

УДК 539.16.04  
© 2007

## ОЦЕНКА ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОСТИ ДПР ТОРОНА В РЕСПИРАТОРНОМ ТРАКТЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

*М.В. Жуковский, А.А. Екидин, И.В. Ярмошенко*

*Россия, г. Екатеринбург, Институт промышленной экологии УрО РАН*

*А.А. Баранова, В.В. Бастриков*

*Россия, г. Екатеринбург, УГТУ-УПИ*

Исследована растворимость дочерних продуктов распада торона, отобранных на рабочих местах пункта хранения монацитового концентрата, в имитаторе биологических жидкостей. Растворимость реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  может быть описана двухэкспоненциальной зависимостью со скоростью быстрого растворения  $\lambda_f=145 \text{ сут}^{-1}$ , скоростью медленного растворения  $\lambda_s=2,0 \text{ сут}^{-1}$  и долей быстрорастворимой фракции  $k=0,3$ . Оцененные значения коэффициента дозового перехода от экспозиции по эквивалентной объемной активности торона к эффективной дозе лежат в интервале 80–260 нЗв/(Бк·ч·м<sup>-3</sup>) и существенно (в 3–8 раз) превышают значения, рекомендованные НКДАР ООН. Показано, что наиболее перспективным методом индивидуального мониторинга поступления аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  является измерение полной активности нуклида в теле человека.

При оценке уровня радиационной безопасности при воздействии природных радионуклидов традиционно большое внимание уделяется  $^{222}\text{Rn}$  и его дочерним продуктам распада (ДПР). Другому изотопу –  $^{220}\text{Rn}$  (торону) уделяется гораздо меньше внимания и зачастую считается, что его влиянием на облучение населения и персонала можно пренебречь. Вместе с тем, в ряде специфических ситуаций, ингаляционное поступление ДПР торона (в первую очередь наиболее долгоживущего нуклида  $^{212}\text{Pb}$ ) может являться доминирующим источником внутреннего облучения на рабочем месте.

Примером такого производства является пункт временного хранения монацитового концентрата – предприятие “Уралмонацит”, расположенный в Красноуфимском районе Свердловской области. Содержание в монаците  $\text{ThO}_2$  лежит в пределах 5–10 %,  $\text{U}_3\text{O}_8 \sim 0,2$  %. С 1960 г. более 82000 т монацитового концентрата хранится в 19 деревянных складах и 4 металлических ангарах, ряд из которых находится в аварийном состоянии. В течение последних

двух лет над наиболее аварийными хранилищами начато возведение дополнительных металлических ангаров.

Проведенные нами исследования показали, что атмосфера складских помещений характеризуется экстремально высокими уровнями объемной активности (ОА) торона (1600–14000 Бк/м<sup>3</sup>) и эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) торона (от 60 до 700 Бк/м<sup>3</sup> в зависимости от склада и погодных условий). Столь высокие уровни ЭРОА торона на рабочем месте требуют корректного учета дозовой нагрузки от данного радиационного фактора и разработки методов мониторинга внутреннего облучения. Особую важность проблема оценки внутреннего облучения персонала приобретает в связи с необходимостью постройки новых стационарных хранилищ монацитового концентрата, перетаривания радиоактивного песка их деревянных ящиков в более технологичную и герметичную тару, а также с перспективой переработки данного материала для извлечения из него тория и редкоземельных элементов.

В настоящее время для связи экспозиции по ДПР торона с эффективной дозой используются коэффициенты дозового перехода (КДП), рекомендованные в Докладах НКДАР ООН – 32–40 нЗв/(Бк·ч·м<sup>-3</sup>) [1, 2] и в целом соответствующие соединениям типа Б при ингаляционном поступлении [3]. Вместе с тем необходимо отметить, что использование для оценок численных значений КДП легочного типа Б не является достаточно обоснованным. В работе [3] было показано, что численное значение КДП от экспозиции по ДПР торона к эффективной дозе в существенной мере зависит от типа радионуклида при ингаляционном поступлении. От транспортабельности ДПР торона (в первую очередь <sup>212</sup>Pb) также зависит динамика распределения радионуклидов по органам и тканям человека и скорость их выведения с калом и мочой.

При проведении экспериментов по оценке транспортабельности ДПР торона в респираторном тракте особое внимание следует уделять соответствию свойств изучаемых объектов характеристикам реальных аэрозолей на рабочих местах и в жилищах. В связи с этим эксперименты по изучению свойств аэрозолей, отобранных в лабораторных условиях (замкнутые боксы, циркуляционные камеры и т.д.) не будут адекватно отображать реальную ситуацию. Вместе с тем, на подавляющем большинстве рабочих мест и, тем более, жилых помещений, уровень объемной активности ДПР торона в воздухе недостаточен для проведения экспериментов подобного рода. В данной ситуации наличие предприятия “Уралмонацит” со столь уникальной радиационной обстановкой, в том числе с высокими уровнями ЭРОА торона, позволило провести серию экспериментов по оценке типа соединений <sup>212</sup>Pb при ингаляционном поступлении в условиях реальных рабочих мест.

В литературе достаточно подробно описаны методики оценки транспортабельности аэрозолей плутония в респираторном тракте по скорости их растворения в растворах, имитирующих биологические жидкости [4, 5]. В данных исследованиях активность, переходящая с аэрозольного фильтра в раствор, оценивалась при помощи радиохимического анализа раствора. К сожалению относительно малый период полураспада <sup>212</sup>Pb не позволил применить в полной

мере данную отработанную методику и схема эксперимента была несколько изменена.

Для оценки типа радиоактивных аэрозолей ДПР торона при ингаляционном поступлении была поставлена специальная серия экспериментов. В атмосфере складов предприятия “Уралмонацит” в реальных производственных условиях были отобраны пробы радиоактивных аэрозолей на аэрозольные фильтры АФА-РСР-20. Для обеспечения достаточной активности пробы прокачка воздуха производилась в течение ~3 ч со скоростью прокачки 20 л/мин. В связи с необходимостью транспортировки пробы интервал между отбором пробы и началом эксперимента по изучению растворимости <sup>212</sup>Pb составлял около 3 ч.

Для оценки растворимости ДПР торона изучалась динамика растворения радиоактивного <sup>212</sup>Pb в имитаторе биологических жидкостей (растворе Рингера). Для этого аэрозольный фильтр в специальном держателе помещался в раствор, температура которого поддерживалась при помощи термостата равной 37 °С. После выдержки в течение некоторого времени в растворе фильтр промывался чистым раствором при той же температуре, а затем активность <sup>212</sup>Pb на фильтре измерялась при помощи гамма-спектрометра. После набора спектра фильтр снова помещался в раствор и процесс растворения продолжался.

