

# Методические проблемы практических оценок радиогенного риска

А.Т. Губин, В.А. Сакович

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности  
и гигиены ФМБА России, Москва

*Составлены математические соотношения, соответствующие описанию процедуры определения значений коэффициента номинального риска, данному в Рекомендациях МКРЗ 2007 г. Показано, что пожизненный радиогенный риск является линейным функционалом от распределения мощности дозы во времени с множителем, спадающим с возрастом. Как следствие, применение коэффициента номинального риска в расчетах риска оправдано в том случае, когда длительное облучение почти равномерно во времени, и даёт заметную погрешность при однократном облучении. При использовании аддитивной модели радиогенного риска, предложенной в Докладе НКДАР 2006 г. для солидных раков, этот множитель почти линейно убывает с возрастом, что удобно для его практического применения.*

Ключевые слова: радиогенный риск, коэффициент номинального риска, возрастной коэффициент риска, модель радиогенного риска.

## Введение

К 1990-м гг. МКРЗ сформировала систему радиационной защиты, которая содержала ряд постулатов, в целом соответствовавших накопленным к тому времени знаниям о биологических эффектах радиации. В основу построения системы был положен упрощенный подход к оценке радиационных рисков, основанный на линейной гипотезе в отношении стохастических эффектов, концепции эффективной дозы и некоторых других предположениях. Обоснованием для такого подхода, помимо обеспечения практичности, было отсутствие в то время достаточно полных данных об отдаленных последствиях облучения и ограниченность моделей для их прогнозирования. Многолетнее применение системы радиационной защиты МКРЗ во всем мире показало полезность такого подхода, и многие рекомендации МКРЗ, в том числе Рекомендации 2007 г. [1], с минимальными изменениями переносились в отечественные нормативные и правовые документы по радиационной безопасности.

Так, в качестве основного показателя вреда от облучения для здоровья человека в Федеральном законе «О радиационной безопасности населения» [2] и позднее, в НРБ-99 [3], эффективная доза была определена «как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения...». В НРБ-99/2009 [4] включена формулировка прямого действия (п.2.3): «В соответствии с общепринятой в мире линейной беспороговой теорией зависимости риска стохастических эффектов от дозы, величина риска пропорциональна дозе излучения и связана с дозой через линейные коэффициенты радиационного риска, приведенные в таблице». И далее там же приведены значения этих коэффициентов, заимствованные из [1] (табл. 1), где они названы коэффициентами номинального риска (далее – КНР). В радиационно-гигиенических паспортах организаций и территорий [5] предусмотрены практические оценки риска.

Применительно к теме статьи следует подчеркнуть, что суть этой ЛБП-модели (по терминологии МКРЗ) состоит

не только в том, что принимается линейная зависимость риска от дозы, но и в том, что она предполагает независимость пожизненного риска в расчете на единицу дозы от временного режима облучения. Этот аспект ЛБП-модели был положен в основу системы учёта индивидуальных доз задолго до введения понятия эффективной дозы.

Однако к настоящему времени значительно расширился объем научных данных и знаний о биологических эффектах радиации, существенно продвинулись методы прогнозирования вероятности возникновения стохастических эффектов облучения. В настоящее время твердо установлено, что она зависит не только от времени, прошедшего с момента облучения, но и от возраста, в котором произошло облучение, и разработаны модели этой зависимости. Такие возраст-зависимые модели (ВЗМ) риска представлены в [1, 6]. На основе этих моделей МКРЗ в Рекомендациях 2007 г. уточнила значения КНР и определила тканевые взвешивающие множители для расчета эффективных доз при встречающихся на практике пространственно неравномерных облучениях.

Факт зависимости вероятности возникновения стохастических эффектов от возраста облучения был известен еще в период формирования современной системы радиационной защиты. Однако в целях простоты и преемственности в Рекомендациях 2007 г. [1] был сохранён приближённый по своей сути метод расчета риска путем умножения КНР на эффективную дозу. Этот метод приводит к одинаковым рискам для облучения в любом возрасте (например, в детском и в старческом), что при наличии современных ВЗМ справедливо порождает вопросы.

Имеется целый ряд практически важных задач, для решения которых необходимо располагать методом оценки рисков возникновения отдаленных последствий с учетом возраста при облучении и достигнутого возраста. Это, прежде всего, оценка рисков для разных групп лиц, проживающих на территориях радиоактивного загрязнения, и при планировании повышенного облучения лиц из персонала для действий в условиях предотвращения или ликви-

дации последствий радиационных аварий. Представляет также значительный интерес оценка риска при установлении причинно-следственной связи онкологических заболеваний с перенесенными облучениями и обосновании выбора контингентов для профилактики возникновения радиационно-индуцированных заболеваний.

