

К вопросу о методологии количественной оценки радиационного риска

В.А. Сакович

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены
Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

В данной статье обсуждаются особенности различных методологических аспектов оценки радиационного риска в зависимости от области их применения и перспективы их совершенствования (выделено жирным шрифтом). Рассматриваются такие области применения, как медико-биологическая, эпидемиологическая, радиационная безопасность, медицинское облучение. Проводится анализ алгоритмов, используемых для оценки радиационного риска. Предлагается «узаконить», в зависимости от области применения, такие меры риска, как обусловленные облучением увеличение интенсивности заболеваемости раком, увеличение интенсивности смертности от рака, сокращение ожидаемой продолжительности жизни. Высказывается суждение, что труднее всего встроить в методологию количественной оценки риска его субъективно-психологическое восприятие. При этом методологические суждения авторов, опубликованные ранее, системно обобщаются в предположении, что читатели знакомы с данной темой. Присутствуют неизбежные в данной теме дискуссионные моменты.

Ключевые слова: радиационная безопасность, радиационный риск, радиогенный риск, эпидемиология, математические модели, функция дожития, интенсивность заболеваемости, интенсивность смертности.

Методология количественной оценки радиационного риска неизбежно является предметом дискуссий, по крайней мере из-за разнообразия областей применения понятия и величины радиационного риска. При этом существенно, что в каждой области для количественного описания радиационного риска характерны различные приближения, компромиссные экспертные соглашения и границы применимости. Такими областями можно считать:

- медико-биологическое применение;
- эпидемиологическое применение;
- обеспечение радиационной безопасности;
- медицинское облучение;
- индивидуально-психологическая и социальная область;
- страховая область.

Что является общим во всех областях и аспектах применения? Радиационный риск – это величина, а именно – вероятность. Вероятность нанесения вреда здоровью в результате облучения, проистекающая из вероятностного характера как самого облучения (в случае, если оно имеет такой характер), так и природы возникновения негативных последствий в облучённом организме.

Негативные последствия в облучённом организме могут быть как детерминированными, наверняка возникающими в относительно близкие сроки после облучения в больших дозах, так и вероятностными по своей природе

и отдалёнными на многие годы, что является определяющим при малых дозах. Учёт вероятности детерминированных эффектов – это отдельная узкая методологическая тема. Вероятность возникновения отдалённых эффектов облучения в определённой дозе справедливо называть радиогенным риском. Методология оценки этой вероятности и является главным предметом данной статьи.

В медико-биологическом применении главным является понимание процессов радиационного канцерогенеза. Общеизвестные модели зависимости интенсивности заболеваемости (ИЗ) раком и интенсивности последующей смертности (ИС) от возраста t_0 , в котором произошло кратковременное облучение, и от возраста наблюдения t , строго говоря, являются аппроксимациями, а не моделями, т.к. они не основываются на медико-биологических механизмах [1, 2]. Они были разработаны и успешно использовались прежде всего для экстраполяции результатов наблюдения за когортой японцев, подвергшихся облучению при атомной бомбардировке Хиросимы и Нагасаки в 1945 г., так называемой когортой LSS в период 1958–1998 гг. на последующие годы, но эта задача с опубликованием результатов за 1958–2009 гг. [3,4] стала, можно сказать, менее актуальной.

Признаки моделирования можно видеть, пожалуй, в аппроксимациях, которые содержат разность возраста заболевания (или смерти) и возраста облучения.

Сакович Вадим Алексеевич

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены

Адрес для переписки: 123182, Россия, Москва, ул. Щукинская, д.40; E-mail: sakvapin1@rambler.ru

В принципе математические модели абсолютной ИС и относительной ИС представляют интерес, но вряд ли их следует считать составной частью методологии оценки радиационного риска, и внимание им мы уделяем отдельно в работах [5, 6].

Буквальными моделями являются модели многостадийного преобразования раковой клетки, разработанные с целью объяснения степенной зависимости от возраста наблюдения ИС от рака. Но они рассматривались авторами вне связи с облучением, и МКРЗ не сочла нужным упомянуть их в своих рекомендациях [1].

Попытка построить математическую модель формирования радиогенного риска на основе современных биологических представлений о динамике канцерогенеза предпринята нами в работах [7, 8]. Предложенная в них квазибиологическая модель (КБМ) использует биологические понятия и величины, присутствующие в описании ряда биологических процессов, что допускает привлечение других (помимо эпидемиологических) данных к анализу радиационного канцерогенеза. Так, используются понятия скорости деления стволовых клеток и скорости убыли их количества с возрастом, что может позволить в дальнейшем объяснить различие зависимости от возраста облучения ИЗ и ИС от рака в разных органах и тканях. Используется также понятие надёжности функционирования организма [9, 10], которое на уровне популяции или когорты проявляется в виде возрастной зависимости суммарной фоновой смертности от всех причин и в том числе от всех раков. При анализе эпидемиологических данных и при оценке радиационного риска важно, что эти зависимости в популяциях заметно различаются между собой и медленно изменяются со сменой поколений. Квазибиологический подход позволит, на наш взгляд, с одной стороны, лучше понять названные выше возрастные зависимости, а с другой, сделать в дальнейшем так называемый межпопуляционный перенос более определённым. При этом он также позволяет учитывать возрастную динамику воздействия различных канцерогенных факторов.

