

## Оптимизация радиационной защиты персонала с учетом ограничений обобщенного риска потенциального облучения

Иванов В.К.<sup>1</sup>, Евстратов Е.В.<sup>2</sup>, Чекин С.Ю.<sup>1</sup>, Казаков С.В.<sup>3</sup>, Меняйло А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России, Обнинск;

<sup>2</sup> Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва;

<sup>3</sup> ФГУП «Федеральный центр ядерной и радиационной безопасности», Москва

В связи с введением в России новых Норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009) в представленной работе впервые с использованием текущих отчетов НКДАР ООН, рекомендаций МКРЗ и стандартов МАГАТЭ рассматриваются основные вопросы оптимизации радиационной защиты для ситуаций потенциального облучения: формирование математических моделей радиационных рисков при профессиональном хроническом облучении и методы оценки базовых сценариев облучаемости персонала с учетом ограничений обобщенного риска потенциального облучения. Показано, что ограничения по годовому риску при наличии пределов доз приводят к необходимости оптимизации режимов облучения персонала во времени. При этом должны учитываться такие характеристики как пол, возраст, распределение дозы во времени, а также прогнозируемые для данного персонала показатели фоновой заболеваемости злокачественными новообразованиями и показатели смертности. Приведены примеры оценки нескольких сценариев облучения персонала с учетом российских данных. Показано, в частности, что облучение в дозах, близких к установленным НРБ-99/2009 пределам доз (20 мЗв/год в течение 5 последовательных лет), должно иметь ограничение по возрасту при облучении: для мужчин – с 25 лет и старше, для женщин – с 41 года и старше. Для анализа произвольных режимов облучения требуется развитие специализированного программно-математического обеспечения.

**Ключевые слова:** радиационная защита персонала, ограничения обобщенного риска, потенциальное облучение.

### Введение

В новых Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [3] введены возрастные ограничения для персонала, привлекаемого к работам в условиях планируемого повышенного облучения: «... планируемое повышенное облучение допускается для мужчин, как правило, старше 30 лет при их добровольном письменном согласии, после информирования о возможных дозах облучения и риска для здоровья». В новых НРБ-99/2009 также впервые введены граничные значения обобщенного риска потенциального облучения (для персонала –  $2 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>).

Эти требования приводят к необходимости решения задачи оптимизации радиационной защиты персонала с использованием текущих отчетов НКДАР ООН, рекомендаций МКРЗ и стандартов МАГАТЭ [4-9].

Важной практической задачей Госкорпорации «Росатом» является переработка и хранение ОЯТ и РАО. Эти проблемы накопились еще с советских времен и требуют зачастую нестандартных подходов их решения (например, решение оперативных вопросов по утилизации АПЛ).

В настоящее время в Госкорпорации «Росатом» завершается внедрение системы АРМИР, обеспечивающей оценку индивидуальных рисков существующего облучения персона-

Иванов В.К. – Председатель РНКРЗ, зам. директора по научной работе ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России; Евстратов Е.В. – зам. Генерального директора Госкорпорации «Росатом»; Чекин С.Ю.\* – ст. научн. сотр. ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России; Казаков С.В. – директор ФГУП «Федеральный центр ядерной и радиационной безопасности»; Меняйло А.Н. – аспирант, ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России.

\* Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (495) 956-94-12, (48439) 9-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

ла [2]. Вместе с тем, необходимость выполнения плановых мероприятий, связанных с ОЯТ и РАО, требует создания технологий радиационной защиты, ориентированных на рисковые критерии потенциального облучения.

В представленной работе впервые системно рассматриваются три основных вопроса оптимизации радиационной защиты потенциального облучения:

- формирование математических моделей оценки индивидуальных радиационных рисков при профессиональном хроническом облучении;
- создание интерактивной компьютерной системы для численного моделирования;
- рассмотрение базовых сценариев облучаемости персонала с учетом ограничений обобщенного риска потенциального облучения.

### Методы расчёта

Модели радиационных рисков смертности человека, как правило, построены на сравнении годовых показателей смертности от злокачественных новообразований в облучённой популяции с теми же показателями в той же популяции, но в отсутствие облучения. Под показателем смертности формально понимается отношение вероятности возникновения нового случая смерти в популяции или группе лиц за короткий период времени (например, за год – для злокачественных новообразований) к длительности этого периода, при условии, что на начало периода все рассматриваемые индивидуумы живы.

