

## Радиационное нормирование и радиационная безопасность

### Что такое риски?

**В экологии — детерминированный подход — концепция ПДК** (как правило).

С помощью ПДК нельзя произвести количественные оценки результатов воздействий.

Более того, на здоровье человека и состояние экосистем влияют не только концентрации конкретных веществ, но и разнообразные, часто случайные факторы: стресс, возраст, пол, социальные факторы....

Концепция ПДК не позволяет учитывать совместное воздействие различных веществ и различных факторов.

В течение последних ~25 лет интенсивно развивается подход, основанный на расчете вероятности проявления конкретного события и вызванного им ущерба. Он получил название “оценка экологического риска” (**Ecological Risk Assessment**).

В последние ~15 лет этот подход находит применение и в России. Многие основополагающие моменты этой науки остаются дискуссионными.

Так, например, до сих пор нет полного единодушия в определении самого понятия “**риск**”, иногда термин “риск” употребляется как тождественный термину “опасность”, иногда как синоним вероятности.

Оценка экологического риска включает в себя **три основные фазы:**  
**формулировку проблемы,**  
**анализ и**

**описание** (характеристику) **риска** (те, кто оценивают риск, должны оценить его, используя полученную оценку воздействия (дозу) и известные зависимости реакции системы на воздействие).

**Оценивание риска** — процесс, состоящий из двух основных этапов:  
**определение риска и оценка риска.**

Каждый из них, в свою очередь, подразделяется на две стадии.

**Стадиями определения риска** являются идентификация риска и его расчет;  
**стадиями оценки риска** — установление приемлемости риска и выявление мер по его уменьшению или полному предотвращению.

**Будем определять риск как вероятность возникновения техногенного или природного явления, сопровождающегося формированием и действием вредных факторов, умноженная на нанесенный в случае реализации такого события социальный, экологический и экономический ущерб.**

**Вероятность события или процесса выступает одним из компонентов риска, а мера последствий (ущерба) — другим.**

**Критерии, устанавливающие приемлемость риска, наиболее полно разработаны для целей радиационной безопасности.**

**Основным понятием здесь является радиационный риск. Радиационный риск является частью экологического риска.**

**«Идеологические» основы подходов к системе радиационной безопасности базируются на том известном обстоятельстве, что большинство решений в человеческой деятельности основывается в скрытой форме на балансе между пользой, с одной стороны, затратами и убытками, с другой стороны.**

Как следствие, формируется заключение о том, являются ли данное направление действий или практическая деятельность стоящими или нет. Практическая деятельность при этом должна быть направлена на достижение максимальной пользы для индивидуума или для общества.

Проблема заключается в том, что **цели человека и общества могут не совпадать.**

**В радиационной безопасности стало возможным количественно формализовать процедуру, чтобы помочь найти такие решения.**

Многие виды текущей практической деятельности приведут к увеличению доз, которые будут получены в будущем, иногда в отдаленном. Эти будущие дозы необходимо учитывать при защите населения, и отдельных лиц, хотя не обязательно тем же способом, какой используется для текущих доз.

Современная практическая деятельность может повысить вероятность того, что в последующем произойдет облучение. Поэтому **в дополнение к масштабу облучения важно учитывать и его вероятность.**

**В начале 1960-х гг.,** когда о стохастических последствиях воздействий ионизирующих излучений было известно немного, широкое распространение получили **сравнительные оценки, которые сводились к оценке доз или ожидаемых доз от рассматриваемого источника излучения и сравнение их с дозами от естественного радиационного фона.**

В этих случаях речь шла о сравнительных оценках риска и сопоставлении его с риском от естественного радиационного фона, который был принят равным единице.

**Был развит подход для оценки ущерба от различных источников через уровень облучения от естественных источников, которые дали бы ту же дозу на душу населения или ту же ожидаемую дозу.** Наиболее полно это проявилось при представлении **рисков от ядерных взрывов через соответствующее время облучения от естественных источников.**

Сопоставления проводились для решения вполне определенных задач.

**Сопоставление с дозами от естественных источников излучения или с наносимым ими ущербом может выявить радиологическую значимость тех или иных искусственных источников излучения, но мало что скажет о приемлемости их использования.**

**Если мы знаем уровень радиации от данного источника по отношению к естественному радиационному фону, то можем судить о целесообразности проведения эпидемиологических исследований.**

При проведении относительных сравнений сопоставляются коллективные дозы или дозы на душу населения от различных источников, **исключая тем самым неопределенность, связанную с оценкой коэффициентов риска.**

В широкой практике оценки радиационной опасности термин "риск" использовался как величина, которая может быть охарактеризована значением, выраженным в безразмерных единицах, если риск означает вероятность, но приобретает некоторую размерность, если риск означает математическое ожидание последствий.