Исходя из этих задач, в системе Госкорпорации «Росатом» в 2010 г. была утверждена «Форма ведомственного статистического наблюдения 10-РТБ-5 [7], в которой для расчёта радиационного риска рекомендуется информационно-аналитическая система АРМИР [8], использующая с этой целью ВЗМ. Отметим, что такое применение ВЗМ в настоящее время не рекомендовано ни МКРЗ [1], ни в НРБ-99/2009 [4].

В 2012 г. были утверждены также Методические указания [9], предназначенные «для организаций и специалистов, участвующих в анализе данных социально-гигиенического мониторинга (СГМ), характеризующих влияние радиационного воздействия на здоровье населения». Цель их разработки состояла в установлении единообразия оценок риска возникновения злокачественных новообразований среди населения для использования в СГМ при сравнительной оценке рисков и выявлении причин повышенной заболеваемости в условиях одновременно-го воздействия различных вредных факторов. Хотя примененные в [9] методы прогноза заболеваемости раком также основаны на ВЗМ и содержат много общего с оценками радиационного риска в целях обеспечения радиационной безопасности, включая терминологию, в данной статье они не рассматриваются.

В связи с отмеченным противоречием между достигнутым уровнем совершенства ВЗМ и практикой использования КНР мы сочли целесообразным обосновать метод расчёта пожизненного радиогенного риска<sup>1</sup> (РР) на основе ВЗМ, который теоретически сочетался бы с методологией применения КНР в нормативных документах по радиационной безопасности.

МКРЗ в Рекомендациях 2007 г. [1] изложила свои подходы к оценке риска и алгоритм получения значений КНР большей частью словесно, что вносит определенные затруднения при их анализе и применении. В данной статье этот алгоритм переложён на строгий математический язык с учетом обобщения результатов радиобиологических и эпидемиологических исследований в докладе НКДАР [6]. В рамках общей методологии оценки рисков, применяемой МКРЗ, показано, что РР является линейным функционалом от распределения мощности дозы во времени с множителем, который характеризует облучаемую группу населения (мужчины, женщины, диапазон возрастов и т.п.). В связи с этим введено понятие возрастного коэффициента риска (ВКР), предложен метод его расчёта и записаны формулы, которые позволяют с применением ВКР получать оценки риска по отношению к различным возрастам до, в момент начала, в процессе и после завершения облучения. В завершающих разделах статьи показано, что определение риска с использованием КНР приводит к минимальным

погрешностям в случае приблизительно равномерного во времени облучения и что при кратковременном облучении отличие оценок риска по КНР и по ВКР для лиц из персонала может составлять до двух раз в обе стороны.

### Математическая формулировка алгоритма расчёта РР

Если под риском стохастических эффектов, согласно п.2.3 НРБ-99/2009 (а, по сути, согласно [1]), подразумевать вероятность смерти, связанной с облучением, то в приближении малых доз можно записать<sup>2</sup>:

$$\Delta \tilde{R}(t_0) = \frac{1}{Q(t_0)} \int_{t_0}^{\infty} \Delta \mu_r(t_0, t) \cdot Q(t) dt, \quad (1)$$

где  $t_0$  – возраст кратковременного облучения или начала протяженного облучения;  $\Delta \mu_r(t_0, t)$  – радиогенная составляющая интенсивности смертности (ИС) в зависимости от достигнутого возраста  $t$ , которую приближённо принимают равной приращению ИС от рака<sup>3</sup>, а  $Q(t)$  – функция дожития, которая определяет вероятность новорожденному прожить как минимум  $t$  лет.

При анализе данных для LSS-когорты рассматривались различные варианты экстраполяционных моделей вида  $\Delta \mu_r(t_0, t) = r(E) \cdot \psi(t_0, t)$ , где  $r(E)$  зависимость эффекта от дозы<sup>4</sup>, а функция  $\psi(t_0, t)$  определяет зависимость радиогенной ИС на единицу дозы от возраста при облучении и от достигнутого возраста. МКРЗ, следуя ЛБП-модели, приняла  $\Delta \mu_r(t_0, t) = E \cdot \psi(t_0, t)$ . В этом случае

$$\Delta \tilde{R}(t_0) = E \cdot \int_{t_0}^{\infty} \frac{Q(t)}{Q(t_0)} \cdot \psi(t_0, t) dt. \quad (1a)$$