Разница между смертностью  $\lambda$  в облучённой популяции и фоновой (в отсутствие облучения) смертностью  $\lambda_0$  в этой же популяции называется избыточным абсолютным риском (excess absolute risk, EAR), а отношение  $EAR / \lambda_0$  – избыточным относительным риском (excess relative risk, ERR). Соответственно, смертность в облучённой популяции принято выражать либо аддитивной моделью избыточного абсолютного риска,  $\lambda = \lambda_0 + EAR$ , либо мультипликативной моделью относительного риска (relative risk, RR),  $\lambda = \lambda_0 \cdot RR = \lambda_0 \cdot (1 + ERR)$ . Величины  $EAR$  и  $ERR$  зависят от дозы облучения, и эта зависимость может модифицироваться такими факторами, как пол облучаемых лиц, их возраст при облучении, достигнутый возраст, время после облучения и др.

Научным комитетом по действию атомной радиации при ООН (НКДАР ООН, или UNSCEAR) в докладе 2000 г. [9] приведены модели радиационных рисков онкосмертности, построенные на основе исследования японской когорты лиц, переживших атомные бомбардировки (Life span study, LSS), за период наблюдения 1958-1987 гг.

Основная модель НКДАР 2000 г. для радиационного риска смертности от солидных раков выражается моделью относительного риска, в которой модификаторами избыточного относительного риска (ERR) являются пол и возраст при облучении ([9]: стр. 356, пар. 321):

$$ERR_{sol} (s, g, D) = \beta(s) \cdot D \cdot e^{\alpha \cdot (g - 30)}, \quad (1)$$

где  $s$  – категориальная переменная пола (мужской  $m$  или женский  $f$ );  $D$  – эквивалентная доза в Зв;  $g$  – возраст при облучении в годах;  $\beta(s)$  – удельный (на 1 Зв) избыточный относительный

риск от облучения в возрасте 30 лет:  $\beta(m)=0,38/3\text{в}$  для мужчин и  $\beta(f)=0,79/3\text{в}$  для женщин;  $\alpha=-0,04/\text{год}$ .

Избыточный абсолютный риск **EAR** в достигнутом возрасте **a** для заданного пола **s** получается домножением **ERR** на фоновый половозрастной показатель заболеваемости солидными раками для рассматриваемой популяции,  $\lambda_0(s,a)$ :

$$EAR_{SOL}(s, a, g, D) = \lambda_0(s, a) \cdot \beta(s) \cdot D \cdot e^{\alpha \cdot (g - 30)}, \text{ если } a \geq (g + LT_{SOL}), \quad (2)$$

$$EAR_{SOL} \equiv 0, \text{ если } a < (g + LT_{SOL}),$$

где  $LT_{SOL}=10$  лет – так называемый латентный период: дополнительные радиационно-индуцированные случаи злокачественных новообразований обнаруживаются по прошествии некоторого латентного периода времени **LT** после облучения; в данном случае для совокупности всех локализаций солидных раков в целом латентный период **LT** принимается равным 10-ти годам.

Модель радиационного риска по лейкозам не изменилась по сравнению с моделью НКДАР ООН 1994 г. ([8]: стр. 48, ф-ла 14) и представляется в аддитивной форме, с линейно-квадратичной зависимостью **EAR** от дозы:

$$EAR_{LQ}(s, t, g, D) = \beta(s, g) \cdot D(1 + 0,79 \cdot D) \cdot \exp(\alpha(s, g) \cdot (t - 25)), \text{ если } t \geq LT_{LQ}, \quad (3)$$

$$EAR_{LQ} \equiv 0, \text{ если } t < LT_{LQ},$$

где  $LT_{LQ}=2$  года – латентный период для лейкозов, **s** – категориальная переменная пола (мужской **m** или женский **f**); **D** – эквивалентная доза в Зв; **g** – возраст при облучении в годах; **t** – время в годах, прошедшее после облучения; достигнутый возраст **a** при этом равен  $a=g+t$ ; значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  приведены в таблице 1, где зависимость риска от возраста при облучении **g** аппроксимируется ступенчатой зависимостью.

Таблица 1  
Значения параметров избыточного абсолютного риска **EAR** заболеваемости лейкозами ([8]: стр. 48, ф-ла 14)

Возраст <b>g</b> , годы	Мужчины		Женщины	
	$\beta$ ( $10^{-5}$ Гр $^{-1}$ год $^{-1}$ )	$\alpha$ (год $^{-1}$ )	$\beta$ ( $10^{-5}$ Гр $^{-1}$ год $^{-1}$ )	$\alpha$ (год $^{-1}$ )
0-19	3,3	-0,17	6,6	-0,07
20-39	4,8	-0,13	9,7	-0,03
> 39	13,1	-0,07	26,4	0,03

В модели (3) избыточный абсолютный риск (**EAR**) лейкозов имеет размерность 1/100 тыс.чел.-лет. Модификаторами  $EAR_{LQ}$  являются пол, возраст на момент облучения **g** и время **t**, прошедшее после облучения. Радиационный риск лейкозов после облучения со временем уменьшается. Латентный период для радиационно-индуцированных лейкозов принят равным двум годам, и наибольший радиационный риск от однократного облучения прогнозируется сразу по истечении этого латентного периода.

