

РАЗДЕЛ 2**НАУЧНЫЕ СТАТЬИ****Количественная оценка вероятности возникновения радиационно-индуцированных заболеваний вследствие внутреннего облучения**

Иванов В.К., Корело А.М., Туманов К.А., Пряхин Е.А., Панфилов А.П.¹, Райков С.В.¹

ФГБУ МРНЦ Минздрава России, Обнинск;

¹ Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва

Рассмотрены количественные оценки вероятности возникновения радиационно-индуцированных заболеваний вследствие внутреннего облучения для сценариев годового облучения, при которых поглощённые дозы в органах и тканях определяются, в основном, ингаляционным поступлением радионуклидов. Показано, что при преимущественно ингаляционном поступлении радионуклидов в организм человека оценка пожизненного атрибутивного риска для персонала атомной промышленности России в условиях нормальной эксплуатации может быть выполнена в предположении, что органная доза полностью сосредоточена в органах дыхания. Эффективная доза может дать приблизительную оценку вреда при облучении для персонала моложе 25 лет.

Ключевые слова: радиационный риск, персонал Госкорпорации «Росатом», внутреннее облучение.

Введение

Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2010 года и дальнейшую перспективу (Пр-2196) от 4 декабря 2003 г. в качестве одной из основных задач указывают следующую:

«11. Для решения задач по повышению уровня ядерной и радиационной безопасности населения и окружающей среды необходимо: 1) внедрить современные методы и средства комплексного анализа и прогнозирования состояния ядерной и радиационной безопасности, а также управления им с использованием показателей рисков...».

Оценка вреда здоровью человека (или радиационного риска), обусловленного внутренним облучением, в настоящее время является актуальной задачей, решение которой имеет определённые методические трудности. Вместе с тем, для некоторых предприятий атомной отрасли, в частности, для радиохимических заводов, горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, основной вред здоровью может быть связан именно с внутренним облучением.

Современные Рекомендации МКРЗ 2007 г. (п. 156) [2] содержат указание на то, что в случае больших доз, превышающих ограничения и пределы для персонала, грубую оценку вреда можно получить с использованием эффективной дозы: «При ретроспективной оценке доз у отдельных индивидуумов, дозы у которых могли существенно превысить пределы дозы, эффективная доза может дать первую приблизительную оценку суммарного вреда». Однако (там же):

Иванов В.К.* – Председатель РНКРЗ, зам. директора по научн. работе, чл.-корр. РАМН; Корело А.М. – вед. программист; Туманов К.А. – научн. сотр., к.б.н.; Пряхин Е.А. – аспирант. ФГБУ МРНЦ Минздрава России. Панфилов А.П. – начальник отдела ДЯРБ, к.т.н.; Райков С.В. – директор ДЯРБ. Госкорпорация «Росатом».

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (48439) 9-33-90; e-mail: nrer@obninsk.com.

«Если доза излучения и радиационный риск должны быть оценены более точно, необходимо провести дальнейшие детальные оценки доз в органах или тканях, особенно тогда, когда необходимо оценить специфические риски для органов отдельных индивидуумов».

В настоящее время средняя годовая эффективная доза облучения персонала в нормальных условиях работы предприятий атомной отрасли составляет около 2 мЗв, в некоторых случаях для небольшой группы лиц достигая примерно 10 мЗв, т.е. гораздо ниже пределов доз для персонала. В этом случае представляет интерес вопрос о том, насколько сильно могут отличаться оценки вреда здоровью (или радиационного риска), полученные с помощью эффективной дозы, по сравнению с «правильным» расчётом по поглощённой или эквивалентной дозе в органе или ткани.

Материалы и методы

Вред здоровью с точки зрения специалистов МКРЗ является многокомпонентной характеристикой. «Его основными компонентами являются величины стохастического характера: вероятность развития смертельного радиационно-индуцированного онкологического заболевания, взвешенная вероятность развития наследственных радиационных эффектов и число лет жизни, потерянных в результате нанесения радиационного вреда» [2].

Рассмотрим, прежде всего, вероятность развития смертельного радиационно-индуцированного онкологического заболевания, как главную компоненту вреда при малых дозах облучения. Традиционно, такая вероятность выражается в форме пожизненного избыточного атрибутивного риска (*LAR*), который должен оцениваться по эквивалентным дозам в органах и тканях, так как опирается на радиационно-эпидемиологические оценки годовых рисков (на годовые вероятности возникновения радиационно-индуцированных стохастических эффектов), полученных, как правило, при однократном облучении, и зависящих от поглощённой дозы (*D*) (или эквивалентной дозы *H*) и модифицирующих риск параметров (пол, возраст при облучении, достигнутый возраст и т.п.) [2]. Далее такой риск будем обозначать *LAR_{OPF}*.