Отдельным аспектом в медико-биологической области является зависимость ИС и ИЗ от дозы и мощности дозы, точнее коэффициент пересчёта от данных по когорте LSS к реализующимся на практике режимам и уровням облучения. Попытки определять этот коэффициент, так называемый коэффициент эффективности дозы и мощности дозы (КЭДМД), привлекая эпидемиологические и радиобиологические данные по результатам облучения в широком диапазоне значения дозы и мощности дозы, на наш взгляд, малоперспективны. Суть в том, что в разное время после облучения действуют различные процессы развития радиационного поражения (повреждения). Практически все они как раз и отражаются в упомянутых ранее моделях. КЭДМД в применении к данным по когорте LSS предназначен для учёта роли исключительной кратковременности облучения при атомном взрыве, т.е. учёта мощности дозы (которая в этом случае обратно пропорциональна дозе). Т.е. речь идёт не о медико-биологическом аспекте, а о биофизическом. Нами было показано, что КЭДМД имеет право на существование, если предположить участие в формировании первичного повреждения ДНК короткоживущих продуктов взаимодействия излучения со средой, окружающей ДНК [11].

Ответ на данный вопрос предстоит искать путём изучения таких цитогенетических эффектов облучения, которые по своей природе связаны с однократным повреждением ДНК. По сути, нужно изучать эффекты, обусловленные однократным попаданием в некоторый участок ДНК при воздействии гамма-излучения различной мощности дозы. В этом случае статистически достоверные выводы получить проще, чем по каким-либо эпидемиологическим данным.

Механизм формирования первичных повреждений ДНК проявляется также в виде относительной биологической эффективности (ОБЭ). Поэтому объяснение наблюдаемой зависимости ОБЭ от линейной передачи энергии (ЛПЭ) с позиций микродозиметрии может пролить свет на значение КЭДМД. В частности, природа модификации ОБЭ в виде так называемого кислородного эффекта, о котором можно прочитать в п. 2.19 работы [12], может быть общей с природой КЭДМД при атомном взрыве.

Методологические аспекты применения оценок радиационного риска в эпидемиологической области ближе всего к аспектам применения в медико-биологической области. И здесь уместнее всего, на наш взгляд, обсудить алгоритмы оценки риска. Эффекты, об оценке риска возникновения которых идёт речь, – первичное заболевание раком или смерть от рака. Кроме того, здесь не идёт речь о коэффициенте номинального риска. Дискуссия начинается с формального определения дополнительного риска. Хорошо известны два несколько различающихся выражения, которые определены в [2] и подробно рассмотрены также в [13, 14]. Применительно к смертности они выглядят так:

$$\Delta \tilde{R}_{rc}(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} [\mu(t) - \mu_c(t)] \Delta Q_r(t_0, t) dt \quad - \text{по-}$$

жизненный радиогенный риск, т.е. повышение вероятности смерти от рака в течение всей последующей жизни с начала облучения, где $\mu(t)$ – ИС по всем причинам; $\mu_c(t)$ – ИС от рака; $Q(t_0, t)$ – функция дожития и $\Delta Q_r(t_0, t)$ – её изменение к возрасту t в результате облучения в возрасте t_0 ;

$$\Delta R_{rc}(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} \Delta \mu_{rc}(t_0, t) Q_r(t_0, t) dt = \int_{t_0}^{\infty} \mu(t) \Delta Q_r(t_0, t) dt$$

– радиогенная доля рака (РДР), т.е. доля радиогенных раков в пожизненном риске смерти для облучённого контингента, где $\Delta \mu_{rc}(t_0, t)$ – изменение ИС от рака в результате облучения и $Q_r(t_0, t)$ – функция дожития после облучения.

Второе выражение применяется в области радиационной безопасности и, как видно и хорошо известно, значение соответствующей величины несколько больше первого значения (на среднюю долю раков в причинах смерти). Какое из них лучше применять в области радиационной безопасности, обсудим позднее. Что касается эпидемиологической области, то здесь представляет интерес результат сравнения данных, относящихся к разным контингентам или к разным календарным периодам. Такое сравнение позволяет провести только первое вы-

ражение, т.к. второе, т.е. $\int_{t_0}^{\infty} \mu(t) \Delta Q_r(t_0, t) dt$, не есть непосредственно наблюдаемая величина.