В дальнейшем предполагается, что избыточные абсолютные риски аддитивны, как по различным локализациям злокачественных новообразований, так и по времени. Аддитивность рисков означает независимость соответствующих вероятностей возникновения заболеваний. Это предположение широко используется при математическом моделировании радиационных рисков, в частности, в докладах НКДАР ООН и Рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ, или ICRP).

Избыточный абсолютный риск злокачественных новообразований в целом практически полностью определяется суммой двух рисков:

$$EAR = EAR_{SOL} + EAR_{LQ}. \quad (4)$$

Кроме того, следует заметить, что, если облучение группы лиц произошло в возрасте  $g$ , то в дальнейшем, в достигнутом возрасте  $a$ , число новых случаев заболеваний следует рассчитывать только из той доли лиц от исходной численности группы в возрасте  $g$ , которая дожила до возраста  $a$ , оставаясь здоровой, т.е. используя вероятность здорового дожития от  $g$  до  $a$ . Для вычислений удобно использовать вероятность здорового дожития на интервале  $[0, a)$ , или функцию здорового дожития,  $S(s, a)$ , где  $s$  – категориальная переменная пола,  $a$  – достигнутый возраст в годах. При этом в возрасте облучения, естественно, здоровое дожитие по определению принимается равным единице: перенормировка этого дожития к единице в каждом возрасте облучения  $g$  даётся тривиальным выражением  $S(s, a|g) = S(s, a) / S(s, g)$ . Функцию  $S(s, a|g)$  в дальнейшем будем называть функцией здорового дожития от возраста  $g$  (для пола  $s$ ). Скорректированный с учётом функции  $S(s, a|g)$  избыточный абсолютный риск будем обозначать  $EAR^*$ :

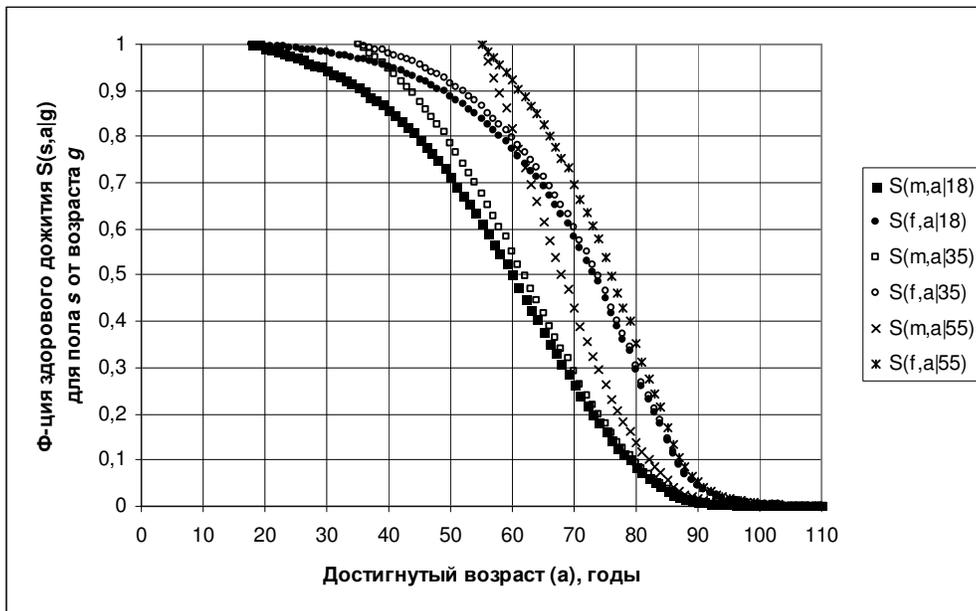
$$EAR^*(s, a | g, D) = \frac{S(s, a)}{S(s, g)} \cdot EAR(s, a | g, D) = S(s, a | g) \cdot EAR(s, a | g, D), \quad a \geq g, \quad (5)$$

Если  $EAR^*$  вычисляется, например, по заболеваемости злокачественными новообразованиями, то при вычислении функции здорового дожития  $S(s, a)$  должны учитываться показатели смертности от всех причин плюс показатели заболеваемости злокачественными новообразованиями, за вычетом смертности от злокачественных новообразований (случаи смерти учитываются в заболеваемости). В этом случае приближённо  $S(s, a)$  можно определить следующим образом:

$$S(s, a) = \exp\left(\sum_{i=0}^{i=a-1} \ln(1 - (p_0(s, i) - p_1(s, i) + p_2(s, i)))\right), \quad (6)$$