В результате экспериментов было получено, что кинетика перехода радионуклида <sup>212</sup>Pb из материала фильтра в раствор не может быть описана при помощи простой кинетики растворения. Уменьшение активности <sup>212</sup>Pb на фильтре, помещенном в раствор Рингера (рис. 1), наилучшим образом аппроксимируется при помощи суперпозиции двух экспоненциальных зависимостей, описываемых уравнением

$$\frac{A(t)}{A_0} = k \cdot \exp[-(\lambda_r + \lambda_f)t] + (1-k) \cdot \exp[-(\lambda_r + \lambda_s)t], \quad (1)$$

где  $A(t)$  – активность <sup>212</sup>Pb на фильтре в момент времени  $t$ ;

$A_0$  – активность <sup>212</sup>Pb на фильтре при  $t=0$ ;

$\lambda_r$  – постоянная распада <sup>212</sup>Pb;

$\lambda_f$  – постоянная времени растворения быстрой компоненты осевшей на фильтр активности <sup>212</sup>Pb;

$\lambda_s$  – постоянная времени растворения аз-

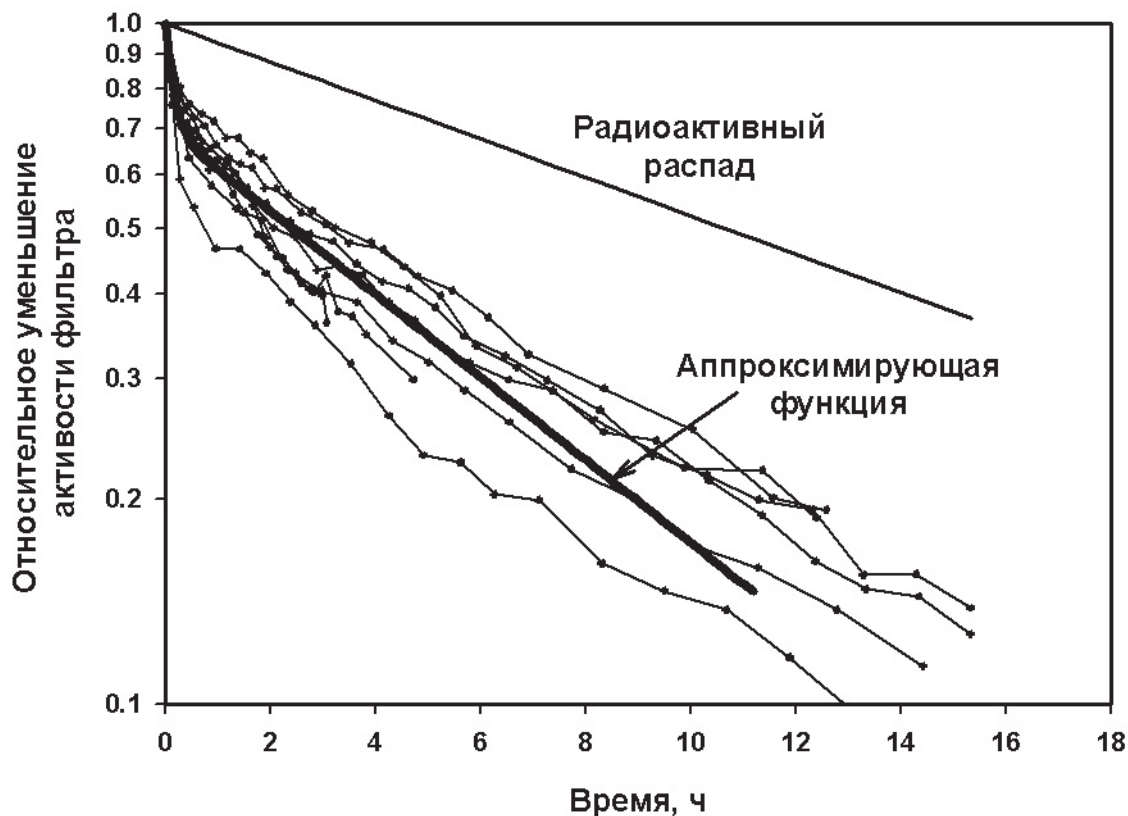


Рис. 1. Динамика уменьшения активности аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  на фильтре, помещенном в раствор Рингера

розольной компоненты с медленной скоростью растворения  $^{212}\text{Pb}$ ;

$k$  — доля быстрорастворимой компоненты в общей активности, осевшей на фильтр.

Параметры кинетики растворения  $^{212}\text{Pb}$  приведены в табл. 1.

Для проверки того, что быстрая компонента кинетики растворения обусловлена именно растворением, а не механическим выносом аэрозольных частиц в раствор был поставлен специальный контрольный эксперимент, в котором в процессе растворения  $^{212}\text{Pb}$  фильтр помещался в дополнительный чехол из поролон толщиной 2–3 мм. Перед каждым измерением производился отжим раствора из поролон,

находившегося вокруг фильтра. Считалось, что при механическом выносе аэрозольных частиц с фильтра они будут задержаны в поролоновом чехле. Было получено, что в целом кинетика растворения в данных условиях также имеет сложный вид и описывается уравнением (1). Постоянные времени как быстрого, так и медленного растворения, как можно было ожидать, имели значения статистически значимо ниже, чем для растворения с открытого фильтра. Для растворения с дополнительным барьером доля быстрой компоненты оказалась неожиданно оказалась даже выше ( $k' = 0,58$ ), чем в основном эксперименте, что может быть обусловлено малым количеством замеров в дополнительной серии экспериментов ( $n = 4$ ).

Таблица 1

Параметры кинетики растворения осевших на фильтр аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  в растворе Рингера при 37 °С (8 образцов)

Параметр	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
$\lambda_r$	145	79	278	60
$\lambda_s$	2,0	1,1	3,9	1,0
k	0,30	0,21	0,45	0,08

Полученное в результате наших экспериментов численное значение постоянной времени медленного растворения  $\lambda_s = 2,0 \text{ сут}^{-1}$  находится в хорошем согласии с результатами работы [6]. В этой работе на основании анализа данных по ингаляционному поступлению искусственных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  в организм человека, полученных на добровольцах, сделана оценка постоянной времени перехода радионуклида из респираторного тракта в жидкости организма, которая составила  $\lambda = 1,7 \pm 0,3 \text{ сут}^{-1}$ . В работе [6] была использована одноэкспоненциальная модель перехода.

Полученная в результате экспериментов информация позволяет оценить поведение ДПР торона при их отложении в респираторном тракте человека. На основании полученных данных была выдвинута гипотеза о том, что скорость перехода радиоактивных аэрозолей из отделов респираторного тракта в жидкости организма в первом приближении может быть описана той же кинетикой, что и их растворение в растворе Рингера.