Необходимо заметить, что в обоих выражениях нижний предел интегрирования может быть любым, как меньше t_0 , так и больше t_0 . В первом случае, пока $t \leq t_0$, сохраняется $\Delta\mu_{rc}(t)=0$ и $Q_r(t_0, t)=Q(t_0, t)$. Во втором случае при $t > t_0$ получается оценка остаточного риска к возрасту t . О нём может идти речь, например, при окончании профессиональной деятельности, связанной с использованием источников ионизирующих излучений.

Необходимо заметить также, что никакое вредное воздействие на организм человека не может увеличить пожизненный риск смерти от всех причин смерти суммарно, т.к. он равен единице. Оно может только перераспределить доли пожизненных рисков, связанных с различными причинами смерти. Формально увеличение радиогенного риска, оцениваемого как по первому, так и по второму выражению, количественно уменьшает другие риски, что, разумеется, не уменьшает их роли. Такой «парадокс» связан с тем, что в результате радиогенного увеличения смертности происходит сокращение ожидаемой продолжительности жизни (ОПЖ):

$$\Delta T_r(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} \Delta Q_r(t_0, t') dt'$$

Такой показатель радиогенного вреда также неоднократно предлагался [15]. В области радиационной безопасности он не узаконен, но в эпидемиологической области его применение, на наш взгляд, необходимо, в особенности при социальной интерпретации радиогенного риска.

Сопоставление выражений для $\Delta\tilde{R}_{rc}(t_0)$, $\Delta R_{rc}(t_0)$ и $\Delta T_r(t_0)$ и $\Delta T_r(t_0)$ показывает, что все они являются линейными функционалами от $Q_r(t_0, t)$, но с разными взвешивающими множителями: $[\mu(t)-\mu_c(t)]$ в случае пожизненного риска, $\mu(t)$ в случае радиогенной доли рака (РДР) и единицей в случае сокращения ОПЖ. Поскольку для взрослых $\mu(t)$ быстро (экспоненциально) увеличивается с возрастом, то РДР как показатель вреда более чувствительна к уменьшению значения функции дожития в старших возрастах, чем сокращение ОПЖ.

Оценка радиогенного риска в эпидемиологической области, как хорошо видно из приведенных выше выражений, зависит от функции дожития, которой можно характеризовать данный контингент, точнее, от его возрастного состава (предшествующего выполнению оценки или прогноза риска). В принципе, существует показатель, свободный от применения функции дожития. Это так называемая функция риска: $M(t) = \int_0^t \mu(t') dt'$ – среднее число смертей в возрастном интервале от 0 до t (которое может превышать 1 на одного человека) [16]. Соответственно, радиогенное увеличение этого показателя:

$$\Delta M_r(t) = \int_0^t \Delta\mu_r(t') dt'$$

присутствует в выражении для радиогенного уменьшения функции дожития:

$$\Delta Q_r(t_0, t) = Q(t_0, t) \cdot \left[1 - \exp \left\{ - \int_{t_0}^t \Delta\mu_r(t') dt' \right\} \right]$$

Оно не используется в радиационной эпидемиологии и в радиационной безопасности, но принято в математической статистике. Было бы целесообразно «узаконить» его для оценки радиогенного риска.

В докладе НКДАР ООН [2] (Дополнение В) обращено внимание на использование ещё одной меры радиационного риска: «годы потерянной жизни, приходящиеся на один радиационно-индуцированный случай» (*YLLRIC* – years of life lost per radiation-induced case), что в наших обозначениях равно:

$$YLLRIC = \Delta T_r(t_0, \infty) / \Delta R_r^*(t_0, \infty) = \int_{t_0}^{\infty} \Delta Q_r(t_0, t) dt / \int_{t_0}^{\infty} \mu(t) \Delta Q_r(t_0, t) dt$$

В работе [1] (рамка текста А.1.) сказано, что, «поскольку возрастные распределения для разных типов рака различны, по данным национальных раковых регистров были оценены средние возраста для нескольких типов рака, которые были преобразованы в среднее число потерянных лет жизни в случае возникновения рака. Затем поправка на число потерянных лет жизни была введена в результат предыдущего этапа». Как именно вносилась эта поправка, неясно. Однако, обсуждая методологию, следует иметь в виду, что $YLLRIC = 1/\mu_{взв}(t)$ – это величина, обратная значению ИС, взвешенному по функции $Q_r(t_0, t)$. Она слабо зависит от облучения и потому почти не содержит дополнительной информации о вреде от облучения. Она характеризует прежде всего изменение фоновой возрастной зависимости ИС в диапазоне возрастов, когда $\Delta Q_r(t_0, t)$ имеет относительно большое значение, т.е. в диапазоне 70–80 лет.