где  $s$  – категориальная переменная пола;  $i$  – возраст в целых годах;  $a$  – достигнутый возраст в целых годах,  $a \geq 1$ ;  $p_0(s, i)$  – вероятность смерти от всех причин в течение года в интервале возрастов  $[i, i+1)$ ;  $p_1(s, i)$  – вероятность смерти по причине злокачественных новообразований в течение года в интервале возрастов  $[i, i+1)$ ;  $p_2(s, i)$  – вероятность заболевания злокачественным новообразованием в течение года в интервале возрастов  $[i, i+1)$ .

Большинство научных комитетов, в частности, МКРЗ при обосновании пределов и ограничений в системе радиологической защиты [7], использует приближённую функцию  $S(s,a)$ , а именно – функцию здорового дожития для необлучённой (равновесной) популяции. Функции здорового дожития от возрастов  $g$ , равных 18, 35 и 55 лет,  $S(s,a|g)=S(s,a)/S(s,g)$ , рассчитанные по формуле (6) для необлучённой российской популяции по данным смертности и заболеваемости злокачественными новообразованиями в России за 2005 г. [1], приведены на рис. 1. Эти функции использовались в дальнейшем при вычислениях скорректированного избыточного абсолютного риска  $EAR^*$ .



**Рис. 1.** Функции здорового дожития для необлучённой российской популяции по данным смертности и заболеваемости в России за 2005 г. [1], для мужчин и женщин, от возраста 18 лет:  $S(m,a|18)$  – мужчины и  $S(f,a|18)$  – женщины; от возраста 35 лет:  $S(m,a|35)$  – мужчины и  $S(f,a|35)$  – женщины; и от возраста 55 лет:  $S(m,a|55)$  – мужчины и  $S(f,a|55)$  – женщины.

Для ситуаций хронического облучения, а так же для произвольных временных сценариев облучения, когда облучение дозами  $D_i$  происходит в возрастах  $g_i$ , где индекс  $i$  пробегает множество возрастов при облучении  $G$ , скорректированный избыточный абсолютный риск  $EAR^*$  в достигнутом возрасте  $a$  даётся следующим выражением:

$$EAR^*(s,a) = \sum_{i \in G} (S(s,a|g_i) \cdot EAR(s,a|g_i,D_i)), \tag{7}$$

или, согласно (4), выражая избыточный абсолютный риск злокачественных новообразований суммой рисков солидных раков и лейкозов:

$$EAR^*(s,a) = \sum_{i \in G} S(s,a|g_i) \cdot (EAR_{SOL}(s,a|g_i,D_i) + EAR_{LQ}(s,a|g_i,D_i)), \tag{8}$$

где функции  $EAR_{SOL}(\cdot)$ ,  $EAR_{LQ}(\cdot)$  и  $S(\cdot)$  задаются формулами (2), (3) и (6), соответственно.

Для расчёта радиационных рисков при хроническом и произвольных режимах облучения была разработана интерактивная программа, в которой у пользователя есть возможность задавать все необходимые для расчёта по формуле (8) данные. Пример пользовательского интерфейса для задания сценария облучения во времени приведён на рис. 2.

