

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P16-94-52

М.М.Комочков

ВЕЛИЧИНЫ И ОЦЕНКИ
РАДИАЦИОННОГО РИСКА

1994

Величины и оценки радиационного риска

Дано описание дифференциальных и интегральных величин радиационного риска на основе рекомендаций международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Значения величин и их распределения по возрасту представлены для наиболее значимых случаев. Анализируются рекомендации МКРЗ по ограничению потенциального облучения и его вероятности на примере гипотетических аварий на ИБР-2 и ИБР-30. Представлены зависимости уровня радиационного риска от времени с 1965 года для персонала ОИЯИ.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1994

Перевод автора

Quantities and Estimations of Radiation Risk

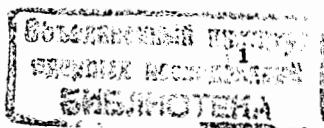
Differential and integral quantities of a radiation risk described on the base of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) recommendations are presented. The quantities values and their age distributions for the most important cases are given. The ICRP recommendations on constraint of potential exposures and their probability on the example of hypothetical accidents on PFR-2 and PFR-30 are analyzed. Time dependences of the radiation risk level since 1965 for the JINR personnel are presented.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

I. Введение

В последние годы все чаще входит в обращение слово риск, и в частности радиационный риск (см., например, /1-5/). Так, в проекте Закона Российской Федерации "О радиационной безопасности населения" предусматривается, что "граждане имеют право на компенсацию за повышенный риск, обусловленный проживанием вблизи ядерных установок и предприятий ядерно-топливного цикла и на других территориях, где существует потенциальная возможность превышения установленных дозовых пределов облучения". В современных рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) одним из необходимых условий является ограничение риска людей от потенциального облучения /1, 6/. Таким образом, конечной целью контроля облучаемости людей ионизирующим излучением следует считать определение значений радиационного риска W_i , т.к. именно эта величина позволяет оценить состояние радиационной безопасности и сравнить количественно вред от различных факторов или суммировать их.

Понятие риск, и в частности W_i , к настоящему времени стало выражать различные результаты действия радиации на человека /2/, а также опасность последствий от потенциальных аварий или происшествий /6-8/. Эта многогранность понятия риска приводит к различным определениям, объединяя их одной величиной — вероятностью возникновения неблагоприятных последствий (вредного эффекта) вследствие облучения. МКРЗ /2/ считает необходимым при этом указать, какой вредный эффект ожидается: неизлечимый рак, излечимый рак, тяжелый наследственный эффект и т.д. Дополнительной частью определения радиационного риска является количественная характеристика вредного эффекта — последствие W_i ; если он произошел; выражением W_i может быть тяжесть эффекта и его распределение во времени. Таким образом, радиационный риск по МКРЗ/2/ вы-



ражается через математическое ожидание последствий облучения:

$$W = \sum P_i W_i, \quad (1)$$

где P_i – вероятность каждого опасного или вредного эффекта i . Применительно к стохастическим эффектам облучения (1) можно представить суммой трех составляющих /2/:

- излечимого рака,
- неизлечимого рака,
- тяжелых наследственных эффектов.

Значения этих составляющих W для населения и взрослых, работающих на единицу эффективной дозы E , можно найти в работах /1,9/. Величины $P_i W_i$ в частном случае называют номинальными коэффициентами вероятности для стохастических эффектов; в некоторых работах их называют коэффициентами радиационного риска /9/ KRR или просто коэффициентами риска, когда ясно из текста, что величина характеризует вредный эффект облучения радиацией /10/. Величины KRR дают возможность оценить стохастические последствия для группы людей, представленных обоими полами и равномерно всеми возрастными группами данной категории (населения или взрослых), а также для среднего индивидуума из этой группы. В общем случае оценку последствий облучения следует выполнять с учетом возрастного распределения людей и времени облучения. К настоящему времени достаточно надежно разработана методология оценки последствий облучения и получены результаты лишь для одной из трех составляющих (1) – неизлечимого рака.

Цель настоящей работы – дать представление о состоянии величин радиационного риска и возможностях оценки их значений, в частности для персонала ОИЯИ.

