

УДК 546.799.4 : 572
© 2004

«ДОЗЫ—1999, 2000» — ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛУТОНИЕВОЙ ДОЗИМЕТРИИ ПЕРСОНАЛА ПО «МАЯК»

В. Ф. Хохряков

Россия, г. Озерск, Южно-Уральский институт биофизики

Кратко излагается текущее состояние разработок косвенной дозиметрии плутония в Филиале № 1 ИБФ МЗ РФ; представлены формулы и графики для экспресс-оценки содержания и доз облучения органов и тканей у лиц из персонала первого отечественного атомного предприятия ПО «Маяк» по уровню экскреции радионуклида с мочой в зависимости от длительности хронического ингаляционного поступления. В основу графического способа дозиметрических оценок заложены две биокинетические модели, отражающие переходное состояние современной стадии развития плутониевой дозиметрии. Рассмотрены способы определения как поглощенных органных доз, так и эффективной эквивалентной дозы. Впервые установлен контрольный уровень альфа активности плутония в моче. Показано в соответствии с требованиями НРБ-99, что этот уровень вмешательства $УВ = 0,4$ расп/мин·сут.

В настоящее время признано, что наиболее эффективным способом мониторинга накопления и облучения персонала инкорпорированным плутонием является косвенный метод дозиметрии, основанный на интерпретации данных, полученных при анализе экскретов на содержание радионуклида. Для персонала ПО «Маяк» указанная интерпретация [1] осуществляется с помощью биокинетических моделей транспорта и экскреции, которые разрабатывались в Филиале № 1 ГНЦ РФ «Институт биофизики» (ФИБ-1), а затем продолжают совершенствоваться в рамках российско-американского проекта, посвященного улучшению качества дозиметрии [2]. Эти модели представляют собой последовательно разработанные модификации известных моделей МКРЗ-30 [3] и МКРЗ-66 [4], выполненные с учетом собственных данных о метаболизме промышленных соединений плутония в организме человека. Анализ структурных схем модифицированных моделей и методик определения параметров указан-

ных моделей, которые условно названы «дозы-1999» и «дозы-2000» (в дальнейшем обозначены D-1999 и D-2000), освещены в отечественных [5, 6] и зарубежных [7, 8] публикациях. Методика D-1999 была использована для расчета доз в эпидемиологических исследованиях [9—11] отдаленных последствий облучения инкорпорированным плутонием. Методика D-2000 призвана, в частности, внести уточнения в указанные эпидемиологические оценки. Расчеты доз облучения органов и тканей по данным анализов экскреции с учетом обмена плутония, описываемого в рамках указанных моделей, связаны с большим объемом вычислений, требующих применения компьютерной техники. Настоящая статья посвящена краткому изложению принципов построения биокинетических моделей D-1999 и D-2000, а также описанию простых приемов определения с помощью графиков уровней накопления и доз облучения основных органов депонирования по содержанию плутония в суточных порциях мочи.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

На рис. 1а и 1б показаны структурные схемы моделей D-1999 и D-2000, включающие в себя одинаковые для обеих моделей отделы десятикамерного системного пула [12] и отличающиеся отделы дыхательного тракта [5, 6].

Несмотря на различие структурных схем, в обеих моделях используется общий подход к характеристикам физико-химических свойств плутониевых аэрозолей, предопределяющим поведение нуклида в дыхательном тракте. Распреде-

ление нуклида между легкими и внелегочным пулом при прочих равных условиях зависит от химической формы соединения, что в рассматриваемых моделях учитывается с помощью показателя S — транспортабельности плутониевого аэрозоля, который определяется объективным методом, путем анализа проб воздуха рабочих помещений. Под транспортабельностью понимается доля альфа активности (в %), задержанной на аэрозольном фильтре при отборе пробы воздуха, которая подвергается диализу в рингеровском растворе через полупроницаемую

