

А.Г. Заворотный

**РАСЧЁТНАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА
РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва

Контактное лицо: Заворотный Александр Григорьевич: zavorotnyi_agz@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от эффективной дозы облучения.

Материал и методы: Для построения модели оценки вероятности выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от эффективной дозы облучения использованы литературные экспериментальные данные и применялся вероятностно-статистический метод и метод наименьших квадратов.

Результаты: Разработана математическая модель оценки выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от эффективной дозы облучения. Вероятностная математическая модель 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 $EAR_1 = 0,000607$ 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 1 тыс. чел при радиационных авариях. 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.

Заключение: Представлена вероятность выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы радиации, полученной человеком. 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 3×10^{-6} в среднем через 15 лет.

Ключевые слова: атомная радиация, вредные и опасные факторы, стохастические и детерминированные эффекты, эффективная доза облучения, риск гибели человека

Для цитирования: Заворотный А.Г. Расчётная модель воздействия на человека радиационного облучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 1. С. 27–32. DOI: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-27-32

Calculation Model of Human Exposure to Radiation Exposure

A.G. Zavorotny

Academy of state fire service, Moscow, Russia, Moscow

Contact person: Zavorotny Aleksandr Grigorevich: zavorotnyi_agz@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: The aim of the work is to assess the output of stochastic and deterministic effects depending on the effective dose.

Material and methods: To construct a model for estimating the probability the output of stochastic and deterministic effects depending on the effective dose of radiation, the literature experimental data were used and the probabilistic-statistical method and the least squares method were used.

Results: A mathematical model is developed for estimating the yield of stochastic and deterministic effects depending on the effective radiation dose. A probabilistic mathematical model allows you to convert the risks of deterministic effects due to acute exposure of a person at a high dose and with a small exposure, measured in minutes, to the risks of stochastic effects due to exposure to a small dose during a long exposure (traced or fractionated exposure). The excellent convergence of the predicted (calculated) value $EAR_1 = 0,000607$ and statistical $EAR_0 = 0,000724$ is due to the fact that the reference points $LD_{10} = 2$ Gy, $LD_{50/60} = 4$ Gy, $LD_{90} = 6$ Gy are based on repeatedly verified statistical data on radiation accidents and deaths of more than 1000 people in radiation accidents. This indicates that the mathematical model adequately reflects the output of stochastic and deterministic effects observed in the operation of nuclear facilities both in normal mode and in radiation accidents.

Conclusion: The probability of the yield of stochastic and deterministic effects depending on the dose of radiation received by a person is presented. The threshold of the stochastic effect for humans is in the vicinity of the equivalent dose of 10 mSv at a dose rate of 10 mSv / year for radiation with low linear energy transfer. Moreover, the probability of a stochastic effect coming out is 3×10^{-6} on average after 15 years.

Keywords: atomic radiation, harmful and dangerous factors for humans, stochastic and deterministic effects, effective radiation dose, the risk of loss of life

For citation: Zavorotny AG. Calculation Model of Human Exposure to Radiation Exposure. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(1):27-32. DOI: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-27-32

Введение

В пункте 36 Публикации 103 МКРЗ [1] констатируется: «(36) При дозах около 100 мЗв в год прирост выхода стохастических эффектов, как это предполагается комиссией, имеет малую вероятность, и он пропорционален увеличению дозы свыше уровня естественного фона. Использование так называемой линейной беспороговой модели (ЛБМ), как считает комиссия, является наилучшим подходом к оценке риска на практике, что соответствует принципу предосторожности». Таким образом, пункт 36 [1] теоретически предполагает, что естественный радиационный фон при малых дозах безвреден, а практически, по принципу предосторожности, основан на так называемой линейной беспороговой модели. Вместе с тем, пункт 45 распространяет рекомендации Комиссии на облучение как от природных, так и от искусственных источников излучения. Стало быть, рекомендации [1] предполагают, что естественный радиационный фон при некотором (пороговом) уровне начинает наносить радиационный вред человеку (стохастический эффект).

