А.В.Кружалов, М.В.Жуковский
Уральский технический университет, г. Екатеринбург
А.В.Павлюк
Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург

УДК 615.849.9

АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ АТОМНОГО КОМПЛЕКСА УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Показано, что оптимальными параметрами, позволяющими производить сопоставление последствий различных радиационных воздействий на население, являются ожидаемая частота возникновения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний (радиационный риск) и ожидаемое сокращение продолжительности жизни. Разработана методология комплексной оценки этих параметров, использующая различные мультипликативные и аддитивные модели экстраполяции радиационного риска для основных источников радиационного воздействия на население: радона и его дочерних продуктов распада, медицинских диагностических рентгенологических исследований, техногенных радиационных аварий.

It is shown that the optimal parameters for a comparison of the consequences of different radiation sources influence on the population are the expected frequency of the radiation-induced cancer incidence (the radiation risk) as well as the loss of life expectancy. The methodology of the complex assessment of both these parameters for the main sources of radiation influence on the population – radon and its daughter products, medical diagnostic X-ray procedures, consequences of industry radiation accidents is developed with using of any multiplicative and additive models of the radiation risk extrapolation.

Общий подход к решению проблемы риска любого происхождения может быть достаточно наглядно проиллюстрирован рис.1. Данный подход в равной мере может быть применен как к радиационным факторам риска, так и к факторам нерадиационной природы (химическое загрязнение, неблагоприятные физические поля, биологические факторы и др.), включая факторы, имеющие социальную основу (преступность, наркомания, инфекционные заболевания, детская смертность и др).



Рис.1. Основные этапы при решении проблемы риска для населения

На этапе оценки воздействия производится анализ первичной информации по неблагоприятным факторам, действовавшим ранее или воздействующим на население рассматриваемого региона в настоящее время. Для радиационного воздействия на население по завершении первого этапа работ должна быть получена исчерпывающая информация по дозам облучения, поступлению радионуклидов в организм, распределению облучения во времени для всех основных групп населения с учетом их возраста, места проживания, профессиональной деятельности и т.д.

Оценка радиационных рисков производится на втором этапе работ. В результате выполнения второго этапа получают численные значения пожизненной вероятности возникновения радиационно-индуцированного онкологического заболевания или смерти в результате его возникновения, а также значения ожидаемой возраст-специфической частоты онкологических заболеваний, свя-

занных с радиационным воздействием. Для вредных факторов химической или биологической природы может применяться аналогичный подход с учетом специфических особенностей их воздействия.

На третьем этапе от полученных на втором этапе вероятностных значений риска необходимо перейти к величинам, позволяющим экономически оценить радиационный ущерб здоровью населения. После этого можно провести ранжирование всех причин, влияющих на уровень жизни населения региона, и выработать стратегию действий по ее улучшению.

Обычно при оценке облучения человека используется эффективная доза E, являющейся обобщенной мерой ущерба, возникающего при неравномерном облучении организма человека:

$$E = \sum w_{\text{т}} H_{\text{т}} = \sum w_R \sum w_{\text{т}} D_{\text{т},R}$$

$$= \sum w_{\text{т}} \sum w_R D_R ,$$

где $w_{\text{т}}$ и w_{R} – тканевый весовой множитель и весовой множитель излучения; $H_{\text{т}}$ – эквивалентная доза в органе или ткани; D_R – средняя поглощенная доза излучения типа R в органе или ткани.

Применение эффективной дозы при облучении дочерними продуктами распада (ДПР) радона может иметь высокую степень неопределенности. Основной величиной, позволяющей оценить воздействие ДПР радона на человека, является так называемая экспозиция по ЭРОА радона.

В работе рассчитаны значения коэффициентов дозового перехода от экспозиции по ЭРОА радона к эффективной дозе с использованием двух методов: метода условного дозового перехода и дозиметрической модели респираторного тракта [1, 2]. Было установлено, что неопределенность оценки коэффициента дозового перехода примерно равна для обоих методов: 5,5-31 нЗв/(Бк·ч·м$^{-3}$). Рекомендованные значения коэффициентов дозового перехода (4 мЗв/WLM для населения и 5 мЗв/WLM для персонала) в основном соответствуют нижней границе наших расчетных оценок.

