

УДК 614.876

## СТОИМОСТЬ ПРЕДОТВРАЩЕННОЙ ДОЗЫ В РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЕ И АВАРИЙНОМ РЕАГИРОВАНИИ

Крюк Ю.Е., к.б.н.

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований «Сосны» НАН Беларуси  
e-mail: yu.kruk@gmail.com

*Для поддержки принятия решений по оправданности и оптимизации мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на радиационно-опасных объектах рассмотрена модель стоимостной оценки предотвращенной дозы. Для денежного выражения вероятности потерянных лет жизни в результате возможной реализации чрезвычайной ситуации предложено использование методики стоимости жизни по оценке самого человека, что позволяет учесть существующие в обществе экономические и социальные ограничения.*

*The averted dose monetary value model is considered as a part of decision-making support for justification and optimization of consequences prevention and liquidation activity on radiation-dangerous objects in emergency situation. The use of the life-price methods by man's own assessment is offered for monetary value of life reduction probability in potential emergency situation that allows taking into account the economical and social limits.*

(Поступила в редакцию 22 июня 2009 г.)

### Введение

Результативность предупреждения чрезвычайных ситуаций на радиационно-опасных объектах гарантируется эффективностью организации радиационной защиты персонала и населения, уровнем безопасности источника, а также средствами обеспечения такой защиты и безопасности, включая средства предотвращения аварий и смягчения последствий аварий в случае, если они происходят.

Для установления принципов радиационной защиты и безопасности определены два типа ситуаций: практическая деятельность и вмешательства [1]. Практическая деятельность – это такая деятельность человека, которая дополнительно увеличивает облучение, обычно получаемое людьми от существующих радиационных источников, или повышает вероятность получения ими облучения. Вмешательства – это деятельность человека, которая направлена на снижение существующего радиационного облучения или вероятности подвергнуться облучению; она не является частью контролируемой практической деятельности. В практической деятельности меры радиационной защиты и безопасности могут быть приняты до ее начала, и сопутствующее воздействие излучения, а также его вероятность могут быть изначально ограничены. В случае вмешательства обстоятельства, вызывающие облучение или создающие вероятность его возникновения, уже существуют и смягчение их влияния может быть достигнуто только за счет проведения защитных действий или принятия восстановительных мер.

При обосновании приемлемого уровня защиты и безопасности при планируемой или существующей ситуации облучения, а также для оценки предотвращенного ущерба, размера компенсаций и материальной помощи пострадавшим в случае аварии встает вопрос эффективности распределения ограниченных ресурсов. Выделение дополнительных средств на нейтрализацию опасных радиационных факторов и минимизацию радиационных рисков неизбежно приводит к необходимости оценки оправданности возрастающих затрат.

### Постановка задачи

Первичной целью радиационной безопасности является обеспечение людей приемлемыми нормами безопасности без чрезмерного ограничения полезной практической деятельности,

приводящей к увеличению облучения [1]. Поставленная цель должна реализовываться посредством трех основных принципов радиационной безопасности: оправданности, ограниченности по дозе и риску и оптимизации.

Для практической деятельности принцип оправданности означает, что получаемая польза для облучаемых лиц или общества в целом не должна превышать связанный с облучением ущерб. В ситуации вмешательства уменьшение ущерба в результате проводимых мероприятий должно быть достаточным, чтоб оправдать затраты на него, включая социальные затраты.

Принцип ограничения доз облучения (предел дозы) и величины потенциальных рисков гарантирует исключение появления детерминированных эффектов, связанных с дозой облучения. Поскольку для детерминированных эффектов существуют пороги, то этих эффектов можно избежать, ограничив дозы облучения. Данный принцип основан на применении строгого контроля над величиной облучения и неприменим в ситуации вмешательства.

Принцип оптимизации в практической деятельности требует снижения индивидуальных доз, числа облучаемых лиц и потенциальных рисков так низко, как это разумно достижимо с учетом экономических и социальных факторов. Оптимизация вмешательства предусматривает получение максимальной экономической и социальной пользы от уменьшения дозы облучения.

Следовательно, реализация главных принципов радиационной безопасности, гарантирующих эффективность предупреждения чрезвычайных ситуаций на радиационно-опасных объектах, основывается на оценке ущерба от вредного воздействия радиации с учетом экономической и социальной составляющих.

Согласно новейшим международным подходам [2,3], рассматривающим ущерб от облучения как ущерб здоровью, ключевым элементом в оценке радиационного ущерба является определение стоимости единицы дозы, предотвращенной или сэкономленной в результате проведения защитных мероприятий.

## Результаты и обсуждение

При организации радиационной защиты для предупреждения радиационного ущерба или ликвидации его последствий в ситуации вмешательства неизбежно встает вопрос: как наилучшим образом распорядиться имеющимися ресурсами.

