

## К вопросу оценки радиационного риска в части учета стохастических эффектов от облучения малыми дозами

ISSN 1996-8493  
DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75  
© Технологии гражданской безопасности, 2023

**В.М. Поляков, З.С. Агаларов, Л.В. Краснова**

### Аннотация

В статье уточняется метод расчета величины номинальных коэффициентов вероятности смерти вследствие стохастических эффектов от облучения малыми дозами. Расчет основан на определении вероятностей суммы совместных событий заболеваний различными видами рака.

**Ключевые слова:** оценка радиационного риска; облучение малыми дозами; стохастические эффекты; совместные и несовместные события.

## On the Issue of Radiation Risk Assessment in Terms of Accounting for Stochastic Effects From Low-Dose Irradiation

ISSN 1996-8493  
DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75  
© Civil Security Technology, 2023

**V. Polyakov, Z. Agalarov, L. Krasnova**

### Abstract

The article clarifies the method of calculating the value of death probability nominal coefficients due to stochastic effects from low-dose irradiation. The calculation is based on determining the probability of various types of cancer-joint events.

**Key words:** radiation risk assessment; low-dose exposure; stochastic effects; joint and incompatible events.

02.03.2023

В повседневной жизни люди подвергаются различным рискам; важность количественной оценки риска для людей, вызванного теми или иными причинами, сравнение и оценка этих рисков вследствие воздействия различных факторов опасности требуют особых знаний и пристального внимания со стороны специалистов [1, 6].

Одним из факторов опасности является облучение населения малыми дозами радиации. Медико-биологические последствия облучения населения

малыми дозами радиации основательно изучены [7]; хуже, на наш взгляд, обстоят дела с математической обработкой результатов исследований в этой области.

Практика проведения исследований в различных областях знаний свидетельствует, что реальный успех достигается в коллективах, где присутствуют специалисты различного профиля. Изучаемые в настоящее время явления и процессы столь сложны и многогранны, что требуют специальных знаний для успешного решения научной задачи. Игнорирование этого фактора снижает

ценность достигаемых результатов, а иногда приводит к принципиальным ошибкам.

Важное место в научных исследованиях занимает обработка данных наблюдений. В настоящее время существует множество доступных пользователям машинных программ обработки данных, в том числе в медицине. Результат исследований будет верный, если корректно учтены математические аспекты вычислений, которые требуют специальных знаний, доступных исследователям, получившим определенную математическую подготовку. Много ли таких специалистов среди врачей, представителей других специальностей, при обучении которых редко предлагается достаточно полный курс математических дисциплин?

Математика, а именно ее разделы: «теория вероятностей» и «математическая статистика», позволяют получить обоснованный результат лишь в том случае, если соблюдены условия и предпосылки, заложенные в каждую из используемых математических моделей. Другими словами, нередко бывает, что специалисты высшей квалификации, но в какой-то своей области, разрабатывают какой-либо специальный вопрос, всесторонне рассматривают различные аспекты решаемой проблемы. Но на этапе математической обработки данных, при представлении окончательных результатов исследования делают ошибки, связанные с применением неподходящих для данного случая математических моделей. Такая ситуация сложилась, по нашему мнению, при подготовке ряда документов по оценке радиационной опасности.

В материалах Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) 103 [7] термины «риск», «радиационный риск» используются в таком же смысле, как и в более ранней публикации [8]. Например, прямо указывается аналогия между терминами «радиационный риск» и «вероятность возникновения радиационно-индуцированных эффектов»: «радиационный риск-вероятность возникновения радиационно-индуцированного стохастического эффекта с учетом модификаций данного параметра, позволяющих проводить оценки для отдельных компонент радиационного вреда при оценке тяжести последствий облучения» [8, 13, 14]. Именно в этом смысле «как вероятность стохастических последствий облучения» будем и мы использовать термин «радиационный риск» и связанные с ним термины.

Принимая «радиационный риск» как синоним понятия «вероятность стохастических последствий облучения», на понятие «радиационный риск» распространяются все правила и условия операций с вероятностями.

