

Лабораторная расчетная работа № 9

«Оценка риска возникновения радиационно-индуцированных стохастических эффектов»

1. Модели радиационного риска при внешнем и внутреннем облучении

Существуют две основные модели экстраполяции риска:

- 1) модель абсолютного риска (аддитивная);
- 2) модель относительного риска (мультипликативная).

Согласно первой модели дополнительная частота возникновения радиационно-индуцированного рака не зависит от базовой (спонтанной) частоты заболевания. В соответствии со второй моделью облучение вызывает увеличение вероятности заболевания, пропорциональное базовой частоте.

Следует учитывать, что риск онкологической заболеваемости проявляется после некоторого латентного периода m , равного 2 года для лейкемии, 5 лет для рака щитовидной железы и 10 лет для остальных онкологических заболеваний.

Пусть $\lambda_0(t)$ – онкологическая заболеваемость в определенном возрасте t от всех причин, в конкретной необлученной популяции (базовая частота). Тогда заболеваемость с учетом облучения будет выражаться следующим образом:

$$\lambda(t, t_e, D) = \lambda_0(t) + \lambda_r(t, t_e, D), \quad (1)$$

где t_e – возраст на момент облучения, D – доза на орган или ткань, для которых оценивается риск. Для аддитивной модели риска величина $\lambda_r(t, t_e, D)$ не зависит от величины спонтанной заболеваемости $\lambda_0(t)$. Для мультипликативной модели $\lambda_r(t, t_e, D) = \lambda_0(t) \cdot K_{ERR}(t, t_e, D)$, где K_{ERR} – коэффициент дополнительного относительного риска.

В большинстве случаев при оценке риска используют линейную беспороговую зависимость доза-эффект. В этом случае можно принять, что для модели абсолютного риска

$$\lambda_r(t_e, t, D) = K_{AR}(t_e, t) \cdot D, \quad (2)$$

а для модели относительного риска

$$\lambda_r(t_e, t, D) = \lambda_0(t) \cdot K_{RR}(t_e, t) \cdot D. \quad (3)$$

Если коэффициенты $K_{AR}(t_e, t)$ и $K_{RR}(t_e, t)$ не зависят от возраста на момент оценки риска и интервала между облучением и оценкой риска то говорят о модели постоянного абсолютного или относительного риска.

Практически для всех органов и тканей принято оценивать радиационные риски с использованием мультипликативных моделей. Считается, что они более адекватно отражают как пожизненную вероятность возникновения радиационно-индуцированного рака, так и распределение этой вероятности по времени после облучения. Аддитивные модели, как правило, применяются наряду с мультипликативными моделями только для красного костного мозга

(лейкемия), щитовидной железы и костной ткани. Численные значения коэффициентов относительного и абсолютного риска приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты относительного и абсолютного радиационного риска при облучении человека малыми дозами при малой мощности дозы

Орган или ткань	Модель риска	Возраст на момент облучения, лет				
		0-9	10-19	20-29	30-39	40+
		Мужчины				
Пищевод	R	0.2239	0.2312	0.2517	0.2892	0.3258
Желудок	R	1.2337	1.9165	1.9051	0.2881	0.2524
Толстый кишечник	R	2.1565	2.1565	0.2809	0.4275	0.0899
Печень	R	1.3449	1.3449	1.3449	1.3449	1.3449
Легкие	R	0.4060	0.4060	0.0453	0.1342	0.1794
Костная ткань	A	0.0927	0.0927	0.0927	0.0927	0.0927
Кожа	A	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672
Молочная железа	R	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Яичники	R	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Мочевой пузырь	R	1.2191	1.1609	1.0736	1.0544	0.9639
Почки	R	0.3911	0.3911	0.3911	0.3911	0.3911
Щитовидная железа	A	0.1667	0.1667	0.0833	0.0833	0.0833
Солидные опухоли	R	0.53	0.33	0.29	0.12	0.09
Лейкемия	A	1.92	1.01	2.17	3.16	2.36
		Женщины				
Пищевод	R	1.0418	1.0896	1.2492	1.5831	2.0211
Желудок	R	3.4469	4.2721	4.0533	0.5797	0.4887
Толстый кишечник	R	2.9680	2.9680	0.5755	0.8186	0.1870
Печень	R	1.3449	1.2449	1.3449	1.3449	1.3449
Легкие	R	1.3753	1.3753	0.1921	0.5440	0.8048
Костная ткань	A	0.0927	0.0927	0.0927	0.0927	0.0927
Кожа	A	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672
Молочная железа	R	0.7000	0.7000	0.3000	0.3000	0.1000
Яичники	R	1.3163	1.0382	0.8829	0.7678	0.6367
Мочевой пузырь	R	1.0115	0.9296	1.0124	1.1032	0.9792
Почки	R	0.3911	0.3911	0.3911	0.3911	0.3911
Щитовидная железа	A	0.3333	0.3333	0.1667	0.1667	0.1667
Солидные опухоли	R	1.03	0.64	0.56	0.24	0.17
Лейкемия	A	1.50	0.52	1.25	0.98	1.59

Примечание

Модель риска

абсолютный (A)

относительный (R)

Размерность единиц

$10^{-4} (\text{Гр} \cdot \text{год})^{-1}$

Гр^{-1}

2. Радиационные риски при облучении ДПР радона

Расчет риска возникновения рака легких, обусловленного ингаляцией короткоживущих дочерних продуктов распада радона, имеет ряд своих специфических особенностей. Основные из них:

- использование исключительно мультипликативных моделей экстраполяции риска;
- пролонгированный характер радиационного воздействия;
- изменение значений коэффициентов относительного риска со временем, прошедшим с момента радиационного воздействия.