Для оказания помощи при принятии решений в условиях ограниченности ресурсов, имеющихся для целей защиты и безопасности, и снижающейся эффективности капиталовложений в защиту был разработан экономический инструментальный метод, предусматривающий использование денежной стоимости единицы коллективной эффективной дозы [2].

Эффективная доза является центральной интегральной дозиметрической величиной в радиационной защите и используется для оценки риска возникновения ущерба здоровью и его тяжести. Понятие коллективной эффективной дозы применяется для оценки суммарного ущерба, связанного со стохастическими последствиями (раковые заболевания, наследственные эффекты) в случае облучения населения и персонала.

Возникновение стохастических эффектов в результате облучения носит вероятностный характер, и вероятность их появления в конкретной облученной группе возрастает с увеличением дозы, а тяжесть протекания от дозы не зависит [1]. Тяжесть последствий облучения характеризуется приписанной вероятностью смерти или реализации наследственных эффектов, а также числом потерянных лет жизни, обусловленных приписанной смертью и появлением несмертельных случаев, приведенных по вреду к последствиям смертельных.

Следовательно, для оценки единицы ущерба по радиационному фактору на каждую единицу эффективной дозы приписывается вероятность реализации смертельных (или приведенных по вреду к таковым) случаев рака – номинальный коэффициент вероятности смерти  $r_e$ . Среднее уменьшение ожидаемой продолжительности жизни, связанное с радиационно-

индуцированным стохастическим последствием для здоровья (летальные раковые заболевания и наследственные эффекты), принимается равным 15 годам [4]. Для денежного выражения радиационного ущерба единице эффективной дозы необходимо приписать стоимость года жизни человека, потерянного в результате реализации стохастического эффекта.

Для оценки уменьшения ожидаемой продолжительности жизни наиболее часто используется подход, основанный на понятии человеческого капитала [5]. В рамках данного подхода денежная стоимость одного года потерянной жизни задается совокупной экономической величиной, обычно душевым годовым валовым внутренним продуктом. При этом, по существу, оценивается не человек как таковой, а его экономические возможности. Односторонне рассматривая человека только в качестве производительной силы, такая оценка учитывает лишь экономические факторы и полностью исключает требование к социальной составляющей. Согласно такому подходу человек представлен как инструмент получения дохода от реализации его деятельности. Следовательно, средства, выделяемые на предупреждение развития или ликвидацию последствий радиационной аварии, будут соответствовать не человеку как таковому, а инструменту, приносящему доход в результате осуществления практической деятельности.

Однако люди живут не для того, чтобы производить материальные блага – они производят материальные блага для того, чтобы жить. Не хозяйственные потери определяют общественную потерю при гибели человека. Прежде всего, человек сам сознательно или бессознательно дает оценку своей жизни. Субъективность такой оценки все чаще реализуется посредством методик оценки денежной стоимости жизни с точки зрения самого человека [6].

Первые практически применимые методики расчета ценности жизни человека с точки зрения самого человека, подвергаемого риску гибели в чрезвычайных ситуациях, появились в США еще в середине 60-х годов прошлого столетия [7]. Основная идея, взятая в качестве исходного положения, заключается в следующем: соглашаясь на опасную или сложную работу, люди требуют повышенную зарплату, а за снижение риска для своей жизни они вынуждены платить.

В работе [6] эта идея формализована математически и со ссылкой на постулат Неймана–Моргенштерна выводится, что человек своим экономическим и физически опасным (безопасным) для жизни поведением оценивает свою жизнь следующим образом:

$$E(t) = I_a / P_y, \quad (1)$$

где  $E(t)$  – экономический эквивалент жизни среднестатистического человека в среднем возрасте  $t$ ;

$I_a$  – среднедушевой денежный годовой доход;

$P_y$  – средняя вероятность смерти за один год.

Средняя вероятность смерти за один год представляет собой, так называемый фоновый риск смерти людей (вероятность наступления смерти от любой причины). В демографии этот показатель называется коэффициентом смертности  $K_m$  с учетом всех причин смерти людей. С учетом того, что  $P_y = K_m$ , формулу (1) можно преобразовать:

$$E(t) = I_a / K_m. \quad (2)$$

Коэффициент смертности  $K_m$  можно представить как отношение числа людей, умерших в стране в данном году от всех причин смерти ( $N_m$ ), к среднегодовой численности населения страны ( $S_p$ ):

$$K_m = N_m / S_p. \quad (3)$$

Тогда стоимость человеческой жизни в случае смерти в возрасте  $T$  можно определить выражением

$$E(t) = I_a S_p / N_m. \quad (4)$$

Экономический эквивалент жизни среднестатистического человека представляет собой интегральный показатель среднедушевых денежных годовых доходов населения в расчете на одного умершего.

Ранжировать экономический эквивалент жизни для различных возрастных групп можно за счет использования возраст-специфического коэффициента смертности. В ситуации применения показателя для конкретной категории работников и использования характерной величины душевого денежного дохода данная величина может рассматриваться как готовность нести затраты, связанные с риском работ в данной области. Однако для населения подход с использованием категорий не применим: защищать необходимо всех, в том числе людей пенсионного возраста и детей.