2. Величины дифференциального риска

Основой представления дифференциального риска является плотность вероятности смерти /2/ $G(t)$. Синонимами наименования этой величины являются:

- плотность смертей в зависимости от возраста /3/ t ,
- интенсивность смертности /11/.

Величина $G(t)$ – вероятность наступления смерти $dS/S(t)$ в течение бесконечно малого временного интервала dt в возрасте t , отнесенная к длительности этого интервала,

$$G(t) = -[1/S(t)]dS/dt, \quad (2)$$

где $S(t)$ – вероятность дожить до возраста t (или функция дожития):

$$S(t) = \exp\left[-\int_0^t G(t)dt\right]. \quad (3)$$

В методологии МКРЗ при воздействии излучения на людей $G(t)$ при некоторых условиях /2/ может представляться суммой двух слагаемых:

$$G(t) = G_0(t) + dp/dt. \quad (4)$$

Здесь $G_0(t)$ – фон условной плотности вероятности смерти (the background conditional death probability rate) – плотность вероятности смерти от всех причин для некоторого среднего индивидуума в зависимости от его возраста. Удовлетворительным приближением для описания $G_0(t)$ при $t > 10$ лет является формула, установленная в прошлом веке:

$$G_0(t) = A \cdot \exp(B \cdot t) + C, \quad (5)$$

где A, B и C – демографические константы.

Условная плотность вероятности смерти (the conditional death probability rate) dp/dt , которая описывает плотность вероятности смерти, вызванной облучением радиацией. Величина dp/dt является приращением $G_0(t)$ и описывается двумя моделями: аддитивной и мультипликативной /2/. Во всех случаях условием применимости dp/dt является

$$(dp/dt)/G_0(t) \ll 1. \quad (6)$$

Безусловная плотность вероятности смерти (the unconditional rate) dr/dt является произведением (dp/dt) и $S(T, t)$ – вероятности выживания, модифицированной приращением риска от облучения:

$$dr/dt = S(T, t) \cdot (dp/dt). \quad (7)$$

Здесь T – время начала облучения или нижняя граница нормировки dr/dt .

Плотность вероятности возраста смерти (the probability density of the age of death) – вариация dr/dt с возрастом, выполненная так, чтобы площадь под кривой dr/dt

равнялась характерной пожизненной вероятности смерти R, определение которой дано в следующем разделе.

3. Величины интегрального риска

Основой представления интегрального риска является характерная пожизненная вероятность смерти (the attributable lifetime probability of death) /2/:

$$R = \int_T (dr/dt) dt. \quad (8)$$

В работе /3/ величина, аналогичная R, определяется несколько по-иному (неся ту же смысловую нагрузку) и называется пожизненная вероятность смерти, обусловленная облучением радиацией.

Аналогичная величина в методологии /11/ имеет принципиально иное определение с наименованием - пожизненный радиационный риск.

В дальнейшем будем иметь дело с величиной R, определенной (8) не столько из-за международного характера рекомендаций /2/, сколько из-за приведения значений этих величин для ряда практически важных случаев /2/.

Одной из важных величин, характеризующих радиационный риск, является средняя потеря продолжительности жизни (the mean loss of lifetime)

$$Y = \frac{\int_T y(t) \cdot (dr/dt) dt}{\int_T (dr/dt) dt}. \quad (9)$$

Здесь $y(t)$ - остаток ожидаемой жизни в зависимости от возраста. Величины Y и R позволяют определить величину снижения продолжительности ожидаемой жизни ΔL , т.е. математическое ожидание потери продолжительности жизни, обусловленное определенным облучением:

$$\Delta L = R \cdot Y. \quad (10)$$

4. Меры радиационного риска

В качестве мер радиационного риска можно рассмотреть эффективную эквивалентную дозу H_E , эффективную дозу E и дозовый эквивалент органа H_T , которые, в принципе, измеряемы, что в большей степени относится к H_E . Согласно рекомендациям МКРЗ (публикация 60) величины E и H_T определены следующим образом:

$$E = \sum_T w_T H_T; \quad H_T = \sum_R w_R D_{TR}, \quad (11)$$

где w_T - взвешивающий тканевый фактор (табулирован) /1/, w_R - взвешивающий фактор излучения R (табулирован) /1/, D_{TR} - средняя поглощенная доза для органа или ткани "Т",

$$D_{TR} = \frac{E_{TR}}{m_T}. \quad (12)$$

Здесь E_{TR} - переданная органу или ткани массой m энергия излучением R.