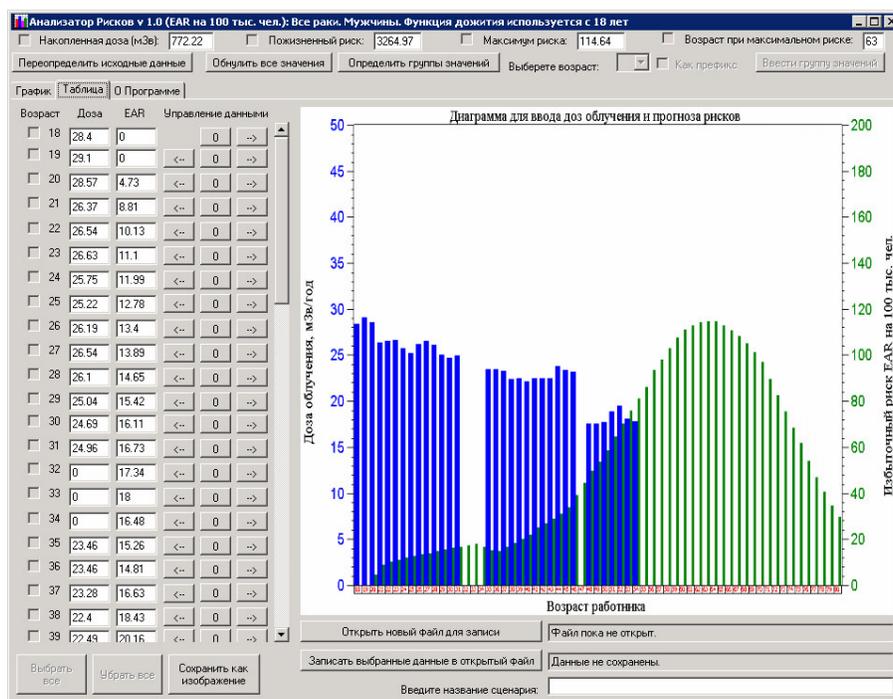


Рис. 2. Пример интерактивного пользовательского интерфейса разработанной программы расчёта радиационных рисков при произвольных временных режимах облучения.

При вводе повозрастных доз при помощи клавиатуры (слева на рис. 2) на графике справа отображаются введенные дозы и рассчитанные риски. Все вводимые и отображаемые данные можно сохранять в текстовом файле, или в формате электронных таблиц (MS Excel). Данная программа позволяет быстро создавать и анализировать различные сценарии облучения.

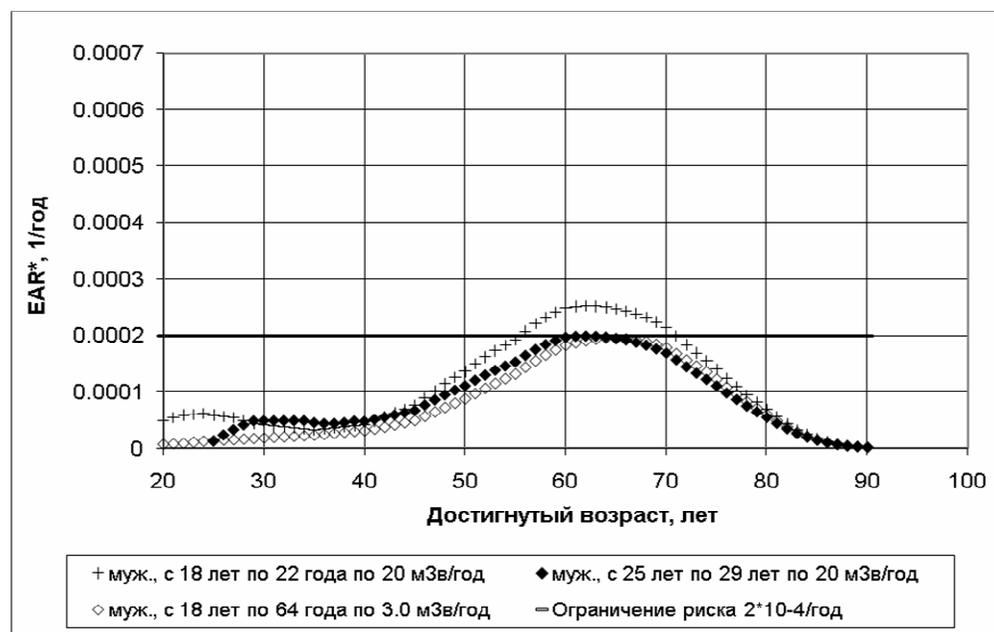
### Результаты и выводы

Расчёты некоторых представляющих интерес режимов облучения в соответствии с формулой (8) для мужчин и женщин представлены на рис. 3 (мужчины) и рис. 4 (женщины). В расчётах использованы показатели заболеваемости и смертности для населения России в 2005 г.

Согласно действующим в России НРБ-99/2009 [3] (таблица 3.1), с точки зрения пределов доз, для персонала допустимо облучение с эффективной дозой 20 мЗв в год за любые последовательные 5 лет. Упрощая ситуацию для расчётов, примем, что эффективная доза равна эквивалентной.