В соответствии с п. 55 [1], наиболее серьезные биологические эффекты радиационного воздействия могут быть сгруппированы в две основные категории:

- детерминированные эффекты (вредные тканевые реакции), по большей части связанные с гибелью или повреждением клеток при больших дозах излучения;
- стохастические эффекты, то есть рак и наследуемые заболевания, связанные или с развитием раковых заболеваний у облученных индивидуумов из-за мутаций в соматических клетках, или с наследуемым заболеванием у потомства облученных лиц из-за мутаций в репродуктивных (функциональных) клетках.

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 LD₁₀ находятся около 1–2 Гр, а для LD₉₀ 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; LD₁₀ = 2 Гр; LD₉₀ = 6 Гр.

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

$$z = \frac{D-MD}{\sigma}, \tag{1}$$

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. А 71 [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 :

$$z = \frac{D-MD}{\sigma}, \tag{2}$$

откуда $dD = \sigma dz$.

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

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

Так как LD₁₀ = 2 Гр, LD₉₀ = 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 LD₉₀ = 6 Гр составляет 40 %, а диапазон значений функции Лапласа составляет 0 – 0,5 (50 % облученных погибают в дозах от 0 до 4 Гр):

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

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

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

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] для излучения с низкой линейной передачей энергии (гамма или рентгеновское излучение) поглощенная доза совпадает с эквивалентной дозой ($w_R = 1$), в дальнейшем эквивалентную дозу будем обозначать в зивертах. Доза $D = 0,6 \text{ Зв}$:

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

где D – доза, равная 0,6 Зв; MD – математическое ожидание дозы (среднее значение), при которой люди получают детерминированный эффект ($MD = 4 \text{ Гр} = 4 \text{ Зв}$); σ – среднеквадратичное отклонение (формула 5) дозы, при которой люди получают детерминированный эффект ($\sigma = 1,56 \text{ Гр} = 1,56 \text{ Зв}$). $P_{0,6}$ – вероятность выхода детерминированных эффектов при дозе $D = 0,6 \text{ Зв}$:

$$P_{0,6} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-2,18} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = -0,4854 + 0,5000 = 0,0146.$$

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

Таблица 1

Вероятность выхода детерминированных эффектов, 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 (А 73 [1])
The probability of the release of deterministic effects associated with radiation-induced syndromes and human death with acute uniform exposure to the whole body of radiation with low linear energy transfer with absorbed dose D in the whole body with a duration of irradiation of about several minutes (A 73 [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 D, при которой возникает эффект, Зв	0,2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

Таблица 2

Расчетные данные по вероятности выхода стохастических эффектов при малых дозах и малых мощностях доз
Calculated data on the probability of stochastic effects at low doses and low dose rates

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

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

$$P_c = 0,025838D^2, \quad (8)$$

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.

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 $DDREF = 2$ отпадает.

Формулы (2) и (3) являются результатом реального облучения более 1 тыс человек (главным образом при несчастных случаях, авариях и т.п. при высоких мощностях доз и малой экспозиции в основном излучения с низкой линейной 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. 1 представлена вероятность P выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D , полученной человеком (по данным табл. 3). На рис. 2 представлена процедура стыковки формул (8) и (2), (3).

На рис. 3 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).

При проверке с помощью критерия согласия χ^2 Пирсона, полученное число $\alpha = 0,99$ указывает на то, что распределение, изображенное на рис. 3, на 99 % приближается к теоретическому нормальному распределению величины D , при котором проявляется стохастический или детерминированный эффект.

На рис. 4 представлена воксел-модель плотности вероятности $f(D)$ выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D , полученной человеком.

В отличие от воксел-фантома, который определяет плотность и анатомический состав различных органов и тканей человека (глоссарий к публикации [1]), воксел на рис. 4 представляет собой трехмерный малый объемный

Таблица 3

Вероятность выхода P^* стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D
The probability of the output of P^* stochastic and deterministic effects depending on the dose D

D , Зв	P	D , Зв	P	D , Зв	P
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	0,998900
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		

Примечание:

* 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) (см. рис. 1).