В соответствии с принятыми в МКРЗ подходами переход отложившихся в респираторном тракте веществ в жидкости организма схематично изображен на рис. 2 [7, 8]. Формально, основной моделью растворения отложившихся в респираторном тракте веществ считается модель, представленная на рис. 2б. Для учета различной растворимости веществ, поступивших в респираторный тракт в виде аэрозолей, их условно разделяют на три типа веществ при ингаляционном поступлении: быстрорастворимые вещества – тип Б; вещества с промежуточной скоростью растворения – тип П; вещества с медленной скоростью растворения – тип М [7].

В нашей ситуации дальнейшую оценку

численных значений дозовых коэффициентов для ингаляционного поступления  $^{212}\text{Pb}$  можно осуществлять двумя различными подходами:

1. Аппроксимировать поведение реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  при растворении некой суперпозицией аэрозолей типа Б и П и использовать для дозиметрических расчетов справочные данные по дозовым коэффициентам  $^{212}\text{Pb}$  [9];

2. Произвести расчет дозовых коэффициентов для ингаляционного поступления реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  с использованием схемы растворения аэрозолей, изображенной на рис. 2а и параметров растворения, представленных в табл. 1, ( $f_r = k = 0,3$ ;  $s_r = \lambda_r = 145 \text{ сут}^{-1}$ ;  $s_s = \lambda_s = 2 \text{ сут}^{-1}$ ).

Первый подход, использующий табулированные значения дозовых коэффициентов не позволяет учесть влияние на их численные значения таких факторов, как тип дыхания и интенсивность работы [7]. В связи с этим для расчета дозовых коэффициентов при ингаляционном поступлении свинца был выбран второй подход. В основу расчетной схемы положены модели респираторного и желудочно-кишечного тракта МКРЗ, а также биокинетическая модель поведения свинца в организме [7, 10, 11].

Для расчета динамики поведения  $^{212}\text{Pb}$  была составлена система линейных дифференциальных уравнений, описывающая содержание нуклида в различных отделах респираторного тракта, желудочно-кишечного тракта, органах и тканях организма, а также его выведение с калом и мочой. Отложение радиоактивных аэрозолей было оценено для различной дисперсности аэрозолей, типа дыхания работника и интенсивности выполняемой работы с использованием модели респираторного тракта МКРЗ [7]. Для расчета динамики

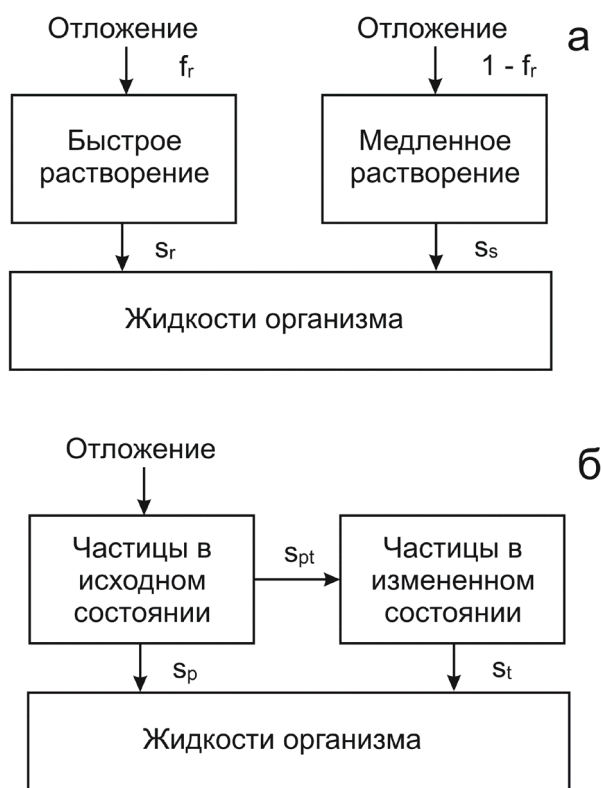


Рис. 2. Схемы растворения отложившихся в респираторном тракте аэрозольных частиц без учета образования веществ в связанном состоянии

поведения радионуклидов в организме и их выведения из организма с калом и мочой система уравнений, описывающая динамику поведения нуклида в организме, решалась численными методами при помощи специализированного программного пакета WinAct, разработанного в Окриджской национальной лаборатории США. Расчет поглощенных и эквивалентных доз на органы и ткани был выполнен при помощи специализированного программного пакета DCAL 8.4, также разработанного в Окриджской национальной лаборатории. Параллельно с расчетами по программным пакетам Окриджской национальной лаборатории были выполнены расчеты с использованием оригинального, разработанного нами программного пакета, позво-

ляющего рассчитывать дозы на респираторный тракт с варьированием параметров расчетной модели случайным образом, что дает возможность в дальнейшем оценить неопределенности дозовых коэффициентов.

Результаты расчетов дозовых коэффициентов на все органы и ткани человека при различных сценариях ингаляционного поступления аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  для динамики растворимости, основывающейся на экспериментальных данных, представлены в табл. 2–4.

Сопоставление численных значений дозовых коэффициентов со справочными данными для стандартных форм ингаляционного поступления аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  показывает, что, как и следует ожидать, эти значения лежат между значениями дозовых коэффициентов для соединений  $^{212}\text{Pb}$  типа Б и типа П.

Были сделаны оценки неопределенностей численных значений дозовых коэффициентов при ингаляционном поступлении аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  для различных отделов респираторного тракта, обусловленных неопределенностью численных значений параметров растворимости аэрозолей. В связи с относительно небольшим количеством экспериментальных точек по определению параметров растворимости аэрозолей определить закон их распределения не представляется возможным. В связи с этим было принято, что значения приведенных в табл. 1 параметров могут быть представлены либо равномерным, либо нормальным распределением. При этом для таких параметров, как доля быстрорастворимой компоненты в общей активности  $k$  и скорости быстрого растворения  $\lambda_f$  были использованы экспериментально определенные значения стандартного отклонения, а для медленной скорости растворения было использовано усеченное нормальное распределение так, чтобы численные значения параметра  $\lambda_s$  оставались положительными.

Расчеты были выполнены методом Монте-Карло при помощи специально разработанной программы. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с результатами расчетов для средних значений параметров растворимости аэрозолей, выполненных по программе DCAL 8.4. Пример расчетов, выполненных для носового типа дыхания, легкой работы и  $\text{АМАД}=1 \text{ мкм}$ , представлен на рис. 3.

