

УДК 629.58

А. Г. Трифонов, доктор технических наук, профессор (БГТУ);
Ю. Е. Крюк, кандидат биологических наук (ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси)

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ПЕРСОНАЛА АЭС

Проведен анализ современной организации радиационной защиты персонала. Показано, что сегодня на практике в ее основе лежит соблюдение принципа ограничения доз облучения, гарантирующего отсутствие детерминированных эффектов облучения, а применение принципа оптимизации, направленного на снижение существующих доз облучения и радиационного риска, требует, в том числе, рассмотрение методики оценки риска. Приведены расчеты и сделан вывод, что оценки риска позволят ранжировать работников по величине потенциальной опасности и обосновывать реализацию принципа оптимизации радиационной защиты.

The analysis of the modern organization of radiation protection was done. It is shown that at today's practice it is based on the principle of limiting radiation doses to guarantee the absence of deterministic effects of irradiation and the application of the principle of optimization aimed at reducing the existing dose and radiation risk, requires, inter alia, consideration of risk assessment methodologies. The calculations were done and concluded that the risk assessment will rank the employees in magnitude of the potential hazard and justify the implementation of the principle of optimization of radiation protection.

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь облучению постоянно подвергаются около 2000 человек в ходе их профессиональной деятельности, и это количество увеличится как минимум вдвое при эксплуатации АЭС.

Организация дозиметрического контроля преследует, прежде всего, цель не превышения предельно допустимой величины дозы облучения работника. В качестве предела дозы используют значение эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения персонала за счет нормальной эксплуатации радиационного объекта, в соответствии с НРБ–2000 [1] и ОСП–2002 [2].

В Беларуси, как и во всем Советском Союзе, до 1954 г. в качестве предела дозы была принята величина 300 мЗв. После первых данных об испытании ядерного оружия она была снижена в 2 раза. А в 1960 г. Международной Комиссией о Радиологической защите (МКРЗ) в качестве предела дозы была рекомендована величина в 50 мЗв. В 1991 г. выходит одна из самых известных публикаций МКРЗ – 60 публикация [3]. Новым рекомендованным пределом облучения персонала являлась величина 20 мЗв в год в среднем за 5 лет, но не более 50 мЗв в отдельно взятый год. Потребовалось почти 10 лет, для того чтобы в Республике Беларусь начал действовать этот предел. Это величина актуальна и сегодня [1, 2].

Однако, простого соблюдения пределов доз недостаточно для достижения приемлемого уровня защиты [3,4]. Пределы дозы представляют нижнюю границу области неприемлемых величин облучения. Их непревышение гарантирует отсутствие детерминированных эффектов облучения. На снижение вероятности возникновения стохастических эффектов направ-

лен другой принцип радиационной защиты – принцип оптимизации.

Согласно [3] никакие дозы не могут быть абсолютно безопасными. Поэтому, в основе радиационной защиты, наряду с использованием пределов доз облучения, постулируется принцип оптимизации, подразумевающий ограничение облучения не только по дозе, но и по вероятности ущерба здоровью человека с учетом существующих экономических и социальных факторов [1, 3].

Целью данной статьи является рассмотрение возможности использования концепции радиационного риска как инструмента для организации индивидуализированного подхода к организации радиационной защиты персонала АЭС.

Материалы и методы. События прошлого века, связанные с авариями и военным использованием источников ионизирующего излучения дали мощный толчок к развитию научных исследований в области радиационной безопасности.

Основываясь на полученных результатах, Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) предложил модели по оценке радиационного риска [5], а Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) распространило новые технологии для оценки риска в ситуации профессионального облучения [6].

В основе модели НКДАР ООН лежит определение величины радиационного риска с использованием рекомендованных МКРЗ форм – аддитивной и мультипликативной [3].

Согласно аддитивной модели определяется вызванная облучением абсолютная величина превышения числа наблюдаемых случаев заболеваний (m) над ожидаемым (m_0):

$$m = m_0 + \text{EAR}, \quad (1)$$

где EAR – абсолютное превышение числа наблюдаемых случаев над ожидаемым, или избыточный абсолютный риск.

