

АТОМНАЯ РАДИАЦИЯ КАК ВРЕДНЫЙ И ОПАСНЫЙ ФАКТОР ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА НА ЗЕМЛЕ

А.Г. Заворотный

**ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы
МЧС России»**

Установлено, что доля благоприятных для организма человека мощностей доз в диапазоне доз, наблюдаемых в местностях, где постоянно проживают люди на Земле, составляет 9,2 мГр/год, а неблагоприятный для организма человека диапазон начинается с 10 мГр/год до 100 мЗв. Облучение организма человека в этом диапазоне сопровождается выходом стохастических эффектов, которые имеют малую вероятность и «он пропорционален увеличению дозы излучения свыше уровня естественного фона».

Проведены оценки выхода стохастических и детерминированных эффектов и числа людей, погибающих от данных эффектов. Разработана вероятностная математическая модель, которая позволяет конвертировать риски выхода детерминированных эффектов, обусловленных острым облучением человека в большой дозе и при малой экспозиции, измеряемой минутами, в риски выхода стохастических эффектов, обусловленных облучением в малой дозе при длительной экспозиции (протрагированное или фракционированное облучение). Точность вычислений диктуется входными данными, которыми заполняется вероятностно-статистическая модель и составляет в среднем $\pm 25\%$.

Ключевые слова: температура окружающей среды, атомная радиация, вредные и опасные факторы для человека, риск гибели человека, стохастические и детерминированные эффекты.

ATOMIC RADIATION AS A HARMFUL AND DANGEROUS FACTOR FOR MAN ON EARTH

A.G. Zavorotny

Academy of the state fire service of Emercom of Russia

The article shows that the proportion of dose rates favorable for the human body in the dose range observed in areas where people live permanently on Earth is 9.2 Mgr/year, and the unfavorable range for the human body starts from 10 Mgr / year to 100 mSv. Irradiation of the human body in this range is accompanied by the output of stochastic effects, which have a low probability and «it is proportional to the increase in the radiation dose above the level of the natural background». Estimates of the output of stochastic and deterministic effects and the number of people who die from these effects were made. A probabilistic mathematical model has been developed that allows to convert the risks of deterministic effects due to acute human exposure at high dose and at low exposure, measured in minutes, into the risks of stochastic effects due to low-dose exposure at long exposure (protraged or fractionated exposure). The accuracy of calculations is dictated by the input data that fills the probabilistic-statistical model and is on average $\pm 25\%$.

Keywords: environmental temperature, atomic radiation, harmful and dangerous factors for humans, risk of human death, stochastic and deterministic effects.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые температуры на Земле заключены в диапазоне от минус 89 °С до 2000 °С, и только интервал с 35,6 °С до 37,5 °С размером всего в 1,9 °С благоприятствует температуре тела человека. Остальные температуры, начиная с 35,6 °С и ниже, и с 37,5 °С и выше являются враждебными человеческому телу. Степень враждебности указанных температур усугубляется плавно, без скачков по мере увеличения и снижения указанных температур. Для жизнедеятельности любых организмов значительно опаснее высокие температуры, чем низкие.

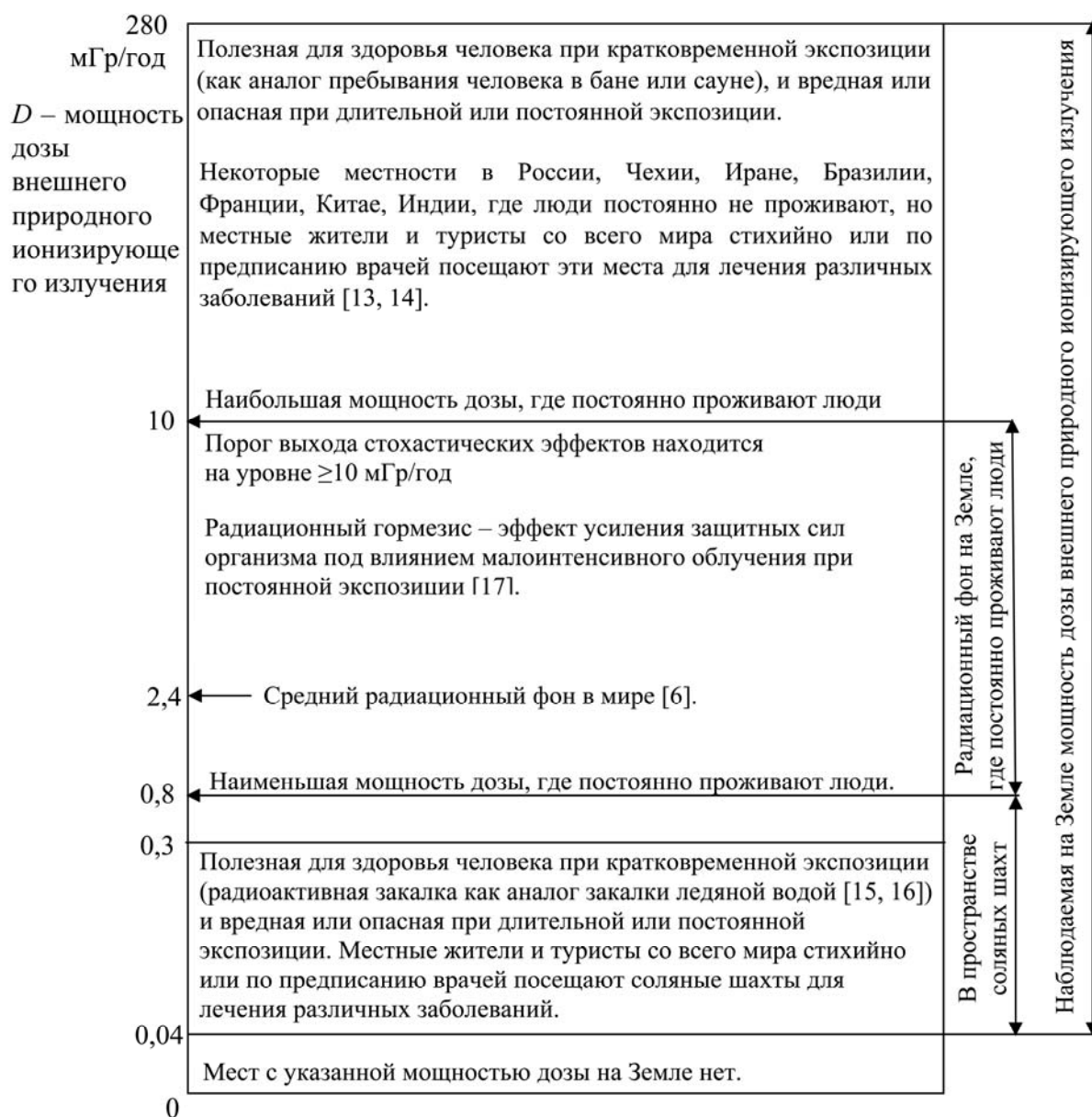


Рис. 1. Примерные мощности дозы внешнего природного ионизирующего излучения и результат его воздействия на человека

Если диапазон наблюдаемых на Земле враждебных человеческому телу температур составляет от минус 89 °С до 2000 °С, а интервал естественных температур тела здорового человека составляет 1,9 °С (35,6 – 37,5 °С), то доля P указанных естественных температур в диапазоне наблюдаемых температур составляет $1,9 \text{ °С} / 2089 \text{ °С} = 0,00091$ или 0,091%:

$$P = \frac{t_B - t_H}{t_{\max} - t_{\min}} = \frac{37,5 - 35,6}{2000 - (-89)} = 0,00091 \text{ или } 0,091\%$$

где t_{\max} – максимальная температура, наблюдаемая при пожарах;
 t_{\min} – минимальная температура, зафиксированная на Земле;
 t_H – температура тела здорового человека (нижний предел);
 t_B – температура тела здорового человека (верхний предел).