Первичной информацией, необходимой для оценки радиационных рисков, является определение среднегодовой экспозиции по дочерним продуктам распада радона, которой подвергаются население или персонал того или иного предприятия. Под экспозицией P за период времени воздействия T мы будем понимать следующее выражение

$$P = \int_0^T C_{Rn}(t) dt = \overline{C_{Rn}} \cdot T, \quad (4)$$

где $C_{Rn}(t)$ – изменяющееся со временем значение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона, $\overline{C_{Rn}}$ – среднее значение ЭРОА радона за период времени воздействия T . Величина $C_{Rn}(t)$ может быть определена при помощи радон-мониторов непрерывно фиксирующих изменение объемной активности или ЭРОА радона в воздухе. Для оценки непосредственно величины $\overline{C_{Rn}}$ можно использовать интегрирующие средства измерения объемной активности радона, позволяющие проводить измерения в течение нескольких недель или даже месяцев – трековые или электретенные детекторы. При проведении нескольких измерений в течение сезона могут быть использованы пассивные угольные адсорбционные детекторы с временем экспонирования до нескольких суток.

Одной из особенностей использования основных моделей оценки радиационных рисков при облучении ДПР радона является то, что все коэффициенты риска нормированы на экспозицию по дочерним продуктам распада радона, выраженную в единицах WLM (Working Level Month – рабочий уровень в месяц). Величина в 1 WLM соответствует экспозиции при ЭРОА радона равной 100 пКи/л (3700 Бк/м³) в течение 170 ч (продолжительность работы в течение 1 месяца). В связи с этим измеренные значения среднегодовой экспозиции P (Бк·ч/м³) должны быть пересчитаны в величину экспозиции, выраженной в единицах WLM

$$P_{WLM} = P_{ЭРОА} / (170 \cdot 3700), \quad (5)$$

где P_{WLM} – экспозиция, выраженная в WLM, $P_{ЭРОА}$ – экспозиция по дочерним продуктам распада радона, выраженная в единицах Бк·ч/м³.

Частота возникновения радиационно-индуцированного рака легких $\lambda_r(t)$ связана с базовой возраст-специфической заболеваемостью $\lambda_0(t)$ при по-

мощи коэффициента дополнительного относительного риска K_{ERR} , зависящего от экспозиции по дочерним продуктам распада радона P_{WLM} , распределения экспозиции во времени, возраста на момент оценки риска и ряда других параметров

$$\lambda_r(t) = \lambda_0(t) \cdot K_{ERR}(t) \quad (6)$$

Для расчета коэффициента $K_{ERR}(t)$ может быть использовано несколько моделей экстраполяции радиационного риска. В данной работе мы рассмотрим только две наиболее простые модели: модель постоянного риска и модель BEIR IV

Модель постоянного риска. Для модели постоянного относительного риска основным является предположение о том, что коэффициент дополнительного относительного риска в возрасте t $K_{ERR}(t)$ зависит только от экспозиции по дочерним продуктам распада радона, полученной в возрасте t_e , $P_{WLM}(t_e)$ и не зависит от остальных факторов

$$K_{ERR}(t) = 0,0083 \cdot P_{WLM}(t_e) \quad \text{для } t > t_e + \tau, \quad (7)$$

где $P_{WLM}(t_e)$ – годовая экспозиция по ДПР радона, полученная в возрасте t_e и выраженная в единицах WLM, τ – латентный период, равный 5 годам. Коэффициент дополнительного относительного риска, обусловленный кумулятивной экспозицией ДПР радона за весь период жизни или за определенный период (производственная деятельность) может быть рассчитан как

$$K_{ERR}(t) = 0,0083 \int_0^{t-\tau} P_{WLM}(t_e) dt_e, \quad (8)$$

где $P_{WLM}(t_e)$ – мощность экспозиции по ДПР радона в возрасте t_e , или, при замене интегрирования суммированием,

$$K_{ERR}(t) = 0,0083 \sum_{t_e=0}^{t-\tau} P_{WLM}(t_e) \quad (9)$$

Модель BEIR IV. Модель, предложенная Комиссией BEIR IV, большей частью основывается на анализе данных по раку легких у шахтеров Канады и США. Это модифицированная мультипликативная модель, учитывающая как время, прошедшее с момента экспозиции, так и достигнутый возраст. Окончательная рекомендованная модель дается соотношением:

$$K_{ERR}(t) = s\gamma(t)[P_1 + 0,5P_2], \quad (10)$$

где $\gamma(t) = 1,2$ для $t < 55$ лет; $\gamma(t) = 1,0$ для $55 \leq t \leq 64$ года;
 $\gamma(t) = 0,4$ для $t > 65$ лет и s – коэффициент пропорциональности с экспозицией, принятый в оригинальной модели BEIR IV равным 0,025;
 P_1 – экспозиция по скрытой энергии (в WLM), полученная в интервале между 5 и 15 годами перед достижением возраста t ;
 P_2 – экспозиция (WLM) полученная за 15 лет и более до этого возраста.

Таким образом, данная модель приводит к ступенчатому изменению дополнительной частоты возникновения заболеваний раком легких.

3. Функция дожития до определенного возраста

Функция дожития $p(t)$ определяется как вероятность достижения человеком возраста t (с рождения).

В отсутствии облучения вероятность дожития до возраста t (с рождения) задается функцией $p_0(t)$ и может быть вычислена по формуле:

$$p_0(t) = \exp\left(-\int_0^t q_0(\tau) d\tau\right), \quad (11)$$

где $q_0(\tau)$ – смертность в определенном возрасте τ от всех причин, в конкретной необлученной популяции.