Мультипликативная форма зависимости между наблюдаемым и ожидаемым числом случаев может быть выражена через относительное превышение числа заболеваний:

$$m = m_0 \cdot (1 + \text{ERR}) \quad (2)$$

где ERR – относительное превышение числа наблюдаемых случаев над ожидаемым, или избыточный относительный риск.

В общем случае избыточные риски ERR и EAR зависят от дозы облучения, возраста при облучении, текущего возраста и пола. Зависимости (1) и (2) можно преобразовать к виду:

$$\text{EAR} = m - m_0; \quad (4)$$

$$\text{ERR} = (m - m_0)/m_0. \quad (4)$$

Объединив (3) и (4), можно легко установить связь между величинами, характеризующими превышение естественного уровня заболеваемости:

$$\text{EAR} = m_0 \cdot \text{ERR}. \quad (5)$$

Для определения доли случаев, вызванных радиационным воздействием, от общего числа случаев заболеваний вводят понятие атрибутивного (обусловленного) риска – AR:

$$\text{AR} = (m - m_0)/m = \text{EAR}/m \quad (6)$$

или

$$\text{AR} = \text{ERR} / (1 + \text{ERR}). \quad (7)$$

Для конкретного облученного человека индивидуальное значение атрибутивного риска рассматривается как относительный вклад радиации в риск возможного ущерба здоровью от всех составляющих. Именно такой подход рекомендован МАГАТЭ и учитывается при организации радиационной безопасности работников в ряде стран [1].

С учетом поставленной задачи оценки риска профессионального облучения в нормальных условиях в данном исследовании рассматривается модель оценки риска реализации солидных раков, представляющих собой один из основных эффектов воздействия ионизирующего излучения на человека.

Согласно рассматриваемой модели радиационно-обусловленный риск при остром кратковременном облучении, приводящий к реализации всех типов солидных раков, в виде избыточного относительного риска ERR представляется следующим образом:

$$\text{ERR}(D, g, s) = a \cdot D \cdot \exp(b \cdot (g - 25)), \quad (8)$$

где D – доза облучения, Зв; g – возраст на момент облучения; s – пол. Коэффициенты a и b являются эмпирическими параметрами риска и служат для обеспечения функциональной связи в модели. Численные значения параметров зависят от пола и типа заболевания [5].

Представленная зависимость характеризует избыточный относительный риск при однократном облучении достаточно существенными дозами и может быть использована при оценке риска для аварийной ситуации.

В нормальных условиях в ходе практической деятельности с источниками ионизирующего излучения работники подвергаются пролонгированному облучению относительно малыми дозами в течение длительного времени. В этом случае, согласно рекомендациям МАГАТЭ, при многократном облучении риски от ежегодного облучения должны суммироваться с учетом дозы и возраста при облучении.

Для описания изменения избыточного относительного риска при пролонгированном облучении необходимо использовать величину, характеризующую дозу облучения во времени. Для этих целей используют величину мощности дозы (w) – доза облучения работника в единицу времени. Как и сама доза, мощность дозы зависит от возраста на момент облучения.

Величина дозы за малый промежуток времени (Δu) может быть оценена как

$$\Delta D = w \cdot \Delta u. \quad (9)$$

В случае облучения, приводящего к реализации стохастических эффектов, развитие болезни начинается не сразу, а спустя некоторое время после облучения. Этот промежуток носит название скрытого или латентного периода T . Следовательно, возраст работника на момент обнаружения ущерба здоровью (u) можно представить как сумму возраста на момент облучения (g) и времени латентного периода (T).