Математическое выражение для пожизненного риска заболевания раком имеет почти такой же вид, как и для риска смерти от рака, с тем отличием, что функция дожития должна умножаться на вероятность не заболеть раком за тот же отрезок времени

$$V_c(t_0, t) = \exp \left\{ - \int_{t_0}^t V_c(t') dt' \right\}$$

, где $\Delta V_c(t_0, t)$ – интенсивность первичной за-

болеваемости раком. Соответственно,

$$V_{rc}(t_0, t) = \exp \left\{ - \int_{t_0}^t [V_c(t') + \Delta V_{rc}(t')] dt' \right\} \quad \text{— где}$$

$\Delta V_{rc}(t')$ – радиогенная (дополнительная) интенсивность заболеваемости раком. Такое отличие от риска смерти очевидно, и оно учитывается, например, в [17]. Не столь очевидно, что этот множитель применяли при определении «Коэффициентов онкологической заболеваемости на основе моделей избыточного абсолютного и относительного риска», которые приведены в таблицах А.4.6 и А.4.7. работы [1]. Этот множитель приблизительно равен доле всех смертей без рака. Если интенсивность заболеваемости раком определять так же, как интенсивность смертности, т.е. принимать отношение числа заболевших в некотором возрасте t за интервал времени Δt

к среднему числу живущих в этом интервале, то получится величина

$$v_c^*(t) = v_c(t) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t v_c(t') dt' \right\}.$$

Соответственно, приближённо будет:

$$v_c(t) \approx v_c^*(t) \cdot \exp \left\{ \int_0^t v_c^*(t') dt' \right\}.$$

Рассмотренное различие проявляется только в старших возрастах, и надо ли его учитывать – вопрос дискуссионный.

Выше в качестве исходной характеристики радиогенного риска мы рассматривали абсолютное радиогенное увеличение интенсивности смертности – $\Delta \mu(t)$ или абсолютное увеличение интенсивности заболеваемости – $\Delta v_{rc}(t)$. Но в эпидемиологии широко использовалась и используется также другая характеристика – относительное радиогенное увеличение интенсивности, например,

$$\text{смертности} - \varepsilon_{rc}(t) = \frac{\Delta \mu_{rc}(t)}{\mu_c(t)}.$$

Несмотря на то, что

в такой характеристике объединены два различных эффекта, она очень информативна и полезна. В своё время именно эта характеристика показала наличие отдалённого вреда облучения и сделала необходимым разработку методов оценок радиационного риска. И сегодня значение именно этой количественной характеристики определяет целесообразность обсуждения методологических тонкостей оценки риска. Таким образом, именно в этой характеристике заключено социальное значение оценок риска. В чём её количественный смысл?

Современным представлениям, отождествляющим механизмы канцерогенеза при различных причинах первичных канцерогенных повреждений ДНК, соответствует соотношение:

$$\mu_c(t) = \int_0^t \int_0^\xi E(t') \Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt' dt,$$

где $\Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt'$ – абсолютное увеличение интенсивности смертности в результате кратковременного облучения в возрасте t_0 , приходящееся на единицу дозы, $E(t')$ – временной режим интенсивности воздействия других канцерогенных факторов, а α и ξ – коэффициенты. Поэтому при облучении с мощностью дозы $P(t')$ его относительная роль характеризуется соотношением:

$$\varepsilon_{rc}(t) = \frac{\int_0^t \alpha P(t') \Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt'}{\int_0^t \xi E(t') \Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt'}.$$

Как видно, сопоставление действия радиации и других факторов происходит адекватно, независимо от модельных представлений о $\Delta \mu_{rc}^0(t_0, t)$. Если происходит сравнение совокупных показателей по конкретному контингенту, то формально этому соответствует интегрирование числителя и знаменателя в выражении для $\varepsilon_{rc}(t)$ по

возрастному составу контингента. Таким образом, обычное сравнение смертности или заболеваемости хронически облучаемой части контингента и необлучаемой (фоновой) части адекватно.

Очевидно, что методология оценки радиационного риска в двух рассмотренных выше областях применения является основой её применения в области обеспечения радиационной безопасности. Основная методологическая позиция в этой области заключается в том, чтобы оценки были консервативными, т.е. с некоторым завышением. Следует заметить, что консервативность в вопросах безопасности, строго говоря, противоречит принципу оптимизации, т.к. ресурс, затрачиваемый в связи с завышением радиационной опасности, отбирается от противодействия другому источнику опасности.

При обеспечении радиационной безопасности принципиальным отличием от предыдущих областей является возможность вероятностного облучения, что также рассмотрим позднее.