На основании исходных статистических данных по численности населения в различных возрастных группах и по смертности в данных группах, разделив количество умерших в течение года в данной возрастной группе на ее численность, можно определить вероятность смерти в течение года для человека в определенном возрасте t – $q_m(t)$ или $q_f(t)$. График зависимости $q_m(t)$ или $q_f(t)$ носит название кривой Гомпертца-Мейкхема. Соответственно, вероятность того, что человек в возрасте от t до $t+1$ останется живым в течение данного года будет равна

$$p'_m(t) = 1 - q_m(t) \quad \text{или} \quad p'_f(t) = 1 - q_f(t), \quad (12)$$

для мужчин и женщин, соответственно. Вероятности p'_m и $p'_f(t)$ относятся к одному году жизни человека. Определение вероятности дожития человека от рождения до возраста t производится при помощи следующей формулы

$$p_{0m}(t) = \prod_{i=1}^t p'_m(i) \quad \text{или} \quad p_{0f}(t) = \prod_{i=1}^t p'_f(i). \quad (13)$$

Пример кривых Гомпертца-Мейкхема и вероятностей дожития $p_0(t)$ для Свердловской области представлены на рис.1.

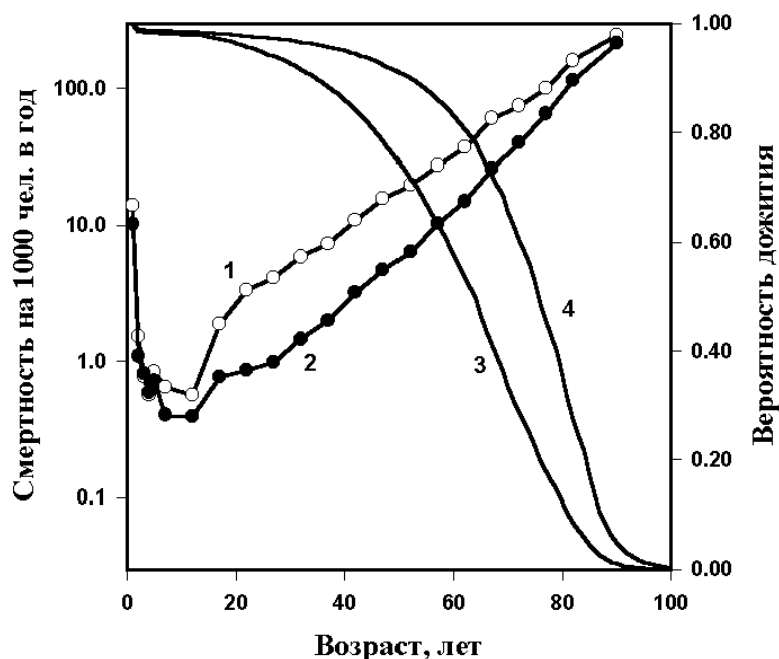


Рис.1. Кривые Гомпертца-Мейкхема (1– мужчины , 2 – женщины) и вероятности дожития (3 – мужчины , 4 – женщины) для населения Свердловской области

Вероятность того, что человек, находящийся в возрасте t_e доживет до возраста t ($t' < t$) рассчитывается по выражению

$$p(t) = \frac{p_0(t)}{p_0(t_e)} . \quad (14)$$

При таком определении вероятности дожития $p_0(t)$ в неявном виде предполагается, что повозрастная структура смертности в данном регионе остается практически неизменной в течение всего периода оценки радиационного риска.

Если известна зависимость $p_0(t)$, то можно определить столь важную демографическую характеристику региона как ожидаемую продолжительность жизни при рождении L_0

$$L_0 = \int_0^{\infty} p_0(t) dt . \quad (15)$$

С учетом того, что величина $p_0(t)$, как правило, представлена в виде дискретного ряда значений, интегрирование может быть заменено суммированием

$$L_0 = \sum_{t=0}^{\infty} p_0(t) . \quad (16)$$

4. Расчет радиационного риска и ожидаемого сокращения продолжительности жизни популяции

Для расчета пожизненного риска (вероятности) возникновения радиационно-индуцированного рака R необходимо использовать следующие рассмотренные ранее величины: вероятность дожития до определенного возраста $p_0(t)$, частоту возникновения радиационно-индуцированного рака $\lambda_r(t)$, а также коэффициент летальности рака данной локализации k . При этом необходимо учитывать дополнительное сокращение ожидаемой вероятности дожития до возраста t , обусловленное возникновением дополнительных случаев возникновения рака

$$R = \int_0^{\infty} \lambda_r(t) \cdot p_0(t) \cdot \exp \left[- \int_0^t k \cdot \lambda_r(t') dt' \right] dt. \quad (16)$$

Если в данном выражении перейти от интегрирования к суммированию, то оно примет вид

$$R = \sum_{t=0}^{\infty} \lambda_r(t) \cdot p_0(t) \cdot \exp \left[- \sum_{t'=0}^t k \cdot \lambda_r(t') \right]. \quad (18)$$

В уравнениях (10) и (11) для перехода от радиационно-индуцированной заболеваемости к дополнительной смертности используется коэффициент летальности k (лейкемия – 0,99; рак легких – 0,95; желудок – 0,90; толстый кишечник – 0,55). В среднем, при общем равномерном облучении организма средняя ожидаемая летальность для радиогенных раков лежит в пределах $k=0,63 \div 0,67$.

Одним из важных параметров, позволяющих оценить величину радиационного ущерба здоровью населения и прогнозировать эффективность различных реабилитационных мер является оценка ожидаемого сокращения продолжительности жизни населения ΔL_R , обусловленного радиационным воздействием. Данную величину при облучении одного органа или ткани можно рассчитать по уравнению

$$\Delta L_R = \int_0^{\infty} p_0(t) dt - \int_0^{\infty} p_0(t) \cdot \exp \left[- \int_0^t k \cdot \lambda_r(t') dt' \right] dt \quad \text{или} \quad (19)$$

$$\Delta L_R = \sum_{t=0}^{\infty} p_0(t) - \sum_{t=0}^{\infty} p_0(t) \cdot \exp \left[- \sum_{t'=0}^t k \cdot \lambda_r(t') \right]. \quad (20)$$