** Среднегодовой фон в мире [5]

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 [5]) стохастический или детерминированный эффект. Время проявления последнего зависит от дозы D . Например, при $LD_{50/60} = 4$ Гр = 4 Зв, время проявления с фатальным исходом составляет в среднем $t = 60$ дней (A72 [1]).

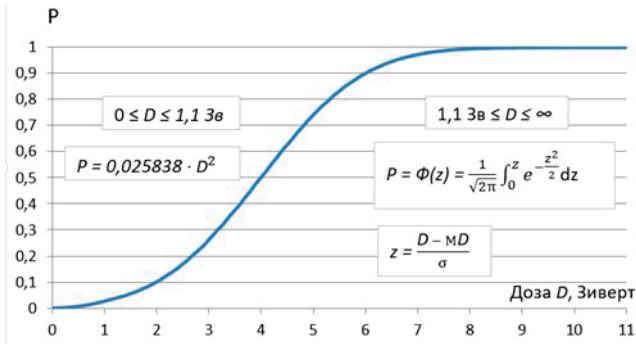


Рис. 1. Вероятность P выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D , которой облучаются люди (по данным табл. 3)

Fig. 1. Probability P of the output of stochastic and deterministic effects depending on the dose D , which people are trained (according to Table 3)

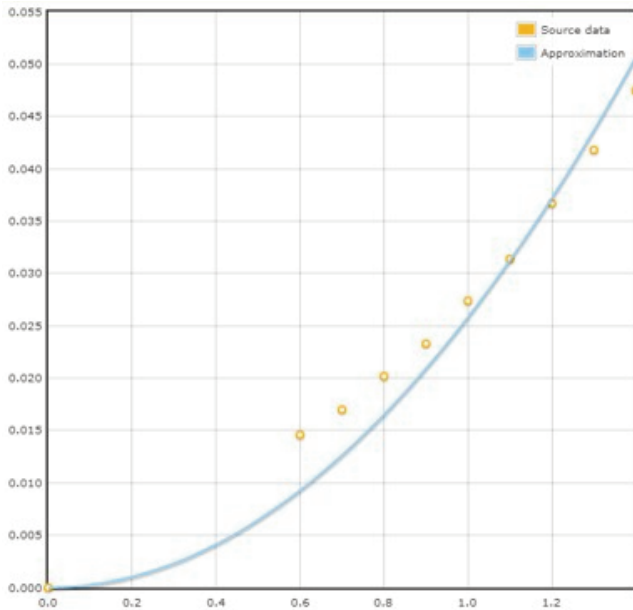


Рис. 2. Стыковка формул (8) и (2), (3) в точке $D = 1,13$ Зв
Fig. 2. Joining of formulas (8) and (2), (3) at the point $D = 1,13$ Sv

Вычислен доверительный интервал для указанной дозы с помощью квантили, соответствующего $|u|_{0,95} = u_{0,975} \approx 1,96$. С учетом этого границы 95 % доверительного интервала составляют:

$$LD_{50/60} = 4 \text{ Гр} = 4 \text{ Зв} \pm |u|_{0,95} \cdot \sigma = 4 \text{ Зв} \pm 1,96 \cdot 1,56 \text{ Зв} = 4 \text{ Зв} \pm 3,06 \text{ Зв}.$$

Соответственно нижняя граница 95 % доверительного интервала для $LD_{50/60}$ составляет 0,94 Зв, верхняя граница – 7,06 Зв. Указанные границы вписываются в пределы «реальных летальных доз, при которых погибают 50 % облученных»

Таблица 4

Статистические и экспертные данные по радиационным авариям в СССР и их последствия
Statistical and expert data on radiation accidents in the USSR and their consequences

Дата аварии	Место аварии	Количество людей, получивших при облучении:	
		стохастический эффект	детерминированный эффект
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 (Нижегород)	2	26
26.04.1986 г.	г. Чернобыль, АЭС, Украина [8]	3940*	60*
1945–2018 гг.	Все неучтенные в источнике [6] аварии, последствия которых оценены авторами настоящей статьи в 25 % всех последствий, указанных в табл. 3.	1134	69
1945–2018 гг.	Всего:	5670	343**

Примечание:

*Количество людей, получивших при облучении стохастический и детерминированный эффекты, указаны в работе [8].