Даже при общем облучении человека эффективная доза выступает как мера ожидаемого ущерба здоровью только в случае пожизненного облучения человека примерно одинаковыми дозами или однократного облучения популяции, состоящей из лиц всех возрастов. Во всех остальных случаях при оценке ожидаемого радиационного ущерба необходимо учитывать возраст человека на момент облучения. Это может быть сделано введением в расчет эффективной дозы дополнительного весового множителя, зависящего от возраста человека на момент облучения. Тогда уравнение, описывающее эффективную дозу, примет вид

$$E(t_e) = \sum w_{\text{AT}}(t_e) w_{\text{т}} H_{\text{т}} =$$

$$= \sum w_R \sum w_{\text{AT}}(t_e) w_{\text{т}} D_{\text{т},R} \sum w_{\text{т}} =$$

$$= \sum w_{\text{AT}}(t_e) w_R D_{\text{т},R} ,$$

где $w_{\text{AT}}(t_e)$ – возрастной весовой множитель для органа или ткани.

Для оценки численных значений $w_{\text{AT}}(t_e)$ были рассчитаны значения пожизненного радиационного риска и ожидаемого сокращения продолжительности жизни (ОСПЖ) при однократном облучении органов и тканей человека в различном возрасте эквивалентной дозой 10 мЗв (рис.2, 3). Однако введение в определение эффективной дозы дополнительных возрастных весовых множителей или специфических поправок, связанных с облучением дочерними продуктами распада радона, сделает это понятие еще более сложным для восприятия лицами, имеющими отношение к радиационной безопасности. Кроме того, изменение определения эффективной дозы требует согласования на международном уровне.

В связи с этим было принято решение при анализе последствий для здоровья населения воздействия природных, техногенных и медицинских радиационных источников, отказаться от использования эффективной дозы как меры радиационного ущерба. Вместо нее предложены такие параметры как пожизненная вероятность возникновения радиационно-индуцированного онкологического заболевания (радиационный риск) и ожидаемое сокращение продолжительности жизни (ОСПЖ), обусловленное возникновением радиогенного рака. Расчет этих пара-

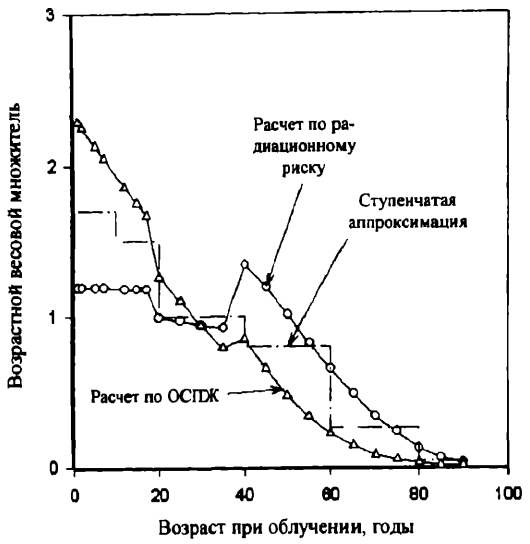


Рис.2. Возрастные весовые множители при облучении красного костного мозга

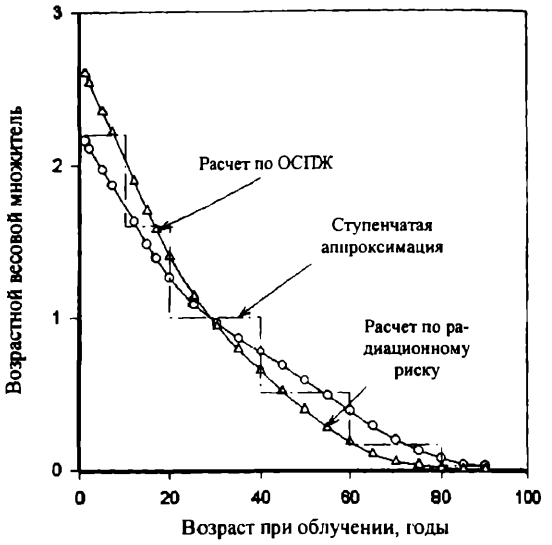


Рис.3. Возрастные весовые множители для оценки ущерба от возникновения радиационно-индуцированных злокачественных опухолей

метров производился с учетом возраста на момент облучения t_e, а также вероятности дожития до определенного возраста $p_0(t)$ и спонтанной частоты онкологических заболеваний той или иной локализации $\lambda_0(t)$, характерных для данного региона.