На рис. 1, 2 представлены мощности дозы внешнего природного ионизирующего излучения с низкой линейной передачей энергии (рентгеновское и гамма излучение) и результат его воздействия на организм человека.

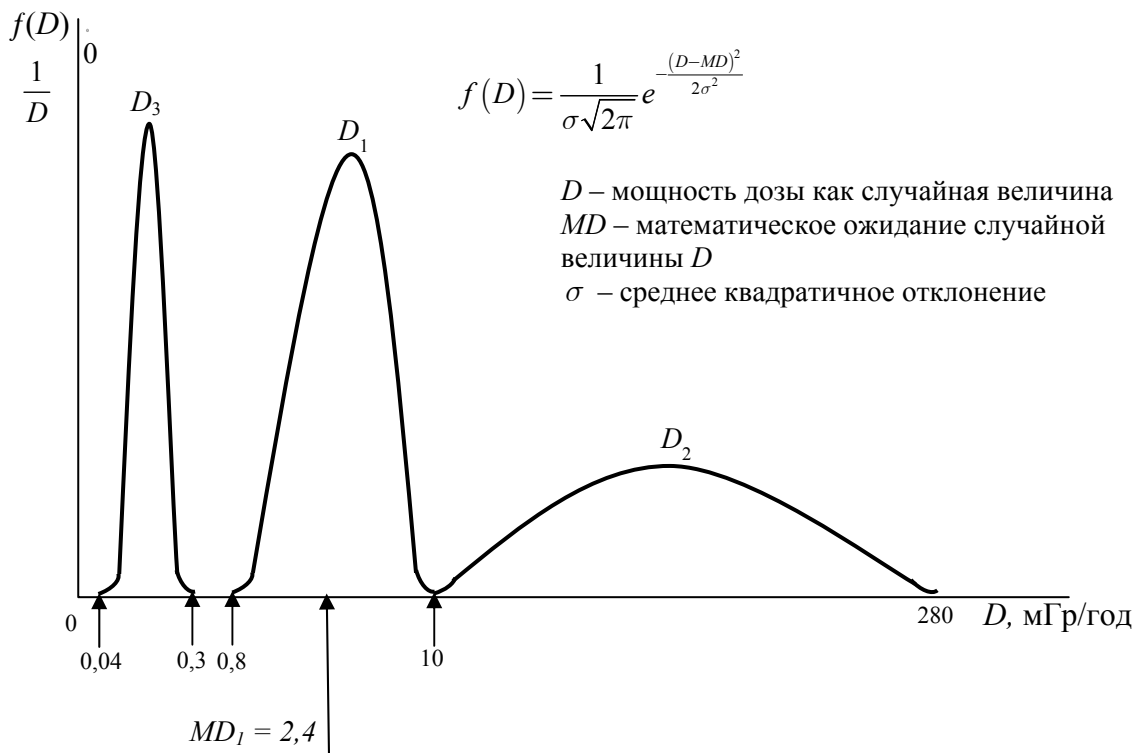


Рис. 2. Функции плотности распределения $f(D)$ случайной величины D .

D_1 – мощность дозы внешнего природного ионизирующего излучения в населенных пунктах Земли, где люди проживают постоянно (постоянная экспозиция); D_2 – мощность дозы, наблюдаемая на Земле, где люди не проживают, но подвергаются облучению в лечебных целях (кратковременная экспозиция); D_3 – мощность дозы в пространстве соляных шахт, где люди не проживают, но подвергаются облучению супермалой дозой в лечебных целях (кратковременная экспозиция).

Из рис. 1, 2 следует, что люди постоянно проживают в местностях, где диапазон мощностей доз составляет 0,8-10 мГр/год. Благоприятный для организма человека диапазон мощностей доз равен 0,8-10 мГр/год. Указанный диапазон равен $10 - 0,8 = 9,2$ мГр/год. Весь диапазон наблюдаемых мощностей доз, где постоянно проживают люди, составляет $10 - 0,8 = 9,2$ мГр/год.

Тогда доля P благоприятных для организма человека мощностей доз в диапазоне доз, наблюдаемых в местностях, где постоянно проживают люди, составляет:

$$P = 9,2 \text{ мГр/год} / 9,2 \text{ мГр/год} = 1,00 = 100\%$$

Неблагоприятный для организма человека диапазон начинается с 10 мГр/год и выше (до 100 мЗв в соответствии с п. 64 [1]). Облучение организма человека в этом диапазоне сопровождается выходом стохастических эффектов, которые имеют малую вероятность и «он пропорционален увеличению дозы излучения свыше уровня естественного фона» (п. 36 [1]). Вот почему живые организмы на Земле не имеют органа для идентификации (распознавания) радиации. В борьбе за существование он им не нужен, так как естественные источники радиации более или менее равномерно рассеяны в толще Земли, и они в подавляющем большинстве случаев не наносят радиационного вреда живым организмам. «Нередко спрашивали: если естественный отбор представляет собой такую могучую силу, то почему он не снабдил некоторые виды тем или другим органом, который, казалось бы, мог быть для них полезным? В таких случаях, так как борьба за жизнь не была связана с этими органами, они не могли быть выработаны путем естественного отбора» [12].

2. ОЦЕНКА ВЫХОДА СТОХАСТИЧЕСКИХ И ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ЭФФЕКТОВ

В п. А.72 [1] упоминается, что для нормального здорового взрослого человека $LD_{50/60}$ (летальная доза, при котором погибает 50% облученных в течение 60 дней) равна в среднем около 4 Гр, но в литературе есть оценки от 3 до 5 Гр. Оценки LD_{10} находятся около 1-2 Гр, а для LD_{90} около 5-7 Гр [1]. В соответствии с п.70 [1], риск рака при малых дозах (менее 100 мГр) оценен путем переноса оценок риска рака, установленных для высоких доз и мощностей доз в виде понижающего риск коэффициента, известного как $DDREF=2$. В соответствии с пунктами 64, 65 [1] малыми дозами считаются дозы 100 мЗв и менее. Таким образом, для дальнейших оценок, на основании имеющихся данных будем использовать следующие усредненные параметры: $LD_{50/60}=4$ Гр; $LD_{10} = 2$ Гр; $LD_{90}=6$ Гр.