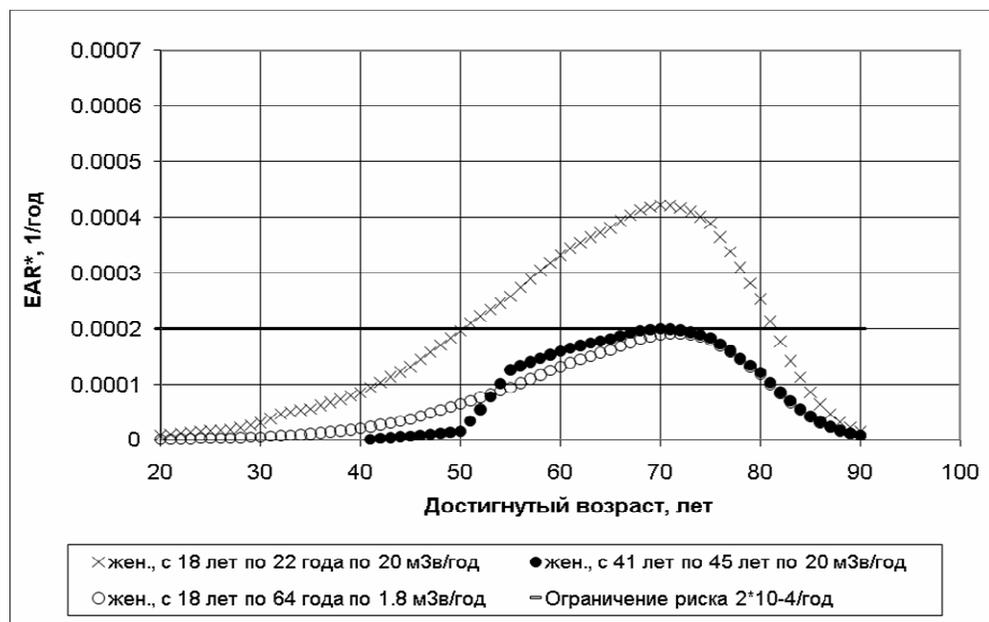
Рассмотрим данные, основанные на **показателях смертности**. Рис. 3 показывает, что облучение мужчин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет, начиная с возраста 18 лет, приводит в

дальнейшем к превышению годового риска  $2 \cdot 10^{-4}$ /год по смертности от злокачественных новообразований в диапазоне достигнутых возрастов от 56 до 70 лет. В то же время, если облучение мужчин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет начинается с возраста 25 лет, в течение всей оставшейся жизни избыточный абсолютный риск смертности  $EAR^*$  не превышает  $2 \cdot 10^{-4}$ /год. Так же в пределах  $2 \cdot 10^{-4}$ /год остаётся избыточный абсолютный риск смертности  $EAR^*$  при облучении с 18 до 64 лет дозой 3,0 мЗв/год. Заметим, что в последнем случае постоянного облучения суммарная накопленная доза составит 141 мЗв.



**Рис. 3.** Скорректированный избыточный абсолютный риск ( $EAR^*$ ) смертности от злокачественных новообразований в зависимости от достигнутого возраста, при разных режимах облучения мужчин (риски показаны после истечения двухлетнего латентного периода для лейкозов).

Рис. 4 показывает, что облучение женщин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет, начиная с возраста 18 лет, приводит в дальнейшем к превышению годового риска  $2 \cdot 10^{-4}$ /год по смертности от злокачественных новообразований в диапазоне достигнутых возрастов от 51 до 81 года. Если облучение женщин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет начинается с возраста 41 год, в течение всей оставшейся жизни избыточный абсолютный риск  $EAR^*$  не превышает  $2 \cdot 10^{-4}$ /год. Так же в пределах  $2 \cdot 10^{-4}$ /год остаётся избыточный абсолютный риск  $EAR^*$  при облучении женщин с 18 до 64 лет дозой 1,8 мЗв/год. Суммарная накопленная доза в последнем случае составит только около 85 мЗв.