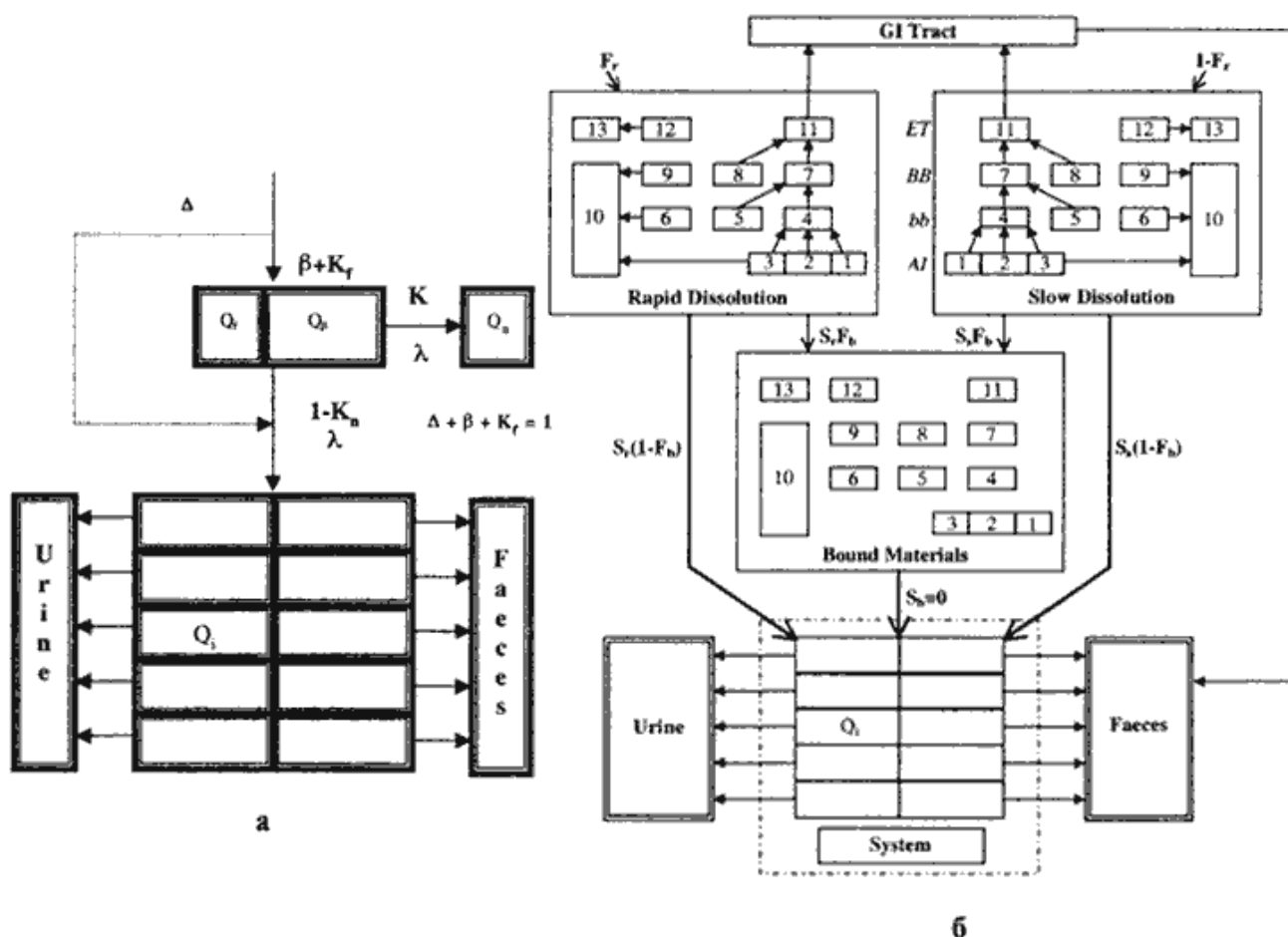


Рис. 1. Структурные схемы биокинетических моделей:
 а — Модель D-1999; б — Модель — D-2000. В обеих моделях использованы 10-камерные блоки для описания обмена системного плутония [12]. Обозначения камер и коммуникаций дыхательного тракта с подробными комментариями приведены в работах [5-8].

мембрану пористостью 0,15–0,25 мкм в течение двух суток.

Согласно [13] аэрозоли, содержащие нитрат плутония, характеризуются средним значением транспортабельности, равным 3,2 %, а аэрозоли с диоксидом — показателем, равным 0,2–0,3 %. Указанные значения в терминах модели, рекомендуемой МКРЗ-66 [4], соответствуют двум классам растворимости плутониевых аэрозолей — промежуточному (moderate) и медленному (slowly). В производственных условиях встречаются смеси аэрозолей двух классов. Это можно выявить по измеренному показателю транспортабельности. Смеси трудно растворимых (диоксид) и ограниченно растворимых (нитраты, оксалаты и др.) на участках химико-металлургического производства, как показали исследования [2, 13], характеризовались среднегеометрическим значением транспортабельности двух классов, равным 1 %. В табл. 1 приведены результаты посмертных исследований распределения плутония в организме, указывающие в общем на обратную зависимость относительного содержания в легких от транспортабельности. Более детально эта связь описывается в рамках моделей D-1999 и D-2000.

Структурная схема дыхательного тракта модели D-1999 (рис. 1а) представляет собой ре-

