

10. Гуревич И.И., Тарасов Л.В. Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965.
11. Казарновский М.В. Замедление и диффузия нейтронов. Цепная ядерная реакция. — Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1995, т. 26, вып. 6, с. 1475—1502.

Поступило в Редакцию 4.11.02

УДК 539.12.08

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ КОГОРТНЫХ РАДИАЦИОННО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Орлов М.Ю., Степаненко В.Ф. (Мед. радиологический научный центр РАМН),
Хоши М., Такада Дж. (Научно-исследовательский институт ядерной медицины
и биологии Университета г. Хиросимы, Япония)

В настоящей работе обсуждается точность определения дозы облучения, необходимая для оценки радиационного риска для здоровья большого контингента населения. Так, после ядерных взрывов в Хиросиме и Нагасаки, на территории в окрестностях ядерных полигонов в СССР и США, на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС, необходимо выполнять ретроспективные оценки дозы облучения для групп населения, составляющих не менее нескольких сотен тысяч человек. Например, в японский регистр лиц, пострадавших при ядерных взрывах, включено примерно 110 тыс. чел. [1], число лиц, проживающих на загрязненной после аварии на Чернобыльской АЭС территории, составляет ~3,1 млн чел. [2].

Радиационно-эпидемиологические исследования можно приближенно разделить на две категории: 1) когортные и популяционные, когда рассматривается заболеваемость большого контингента населения, и 2) по методологии «случай — контроль», где число включенных в исследования лиц может быть небольшим (десятки и сотни). В настоящей работе рассматривается пример именно с когортным исследованием.

В качестве материала для определения необходимой точности оценок дозы были использованы приведенные в таблице данные совместной японско-американской программы LSS (Life Span Study — исследование продолжительности жизни) [1]. В этих материалах содержатся, в частности, данные о смертности от лейкоза лиц, подвергшихся облучению при взрывах ядерных бомб в городах Хиросима и Нагасаки. Доза облучения этих лиц была оценена в работе T65D [3]. Эти данные и их точность считались типичными для современных оценок неблагоприятных последствий облучения больших групп населения.

При выполнении программы LSS из-за небольшого числа статистических данных о смертности и трудностей оценки индивидуальной дозы для анализа были использованы широкие дозовые интервалы (0—1, 1—10, 10—50, 50—100, 100—200, 200—300, 300—400, 400—450 рад или 0—0,01, 0,01—0,1, 0,1—0,5, 0,5—1, 1—2, 2—3, 3—4, 4—4,5 Зв). В таких дозовых интервалах имелось по 7—30 событий, представляющих интерес для анализа (смерти от лейкемии).

Целью настоящей работы являлась оценка влияния ширины дозовых интервалов на значения радиационного риска и их неопределенности в соответствии с данными [1].

В качестве меры риска в работе использованы отношения наблюдаемого числа случаев смерти от лейкемии в когорте в 1950—1974 гг. при разной дозе облучения к ожидаемому числу случаев смерти в этой когорте только при фоновом облучении $R(D)/R(0)$. Здесь следует отметить, что в исследовании не ставилась цель переоценки дозы или иных результатов [1] и не содержатся предложения по такой переоценке. Данные работы [1] использованы здесь только как типичный пример имеющихся в оценке радиационного риска сведений и только для иллюстрации предлагаемого подхода.

При выполнении работы были приняты следующие предположения, хорошо обоснованные экспериментально:

смерть от лейкемии является редким событием, и статистическое распределение этих событий описывается законами Пуассона или Гаусса:

неопределенность (вариабельность) численных значений риска описывается нормальным распределением:

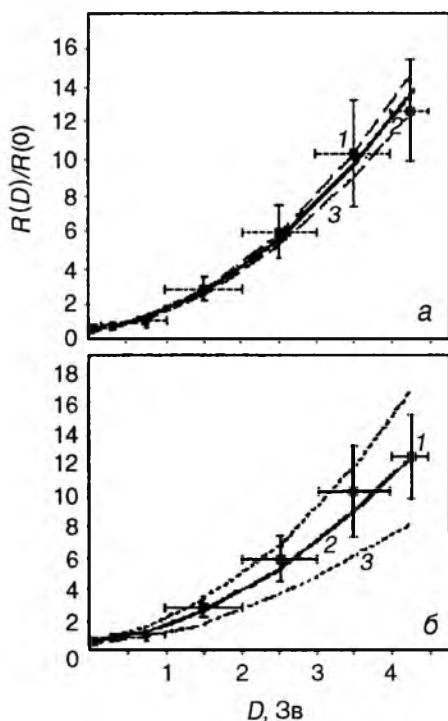
внутри интервалов усреднения значения дозы распределены равномерно.

Для описания зависимости доза—эффект используется парабола, полученная методом наименьших квадратов. Для коэффициентов параболы вычисляются дисперсии и ковариации, т.е. полная ковариационная матрица [4]. Такое описание применялось исключительно для удобства и не связано с какими-либо модельными представлениями о механизмах, приводящих к возникновению лейкемии после облучения.