Ограниченное определение риска оказалось недостаточным для представления разнообразия "рискованных ситуаций".

Во многих областях, где оценивают опасность, стали избегать особых значений слова "риск" и отдавать предпочтение таким словам, как "вероятность", "последствие" и "математическое ожидание" последствия, которое является синонимом среднего значения.

Постепенно в практике радиационного нормирования широко используемое слово "**риск**" стало скорее понятием, чем величиной, хотя его также можно рассматривать как многофакторную величину и говорить о "векторном" представлении для описания полной ситуации риска.

Часто предпочитают использовать там, где это можно, более прямой термин "**вероятность**". Это позволяет уменьшить неопределенность при передаче рекомендаций регулирующим органам и организациям, имеющим дело также с нетрадиционными рисками.

**Недостатком же "оценки вероятности" по сравнению с "оценкой риска" оказывается то, что здесь не учитывается природа и степень тяжести вредных последствий.**

В тех случаях, когда неправильное понимание мало вероятно, когда точный смысл слова несущественен, а также в установившихся выражениях слово "риск", конечно, используется без особых сомнений. Речь идет о таких выражениях, как "приемлемость риска", "риски излучения", "оценка риска" или "чрезмерный относительный риск".

При установлении количественной меры ущерба, связанного с воздействием излучения, и для защиты человека широкое употребление нашли также следующие выражения:

**изменения в биологических объектах,  
их повреждение,  
вред и ущерб здоровью человека и группы людей.**

**Изменения** при этом могут быть вредными, а могут и не быть.

**Повреждение** представляет некоторую степень вредных изменений, например в клетках, но оно не обязательно вредно для облученного индивидуума.

**Вред** — понятие, используемое для обозначения клинически наблюдаемых вредных эффектов, которые проявляются у индивидуумов (соматические эффекты) и их потомков (наследуемые эффекты).

**Ущерб** — это сложное понятие, сочетающее вероятность, степень тяжести эффекта и время его проявления. Его трудно представить с помощью одной единственной переменной величины.

Используя на практике термин риск в радиационной безопасности, часто выражают вероятность вредных последствий (событий) в процентах. Число предполагаемых событий в масштабах популяции может выражаться в расчете либо на тысячу, либо на миллион человек.

**Для любых практических оценок наиболее существенным понятием является «коэффициент риска», используемый в общем смысле для обозначения риска на единицу дозы (риск на 1 Гр в случае поглощенной дозы или риск на 1 Зв в случае эффективной или эквивалентной дозы). Поскольку риск не всегда бывает пропорционален дозе, иногда необходимо указывать ту дозу или дозовый диапазон, которым соответствует этот коэффициент.**

Так как при рассмотрении воздействия малых доз излучений риск рака является основным эффектом, то в зависимости от контекста в научной литературе коэффициент риска иногда называют «номинальным коэффициентом вероятности стохастических эффектов»; «полным риском для всех видов рака на 1 Зв»; «коэффициентом вероятности смертельного исхода». (В НРБ-99 мы обнаруживаем не очень удачный термин: «коэффициент пожизненного риска сокращения длительности периода полноценной жизни в среднем на 15 лет на один стохастический эффект».)

**Речь идет о коэффициентах, связывающих полученную дозу с вероятностью возникновения стохастических эффектов, а не о введении дополнительных весовых множителей помимо  $W_R$  и  $W_T$ .**

Номинальные коэффициенты вероятности стохастических эффектов, согласно Публикации 60 МКРЗ, для персонала, профессионально работающего с излучениями, и для населения представлены в табл.



Облученный контингент	Смертельные случаи рака <sup>б</sup>	Вероятности стохастических эффектов <sup>а</sup> , $10^{-2} \text{Зв}^{-1}$		
		Несмертельные случаи рака	Тяжелые наследуемые эффекты	Суммарный эффект
Персонал	4,0	0,8	0,8	5,6
Население	5,0	1,0	1,3	7,3

<sup>а</sup> Округленные значения.

<sup>б</sup> Для смертельных случаев рака ущерб равен коэффициенту вероятности.

Коэффициенты для работающих немного меньше, чем для всего населения (снижение составляет около 40%) из-за другого распределения работающего населения по возрастам.