дуцированный вариант модели МКРЗ-30, включающей в себя следующие три камеры: Q_p — компонент, медленно абсорбируемый в кровь, Q_f — депо фиксации в пульмональном отделе и камеру Q_n , отвечающую накоплению нуклида в легочных лимфоузлах [5]. Для ранней фазы легочного клиренса после ингаляционного поступления принято заведомо упрощающее допущение о мгновенном всасывании некоторой части нуклида в кровь, а перемещением материала из дыхательного тракта в ЖКТ с последующим удалением из организма с фекалиями пренебрегается. Верификация модели, выполненная путем сравнения модельных прижизненных биофизических оценок с данными посмертных определений об относительном содержании нуклида в дыхательном тракте, показала удовлетворительное соответствие модельных оценок для отдаленных сроков, порядка десяти и более лет после начала контакта. Модель по анализам мочи на плутоний предсказывает несмещенные оценки содержания в легком с неопределенностью, характеризуемой стандартным геометрическим отклонением, колеблющимся от 2,6 до 3,6 в зависимости от транспортабельности плутониевого аэрозоля [5]. Поскольку на ПО «Маяк» в условиях контакта с плутонием персонал работает, как правило, более десяти лет, то модель D-1999 в первом приближении можно рассматривать в качестве инструмента, пригодного для предварительных оценок доз облучения персонала инкорпорированным плутонием. Эта модель была использована при создании и внедрении в практику биофизической методики выявления и наблюдения за «носителями» плутония [1]. Методика применяется при обследовании биофизическими лабораториями персонала предприятий в течение последних пятнадцати лет. Полученные результаты, как было сказано выше, использованы также для предварительных оценок риска проявления канцерогенных эффектов, вызванных облучением персонала ПО «Маяк» инкорпорированным плутонием.

Уже отмечалось, недостатком модели D-1999 является упрощенное описание обмена в дыхательном тракте в ранней фазе после инга-

Таблица 1

Среднее (геометрическое) содержание плутония в дыхательном тракте (% от общего содержания в организме) в зависимости от транспортабельности промышленного аэрозоля, S [13]

Транспортабельность S, %	3,21 (1,69)	1,0 (3,00)	0,2 (1,55)
Количество исследованных случаев	281	112	45
Содержание в дыхательном тракте, %	3,60 (2,3)	13,2 (2,47)	43,2 (1,8)

Примечание — в скобках приведено стандартное геометрическое отклонение.

ляции, что приводит к недооценке аккумулярованных доз облучения. Особенно большие ошибки возможны при ранней трактовке острых, т.е. однократных случаев ингаляционного поступления. Указанные недостатки устранены в биокинетической модели D-2000, в которой структурная схема (рис. 16) блока камер дыхательного тракта, построенная в соответствии с рекомендациями МКРЗ-66, включает в себя депо фиксации, а также камеры и коммуникации, описывающие транспорт нуклида из дыхательного тракта в ЖКТ наряду с процессом поглощения в кровь. Параметры модели D-2000 получены путем адаптации легочной модели МКРЗ-66 к материалам о метаболизме промышленных соединений плутония в организме человека, накопленным биофизической лабораторией ФИБ-1 в процессе многолетних исследований экскреции, и данным о посмертном распределении нуклида по органам и тканям у персонала ПО «Маяк». Модель D-2000 включает в себя в неизменном виде транспортные коммуникации, рекомендуемые МКРЗ-66 для описания процессов, обусловленных поглощением нуклида в кровь и действием мерцательного эскалатора в трахеобронхиальном дереве как в ранние, так и в поздние сроки после ингаляции.

Адаптация модели МКРЗ-66 к данным о метаболизме у рабочих ПО «Маяк» состояла в определении доли, отложившегося плутония в депо фиксации и оценке скорости (периодов) абсорбции нуклида в кровь [6]. Относительная роль ранней фазы легочного клиренса для накопления вещества в органе снижается по мере нарастания промежутка времени от начала облучения. Однако и в отдаленные сроки обе модели D-1999 и D-2000 дают расходящиеся оценки содержания нуклида в легких.

Сравнительный анализ показывает, что для нерастворимых соединений типа диоксида модель D-2000 дает оценки содержания, практически совпадающие с оценками модели МКРЗ-66, но для соединений типа нитрата выявлено расхождение в пределах целого порядка величины [2].

Модель D-2000 является очередной ступенью развития плутониевой дозиметрии в рамках совместного российско-американского проекта

2.4 «Разработка и совершенствование дозиметрической системы для рабочих ПО «Маяк» [2]. Применение этой модели позволяет уже в настоящее время производить улучшенные сравнительно с D-1999 дозиметрические оценки при эпидемиологических исследованиях по определению радиационных рисков.

Вместе с тем, модель требует дальнейшего совершенствования способа описания легочного клиренса с учетом недавно выявленной количественной связи параметров обмена в органе с модифицирующим действием факторов курения, возраста и состояния здоровья. Согласно упомянутому проекту на основе дополнительной информации о метаболизме плутония, полученной в последнее время учеными Окриджской Национальной лаборатории и сотрудниками ФИБ-1, предполагается также улучшить модель МКРЗ-67 [14] для описания кинетики обмена системного плутония. На заключительной стадии проекта будут разработаны комбинированная (легкие + системный пул) модель D-2005 и соответствующая методика определения доз облучения по анализам нуклида на содержание в моче, учитывающая выше намеченные планы по разработке и усовершенствованию дозиметрии плутония.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Представленные ниже материалы в табулированном или графическом виде основаны на расчетах, выполненных по алгоритмам, вытекающим из моделей. Математический аппарат моделей позволяет осуществлять дозиметрические оценки с учетом изменяющегося во времени ритма поступления. В данной статье графики для оценки содержания и накопленных доз с помощью модели D-1999 получены в предположении постоянной скорости ингаляционного поступления.