Влияние статистического распределения на результаты оценки риска определяли с помощью статистического моделирования (метод Монте-Карло). Для этого в приведенных в таблице интервалах случайно выбирали значения дозы с прямоугольным распределением и затем многократно вычисляли параболические зависимости. После этого вычисляли средние значения параметров, их дисперсии и ковариации и погрешности аппроксимационной кривой.

Число случаев смерти от лейкемии в 1954—1970 гг. среди представителей населения, пережившего ядерную бомбардировку в Хиросиме и Нагасаки [1]

Интервал дозы, Зв	Число случаев		$R(D)/R(0) = N_{\text{н}}/N_{\text{ож}}$
	наблюдаемое $N_{\text{н}}$	ожидаемое $N_{\text{ож}}$	
0	31	62,6	$0,495 \pm 0,089$
0,01—0,09	23	36,9	$0,623 \pm 0,131$
0,1—0,49	20	26,2	$0,762 \pm 0,168$
0,5—0,99	7	7,3	$0,961 \pm 0,365$
1—1,99	16	5,7	$2,83 \pm 0,71$
2—2,99	15	2,6	$5,86 \pm 1,52$
3—3,99	12	1,2	$10,27 \pm 2,98$
4—4,5	20	1,6	$12,55 \pm 2,89$



На рис. 1 приведены результаты, иллюстрирующие влияние на неопределенность радиационного риска ширины интервалов усреднения дозы. Если ширину дозовых интервалов не принимать во внимание и использовать только срединные значения этих интервалов в качестве независимых переменных, то кривая доза—эффект может быть описана зависимостью (см. рис. 1, а)

$$R(D) = (0,53 \pm 0,037) + (0,45 \pm 0,22)D + (0,61 \pm 0,09)D^2, \quad (1)$$

где $R(D)$ — относительный риск; D — доза, Зв.

В данном случае можно говорить о том, что неопределенность риска определяется только объемом анализируемой выборки и является минимальной, поскольку значения дозы считаются абсолютно точными.

Если же учесть ширину дозовых интервалов, эта зависимость будет иметь такой вид (см. рис. 1, б):

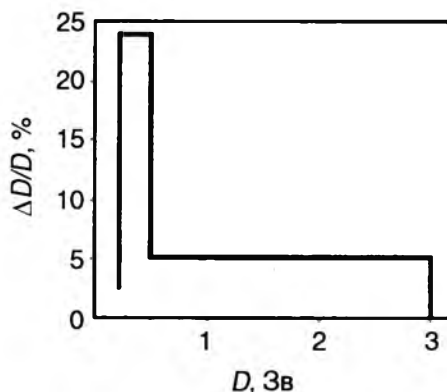
$$R(D) = (0,56 \pm 0,08) + (0,52 \pm 0,64)D + (0,54 \pm 0,28)D^2. \quad (2)$$

Р и с. 1. Зависимость относительного риска $R(D)/R(0)$ от дозы (D) без учета (а) и с учетом (б) влияния ширины интервалов усреднения дозы: 1 — эксперимент; 2 — аппроксимация; 3 — коридор ошибок

Как видно из приведенных результатов, параметры и, главное, их неопределенности оказываются различными. В случае учета ширины интервалов усреднения дозы неопределенности параметров оказываются значительно выше.

Как видно из рис. 1 и соотношений (1), (2), оценки уровней риска для таких редко встречающихся заболеваний, как лейкоз, не могут иметь точность лучшую, чем 20—35%, из-за малого объема анализируемой выборки (в данном случае числа умерших от лейкоза).

Указанные уровни точности оценки радиационного риска (смерти от лейкоза) были использованы для определения необходимой точности определения дозы в различных дозовых интервалах. Было установлено (рис. 2), что необходимая для оценки риска с неопределенностью 20—35% точность определения дозы составляет 30—35% в интервале 1—5 рад (0,01—0,05 Зв) и 5—10% в интервале 5—30 рад (0,05—0,3 Зв).



Р и с. 2. Необходимая точность оценки дозы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beebe G., Kato H., Land E. Mortality Experience of Atomic Bomb Survivors 1950-74. Radiation Effects Research Foundation. Techn. Report RERF TR 1-77, 1977.
2. Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Parshkov E.M. et al. Retrospective absorbed thyroid doses estimation in Russia following the Chernobyl accident. — In: Progress and Application to Dosimetrical Evaluation of Childhood Thyroid Cancer Morbidity. Proc. of the Second Hiroshima Intern. Symp. Research Institute for Radiation Biology and Medicine, Hiroshima University, Hiroshima, 1996, p. 31—84.
3. Milton R., Shohoji R. Tentative 1965 Radiation Dose Estimation for Atomic Bomb Survivors. Report TR1-68, Atomic Bomb Casualty Commission (ABCC), 1968.
4. Калашников И.И., Козодаева М.С. Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966. 407 с.

Поступило в Редакцию 6.11.02

Редакция журнала поздравляет академика, вице-президента РАН Геннадия Андреевича Месяца с присуждением совместно с Яном Дугласом Смитом (США) Международной энергетической премии «Глобальная энергия» 2003 года за фундаментальные исследования и разработку мощной импульсной энергетики.