Если эквивалентная доза распределена почти равномерно по всему телу, то **вероятность возникновения смертельного случая от определенного рака, обусловленного полученной эффективной дозой, можно непосредственно получить с помощью номинальных коэффициентов вероятности смертельного исхода для этого вида рака**, используя данные приведенной ниже табл. Эти коэффициент могут применяться при малых дозах и малых мощностях дозы.

**Определяют эти коэффициенты риска для раковых заболеваний вследствие облучения при низких дозах только лишь из данных об эффектах при больших дозах и больших мощностях дозы, а коэффициенты риска для наследственных эффектов нельзя получить из данных для человека.** (В первую очередь речь идет о коэффициентах риска, полученных по японцам, пережившим атомные бомбардировки, а также по группам лиц, облучавшихся в терапевтических целях.)

**Рассматривая любые оценки, всегда необходимо знать, при каких допущениях они получены.**

Ткань или орган	Вероятность смертельных случаев рака, $10^{-2}$ Зв <sup>-1</sup>		
	Все население	Работающие	
Желудок	1,10	0,88	
Кожа	0,02	0,02	
Красный костный мозг	0,50	0,40	
Легкие	0,85	0,68	
Молочные железы	0,20	0,16	
Мочевой пузырь	0,30	0,24	
Печень	0,15	0,12	
Пищевод	0,30	0,24	
Поверхность костей	0,05	0,04	

Толстый кишечник	0,85	0,68
Щитовидная железа	0,08	0,06
Яичники	0,10	0,08
Остальные органы	0,50	0,40
Всего	5,00	4,00
Вероятность тяжелых наследуемых нарушений <sup>a</sup>		
Половые железы	1,00	0,6
Общий итог (округленно)	—	—

Значения относятся к популяции с одинаковым числом лиц обоего пола и с широким диапазоном возрастов, т. е. для представительных групп людей с конкретными условиями облучения. Оцененные МКРЗ таким образом вероятности смертельных случаев рака на единицу эффективной дозы были названы номинальными коэффициентами вероятности смерти.<sup>a</sup> В наблюдениях на человеке пока не обнаруженных.

**Экстраполяцию к низким уровням облучения, которые и представляют интерес в экологически значимых ситуациях, обычно проводят, применяя коэффициент эффективности дозы и мощности дозы (DDREF), который снижает коэффициент риска на единицу дозы, полученный из наблюдения последствий облучения в большой дозе и с большой мощностью дозы.**

**Индуцируемые облучением злокачественные новообразования неотличимы от опухолей, образующихся под действием других факторов.** (Тем не менее вопрос: «может ли облучение вызывать специфическую форму рака?» периодически возникает. Он может возникнуть в ходе судебных разбирательств, при назначении компенсации за профессиональное облучение или при разработке правовых документов. Считается, что, как правило, не существует индуцируемых радиацией специфических патобиологических процессов, приводящих к формированию опухолей. Поскольку некоторые виды опухолей в обычных условиях встречаются крайне редко, а после облучения их частота значительно возрастает, можно предположить, что они обусловлены воздействием радиации. Однако радиация, как правило, лишь увеличивает встречаемость уже существующих форм рака.)

**Наблюдения за действием радиации на человека ограничены популяциями, которые по разным причинам и разными путями подвергались более интенсивному облучению, нежели другие контингенты.**

При анализе данных по радиационному канцерогенезу **риск обычно характеризуют в абсолютных или относительных показателях.**

**Абсолютный риск**, как правило, означает абсолютное увеличение частоты заболеваний раком, мутаций и других эффектов. **Коэффициент абсолютного риска — повышение риска в пересчете на единицу облучения и на единицу времени с поправкой на различные искажающие факторы.** Эту величину обычно выражают через **дополнительную смертность или число случаев заболевания на 1 Гр на 10 тыс.** (или 1 млн. человеко-лет и рассчитывают методом регрессионного анализа различий между регистрируемым и ожидаемым числом событий в репрезентативной группе или популяции в зависимости от дозы облучения.

**Относительный риск** — отношение числа зарегистрированных случаев заболевания в подвергшейся облучению популяции к числу ожидаемых случаев в необлученной популяции, сопоставимой с первой по всем остальным параметрам.

**Увеличение плотности вероятности смерти от рака не будет обнаружено, пока от момента воздействия излучения не пройдет минимальный латентный период.**

**Для описания последующей дополнительной плотности вероятности в зависимости от времени** (т. е. для целей прогноза) **необходимо использовать какие-то модели** (Канцерогенное действие низких доз облучения нельзя продемонстрировать, непосредственно исходя из имеющихся данных, или надежно экстраполировать на основании данных о действии высоких доз. Поэтому зависимость доза-эффект при очень низких дозах ионизирующей радиации является лишь гипотетической. Для установления этой зависимости необходимо знать, что представляет собой канцерогенез как биологический процесс и какова при этом роль радиации).