Согласно рекомендациям МКРЭ /12/ эффективная эквивалентная доза -

$$H_E = \sum_T w_T H_T, \quad (13)$$

средняя эквивалентная доза для органа или ткани -

$$H_T = Q_T D_T, \quad (14)$$

где

$$Q_T = (1/m_T D) \int Q D dm, \quad (15)$$

$$D_T = (1/m_T) \int D dm. \quad (16)$$

Здесь D - поглощенная доза в элементе массы dm, Q - коэффициент качества.

$$Q = (1/D) \int Q(L) D_L dL, \quad (17)$$

где $D_L dL$ - та часть поглощенной дозы, которая передается частицами с (неограниченной) линейной передачей энергии между L и L + dL. Зависимость Q(L) описывается /1/ следующим образом:

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & \text{для } L < 10 \\ 0.32L - 2,2 & \text{для } 10 < L < 100 \\ 300/\sqrt{L} & \text{для } L \geq 100. \end{cases} \quad (18)$$

Сравнение величин E и H_E показывает, что несмотря на одинаковое предназначение, их концепции различны; значения E и H_E для одного и того же поля излучения часто приблизительно совпадают [12].

5. Примеры значений величин радиационного риска

5.1. Распределение условной плотности вероятности смерти [2]

Фон условной плотности вероятности смерти (от всех причин) $G_0(t)$ и условная плотность вероятности смерти (от облучения) dp/dt представлены на рис.1 в зависимости от возраста. Результаты расчета dp/dt получены на основе аддитивной для мужчин (am) и мультипликативной для мужчин (mm) и женщин (mf) моделей при облучении в течение всей жизни дозой 5 мЗв.

5.2. Распределение безусловной плотности вероятности смерти [2]

Необходимую и достаточную информацию о риске можно получить на основе безусловной плотности вероятности dr/dt и $S(18, t) \cdot G_0(t)$, распределения которых приведены на рис.2. Значения dr/dt_m получены на основе мультипликативной модели, а dr/dt_a — на основе аддитивной модели при ежегодной дозе облучения мужчин 50 мЗв с 18-ти до 65-ти лет. Значения $S(18, t) \cdot G_0(t)$ дают безусловную плотность вероятности смерти от всех причин, а $S(18, t)$ — вероятность дожить до возраста t , модифицированную условием нормировки: нижняя граница определения риска — 18 лет. Демографические функции $S(18, t)$ и $G_0(t)$ относятся к населению Швеции [2]. Представленные на рис.2 результаты показывают, что дифференциальный риск по аддитивной модели выше, чем по мультипликативной до ~60 лет, а после 60 лет $dr/dt_m > dr/dt_a$.