С учетом вышесказанного приращение избыточного относительного риска ΔERR от дозы ΔD реализуется спустя латентный период T в возрасте на момент облучения $g = u - T$ и составит с учетом (8):

$$\Delta \text{ERR}(u) = a \cdot \Delta D(u - T) \cdot \exp(b \cdot (u - T - 25)). \quad (10)$$

Переходя к мощности дозы w , выражение (10) можно представить в следующем виде:

$$\Delta \text{ERR}(u) = a \cdot w \cdot \Delta u \cdot \exp(b \cdot (u - T - 25)). \quad (11)$$

Преобразуем полученное выражение (11), разделив обе части на Δu :

$$\frac{\Delta \text{ERR}(u)}{\Delta u} = a \cdot w \cdot \exp(b \cdot (u - T - 25)). \quad (12)$$

При $\Delta u \rightarrow 0$ из выражения (12) получаем уравнение для изменения риска с возрастом (или со временем):

$$\frac{dERR(u)}{du} = a \cdot w \cdot \exp(b \cdot (u - T - 25)), \quad (13)$$

где $u > g_0 + T$; g_0 – возраст, при котором работник подвергся облучению впервые. Таким образом, полученное изменение индивидуального избыточного относительного риска с возрастом описывается дифференциальным уравнением с запаздывающим параметром (латентный период – T). Согласно определению латентного периода для солидных раков он принимается равным 10 годам.

Как видно из последнего выражения (13), изменение ERR в возрасте u происходит за счет облучения в возрасте $u - T$ при мощности w с весом $\exp(b \cdot (u - T - 25))$.

Вследствие того, что возраст на момент облучения можно выразить через возраст на момент проявления эффекта и прошедшего латентного периода, уравнение (13) преобразуется и с учетом замены ($g = u - T$) интегрируется:

$$ERR(u) = a \cdot \int_{g_0}^{u-T} (w(g) \cdot \exp(b \cdot (g - 25))) dg. \quad (14)$$

Таким образом, интеграл (14) дает значение избыточного относительного риска для работника в возрасте u .

При применении полученного выражения для оценки индивидуального радиационного риска при профессиональном облучении в нормальных условиях естественно допустить, что мощность дозы с течением времени на рабочем месте существенным изменениям не подвергается. Тогда, если принять, что мощность дозы не зависит от времени, то, взяв интеграл (14), получаем выражение для оценки избыточного относительного риска следующего вида:

$$ERR(u) = \frac{a \cdot w}{b} \times (\exp(b \cdot (u - T - 25)) - \exp(b \cdot (g_0 - 25))). \quad (15)$$

Полученная зависимость позволяет сделать вывод, что при постоянном облучении избыточный риск ERR экспоненциально растет с возрастом.

В предельном случае кратковременного облучения в возрасте g_1 мощность дозы можно представить в виде дельта функции, где D – доза облучения:

$$w = D(\delta(g - g_1)). \quad (16)$$

С учетом (16) выражение для оценки избыточного относительного риска в предельном

случае острого однократного облучения в возрасте g_1 дозой D будет иметь следующий вид:

$$ERR(u) = a \cdot D \cdot \exp(b \cdot (g_1 - 25)), \quad (17)$$

где $u > g_1 + T$. Таким образом, уравнение (14), в случае применения для ситуации однократного острого облучения имеет вид модели (8), рекомендованной НКДАР ООН для оценки вероятности реализации солидных раков. Следовательно, согласно рекомендации МАГАТЭ данный подход может быть использован для пролонгированного облучения малыми дозами, что допускает использование данной модели для оценки радиационной безопасности при работе с источником в нормальных условиях.