Введя концепцию эффективной дозы и рекомендуя пользоваться КНР для оценки РР, МКРЗ неявно предположила, что приращения радиогенной ИС, обусловленные элементарными фракциями дозы, аддитивны. При этом для перехода от условий облучения LSS-когорты к практически значимой области доз и мощностей доз был применен коэффициент эффективности дозы и мощности дозы – DDREF. Таким образом, для облучения при мощности дозы  $P(t)$  можно записать:

$$\Delta \mu_r(t_0, t) = \frac{1}{DDREF} \int_{t_0}^t P(t') \cdot \psi(t', t) dt'. \quad (2)$$

Подстановка (2) в (1) приводит к следующему общему выражению для РР, применимому в области малых доз и мощностей доз:

$$\Delta \tilde{R}(t_0) = \frac{1}{Q(t_0) \cdot DDREF} \int_{t_0}^{\infty} Q(t) \int_{t_0}^t P(t') \psi(t', t) dt' dt. \quad (3)$$

<sup>1</sup> В англоязычной литературе эту величину обычно называют «lifetime attributive risk» – LAR (пожизненный атрибутивный риск).

<sup>2</sup> Мы вводим здесь собственные обозначения вместо более сложных обозначений доклада НКДАР [6].

<sup>3</sup> В англоязычной литературе эту величину обычно называют «excess absolute risk» – EAR (дополнительный абсолютный риск).

<sup>4</sup> При анализе данных о солидных раках для LSS-когорты в качестве меры воздействия вместо эффективной дозы использован некоторый её суррогат, а именно: результат сложения поглощенной дозы гамма-излучения и увеличенной в 10 раз поглощенной дозы нейтронов в толстом кишечнике. Тем не менее, мы здесь и далее используем для неё обозначение  $E$  и единицу измерения Зв.

После изменения очередности интегрирования с соответствующей заменой пределов (см., например, [10]), получаем:

$$\Delta\tilde{R}(t_0) = \frac{1}{Q(t_0)} \int_{t_0}^{\infty} P(t'') \int_{t'}^{\infty} Q(t') \cdot \frac{\psi(t'', t')}{DDREF} dt' dt'' . \quad (4)$$

Введение обозначения

$$k_r(t) = \int_t^{\infty} Q(t') \cdot \frac{\psi(t, t')}{DDREF} dt' , \quad (5)$$

приводит к следующей компактной формуле:

$$\Delta\tilde{R}(t_0) = \frac{1}{Q(t_0)} \int_{t_0}^{\infty} P(t) \cdot k_r(t) dt . \quad (6)$$

Эта формула является основным результатом статьи. Она показывает, что с математической точки зрения РР, рассчитываемый на момент начала облучения, является линейным функционалом от распределения мощности дозы по возрасту  $P(t)$  с множителем  $k_r(t)/Q(t_0)$ .

В нижнем пределе интеграла в соотношении (6) формально можно заменить  $t_0$  на 0, т.к. начало облучения автоматически содержится в  $P(t)$ :

$$\Delta\tilde{R}(t_0) = \frac{1}{Q(t_0)} \int_0^{\infty} P(t) \cdot k_r(t) dt \quad (7)$$

В этом случае  $t_0$  в качестве аргумента в РР и в функции дожития означает возраст, на который оценивается РР. Если принять  $t_0=0$ , то  $Q(0)=1$  и  $\Delta\tilde{R}(0)$  есть оценка РР на момент рождения. Таким образом,  $k_r(t)$  характеризует уменьшение эффективности облучения с возрастом рассматриваемой группы населения, характеризующейся функцией дожития  $Q(t_0)$ . В широком диапазоне возрастов она незначительно отличается от единицы, поэтому определяющую роль при практических оценках РР играет именно  $k_r(t)$ . Величину  $k_r$ , исходя из такого её смысла, уместно назвать возрастным коэффициентом риска (ВКР).

Имея прогноз РР на момент рождения, определяемый с помощью ВКР, его легко пересчитать на любой другой возраст, предшествующий облучению, воспользовавшись формулой

$$\Delta\tilde{R}(t) = \Delta\tilde{R}(0)/Q(t) , \quad (8)$$

которая получается из (6) с учетом того, что для любого возраста  $t < t_0$   $\psi(t_0, t) \equiv 0$ , а функция дожития отличается от функции дожития при рождении на нормировочный множитель  $1/Q(t)$ .

При решении ряда задач возникает необходимость в получении оценок радиогенного риска в различных возрастах после начала облучения. Такие оценки могут потребоваться, например, по окончании трудовой деятельности для лиц из персонала или перед началом планируемого повышенного облучения. Поскольку в возрастах после начала облучения часть РР уже реализовалась, уместно называть РР в таких возрастах остаточным.