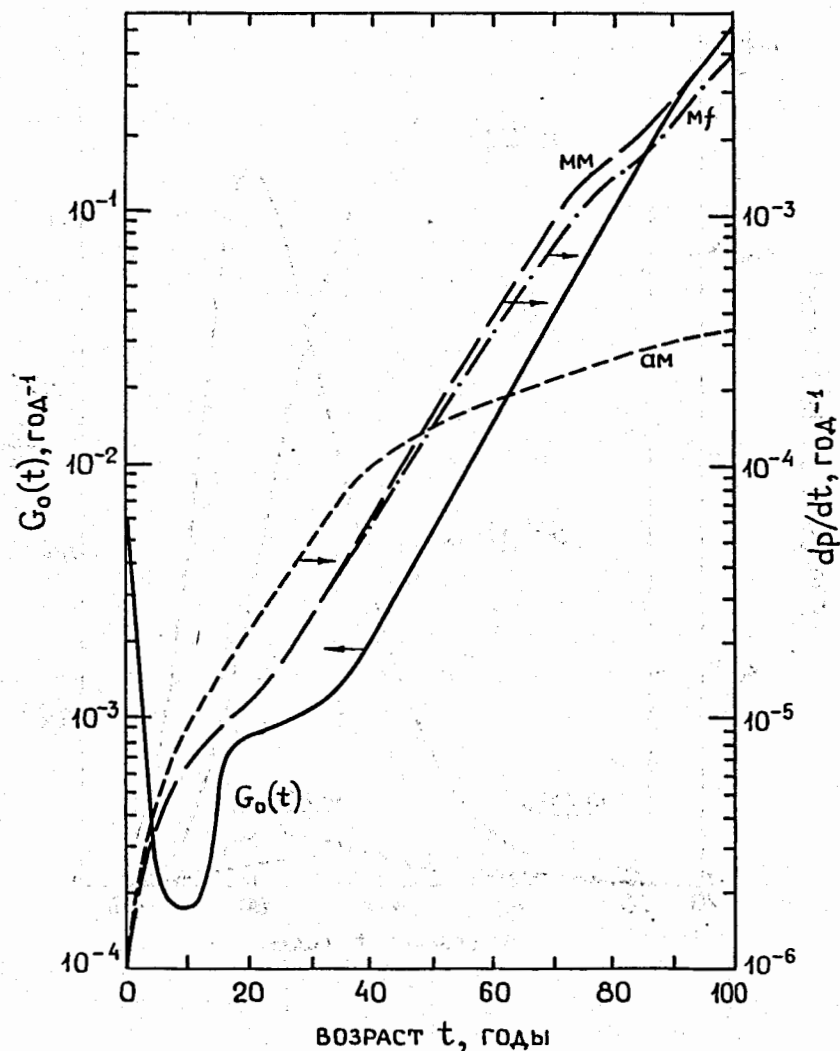


Рис. 1. Зависимость условной плотности вероятности смерти от возраста: $G_0(t)$ — все причины смерти (данные по Швеции [2]), dp/dt — ежегодное облучение эффективной дозой 5 мЗв в течение всей жизни:
 ---- мужчины, аддитивная модель (am),
 ——— мужчины, мультипликативная модель (mm),
 -·-·- женщины, мультипликативная модель (mf)