На основании дозовой зависимости частоты и тяжести тканевых реакций (детерминированных эффектов), изображенной на рис. А.3.3 [1], аппроксимируем указанную зависимость классическим нормальным распределением, функция которого $f(D)$ представлена формулой (1):

$$f(D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D-MD)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

где D – доза, которой облучаются люди до получения результируемого детерминированного эффекта;

MD – математическое ожидание дозы (среднее значение), при которой люди получают детерминированный эффект ($MD=4\text{Гр}=LD_{50/60}$);

σ – среднее квадратичное отклонение дозы, при которой люди получают детерминированный эффект.

В формуле (1) неизвестной величиной остается величина σ – среднее квадратичное отклонение или стандартное отклонение распределения, которое упоминается в п. А71 [1], но численного значения, которого в [1] нет. Вычислим σ следующим образом. В дополнение к случайной величине D в формуле (1) введем новую случайную величину z :

$$z = \frac{D - MD}{\sigma} \quad (2)$$

Откуда $dD = \sigma dz$.

Подставляя (2) и dD в формулу (1) и интегрируя от 0 до z , получаем функцию Лапласа [3]:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (3)$$

Так как $LD_{10} = 2$ Гр, $LD_{90} = 6$ Гр, $MD = 4$ Гр = $LD_{50/60}$, и указанные дозы расположены симметрично к математическому ожиданию $MD = 4$ Гр, используем функцию Лапласа и приравняем ее к 0,4 (формула 4).

Доля облученных свыше $MD = 4$ Гр и погибающих от $LD_{50/60} = 4$ Гр до $LD_{90} = 6$ Гр составляет 40%, а диапазон значений функции Лапласа составляет 0 – 0,5 (50% облученных погибают в дозах от 0 до 4 Гр):

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,4 \quad (4)$$

По таблице функции Лапласа [3] находим значение функции Лапласа $\Phi(z) = 0,4$, которому соответствует значение $z=1,28$. Подставляя $z=1,28$ в формулу (2), получаем:

$$\sigma = \frac{LD_{90} - MD}{z} = \frac{6 \text{ Гр} - 4 \text{ Гр}}{1,28} = 1,56 \text{ Гр} \quad (5)$$

По формулам (2,3) вычислим вероятность P выхода детерминированных эффектов для доз 0,6-1,4 Зв. Так как, в соответствии с п. 112 [1] при излучении с низкой линейной передачей энергии (гамма или рентгеновское излучение) поглощенная доза совпадает с эквивалентной дозой ($W_A = 1$), в дальнейшем эквивалентную дозу будем обозначать в Зивертах. Доза $D=0,6$ Зв:

$$z = \frac{D - MD}{\sigma} = \frac{0,6 \text{ Зв} - 4 \text{ Зв}}{1,56 \text{ Зв}} = -2,18 \quad (6)$$

где D – доза, равная 0,6 Зв;

MD – математическое ожидание дозы (среднее значение), при которой люди получают детерминированный эффект ($MD = 4$ Гр = 4 Зв);

σ – среднее квадратичное отклонение (формула 5) дозы, при которой люди получают детерминированный эффект ($\sigma = 1,56$ Гр = 1,56 Зв).

$P_{0,6}$ – вероятность выхода детерминированных эффектов при дозе $D = 0,6$ Зв:

$$P_{0,6} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-2,18} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = -0,4854 + 0,5000 = 0,0146(7)$$

Аналогичным методом вычислены все другие вероятности выхода детерминированных эффектов до $D=1,4$ Зв, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Вероятность выхода детерминированных эффектов
(расчетные данные по формулам 2,3), связанных с радиационно-индуцированными
синдромами и смертью человека при остром равномерном воздействии
на все тело излучения с низкой линейной передачей энергии с поглощенной дозой D
во всем теле при длительности облучения около нескольких минут (A73 [1])**

Расчетная вероятность выхода детерминированных эффектов P	0,0075	0,0146	0,0172	0,0202	0,0233	0,0274	0,0314	0,0367	0,0418	0,0475
Эквивалентная доза, при которой возникает эффект $D, Зв$	0,2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

С использованием данных табл. 1 (за исключением дозы $D = 0,2$ Зв), методом наименьших квадратов [3,4] выведена функция:

$$P_c = 0,025838 \cdot D^2 \tag{8}$$

где P_c – вероятность выхода стохастических (при дозах $D \leq 0,2$ Зв) и детерминированных эффектов при малых дозах $D \leq 1,1$ Зв и малых мощностях доз, выведенных на основании больших доз D и больших мощностей доз, указанных в табл. 1.

По формуле (8) вычислим P_c для доз от 0 до 0,2 Зв, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Расчетные данные по вероятности выхода стохастических эффектов при малых дозах
и малых мощностях доз, вычисленных по формуле (8)**

Вероятность выхода стохастических эффектов P_c	0,000003	0,000010	0,000023	0,000041	0,000065	0,000093	0,000127	0,000165	0,000209	0,000258	0,001033
Доза $D, Зв$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,20

В табл. 1, представленной в публикации [1], коэффициент номинального риска для стохастических эффектов составляет: для всех людей $K_n=0,057$ 1/Зв; для взрослых людей $K_n=0,042$ 1/Зв. Теперь, когда вероятность выхода (формула 8) стохастических эффектов при малых дозах $D \leq 0,200$ Зв известна, актуальность коэффициентов $K_n=0,057$, $K_n=0,042$ и коэффициента эффективности дозы и мощности дозы $DDREF=2$ отпадает.

