

"Бюллетень радиационной медицины", 1990 год, № 2, стр. 77-81.

Эффективная эквивалентная доза облучения персонала инкорпорированным плутонием

Хохряков В.Ф., Кудрявцева Т.И., Суслова К.Г.

На основе собственных данных о метаболизме промышленных соединений плутония рассчитана эффективная эквивалентная доза (ЭЭД), создаваемая инкорпорированным нуклидом при ингаляционном поступлении. Основной вклад (76-80 %) в ЭЭД вносят дозы облучения легких и клеток костных поверхностей. Обсуждается оценка величины допустимого поступления исходя из концепции о критическом органе и риске, основанном на учете ЭЭД.

Effective dose equivalent of irradiation of the staff by incorporated plutonium

Khokhryakov V.F., Kudryavtseva T.I., Suslova K.G.

On the basis of own data on metabolism of industrial compounds of plutonium the effective dose equivalent (EDE) by inhalation of incorporated plutonium was calculated. Doses of irradiation of lungs and cells of bone surfaces contribute significantly (76-80%) to EDE. Estimating the value of permissible transfer from the conception about critical organ and risk based on consideration of EDE is discussed.

В связи с рекомендациями МКРЗ [3, 4, 9] применять ЭЭД в качестве основного критерия при оценке риска облучения представляет интерес определение этого показателя для инкорпорированного плутония, поскольку внутреннее облучение, обусловленное этим радионуклидом, является одним из ведущих факторов профессиональной вредности на предприятиях радиохимической промышленности. Настоящая работа посвящена оценке численного значения ЭЭД с учетом фактических данных о распределении радионуклида в организме человека, полученных при анализе секционного материала. Результаты использованы для сравнительного анализа допустимых уровней поступления (ПДП) при разных подходах к нормированию.

Материалы и методы исследования

В статье использованы данные собственных исследований о распределении плутония в органах и тканях умерших работников радиохимических заводов. Методы посмертной радиометрии подробно изложены ранее [5]. В настоящей работе суммированы и обобщены данные предыдущей работы [8] и более поздних исследований, в результате которых удалось дополнительно определить коэффициенты отложения внепочечного плутония для органов и тканей с низким уровнем депонирования. Анализ дополнительного материала подтвердил ранее установленный факт, что распределение плутония во внепочечной части организма не зависит от физико-химических форм ингалируемых промышленных соединений нуклида [8]. В связи с этим данные об относительных концентрациях и коэффициентах отложения в органах и тканях были усреднены для персонала различных производств.

При расчете эффективных эквивалентных доз использованы значения взвешивающих факторов (w_T), приведенные в Публикации 30 МКРЗ. Кроме шести органов и тканей, для которых в Публикации рекомендованы численные значения этих показателей, при вычислении ЭЭД был применен весовой множитель $w_T=0,06$ для следующих тканей, обладающих наиболее высокой относительной концентрацией: печени, селезенки, надпочечников, почек и сердца (табл. 1).

Эффективную эквивалентную дозу вычисляли по формуле:

$$H_E = \sum_T w_T H_{50,T},$$

где $H_{50,T}$ - ожидаемая эквивалентная доза (Зв) в органе, формирующаяся за 50 лет после однократного поступления нуклида в органы дыхания.

В основу расчета H_E и $H_{50,T}$ положена дозиметрическая модель легочного клиренса промышленных соединений плутония [7], особенностью которой является отсутствие зависимости периода полувыведения нуклида из пульмонального отдела от формы химического соединения, в которое входит вещество, а также то, что уровень резорбции нуклида из верхних отделов дыхательного тракта пропорционален величине транспортабельности S , определяемой методом диализа. Расчеты выполнены для аэрозолей с АМАД=1 мкм, $S_1=3\%$ и $S_2=0,3\%$. Эти значения транспортабельности отвечают соединениям, соответственно относительно растворимым (нитрат, хлорид) и труднорастворимым (оксиды), что по классификации МКРЗ отвечает классам соответственно W и Y . При расчете $H_{50,T}$ учитывали численные значения коэффициентов отложения плутония в экстрапульмональной области организма, приведенные в таблице 1.

Таблица 1
Относительные концентрации и коэффициенты отложения внелегочного
плутония в органах и тканях у персонала

Орган, ткань	Количество исследованных органов	Относительная концентрация* $\bar{X} \pm \sigma$	Коэффициенты отложения, %
Печень	502	$9,7 \pm 4,3$	32,8
Кости	502	$4,0 \pm 2,3$	57,2
Селезенка	492	$1,2 \pm 0,3$	0,33
Гонады:			
мужские	48	$0,91 \pm 0,49$	0,046
женские	26	$0,81 \pm 0,34$	0,013
Надпочечники	42	$0,74 \pm 0,34$	0,015
Почки	498	$0,60 \pm 0,17$	0,27
Щитовидная железа	73	$0,52 \pm 0,38$	0,015
Красный костный мозг	9	$0,35 \pm 0,18$	0,75
Сердце	498	$0,34 \pm 0,19$	0,17
Желчный пузырь	29	$0,32 \pm 0,2$	0,021
Поджелудочная железа	84	$0,21 \pm 0,14$	0,030
Мышцы	500	$0,20 \pm 0,07$	8,34
Молочные железы	7	$0,03 \pm 0,014$	0,015