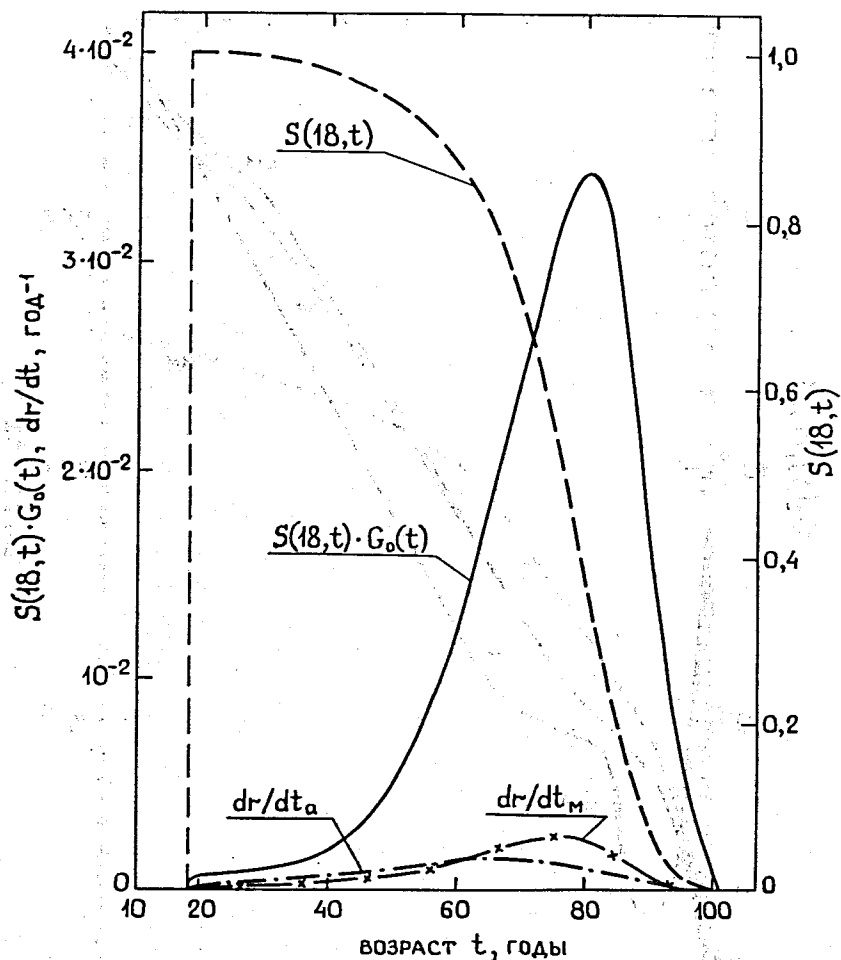


Рис. 2. Безусловная плотность вероятности смерти: от всех причин - $S(18,t) \cdot G_0(t)$, от ежегодного облучения эффективной дозой 50 мЗв с 18-ти до 65-ти лет - dr/dt_a (аддитивная модель), dr/dt_M (мультипликативная модель); $S(18,t)$ - вероятность дожить до возраста t

5.3. Значения величин радиационного риска

Значения основных величин, характеризующих радиационный риск представлены /2/ в таблице 1. Рассчитанные с помощью (7) значения R полезно сравнить с результатами оценки этой величины, опираясь на простейшую формулу

$$R = KPP \cdot E \cdot \Delta t, \quad (19)$$

которая не учитывает временных зависимостей величин радиационного риска и рассчитана на средние значения коэффициентов радиационного риска KPP (номинальные коэффициенты вероятности для стохастических эффектов); E - мощность эффективной дозы, Δt - период облучения. Полученные с помощью (19) значения R для E равных 1,3,3,50 мЗв/год (см. таблицу 1) составляют 0,35%, 1,05%, 0,56%, 9,4% соответственно. Сравнение этих значений R с аналогичными из таблицы 1 показывает хорошее согласие со значениями, полученными с помощью мультипликативной модели, и консервативный характер (19).

Необходимо заметить, что значения ΔL из таблицы 1 не следует относить к каждому человеку из группы численностью N облучаемых, т.к. они являют собой число лет, недожитое теми из группы N , кто умер от рака (n), деленное на N :

$$\Delta L = \frac{n \cdot Y}{N} = R \cdot Y, \quad (20)$$

5.4. Риск при потенциальном облучении

Ситуации с потенциальным облучением могут возникать в большинстве, если не во всех, действиях с источниками ионизирующих излучений; при этом возможны большие вариации в последствиях. Аварии на ядерных реакторах могут привести к широкому диапазону последствий, включая экономические и социальные потрясения. В отсутствие общих законов на пределы и ограничения (сдерживания) при проектировании и эксплуатации подобных установок МКРЗ /6/ рекомендует последствия аварий и происшествий из соображений радиационной безопасности выбирать из групп, представленных в таблице 2.

Таблица 1. Основные величины радиационного риска и их значения: верхние числа получены с помощью аддитивной модели, нижние — с помощью мультипликативной /2,3/

Облучение ежегодной эффективной дозой (мЗв)	Величина радиационного риска			от 18 до 65 лет в течение всей жизни (70 лет)
	1	3	3	
Характерная (обусловленная облучением) полиз- менная вероятность смерти от рака (%), R	0,15	0,46	0,35	5,66
Средняя потеря продолжительности жизни, если смерть наступает от рака (лет), Y	0,40	1,12	0,55	8,56
Снижение продолжительности ожидаемой жизни (лет), $\Delta L = R \cdot Y$	22,6	22,6	19,8	20
Ожидаемое в среднем (за период облучения Δt) ежегодное число смертей от рака среди миллиона людей, $R \cdot 10^6 \cdot \Delta t^{-1}$	13,4	13,4	12,6	13
Максимальный риск, эквивалентный старению (лет), максимум $\{y(t) \text{ dr/dt}\}$	0,03	0,10	0,07	1,12
	0,05	0,15	0,07	1,11
	21	66	74	1200
	57	160	120	1820
	0,3	0,9	0,2	3,9
	0,2	0,5	0,07	1,2

Таблица 2. Диапазоны вероятностей в год, положенных в основу выбора ограничения

Последствие случаев, ведущих к дозам, трактующим как часть нормального облучения	$10^{-1} - 10^{-2}$
Последствие случаев, ведущих только к стохастическим эффектам, но выше пределов доз	$10^{-2} - 10^{-5}$
Последствие случаев, ведущих к дозам, при которых имеют место некоторые детерменистские (пороговые, нестохастические) эффекты	$10^{-5} - 10^{-6}$
Последствие случаев, ведущих к дозам, при которых возможна смерть	$< 10^{-6}$