Вероятность выхода P^* стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D

$D, Зв$	P	$D, Зв$	P	$D, Зв$	P
1	2	1	2	1	2
0,00	0,000000	2,10	0,111200	6,10	0,911500
0,0024**	0,000000	2,20	0,125100	6,20	0,920700
0,01	0,000003	2,30	0,137900	6,30	0,929200
0,02	0,000010	2,40	0,151500	6,40	0,938200
0,03	0,000023	2,50	0,168500	6,50	0,945200
0,04	0,000041	2,60	0,184100	6,60	0,952500
0,05	0,000064	2,70	0,203300	6,70	0,958200
0,06	0,000093	2,80	0,220700	6,80	0,963300
0,07	0,000127	2,90	0,238900	6,90	0,968600
0,08	0,000165	3,00	0,261100	7,00	0,972600
0,09	0,000208	3,10	0,283500	7,10	0,976700
0,10	0,000258	3,20	0,305000	7,20	0,979800
0,11	0,000313	3,30	0,326400	7,30	0,983000
0,12	0,000372	3,40	0,352000	7,40	0,985400
0,13	0,000436	3,50	0,374500	7,50	0,987500
0,14	0,000506	3,60	0,397400	7,60	0,989600
0,15	0,000581	3,70	0,424700	7,70	0,991100
0,16	0,000661	3,80	0,448300	7,80	0,992700
0,17	0,000748	3,90	0,476100	7,90	0,993800
0,18	0,000837	4,00	0,500000	8,00	0,994800
0,19	0,000933	4,10	0,523900	8,10	0,995700
0,20	0,001033	4,20	0,551700	8,20	0,996400
0,30	0,002325	4,30	0,575300	8,30	0,997100
0,40	0,004134	4,40	0,602600	8,40	0,997600
0,50	0,006459	4,50	0,625500	8,50	0,998000
0,60	0,009301	4,60	0,648000	8,60	0,998400
0,70	0,012660	4,70	0,673600	8,70	0,998700
0,80	0,016536	4,80	0,695000	8,80	0,998960
0,90	0,020928	4,90	0,719000	8,90	0,999150
1,00	0,025837	5,00	0,738900	9,00	0,999310
1,10	0,031300	5,10	0,761100	10,00	0,999996
1,20	0,036700	5,20	0,779400	11,00	1,000000
1,30	0,041800	5,30	0,796700		
1,40	0,047500	5,40	0,815900		
1,50	0,054800	5,50	0,831500		
1,60	0,061800	5,60	0,848500		
1,70	0,070800	5,70	0,862100		
1,80	0,079300	5,80	0,874900		
1,90	0,088500	5,90	0,888800		
2,00	0,100000	6,00	0,900000		

*Вероятности P для стохастических эффектов в диапазоне доз 0 – 0,2 Зв вычислены по формуле (8), для стохастических и детерминированных эффектов в диапазоне доз 0,2 Зв – 1,1 Зв также по формуле (8), вероятности P для детерминированных эффектов в области доз $D \geq 1,1$ Зв – по формулам (2, 3). Вероятности P , вычисляемые по формулам (2, 3) и (8) для дозы $D = 1,1$ Зв совпадают. Доза $D = 1,1$ Зв является точкой плавного перехода вероятности P от формулы (8) к формулам (2, 3), или точкой стыковки формул (8) и (2, 3).

**Среднегодовой фон в мире.

Формулы (2, 3) являются результатом реального облучения более тысячи человек (главным образом при несчастных случаях, авариях и т.п. при высоких мощностях доз и малой экспозиции в основном излучения с низкой передачей энергии) [1], статистические данные по которым пропущены через вероятностно-статистическую математическую модель (формулы 1 – 8) без учета коэффициента $DDREF=2$. Указанная модель не нуждается в понижающем коэффициенте $DDREF$, и она естественным образом, через функцию плотности вероятности $f(D)$ нормального распределения учитывает все нюансы поведения кривой $f(D)$ во всем диапазоне доз D от 0 до ∞ , в том числе линейно-квадратичную зависимость (формула 8) риска стохастических эффектов от малых доз D .

В табл. 3 представлены вероятности P выхода стохастических и детерминированных эффектов, вычисленные по формулам (2, 3, 8), в зависимости от дозы D .

На рис. 3 представлена процедура стыковки формул (8) и (2, 3).

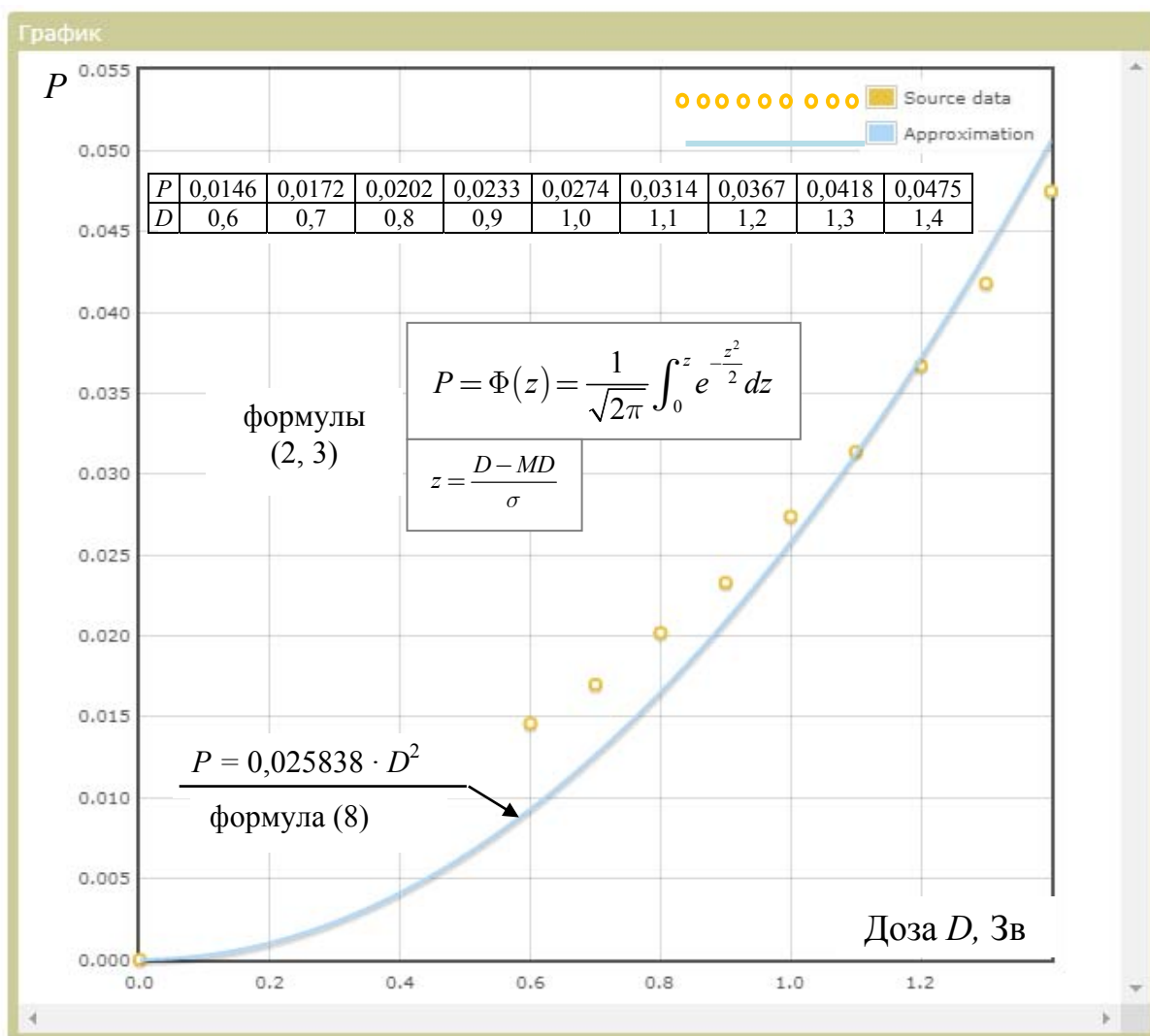


Рис. 3. Стыковка формул (8) и (2, 3) в точке $D = 1,1$ Зв.