Специфика организации радиационной защиты профессионального облучения состоит, прежде всего, в проведении текущего мониторинга доз облучения [1, 2]. Следовательно, в каждый определенный момент времени индивидуальное значение дозы облучения является известной величиной. В таком случае согласно формуле (14) можно дать прогноз риска на T лет вперед, когда возраст работника будет равен $u + T$ годам:

$$ERR(u + T) = a \cdot \int_{g_0}^u (w(g) \cdot \exp(b \cdot (g - 25))) dg. \quad (18)$$

Режим облучения каждого работника в процессе профессиональной деятельности индивидуален, следовательно, и функциональная зависимость мощности дозы от возраста в каждом случае будет уникальна. Тогда для численной оценки индивидуального риска интегрирование уравнений (14) и (18) можно осуществить численным методом. С дискретным шагом по возрасту в 1 год интегралы (14) и (18) представляются в виде сумм следующим образом:

$$ERR(u) = a \cdot \sum_{g=g_0}^{g=u-T} D \cdot \exp(b \cdot (g - 25)); \quad (19)$$

$$ERR(u + T) = a \cdot \sum_{g=g_0}^{g=u} D \cdot \exp(b \cdot (g - 25)), \quad (20)$$

где g_0, g, u – дискретные величины с шагом в 1 год; D_g – годовая доза облучения, полученная в возрасте g .

Таким образом, для расчета и прогноза индивидуального избыточного относительного риска ERR необходимо для конкретного работника составить матрицу значений, включающих дозу облучения, текущий возраст и возраст на момент облучения. Использование составленной матрицы позволит выполнять оценку полного риска ERR заболевания солидными раками на текущий момент (уравнение (19)) и для прогноза (уравнение (20)).

Как уже отмечалось выше, в основе вероятностных оценок индивидуальной безопасности при работе с источником ионизирующей радиации лежит величина индивидуального атрибутивного риска $AR(u)$. С учетом найденного значения полного риска $ERR(u)$ значение атрибутивного риска в процентном выражении может быть получено по формуле

$$AR = \frac{ERR}{1 + ERR} \cdot 100\%. \quad (21)$$

Таким образом, использование представленной модели позволяет проводить оценку радиационно-обусловленного риска при профессиональном облучении на индивидуальном уровне.

Результаты и обсуждение. Для изучения влияния величины дозы облучения на вероятность ущерба здоровью используем описанную методику индивидуального риска для оценки возможного вклада профессионального облучения в реализацию всех типов рака у двух работников АЭС мужского пола, проработавших двадцать лет на предприятии в возрасте с 25 до 45 лет с годовой дозой облучения соответственно 15 и 5 мЗв. Оба значения ниже установленных в нашей стране пределов доз облучения и, следовательно, могут иметь место в процессе нормальной эксплуатации АЭС. Так как латентный период для солидных раков составляет десять лет, то согласно (15)–(21) вероятностный вклад в развитие заболевания после 55 лет для первого работника составит почти 20%, а второго чуть более 5%. Следовательно, равные с точки зрения действующих республиканских нормативов дозы облучения (оба значения ниже установленного предела) имеют заметные различия в величине возможного ущерба здоровью.

Выводы. Радиационная защита персонала сегодня построена на соблюдении непревышения предельно допустимой величины дозы. Однако полученные ниже предела дозы облучения не обеспечивают равновероятностную радиационную безопасность для разных работников.

Использование международных моделей оценки радиационного риска дает возможность оценивать индивидуальный радиационно-обусловленный риск при работе в условиях облучения. Индивидуальные оценки риска позволяют ранжировать работников по величине потенциальной опасности и обосновывать реализацию принципа оптимизации радиационной защиты.

Литература

1. Нормы радиационной безопасности: НРБ–2000. – Минск, 2000. – 115 с.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности: ОСП–2002. – Минск, 2002. – 98 с.
3. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection / Annals of the ICRP Publication; ed. J. Valentin [et al.]. – Oxford: Elsevier, 1991. – No. 60. – P. 201.
4. Recommendations of the international commission on Radiological Protection / Annals of the ICRP Publication; ed. J. Valentin [et al.]. – Oxford: Elsevier, 2007. – No. 103. – P. 332.
5. Effects and Risk of Ionizing Radiation: Report to the General Assembly / United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – New York: UN, 1994. – 272 p.
6. IAEA TECDOC. Methods for estimating the probability of cancer from occupational radiation exposure: TECDOC-870. – Vienna: IAEA, 1996. – 55 p.

Поступила 02.03.2011