Таблица 2

 Дозовые коэффициенты при ингаляционном поступлении  
 реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ , Зв/Бк (AMAD = 0,3 мкм)

Органы и ткани	Тяжелая работа		Легкая работа	
	Ротоносовое дыхание	Носовое дыхание	Ротоносовое дыхание	Носовое дыхание
Стенки желудка	1,87E-09	1,91E-09	1,90E-09	2,04E-09
Стенки тонкого кишечника	1,94E-09	2,06E-09	1,97E-09	2,19E-09
Верхний отдел толстого кишечника	2,32E-09	2,78E-09	2,35E-09	2,93E-09
Нижний отдел толстого кишечника	2,38E-09	2,92E-09	2,41E-09	3,07E-09
Почки	4,29E-08	4,25E-08	4,35E-08	4,55E-08
Печень	1,19E-08	1,19E-08	1,20E-08	1,27E-08
Верхние дыхательные пути ET1	4,07E-05	1,51E-04	4,36E-05	1,60E-04
Верхние дыхательные пути ET2	1,24E-08	1,89E-08	1,28E-08	1,96E-08
Лимфатические узлы ET	1,99E-09	2,44E-09	2,03E-09	2,60E-09
Базальные клетки бронхиального отдела	5,16E-07	4,43E-07	4,85E-07	4,21E-07
Секреторные клетки бронхиального отдела	9,49E-07	8,15E-07	8,95E-07	7,77E-07
Бронхиолярный отдел	7,42E-07	6,89E-07	8,45E-07	7,93E-07
Альвеолярный отдел	5,47E-08	5,12E-08	5,47E-08	5,48E-08
Лимфатические узлы торакального отдела	1,88E-09	1,88E-09	1,91E-09	2,01E-09
Легкие в целом	5,09E-07	4,56E-07	5,29E-07	4,82E-07
Костные поверхности	4,47E-08	4,47E-08	4,54E-08	4,78E-08
Красный костный мозг	5,68E-09	5,68E-09	5,76E-09	6,08E-09
Эффективная доза	6,42E-08	5,90E-08	6,66E-08	6,24E-08



Таблица 3

Дозовые коэффициенты при ингаляционном поступлении реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ , Зв/Бк (AMAD = 1,0 мкм)

Органы и ткани	Тяжелая работа		Легкая работа	
	Ротоносное дыхание	Носовое дыхание	Ротоносное дыхание	Носовое дыхание
Стенки желудка	2,38E-09	2,26E-09	2,38E-09	2,30E-09
Стенки тонкого кишечника	2,61E-09	2,76E-09	2,60E-09	2,79E-09
Верхний отдел толстого кишечника	3,74E-09	5,02E-09	3,65E-09	5,03E-09
Нижний отдел толстого кишечника	3,96E-09	5,50E-09	3,86E-09	5,51E-09
Почки	5,18E-08	4,47E-08	5,22E-08	4,57E-08
Печень	2,95E-08	1,29E-08	1,47E-08	1,32E-08
Верхние дыхательные пути ET1	1,28E-04	4,65E-04	1,37E-04	4,94E-04
Верхние дыхательные пути ET2	3,32E-08	4,59E-08	3,00E-08	4,93E-08
Лимфатические узлы ET	2,76E-09	3,88E-09	2,81E-09	4,04E-09
Базальные клетки бронхиального отдела	1,74E-06	9,86E-07	1,28E-06	6,14E-07
Секреторные клетки бронхиального отдела	3,19E-06	1,80E-06	2,34E-06	1,12E-06
Бронхиоллярный отдел	6,25E-07	4,15E-07	6,78E-07	4,39E-07
Альвеолярный отдел	5,51E-08	3,72E-08	5,87E-08	4,08E-08
Лимфатические узлы торакального отдела	2,31E-09	2,03E-09	2,32E-09	2,07E-09
Легкие в целом	1,05E-06	6,15E-07	8,49E-07	4,49E-07
Костные поверхности	5,49E-08	4,89E-08	5,52E-08	4,99E-08
Красный костный мозг	6,97E-09	6,21E-09	7,01E-09	6,32E-09
Эффективная доза	1,31E-07	8,12E-08	1,07E-07	6,15E-08

Таблица 4

Дозовые коэффициенты при ингаляционном поступлении реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ , Зв/Бк (AMAD = 5,0 мкм)

Органы и ткани	Тяжелая работа		Легкая работа	
	Ротоносное дыхание	Носовое дыхание	Ротоносное дыхание	Носовое дыхание
Стенки желудка	3,9E-09	2,78E-09	3,77E-09	2,63E-09
Стенки тонкого кишечника	4,81E-09	3,74E-09	4,61E-09	3,57E-09
Верхний отдел толстого кишечника	8,89E-09	7,99E-09	8,41E-09	7,73E-09
Нижний отдел толстого кишечника	9,75E-09	8,91E-09	9,21E-09	8,63E-09
Почки	7,58E-08	4,92E-08	7,37E-08	4,62E-08
Печень	2,21E-08	1,48E-08	2,14E-08	1,39E-08
Верхние дыхательные пути ET1	3,20E-04	9,88E-04	3,49E-04	9,88E-04
Верхние дыхательные пути ET2	1,12E-07	9,60E-08	1,03E-07	8,93E-08
Лимфатические узлы ET	4,71E-09	6,29E-09	4,73E-09	6,15E-09
Базальные клетки бронхиального отдела	3,46E-06	1,35E-06	2,75E-06	6,76E-07
Секреторные клетки бронхиального отдела	6,34E-06	2,46E-06	5,05E-06	1,24E-06
Бронхиолярный отдел	8,63E-07	3,08E-07	9,01E-07	2,77E-07
Альвеолярный отдел	4,57E-08	2,03E-08	4,91E-08	2,08E-08
Лимфатические узлы торакального отдела	3,52E-09	2,32E-09	3,40E-09	2,17E-09
Легкие в целом	1,93E-06	7,44E-07	1,62E-06	4,18E-07
Костные поверхности	8,37E-08	5,61E-08	8,11E-08	5,28E-08
Красный костный мозг	1,06E-08	7,12E-09	1,03E-08	6,70E-09
Эффективная доза	2,41E-07	1,01E-07	2,03E-07	8,13E-08