До точки $D = 1,1$ Зв работает формула (8), после – формулы (2, 3).

Вероятности P , вычисляемые по формулам (2, 3, 8) для дозы $D = 1,1$ Зв совпадают.

Точки на графике представляют собой формулы (2, 3), по которым выведена методом наименьших квадратов формула (8).

На рис. 4 представлена плотность вероятности $f(D)$ (формула 1) выхода стохастических и детерминированных эффектов в диапазоне доз от 0 до 11 Зв с шагом 0,1 Зв (по данным табл. 3).

На рис. 5 представлена воксел-модель плотности вероятности $f(D)$ выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D , полученной человеком.

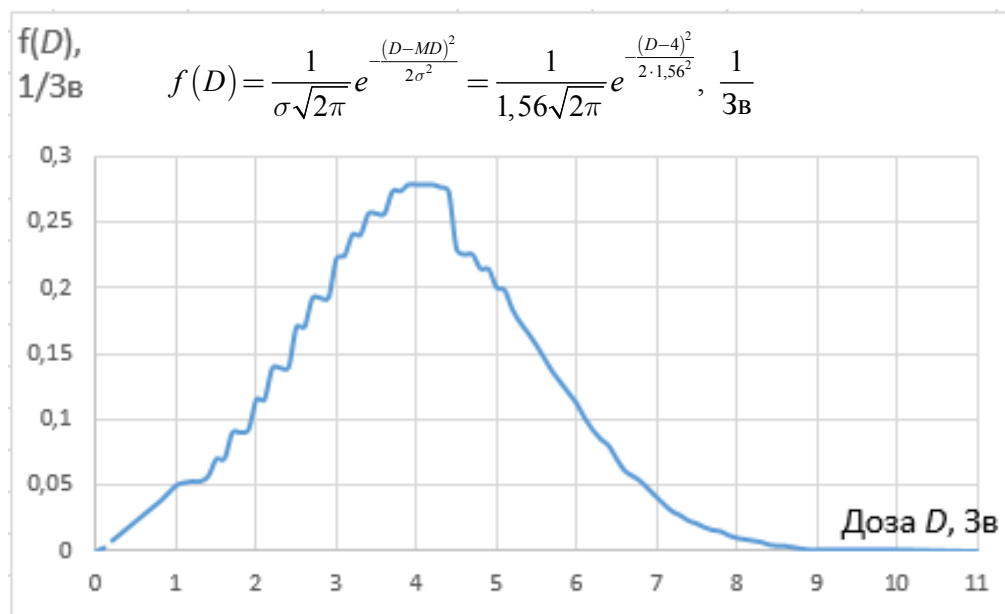


Рис. 4. Плотность вероятности $f(D)$ (формула 1) выхода стохастических и детерминированных эффектов в диапазоне доз от 0 до 11 Зв с шагом 0,1 Зв (по данным таблицы 3)

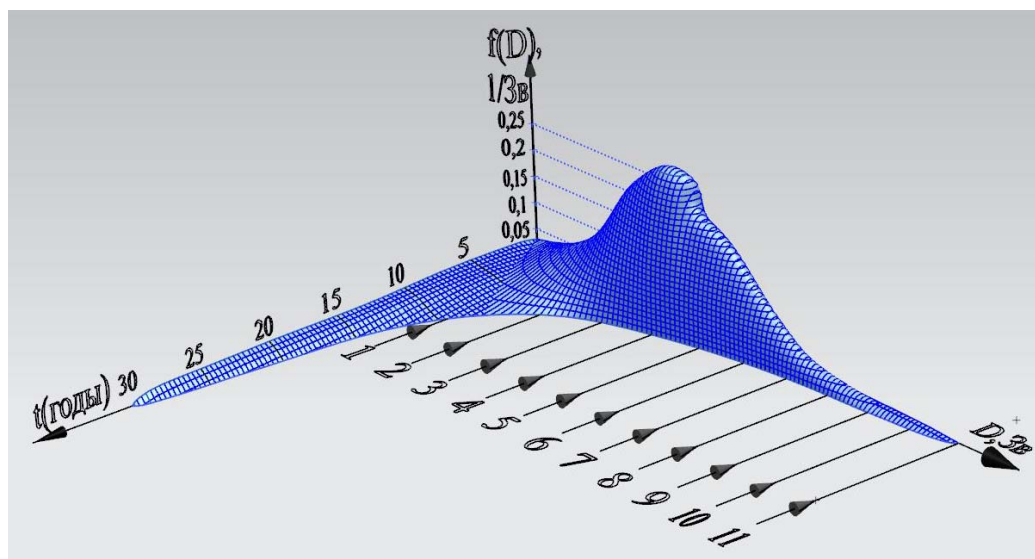


Рис. 5. Фронтальный вид воксел-модели плотности вероятности $f(D)$ выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D :

Воксел – малый трехмерный объемный элемент, олицетворяющий облученного индивидуума, из которых состоит облученная популяция людей (построена по данным табл. 3 и рис. 4)

В отличие от воксел-фантома, который определяет плотность и анатомический состав различных органов и тканей человека (Глоссарий к публикации [1]), воксел на рис. 5 представляет собой трехмерный малый объемный элемент, олицетворяющий индивидуумов, из которых состоит облученная популяция людей. Воксел-модель позволяет в наглядном виде показать не только плотность вероятности $f(D)$ выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D , но и время t , через которое проявляется (в среднем через 15 лет [6]) стохастический или детерминированный эффект. Время проявления последнего зависит от дозы D . Например, при $LD_{50/60} = 4 \text{ Гр} = 4 \text{ Зв}$, время проявления с фатальным исходом составляет в среднем $t = 60$ дней (A72 [1]).

Точность вычислений по формулам (2, 3, 8) диктуется входными данными, которыми заполняется вероятностно-статистическая модель. Коль скоро разброс $LD_{10}=1 - 2 \text{ Гр}$, $LD_{50/60}=3 - 5 \text{ Гр}$, $LD_{90}=5 - 7 \text{ Гр}$ составляет $\pm 1 \text{ Гр}$ (п. A72 [1]), то, ориентируясь на $LD_{50/60}=4 \text{ Гр}$, можно считать, что точность вычислений по формулам (2, 3, 8) составляет $(1/4) \cdot 100\% = \pm 25\%$, где 1 Гр – разброс от средних значений LD_{10} , $LD_{50/60}$, LD_{90} ; 4 Гр – среднее значение $LD_{50/60}$. Тогда точность вычислений чисел в табл. 1-3 составляет $\pm 25\%$. Во всяком случае, по мере уточнения статистических данных, описанная вероятностно-статистическая модель даст адекватный входным данным результат.