Рассчитанный таким образом экономический эквивалент жизни человека будет косвенно отражать готовность общества платить за снижение риска опасных работ, повышение уровня и продолжительности жизни отдельного человека.

Основным допущением в определении денежной стоимости единицы коллективной дозы является согласие с беспороговой линейной концепцией, согласно которой частота появления стохастических эффектов напрямую зависит от величины дозы. В этом случае признается, что любой величине дозы облучения соответствует некий потенциальный риск ущерба здоровью. Представляя ущерб здоровью  $H$  в виде уменьшения ожидаемой продолжительности жизни, можно оценить его стоимость в денежном выражении как произведение стоимости одного года жизни на ожидаемое число потерянных в результате ущерба лет ( $T$ ):

$$H = E(A - t)T, \quad (5)$$

где  $E \cdot (A - t)$  – экономический эквивалент одного года жизни среднестатистического жителя в возрасте  $t$ .

Денежный эквивалент одного года жизни можно найти из выражения (4) следующим образом:

$$E(A - t) = E(t)/(A - t), \quad (6)$$

где  $A$  – средняя продолжительность жизни в стране.

В таком случае денежную стоимость единицы коллективной дозы можно представить как произведение вероятности возникновения последствия для здоровья, связанного с коллективной дозой в один человеко-зиверт, на денежную стоимость данного последствия для здоровья. С учетом (4), (5) и (6) денежная стоимость единицы коллективной дозы ( $\alpha$ ) оценивается следующим образом:

$$\alpha = (I_a \cdot S_p / N_m \cdot (A - t))r_e T. \quad (7)$$

По данным Национального статистического комитета Республики Беларусь по предварительным данным в 2008 году:

- численность населения составляла 9 671 тыс. человек;
- денежные доходы на душу населения в год 7 887 тыс. руб. (3 668 долларов США);
- средняя продолжительность жизни – 69 лет;
- средний возраст жителей – около 40 лет;
- суммарное число людей, умерших в течение года – 132 993 человека.

Согласно действующим Нормам радиационной безопасности (НРБ-2000) номинальный коэффициент вероятности смерти в результате облучения для населения равен  $7,3 \cdot 10^{-2} \text{Зв}^{-1}$ , среднее уменьшение ожидаемой продолжительности жизни, связанное с радиационно-индуцированным эффектом, – 15 лет.

Подставляя приведенную информацию в (7), легко найти значение  $\alpha$  – оно составляет 10 071,36 долларов США на человеко-зиверт.

Стоимость предотвращенной дозы при осуществлении радиационной защиты или форм вмешательства рассчитывается простым произведением сэкономленной в результате проведенных мероприятий коллективной эффективной дозы на величину  $\alpha$ :

$$Y(D) = \alpha(D_0 - D_i), \quad (8)$$

где  $Y(D)$  – стоимость предотвращенной дозы;

$D_0$  – коллективная эффективная доза без учета мероприятий по предупреждению радиационного облучения и/или ликвидации последствий;

$D_i$  – коллективная эффективная доза, которая достигнута или может быть достигнута в ходе осуществления мероприятий по предупреждению и/или ликвидации.

Соотнесение затрат на предупреждение чрезвычайной ситуации или ликвидацию последствий со стоимостью предотвращенной (сэкономленной) в результате осуществляемых или планируемых мероприятий дозы даст возможность оценить оправданность и оптимизированность применения конкретного варианта защиты или вмешательства.

### Заключение

В ходе принятия решений по реализации основных принципов радиационной безопасности, гарантирующих эффективность предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на радиационно-опасных объектах, встает необходимость проведения стоимостной оценки предотвращенной дозы. Использование методики оценки денежной стоимости жизни с точки зрения самого человека для стоимостного выражения предотвращенной дозы позволит в процессе принятия решений учитывать существующие экономические и социальные ограничения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60. – Oxford : Pergamon Press, 1991. – 201 p.
2. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological: ICRP Publication 103. – Oxford : Elsevier, 2007. – 332 p.
3. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimization of radiological protection: ICRP Publication 101. – Oxford : Elsevier, 2006. – 104 p.
4. Нормы радиационной безопасности : НРБ-2000. – Минск, 2000. – 115 с.
5. Оптимизация радиационной защиты при контроле облучения персонала : серия докладов по безопасности № 21. – Вена : МАГАТЭ, 2003. – 81 с.
6. Стоимость жизни. Эквивалент стоимости человеческой жизни / И.Л. Турнов, Л.К. Айвар, Г.Х. Харисов // Представительная власть. – 2006. – № 3 (69). – С. 24–29.
7. Civil Aviation Expenditures/ G. Fromm, R. Dorman // Measuring Benefits of Government Investments. – 1965. – 152 p.