Хорошо известно, что, зная годовой избыточный абсолютный риск (*EAR*) в достигнутом возрасте *a* для человека пола *s*, можно оценить *LAR_{OPF}* рака локализации *l* после однократного облучения в возрасте *g* дозой *D*. Он рассчитывается суммированием значений избыточного абсолютного риска с учётом вероятности дожития (функции дожития – *S*), т.е. по следующей формуле:

$$LAR_{OPF}(g, l, s, D) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=g}^{a_{max}} EAR(g, a, l, s, D) \cdot S(g, a, l, s),$$

где *DDREF* – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, учитывающий уменьшение риска в случае хронического облучения или облучения в малой дозе; в МКРЗ в Публикации 103 рекомендуется значение *DDREF* брать равное 2; *a_{max}* обычно выбирается от 90 до 120 лет.

Результатом оценки доз внутреннего облучения в случае индивидуального дозиметрического контроля или группового дозиметрического контроля, как правило, является эффективная доза (*E*). При этом, для дальнейшей оценки поглощённых или эквивалентных доз на органы и ткани требуются определённые допущения от распределения поглощённых доз в теле человека, принимая во внимание тот или иной сценарий облучения.

Ниже рассматриваются сценарии облучения, при которых дозы обусловлены, в основном, ингаляционным поступлением соединений урана и дочерних продуктов распада радона в организм человека. В качестве примеров рассмотрены эффективные дозы 2 мЗв и 10 мЗв, при четырёх разных модельных предположениях о распределении эквивалентных доз в органах, в том числе и при небольшом поступлении радионуклидов через желудочно-кишечный тракт. Были выбраны следующие сценарии для расчёта пожизненного атрибутивного риска по органной дозе, $LAR_{орг}$:

- 1) на лёгкие,
- 2) на лёгкие и толстый кишечник,
- 3) на лёгкие и красный костный мозг,
- 4) на лёгкие, толстый кишечник и красный костный мозг.

Для сравнения вычислялась оценка пожизненного избыточного атрибутивного риска с использованием эффективных доз 2 мЗв и 10 мЗв, т.е. для всех злокачественных новообразований ($LAR_{эфф}$). Для выбранных органов и тканей, согласно Рекомендациям МКРЗ 2007 г. [2], тканевой фактор перехода от H к E равен 0,12, т.е. оценка эквивалентной дозы в органе даётся соотношением $H=E/0,12$. При оценке пожизненных рисков использовались функция дожития и показатели онкологической смертности для российской популяции по данным 2009 г. [1].

Результаты и обсуждение

Результаты расчёта для трёх групп по возрасту при облучении g : 20-24 года, 40-44 года и 60-64 года представлены ниже в таблицах 1-6.

Для того чтобы оценить отличие в оценке радиационных рисков, рассчитанных по органной и эффективной дозе, введён коэффициент R , равный отношению пожизненного атрибутивного риска, рассчитанного с помощью органных доз, к риску, рассчитанному с помощью эффективной дозы.

Таблица 1

Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 2 мЗв/0,12=16,7 мЗв), и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R), для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 20-24 года

Лёгкие (%)	Красный костный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (20-24 года)		Женщины (20-24 года)	
			$LAR_{орг}$ на 10 тыс.	$R=LAR_{орг}/LAR_{эфф}$	$LAR_{орг}$ на 10 тыс.	$R=LAR_{орг}/LAR_{эфф}$
100	0	0	0,849	0,920	1,693	0,881
95	0	5	0,854	0,926	1,637	0,851
90	0	10	0,859	0,931	1,581	0,822
85	0	15	0,864	0,936	1,525	0,793
80	0	20	0,869	0,942	1,469	0,764
95	5	0	0,866	0,939	1,648	0,857
90	10	0	0,891	0,965	1,609	0,837
85	15	0	0,908	0,984	1,564	0,813
80	20	0	0,925	1,002	1,520	0,790
95	2,5	2,5	0,860	0,932	1,643	0,854
90	5	5	0,871	0,944	1,592	0,828
85	7,5	7,5	0,890	0,964	1,547	0,805
80	10	10	0,901	0,976	1,497	0,778

Таблица 2

**Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 2 мЗв/0,12=16,7 мЗв),
и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R),
для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы)
при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 40-44 года**

Лёгкие (%)	Красный костный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (40-44 года)		Женщины (40-44 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}
100	0	0	0,948	1,876	1,704	1,809
95	0	5	0,927	1,834	1,634	1,734
90	0	10	0,906	1,793	1,564	1,659
85	0	15	0,885	1,751	1,493	1,585
80	0	20	0,864	1,709	1,423	1,510
95	5	0	0,957	1,894	1,685	1,788
90	10	0	0,974	1,926	1,674	1,776
85	15	0	0,983	1,945	1,654	1,756
80	20	0	0,992	1,963	1,635	1,735
95	2,5	2,5	0,942	1,864	1,659	1,761
90	5	5	0,936	1,852	1,614	1,713
85	7,5	7,5	0,937	1,855	1,578	1,675
80	10	10	0,931	1,843	1,533	1,627