Оценка радиационного риска, обусловленного ингаляционным облучением ДПР радона и торона, была выполнена на основании результатов проведенных исследований [2-5] с использованием различных методик [6]. Результаты расчетов представлены в табл.1. С учетом численности населения, проживающего в жилищах различного типа, можно утверждать, что ежегодно в Свердловской области возникает около 460 (от 360 до 710) у мужчин и 86 (от 61 до 144) у женщин случаев рака легкого, обусловленного ингаляционным облучением ДПР радона и торона.

Из-за слабой дифференциация исходных статистических данных по диагностическому медицинскому облучению населения Свердловской области при расчетах было принято, что сделанные оценки эффективных доз соответствуют равномерному облучению всего организма. Для мужчин и женщин области были рассчитаны радиационные риски (0,0030 и 0,0046) и ОСПЖ (11,2 и 20,4 сутки) при пожизненном медицинском облучении дозой 1 мЗв/год. При средней дозе медицинского диагностического облучения 1,4 мЗв/год ожидаемая частота возникновения онкологических заболеваний, обусловленных медицинским диагностическим облучением, составит для Свердловской области около 150 (от 75 до 210) случаев в год для мужчин и 220 (от 145 до 360) для женщин.

Таблица 1

Значения пожизненного радиационного риска и ОСПЖ, обусловленные облучением ДПР радона и торона

Объект	Экспозиция $P_{прав}$, WLM/год	Радиационный риск		ОСПЖ, сутки	
		Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
Сельские дома	0,85	0,0289	0,0056	122,7	30,4
Городские квартиры:					
Первые этажи	0,37	0,0126	0,0024	53,4	13,2
Верхние этажи	0,23	0,0078	0,0015	33,2	8,2
Среднее по области	0,37	0,0127	0,0025	53,4	13,2

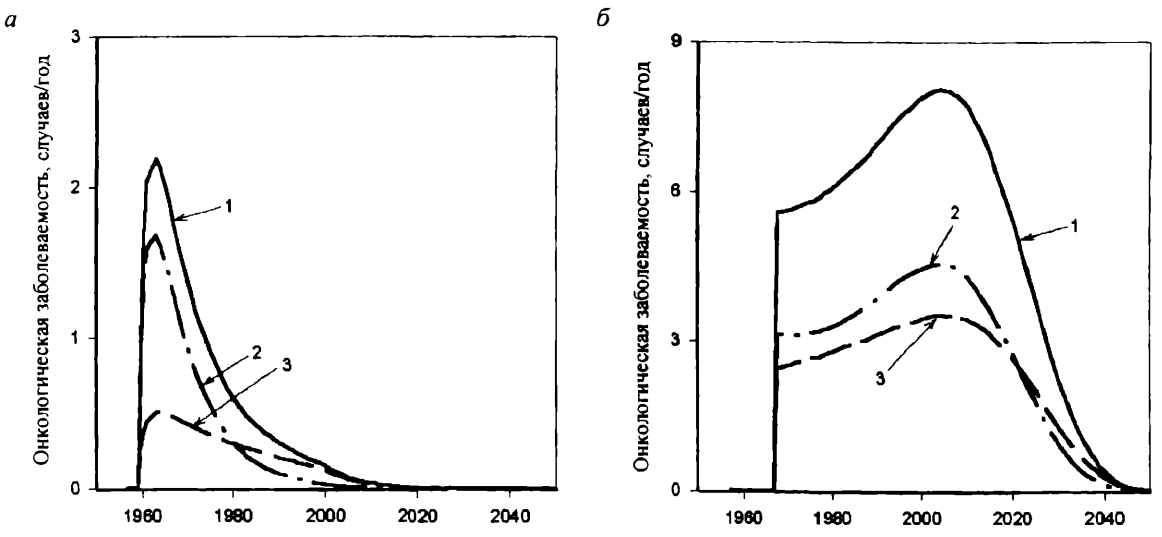


Рис.4. Ожидаемая радиационно-индуцированная заболеваемость лейкемией (*а*) и злокачественными новообразованиями всех локализаций (*б*) для населения зоны аварии