В случае оценивания РР в возрасте  $t > t_0$  можно, как и ранее в (3), произвести замену очередности интегриро-

вания (здесь также формально можно заменить  $t_0$  в нижнем пределе интегрирования на 0):

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{R}(t) &= \frac{1}{Q(t)} \int_t^{\infty} Q(t') \int_{t_0}^t P(t'') \psi(t'', t') dt' dt'' = \\ &= \frac{1}{Q(t)} \left[ \int_t^{\infty} P(t'') \int_{t'}^{\infty} Q(t') \psi(t'', t') dt' dt'' + \int_{t_0}^t P(t'') \int_t^{\infty} Q(t') \psi(t'', t') dt' dt'' \right] = \\ &= \frac{1}{Q(t)} \left[ \int_t^{\infty} P(t'') \cdot k_r(t'') dt'' + \int_{t_0}^t P(t'') \int_t^{\infty} \frac{\psi(t'', t')}{\psi(t, t')} Q(t') \psi(t, t') dt' dt'' \right] . \end{aligned} \quad (9)$$

Далее воспользуемся тем, что, как будет видно из дальнейшего, в  $\psi(t, t')$  переменные разделяются: в моделях МКРЗ [1] явным образом, а в моделях НКДАР – приближенно. В этом случае отношение  $\psi(t, t')$  не зависит от  $t'$  и его можно вынести из-под знака интеграла. В результате получаем

$$\Delta\tilde{R}(t) = \frac{1}{Q(t)} \left[ \int_t^{\infty} P(t'') \cdot k_r(t'') dt'' + k_r(t) \int_{t_0}^t P(t'') \frac{\psi(t'', t')}{\psi(t, t')} dt'' \right] . \quad (10)$$

Для возраста окончания периода облучения (например, на момент завершения трудовой деятельности с применением ИИИ), когда  $t=t_{\max}$  и  $P(t'') > t_{\max} = 0$ , данную формулу можно представить в виде

$$\Delta\tilde{R}(t_{\max}) = \frac{k_r(t_{\max})}{Q(t_{\max})} \cdot E_{\text{ост}}(t_{\max}) , \quad (11)$$

где

$$E_{\text{ост}}(t_{\max}) = \int_0^{t_{\max}} P(t'') \frac{\psi(t'', t')}{\psi(t, t')} dt'' . \quad (12)$$

Для модели МКРЗ  $\psi(t'', t') / \psi(t, t') = e^{\lambda(t-t'')}$  ( $\lambda = -0,0274 \text{ год}^{-1}$ ), так что

$$E_{\text{ост}}(t_{\max}) = e^{\lambda \cdot t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} P(t) e^{\lambda \cdot t} dt . \quad (13)$$

В случае модели НКДАР такую простую формулу для отношения получить не удастся, однако, основываясь на данных рисунка 1, приведенного далее, можно заключить, что и в этом случае для приближенной оценки допустимо воспользоваться формулой (13).

### Математическая формулировка алгоритма расчета КНР

Как уже отмечалось выше, МКРЗ ограничилась лишь кратким словесным описанием алгоритма получения КНР ( $K_R$ ), приведенным во врезке «Рамка текста А.1» [1]. Этот алгоритм заключается в использовании возрастно-зависимых моделей риска для расчёта РР на единицу дозы кратковременного облучения LLS-когорты (см. соотношение 1а), последующее его усреднение по полу и возрасту и деление итоговых значений на DDREF.

Усреднение по возрастам в интервале  $(t_{\min}, t_{\max})$  с учётом (5) дает:

$$K_R(t_{\min}, t_{\max}) = \frac{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} Q(t_0) \frac{\Delta\tilde{R}(t_0)}{E} dt_0}{DDREF \cdot \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} Q(t_0) dt_0} = \frac{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} k_r(t_0) dt_0}{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} Q(t_0) dt_0} . \quad (14)$$

В последнем равенстве учтено, что деление на DDREF было включено в алгоритм вычисления  $k(t_0)$  (см. формулу (5)), и формула (14) является окончательной для алгоритма МКРЗ.

Прогнозируемая эффективная доза  $E$ , которую следует применять при оценке РР с использованием КНР, с учётом вероятности естественного выбывания, равна:

$$E = \frac{1}{Q(t_{\min})} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} P(t) \cdot Q(t) dt. \quad (15)$$

Следовательно, для РР в соответствии с рекомендациями МКРЗ имеем

$$\Delta \tilde{R} = K_R \times E = \frac{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} k_r(t) dt}{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} Q(t) dt} \times \frac{1}{Q(t_{\min})} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} P(t) \cdot Q(t) dt,$$

что в общем случае, т.е. при произвольном временном режиме облучения, заметно отличается от РР, рассчитываемого по ВКР (см. (6)). Так, для возраста начала облучения:

$$\Delta \tilde{R}(t_{\min}) = \frac{1}{Q(t_{\min})} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} P(t) \cdot k_r(t) dt. \quad (17)$$

Однако в случае постоянной мощности дозы расчеты по формулам (16) и (17) приводят к одинаковым результатам.