При разработке алгоритма и программ расчета доз-2000 для персонала ПО «Маяк» был учтен фактор снижающейся во времени скорости ингаляционного поступления. Анализ аутопсийного материала в сопоставлении с радиационной обстановкой на рабочих местах показал, что

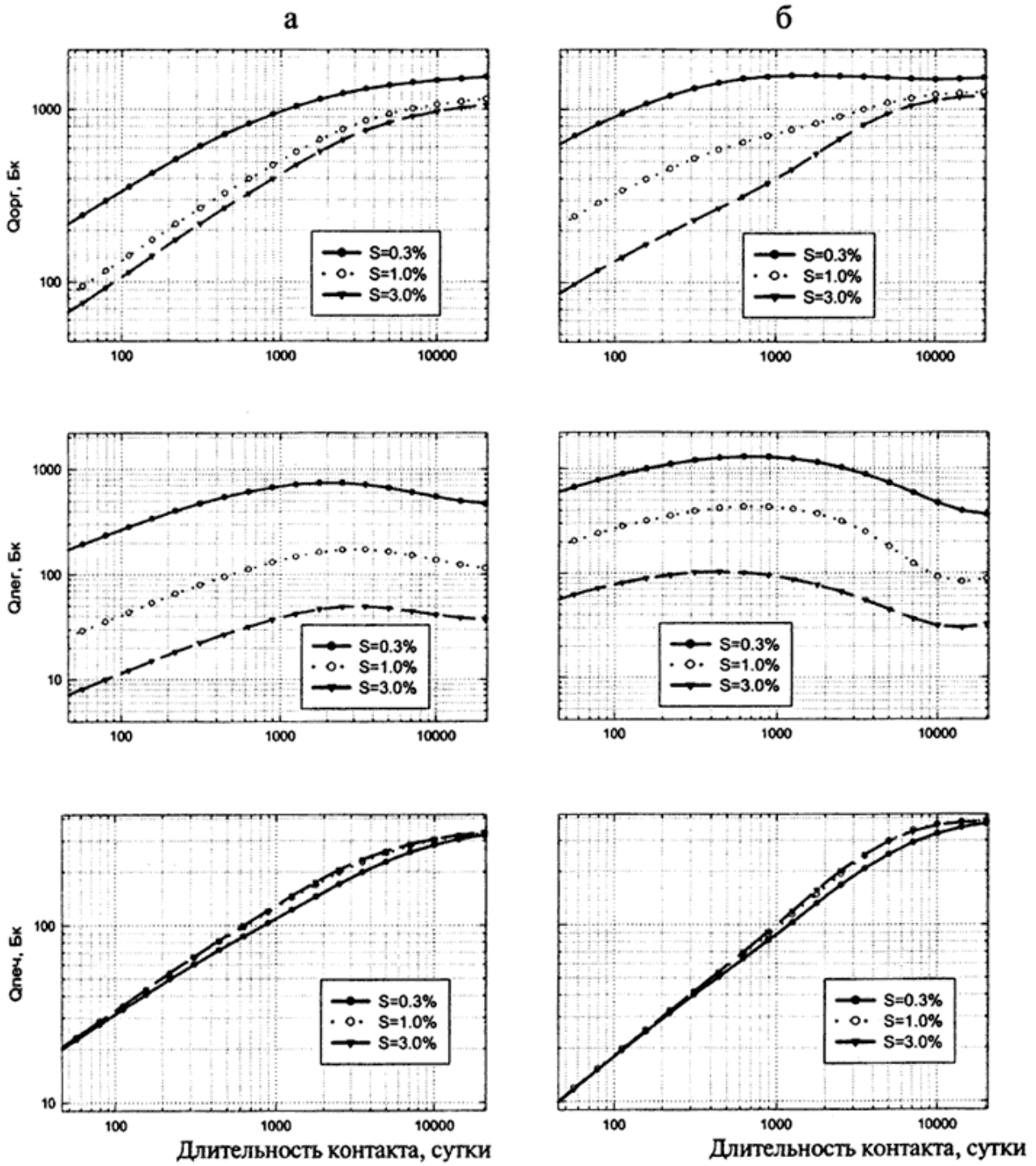


Рис. 2. Содержание в организме, легких, печени человека для разных классов транспортабельности S при $U_m = 1$ расп/мин: а — дозы-1999, б — дозы-2000

в первом приближении скорость ингаляционного поступления снижалась со временем по экспоненциальному закону с разными периодами для разных участков производства [5]. Указанный ритм поступления был характерен для ПО «Маяк», поэтому графики рис. 2, построенные с помощью модели D-2000, справедливы только для персонала этого предприятия.