Основополагающими документами в области оценки радиационного риска являются публикации МКРЗ [7, 8], в которых обобщены материалы натуральных наблюдений за подвергнувшимися облучению людьми, результаты передовых теоретических исследований в этой области.

Количественно радиационный вред оценивается в публикации [8] риском избыточной смертности, а в действующей в настоящее время публикации [7] — риском избыточной заболеваемости. Цитируем

[8, стр. 40]: «Комиссия оценивает риски для представительных групп людей с конкретными условиями облучения, она называет оцененную вероятность смертельных случаев риска на единицу эффективной дозы номинальным коэффициентом вероятности смерти (*nominal fatality probability coefficient*). Коэффициент может применяться при малых дозах и малых мощностях дозы».

Математически номинальный коэффициент вероятности смерти представляет собой коэффициент пропорциональности в линейной зависимости, проходящей через ноль вероятности наступления смерти от полученной дозы облучения [12]. В более поздней публикации [7] оценки радиационного риска уточнены в части более полного учета стохастических эффектов от облучения малыми дозами.

Математический метод расчета значений номинальных рисков нами применяется на основе материалов исследований, представленных в документах МКРЗ [3, 7], как наиболее информативных в плане оценки стохастических эффектов.

Рассмотрим значения номинальных рисков, усредненные по полу и вреду, приведенные в таблице [3, 7].

В шестом столбце этой таблицы суммируются данные абсолютного количества случаев заболеваний, приведенных к эффективной дозе в один зиверт на 10000 человек, с учетом летальности и вреда от несмертельных видов рака, а также от наследственных заболеваний.

Эти данные являются исходным материалом для вычисления радиационного риска. Поскольку в публикации [7] используется линейная концепция доза-эффект, вычисленные таким образом коэффициенты 0,0574 (округленно 0,057) для населения в целом и 0,0422 (округленно 0,042) представляют собой вероятности радиационного вреда или радиационный риск для одного человека, отнесенный к одному Зв. Тогда зависимость радиационных рисков  $r_E$  от полученной дозы облучения  $E$  для населения в целом будет описываться линейной зависимостью:

$$r_E = 0,057 * E,$$

и для работающих:

$$r_E = 0,042 * E.$$

Еще раз обратим внимание на то, что эти формулы «работают» только при малых дозах облучения, не выше 0,100–0,200 Зв.

Рассмотрим внимательно вывод значений вероятности радиационного вреда. Для этого обратимся к данным таблицы, позаимствованной из работы [7]. Вероятности 0,057 и 0,042 по сути дела получены суммированием вероятностей заболеваний по отдельным органам. То есть, использована известная формула для определения вероятности суммы несовместных событий  $A + B + C + \dots D$ :