Величина радиогенного риска как показателя радиационной опасности необходима, что общеизвестно, для решения двух задач: сопоставление эффектов облучения при различных пространственных (микро- и макро-) и временных распределениях поглощённой дозы в теле человека и сопоставление опасности различных видов деятельности. И здесь существенно то, вероятность каких именно эффектов принимается в рассмотрение.

Если рассматривать радиогенный риск смерти, то сравнение с рисками различных видов деятельности и занятий имеет основания, хотя другие виды деятельности характеризуют, как правило, риском смерти во время или в ближайшее время после окончания деятельности, но не риском возникновения отдалённых эффектов. При дополнении риска смерти, в частности, от рака, риском наследственных заболеваний сопоставление с другими видами деятельности становится не вполне корректным. Номинальный риск как величина, предложенная МКРЗ (алгоритма его расчета здесь не касаемся) на основе риска заболеваемости раком, для такого сопоставления заведомо не приемлем, а при учёте наследственных эффектов тем более.

Известно, что летальность и тяжесть заболевания зависят от локализации рака. Т.е. следует согласиться, что использование риска заболевания как показателя вреда от облучения вместо риска смерти имеет значение для взвешивающих коэффициентов ткани.

Однако низкая достоверность определения радиогенной (дополнительной) ИЗ, т.е. $\Delta v_{rc}(t)$ для большинства локализаций по данным о заболеваемости раком в LSS когорте, например, ограничивает возможности уточнения значения номинального риска. Использование понятия летальности и тяжести заболевания для приведения оценок риска заболевания к риску смерти, что делает МКРЗ, в принципе обесценивает, на наш взгляд, смысл используемого показателя. Так следовало бы делать, если бы существовало нормативное значение суммарного риска всех известных и потенциально возможных отдалённых эффектов облучения. Но такового нет. Хотя эксперты имеют право сойтись на любой договорённости. Так, можно согласиться с той точкой зрения, что облучение с некоторой вероятностью влияет на качество сосудов. Надо ли в связи с этим пересчитывать коэффициент

номинального риска? И зачем? Стало ли облучение опаснее? Для регулирования радиационной безопасности это не имеет значения. Мероприятия по снижению облучения практически не зависят от детализации показателя риска. Распределение дозы по телу также невозможно учесть при разработке таких мероприятий. Другое дело, что оправдано оценить, например, методом параметрических исследований роль возможного уточнения весовых множителей ткани при внутреннем облучении.

Таким образом, пожизненный радиогенный риск смерти от рака может быть достаточным обобщающим критерием для обеспечения радиационной безопасности. Но при этом нужно иметь в виду, что общий вред облучения из-за других эффектов несколько выше: например, при индивидуальном выборе вида деятельности на основе психологического восприятия радиогенного риска.

Итак, пожизненный радиогенный риск смерти от рака – наиболее простой и очевидный показатель опасности облучения, и на его примере легче всего показать методические проблемы, связанные с зависимостью радиогенной интенсивности смертности от возраста облучения и от возраста наблюдения. Эта зависимость становится всё более определённой, в частности, по мере наблюдения за когортой LSS. МКРЗ, признавая наличие такой зависимости, в целях определения коэффициента номинального радиогенного риска усреднила её по условной популяции и обоим полам. Формально такой коэффициент применим в условиях равномерного во времени облучения. Фактически его применение приводит к занижению оценки пожизненного риска от кратковременного облучения в 1,5 раза в начале периода трудовой деятельности и завышает примерно в 2 раза в конце этого периода. Учитывая современный уровень цифровых технологий, представляется вполне возможным оценивать индивидуальный пожизненный риск с учётом временного режима облучения в ходе профессиональной деятельности и пола, если «узаконить» соответствующие методики [18]. Такого типа оценки заведомо уместны при планируемом повышенном облучении. В конце концов, предложение рождает спрос.

Задачи, решаемые в условиях планируемого повышенного облучения, связаны также с потенциальным облучением. Здесь методология оценки радиационного риска предусматривает использование зависимости вероятности облучения от заданного значения дозы. Практически такие зависимости неизвестны и не используются, за исключением задачи создания радиационной защиты в межпланетном полёте [19]. Если, тем не менее, зависимость известна, то следует интегрировать произведение плотности вероятности значения дозы на риск, соответствующий этой дозе.

Однако здесь возникают проблемы для нормирования облучения. На первый взгляд, нормируемому значению риска однозначно соответствует нормируемое значение дозы. Ещё проще при линейной зависимости радиогенного риска от дозы: среднему значению риска соответствует среднее значение дозы облучения (и наоборот). Таким образом, может показаться, что из-за вероятностного характера облучения показатель опасности облучения концептуально не меняется.