Таким образом, использование КНР для определения РР приемлемо, когда облучение приблизительно равномерно во времени. Сравнение результатов, рассчитанных с применением КНР и ВНР для случая неравномерного во времени облучения и, в особенности, аварийного или планируемого повышенного облучения, проведено в следующем разделе.

На самом деле МКРЗ определяет КНР несколько сложнее, чем описано выше, что связано ещё с двумя методическими проблемами: с проблемой выбора показателя вреда и с проблемой межпопуляционного переноса, которые мы здесь не затрагиваем.

### Результаты численных оценок РР с применением ВКР

Доминирующий вклад в дополнительную смертность, обусловленную облучением, дают раки с преобладанием среди них солидных раков. Поэтому, имея в виду иллюстративный характер приводимых ниже результатов, будем считать, что  $\Delta \mu_r(t)$  полностью определяются радиационно-индуцированными солидными раками и воспользуемся следующими формулами для радиогенной ИС от солидных раков:

$$\psi(t_0, t) = \begin{cases} 1,13 \cdot 10^{-8} \cdot (t - t_0)^{0,659} \cdot t^{2,36} & \text{по НКДАР [10]} \\ 1,35 \cdot 10^9 \cdot e^{-0,0274 \cdot t_0} \cdot t^{3,36} & \text{МКРЗ [7]} \end{cases} \quad (18)$$

в соответствии с моделями аддитивного риска НКДАР (табл. 45 в [6]) и МКРЗ (табл. А.4.9 в [1]), считая их применимыми для обоих полов. Здесь все возраста выражены в годах.

Как и в Рекомендациях 2007 г. [1], во всех расчетах принято DDREF=2.

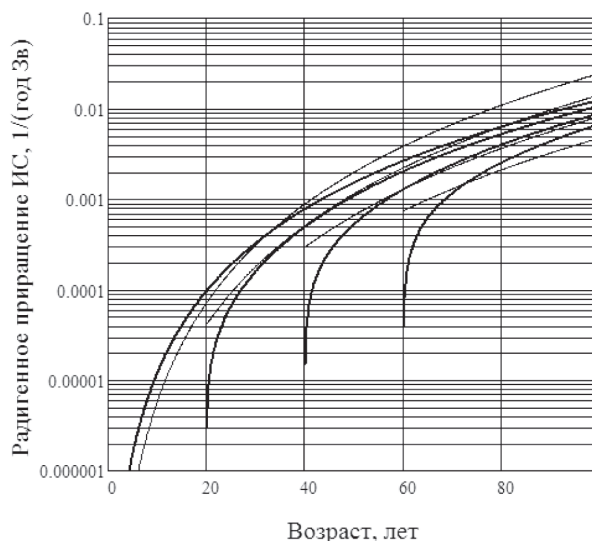
Различия моделей НКДАР и МКРЗ иллюстрирует рисунок 1. Модель НКДАР воспроизводит эффект отсроченного проявления радиационно-индуцированных раков, который МКРЗ ранее грубо учитывала в своих моделях путём введения латентного периода [11]. В Рекомендациях МКРЗ 2007 г. [1] об использовании латентного периода не сообщается, из чего можно заключить, что он не применялся. В этом плане модель НКДАР представляется более реалистичной.

Для расчета фоновых функций дожития по формуле  $Q(t) = \exp\left(-\int_0^t \mu(t') dt'\right)$  использованы следующие аппроксимации возрастных зависимостей ИС для комбинированного населения МКРЗ:

$$\mu(t) = \begin{cases} 2,1 \cdot 10^{-4} + 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot e^{0,0984 \cdot t} & \text{для мужчин} \\ 1,3 \cdot 10^{-4} + 1,21 \cdot 10^{-5} \cdot e^{0,103 \cdot t} & \text{для женщин} \end{cases} \quad (19)$$