* За единицу принята средняя концентрация плутония, обнаруженного во внелегочной части организма.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные оценки для двух классов соединений представлены в таблице 2. Эти данные показывают, что величина ЭЭД слабо зависит от транспортабельности промышленных аэрозолей плутония: для $S_1=3\%$ она составляет 111 мкЗв/Бк, для $S_2=0,3\%$ - 92 мкЗв/Бк. При этом для обоих типов соединений эквивалентная доза облучения легкого оказалась одинаковой, что является следствием модели легочного клиренса, согласно которой выведение нуклида не зависит от химической формы аэрозоля. Вследствие медленного выведения, предсказываемого моделью, легкое является органом, вносящим наибольший вклад в эффективную эквивалентную дозу. Так, при поступлении соединений класса W облучение легкого вносит в ЭЭД - 45,8 %, а при поступлении соединений класса Y - 55,7 %. Величина ЭЭД будет обусловлена в еще большей степени облучением легкого, если принять во внимание активность, накопленную в трахеобронхиальных лимфоузлах. В публикации 30 МКРЗ рекомендуется с целью учета облучения, создаваемого инкорпорированным нуклидом в легочных лимфоузлах, рассчитывать дозу для так называемого составного легкого, включающего трахеобронхиальный и альвеолярный отделы вме-

сте с легочными лимфоузлами. Массу составного органа предлагается принимать равной 1000 г, а взвешивающий фактор $W_T=0,12$. Согласно этой рекомендации были вычислены значения ЭЭД для "составного легкого" (см. табл. 2). Из данных таблицы 2 видно, что ЭЭД при "составном легком" увеличивается на 7 % для $S_1=3\%$ и на 38 % для $S_2=0,3\%$ и составляет 119 и 127 мкЗв/Бк. При этом вклад в ЭЭД за счет облучения, создаваемого плутонием в легочных лимфоузлах, увеличивается на 3,4 % ($S_1=3\%$) и на 12,3 % ($S_2=0,3\%$).

Второй наиболее значимой по вкладу в ЭЭД величиной является доза облучения клеток костной поверхности. На ее долю приходится 30,2 % для транспортабельных и 24,5 % для низкотранспортабельных форм плутония. Обе ткани - легочная и костная поверхности - обуславливают 76-80 % эффективной эквивалентной дозы при поступлении промышленных аэрозолей плутония в органы дыхания.

Данные таблицы 2 указывают на приблизительно одинаковые вклады в ЭЭД доз облучения печени и красного костного мозга, составляющих 7,5-9,2 % (печень), 8,3-9,9 % (красный костный мозг).

Уровни облучения остальных органов и тканей обуславливают 4,04-4,88 % эффективной эквивалентной дозы.

Таблица 2

Эффективная эквивалентная доза (10^{-4} Зв) и ее составляющие при ингаляционном поступлении 1 Бк/год промышленных соединений плутония

Орган, ткань	W_T	$S_T=3\%$ (класс W)			$S_T=0,3\%$ (класс Y)		
		$H_{50,T}$	$W_T \times H_{50,T}$	вклад, %	$H_{50,T}$	$W_T \times H_{50,T}$	вклад, %
Легкое	0,12	4,25	0,510	45,8	4,25	0,510	55,7
"Составное легкое"	0,12	(4,88)	(0,586)	(49,2)	(7,18)	(0,862)	(68)
	0,12	(4,88)	(0,586)	(49,2)	(7,18)	(0,862)	(68)
Клетки костной поверхности	0,03	11,19	0,336	30,2	7,48	0,224	24,5
Красный костный мозг	0,12	0,907	0,110	9,9	0,624	0,076	8,3
Печень	0,06	1,706	0,102	9,2	1,143	0,069	7,5
Гонады	0,25	0,114	0,028	2,5	0,0776	0,019	2,1
Селезенка	0,06	0,1706	0,0102	0,92	0,1143	0,0069	0,75
Надпочечники	0,06	0,0997	0,0060	0,54	0,0667	0,0040	0,44
Почки	0,06	0,0810	0,0049	0,44	0,0543	0,0033	0,36
Сердце	0,06	0,0452	0,0027	0,24	0,0303	0,0018	0,20
Щитовидная железа	0,03	0,0698	0,0021	0,19	0,0467	0,0014	0,15
Молочные железы	0,15	0,0039	0,0006	0,05	0,0026	0,0004	0,04
H_E			1,1125			0,9158	
H_E (при "составном легком")			1,1885			1,268	

Результаты настоящего исследования, характеризующие структуру ЭД у персонала, отличаются от данных, полученных ранее в статье [6], в которой вклад облучения легких и костей в эффективную эквивалентную дозу составляет менее 50 %, а облучение печени - около 30. Эти расхождения объясняются тем, что в работе [6] не учтена динамика 50-летнего формирования дозовой нагрузки на органы и ткани после однократного поступления и вместо эквивалентной дозы на клетки костной поверхности (как это рекомендуется в Публикации 30 МКРЗ) рассчитана средняя эквивалентная доза на всю костную ткань.