** В том числе 71 человек, официально зарегистрированные в специализированной клинике для лечения радиационно пораженных людей

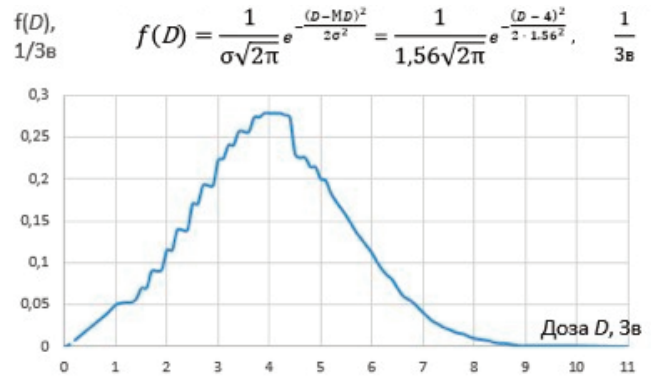


Рис. 3. Плотность вероятности $f(D)$ (формула (1)) выхода стохастических и детерминированных эффектов в диапазоне доз от 0 до 11 Зв с шагом 0,1 Зв (по данным табл. 3)

Fig. 3. Probability density $f(D)$ (formula (1)) of the output of stochastic and deterministic effects in the dose range from 0 to 11 Sv in increments of 0.1 Sv (according to Table 3)

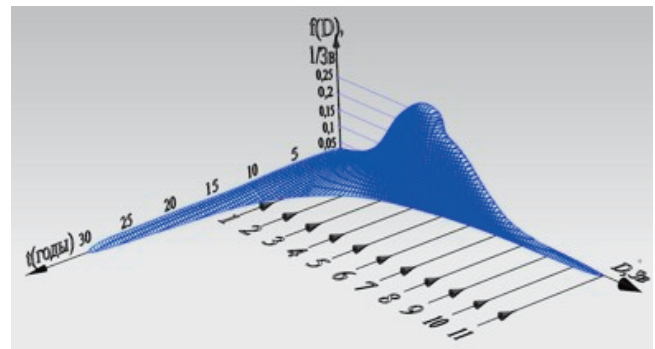


Рис. 4. Фронтальный вид воксель-модели плотности вероятности $f(D)$ выхода стохастических и детерминированных эффектов в зависимости от дозы D (построена по данным табл. 3 и рис. 3)

Fig. 4. Frontal view of the voxel model of the probability density $f(D)$ of the output of stochastic and deterministic effects depending on the dose D (built according to Table 3 and Fig. 3)

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].

Точность вычислений по формулам (2), (3), (8) диктуется входными данными, которыми заполняется вероятностно-статистическая модель. Коль скоро разброс $LD_{10} = 1 - 2$ Гр, $LD_{50/60} = 3 - 5$ Гр, $LD_{90} = 5 - 7$ Гр составляет ± 1 Гр (п. А 72 [1]), то, ориентируясь на $LD_{50/60} = 4$ Гр, можно считать, что неопределенность вычислений по формулам (2), (3), (8) составляет $(1/4)100\% = \pm 25\%$, где 1 Гр – разброс от средних значений LD_{10} , $LD_{50/60}$, LD_{90} ; 4 Гр – сред-

Таблица 5

Исходные данные для вычисления избыточного абсолютного риска EAR и его вычисленные значения
Initial data for calculating the excess absolute risk EAR and its calculated values

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 [10])	Средняя EAR ₀ для 1 человека за 40 лет (статистика в табл. 2 [10])	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	0,000607	0,045915

нее значение LD_{50/60}. Тогда неопределенность вычислений чисел в табл. 1–3 составляет ±25 %. Во всяком случае, по мере уточнения статистических данных, описанная вероятностно-статистическая модель даст адекватный входным данным результат.