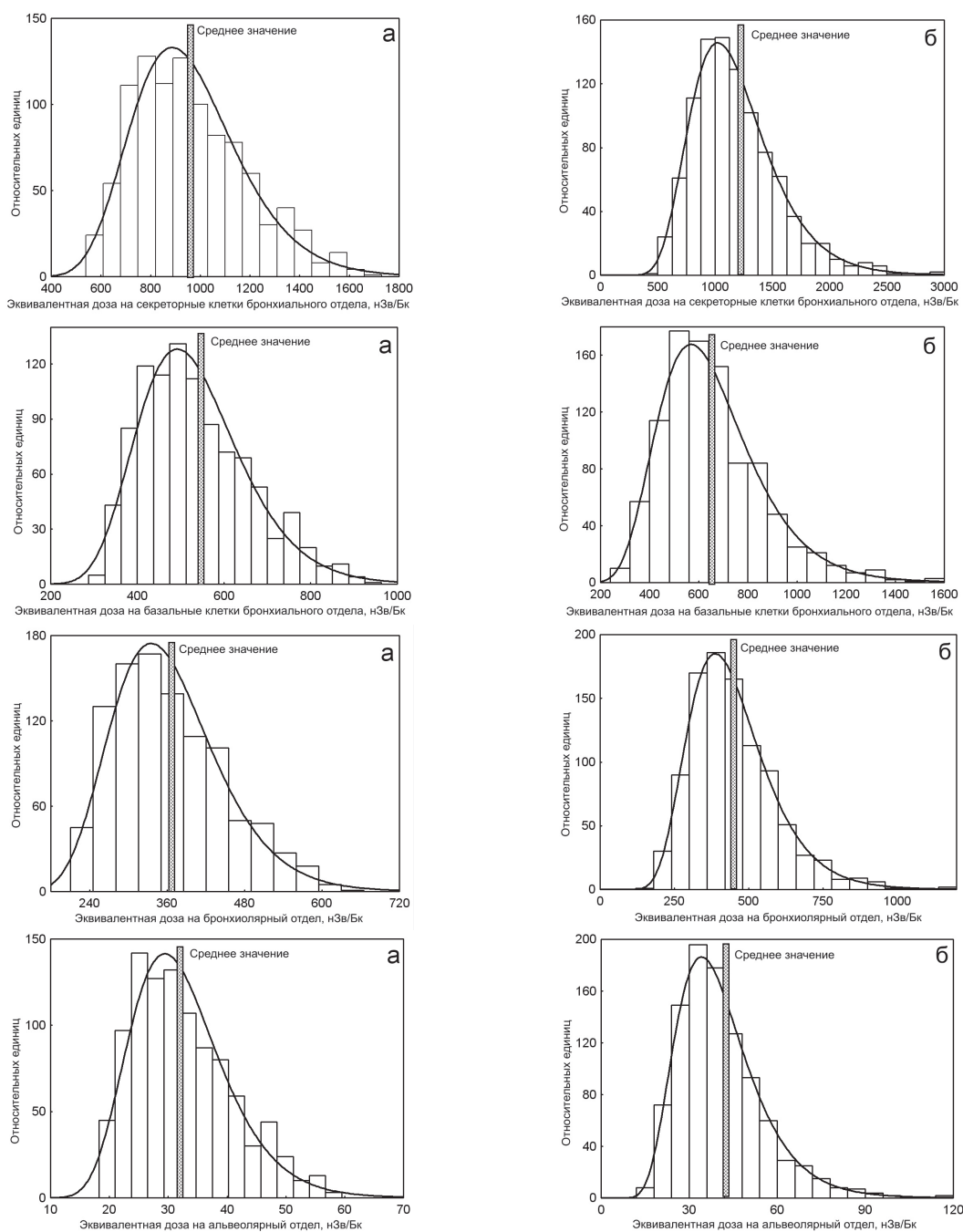


Рис. 3. Неопределенности численных значений дозовых коэффициентов для различных отделов респираторного тракта при ингаляционном поступлении аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  (а – равномерное распределение параметров растворимости, б – нормальное распределение параметров растворимости)

При моделировании распределения параметров растворимости нормальным распределением распределение дозовых коэффициентов подчиняется логнормальному закону распределения со стандартным геометрическим отклонением 1,4. При равномерном распределении параметров растворимости распределение дозовых коэффициентов подобно логнормальному, но статистически значимо отличается от него.

Численные значения КДП от экспозиции по ДПР торона к эффективной дозе определяются следующими факторами:

- численными значениями дозовых коэффициентов для реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ , зависящих от АМАД аэрозолей, интенсивности дыхания и типа дыхания (табл. 2–4);
- численными значениями дозовых коэффициентов для аэрозолей  $^{212}\text{Bi}$ , зависящими от тех же параметров, что и дозовые коэффициенты для  $^{212}\text{Pb}$ , а также от неизвестного типа соединения при ингаляционном поступлении (тип Б или П);
- кратностью воздухообмена в помещении и константой взаимодействия с аэрозолями, определяющими сдвиг равновесия между ДПР торона.

Для оценки численных значений КДП был использован подход, ранее применявшийся в работе [3] для оценки численных значений КДП для стандартных типов соединений  $^{212}\text{Pb}$  и  $^{212}\text{Bi}$ . Была составлена система уравнений, описывающая объемную активность отдельных ДПР торона, находящихся как в виде неприсоединенной фракции, так и в виде связанных с аэрозольными частицами радионуклидов [11]. Далее была рассчитана объемная активность “свободной” и “аэрозольной” фракций для всех ДПР торона ThA – ThC ( $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$  и  $^{212}\text{Bi}$ ) в зависимости от изменения кратности воздухообмена в помещениях и константы взаимодействия с аэрозолями в типичном для этих параметров диапазоне [12].

Для неприсоединенной к аэрозолям фракции ДПР торона (дающей минимальный вклад в дозовый коэффициент) были использованы данные расчетов для АМТД аэрозолей 1 нм и соединений типа Б. Для аэрозольной фракции соединений  $^{212}\text{Bi}$  расчеты КДП были выполнены для двух вариантов расчета – соединений

типа Б и типа П. Для данных типов соединений  $^{212}\text{Bi}$  дозовые коэффициенты были рассчитаны с учетом интенсивности дыхания и типа дыхания. Примеры результатов расчета КДП от экспозиции по ЭРОА торона приведены на рис. 4, полученные значения лежат в интервале 80–260 нЗв/(Бк·ч·м<sup>-3</sup>).

Следует отметить, что полученные значения КДП от экспозиции по ЭРОА торона к эффективной дозе существенно, в несколько раз превышают значения, рекомендованные НКДАР ООН [1, 2] 32–40 нЗв/(Бк·ч·м<sup>-3</sup>) и используемые в отечественной практике нормирования облучения от природных источников ионизирующего излучения. Это в первую очередь связано с увеличением используемых при расчете значений дозовых коэффициентов для ингаляционного поступления радиоактивных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ . Дополнительными факторами, играющими существенную роль в оценке численного значения КДП, являются дисперсность радиоактивных аэрозолей, интенсивность выполняемой работы и тип дыхания. Проведенные оценки показывают, что увеличение численных значений КДП приводит к тому, что ингаляционное облучение ДПР торона становится сопоставимым с уровнем внешнего облучения персонала предприятия “Уралмонацит”, что в соответствии с нормативными требованиями [13] требует организации индивидуального мониторинга внутреннего облучения персонала.