Наибольшее распространение получили **ДВЕ МОДЕЛИ:**

**мультипликативная модель риска** (multiplicative risk projection model) и **аддитивная модель риска** (additive risk projection model).

**Мультипликативная модель риска** основывается на том, что для большинства видов рака избыточная смертность после начального периода отсутствия риска или очень малого риска, т. е. латентного периода, имеет то же распределение во времени, что и естественная смертность от рака того же вида. Если такая картина продолжается в течение всей жизни, то между естественной смертностью от рака и избытком, вызванным излучением, в течение всего времени после минимального латентного периода будет наблюдаться просто пропорциональная зависимость. Эта модель не обязательно должна отражать мультипликативный биологический процесс, она может быть лишь удобным описанием пути, по которому **приписанная вероятность рака изменяется со временем, прошедшим после облучения**. Эта модель рассматривается сейчас как весьма упрощенная.

**Аддитивная модель риска** является альтернативной моделью экстраполяции и основывается на положении, что **избыточная смертность не зависит от обычной смертности**. После минимального латентного периода частота случаев смерти в течение нескольких лет после облучения возрастает, а затем остается довольно постоянной или убывает, как при лейкемии или раке костей.

**С учетом современных коэффициентов вероятности эта модель предсказывает полную конечную вероятность смерти, составляющую около половины значений, прогнозируемых моделью мультипликативного риска.** Она предсказывает также больше потерянных лет жизни на приписанную смерть. Простую аддитивную модель не согласуется с большинством эпидемиологических наблюдений.



Взрывы атомных бомб в Хиросима и Нагасаки, а также радиационные аварии, и в первую очередь Чернобыльская авария, привлекали и привлекают внимание общества к вопросам о риске смерти от воздействия излучения.

**Приписанная пожизненная вероятность смерти от воздействия излучения широко используется в практике радиационного нормирования для оправдания различных уровней ограничения дозы.**

**Радиационные риски выражают при этом количеством "процентов на зиверт".** Заметим, что полную вероятность смерти человека, которая составляет 100%, никак нельзя увеличить.

**Введение нового источника риска изменит не пожизненную вероятность смерти, а лишь распределение вероятных причин смерти.**

**Любое увеличение, которое вызывает новый источник риска, представляет собой увеличение плотности вероятности нашей смерти в любом заданном возрасте при условии, что данное лицо дожило до этого возраста (т. е. увеличение обусловленной плотности вероятности).**

Полная обусловленная плотность вероятности смерти от всех причин для некоего «усредненного» индивидуума, о котором известно, что он оставался в живых при каждом возрасте  $u$ , может быть получена с помощью выражения Гомпертца-Мейкхема [Публикация 60 МКРЗ]:

$$G_0(u) = A \exp(Bu) + C,$$

где  $u$  — возраст;  $A$ ,  $B$  и  $C$  — параметры, которые могут быть получены по демографическим таблицам.

Облучение некоторым источником, например источником с постоянной мощностью дозы, в возрасте от 18 до 65 лет может прибавить к фоновой плотности вероятности  $G_0(u)$  связанное с источником дополнительное увеличение обусловленной плотности вероятности  $dp/du$ :

$$G(u) = G_0(u) + dp/du.$$

По предположению, данный источник или вид практической деятельности служит на протяжении оставшейся жизни облученного человека причиной возникновения плотности вероятности радиационно-индуцированной смерти  $dp/du$ . Если зависимость мощности дозы от возраста известна, то эту плотность вероятности можно рассчитать в рамках определенной модели.

Одним из **существенных требований** радиационной безопасности является **удержание этой обусловленной плотности вероятности на приемлемом низком уровне.**