В рамках применяемых моделей предполагается, что содержание в органе q_i (Бк), годовая $h_i(t)$ (сГр/год) или аккумулированная поглощенная D_i доза (сГр) являются функциями следующих переменных:

t – длительность ингаляционного поступления, сут;

U_m – среднее содержание плутония в суточных порциях мочи в период;

S – транспортабельность плутониевого аэрозоля на рабочем месте, определяемая методом диализа через полупроницаемую мембрану, %;

M – масса тела пациента, кг.

Так что, например, для расчета однородной (усредненной по всему органу) дозы облучения легкого имеет место

$$D_n = \frac{A}{0,0142M} \int_0^t q_n(U_m, S, t) dt \quad (1)$$

Соответственно для i -го органа или ткани из внелегочного пула

$$D_i = \frac{1}{0,986 M \varphi_i} \int_0^t q_i(U_m, S, t) dt \quad (2)$$

где $A = 8,2 \cdot 10^{-11}$ (сГр·кг/расп) – множитель перехода от числа распадов в органе-мишени к поглощенной дозе, выраженной в сГ;

0,0142 – доля массы легкого от массы всего тела M ;

φ_i – доля массы i -го органа от массы системного (внелегочного) пула;

0,986 = 69/70 – доля массы системного пула от массы тела M ;

F_i – фракция поглощенной энергии в ткани-мишени;

q_n – содержание плутония в легком, Бк.

Численные значения интегралов (1) и (2) зависят как от набора входных данных t, S, U_m , характеризующих конкретное биофизическое облучение, так и от вида функций q_n и q_i , которые в свою очередь определяются выбором биокинетической модели.

Структурные схемы моделей D-1999 и D-2000 включают в себя одинаковые для обеих моделей отделы десятикамерного системного пула [12, 15], в котором образуется постоянное относительное распределение между органами и тканями η_i , не зависящее ни от транспортабельности, ни от времени.

Постоянное во времени относительное распределение во внелегочном пуле означает, что, если известно содержание в каком-либо органе пула, например, в печени q_n , то содержание q_i в i -ом органе в любой момент времени можно рассчитать по формуле:

$$q_i = q_n \cdot (\eta_i / \eta_n) \quad (3)$$

где (η_i / η_n) – отношение относительных содержаний нуклида в i -ом органе и печени, определяемое по данным табл. 2.

Соответственно поглощенная доза облучения, накопленная в i -ом органе системного пула, должна быть пропорциональной содержанию и дозе печени и вычисляться с помощью выражения (4), в котором учитываются как соотношение масс (φ_n / φ_i) и отношение относительных содержаний (η_i / η_n) в двух органах, так и соответствующая фракция поглощенной энергии F_i

$$D_i = D_n \cdot (\eta_i / \eta_n) \cdot (\varphi_n / \varphi_i) \cdot F_i \quad (4)$$

Численные значения для η_i и φ_i приведены в табл. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ – ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ И ДОЗ С ПОМОЩЬЮ ГРАФИКОВ

На рис. 2а,б и 3а,б представлены графически содержание плутония и накопленные дозы, в легких и в печени при содержании нук-

Таблица 2

Относительное содержание η_i плутония (в % от системного пула) [15], относительная масса органа φ_i (в процентах от содержания в системном пуле*) [17], фракция энергии F_i , поглощенная в i -ом органе-мишени [3], тканевый весовой множитель W_i [16]

Орган, ткань	η_i	φ_i *)	F_i	W_i	$(\eta_i/\eta_n)(\varphi_n/\varphi_i)F_iW_i$
Гонады	0,032	0,051	1,0	0,20	0,00777
Трабекулярный кр. костн. мозг - (самооблучение)	1,1	2,2	1,0	0,12	0,00371
Трабекулярный кр. костн. мозг (облучение от Pu , отложившегося на поверхн. трабекул)	24,45	2,2	0,5	0,12	0,04128
Толстый кишечник	0,034	0,54	0,5	0,12	0,00023
Легкие	η_n	1,45	1,0	0,12	—
Желудок	0,02	0,022	0,5	0,12	0,00338
Мочевой пузырь	0,032	0,065	1,0	0,05	0,00152
Молочные железы	0,057	0,038	1,0	0,05	0,00464
Печень	42	2,6	1,0	0,05	0,05000
Пищевод	0,038	0,054	0,5	0,05	0,00109
Щитовидная железа	0,013	0,029	1,0	0,05	0,00139
Кожа	0,38	3,77	1,0	0,01	0,00006
Скелет	50	14,5	—	—	—
Клетки костн. поверхности	24,45	0,17	0,25	0,01	0,02226
Остальные органы и ткани	7,39	78,4	1,0	0,05	0,000292
ИТОГО	92,61	21,6	—	—	0,13762

*) Масса системного пула условного человека принята равной 69 кг [17].

лида в суточной порции мочи $U_m = 1$ расп/мин, рассчитанные с помощью моделей D-1999 и D-2000 в зависимости от длительности t хронической ингаляции аэрозолей трех типов транспортабельности S . В данной работе расчеты выполнены в предположении, что дисперсности аэрозолей отвечает АМАД = 15 мкм. Это значение было характерно для аэрозолей первых де-

сятилетий функционирования ПО «Маяк». Из графиков рис. 2а,б и 3а,б следует, что обе модели предсказывают похожие зависимости от времени поступления и от транспортабельности с заметным различием рассматриваемых показателей приблизительно до тысячи суток и тенденцией к сближению оценок в более поздние сроки.