Аналогично радиационному риску может быть проведен расчет пожизненного риска возникновения спонтанного онкологического заболевания данной локализации

$$R_0 = \sum_{t=0}^{\infty} \lambda_0(t) \cdot p_0(t). \quad (21)$$

Исходя из полученных данных могут быть рассчитаны пожизненный относительный и атрибутивный риски возникновения радиационно-индуцированного онкологического заболевания

$$RR = \frac{R + R_0}{R_0} = 1 + \frac{R}{R_0} \quad AR = \frac{R}{R + R_0}. \quad (22)$$

При использовании моделей абсолютного риска, либо моделей переменного относительного риска определенный интерес может представлять расчет возраст-специфического атрибутивного риска, показывающего вероятность того, что возникшее онкологическое заболевание имеет радиационную природу

$$AR(t) = \frac{r(t)}{r(t) + r_0(t)} = \frac{\lambda_r(t) \cdot p(t)}{\lambda_r(t) \cdot p(t) + \lambda_0(t) \cdot p_0(t)} \cong \frac{\lambda_r(t)}{\lambda_r(t) + \lambda_0(t)}. \quad (23)$$

Удобнее всего расчеты радиационного риска при внешнем и внутреннем облучении, а также при ингаляционном облучении ДПР радона производить при помощи электронной таблицы EXCEL. Примеры составления расчетных таблиц приведены в Приложении.

5. Порядок выполнения расчетной работы

1. Получите у преподавателя индивидуальное задание для выполнения расчетной работы.
2. Значения дозовых нагрузок на указанные в задании органы и ткани берутся из лабораторной работы, посвященной оценке облучения человека при радиоактивном загрязнении окружающей среды.
3. Численные значения коэффициентов абсолютного и относительного риска берутся из Табл. 1. Значения исходной вероятности дожития $p_0(t)$ и частоты спонтанного возникновения онкологических заболеваний различных органов и тканей приведены в специальной справочной таблице *Baseline.xls*, выдаваемой преподавателем.
4. Тип модели радиационного риска, по которой оценивается вероятность возникновения рака легких при облучении ДПР радона, задается в индивидуальном задании.
5. Проведите расчеты пожизненного радиационного риска, относительного и атрибутивного рисков, а также ожидаемого сокращения продолжительности жизни.
6. Отчет должен содержать:
 - Исходное индивидуальное задание.
 - Обоснование выбора численных значений используемых параметров.
 - Результаты расчетов и их интерпретацию.
 - Расчетные файлы с пояснениями и комментариями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. УрО РАН. Екатеринбург. 1997. 232 с.
2. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ. М.: Энергоатомиздат. 1990.
3. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат. 1995.
4. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации. Доклад НКДАР ООН за 1988 г. М.: Мир, 1992. Т.2.
5. Кириллов В.Ф., Книжников В.А., Коренков И.П. Радиационная гигиена М.: Медицина. 1988.
6. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М.: Энергоатомиздат. 1999.
7. Критерии вмешательства в случае ядерной аварии или радиационной аварийной ситуации. Серия изданий по безопасности № 109. МАГАТЭ. Вена. 1998.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1.758-99. Минздрав России. 1999.
9. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Ч.1; Публикация МКРЗ 61. М.: Энергоатомиздат, 1994.
10. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1994. Ч.2.
11. Романов Г.Н. Ликвидация последствий радиационных аварий. Справочное руководство. М.: ИздАТ. 1993.
12. External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil. Federal Guidance Report No 12. Environmental Protection Agency. USA. 1993.
13. Health Risks from Low-Level Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report No 13. Environmental Protection Agency. USA. 1998.
14. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Safety series No 115. IAEA. Vienna. 1996.

Таблица П1

Пример таблицы EXCEL для расчета риска возникновения радиационно-индуцированной лейкемии (модель абсолютного риска)