$$P(A + B + C + \dots D) = P(A) + P(B) + P(C) + \dots P(D). \quad (1)$$

Таблица

## Итоговые значения номинальных рисков, усредненные по полу и вреду [3, 7]

Ткань	Коэффициент номинального риска (случаев на 10,000 человек на Зв)	Доля летальности	Номинальный риск с учетом летальности (по отношению к колонке 1)	Относительная потеря времени жизни без рака	Вред (по отношению к колонке 1)	Относительный вред	Вероятн. события по данным таблицы	Вероятн. противоположного события
<b>а) Вся популяция</b>								
Пищевод	15,00	0,93	15,10	0,87	13,10	0,02	0,00131	0,99869
Желудок	79,00	0,83	77,00	0,88	67,70	0,12	0,00677	0,99323
Толстая кишка	65,00	0,48	49,40	0,97	47,90	0,08	0,00479	0,99521
Печень	30,00	0,95	30,20	0,88	26,60	0,05	0,00266	0,99734
Легкое	114,00	0,89	112,90	0,80	90,30	0,16	0,00903	0,99097
Кость	7,00	0,45	5,10	1,00	5,10	0,01	0,00051	0,99949
Кожа	1000,00	0,002	4,00	1,00	4,00	0,01	0,00040	0,99960
Молочная железа	112,00	0,29	61,90	1,29	79,80	0,14	0,00798	0,99202
Яичник	11,00	0,57	8,80	1,12	9,90	0,02	0,00099	0,99901
Мочевой пузырь	43,00	0,29	23,50	0,71	16,70	0,03	0,00167	0,99833
Щитов. железа	33,00	0,07	9,80	1,29	12,70	0,02	0,00127	0,99873
Костный мозг	42,00	0,67	37,70	1,63	61,50	0,11	0,00615	0,99385
Другие солидные	144,00	0,49	110,20	1,03	113,50	0,20	0,01135	0,98865
Гонады (наследственные заболевания)	20,00	0,80	19,30	1,32	25,40	0,04	0,00254	0,99746
<b>Всего</b>	<b>1715,00</b>		<b>564,90</b>		<b>574,20</b>	<b>1,00</b>	<b>0,05742</b>	<b>0,94258</b>
<b>б) лица работающих возрастов (18–64 лет)</b>								
Пищевод	16,00	0,93	16,00	0,91	14,20	0,03	0,00142	0,99858
Желудок	60,00	0,83	58,00	0,89	51,80	0,12	0,00518	0,99482
Толстая кишка	50,00	0,48	38,00	1,13	43,00	0,10	0,00430	0,99570
Печень	21,00	0,95	21,00	0,93	19,70	0,05	0,00197	0,99803
Легкое	127,00	0,89	126,00	0,96	120,70	0,29	0,01207	0,98793
Кость	5,00	0,45	3,00	1,00	3,40	0,01	0,00034	0,99966
Кожа	670,00	0,00	3,00	1,00	2,70	0,01	0,00027	0,99973
Мол. железа	49,00	0,29	27,00	1,20	32,60	0,08	0,00326	0,99674
Яичник	7,00	0,57	6,00	1,16	6,60	0,02	0,00066	0,99934
Мочевой пузырь	42,00	0,29	23,00	0,85	19,30	0,05	0,00193	0,99807
Щитов. железа	9,00	0,07	3,00	1,19	3,40	0,01	0,00034	0,99966
Костный мозг	23,00	0,67	20,00	1,17	23,90	0,06	0,00239	0,99761
Другие солидные	88,00	0,49	67,00	0,97	65,40	0,16	0,00654	0,99346
Гонады (наследственные заболевания)	12,00	0,80	12,00	1,32	15,30	0,04	0,00153	0,99847
<b>Всего</b>	<b>1179,00</b>		<b>423,00</b>		<b>422,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,04220</b>	

А можно ли считать несовместными событиями, например, заболевания раком пищевода, желудка, печени и других органов? Теоретически такие события могут происходить одновременно. А значит и формула (1) в данном случае не применима.

Для определения вероятностей суммы совместных событий используется следующая формула [6]:

$$P(A + B + C + \dots D) = 1 - P(\bar{A}) * P(\bar{B}) * P(\bar{C}) * \dots P(\bar{D}), \quad (2)$$

где  $P(\bar{A}), P(\bar{B}) \dots$  — вероятности противоположных событий событиям  $A, B \dots$

В данном случае (см. столбцы 8 и 9 таблицы), например, вероятность рака желудка для случайным образом выбранного из всей популяции населения человека (событие  $A$ ) составит 0,006770. А вероятность не заболеть раком желудка — противоположного события —  $\bar{A}$  будет равна  $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$  или  $P(\bar{A}) = 1 - 0,00677 = 0,99323$ .

Значения вероятности заболеть каким-то одним любым видом рака, а также вероятности не получить рак приведены в 8 и 9 столбцах таблицы.

Вычисления по формуле 2 привели к следующим значениям радиационного риска, приведенного к одному зиверту: для работающих — 0,041 и для населения в целом — 0,056.

Различия в итоговых значениях вероятностей, вычисленных по формуле 1 и полученных суммированием вероятностей заболеваний различными видами рака, получились невелики. Около 2,5 процентов. Понятно, почему получились столь небольшие отличия в данном случае. События проявления тех или иных видов рака являются так называемыми «ординарными событиями». А именно: вероятность появления одного вида рака у индивидуума значительно больше вероятности события появления двух и более видов рака.

