот тренд статистически значим.

Имеет место различие в 8,6 раза в значении избыточного относительного риска на единицу дозы при использовании данных только по дозам, полученным в результате ликвидации аварии на ЧАЭС и при суммарных дозах облучения.

Таблица 4

**Характеристика некоторых показателей ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, мужчин – работников предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом»**

Дозовая группа	Доза (минимум – максимум), мЗв	Средняя доза, мЗв	Число ликвидаторов (мужчины)	Средний возраст на начало работы с РВ и ИИИ	Чел.-лет наблюдения	Число больных ЗНО	Относительный риск
1	0,1 – 5,9	2,60	2 983	36,5	158 915	173	1,0
2	6,0 – 16,7	10,33	2 248	36,1	118 048	125	0,86
3	17,0 – 48,8	30,45	2 478	35,4	130 610	169	1,06
4	49,0 – 120,5	80,39	2 485	35,6	131 358	147	0,92
5	121 – 1 985,5	229,07	2 504	35,7	136 016	191	1,15

Таблица 5

**Стратифицированные показатели ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, мужчин – работников предприятий и организаций Госкорпорации «Росатом» (дозы ЧАЭС), относительный риск**

Дозовая группа	Доза (минимум – максимум), мЗв	Средняя доза, мЗв	Число ликвидаторов (мужчины)	Средний возраст на начало работы с РВ и ИИИ	Чел.-лет наблюдения	Число больных ЗНО	Относительный риск
1	0,1 – 4,9	2,23	2 929	36,4	27 246	170	1,0
2	5,0 – 12,9	7,96	2 270	35,7	10 003	142	0,98
3	13,0 – 35,1	21,73	2 497	35,9	5 323	172	1,07
4	36,0 – 98,8	62,25	2 509	35,6	5 306	160	1,01
5	99,0 – 1 478,5	180,42	2 493	35,5	6 614	165	1,01

Таблица 6

**Оценки радиационных рисков с использованием программы «AMFIT» для различных дозовых нагрузок**

Дозы	Число ликвидаторов (мужчины)	ERR на 1 Зв	Ошибка показателя	Нижний уровень	Верхний уровень
ЧАЭС + проф.	12 698	1,127	0,5079	0,1311	2,122
ЧАЭС	12 698	0,131	0,5406	– 0,9286	1,190

Основная проблема использования только части суммарной дозы облучения для оценки риска возникновения дозово-индуцированных заболеваний – нарушение этапа группировки данных. Эта ошибка продемонстрирована на примере таблицы 7, в которой отражены в сопоставлении дозовые нагрузки как по результатам работы в ликвидации

последствий аварии на ЧАЭС, так и дозы профессионального облучения.

В таблицу 7 из Отраслевого регистра лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на ЧАЭС, выделены для примера 62 работника из контрольной группы, имеющие дозы внешнего облучения 5 мЗв, полученные при

Таблица 7

### Сопоставление дозовых нагрузок

Доза ЧАЭС, мЗв	Индивидуальные проф. дозы, мЗв	Общая доза, мЗв
5,7	789,9	795,6
5	575,1	580,1
5	502,1	507,1
5	395,0	400,0
5,5	329,6	335,1
5	296,1	301,1
5	248,6	253,6
5	216,8	221,8
5	202,18	207,18
5	200,0	205,0
5	195,4	200,4
5	189,7	194,7
5	169,9	174,9
5	166,7	171,7
5,8	166,08	171,88
5,8	157,71	163,51
5	148,94	153,94
5	148,17	153,17
5,1	146,87	151,97
5	146,5	151,5
5	145,7	150,7
5	142,8	147,8
5	141,5	146,5
5,1	129,6	134,7
5	115,0	120,0
5	108,71	113,71
5	100,94	105,94
5,9	99,2	105,1
5	98,78	103,78
5,7	97,3	103,0
5	96,2	101,2
5	92,87	97,87
5,7	91,4	97,1
5	82,31	87,31
5	81,8	86,8



Доза ЧАЭС, мЗв	Индивидуальные проф. дозы, мЗв	Общая доза, мЗв
5,5	78,0	83,5
5	75,35	80,35
5	71,48	76,48
5	56,35	61,35
5	53,6	58,6
5	53,18	58,18
5	52,6	57,6
5	49,5	54,5
5	46,14	51,14
5,2	43,92	49,12
5	43,8	48,8
5	42,49	47,49
5	42,1	47,1
5	38,5	43,5
5	37,8	42,8
5	37,41	42,41
5	36,8	41,8
5	34,1	39,1
5	32,53	37,53
5	31,3	36,3
5,5	29,3	34,8
5	20,17	25,17
5	6,46	11,46
5	5,64	10,64
5	1,4	6,4
5,5	0,37	5,87
5	0,1	5,1

работе в 30-километровой зоне ЧАЭС. Вместе с тем при использовании суммы дозовых нагрузок (при ликвидации аварии на ЧАЭС и дозы профессионального облучения) только двоих из 62 ликвидаторов можно включать в контрольную группу.

Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование в области обеспечения радиационной безопасности регламентирует ограничения облучений граждан в форме гигиенических нормативов и (или) уровней вмешательства отдельно для каждого из видов облучения:

- облучение от техногенных ИИИ при их нормальной эксплуатации;
- облучение от природных ИИИ;
- медицинское облучение пациентов;
- аварийное облучение [2].

Такой подход к нормированию, по нашему мнению, некорректен: сумма отдельных нормативов может превысить порог минимального воздействия радиации на организм человека.

### Заключение

Основным источником оценки радиационной безопасности является исследование риска возникновения радиационно-ассоциированных заболеваний [1]. Данное исследование показало, что использование для этой цели доз различных видов облучения приводит к получению отличных друг от друга результатов. Поэтому основной задачей в настоящее время надо считать создание Отраслевого медико-дозиметрического регистра работников атомной промышленности с включением в него данных о дозах всех видов облучения (профессионального, аварийного, медицинского, природного), что требуют директивные документы [1, 2]. В свою очередь, использование результатов оценки риска возникновения радиационно-обусловленных заболеваний суммарной дозы позволит нам получать корректные результаты для совершенствования нормативов радиационной безопасности.

### Список литературы

1. О радиационной безопасности населения: федер. закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_8797/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/) (дата обращения: 04.12.2019).
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 96): Гигиенические нормативы. М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996. 127 с.
3. Koterov A. N., Zharkova G. P., Biryukov A. P. Tandem of radiation epidemiology and radiobiology for practice of radiation protection // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2010. Т. 55. № 5. С. 48 – 73.
4. Ильин Л. А., Киселёв М. Ф., Панфилов А. П. Медико-дозиметрический регистр работников атомной промышленности России. Состояние и перспективы // Бюллетень сибирской медицины. 2005. Т. 4. № 2. С. 6 – 13.
5. Фирсанова Н. Система радиационной безопасности требует совершенствования // Кто есть кто в медицине. 2010. № 5 (48). URL: <http://ktovmedicine.ru/news/2010/5/sistema-radiacionnoy-bezopasnosti-trebuets-overshenstvovaniya.html> (дата обращения: 04.12.2019).
6. Atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki: significance for radiation protection. URL: [http://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/introduction/atomic-bombs/atomic-bombing\\_node.html](http://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/introduction/atomic-bombs/atomic-bombing_node.html) (дата обращения: 04.12.2019).
7. Japan Program: Radiation Effects Research Foundation. URL: <https://www.energy.gov/ehss/japan-program-radiation-effects-research-foundation> (дата обращения: 04.12.2019).
8. Kato K., Sawada Sh. Medical X-ray Doses Contributions to the Ionizing Radiation Exposures of Atomic-Bomb Survivors // Journal of Radiation Research. Volume 32. Issue Suppl\_1. 1991. P. 136 – 153.

### References

1. On the radiation safety of the population: feder. law of January 9, 1996 No. 3-FZ. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_8797/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/) (The date of the appeal is: 04.12.2019).
2. Radiation safety standards (NRB – 96): Hygienic standards. M.: Information and Publishing Center of the State Committee for Sanitary and Epidemiological Surveillance of Russia, 1996. 127 p.
3. Koterov A. N., Zharkova G. P., Biryukov A. P. Tandem of radiation epidemiology and radiobiology for radiation protection // Medical radiology and radiation safety. 2010. V. 55. № 5. P. 48 – 73.
4. Ilyin L. A., Kiselev M. F., Panfilov A. P. Medical-dosimetry register of nuclear industry workers in Russia. State and prospects // Bulletin of Siberian medicine. 2005. V. 4. No. 2. P. 6 – 13.
5. Firsanova N. The radiation safety system needs improvement. Who is who in medicine. 2010. № 5 (48). URL: <http://ktovmedicine.ru/news/2010/5/sistema-radiacionnoy-bezopasnosti-trebuets-overshenstvovaniya.html> (The date of the appeal is: 04.12.2019).
6. Atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki: significance for radiation protection. URL: [http://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/introduction/atomic-bombs/atomic-bombing\\_node.html](http://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/introduction/atomic-bombs/atomic-bombing_node.html) (The date of the appeal is: 04.12.2019).
7. Japan Program: Radiation Effects Research Foundation. URL: <https://www.energy.gov/ehss/japan-program-radiation-effects-research-foundation> (The date of the appeal is: 04.12.2019).
8. Kato K., Sawada Sh. Medical X-ray Doses Contributions of Atomic-Bomb Survivors // Journal of Radiation Research. Volume 32. Issue Suppl\_1. 1991. P. 136 – 153.