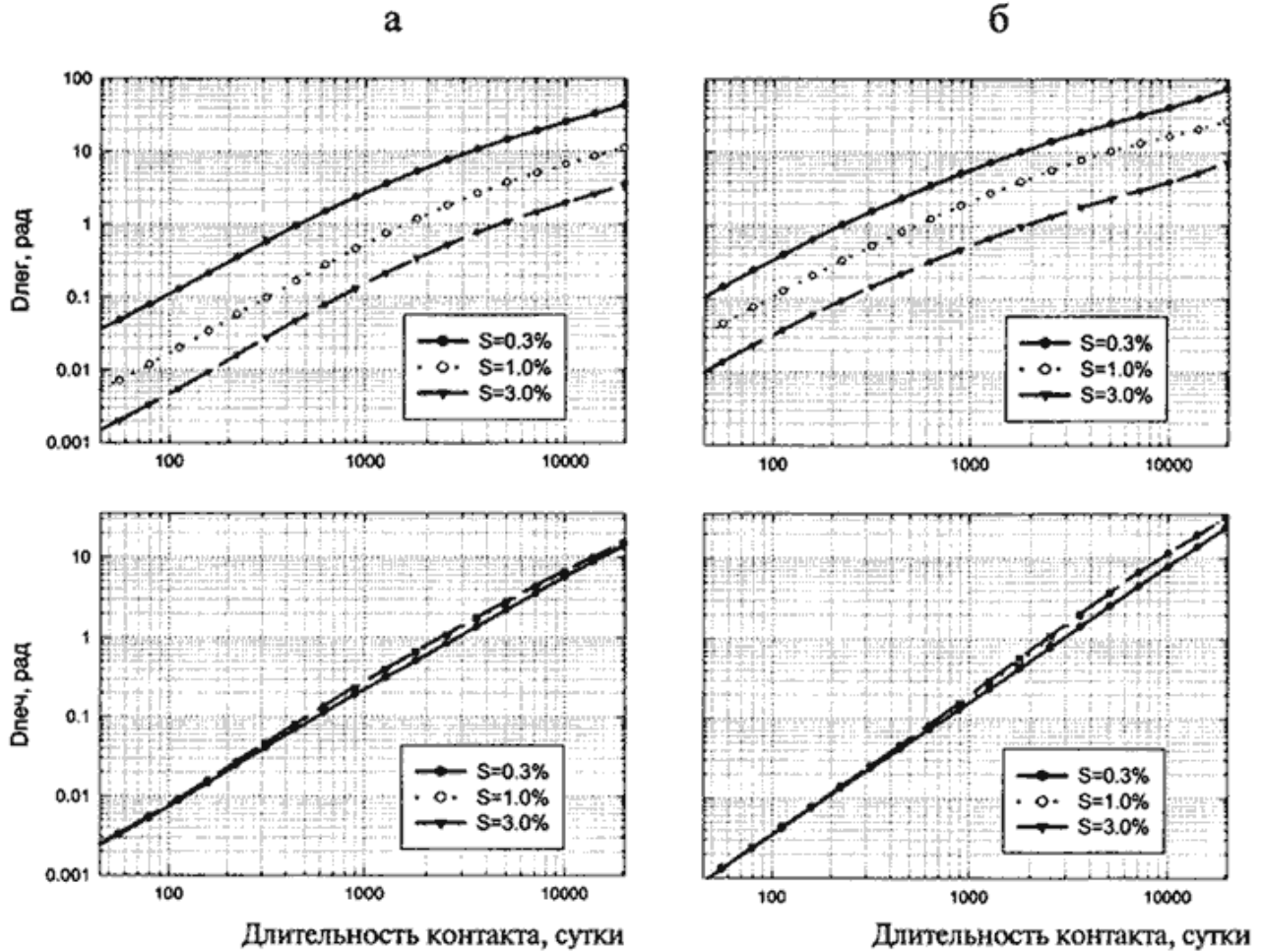


Рис. 3. Поглощенные дозы на легкие, печень человека при $U_m=1$ расп/мин:
 а — дозы-1999, б — дозы-2000.

Примечание — дозы-1999 рассчитываются при условии постоянного ритма поступления плутония, дозы-2000 — при условии экспоненциально убывающего ритма поступления.

Поскольку кинетика обмена в рамках моделей D-1999 и D-2000 описывается линейными дифференциальными уравнениями, то накопление и дозы облучения при прочих равных условиях должны быть пропорциональны измеренному содержанию нуклида в суточной порции мочи. Это означает, что при измеренном содержании в моче U_m для содержания q_i в органе

имеет место:

$$q_i = q_{ii} (U_m/U_{1m}), \quad (5)$$

$$D_{mi} = D_{ii} \cdot (U_m/U_{1m}), \quad (6)$$

где q_{ii} и D_{ii} — содержание и доза, отвечающие содержанию в моче $U_{1m} = 1$ расп/мин-сут.