С учетом допущений, принятых МКРЗ при определении компонент вреда здоровью вследствие стохастических эффектов от облучения, вроде бы эти различия малы и ими можно пренебречь. Но вопрос принципиален, в различных нормативных документах по вопросам радиационной безопасности копируется подход к определению рисков суммирования их по различным причинам без учета того факта, что

события, приводящие к радиационному вреду, являются совместными.

В заключение хотелось бы отметить, что публикации МКРЗ действительно являются авторитетнейшими изданиями и надо обладать специальными математическими знаниями, чтобы подвергнуть сомнению метод, применяемый в этих работах для исчисления вероятностей.

Есть и другая сторона вопроса. Сведения по эффектам вследствие радиационного воздействия в публикациях столь важны и фундаментальны, что мы полагали бы крайне неприятным событием то, что на этапе их обобщения делаются принципиальные методические ошибки при приведении вычислений. Эти ошибки, тиражируемые применительно к другим исходным данным, могут привести к значительным искажениям результатов определения радиационных рисков в других случаях.

### Литература

1. Архангельский В. И., Кириллов В. Ф., Коренков И. П. Радиационная гигиена: Практикум / Учеб. пособ. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 352 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 6-е изд. стер. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
3. Вестник Российского онкологического научного центра имени Н. Н. Блохина РАМН: Науч.-практ. ж-л. 2012. Т. 23. № 3 (89). 36 с.
4. Гаврилов Б. М., Нурлыбаев К., Мартынюк Ю. Н. Решение семинара ГК «Росатом» по радиационной безопасности // АНРИ. 2018. № 4 (95). С. 82–90.
5. Логвинов Д. И. Разработка методов исследования спектральных характеристик нейтронных детекторов и моделирование многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра: Дисс. к. т. н. Курск, 2019. 149 с.
6. Поляков В. М., Галушкин Б. А., Агаларов З. С., Краснова Л. В. Сравнение последствий для населения различных факторов опасности // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 2 (72). С. 21–25.
7. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Пер с англ.; под общей ред. М. Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
8. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Ч. 1. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Публикации 60, ч. 1., 61 МКРЗ/Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1994. 192 с.
9. Радиационная гигиена / Л. А. Ильин, И. П. Коренков, Б. Я. Наркевич. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017.
10. Архангельский В. И., Кириллов В. Ф., Коренков И. П. Радиационная гигиена: практикум: Учеб. пособ. 2015. 352 с.
11. Радиационная защита персонала организаций атомной отрасли: Учеб. пособ. / В. А. Кутыков, В. В. Ткаченко, В. П. Романцов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 400 с.
12. Регин Л. В. Номинальные коэффициенты ущерба: вычисление и назначение // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4. № 1. С. 35–37.
13. Рыжкин С. А. Оптимизация радиационного воздействия на пациентов и медицинский персонал при выполнении рентгенологических процедур (на примере Республики Татарстан): Дисс. д. м. н. М., 2019. 300 с.
14. Ширкин Л. А., Семченко М. И., Трифонова Т. А. Оценка радиационного риска и ущерба для здоровья населения от радона в воздухе помещений на примере города Владимира // Радиация и риск: Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра. 2017. Т. 26. № 4. С. 63–73.

### Сведения об авторах

**Поляков Владимир Михайлович:** д.т.н., ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», проф. каф. математики.  
Москва, Россия.  
SPIN-код: 7763-5664.

**Агаларов Зураб Сардарович:** к.э.н., доц., ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», доц. каф. математики.  
Москва, Россия.  
SPIN-код: 4430-1398.

**Краснова Любовь Викторовна:** к. э. н., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), с. н. с. науч.-исслед. отдела.  
Москва, Россия.  
SPIN-код: 6524-6195.

### Information about the authors

**Polyakov Vladimir M.:** ScD (Technical Sc.), Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Professor of the Department of Mathematics.  
Moscow, Russia.  
SPIN-scientific: 7763-5664.

**Agalarov Zurab S.:** PhD (Economic Sc.), Associate Professor, Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Associate Professor of the Department of Mathematics.  
Moscow, Russia.  
SPIN-scientific: 4430-1398.

**Krasnova Lyubov V.:** PhD (Economic Sc.), All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Senior Researcher, Research Department.  
Moscow, Russia.  
SPIN-scientific: 6524-6195.