Проблема заключается в том, что одному и тому же критерию могут удовлетворять разные варианты защи-

ты от облучения (в смысле как термина «protection», так и «shielding»). Так, при соблюдении нормативного значения средней дозы допускается разное значение риска больше среднего. Например, в межпланетном полёте в зависимости от периода солнечной активности может быть разным соотношение детерминированной дозы галактического космического излучения и вероятностной дозы от солнечных протонных событий, которое является предметом оптимизации при минимизации массы защиты веществом [20]. С другой стороны, может показаться, что удобно ограничивать значение риска: применительно к космическим полётам использовалось вначале понятие надёжности защиты, которая «... должна быть не ниже 0,99» [21]. Но он допускает, в свою очередь, варианты полёта с большой средней дозой, т.е. большой эффект.

Таким образом, в условиях вероятностного облучения должно быть, по крайней мере, два ограничивающих показателя: средняя доза или средний риск и вероятность превышения некоторого большого значения дозы, например, при котором возникает детерминированный эффект. Заметим, что использование двух показателей не требует предположения о линейной зависимости риска от дозы.

Похожий вариант ограничения риска наименее вероятного события используется в случае техногенного облучения в нормальных условиях, когда в пространственно неравномерном поле излучения вероятностной является длительность пребывания различных групп населения в разных его частях. В этом случае социальным показателем является коллективная доза, значение которой зависит от численности рассматриваемого контингента населения, а также средняя доза. Значению средней дозы соответствует некоторое среднее значение риска. Но ограничению подлежит облучение критической группы, т.е. некоторого количества лиц из населения дозой, заметно превышающей среднюю дозу. В данном случае не используется понятие радиационного риска, но фактически ограничивается некоторый квантиль радиогенного риска. Если бы в подобной задаче прогнозировали ситуацию с последовательным использованием оценки риска наиболее облучаемой группы, то в качестве методологического аспекта проявилась бы необходимость учитывать численность всего контингента [22].

Закономерен вопрос, почему ограничивается не средний риск. Дело в том, что здесь имеет место индивидуально-психологическое применение понятия радиационного риска. Отдельного индивида не волнует средний риск – его волнует его индивидуальный риск, причём не в теоретическом исчислении, а в своём собственном представлении и даже ощущении. Если предусматривать некоторые социально-экономические меры компенсации для критических групп, то радиационный риск для них можно было бы увеличить, допустив автоматически увеличение и среднего риска для рассматриваемого контингента. Если, конечно, это имеет социально-экономический смысл, тот самый, который лежит в основе принципа оптимизации.

Индивидуально-психологическое применение понятия радиационного риска проявляется в существенном различии основных дозовых пределов для работников и для населения. По существу, риск работников, которые с индивидуально-психологических и экономических позиций готовы договориться с работодателем о повышен-

ном значении риска, государство ограничивает сверху, потому что ему предстоит компенсировать возможные последствия. Нормативное значение риска населения (посредством нормирования дозы) государство ограничивает снизу, потому что население с индивидуальных позиций не видит негативного влияния неоправданных расходов на экономику. С этой точки зрения трудно дать толкование понятию «уровень пренебрежимо малого риска» и найти его место в методологии оценки радиационного риска.

Очевидно, что в отношении радиационной аварии понятие вероятности применимо не только к событию самой аварии, но и ко многим событиям ликвидации её последствий. Сложная система дозовых показателей для вмешательства и мероприятий после радиационной аварии заслуживает системного анализа с позиции радиационного риска. В целом, это сложная задача прежде всего из-за необходимости оценивать риски вреда от излишних мероприятий, в том числе и социально-психологические.

В целом, количественное описание социально-психологического аспекта оценок риска представляется малопродуктивным.

С позиции методологии оценки радиационного риска заслуживает анализа и медицинское облучение. Что касается медицинского персонала, то обеспечение его радиационной безопасности в принципе не отличается от безопасности других работников в условиях воздействия ИИИ. Что касается пациентов, а также лиц, причастных к медицинскому облучению, то прежде всего предстоит определиться, о чьих и каких рисках идёт речь. Здесь также присутствует трудно поддающийся количественному описанию индивидуально-психологический компонент.

В завершение следует, на наш взгляд, признать индивидуально-психологической областью применения методологии оценки радиационного риска восприятие этой методологии населением. Например, вряд ли целесообразно вслед за МКРЗ продолжать называть увеличение годовой интенсивности заболеваемости раком, обусловленное облучением в предшествующие годы, таким пугающим термином, как «радиационный риск». Мотивацию его использования за прошедшие полвека можно считать исчерпанной.

Очевидно, что оценка радиационного риска востребована в области страхования, но методология в этой области, на наш взгляд, в основном определяется методологией страхования, которую мы не рассматриваем.

Благодарности

Автор выражает благодарность Губину Анатолию Тимофеевичу за творческое сотрудничество при проведении многих из цитированных работ, при выполнении которых формировались изложенные в статье взгляды на методологию оценки радиационного риска.