Рассмотрим пример определения содержания и доз в случае, характеризуемом следующими входными данными:

Пациент с массой тела $M = 60$ кг постоянно работает в контакте со смесью нерастворимых и ограниченно растворимых соединений плутония ($S = 1\%$) в течение 2000 суток и к этому сроку у него в суточной порции мочи обнаружено $U_m = 2$ расп/мин плутония.

Из графиков рис. 2а, построенных для $U_{1m} = 1$ расп/мин-сут, находим, что при $t = 2000$ сут содержание нуклида в организме по модели D-1999 составляет 700 Бк, а в легких и печени – приблизительно по 180 Бк. Согласно формуле (5) эти величины необходимо умножить на отношение $(U_m/U_{1m}) = 2$, так что для организма получаем 1400 Бк, и для печени и легких по 360 Бк. А содержание, например, в красном костном мозге $q_{ккм}$, согласно формуле (3) и табл. 2, составляет: $q_{ккм}^{1999} = q_n^{1999} (\eta_n/\eta_n) = q_n^{1999} (1,1/42) = 360 \cdot (1,1/42) = 9,43$ Бк.

Из графиков рис. 2б с применением модели D-2000 по той же схеме получаем несколько отличающиеся от модели D-1999 оценки содержания: в организме – 1700 Бк, в легких – 700 Бк, в печени – 320 Бк.

Соответственно из графика рис. 3а с учетом $(U_m/U_{1m}) = 2$ в рамках модели D-1999 дозы облучения легких и печени для условного человека составят 2,6 рад и 1,5 рад. Поскольку масса пациента 60 кг отлична от таковой для условного человека, согласно формулам (1) и (2) необходимо полученные результаты умножить на фактор $70/60 = 1,17$. Так что получим $D_n^{1999} = 2,6 \cdot 1,17 = 3,04 \approx 3,0$ рад, $D_n^{1999} = 1,5 \cdot 1,17 = 1,76 \approx 1,8$ рад. В соответствии с формулой (4) дозу на красный костный мозг $D_{ккм}^{1999(a)}$ можно рассчитать путем введения в D_n^{1999} поправок на распределение, массу и фракции поглощенной энергии в органе мишени из табл. 1:

$$D_{ккм}^{1999(a)} = D_n (\eta_{ккм}/\eta_n) (\varphi_n/\varphi_{ккм}) F_{ккм} = 1,76 \cdot (1,1/42) \cdot (2,6/2,2) \cdot 1,0 \approx 0,05 \text{ рад.}$$

Эта часть дозы обусловлена действием нуклида, отложившегося в красном костном мозге. Другая, более значительная, часть дозы $D_{ккм}^{1999(b)}$ обусловлена облучением этой ткани радионуклидом, отложившимся на поверхнос-

ти костей. Из табл. 2 следует, что из 50 % скелетной части системного плутония на клетки всей костной поверхности приходится 48,9 %. Половину этого количества (24,5 %), согласно рекомендациям МКРЗ-30, составляет плутоний на стенках трабекулярной кости, облучающий костный красный мозг с фракцией энергии, поглощенной в органе-мишени, равной 0,5 [3]. В соответствии с формулой (4) получаем для этой части дозы:

$$D_{ккм}^{1999} = D_n^{1999} \cdot (24,5/42) \cdot (2,6/2,2) \cdot 0,5 = 1,76 \cdot 0,345 \approx 0,61 \text{ рад.}$$

Суммарная поглощенная доза красным костным мозгом составит:

$$D_{ккм}^{1999} = 0,61 + 0,05 = 0,66 \text{ рад.}$$

Применяя аналогичные приемы с использованием графиков рис. 3б, получим для данного пациента следующие оценки в рамках модели D-2000:

$$D_n^{2000} \approx 10 \text{ рад; } D_n^{2000} \approx 1,5 \text{ рад; } D_{ккм}^{2000} \approx 0,46 \text{ рад.}$$

Приведенные примеры, а также более детальные модельные расчеты показывают, что при равных содержании нуклида в моче U_m и времени ингаляции накопленные дозы D-2000 облучения легких выше, чем дозы D-1999, для всех значений показателя транспортабельности. С увеличением длительности облучения уменьшается различие модельных оценок, но даже в самые отдаленные сроки расчеты выявляют для этого органа разницу в несколько раз. Для органов внелегочного пула имеет место более сложная динамика соотношения модельных оценок доз. Из графиков рис. 3а,б следует, что в ранние сроки модель D-2000 по сравнению D-1999 недооценивает дозу облучения печени и, соответственно, других органов и тканей системного пула. Однако, с увеличением длительности воздействия отношение (D_n^{2000}/D_n^{1999}) возрастает и в отдаленные до 10^4 суток (~30 лет) оценка D_n^{2000} в зависимости от транспортабельности также в 1,5–2 раза превышает оценку D_n^{1999} . Это является следствием разного описания моделими процессов обмена в дыхательном тракте в ранней фазе легочного клиренса. Наряду со сказанным разница в оценках также обусловлена тем, что модель D-2000 учитывает снижавшийся в период профессионального контакта уровень

поступления, тогда как согласно D-1999 допускается постоянный уровень.