В работе [3] для оценки возможности организации мониторинга внутреннего облучения персонала предприятия “Уралмонацит” был выполнен расчет динамики удержания в организме и выведения с мочой радионуклида  $^{212}\text{Pb}$  для стандартных типов соединения при ингаляционном поступлении (Б, П и М). В данной работе был проведен аналогичный расчет для экспериментально оцененных параметров транспортабельности нуклида в респираторном тракте. Как уже отмечалось ранее [3], ожидаемое среднее значение поступления  $^{212}\text{Pb}$  за время рабочей смены оценивается около 1000 Бк. Период полураспада  $^{212}\text{Pb}$  сопоставим по порядку величины с продолжительностью рабочей смены. Поэтому стандартный вариант расчета выведения  $^{212}\text{Pb}$  из организма при однократном поступлении недостаточно адекватно соответствует реальной ситуации. В связи с этим при

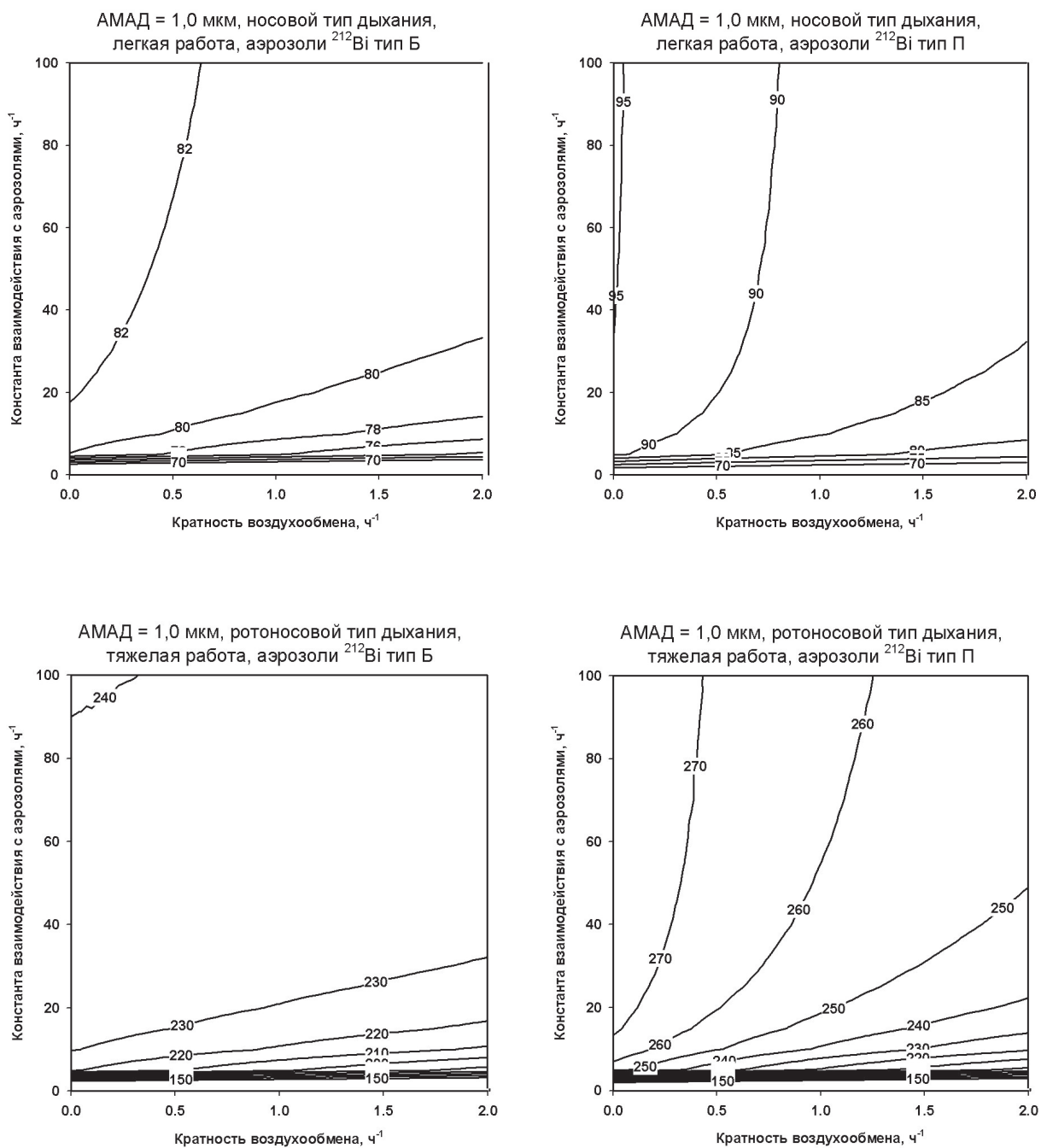


Рис. 4. Коэффициенты дозового перехода от экспозиции по ЭРОА торона к эффективной дозе для различных типов и интенсивности дыхания, а также типов соединения <sup>212</sup>Ві

расчетах принималось, что имеет место ингаляционное поступление радионуклида с постоянной скоростью в течение 6 ч (стандартная продолжительность рабочей смены).

Все расчеты были выполнены для параметров растворимости реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ , найденных в настоящей работе. Результаты расчетов приведены на рис 5. Результаты расчетов представлены в долях от поступления радионуклида за рабочую смену.

Дополнительный интерес для решения задач мониторинга внутреннего облучения представляет оптимизация периода сбора выделений, поскольку необходимо обеспечить не только максимальный сбор выделяемой активности, но и учитывать распад накапливающегося нуклида

$$A_{u,r}(\tau) = \int_0^{\tau} \dot{A}_{u,r}(t) \cdot \exp\left(-\frac{0,693 \cdot (\tau - t)}{T_{1/2}}\right) dt, \quad (2)$$

где  $A_{u,r}(\tau)$  – активность в собранной пробе мочи или кала через интервал времени  $\tau$ ;  
 $\dot{A}_{u,r}(t)$  – динамика выведения активности в мочу или кал.

Результаты расчетов представлены в табл. 5. Для интервалов времени, приведенных в таблице, начало отсчета соответствует началу поступления радионуклида в организм (начало рабочей смены).

Проведенный расчетный анализ, при условии равномерного поступления нуклида в течение рабочей смены (6 ч), показал, что наиболее перспективным и чувствительным методом определения поступления  $^{212}\text{Pb}$  в организм работников представляется прямое измерение активности нуклида, содержащегося в теле человека при помощи спектрометров излучения человека через 12 или 24 ч после начала поступления. С учетом высокой подвижности  $^{212}\text{Pb}$  в организме измерения должны проводиться для всего тела работника, а не только для зоны респираторного тракта. Менее чувствительным методом является определение поступления  $^{212}\text{Pb}$  путем измерения его выведению с мочой (1,5–3,0 Бк на пробу при ожидаемом поступлении  $^{212}\text{Pb}$  за рабочую смену 1000 Бк), что возможно лишь на полупроводниковых спектрометрах с достаточно высокой эффективностью регистрации. Оценка поступления  $^{212}\text{Pb}$  по его выведению с калом может быть достаточно эффективным и

слабо зависящим от типа дыхания только для аэрозолей с дисперсностью АМАД = 5 мкм, наличие которых в помещении складов предприятия “Уралмонацит” при отсутствии интенсивно проводимых производственных работ представляется маловероятным. Для аэрозолей с АМАД = 1 мкм на интерпретацию результатов мониторинга существенное влияние будет оказывать тип дыхания работника. Мониторинг поступления аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  с АМАД = 0,3 мкм по выведению с калом не имеет особых преимуществ по сравнению с мониторингом по выведению с мочой.