Таблица 3

**Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 2 мЗв/0,12=16,7 мЗв),
и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R),
для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы)
при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 60-64 года**

Лёгкие (%)	Красный костный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (60-64 года)		Женщины (60-64 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}
100	0	0	0,557	3,921	1,140	4,216
95	0	5	0,537	3,780	1,087	4,022
90	0	10	0,517	3,640	1,035	3,828
85	0	15	0,497	3,500	0,982	3,633
80	0	20	0,477	3,359	0,929	3,439
95	5	0	0,566	3,990	1,107	4,097
90	10	0	0,581	4,093	1,078	3,989
85	15	0	0,591	4,163	1,046	3,870
80	20	0	0,601	4,233	1,014	3,751
95	2,5	2,5	0,552	3,885	1,097	4,060
90	5	5	0,547	3,850	1,055	3,903
85	7,5	7,5	0,546	3,847	1,015	3,757
80	10	10	0,541	3,812	0,973	3,601

Таблица 4

**Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 10 мЗв/0,12=83,3 мЗв),
и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R),
для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы)
при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 20-24 года**

Лёгкие (%)	Красный костный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (20-24 года)		Женщины (20-24 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}
100	0	0	4,247	0,920	8,466	0,881
95	0	5	4,272	0,926	8,186	0,851
90	0	10	4,297	0,931	7,905	0,822
85	0	15	4,322	0,936	7,625	0,793
80	0	20	4,346	0,942	7,345	0,764
95	5	0	4,348	0,942	8,253	0,858
90	10	0	4,443	0,962	8,036	0,836
85	15	0	4,547	0,985	7,826	0,814
80	20	0	4,653	1,008	7,617	0,792
95	2,5	2,5	4,310	0,934	8,219	0,855
90	5	5	4,372	0,947	7,973	0,829
85	7,5	7,5	4,436	0,961	7,727	0,804
80	10	10	4,492	0,973	7,476	0,778

Таблица 5

**Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 10 мЗв/0,12=83,3 мЗв),
и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R),
для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы)
при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 40-44 года**

Лёгкие (%)	Красный костный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (40-44 года)		Женщины (40-44 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}
100	0	0	4,741	1,876	8,521	1,809
95	0	5	4,636	1,834	8,170	1,734
90	0	10	4,530	1,793	7,818	1,659
85	0	15	4,424	1,751	7,467	1,585
80	0	20	4,319	1,709	7,116	1,510
95	5	0	4,802	1,900	8,441	1,792
90	10	0	4,857	1,922	8,355	1,773
85	15	0	4,922	1,947	8,279	1,757
80	20	0	4,988	1,974	8,206	1,742
95	2,5	2,5	4,718	1,867	8,305	1,763
90	5	5	4,696	1,858	8,090	1,717
85	7,5	7,5	4,674	1,850	7,875	1,671
80	10	10	4,646	1,838	7,652	1,624

Таблица 6

Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 10 мЗв/0,12=83,3 мЗв), и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R), для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 60-64 года

Лёгкие (%)	Красный костный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (60-64 года)		Женщины (60-64 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}
100	0	0	2,783	3,921	5,698	4,216
95	0	5	2,683	3,780	5,435	4,022
90	0	10	2,584	3,640	5,173	3,828
85	0	15	2,484	3,500	4,910	3,633
80	0	20	2,384	3,359	4,647	3,439
95	5	0	2,842	4,004	5,543	4,102
90	10	0	2,898	4,082	5,386	3,986
85	15	0	2,959	4,169	5,233	3,872
80	20	0	3,022	4,258	5,081	3,760
95	2,5	2,5	2,763	3,892	5,489	4,062
90	5	5	2,742	3,864	5,280	3,908
85	7,5	7,5	2,723	3,836	5,072	3,753
80	10	10	2,698	3,802	4,861	3,597

Как видно из таблиц 1-6, значения коэффициента R близко к 1 в возрастной группе 20-24 года и увеличивается с возрастом: так, в группе 60-64 года риск, рассчитанный по органным дозам, примерно в 4 раза выше риска, рассчитанного по эффективной дозе.

Нужно обратить внимание, что с увеличением вклада в дозу на толстый кишечник и красный костный мозг и снижением вклада в дозу на лёгкие, в возрастной группе 20-24 года среди мужчин наблюдается рост радиационного риска.