3. ОЦЕНКА ЧИСЛА ЛЮДЕЙ, ПОГИБАЮЩИХ ОТ СТОХАСТИЧЕСКИХ И ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ЭФФЕКТОВ

Вероятность P выхода стохастических эффектов при дозе $D=0,0024 \text{ Зв}$ (среднемировой фон при мощности дозы $0,0024 \text{ Зв/год}$), в соответствии с табл. 3, равна $P = 0,000000$.

Порог выхода стохастических эффектов находится в районе 10 мЗв , при мощности дозы 10 мЗв/год . При этом вероятность P выхода стохастических эффектов, в соответствии с табл. 3, равна $P=0,000003$. То есть, три из миллиона человек, облученных дозой $D=10 \text{ мЗв}$, при мощности дозы 10 мЗв/год , в среднем через 15 лет получают стохастический эффект (соматические заболевания, канцерогенные и наследственные [6]).

В табл. 3 представлены статистические данные по радиационным авариям в СССР [7] и их последствия, вычисленным по формулам (2, 3, 8).

Таким образом, получается, что с 1945 по 2018 г. при радиационных авариях в СССР и в Российской Федерации стохастический эффект получили 5670 человек и детерминированный эффект – 343 человека. В сумме это составляет: $5670 + 343 = 6013$ человек. В среднем ежегодно стохастический и детерминированный эффекты получали: $6013 / 74 = 82$ человека, где 74 года – это период времени с 1945 по 2018 годы. Экономический эквивалент стоимости ущерба в результате гибели 82 человек составляет: $82 \cdot 22,4 \text{ млн. руб.} = 1837 \text{ млн. руб.}$, где 22,4 млн. руб. – экономический эквивалент стоимости жизни средне-статистического человека (без различия пола) в возрасте 37 лет [8]. Материальный ущерб при пожарах составляет примерно 10% от экономического ущерба в результате гибели и травмирования людей при пожарах [8]. Для радиационных аварий эту величину оценим (с учетом Чернобыльской аварии) в 50%. Тогда получается, что в среднем ежегодно с 1945 по 2018 годы в результате радиационных аварий экономический эквивалент стоимости ущерба от гибели людей составлял: $1837 \text{ млн. руб.} + 0,5 \cdot 1837 \text{ млн. руб.} \approx 2,8 \text{ млрд. руб.}$ А средний ежегодный суммарный ущерб в результате гибели людей при пожарах и от холода в 2010 – 2018 годах составлял около 400 млрд. руб. И это не считая ущерба в результате гибели около 5000 чел. от простудных заболеваний, которые явились следствием охлаждения температуры тела человека.

Статистические данные по радиационным авариям в СССР и их последствия

Дата аварии	Место аварии	Количество людей, получивших при облучении:	
		стохастический эффект	детерминированный эффект
1	2	3	4
19.06.1948 г.	Комбинат «Маяк» в Челябинской обл.	-	33
03.03.1949 г.	Комбинат «Маяк» в Челябинской обл.	142	-
29.09.1957 г.	Комбинат «Маяк» в Челябинской обл.	194	155
15.04.1967 г.	Комбинат «Маяк» в Челябинской обл.	258	-
18.01.1970 г.	Завод «Красное Сормово» г. Горький (Нижний Новгород)	2	26
26.04.1986 г.	г. Чернобыль, АЭС, Украина[9]	3940*	60*
с 1945 г. по 2018 г.	Все неучтенные в источнике [7] аварии, последствия которых оценены авторами настоящей статьи в 25% всех последствий, указанных в таблице 3.	1134	69
1945-2018	Итого	5670	343

*Количество людей, получивших при облучении стохастический и детерминированный эффекты, указаны в работе [9].

4. СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВРЕДА С РАДИАЦИОННЫМ ВРЕДОМ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В соответствии с публикацией [1], радиационный вред – суммарный вред для здоровья человека. По аналогии с этим будем рассматривать температурный вред – вред, наносимый человеку в результате повышения или понижения температуры его тела сверх допустимого уровня.

За период с 2009 по 2016 годы в Российской Федерации при пожарах погибли 89496 человек, что в расчете на 1 год в среднем приходится $89496 / 8 = 11187$ человек. За этот же период при пожарах серьезно травмировалось 93758 человек, что в расчете на 1 год в среднем приходится $93758 / 8 = 11720$ человек [8].

Гибель людей в быту и на производстве при контакте с нагретыми до высокой температуры предметами (не при пожарах) оцениваем в среднем в 3000-4000 человек ежегодно, травмированных – 100% от погибших (в статистических данных этот показатель не регистрируется).

По данным [2] в Российской Федерации за период с 2014 по 2017 годы в среднем ежегодно от холода погибало (замерзали) 9061 человек. Пропорцию травмированных от холода будем считать такой же, как пропорцию травмированных при пожарах: примерно 100%. Тогда травмированных от холода получается в среднем 9061 человек ежегодно.

Гибель людей от простудных заболеваний, которые являются следствием понижения температуры тела человека в результате охлаждения, составляет около 5000 человек ежегодно [2]. Минимум температурной кривой общей смертности четко выражен в диапазоне температур 18-20 °С [2]. Так как обоснованных индексов социального ущерба в результате гибели и травмирования людей в нашей стране нет, воспользуемся зарубежным

опытом. Индекс социального ущерба в результате травмирования людей, практикуемые в Великобритании, Нидерландах и по их примеру в других странах, составляет 0,1 от индекса социального ущерба в результате гибели человека и равного 1. С помощью индекса, равного 0,1, конвертируем травмированных людей в погибших, считая, что средняя травма эквивалента 0,1 погибшего человека. Тогда 11720 человек, ежегодно травмируемых при пожарах, эквивалентны $0,1 \cdot 11720 = 1172$ человека, погибших при пожарах; 3500 человек, травмируемых в быту и на производстве при контакте с нагретыми до высокой температуры предметами, эквиваленты $0,1 \cdot 3500 = 350$ человек погибших; 9061 человек, ежегодно травмируемых от холода, эквивалентны $0,1 \cdot 9061 = 906$ человек, погибших от холода.

Число ежегодно травмированных при радиационных авариях считаем равным 100% от числа ежегодно погибавших, то есть 82 человека.

В соответствии с индексом, равном 0,1, при средней травме, 82 человека травмированных по своему социальному ущербу эквивалентны восьми человекам погибших: $0,1 \cdot 82 \approx 8$ человек. Итого получается $82 + 8 = 90$ человек погибших.

В табл. 4 представлены данные для сравнительного анализа температурного и радиационного вреда для человека в Российской Федерации.