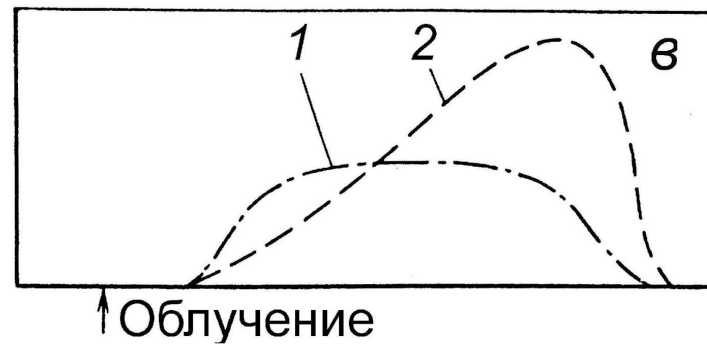
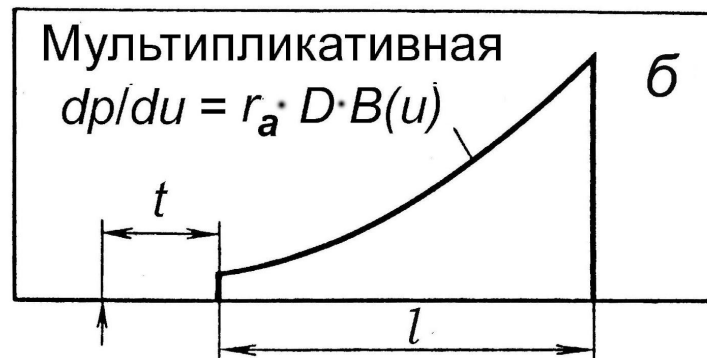
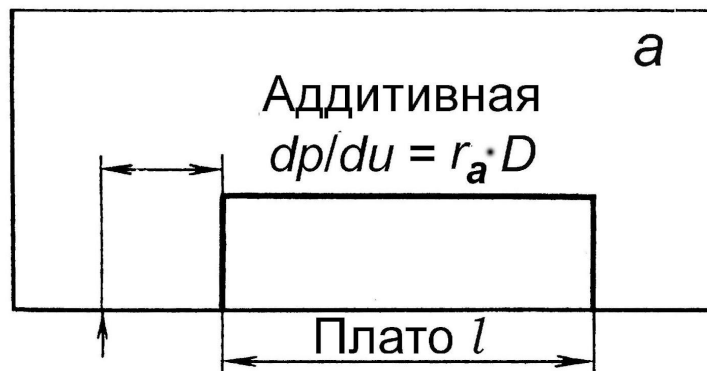
Она является обусловленной, так как может проявиться только, если человек остался живым при тех возрастах ( $u$ ), для которых она определяется.

Увеличение плотности вероятности смерти от рака будет обнаружено только после того, как от момента воздействия излучения пройдет минимальный латентный период.

На рис представлены дополнительные плотности вероятности в зависимости от времени

В простой "аддитивной" модели дополнительная плотность вероятности зависит от дозы, но не зависит от возраста.

**a** — упрощенная аддитивная модель. Дополнительная обусловленная плотность вероятности (смерти от рака) после однократной дозы излучения считается пропорциональной дозе,  $dp/du = r_a \cdot D$ , начиная с  $t$  — конца минимального латентного периода и в течение периода времени "плато"  $l$ ;



В простой версии "мультипликативной" модели дополнительная плотность увеличивается с возрастом так же, как плотность фоновой частоты рака, см. рис. б.

В настоящее время считают, что мультипликативная модель лучше согласуется с эпидемиологическими наблюдениями.

Дополнительная обусловленная плотность вероятности принимается пропорциональной также частоте естественной смерти от рака  $B(u)$ :  
$$dp/du = r_m \cdot D \cdot B(u); r_a \text{ и } r_m \text{ — некоторые коэффициенты.}$$

Таким образом, в простой "аддитивной" модели дополнительная плотность вероятности зависит от дозы, но не зависит от возраста.

В самой простой версии "мультипликативной" модели дополнительная плотность увеличивается с возрастом так же, как плотность фоновой частоты рака.

На рис. в — вероятные формы кривых при более реалистических предположениях для аддитивной (1) и мультипликативной (2) моделей.

**Риски от воздействия излучения можно представить несколькими способами, а это означает, что при различных способах представления может создаваться совершенно разное впечатление.**

В то же время, риск развития рака у лиц, подвергшихся облучению, зависит от многих факторов. К их числу относятся индивидуальные особенности человека, подвергшегося облучению, характер облучения (большие или малые дозы, острое или хроническое облучение, качество излучения); такие факторы, как курение, характер питания, масса тела, воздействие химических соединений, наличие других заболеваний, терапевтические воздействия и, наконец, природа самого процесса канцерогенеза.

Наличие всех этих факторов делает невозможной оценку облучения каким-либо одним способом. Поэтому оказывается необходимым использовать несколько подходов. Все это указывает на необходимость очень тщательного, взвешенного подхода при формулировке каких-либо заключений.