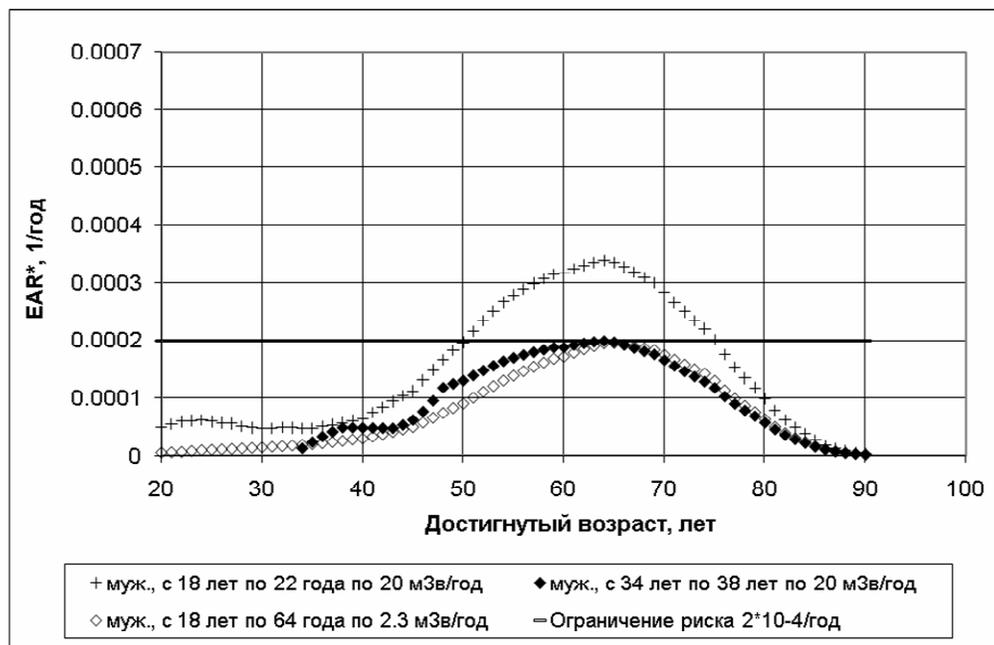


**Рис. 4.** Скорректированный избыточный абсолютный риск ( $EAR^*$ ) смертности от злокачественных новообразований в зависимости от достигнутого возраста, при разных режимах облучения женщин (риски показаны после истечения двухлетнего латентного периода для лейкозов).

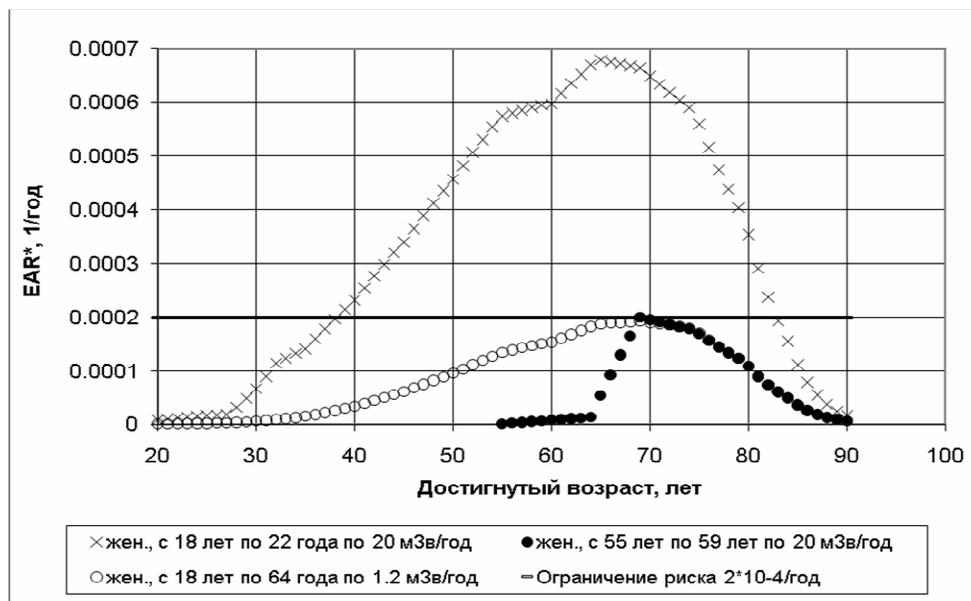
Рассмотрим теперь данные, основанные на **показателях заболеваемости**.

Рис. 5 показывает, что облучение мужчин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет, начиная с возраста 18 лет, приводит в дальнейшем к превышению годового риска  $2 \cdot 10^{-4}$ /год по заболеваемости злокачественными новообразованиями в диапазоне достигнутых возрастов от 51 года до 75 лет. В то же время, если облучение мужчин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет начинается с возраста 34 года, в течение всей оставшейся жизни избыточный абсолютный риск  $EAR^*$  не превышает  $2 \cdot 10^{-4}$ /год. Так же в пределах  $2 \cdot 10^{-4}$ /год остаётся избыточный абсолютный риск  $EAR^*$  при облучении с 18 до 64 лет дозой 2,3 мЗв/год. Заметим, что в последнем случае постоянного облучения суммарная накопленная доза составит более 108 мЗв.

Рис. 6 показывает, что облучение женщин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет, начиная с возраста 18 лет, приводит в дальнейшем к превышению годового риска  $2 \cdot 10^{-4}$ /год по заболеваемости злокачественными новообразованиями в диапазоне достигнутых возрастов от 39 до 82 лет. Если облучение женщин в дозе 20 мЗв/год в течение 5 лет начинается с возраста 55 лет, в течение всей оставшейся жизни избыточный абсолютный риск  $EAR^*$  не превышает  $2 \cdot 10^{-4}$ /год. Так же в пределах  $2 \cdot 10^{-4}$ /год остаётся избыточный абсолютный риск  $EAR^*$  при облучении женщин с 18 до 64 лет дозой 1,2 мЗв/год. Суммарная накопленная доза в последнем случае составит только 56 мЗв.