В возрастных группах 40-44 года и 60-64 года среди мужчин в сценариях «лёгкие и толстый кишечник» и «лёгкие, красный костный мозг и толстый кишечник» риск заболевания снижается от первого сценария к последующему. Это связано с особенностями зависимости радиационного риска рака разных локализаций от возраста при облучении. По той же причине у женщин во всех трёх рассмотренных сценариях с уменьшением вклада в дозу на лёгкие и увеличением вклада в дозу на толстый кишечник и красный костный мозг наблюдается снижение суммарного радиационного риска.

В сценарии «лёгкие и красный костный мозг» у мужчин, во всех трёх рассмотренных возрастных группах, с увеличением вклада в дозу на красный костный мозг и уменьшением вклада на лёгкие, наблюдается рост радиационного риска. У женщин же, как отмечалось выше, в аналогичном сценарии, риск снижается.

Более детальный анализ конкретной возрастной группы 40-44 года показал, что при увеличении вклада в дозу на красный костный мозг пожизненный атрибутивный риск лейкозов растёт как у мужчин, так и у женщин. Очевидно, что при уменьшении вклада в дозу на лёгкие, риск заболевания раком лёгких снижается как у мужчин, так и у женщин. Так как пожизненный атрибутивный риск в сценарии «лёгкие и красный костный мозг» является суммой риска лейкоза и риска рака лёгких, то различие в поведении суммарного риска красного костного мозга и лёгких объясняется тем, что снижение риска при уменьшении вклада в дозу на лёгкие у мужчин происходит медленнее, чем у женщин, при одинаковом увеличении риска лейкозов.

Заключение

Рассмотрены количественные оценки вероятности возникновения радиационно-индуцированных заболеваний вследствие внутреннего облучения для сценариев годового облучения, при которых поглощённые дозы в органах и тканях определяются, в основном, ингаляционным поступлением радионуклидов.

Показано, что для российской популяции в возрастной группе 20-24 года на момент облучения величина пожизненного атрибутивного риска, рассчитанного по органным дозам (LAR_{ORG}), меняется в зависимости от рассмотренных распределений органных доз с разбросом не более 10 % от его средней величины, а отличие LAR_{ORG} от величины пожизненного атрибутивного риска, формально рассчитанного по эффективной дозе ($LAR_{ЭФФ}$), составляет менее 25 %.

Значения пожизненного атрибутивного риска LAR_{ORG} для возраста при облучении старше 40 лет, в зависимости от рассмотренных распределений органных доз, имеют разброс не более 10 % от его средней величины, в то время как отличия LAR_{ORG} от $LAR_{ЭФФ}$ для этих возрастов составляют не менее 1,5 крат.

Таким образом, при преимущественно ингаляционном поступлении радионуклидов в организм человека оценка пожизненного атрибутивного риска для персонала атомной промышленности России в условиях нормальной эксплуатации может быть выполнена в предположении, что органная доза полностью сосредоточена в органах дыхания. Эффективная доза может дать приблизительную оценку вреда при облучении для персонала моложе 25 лет.

Литература

1. Злокачественные новообразования в России в 2001-2009 гг. (заболеваемость и смертность). Справочник /Под ред. акад. РАМН В.И.Чиссова, проф. В.В. Старинского. М., 2000-2009.
2. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) /Пер. с англ., под общей ред. М.Ф.Киселёва и Н.К.Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.

Risk of diseases induced by internal radiation

Ivanov V.K., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin E.A., Panfilov A.P.¹, Raykov C.V.¹

Medical Radiological Research Center of the Russian Ministry of Health, Obninsk;

¹ State Atomic Energy Corporation "Rosatom", Moscow

Risks of diseases induced by internal radiation for different scenarios of annual exposure to radiation were assessed. In the scenario it is assumed that absorbed doses to organs and tissues are formed mainly due to inhalation of radionuclides. Results of study demonstrate that if internal radiation is due to inhaled radionuclides, organ dose is located in respiratory organs primarily, operational state of NPP is normal, lifetime attributable risk for nuclear workers can be assessed. Effective dose can be considered as approximate estimate of possible harm to health of those exposed to radiation at the age younger than 25 years.

Key words: *radiation risk, staff of the Corporation Rosatom, internal exposure.*

Ivanov V.K.* – Chairman of RSCRP, Deputy Director, Corresponding Member of RAMS; **Korelo A.M.** – Lead. Programmer; **Tumanov K.A.** – Research Assistant, C. Sc., Biol.; **Pryakhin E.A.** – Postgraduate Student. MRRRC. **Panfilov A.P.** – Chief of Dep., DNRS, C. Sc., Tech.; **Raykov C.V.** – Deputy Director, DNRS. Corporation Rosatom.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (48439) 9-33-90; e-mail: nrer@obninsk.com.