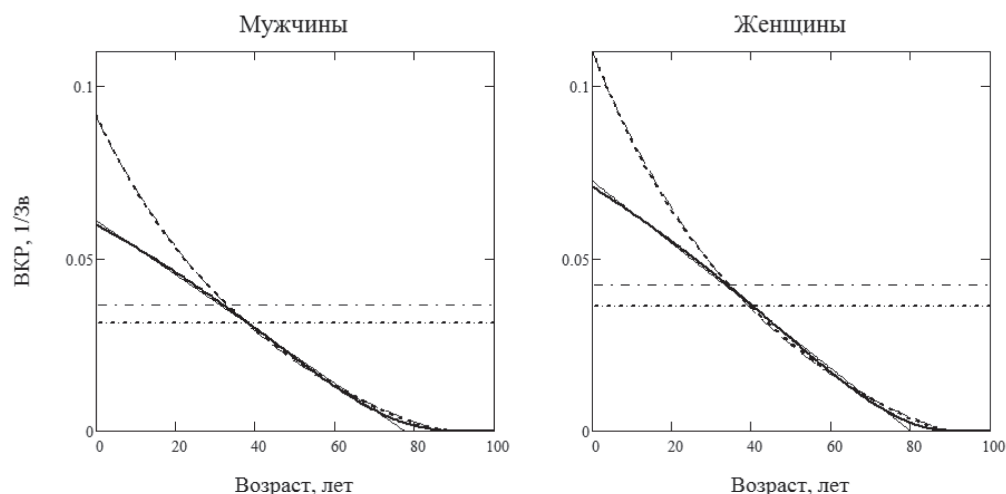
полученные по данным [1] (табл. А.4.12, А.4.13 и А.4.16, А.4.17). Значения ожидаемой продолжительности жизни при рождении, соответствующие таким  $\mu(t)$ , равны 76,2 и 81,4 лет для мужчин и женщин соответственно.

На рисунке 2 показаны зависимости ВКР для мужчин и женщин комбинированного населения МКРЗ от возраста, рассчитанные по формуле (5) с использованием моделей (18) и аппроксимаций (19). Рисунок выявляет значительные межполовые различия в эффективности облучения. Поскольку модели абсолютного риска для обоих полов в расчетах приняты одинаковыми, то эти различия связаны исключительно с различием функций дожития. Следовательно, существенным фактором, от которого зависит РР, является продолжительность жизни населения: для населения стран с более высокой средней продолжительностью жизни РР выше.



**Рис. 1.** Радиогенная компонента ИС мужчин от солидных раков после кратковременного облучения дозой 1 Зв в возрастах 0, 20, 40 и 60 лет, рассчитанная по моделям НКДАР (толстые линии) и МКРЗ (тонкие линии)





**Рис. 2.** Зависимость ВКР от возраста начала облучения для мужчин и женщин по моделям НКДАР (сплошные линии) и МКРЗ (пунктир). Толстыми линиями показаны результаты расчетов по формулам (5), (18) и (19), а тонкими – аппроксимации (20) и (21). Горизонтальные штрих-пунктирные линии показывают значения КНР для всего населения (указаны в тексте), рассчитанные с использованием ВКР

Рисунок 2 выявляет также достаточно быстрое уменьшение ВКР с увеличением возраста и заметные различия в характере возрастной зависимости для двух моделей: для модели НКДАР зависимости почти линейны, а для модели МКРЗ – близки к экспоненциальным. Пригодны следующие простые аппроксимации:

$$k_r(t_0) = \begin{cases} 0,061 \cdot (1 - 0,0129 \cdot t_0) & \text{по модели НКДАР} \\ 0,108 \cdot \exp(-0,0215 \cdot t_0) - 0,0168 & \text{по модели МКРЗ} \end{cases} \quad (20)$$

для мужчин и

$$k_r(t_0) = \begin{cases} 0,075 \cdot (1 - 0,0125 \cdot t_0) & \text{по модели НКДАР} \\ 0,129 \cdot \exp(-0,0216 \cdot t_0) - 0,019 & \text{по модели МКРЗ} \end{cases} \quad (21)$$

для женщин. (Три значащих цифры здесь отражают конкретные результаты расчётов и не характеризуют точность реальных значений ВКР.)

Использование полученных зависимостей  $k_r(t)$  в (14) вместе с рассчитанными по (19) функциями дожития и с вышеприведенными значениями продолжительности жизни для мужчин и женщин дает значения КНР (в 1/3v) для мужчин, женщин и всего населения 0,0312; 0,0361 и 0,0337 по модели НКДАР и 0,0366; 0,0423 и 0,0395 по модели МКРЗ соответственно. Последнее значение заметно меньше 0,0503 для смертности от солидных раков из таблицы А.4.2 в [1]. Это было ожидаемо, т.к. нами не ставилась цель достичь совпадения, и в связи с этим мы не применяли разработанную МКРЗ процедуру межпопуляционного переноса, основанную на комбинации аддитивной и мультипликативной моделей. Надо полагать, что эта процедура использовалась не только при оценке заболеваемости раками различной локализации [1], но и при оценке смертности от них в комбинированной популяции.