Литература

1. Рекомендации 2007 года Международной Комиссии по Радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ., по ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
2. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. UN, New York, 2008.
3. Grant E.J., Brenner A. Hiromi Sugiyama et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009 // Radiat. Res. 2017. Vol. 187. P. 513–537.
4. Сайт Фонда научных исследований радиационных эффектов: <http://www.rerf.or.jp> (дата обращения 25.10.2017).
5. Губин А.Т., Сакович В.А. Анализ обобщённых моделей радиогенного риска. Часть 1. Модели МКРЗ // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 4. С. 48–60.
6. Губин А.Т., Сакович В.А. Анализ обобщённых моделей радиогенного риска. Часть 2. Модели НКДАР ООН // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 4. С. 61–79.
7. Губин А.Т., Редько В.И., Сакович В.А. Квазибиологическая модель радиогенной заболеваемости раком // Радиационная гигиена. 2015. Т.8, №4. С. 23–31.
8. Губин А.Т., Редько В.И., Сакович В.А. Дополнение квазибиологической модели радиогенной заболеваемости раком // Радиационная гигиена. 2017. Т.10, №4. С. 53–56.
9. Губин А.Т., Ковалев Е.Е., Сакович В.А. Модель для описания вероятности летального исхода при воздействии радиации и других вредных факторов // Атомная энергия. 1992. Т. 72, вып.6. С. 604–612.
10. Сакович В.А., Губин А.Т., Гоголева М.В., и др. Нагрузочная модель радиационного риска и её модификации // Проблемы анализа риска. 2004. Т.1, №1. С. 76–98.
11. Сакович В.А., Губин А.Т. Микродозиметрическая интерпретация коэффициента эффективности дозы и мощности дозы // Атомная энергия. 2017. Т. 122, вып.2. С. 103–108.
12. Губин А.Т., Сакович В.А. Методические проблемы практических оценок радиогенного риска // Радиационная гигиена. 2014. Т.7, №1. С. 16–22.
13. Сакович В.А., Губин А.Т. Методические основы разработки документов по определению значений радиогенного риска смерти, обусловленного облучением в пределах, установленных для контролируемых условий. Рекомендации Р. ФМБА России 21.07 – 2016, Москва 2016. 51 с.
14. Демин В.Ф., Голиков В.Я., Иванов Е.В., и др. Нормирование и сравнение риска здоровью человека от разных источников вреда // Атомная энергия. 2001. Т. 90, Вып. 5. С. 385 – 397.
15. Оценка радиационного риска у населения за счет длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах. Методические указания. МУ 2.1.10. 3014 – 12. – М.: ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора, 2011. 26 с.
16. Кокс Д.Р., Оукс Д. Анализ данных типа времени жизни / пер. с англ. О.В. Селезнева. М.: Финансы и статистика. 1988.
17. Форма ведомственного (ГК «Росатом») статистического наблюдения 10-РТБ-5 «Сведения о состоянии радиационной и токсической безопасности в организации». Введена в действие Приказом № 1/352-П от 18.10.2010 г.
18. Лучи космические солнечные. Модель потоков протонов. ГОСТ 25645.134-86. Москва: Издательство стандартов. 1986.
19. Дудкин В.Е., Ковалёв Е.Е., Коломенский А.В., и др. Оценка радиационной защиты при пилотируемом полёте к Марсу // Атомная энергия. 1991. Т.74, вып.4. С. 351–353.
20. Временные нормы радиационной безопасности при космических полётах (ВНРБ-75). Москва: Минздрав СССР. 1976.
21. Сакович В.А. Шапов О.И., Шейн В.И. Критерии санитарно-гигиенического регулирования радиационной безопасности. Медицина экстремальных ситуаций. Тез. докл. межд. конф. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях», Москва, 24–26 апр. 2000 г. ФУ «Медбиоэкстрем». 2000. №4(7). С. 24–25.

Поступила: 14.06.2019 г.

Сакович Вадим Алексеевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 123182, Россия, Москва, ул. Щукинская, д.40; E-mail: sakvagin1@rambler.ru

Для цитирования: Сакович В.А. К вопросу о методологии количественной оценки радиационного риска // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 94-101. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-94-101

On the issue of the methodology of quantitative assessment of radiation risk

Vadim A. Sakovich

Research and technical center of radiation-chemical safety and hygiene
of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Peculiarity of various methodology aspects for estimate radiation risk in dependence of using area are discussed in this article; perspective of the estimate perfection is discussed too. It is consideration such area of using as medico-biology, epidemiology, radiation protection, medical exposure. The opinion expressed that it is difficult to insert subjectively-psychological perception of risk in the methodology. It is generalized systematically author's methodological judgement, which been published before. The article contain discussion moment, which is inevitable in given theme.