Для более точной интерпретации данных индивидуального мониторинга внутреннего облучения персонала за счет ингаляционного поступления ДПР торона наиболее важной информацией будет являться информация по дисперсности радиоактивных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  на рабочем месте. Такая информация может быть получена при реализации программы специального мониторинга воздуха рабочей зоны предприятия “Уралмонацит” с использованием как каскадных импакторов, так и диффузионных батарей, позволяющих оценить дисперсность радиоактивных аэрозолей в диапазоне от АМТД = 0,001 мкм до АМАД = 10 мкм. Информация по типу дыхания индивидуальных работников может быть с достаточной степенью точности получена при профессиональном медицинском осмотре у врача-отоларинголога.

Необходимо отметить, что отбор проб в складах производился в теплое время года при отсутствии каких-либо технологических операций. Это позволяет выдвинуть предположение, что полученная оценка КДП будет справедлива и для ингаляционного поступления ДПР торона в жилищах.

## ВЫВОДЫ

По результатам проделанных экспериментов и оценочных расчетов можно сделать следующие основные выводы.

1. Эксперименты по изучению растворимости отобранных на рабочих местах радиоактивных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  в имитаторе биологических жидкостей показали, что растворение аэрозолей наилучшим образом аппроксимируется при помощи суперпозиции двух экс-

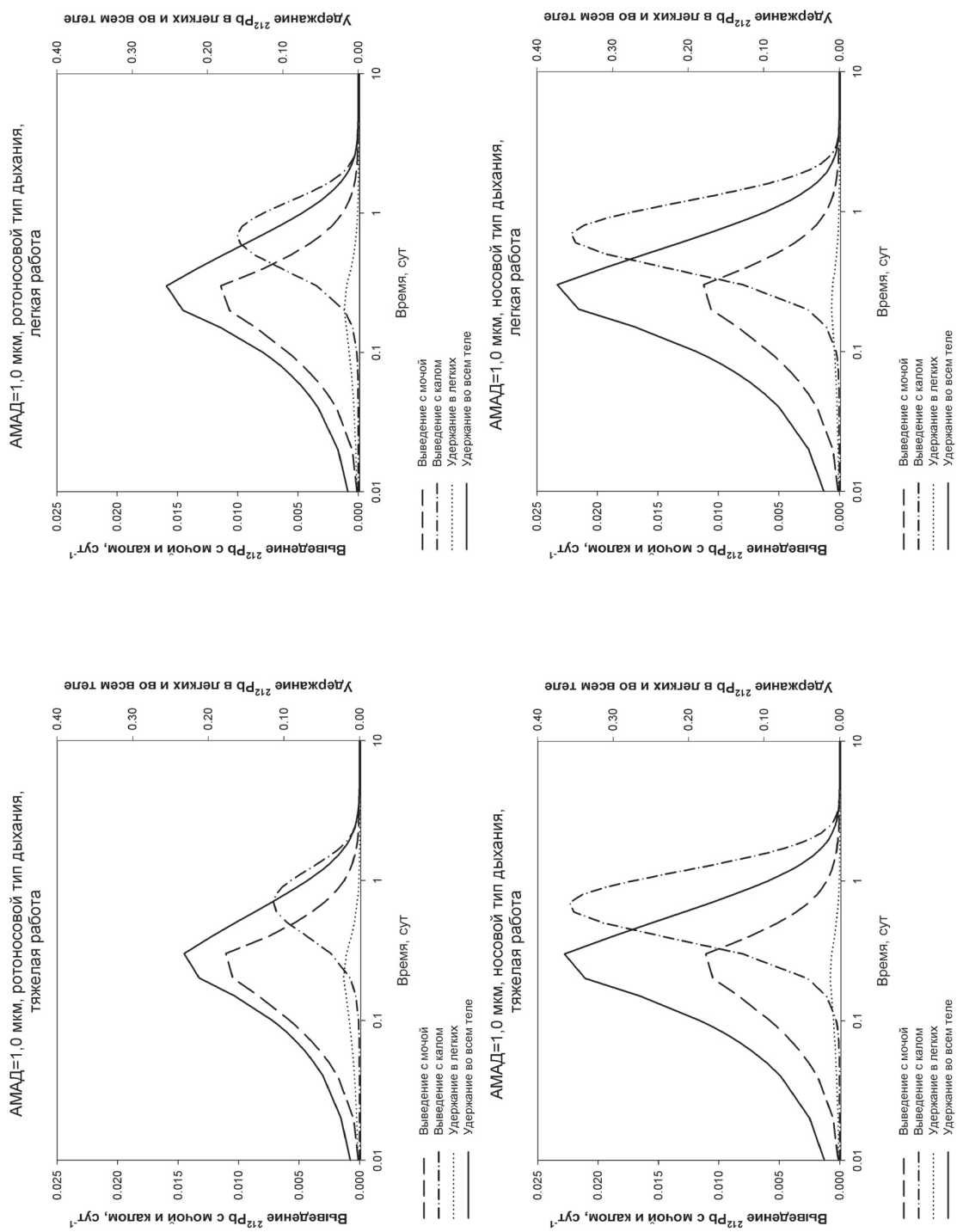


Рис. 5. Динамика удержания радионуклида  $^{212}\text{Pb}$  в организме работника и его выведения с калом и мочой, рассчитанная для параметров растворимости аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ , найденных в настоящей работе

Таблица 5

Доля от поступившей в течение рабочей смены активности  $^{212}\text{Pb}$ , содержащаяся в выделениях, собранных за различные интервалы, в легких и в организме в целом для динамики растворимости  $^{212}\text{Pb}$ , основывающейся на экспериментальных данных