Возраст	Исход. ве- роятн. до- жития $p_0(t)$	Вероятность дожития, нор- мированная на возраст облу- чения t_e	Спонтанная частота воз- никновения заболевания λ_0	Коэффициент абсолютного риска K_{AR}	Взвешенная по ОБЭ доза, Гр	Риск возник- новения рака в возрасте t без учета влияния других рисков λ_r	Кумулятивн. функция риска	Поправка, учи- тывающая уменьшение ве- роятности дожи- тия за счет появ- ления радиаци- онного риска	Вероятность дожития с уче- том радиаци- он. риска $p(t)$	Риск возникно- вания рака в возрасте t с учетом влияния других рисков	Спонтанный риск возник- новения забо- левания на пе- риод после об- лучения	Атрибутивный риск как функция возраста	Летальность рака данной локализации
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0.999	1	9.84E-05			0	0	=EXP(-H1*\$N\$1)	=C1*I1	0	0	0	0.99
2	0.998	1	9.15E-05			0	0	=EXP(-H2*\$N\$1)	=C2*I2	0	0	0	
3	0.997	1	8.45E-05			0	0	=EXP(-H3*\$N\$1)	=C3*I3	0	0	0	
4	0.997	1	7.76E-05			0	0	=EXP(-H4*\$N\$1)	=C4*I4	0	0	0	
5	0.996	1	7.14E-05			0	0	=EXP(-H5*\$N\$1)	=C5*I5	0	0	0	
33	0.905	1	7.67E-05			0	0	=EXP(-H33*\$N\$1)	=C33*I33	=J33*G33	0	0	
34	0.898	1	7.94E-05			0	0	=EXP(-H34*\$N\$1)	=C34*I34	=J34*G34	0	0	
35	0.890	=B35/B\$35	8.25E-05	=0.000316	1.30E-01	0	0	=EXP(-H35*\$N\$1)	=C35*I35	=J35*G35	=D35*J35	=K35/(L35+K35)	
36	0.882	=B36/B\$35	8.61E-05			0	0	=EXP(-H36*\$N\$1)	=C36*I36	=J36*G36	=D36*J36	=K36/(L36+K36)	
37	0.873	=B37/B\$35	9.01E-05			=E\$35*F\$35	=G37	=EXP(-H37*\$N\$1)	=C37*I37	=J37*G37	=D37*J37	=K37/(L37+K37)	
38	0.863	=B38/B\$35	9.46E-05			=E\$35*F\$35	=G38+H37	=EXP(-H38*\$N\$1)	=C38*I38	=J38*G38	=D38*J38	=K38/(L38+K38)	
39	0.852	=B39/B\$35	9.96E-05			=E\$35*F\$35	=G39+H38	=EXP(-H39*\$N\$1)	=C39*I39	=J39*G39	=D39*J39	=K39/(L39+K39)	
40	0.841	=B40/B\$35	1.05E-04			=E\$35*F\$35	=G40+H39	=EXP(-H40*\$N\$1)	=C40*I40	=J40*G40	=D40*J40	=K40/(L40+K40)	
41	0.830	=B41/B\$35	1.11E-04			=E\$35*F\$35	=G41+H40	=EXP(-H41*\$N\$1)	=C41*I41	=J41*G41	=D41*J41	=K41/(L41+K41)	
42	0.817	=B42/B\$35	1.18E-04			=E\$35*F\$35	=G42+H41	=EXP(-H42*\$N\$1)	=C42*I42	=J42*G42	=D42*J42	=K42/(L42+K42)	
73	0.160	=B73/B\$35	8.15E-04			=E\$35*F\$35	=G73+H72	=EXP(-H73*\$N\$1)	=C73*I73	=J73*G73	=D73*J73	=K73/(L73+K73)	
74	0.139	=B74/B\$35	8.38E-04			=E\$35*F\$35	=G74+H73	=EXP(-H74*\$N\$1)	=C74*I74	=J74*G74	=D74*J74	=K74/(L74+K74)	
75	0.120	=B75/B\$35	8.59E-04			0	=G75+H74	=EXP(-H75*\$N\$1)	=C75*I75	=J75*G75	=D75*J75	=K75/(L75+K75)	
76	0.102	=B76/B\$35	8.79E-04			0	=G76+H75	=EXP(-H76*\$N\$1)	=C76*I76	=J76*G76	=D76*J76	=K76/(L76+K76)	
97	0.00007	=B97/B\$35	1.00E-03			0	=G97+H96	=EXP(-H97*\$N\$1)	=C97*I97	=J97*G97	=D97*J97	=K97/(L97+K97)	
98	0.00005	=B98/B\$35	1.00E-03			0	=G98+H97	=EXP(-H98*\$N\$1)	=C98*I98	=J98*G98	=D98*J98	=K98/(L98+K98)	
99	0.00004	=B99/B\$35	1.00E-03			0	=G99+H98	=EXP(-H99*\$N\$1)	=C99*I99	=J99*G99	=D99*J99	=K99/(L99+K99)	
100	0.00002	=B100/B\$35	1.00E-03			0	=G100+H99	=EXP(-H100*\$N\$1)	=C100*I100	=J100*G100	=D100*J100	=K100/(L100+K100)	
		=СУММ(C1:C101)							=СУММ(J1:J100)	=СУММ(K1:K100)	=СУММ(L1:L100)		
		L₀							L	R	R₀		
				ОСПЖ (лет) =	=J102-C102								
				AR =	=K102/(K102+L102)								

Таблица П2
Пример таблицы EXCEL для расчета риска возникновения радиационно-индуцированного рака легких (внешнее облучение, модель относительного риска)

Возраст	Исход. вероятн. дожития p ₀ (t)	Вероятность дожития, нормированная на возраст облучения t _e	Спонтанная частота возникновения заболевания λ ₀	Коэффициент относительного риска K _{RR}	Взвешенная по ОБЭ доза, Гр	Риск возникновения рака в возрасте t без учета влияния других рисков λ _t	Кумулятивн. функция риска	Поправка, учитывающая уменьшение вероятности дожития за счет появления радиационного риска	Вероятность дожития с учетом радиацион. риска p (t)	Риск возникновения рака в возрасте t с учетом влияния других рисков	Спонтанный риск возникновения заболевания на период после облучения	Атрибутивный риск как функция возраста	Летальность рака данной локализации
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0.999	1	1.59E-07			0	0	=EXP(-H1*\$N\$1)	=I1*C1	=G1*J1	0	0	0.95
2	0.998	1	5.75E-08			0	0	=EXP(-H2*\$N\$1)	=I2*C2	=G2*J2	0	0	
3	0.997	1	1.00E-06			0	0	=EXP(-H3*\$N\$1)	=I3*C3	=G3*J3	0	0	
4	0.997	1	1.00E-06			0	0	=EXP(-H4*\$N\$1)	=I4*C4	=G4*J4	0	0	
5	0.996	1	1.00E-06			0	0	=EXP(-H5*\$N\$1)	=I5*C5	=G5*J5	0	0	