Key words: radiation protection, radiation risk, radiogenic risk, epidemiology, mathematical models, survival function, incidence rate, mortality rate.

References

1. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Translation from English, ed. by MF Kiselev, NK Shandala. Moscow: «Alana». 2009; 312 (In Russian)
2. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. UN, New York; 2008.
3. Grant EJ, Brenner A, Hiromi Sugiyama et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. *Radiat. Res.* 2017;187: 513-537.
4. Website of the Foundation of the scientific research on radiation effects. Available from: <http://www.rerf.or.jp> (Accessed: 25 October 2017). (In Russian)
5. Gubin AT, Sakovich VA. Analysis of the general models of the radiogenic risk. Part 1. ICRP models. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk.* 2016;25(4): 48-60. (In Russian)
6. Gubin AT, Sakovich VA. Analysis of the general models of the radiogenic risk. Part 2. UNSCEAR models. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk.* 2016;25(4): 61-79. (In Russian)
7. Gubin AT, Redko VI, Sakovich VA. Quasi – biological model of radiogenic cancer morbidity. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2015;8(4): 23-31. (In Russian).
8. Gubin AT, Redko VI, Sakovich VA. Addition to the quasi-biological model of radiogenic cancer morbidity. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2017;10(4): 53-58. (In Russian).
9. Gubin AT, Kovalev EE, Sakovich VA. Model for the description of the probability of the lethal outcome for the radiation exposure and other hazardous factors. *Atomnaya energiya = Atomic energy.* 1992;72(6): 604-612. (In Russian).
10. Sakovich VA, Gubin AT, Gogoleva MV, et al. Operating model of the radiation risk and its modifications. *Problemy analiza riska = Problems of the risk analysis.* 2004;(1): 76-98. (In Russian).
11. Sakovich VA, Gubin AT. Microdosimetric interpretation of the dose effectiveness coefficient and dose rate. *Atomnaya energiya = Atomic energy.* 2017;122(2): 103-108. (In Russian)
12. Gubin AT, Sakovich VA. Methodological problems of practical radiogenic risk estimations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2014;7(1): 16-22. (In Russian)
13. Sakovich VA, Gubin AT. Methodical basis for the development of the documents on the estimation of the values of the radiogenic mortality risks due to the exposure in limits for the controlled conditions. Recommendations of the FMBA of Russia, 21.07.2016. Moscow, 2016: 51 (In Russian)
14. Demin VF, Golikov VYa, Ivanov EV, et al. Limitation and comparison of the human health risks from different hazardous sources. *Atomnaya energiya = Atomic energy.* 2001;90(5): 385 – 397. (In Russian)
15. Assessment of the radiation risk to the public due to long-term uniform technogenic low-dose exposure. Methodical guidelines. MU 2.1.10. 3014 – 12. Moscow: FBUZ "Federal center of hygiene and epidemiology" of Rosпотребнадзор. 2011: 26 (In Russian)
16. Koks DR, Ouks D. Analysis of the life time data. Translation from English Selezneva OV. Moscow: Finance and statistics. 1988. (In Russian)

Vadim A. Sakovich

Research and technical center of radiation-chemical safety and hygiene

Address for correspondence: Shchukinskaya str., 40, Moscow, 123182, Russia; E-mail: sakvagin1@rambler.ru

17. Form of the agency-level (Rosatom) statistical surveillance 10-RTB-5 "Data on the radiation and toxic safety in the facility". Based on the Order № 1/352-P, 18.10.2010. (In Russian)
18. Solar cosmic rays. Model of the proton flows. GOST 25645.134-86. Moscow. 1986. (In Russian)
19. Dudkin VE, Kovalev EE, Kolomenskiy AV, et al. Assessment of the radiation shielding for the piloted flight to Mars. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 1991;74(4): 351-353. (In Russian)
20. Temporal norms of the radiation safety for the space flights (VNRB-75). Moscow: Minzdrav of USSR. 1976. (In Russian)
21. Sakovich VA, Shamov OI, Shein VI. Criteria of the sanitary-hygienic regulation of the radiation safety. Medicine of extreme conditions. International Conference «Radioactivity from nuclear explosions and emergencies». Moscow, 24-26 April. 2000; 4 (7): 24-25. (In Russian)

Received: June 14, 2019

For correspondence: Vadim A. Sakovich – doctor of physical and mathematical sciences, chief research scientist, scientific and technical center radiation-chemical safety and hygiene, Federal medical biological agency of Russia (Shchukinskaya str., 40, Moscow, 123103, Russia; E-mail: sakvapin1@rambler.ru)

For citation: Sakovich V.A. On the issue of the methodology of quantitative assessment of radiation risk. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 94-101. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-94-101