Полученные результаты использованы нами для расчета величины предельно допустимого годового поступления (ПДП) в органы дыхания при двух подходах к нормированию облучения персонала. Один из них базировался на непревышении предельно допустимой дозы на критический орган. Другой основывался на использовании двух критериев, рекомендованных Публикацией 26: непре-

вышения значения эффективной эквивалентной дозы 0,05 Зв (для ограничения стохастических эффектов) и непревышения одного, одинакового для всех органов значения эквивалентной дозы 0,5 Зв (для предупреждения нестохастических эффектов).

Из данных, приведенных в таблице 3, следует, что значение ПДП, рассчитанное исходя из ПДД облучения критического органа на основании собственных данных о метаболизме промышленных соединений для класса W , в 3,3 раза выше значения, рекомендуемого НРБ-76. Это связано с тем, что использованные нами значения доли нуклида, поступающей из крови в кость, равное $0,57 \times 0,9 = 0,51$, а также периода полувыведения из этой ткани - 53 года [7], ниже соответствующих значений 0,8 и 200 лет, принятых при расчетах в НРБ-76. По этой же причине полученный нами норматив по нестохастическим эффектам для относительно растворимых соединений оказался в 2,25 раза выше рекомендуемого МКРЗ.

Таблица 3

Предельно допустимое годовое поступление (Бк/год)

Класс соединений	НРБ-76	По данным собственных исследований	МКРЗ-30	По данным собственных исследований
W	78 (кость)	260 (кость)	200 (костные поверхности 400*)	450 (костные поверхности 450*)
Y	1740 (легкое)	350 (легкое)	500 (костные поверхности 600*)	660 (костные поверхности 540*)

* - Ограничение стохастических эффектов.

Таким образом, численное значение ПДП, равное 78 Бк/год, оказывается в несколько раз ниже значений, полученных при всех других подходах к нормированию. В связи с этим, казалось бы, что рекомендуемая НРБ-76 величина $ДК_A=0,033 \text{ Бк/м}^3$, полученная фактически с большим запасом, подлежит пересмотру. Однако данные эпидемиологических исследований, свидетельствующие об учащении рака легкого у человека при аккумулярованных дозах в органе, близких к допустимым уровням, указывают на необходимость проявить осторожность в этом вопросе [1, 7] и до более глубокого изучения проблемы в целом изменение рекомендуемого НРБ-76 норматива $ДК_A$ в настоящее время нецелесообразно.

Заключение

Величина эффективной эквивалентной дозы, рассчитанная на основании собственных данных по распределению промышленных соединений плутония в организме человека с использованием взвешивающих факторов, рекомендованных Публикацией 30 МКРЗ для оценки риска стохастических эффектов облучения, слабо зависит от формы химического соединения вдыхаемого аэрозоля. Приблизительно половина величины ЭЭД при ингаляции обусловлена дозой облучения легких. Вклад в ЭЭД дозы облучения клеток костных поверхностей при этом составляет 24-30 %.

Оценка величины предельно допустимого поступления (ПДП) относительно растворимых соединений плутония (класс **И**), произведенная исходя из дозового предела для ЭЭД, приводит к менее жесткому ограничению уровня поступления.

Литература

1. Кошурникова Н.А. Отдаленные последствия вдыхания плутония-239 у человека и животных: Дис. докт. мед. наук М., 1978, 435с.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ-76 и основные Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72180. М., 1981, 96 с.
3. Основные концепции и величины, используемые МКРЗ. Публикация 42 МКРЗ: Пер. с англ./Под ред. А.А.Моисеева и др. М., 1987, с. 53-80.
4. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением. Публикация 30 МКРЗ. Ч. 1: Пер. с англ./Под ред. П.Рамзаева, А.А.Моисеева. М., 1982, 135 с.
5. Суслова К.Г., Хохряков В.Ф., Кошурникова Н.А. Америций-241 и плутоний-239. Определение соотношения их содержания в образцах секционного материала: Методические указания. М., 1983 г. 11 с.
6. Терновский И.А., Кошурникова Н.А., Хохряков В.Ф. К оценке эффективности эквивалентной дозы у персонала и населения при ингаляционном поступлении плутония//Проблемы охраны труда и окружающей среды на предприятиях атомной промышленности./Под ред. Л.А.Булдакова, Ф.Д.Третьякова. Вып. 1. М., 1986. С. 153-159.
7. Хохряков В.Ф. Обмен промышленных соединений плутония в организме человека. Моделирование транспорта и разработка косвенной дозиметрии: Дис. докт. биол. наук. М., 1984. 322 с.
8. Хохряков В.Ф., Кудрявцева Т.И. Распределение плутония-239 в организме работников радиохимического производства//Бюл. радиац. мед. 1985. N 2. С. 74-80.
9. ICRP Publication 26. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, 4, No 3, Pergamon Press, Oxford-New York-Frankfurt (1978). 117 p.