Оценка числа людей, погибающих от стохастических и детерминированных эффектов

Вероятность P выхода стохастических эффектов при дозе $D = 0,0024$ Зв (среднемировой фон при мощности дозы $0,0024$ 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 $D = 10$ мЗв, при мощности дозы 10 мЗв/год, в среднем через 15 лет получают стохастический эффект (соматические заболевания, канцерогенные и наследственные [5]).

В табл. 4 представлены статистические и экспертные данные по радиационным авариям в СССР [6] и их последствия. Количество людей, подвергшихся радиации, и дозы, полученные ими – экспертные оценки, зафиксированные в [6, 7]. Стохастические и детерминированные эффекты вычислены 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: $82 \times 22,4$ млн. руб. = 1837 млн. руб., где 22,4 млн. руб. – экономический эквивалент стоимости жизни среднестатистического человека (без различия пола) в возрасте 37 лет [11].

Проверка адекватности математической модели по реальной смертности людей в результате выхода стохастических эффектов

В работе [10] 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 в [10]) 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 [10]), 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 $1730 / 40 \times 2 = 21,6$ мЗв. По формуле (8) вычислим средний избыточный абсолютный риск для одного человека за 0,5 года: $EAR = 0,025838$

$\times (0,0216 \text{ Зв})^2 = 0,000012$. За 40 лет средний EAR_c для одного человека составит: $EAR_c = 0,000012 \times 40 \times 2 = 0,000960$.

Формулы (2), (3), (8) учитывают человека без различия пола в среднем возрасте 36–39 лет. Так как дозы LD₁₀ = 2 Гр, LD_{50/60} = 4 Гр, LD₉₀ = 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 [10]. По формуле (1) в работе [10] вычислим EAR для мужского пола в возрасте 36 лет и 71 год: $EAR_{36} = 0,049$; $EAR_{71} = 0,031$. Тогда для возраста 71 год в вычисленное по формуле (8) и равное $EAR_c = 0,000960$ значение необходимо внести поправку: $EAR_1 = EAR_c \times (EAR_{71} / EAR_{36}) = 0,000960 \times (0,031 / 0,049) = 0,000607$.

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 таблицей 1 [1], каждый получит суммарный избыточный абсолютный риск: $EAR = K_n \times D \cdot t = 0,042 \times 0,0216 \times 40 \times 2 = 0,072576$. Внесем поправку, учитывающую возраст: $EAR_2 = EAR \times (EAR_{71} / EAR_{36}) = 0,072576 \times (0,031 / 0,049) = 0,045915$.

В табл. 5 представлены исходные данные для вычисления избыточного абсолютного риска EAR по трем источникам: по статистическим данным из работы [10]; по формуле (8); по формуле с использованием $K_n = 0,042$ 1/Зв, представленной в работе [1].

Из табл. 5 следует, что прогнозируемое по формуле (8) значение $EAR_1 = 0,000607$ отличается от статистического значения $EAR_0 = 0,000724$ на: $(0,000607 - 0,000724) / 0,000724 = -0,16$ или на минус 16 %, а прогнозируемое значение $EAR_2 = 0,045915$ с использованием $K_n = 0,042$ 1/Зв из таблицы 1 [1] отличается от статистического значения $EAR_0 = 0,000724$ на: $(0,045915 - 0,000724) / 0,000724 \approx 62$ или на 6200 %. 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. 4).

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 $EAR_1 = 0,000607$ 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 1 тыс. 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.

Выводы

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 ($0,7 \times 10^{-6}$ 1/чел. · год [9]).

Разработанная вероятностная математическая модель 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).