Что касается отклонения значений РР для кратковременного облучения, рассчитанных с помощью КНР, от значений, которые определяются ВКР, то оно, разумеется, зависит от возраста облучения. В случае кратковременного облучения в начале трудовой деятельности оценка РР по КНР, как видно из рисунка 2, примерно в 1,5

раза ниже, чем оценка с помощью ВКР, а в конце трудовой деятельности примерно в 2 раза выше. Здесь следует заметить, что оценку РР на момент начала и окончания трудовой деятельности с использованием ВКР, приведенного на рисунке 2, следовало бы поделить на значения функции дожития для соответствующих возрастов. Но она близка к единице и поэтому на указанные выше различия не влияет.

Итак, выполненные численные оценки показывают, что зависимость ВКР по смертности от солидных раков от возраста облучения имеет относительно простой вид, что облегчает введение и использование ВКР в нормативных документах по оценке РР. Но для этого необходимо, во-первых, принять пожизненный риск радиогенной смерти от солидных раков (или от всех раков) в качестве основного показателя вреда при регулировании облучения, а во-вторых, решить проблему межпопуляционного переноса рисков применительно к российскому населению.

### Основные результаты работы

1. Замена переменных в математическом алгоритме определения радиогенного риска (РР) позволила представить его в виде линейного функционала от возрастной зависимости мощности дозы с множителем, являющимся функцией возраста облучения, – возрастным коэффициентом риска (ВКР).

2. Разработан алгоритм определения с использованием ВКР пожизненного радиогенного риска, учитывающий неравномерность облучения во времени и возраст, по отношению к которому оценивается РР.

3. Численные расчёты с использованием аддитивной возрастно-зависимой модели риска смерти от солидных раков из Доклада НКДАР 2006 г. дали для ВКР зависимость, спадающую практически линейно до нуля в возрасте около 80 лет, а с использованием модели МКРЗ из Рекомендаций 2007 г. – спадающую экспоненциально.

4. Показано, что расчет РР путем умножения значения КНР, установленного в НРБ-99/2009, на эффективную

дозу будет давать совпадающие с результатами точных расчетов по ВКР значения РР только в случае приблизительно равномерного облучения.

5. Расчет по КНР для кратковременного облучения будет приводить примерно к 1,5-кратному занижению РР для начала периода трудовой деятельности лиц из персонала и примерно к 2-кратному его завышению в конце этого периода.

### Обсуждение результатов

Предложенный метод расчёта РР с использованием ВКР предоставляет дополнительные возможности оценки опасности облучения, по сравнению с методом, основанным на использовании КНР. Например, расчеты по ВКР позволяют получать оценки РР для определенных возрастов при облучении. В связи с сильной зависимостью ВКР от возраста это особенно актуально при оценке РР для планирования мероприятий по обеспечению радиационной безопасности в связи с аварийным или планируемым повышенным облучением, проживанием на загрязнённой территории и др. Такие задачи необходимо решать, в частности, в рамках ЕГАСКРО.

Оказалось, что расчеты по ВКР и по КНР приводят к примерно одинаковым результатам для практически важной ситуации протяженного облучения с приблизительно равномерных во времени. Однако при однократном облучении метод расчета по КНР приводит к существенным погрешностям: например, для персонала в начале трудовой деятельности он занижает, а в конце трудовой деятельности завышает РР в 1,5 и 2 раза соответственно.

Поскольку ВКР зависит от вида возраст-зависимых моделей (ВЗМ), то дополнительный смысл приобретает дальнейшее совершенствование таких моделей путем анализа постепенно возрастающего объема данных наблюдений за когортами облученных лиц. Временные параметры этих моделей различаются для раков различной локализации, и это важно не только с точки зрения оценки РР, но и для уточнения тканевых взвешивающих множителей, применяемых для расчета эффективной дозы.

Метод расчёта РР с помощью ВКР позволяет учесть тот факт, что к моменту после начала облучения часть РР реализована. Вследствие этого факта в случае неравномерного во времени профессионального облучения значение РР, рассчитанное по накопленной эффективной дозе для возраста окончания трудовой деятельности, больше значения, рассчитанного по такой же эффективной дозе для возраста начала трудовой деятельности. С применением ВКР становится очевиднее, что при использовании значения РР для принятия решений в целях радиационной безопасности целесообразно указывать возраст, к которому относятся оценки риска. Это важно также для решения задач по оценке РР в области страхования.

Использование ВКР позволяет напрямую рассчитывать РР для внутреннего облучения с учётом его временной динамики и избавиться таким образом от известной методической противоречивости применяемой процедуры суммирования эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения.

Данное обсуждение показывает, что включение ВКР в состав НРБ и последующее использование его в нормативно-методических документах более низкого уровня устранило бы некоторые несоответствия в отечественных

нормативно-методических документах и существенно упростило решение многих практических задач.