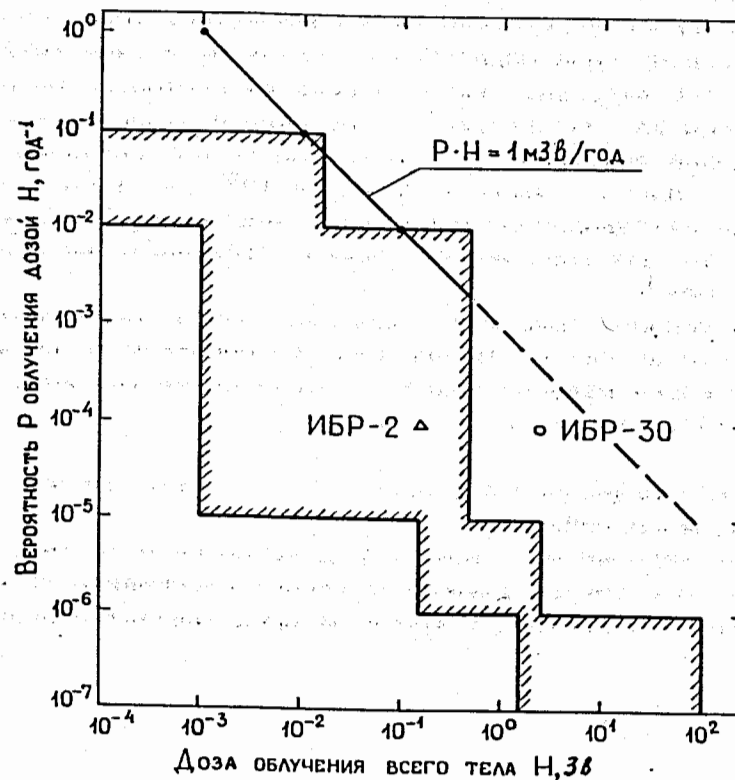


Рис. 3. Ограничения при потенциальном облучении

Данные таблицы 2 представлены гистограммой на рис.3, там же изображена линия равного риска от стохастических эффектов при ежегодном облучении дозой 1 мЗв. Точки являют собой гипотетическую аварийную ситуацию на ИБР-2 и ИБР-30 ОИЯИ; вероятность аварии заимствована из работы /13/, а дозы облучения - из работы /14/. Содержание таблицы 2 и гистограммы (рис.3) рассматриваются /7/ как первый вариант рекомендаций по радиационной безопасности, который будет предметом ревизии по мере накопления опыта. В этой связи и, имея ввиду отсутствие доступных нам комментариев по применению рекомендаций таблицы 1 и гистограммы (рис.3), возможна следующая интерпретация расположения точек ИБР-2 и ИБР-30 на рис.3.

Точка ИБР-2 лежит на два порядка ниже верхней границы гистограммы, которая близка к линии равного риска при ежегодном облучении дозой 1 мЗв, рекомендованной МКРЗ /1/ для одного (любого) человека из населения. Это может означать, что при аварии ИБР-2 с вероятностью 10^{-4} в год и выбросе радионуклидов в количестве, указанном в работе /12/ допустимо подвергнуть облучению дозами $\sim 0,2$ Зв не более 100 жителей. Принимая среднюю плотность по району г. Дубны 250 человек/км² и оценивая площадь с эффективной дозой облучения 0,2 Зв равной 16 км² согласно работе /14/, получим число жителей $\sim 4 \cdot 10^3$. Для того, чтобы следовать рекомендациям МКРЗ /6/, необходимо плотность вероятности гипотетической аварии /14/ иметь не более $2,5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Аналогичные оценки в отношении ИБР-30 показывают, что допустимая плотность вероятности гипотетической аварии с выбросом радионуклидов в количестве, указанном в работе /14/, составляет $\sim 10^{-7}$ год⁻¹.