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 3×10^{-6} в среднем через 15 лет.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. / Под ред. Киселева М.Ф., Шандалы Н.К. М.: ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Издательство Юрайт, 2016. 479 с.
3. Волков Е.А. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1987. 248 с.
4. Калькулятор онлайн. Теория вероятностей. Метод наименьших квадратов. [Электронный ресурс]: <https://www.kontrolnaya-rabota.ru/s/teoriya-veroyatnosti/method-naimenshih-kvadratov/> дата обращения 12.03.2019.
5. Кальницкий С.А., Якубовский-Липский Ю.О., Тихонов М.Н. Риск медицинского облучения населения // Ядерное общество. 2007. № 4-6. С. 53-62.
6. Крупнейшие радиационные аварии и катастрофы в мире. Справка. [Электронный ресурс]: <https://ria.ru/20110312/347505544.html>.
7. Заворотный А.Г. Особенности ведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на радиоактивно-загрязненной местности: Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. 292 с.
8. Чернобыль: истинные масштабы аварии (Международное агентство по атомной энергии. Всемирная организация здравоохранения) // Ядерное общество. 2006. № 2-3. С. 11-18.
9. Харисов Г.Х. Основы обеспечения безопасности жизнедеятельности человека. Курс лекций. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. 89 с.
10. 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. Т.17, № 2. С. 9-28.

REFERENCES

1. Ed. Kiselev M. F., Shandala N.K. Publikatsiya. 103 Mezhdunarodnoy Komissii po Radiatsionnoy Zashchite (MKRZ) = 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Per. with English. Moscow, OOO PKF Alana Publ., 2009. 344 p. (In Russ.).
2. Gmurman V.E. Teoriya Veroyatnostey i Matematicheskaya Statistika = Theory of Probability and Mathematical Statistics. Moscow, Izdatelstvo Yurayt Publ., 2016. 479 p. (In Russ.).
3. Volkov Ye.A. Chislennyye Metody = Numerical Methods. Studies! the Manual for High Schools. Moscow, Nauka Publ., 1987. 248 p. (In Russ.).
4. Calculator Online. Probability Theory. The Method of Least Squares. URL: <https://www.kontrolnaya-rabota.ru/s/teoriya-veroyatnosti/method-naimenshih-kvadratov/> (Date Accessed 12.03.2019) (In Russ.).
5. Kalnitskiy S.A., Yakubovskiy-Lipskiy Yu.O., Tikhonov M.N. Risk Meditsinskogo Oblucheniya Naseleniya = The Risk of Medical Exposure of the Population. Yadernoye obshchestvo. 2007;4-6:53-62 (In Russ.).
6. The Largest Radiation Accidents and Catastrophes in the World. Help URL: <https://ria.ru/20110312/347505544.html> (In Russ.).
7. Zavorotnyy A.G. Osobennosti Vedeniya Avariyno-Spatelnykh i Drugikh Neotlozhnykh Rabot na Radioaktivno-Zagryaznennoy Mestnosti = Features of Conducting Emergency Rescue and Other Urgent Work in Radioactively Contaminated Areas. Monograph. Moscow, Publ., 2014. 292 p. (In Russ.).
8. Chernobyl: the True Extent of the Accident (International Atomic Energy Agency. World Health Organization). Yadernoye obshchestvo. 2006;2-3:11-18 (In Russ.).
9. Kharisov G.Kh. Osnovy Obespecheniya Bezopasnosti Zhiznedeyatelnosti Cheloveka = Fundamentals of Ensuring the Safety of Human Life. Lecture Course. Moscow, Publ., 2005. 89 p. (In Russ.).
10. Ivanov V.K., Kaydalov O.V., Kashcheyeva P.V., et al. Assessment of Individual Radiation Risks in Different Scenarios of Occupational Chronic Exposure. Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk. 2008;17;2:9-28 (In Russ.).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Поступила: 17.07.2021. Принята к публикации: 05.09.2021.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Article received: 17.07.2021. Accepted for publication: 05.09.2021