1 – население в целом; 2 – мужчины; 3 – женщины

Таблица 2

Оценка пожизненного популяционного риска возникновения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний и популяционного ущерба для населения зоны аварии

Заболевание	Заболеваемость, число случаев		Общая заболеваемость (смертность), число случаев		Ожидаемый ущерб, человеко-годы		Суммарный ожидаемый ущерб, человеко-годы
	Мужчины	Женщины			Мужчины	Женщины	
Лейкемия	30-36	19-26	49-62	(8-61)	640-720	410-480	1120-1130
Злокачественные новообразования	73-221	151-413	234-613	166-435	730-1700	1900-4400	3100-6000
	154	228	383	272	1400	2700	4100
Всего	103-257	170-439	283-675	214-496	1400-2400	2300-4900	4200-7100
	187	251	438	327	2100	3100	5200

Примечание. В числителе – диапазон; в знаменателе – среднее значение.

При оценке последствий аварии 1957 г на ПО «Маяк» расчет индивидуальных параметров радиационного риска и ОСПЖ был произведен, исходя из плотности загрязнения территории по ^{90}Sr [7]. На основе расчетов индивидуальных параметров риска были получены ожидаемые временные зависимости онкологической заболеваемости, обусловленной аварийным облучением, для пострадавшего населения (около 300 тыс. человек) зоны аварии (рис.4, табл.2).

Таблица 3

Оценка популяционного радиационного риска и ущерба для зоны аварии

Источник облучения	Число онкологических заболеваний		Ожидаемое количество потерянных человеко-лет жизни	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
Пребывание в зоне аварии	187	251	2100	3100
Диагностические процедуры	585	934	6000	11300
Радон	3526	710	40900	10600

Для всех районов зоны аварии были рассчитаны значения популяционного риска и ущерба, обусловленные всеми основными радиационными факторами (табл.3). Полученные данные демонстрируют, что постоянно действующие в течение жизни человека радиационные факторы (природное облучение и медицинские рентгенодиагностические процедуры) могут оказывать на здоровье воздействие, сопоставимое с прямыми последствиями достаточно серьезной радиационной аварии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жуковский М.В.* Коэффициенты дозового перехода от экспозиции дочерними продуктами распада радона к эффективной дозе / М.В.Жуковский, А.В.Павлюк // АНРИ. 2001. № 2.

2. *Жуковский М.В.* Комплексный подход к оценке радиационных рисков для населения / М.В.Жуковский, А.В.Кружалов // Изв. Томского политехнического ун-та. Томск, 2000. Т.303. № 2.

3. *Ярмошенко И.В.* Облучение населения Свердловской области радоном и тороном / И.В.Ярмошенко, М.В.Жуковский, А.А.Екидин // Техногенез и экология: Информ.-темат. сборник / Уральская горно-геологическая академия. Екатеринбург, 1999.

4. *Жуковский М.В.* Радиационная обстановка и радиационная безопасность населения / М.В.Жуковский, А.Н.Кямкин, И.В.Тибилов, А.В.Кружалов // Государственный доклад о состоянии окружающей среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской области в 1998 году Екатеринбург, 1999.

5. *Кружалов А.В.* Радиационная обстановка А.В.Кружалов, М.В.Жуковский, А.Н.Кямкин // Государственный доклад о состоянии окружающей среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской области в 1999 г Екатеринбург, 2000.

6. *Жуковский М.В.* Расчет радиационных рисков при облучении дочерними продуктами распада радона // АНРИ. 2001. № 1.

7. *Жуковский М.В.* Радиационные риски для населения зоны ВУРСа Свердловской области / М.В.Жуковский, А.В.Павлюк // VIII Международный экологический симпозиум «Урал атомный, Урал промышленный – 2000»: Тезисы докладов /Уральский технический ун-т. Екатеринбург, 2000.