33	0.940	1	2.58E-05			0	0	=EXP(-H33*\$N\$1)	=I33*C33	=G33*J33		0	
34	0.934	1	2.66E-05			0	0	=EXP(-H34*\$N\$1)	=I34*C34	=G34*J34		0	
35	0.929	1	2.74E-05			0	0	=EXP(-H35*\$N\$1)	=I35*C35	=G35*J35		0	
36	0.923	=B36/B\$36	2.84E-05	0.1342	2.60E-01	0	0	=EXP(-H36*\$N\$1)	=I36*C36	=G36*J36		=G36/ (G36+D36)	
37	0.917	=B37/B\$36	2.96E-05			0	0	=EXP(-H37*\$N\$1)	=I37*C37	=G37*J37		=G37/ (G37+D37)	
38	0.911	=B38/B\$36	3.12E-05			0	0	=EXP(-H38*\$N\$1)	=I38*C38	=G38*J38		=G38/ (G38+D38)	
39	0.905	=B39/B\$36	3.35E-05			0	0	=EXP(-H39*\$N\$1)	=I39*C39	=G39*J39		=G39/ (G39+D39)	
40	0.898	=B40/B\$36	3.67E-05			0	0	=EXP(-H40*\$N\$1)	=I40*C40	=G40*J40		=G40/ (G40+D40)	
41	0.890	=B41/B\$36	4.11E-05			0	0	=EXP(-H41*\$N\$1)	=I41*C41	=G41*J41		=G41/ (G41+D41)	
42	0.882	=B42/B\$36	4.74E-05			0	0	=EXP(-H42*\$N\$1)	=I42*C42	=G42*J42		=G42/ (G42+D42)	
43	0.873	=B43/B\$36	5.64E-05			0	0	=EXP(-H43*\$N\$1)	=I43*C43	=G43*J43		=G43/ (G43+D43)	
44	0.863	=B44/B\$36	6.85E-05			0	0	=EXP(-H44*\$N\$1)	=I44*C44	=G44*J44		=G44/ (G44+D44)	
45	0.852	=B45/B\$36	8.46E-05			0	0	=EXP(-H45*\$N\$1)	=I45*C45	=G45*J45		=G45/ (G45+D45)	
46	0.841	=B46/B\$36	1.06E-04			=D46*E\$36*F\$36	=G46	=EXP(-H46*\$N\$1)	=I46*C46	=G46*J46	=J46*D46	=G46/ (G46+D46)	
47	0.830	=B47/B\$36	1.36E-04			=D47*E\$36*F\$36	=G47+H46	=EXP(-H47*\$N\$1)	=I47*C47	=G47*J47	=J47*D47	=G47/ (G47+D47)	
48	0.817	=B48/B\$36	1.76E-04			=D48*E\$36*F\$36	=G48+H47	=EXP(-H48*\$N\$1)	=I48*C48	=G48*J48	=J48*D48	=G48/ (G48+D48)	
49	0.803	=B49/B\$36	2.29E-04			=D49*E\$36*F\$36	=G49+H48	=EXP(-H49*\$N\$1)	=I49*C49	=G49*J49	=J49*D49	=G49/ (G49+D49)	

96	0.001	=B96/B\$36	5.46E-03			=D96*E\$36*F\$36	=G96+H95	=EXP(-H96*\$N\$1)	=I96*C96	=G96*J96	=J96*D96	=G96/ (G96+D96)	
97	0.001	=B97/B\$36	5.46E-03			=D97*E\$36*F\$36	=G97+H96	=EXP(-H97*\$N\$1)	=I97*C97	=G97*J97	=J97*D97	=G97/ (G97+D97)	
98	0.000	=B98/B\$36	5.46E-03			=D98*E\$36*F\$36	=G98+H97	=EXP(-H98*\$N\$1)	=I98*C98	=G98*J98	=J98*D98	=G98/ (G98+D98)	
99	0.000	=B99/B\$36	5.46E-03			=D99*E\$36*F\$36	=G99+H98	=EXP(-H99*\$N\$1)	=I99*C99	=G99*J99	=J99*D99	=G99/ (G99+D99)	
100	0.000	=B100/B\$36	5.46E-03			=D100*E\$36*F\$36	=G100+H99	=EXP(-H100*\$N\$1)	=I100*C100	=G100*J100	=J100*D100	=G100/ (G100+D100)	
		=SUMM(C1:C100)							=SUMM(J1:J100)	=SUMM(K37:K102)	=SUMM(L37:L102)		
		L0								R	R0		
						Атрибут. риск AR =	=K101/ (K101+L101)						
						ОСПЖ, лет =	=C101-J101						

Таблица ПЗ

Расчет радиационного риска возникновения рака легких при облучении радоном с использованием модели BEIR IV