Однако для этого необходимо обосновать вид зависимостей функции дожития, т.е.  $Q(t)$ , и ВЗМ, т.е.  $\psi(t_0, t)$ , для российского населения, поскольку ими определяется ВКР (впрочем, как и КНР). Здесь важно то, что значения ВКР и КНР тем больше, чем больше продолжительность жизни населения, как показали результаты численных расчетов ВКР, выполненных с использованием демографических характеристик композитного населения и моделей риска, примененных МКРЗ в расчетах КНР. Для российского населения, продолжительность жизни которого заметно меньше, чем у композитного населения МКРЗ, значения КНР и РР также должны быть меньше. Поэтому целесообразно отказаться от практики прямого переноса рекомендаций МКРЗ в отечественные нормативные документы и решать задачи межпопуляционного переноса именно для российского населения.

Обоснование вида зависимости  $Q(t)$  предполагает достижение экспертного соглашения по поводу того, какой исторический период и (или) какой регион выбрать в качестве представительного для определения  $Q(t)$ . Для обоснования вида  $\psi(t_0, t)$  потребуется выбрать подходящие из международно-признанных моделей и проанализировать структуры заболеваемости и смертности российского населения в сопоставлении с принятыми в Рекомендациях МКРЗ. Решение этой задачи более наукоёмко и трудоёмко, но вполне осуществимо с учетом уже имеющихся моделей риска и методов межпопуляционного переноса рисков.

В заключение обсуждения необходимо обратить внимание на то, что предложенный метод ВКР оперирует понятием РР смерти от рака, в то время как КНР содержит риски заболевания раком и наследственных заболеваний, вызванных облучением. В связи с этим, на наш взгляд, заслуживает обсуждения сделанный МКРЗ выбор в отношении показателя вреда от облучения для принятия решений в целях радиационной безопасности. Представляется целесообразным в качестве такового выбрать РР, определяемый по дополнительной смертности от рака, так как он адекватен показателям вреда, применяемым для других вредных факторов и видов деятельности, и алгоритмически полностью определяем. Полный вред от облучения с учётом несмертельных радиогенных раков, других радиогенных заболеваний и наследственных эффектов можно рассчитывать, в случае необходимости, путём умножения риска смерти на соответствующий коэффициент. В этом случае проблема учёта полного вреда от облучения выносится за пределы метода определения РР в целях обоснования мер по обеспечению радиационной безопасности. Для реализации такого подхода потребуется только уменьшить на соответствующий коэффициент указанные в НРБ-99/2009 значения индивидуального пожизненного риска, по которым рассчитаны годовые пределы доз облучения персонала и населения, что несложно сделать, поскольку сами эти значения являются экспертным соглашением, имеющим косвенное научное обоснование.

### Литература

1. Рекомендации 2007 года Международной Комиссии по Радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ. под ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. – М.: ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.

2. О радиационной безопасности населения : федерал. Закон Рос. Федерации от 9 января 1996 г. №3-ФЗЖ: принят Гос. Думой Федер. Собрания Рос. Федерации 5 декабря 1995 г. Собр. законодательства Рос. Федерации, 1996. – № 3. – Ст. 141.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.758-99). – М.: Минздрав России, 1999. – 116 с.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09). – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
5. Порядок разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 28 января 1997 г. № 93).
6. 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.
7. 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.
8. Иванов, В.К. Оптимизация радиационной защиты: «Дозовая матрица»/ В.К. Иванов [и др. ]. – М.: Медицина, 2006. – 304 с.
9. 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.
10. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике (для инженеров и учащихся ВТУЗ'ов) / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – Изд. 3-е, перераб. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 608 с.
11. Рекомендации МКРЗ 1990 года. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – публ. 60, Ч.2. – 208 с.

**A.T. Gubin, V.A. Sakovich**

#### **Methodological problems of practical radiogenic risk estimations**

Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of FMBA of Russia, Moscow

*Abstract. Mathematical ratios were established according to the description of the calculation procedure for the values of the nominal risk coefficient given in the ICRP Recommendations 2007. It is shown that the lifetime radiogenic risk is a linear functional from the distribution of the dose in time with a multiplier descending with age. As a consequence, application of the nominal risk coefficient in the risk calculations is justified in the case when prolonged exposure is practically evenly distributed in time, and gives a significant deviation at a single exposure. When using the additive model of radiogenic risk proposed in the UNSCEAR Report 2006 for solid cancers, this factor is almost linearly decreasing with the age, which is convenient for its practical application.*

*Key words: radiogenic risk, nominal risk coefficient, age risk coefficient, radiogenic risk model.*

Губин А.Т.  
Тел. (499)1905131  
E-mail: ntc\_rhbg@fmbamail.ru

Поступила: 13.12. 2013 г.