Таблица 4

Сравнение температурного и радиационного вреда для человека в Российской Федерации

Наименование вреда для жизни человека	Количество погибающих людей в среднем за 1 год	Примечание
1	2	3
Повышение температуры тела человека сверх допустимого уровня:		
- при пожаре	12359	в 2009-2016 г.г.
- при контакте с раскаленными предметами (веществами)	3850	в 2009-2016 г.г.
Снижение температуры тела человека ниже допустимого уровня при низких температурах	9967	в 2014-2017 г.г.
Простудные заболевания, которые являются следствием понижения температуры тела человека	5000	в 2014-2017 г.г.
Итого	31176	в 2009-2017 г.г.
Стохастический или детерминированный эффект при радиационных несчастных случаях и авариях	90	в 1945-2018 г.г.

В соответствии с табл. 4, в Российской Федерации ежегодно с 2009 по 2017 годы в среднем погибало в результате температурного вреда 31176 человек, в результате радиационных аварий, которые приводили к стохастическому или детерминированному эффекту, с 1945 по 2018 годы в среднем ежегодно погибали 90 человек. Таким образом, получается, что на каждого погибшего при радиационном несчастном случае и аварии приходится $31176 / 90 = 346$ человек, погибших от температурного вреда. И никакой паники, ажиотажа, фобии по поводу того, что при пожарах ежегодно погибают свыше 12000 человек, при контакте с раскаленными предметами (веществами) – около 4000 че-

людей, при низких температурах – около 10000 человек, при простудных заболеваниях, сопровождающихся смертью – 5000 человек, не наблюдается. Причина этого заключается в том, что температурный вред – хорошо известный и осязаемый фактор, который следует отнести к известному риску – риску, параметры которого хорошо известны людям с незапамятных времен. А радиационный риск – это новый вид риска, причем невидимый, параметры и составные части которого неизвестны для подавляющего большинства людей.

5. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО РЕАЛЬНОЙ СМЕРТНОСТИ ЛЮДЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЫХОДА СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

В работе [11] в табл. 2 приведены данные о накопленной дозе и среднему избыточному абсолютному риску EAR на 25 человек из 9900 работников ПО «Маяк» в 2008 г. Суммарная накопленная доза за 40 лет работы (рис. 19 [11]) у этих 25 человек составляет 43240 мЗв, что в среднем на одного человека приходится $43240 / 25 = 1730$ мЗв. Суммарный избыточный абсолютный риск (смертность в результате выхода стохастического эффекта) у этих 25 человек составляет 0,018110 (табл. 2 [11]), что в среднем на одного человека приходится $EAR_0 = 0,018110 / 25 = 0,000724$.

Каждый из 25 человек в среднем за каждые 0,5 года в течение 40 лет получал дозу $1730 / 40 \cdot 2 = 21,6$ мЗв. По формуле (8) вычислим средний избыточный абсолютный риск для одного человека за 0,5 года: $EAR = 0,025838 (0,0216 \text{ Зв})^2 = 0,000012$. За 40 лет средний EAR_c для одного человека составит: $EAR_c = 0,000012 \cdot 40 \cdot 2 = 0,000960$.

Формулы (2, 3, 8) учитывают человека без различия пола в среднем возрасте 36-39 лет. Так как дозы $LD_{10} = 2$ Гр, $LD_{50/60} = 4$ Гр, $LD_{90} = 6$ Гр, многократно упоминаемые в [1], представляют собой соответствующие летальные дозы для людей обоих полов и всех возрастов, а средний возраст живущих людей в Российской Федерации (и в странах с ядерной энергетикой) варьирует в окрестности 36-39 лет, формулы (2, 3, 8) учитывают выход стохастического эффекта для человека без различия пола в возрасте 36-39 лет. Средний возраст смерти указанных 25 человек составляет 71 год [11]. По формуле (2) в работе [11] вычислим EAR для мужского пола в возрасте 36 лет и 71 год: $EAR_{36} = 0,000021$; $EAR_{71} = 0,000014$. Тогда для возраста 71 год в вычисленное по формуле (8) и равное $EAR_c = 0,000960$ значение необходимо внести поправку:

$$EAR_1 = EAR_c \cdot (EAR_{71} / EAR_{36}) = 0,000960 \cdot (0,000014 / 0,000021) = 0,000640.$$

В табл. 1 [1] представлен коэффициент номинального риска $K_n = 0,042$ 1/Зв для стохастических эффектов с учетом их вреда после облучения с малой мощностью дозы. Если каждый из 25 человек в среднем за каждые 0,5 года в течение 40 лет получал дозу $21,6$ мЗв = $0,0216$ Зв, то за $t = 40$ лет, в соответствии с табл. 1 [1], каждый получит суммарный избыточный абсолютный риск: $EAR = K_n \cdot D \cdot t = 0,042 \cdot 0,0216 \cdot 40 \cdot 2 = 0,072576$. Внесем поправку, учитывающую возраст:

$$EAR_2 = EAR \cdot (EAR_{71} / EAR_{36}) = 0,072576 \cdot (0,000014 / 0,000021) = 0,048384.$$

В табл. 5 представлены исходные данные для вычисления избыточного абсолютного риска EAR по трем источникам: по статистическим данным из работы [11]; по формуле (8); по формуле с использованием $K_n = 0,042$ 1/Зв, представленной в работе [1].

Исходные данные для вычисления избыточного абсолютного риска EAR и его вычисленные значения

Количество человек из 9900 работников ПО «Маяк»	Годы рождения работников (мужской пол)	Суммарная накопленная доза за 40 лет работы, мЗв	Среднее время накопления дозы (стаж работы), годы	Суммарная EAR для 25 человек за 40 лет (смертность в результате выхода стохастического эффекта) (статистика в табл. 2 [11])	Средняя EAR_0 для 1 человека за 40 лет (статистика в табл. 2 [11])	Средняя EAR_1 для 1 человека за 40 лет (по формуле (8))	Средняя EAR_2 для 1 человека за 40 лет (с учетом $K_n = 0,042$ 1/Зв [1])
25	1930-1941	43240	40	0,018110	0,000724	0,000640	0,048384

Из табл. 5 следует, что прогнозируемое по формуле (8) значение $EAR_1 = 0,000640$ отличается от статистического значения $EAR_0 = 0,000724$ на: $(0,000640 - 0,000724) / 0,000724 = -0,12$ или на минус 12%, а прогнозируемое значение $EAR_2 = 0,048384$ с использованием $K_n = 0,042$ 1/Зв из табл. 1 [1] отличается от статистического значения $EAR_0 = 0,000724$ на: $(0,048384 - 0,000724) / 0,000724 \approx 66$ или на 6600%. Таким образом, коэффициент $K_n = 0,042$ 1/Зв, представленный в табл. 1 [1], приводит к завышению расчетной величины EAR_2 в данном конкретном случае в 62 раза.