Возраст	Исход. веро- ятн. дожития p ₀ (t)	Экспозиция, WLM	Спонтанная частота воз- никновения заболевания λ ₀	Кумулятивная экспозиция P ₁	Кумулятивная экспозиция P ₂	Функц. возр.	Коэффициент допол- нительного относи- тельного риска K _{ERR}	Риск воз- никнове- ния рака в возрасте t без учета влияния других рисков λ _г	Кумулятивн. функция риска	Спонтанный риск возник- новения забо- левания γ ₀ (t)	Риск возникновения радио- генного рака в возрасте t с учетом влияния других рис- ков	Вероятность дожи- тия с учетом радиа- цион. риска p (t)
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	0.986	0.75	0			1.2	=0.025*G1*(E1+F1/2)	=D1*H1	=I1	=B1*D1	=D1*B1*H1*EXP(-J1*0.95)	=B1*EXP(-J1*0.95)
2	0.984	0.75	0			1.2	=0.025*G2*(E2+F2/2)	=D2*H2	=I2+J1	=B2*D2	=D2*B2*H2*EXP(-J2*0.95)	=B2*EXP(-J2*0.95)
3	0.984	0.75	0			1.2	=0.025*G3*(E3+F3/2)	=D3*H3	=I3+J2	=B3*D3	=D3*B3*H3*EXP(-J3*0.95)	=B3*EXP(-J3*0.95)
19	0.965	0.75	0			1.2	=0.025*G19*(E19+F19/2)	=D19*H19	=I19+J18	=B19*D19	=D19*B19*H19*EXP(-J19*0.95)	=B19*EXP(-J19*0.95)
20	0.962	0.75	0			1.2	=0.025*G20*(E20+F20/2)	=D20*H20	=I20+J19	=B20*D20	=D20*B20*H20*EXP(-J20*0.95)	=B20*EXP(-J20*0.95)
21	0.959	5.78	0			1.2	=0.025*G21*(E21+F21/2)	=D21*H21	=I21+J20	=B21*D21	=D21*B21*H21*EXP(-J21*0.95)	=B21*EXP(-J21*0.95)
22	0.956	5.78	0			1.2	=0.025*G22*(E22+F22/2)	=D22*H22	=I22+J21	=B22*D22	=D22*B22*H22*EXP(-J22*0.95)	=B22*EXP(-J22*0.95)
29	0.927	5.78	0			1.2	=0.025*G29*(E29+F29/2)	=D29*H29	=I29+J28	=B29*D29	=D29*B29*H29*EXP(-J29*0.95)	=B29*EXP(-J29*0.95)
30	0.922	5.78	3.01E-06	=СУММ(C16:C25)	=СУММ(C\$1:C15)	1.2	=0.025*G30*(E30+F30/2)	=D30*H30	=I30+J29	=B30*D30	=D30*B30*H30*EXP(-J30*0.95)	=B30*EXP(-J30*0.95)
31	0.916	5.78	3.75E-06	=СУММ(C17:C26)	=СУММ(C\$1:C16)	1.2	=0.025*G31*(E31+F31/2)	=D31*H31	=I31+J30	=B31*D31	=D31*B31*H31*EXP(-J31*0.95)	=B31*EXP(-J31*0.95)
32	0.911	5.78	4.26E-06	=СУММ(C18:C27)	=СУММ(C\$1:C17)	1.2	=0.025*G32*(E32+F32/2)	=D32*H32	=I32+J31	=B32*D32	=D32*B32*H32*EXP(-J32*0.95)	=B32*EXP(-J32*0.95)
55	0.651	5.78	1.32E-03	=СУММ(C41:C50)	=СУММ(C\$1:C40)	1	=0.025*G55*(E55+F55/2)	=D55*H55	=I55+J54	=B55*D55	=D55*B55*H55*EXP(-J55*0.95)	=B55*EXP(-J55*0.95)
56	0.633	0.75	1.51E-03	=СУММ(C42:C51)	=СУММ(C\$1:C41)	1	=0.025*G56*(E56+F56/2)	=D56*H56	=I56+J55	=B56*D56	=D56*B56*H56*EXP(-J56*0.95)	=B56*EXP(-J56*0.95)
57	0.616	0.75	1.72E-03	=СУММ(C43:C52)	=СУММ(C\$1:C42)	1	=0.025*G57*(E57+F57/2)	=D57*H57	=I57+J56	=B57*D57	=D57*B57*H57*EXP(-J57*0.95)	=B57*EXP(-J57*0.95)
58	0.599	0.75	1.95E-03	=СУММ(C44:C53)	=СУММ(C\$1:C43)	1	=0.025*G58*(E58+F58/2)	=D58*H58	=I58+J57	=B58*D58	=D58*B58*H58*EXP(-J58*0.95)	=B58*EXP(-J58*0.95)
59	0.577	0.75	2.21E-03	=СУММ(C45:C54)	=СУММ(C\$1:C44)	1	=0.025*G59*(E59+F59/2)	=D59*H59	=I59+J58	=B59*D59	=D59*B59*H59*EXP(-J59*0.95)	=B59*EXP(-J59*0.95)
60	0.556	0.75	2.49E-03	=СУММ(C46:C55)	=СУММ(C\$1:C45)	1	=0.025*G60*(E60+F60/2)	=D60*H60	=I60+J59	=B60*D60	=D60*B60*H60*EXP(-J60*0.95)	=B60*EXP(-J60*0.95)
61	0.535	0.75	2.80E-03	=СУММ(C47:C56)	=СУММ(C\$1:C46)	1	=0.025*G61*(E61+F61/2)	=D61*H61	=I61+J60	=B61*D61	=D61*B61*H61*EXP(-J61*0.95)	=B61*EXP(-J61*0.95)
62	0.515	0.75	3.13E-03	=СУММ(C48:C57)	=СУММ(C\$1:C47)	1	=0.025*G62*(E62+F62/2)	=D62*H62	=I62+J61	=B62*D62	=D62*B62*H62*EXP(-J62*0.95)	=B62*EXP(-J62*0.95)
63	0.496	0.75	3.48E-03	=СУММ(C49:C58)	=СУММ(C\$1:C48)	1	=0.025*G63*(E63+F63/2)	=D63*H63	=I63+J62	=B63*D63	=D63*B63*H63*EXP(-J63*0.95)	=B63*EXP(-J63*0.95)
64	0.466	0.75	3.85E-03	=СУММ(C50:C59)	=СУММ(C\$1:C49)	1	=0.025*G64*(E64+F64/2)	=D64*H64	=I64+J63	=B64*D64	=D64*B64*H64*EXP(-J64*0.95)	=B64*EXP(-J64*0.95)
65	0.438	0.75	4.24E-03	=СУММ(C51:C60)	=СУММ(C\$1:C50)	0.4	=0.025*G65*(E65+F65/2)	=D65*H65	=I65+J64	=B65*D65	=D65*B65*H65*EXP(-J65*0.95)	=B65*EXP(-J65*0.95)
66	0.411	0.75	4.65E-03	=СУММ(C52:C61)	=СУММ(C\$1:C51)	0.4	=0.025*G66*(E66+F66/2)	=D66*H66	=I66+J65	=B66*D66	=D66*B66*H66*EXP(-J66*0.95)	=B66*EXP(-J66*0.95)
93	0.004	0.75	6.61E-03	=СУММ(C79:C88)	=СУММ(C\$1:C78)	0.4	=0.025*G93*(E93+F93/2)	=D93*H93	=I93+J92	=B93*D93	=D93*B93*H93*EXP(-J93*0.95)	=B93*EXP(-J93*0.95)
94	0.003	0.75	6.46E-03	=СУММ(C80:C89)	=СУММ(C\$1:C79)	0.4	=0.025*G94*(E94+F94/2)	=D94*H94	=I94+J93	=B94*D94	=D94*B94*H94*EXP(-J94*0.95)	=B94*EXP(-J94*0.95)
95	0.002	0.75	6.30E-03	=СУММ(C81:C90)	=СУММ(C\$1:C80)	0.4	=0.025*G95*(E95+F95/2)	=D95*H95	=I95+J94	=B95*D95	=D95*B95*H95*EXP(-J95*0.95)	=B95*EXP(-J95*0.95)
	=СУММ(B1:B95)									=СУММ(K1:K95)	=СУММ(L1:L95)	=СУММ(M1:M95)
	L0								RR =	=L96/K96+1	ОСПЖ, сут =	=365*(B96-M96)