5.5. Оценка радиационного риска (РР) от источников излучений ОИЯИ

Всестороннее и полное определение РР в соответствии с (1) и с учетом дифференциальных распределений его составляющих в настоящее время не представляется возмож-

ным из-за отсутствия достаточной информации /1/. Возможность всестороннего определения имеется лишь в отношении одной из составляющих РР - вероятности смерти от рака R. Для выполнения расчетов R от источников излучения ОИЯИ необходимы дозовые распределения в зависимости от возраста, получение которых планируется. В отсутствие таких распределений оценку уровней R и W выполним на основе номинальных коэффициентов вероятности стохастических эффектов /1/ или KPP /9/ и зависимости средней и коллективной мощности дозы облучения от времени для сотрудников ОИЯИ:

$$\dot{R} = KPP_c \cdot \dot{E} \quad (21)$$

$$\dot{W} = KPP \cdot \dot{E} \quad (22)$$

где \dot{E} - мощность эффективной дозы, KPP_c - коэффициент радиационного риска смерти от рака, KPP - суммарный коэффициент радиационного риска по всем стохастическим эффектам:

$$KPP_c = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1} \text{ — взрослые (t } \geq 18 \text{ лет),}$$

$$KPP_c = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1} \text{ — все население,}$$

$$KPP = 5,6 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1} \text{ — взрослые (t } \geq 18 \text{ лет),}$$

$$KPP = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1} \text{ — все население.}$$

Согласно работе /13/ средняя мощность эффективной дозы в условиях проживания жителей г. Дубны составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ Зв/год; дозу формируют как природные, так и техногенные источники излучений. Средняя мощность эффективной дозы облучения персонала от источников излучений ОИЯИ за последние несколько лет составляет $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ Зв/год. Это дает возможность оценить уровень радиационного риска с помощью (21) и (22):

- для одного человека из населения вероятность смерти за год составит:

$$\dot{R}_n = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 1,25 \cdot 10^{-4},$$

а вероятность заболевания за год составит:

$$\dot{W}_n = 7,3 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \approx 1,8 \cdot 10^{-4};$$

- для одного человека из персонала уровень дополнительной вероятности смерти за год составит:

$$\dot{R}_n = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,8 \cdot 10^{-4},$$

а дополнительная вероятность заболевания за год -

$$\dot{W}_n = 5,6 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1,12 \cdot 10^{-4}.$$

Для N сотрудников или жителей уровень риска будет в N раз больше.

Зависимость среднего дополнительного уровня радиационного риска для персонала ОИЯИ, работавшего с источниками ионизирующих излучений, \dot{W}_n и $\dot{W}_n \cdot N$ от времени с 1965 года представлена на рис. 4. Площади под кривыми дадут, очевидно, дополнительный радиационный риск как на одного сотрудника (в среднем), так и на весь персонал за период с 1965 года.

Согласно [13] уровень радиационного риска на одного жителя от гипотетической аварии на реакторах ОИЯИ составит:

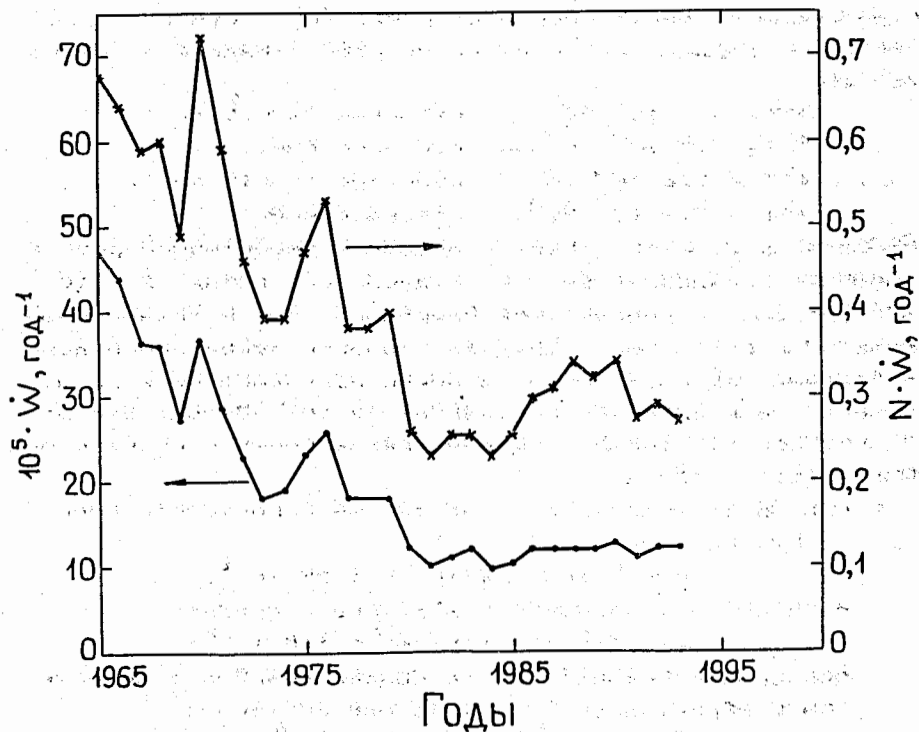


Рис. 4. Уровень радиационного риска среди N сотрудников ОИЯИ, работающих с источниками ионизирующих излучений (персонал):

$\text{---} \times \text{---}$ — средняя дополнительная плотность вероятности заболевания сотрудника — \dot{W} , год⁻¹,
 $\text{---} \times \text{---}$ — число ожидаемых дополнительных заболеваний в год среди персонала — $\dot{W} \cdot N$, год⁻¹

$R_a = 4,5 \cdot 10^{-7}$ — вероятность смерти за год,

$\dot{W}_a = 6,6 \cdot 10^{-7}$ — вероятность заболевания за год.

Общий уровень радиационного риска от всех действующих и гипотетических источников излучений будет:

— для населения: $\dot{R} = \dot{R}_n + R_a$,

$\dot{W} = \dot{W}_n + \dot{W}_a$,

— для персонала: $\dot{R} = \dot{R}_n + R_n + R_a$,

$\dot{W} = \dot{W}_n + \dot{W}_n + \dot{W}_a$.

Сравнение значений уровней радиационного риска (УРР) с другими видами риска [13] показывает, что УРР в Дубне не превышает 1% от суммарных значений уровня риска от всех причин — болезней, несчастных случаев и прочего.

6. Заключение

Различные методологии установления радиационного риска, разработанные к настоящему времени, привели к различным системам величин для его описания. Рекомендации МКРЗ [1-3] пока не улучшили ситуацию в этой части, однако дали возможность выполнять наиболее полные оценки значений одного из самых значимых компонентов радиационного риска — смерти от рака, а также получать усредненные по полу и возрасту значения вероятности заболеваний в результате стохастических эффектов.

На начальной стадии развития находится методика оценки риска от потенциального облучения, что свидетельствует о явном отставании от требований настоящего времени, чревато аварийными ситуациями с различными источниками ионизирующих излучений. В этой связи имеется острая необходимость оценки вероятностей гипотетических аварий на ИБР-2 и на ИБР-30, чтобы убедиться в их непротиворечии с рекомендациями МКРЗ [6], а также с целью определения степени необходимой готовности к ликвидации последствий аварии.

Уровень радиационного риска сотрудников ОИЯИ, работающих с источниками ионизирующих излучений, за последнее десятилетие слабо меняется во времени и сопоставим с аналогичными значениями в подобных научных центрах развитых стран.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. ICRP. Publication 60. 1990. Recommendation of the ICRP. Annals of the ICRP, v.21, No 1-3, Pergamon Press, Oxford, 1991.
2. Там же, Annex C.
3. Там же, Annex B.
4. Машкович В.П., Панченко А.М. Основы радиационной безопасности. М.: Энерггоатомиздат, 1990.
5. Губин А.Т. - Атомная энергия, 1993, 74, с.63.
6. ICRP. Publication 64. Protection from potential exposure: a conceptual framework. Annals of the ICRP, v.23, No 1, Pergamon Press, Oxford, 1993.
7. Smith H. - Kerntechnik, 1993, 58, p.203.
8. Пузанов Ю.В. - Атомная энергия, 1993, 75, с.372.
9. Комочков М.М. - ОИЯИ Р16-190, Дубна, 1992.
10. United Nations. Sources Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNCEAR, 1988, Report General Assembly. New York, 1988.
11. Губин А.Т. и др. - Атомная энергия, 1992, 72, с.604.
12. Allisy A. et al. ICRU News, December 1991, p.5.
13. Комочков М.М. - ОИЯИ Р16-91-459, Дубна, 1991.
14. Комочков М.М. - ОИЯИ Р16-93-132, Дубна, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 февраля 1994 года.