Если бы работник ПО «Маяк» получил бы однократное острое облучение в течение нескольких минут в дозе $D = 1730$ мЗв, в соответствии с табл. 3 выход детерминированного эффекта реализовался бы с вероятностью 0,073000. А при протрагированном облучении в той же дозе 1730 мЗв, но полученной в среднем за каждые 0,5 года в течение 40 лет по 21,6 мЗв за 0,5 года, стохастический эффект реализовался с вероятностью $EAR_0 = 0,000724$ (табл. 5). Тогда коэффициент $DDREF$ в данном конкретном случае должен быть: $DDREF = 0,073000 / 0,000724 = 101$.

Вероятностная математическая модель, с помощью которой получены формулы (2, 3, 8), позволяет конвертировать риски выхода детерминированных эффектов, обусловленных острым облучением человека в большой дозе и при малой экспозиции, измеряемой минутами, в риски выхода стохастических эффектов, обусловленных облучением в малой дозе при длительной экспозиции (протрагированное или фракционированное облучение).

Отличная сходимость прогнозируемой (расчетной) величины $EAR_1 = 0,000640$ и статистической $EAR_0 = 0,000724$ обусловлена тем, что реперные точки $LD_{10} = 2$ Гр, $LD_{50/60} = 4$ Гр, $LD_{90} = 6$ Гр базируются на многократно проверенных статистических данных по радиационным несчастным случаям и гибели более 1000 человек при радиационных авариях [1]. Это указывает на то, что математическая модель адекватно отражает выход стохастических и детерминированных эффектов, наблюдаемых при работе ядерных объектов как в штатном режиме, так и при радиационных авариях.

6. ВЫВОДЫ

1. Риск гибели человека от несчастного случая, связанного с радиацией в Российской Федерации, примерно равен риску гибели (с учетом чернобыльской аварии) при прямом попадании молнии в человека ($0,7 \cdot 10^{-6}$ 1/чел.· год).

2. Радиационный фон на Земле, где постоянно проживают люди, составляет 0,8 – 10 мЗв/год (рис. 3), средний радиационный фон в мире – 2,4 мЗв/год, причем в местностях, где наблюдаемый радиационный фон составляет около 10 мЗв/год и больше, проживают всего несколько миллионов человек. Основная масса людей проживает в местностях с радиационным фоном примерно $1 \text{ мЗв/год} \leq 2,4 \text{ мЗв/год} \leq 3,2 \text{ мЗв/год}$. Если мощности дозы радиации в указанном диапазоне, с учетом экспозиции, достаточной для нанесения радиационного вреда, являются опасными для человека, животных и других существ, причем по мере увеличения накопленной дозы вероятность вреда растет, то, в соответствии с теорией Дарвина о Естественном Отборе, все живые существа должны иметь орган, позволяющий идентифицировать (распознавать) радиацию и дифференцировать (различать) ее мощность дозы. Точно так же, как живые существа чувствуют температуру и покидают место со слишком высокой или слишком низкой температурой, они должны распознавать радиацию и покидать место с ее высоким уровнем. Но до сих пор на Земле не обнаружено ни одного существа с указанным органом. Это свидетельствует о том, что природное фоновое излучение (радиация) на Земле безвредно для живых существ. Именно по этой причине живые существа на Земле не имеют органа для распознавания радиации. В борьбе за существование он им не нужен. Где бы ни находилось живое существо, оно подвергается облучению радиацией, а коль скоро это облучение в подавляющем большинстве случаев безвредно, то необходимость иметь указанный орган отпадает. Это следует из теории естественного отбора Чарльза Дарвина [12].

3. Порог стохастического эффекта для человека находится в окрестности эквивалентной дозы 10 мЗв при мощности дозы 10 мЗв/год для излучения с низкой линейной передачи энергии. При этом вероятность выхода стохастического эффекта равна $3 \cdot 10^{-6}$ в среднем через 15 лет.

Литература

1. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. / Под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». - 2009. – 344 с.
2. Statistics of deaths from cold in the Russian Federation [Electronic resource]. Mode of access: <http://kalmchat.com/2018/08/15/24437>
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 12-е изд. – М.: Издательство Юрайт. - 2016. – 479 с.
4. Волков Е.А. Численные методы. Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. - 1987. – 248 с.
5. Калькулятор онлайн. Теория вероятностей. Метод наименьших квадратов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kontrolnaya-rabota.ru/s/teoriya-veroyatnosti/method-naimenshih-kvadratov/> дата обращения 12.03.2019.
6. Кальницкий С.А., Якубовский-Липский Ю.О., Тихонов М.Н. Риск медицинского облучения населения / Журнал Ядерного общества России, №4-6, 2007 – С. 53-62.
7. Крупнейшие радиационные аварии и катастрофы в мире. Справка [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20110312/347505544.html>
8. Харисов Г.Х., Фирсов А.В. Обоснование оптимального значения индивидуального пожарного риска в Российской Федерации / Безопасность жизнедеятельности. - 2018. – С. 36-42.
9. Чернобыль: истинные масштабы аварии (Международное агентство по атомной энергии. Всемирная организация здравоохранения) // Ядерное общество, № 2-3 (июнь), 2006 г. – С. 11-18.

10. Ревич Б.А. Неблагоприятные метеорологические условия как факторы риска здоровья населения России // Проблемы анализа риска, Том 4, 2007, № 1. – С. 16-26.
11. Иванов В.К., Кайдалов О.В., Кашеева П.В. и др. Оценка индивидуальных радиационных рисков при различных сценариях профессионального хронического облучения / Радиация и риск. - 2008. Том 17, № 2. – С. 9-28.
12. Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора. – М.: Просвещение. - 1986 – 383 с.
13. Karam, P.A. et al. ICRP evolutionary recommendations and the reluctance of the members of the public to carry out remedial work against radon in some high-level natural radiation areas/International Congress Series, July 2002 – 1236: 35-37.
14. Ramsar, Mazandaran: From Wikipedia, the free encyclopedia[Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ramsar>, - Mazandaran.
15. Харисов Г.Х., Заворотный А.Г. Эффект влияния на человека сверхмалых доз атомной радиации, наблюдаемой в соляных шахтах/ Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 9(213).– С. 7-15.
16. Заворотный А.Г., Харисов Г.Х. Радиоактивная закалка как эффективное средство борьбы с радиофобией / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2018. – № 5. – С. 51-61.
17. Сивинцев Ю.В. Насколько опасно облучение (Радиация и человек) 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Издат. - 1991. – 112 с.

Сведения об авторе

Заворотный Александр Григорьевич, доцент, начальник учебно-научного комплекса гражданской защиты ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России». 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4. Тел. (495)617-27-18, 8926-317-26-44. E-mail: zavorotnyi_agz@mail.ru.

УДК 65.12

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-02-7

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИНСТРУМЕНТАРИЯ «УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ» В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Чл.-корр. РАН Н.А. Махутов
Институт машиноведения РАН, «НИИ Транснефть»

П.М. Морозов
ООО «ЗВЁЗДНЫЙ»

Кандидат техн. наук Ю.П. Климов
Совет ветеранов войны и труда Министерства машиностроения СССР

В.Н. Левицкий
ООО «ЗВЁЗДНЫЙ»