Таблица П4

Расчет радиационного риска возникновения рака легких при облучении радоном с использованием модели постоянного риска

Возраст	Исход. вероятн. дожития $p_0(t)$	Экспозиция, WLM	Спонтанная частота возникновения заболевания λ_0	Коэффициент дополнительного относительного риска K_{ERR}	Риск возникновения рака в возрасте t без учета влияния других рисков λ_t	Кумулятивн. функция риска	Спонтанный риск возникновения заболевания $\gamma_0(t)$	Риск возникновения радиогенного рака в возрасте t с учетом влияния других рисков	Вероятность дожития с учетом радиацион. риска $p(t)$
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.986	0.75	0	0		=F1	=B1*D1	=D1*B1*E1*EXP(-G1*0.95)	=B1*EXP(-G1*0.95)
2	0.984	0.75	0	0		=G1+F2	=B2*D2	=D2*B2*E2*EXP(-G2*0.95)	=B2*EXP(-G2*0.95)
3	0.984	0.75	0	0		=G2+F3	=B3*D3	=D3*B3*E3*EXP(-G3*0.95)	=B3*EXP(-G3*0.95)
19	0.965	0.75	0	0		=G18+F19	=B19*D19	=D19*B19*E19*EXP(-G19*0.95)	=B19*EXP(-G19*0.95)
20	0.962	0.75	0	0		=G19+F20	=B20*D20	=D20*B20*E20*EXP(-G20*0.95)	=B20*EXP(-G20*0.95)
21	0.959	5.78	0	0		=G20+F21	=B21*D21	=D21*B21*E21*EXP(-G21*0.95)	=B21*EXP(-G21*0.95)
22	0.956	5.78	0	0		=G21+F22	=B22*D22	=D22*B22*E22*EXP(-G22*0.95)	=B22*EXP(-G22*0.95)
28	0.933	5.78	0	0		=G27+F28	=B28*D28	=D28*B28*E28*EXP(-G28*0.95)	=B28*EXP(-G28*0.95)
29	0.927	5.78	0	0		=G28+F29	=B29*D29	=D29*B29*E29*EXP(-G29*0.95)	=B29*EXP(-G29*0.95)
30	0.922	5.78	4.77E-06	=0.0083*СУММ(C\$1:C25)	=E30*D30	=G29+F30	=B30*D30	=D30*B30*E30*EXP(-G30*0.95)	=B30*EXP(-G30*0.95)
31	0.916	5.78	3.75E-06	=0.0083*СУММ(C\$1:C26)	=E31*D31	=G30+F31	=B31*D31	=D31*B31*E31*EXP(-G31*0.95)	=B31*EXP(-G31*0.95)
32	0.911	5.78	4.26E-06	=0.0083*СУММ(C\$1:C27)	=E32*D32	=G31+F32	=B32*D32	=D32*B32*E32*EXP(-G32*0.95)	=B32*EXP(-G32*0.95)
33	0.906	5.78	6.47E-06	=0.0083*СУММ(C\$1:C28)	=E33*D33	=G32+F33	=B33*D33	=D33*B33*E33*EXP(-G33*0.95)	=B33*EXP(-G33*0.95)
34	0.899	5.78	1.06E-05	=0.0083*СУММ(C\$1:C29)	=E34*D34	=G33+F34	=B34*D34	=D34*B34*E34*EXP(-G34*0.95)	=B34*EXP(-G34*0.95)
54	0.669	5.78	1.15E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C49)	=E54*D54	=G53+F54	=B54*D54	=D54*B54*E54*EXP(-G54*0.95)	=B54*EXP(-G54*0.95)
55	0.651	5.78	1.32E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C50)	=E55*D55	=G54+F55	=B55*D55	=D55*B55*E55*EXP(-G55*0.95)	=B55*EXP(-G55*0.95)
56	0.633	0.75	1.51E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C51)	=E56*D56	=G55+F56	=B56*D56	=D56*B56*E56*EXP(-G56*0.95)	=B56*EXP(-G56*0.95)
57	0.616	0.75	1.72E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C52)	=E57*D57	=G56+F57	=B57*D57	=D57*B57*E57*EXP(-G57*0.95)	=B57*EXP(-G57*0.95)
58	0.599	0.75	1.95E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C53)	=E58*D58	=G57+F58	=B58*D58	=D58*B58*E58*EXP(-G58*0.95)	=B58*EXP(-G58*0.95)
59	0.577	0.75	2.21E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C54)	=E59*D59	=G58+F59	=B59*D59	=D59*B59*E59*EXP(-G59*0.95)	=B59*EXP(-G59*0.95)
93	0.004	0.75	6.61E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C88)	=E93*D93	=G92+F93	=B93*D93	=D93*B93*E93*EXP(-G93*0.95)	=B93*EXP(-G93*0.95)
94	0.003	0.75	6.46E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C89)	=E94*D94	=G93+F94	=B94*D94	=D94*B94*E94*EXP(-G94*0.95)	=B94*EXP(-G94*0.95)
95	0.002	0.75	6.30E-03	=0.0083*СУММ(C\$1:C90)	=E95*D95	=G94+F95	=B95*D95	=D95*B95*E95*EXP(-G95*0.95)	=B95*EXP(-G95*0.95)
	=СУММ(B1:B95)						=СУММ(H1:H95)	=СУММ(I1:I95)	=СУММ(J1:J95)
	L0						R0	R	L
						RR =	=I96/H96+1	ОСПЖ, сут =	=365*(B96-J96)