АМАД, мкм	Работа	Дыхание	Выведение с мочой, сбор за интервал			Выведение с калом, 24 ч	Удержание в организме			
			24 ч	12 ч	8 ч		Легкие 12 ч	Все тело 12 ч	Легкие 24 ч	Все тело 24 ч
0,3 (АМТД 0,19 мкм)	Тяжелая	Рогонос.	0,0017	0,0022	0,0017	0,0014	0,0051	0,121	0,0007	0,052
		Носовое	0,0017	0,0022	0,0017	0,0028	0,0047	0,147	0,0006	0,060
	Легкая	Рогонос.	0,0017	0,0022	0,0017	0,0014	0,0057	0,123	0,0008	0,053
		Носовое	0,0018	0,0024	0,0018	0,0029	0,0052	0,156	0,0007	0,064
1,0	Тяжелая	Рогонос.	0,0021	0,0027	0,0021	0,0030	0,0070	0,164	0,0010	0,069
		Носовое	0,0019	0,0027	0,0021	0,0093	0,0043	0,249	0,0006	0,095
	Легкая	Рогонос.	0,0021	0,0028	0,0021	0,0042	0,0063	0,180	0,0009	0,075
		Носовое	0,0020	0,0027	0,0021	0,0092	0,0037	0,255	0,0005	0,097
5,0	Тяжелая	Рогонос.	0,0040	0,0058	0,0048	0,0168	0,0110	0,404	0,0015	0,162
		Носовое	0,0023	0,0033	0,0027	0,0176	0,0042	0,401	0,0006	0,145
	Легкая	Рогонос.	0,0032	0,0045	0,0035	0,0156	0,0098	0,358	0,0012	0,142
		Носовое	0,0022	0,0032	0,0025	0,0172	0,0028	0,391	0,0004	0,141



пониженных зависимостей. Постоянная времени быстрого растворения равна  $\lambda_f = 145 \text{ ч}^{-1}$ , а постоянная времени медленного растворения  $\lambda_s = 2 \text{ ч}^{-1}$ . Доля быстрой компоненты составляет 0,3. Таким образом, для описания транспорта аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  в респираторном тракте невозможно использовать ни один из стандартных типов веществ при ингаляционном поступлении (Б или П).

2. Расчеты показали, что для аэрозолей с АМАД = 0,3 мкм (АМТД = 0,19 мкм) для ингаляционного поступления реальных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  дозовый коэффициент для перехода к эффективной дозе составляет  $(6,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$  Зв/Бк со слабой зависимостью от типа дыхания и интенсивности работы. Для АМАД=1 мкм дозовый коэффициент составляет  $(9,5 \pm 3,5) \cdot 10^{-8}$  Зв/Бк, для АМАД = 5 мкм дозовый коэффициент составляет  $(1,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$  Зв/Бк с большими значениями коэффициента для ротоносового типа дыхания. Влияние типа дыхания на значение дозовых коэффициентов растет по мере роста АМАД аэрозолей.

3. Полученные значения КДП от экспозиции по ЭРОА торона к эффективной дозе существенно, в несколько раз превышают значения, рекомендованные НКДАР ООН и используемые в отечественной практике нормирования облучения от природных источников ионизирующего излучения. Это превышение, в первую очередь, связано с увеличением дозовых коэффициентов для ингаляционного поступления радиоактивных аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$ . Дополнительными факторами, играющими существенную роль в оценке численного значения КДП, являются дисперсность радиоактивных аэрозолей, интенсивность выполняемой работы и тип дыхания.

4. Наиболее перспективным и чувствительным методом определения поступления  $^{212}\text{Pb}$  в организм работников пункта хранения монацитового концентрата представляется прямое измерение активности нуклида, содержащегося в теле человека при помощи спектрометров излучения человека через 12 или 24 ч после начала поступления. С учетом высокой подвижности  $^{212}\text{Pb}$  в организме измерения должны проводиться для всего тела работника, а не только для зоны респираторного тракта.

5. Менее чувствительным методом яв-

ляется определение поступления  $^{212}\text{Pb}$  путем измерения его выведению с мочой (1,5–3,0 Бк на пробу при ожидаемом поступлении  $^{212}\text{Pb}$  за рабочую смену 1000 Бк), что возможно лишь на полупроводниковых спектрометрах с достаточно высокой эффективностью регистрации.

6. Оценка поступления  $^{212}\text{Pb}$  по его выведению с калом может быть достаточно эффективным и слабо зависящим от типа дыхания только для аэрозолей с дисперсностью АМАД = 5 мкм, наличие которых в помещении складов предприятия “Уралмонацит” при отсутствии интенсивно проводимых производственных работ представляется маловероятным. Для аэрозолей с АМАД = 1 мкм на интерпретацию результатов мониторинга существенное влияние будет оказывать тип дыхания работника. Мониторинг поступления аэрозолей  $^{212}\text{Pb}$  с АМАД = 0,3 мкм по выведению с калом не имеет особых преимуществ по сравнению с мониторингом по выведению с мочой.

7. На результаты мониторинга внутреннего облучения в существенной степени влияют такие факторы как дисперсность аэрозолей и тип дыхания работника. Для корректной интерпретации данных по выведению  $^{212}\text{Pb}$  или его удержанию в организме и переходе от этих значений к величинам поступления нуклида необходимо уточнение данной информации. Данные по характерному типу дыхания могут быть получены при профосмотре у отоларинголога. Для оценки дисперсности аэрозолей может потребоваться проведение дополнительной программы специального мониторинга.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 06-08-00744.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. UN. New York, 1993.
2. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. UN. New York, 2000.
3. Жуковский М.В., Екидин А.А., Ярмошенко И.В. Проблема мониторинга профессионального внутреннего облучения дочерними продуктами распада торона // Вопросы рад. безопасности. – 2006. – № 3. – С. 41–53.

4. Аладова Е.Е., Хохряков В.Ф., Бондаренко О.А. Исследование физико-технических свойств  $\alpha$ -активных аэрозолей на производстве по получению и производству плутония // Вопросы рад. безопасности. – 2002. – № 3. – С. 20–27.
5. LaMont S.P., LaBone T.R., Cadieux J.R. In vitro lung dissolution rates for PuO<sub>2</sub> // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2006. – V. 269. – No. 2. – P. 271–277.
6. Marsh J.W., Birchall A. Determination of Lung-to-Blood Absorption Rates for Lead and Bismuth which are Appropriate for Radon Progeny // Radiation Protection Dosimetry. – 1999. – V. 83. – No. 4. – P. 331–337.
7. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66 // Annals of the ICRP. – 1994. – V. 24. – No. 1–3.
8. Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. Supporting Guidance 3 // Annals of the ICRP. – 2002. – V. 32. – No. 1–2.
9. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of Public. CD-ROM. Elsevier Science, 1998.
10. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами // Публикация МКРЗ 30, Ч. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
11. Age dependent doses to members of public from intake of radionuclides: Part 2 Ingestion Dose coefficients. ICRP Publication 67 // Annals of the ICRP. – 1993. – V. 23. – No. 3–4.
12. Жуковский М.В., Ярошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997.
13. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в контролируемых условиях обращения с источниками излучения. Общие требования. МУ–016–2000. – М.: Минатом РФ, Минздрав РФ, ФУ Медбиоэкстрем, 2000.