**Рис. 5.** Скорректированный избыточный абсолютный риск ( $EAR^*$ ) заболеваемости злокачественными новообразованиями в зависимости от достигнутого возраста, при разных режимах облучения мужчин (риски показаны после истечения двухлетнего латентного периода для лейкозов).



**Рис. 6.** Скорректированный избыточный абсолютный риск ( $EAR^*$ ) заболеваемости злокачественными новообразованиями в зависимости от достигнутого возраста, при разных режимах облучения женщин (риски показаны после истечения двухлетнего латентного периода для лейкозов).

Таким образом,

- ограничения по годовому риску при наличии пределов доз приводят к необходимости оптимизации режимов облучения персонала во времени;
- для оптимизации режимов облучения персонала следует учитывать такие характеристики, как пол, возраст, распределение дозы во времени, а также прогнозируемые для данного персонала показатели фоновой заболеваемости злокачественными новообразованиями и показатели смертности;
- согласно российским НРБ-99/2009 [3], допустимое для персонала облучение с эффективной дозой 20 мЗв/год за любые последовательные 5 лет, с учётом ограничения годового риска  $2 \cdot 10^{-4}$ /год должно иметь ограничение по возрасту при облучении: для мужчин – с 25 лет и старше, для женщин – с 41 года и старше (по данным, основанным на показателях смертности);
- для анализа произвольных режимов облучения требуется разработка и развитие специализированного программно-математического обеспечения.

### Литература

1. Злокачественные новообразования в России в 2005 году (заболеваемость и смертность) /Под ред. В.И.Чиссова, В.В.Старинского, Г.В.Петровой. М.: ФГУ МНИОИ им. П.А. Герцена, 2007. 252 с.
2. **Иванов В.К.** АРМИР – индивидуальные радиологические риски профессионального облучения. Буклет. ISBN 978-591706-010-1. М.: Общественный совет Госкорпорации «Росатом», 2009. 60 с.
3. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. Российская газета, № 171/1 (4995/1), 11.09.2009.
4. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimization of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101 //Annals of the ICRP. 2006. V. 36, N 3. 114 p.
5. Methods for estimating the probability of cancer from occupational radiation exposure. International Atomic Energy Agency (IAEA), April 1996. IAEA-TECDOC-870, 1996. 55 p.
6. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 //Annals of the ICRP. 1991. V. 21, N 1-3. 215 p.
7. The 2007 Recommendations of the ICRP //Annals of the ICRP. 2007. Publication 103. 332 p.
8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nation, 1994. 272 p.
9. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nation, 2000. 566 p.

## Optimization of radiation protection of professionals with an allowance for limits of integrated risk of potential exposure to radiation

Ivanov V.K.<sup>1</sup>, Evstratov E.V.<sup>2</sup>, Chekin S.Yu.<sup>1</sup>, Kazakov S.V.<sup>3</sup>, Menyailo A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Medical Radiological Research Center of the Russian Ministry of Health and Social Development, Obninsk;

<sup>2</sup> State Atomic Energy Corporation "Rosatom", Moscow;

<sup>3</sup> FSUE "Federal Center for Nuclear and Radiation Safety", Moscow

Basic issues on optimization of radiation protection in a case of potential exposure to radiation, such as design of mathematical models for an assessment of risks for occupational chronic exposure to radiation, methods for assessment of basic scenarios of occupational exposure with allowance for potential irradiation integrated risk limits are reviewed in the paper. Restrictions of annual risk if dose limits exist, require optimizing plan of exposure of professionals to radiation. In this case age, gender, temporal dose distribution, as well as expected baseline cancer incidence and mortality characteristic to specific groups of professionals should be taken into account. Examples of some scenarios of irradiation of nuclear workers adjusted to Russian data are given in the article. Radiation dose close to dose limits stated by National Radiation Standards-99/2009 (20 mSv/year during 5 consecutive years) should be restricted in accordance with the age of a person. The restrictions should be applied to men of  $\geq 25$  years old and women of  $\geq 41$  years old. To make analysis of cases of random irradiation a design of specialized software is required.

**Key words:** *radiation protection of personnel, restrictions of integrated risk, potential exposure.*

---

Ivanov V.K. – Chairman of RSCR, Deputy Director, MRRC; Evstratov E.V. – Deputy Director General, State Atomic Energy Corporation "Rosatom"; Chekin S.Yu.\* – Senior Researcher, MRRC; Kazakov S.V. – Director, FSUE "Federal Center for Nuclear and Radiation Safety"; Menyailo A.N. – Postgraduate Student, MRRC.

\* Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (495) 956-94-12, (48439) 9-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.