Учитывая, что формально обе модели описывают процессы накопления и выведения плутония для всех органов депонирования, представляет интерес, основываясь на данных табл. 2, установить связь накопленной эффективной дозы $E(t)$ облучения с уровнем нуклида в моче. Согласно рекомендации МКРЗ-60 [16] в обозначениях, принятых в данной статье, эффективная накопленная доза $E(t)$, выраженная в сЗв, рассчитывается как сумма взвешенных эквивалентных доз всех органов и тканей:

$$E(t) = \sum_{i=1}^{i=n} W_i \cdot 20 \cdot D_i, \quad (7)$$

где W_i – тканевый весовой множитель, численные значения которого из [16] приведены в табл. 2;

n – число органов и тканей, обуславливающих вклад в эффективную дозу, коэффициент 20 отвечает относительной биологической эффективности альфа-излучения плутония;

D_i – поглощенная доза, накопленная к моменту t , измеренная в рад (сГр).

Выражение (7) можно разделить на две части: связанную с облучением легких D_L и связанную с облучением органов системного пула:

$$E(t) = W_L \cdot 20 \cdot D_L + \sum_{i=1}^{i=n-1} W_i \cdot 20 \cdot D_i. \quad (8)$$

Поскольку доза в i -ом органе системного пула пропорциональна дозе в печени, то, используя соотношение (4), последнее уравнение можно записать в виде

$$E(t) = W_L \cdot 20 \cdot D_L + D_n \cdot 20 \times \sum_{i=1}^{i=n-1} W_i (\eta_i / \eta_n) (\varphi_n / \varphi_i) F_i. \quad (9)$$

Численные значения $n-1$ слагаемого под знаком суммы и сама сумма приведены в табл. 2. Используя данные табл. 2, выражение (9) можно записать в более простой и удоб-

ной для расчетов форме

$$E(t) = 2,4 \cdot D_L + 2,75 \cdot D_n. \quad (10)$$

Уравнение (10) в равной степени применимо для оценки эффективной дозы в рамках обеих моделей D-1999 и D-2000, что является следствием одинакового описания процессов обмена в системном пуле.

Представленные выше материалы указывают, что модель D-2000 является более корректной и к тому же обеспечивающей более консервативные оценки облучения сравнительно с моделью D-1999. Используя графики рис. 3б, устанавливающие в рамках модели D-2000 зависимость поглощенных доз от длительности облучения, а также формулу (10), можно рассчитать накопленную эффективную дозу за период трудовой деятельности $t = 2 \cdot 10^4$ сут (≈ 50 лет). Расчеты показывают, что для труднорастворимых соединений типа диоксида плутония ($S \approx 0,2-0,3\%$) при содержании в суточной порции мочи в конце указанного периода, равном $U_m = 1$ расп/мин·сут, накопленная эквивалентная доза составит $E_{0,3\%} \approx 250$ сЗв, а для соединений типа нитрата ($S \approx 3,0\%$) она составит $E_{3,0\%} \approx 90$ сЗв. Первая величина в 2,5 раза превышает 50-летний предел дозы, равный 100 сЗв (29 мЗв/год·50 лет) [18], тогда как вторая ниже его на 10%. Очевидно, это означает, что, если в процессе профессиональной деятельности при контакте с соединениями, которые по МКРЗ-66 относятся к классу М, содержание плутония в суточных порциях мочи не превысит величины $1/2,5 = 0,4$ расп/мин·сут, то накопленная эффективная доза за 50 лет не превысит дозового предела 100сЗв. Следовательно, в соответствии с основными положениями НРБ-99 [18] содержание в суточной порции мочи, равное 0,4 расп/мин·сут можно рассматривать как УВ – уровень вмешательства, систематическое превышение которого указывает на необходимость проведения дополнительных защитных мероприятий. Очевидно, что для работы с соединениями плутония класса П рассматриваемый показатель УВ равняется $1,1 \approx 1$ расп/мин·сут. Согласно методическим указаниям [19] допускаемый фактор неопределенно-

сти эффективной дозы внутреннего облучения при дозиметрическом контроле принят равным 2,5. Учитывая столь высокую степень неопределенности, представляется целесообразным принять $УВ = 0,4$ расп/мин·сут, независимо от класса соединений плутония в аэрозолях. Этот консервативный подход оправдан тем, что зачастую на практике невозможно определить, с какими аэрозолями обследуемый работник имел контакт. Следует отметить, что выполнение указанного норматива обеспечено современным уровнем радиохимических методик биофизических лабораторий, позволяющих определять содержание плутония в моче с минимально измеряемой активностью, равной $2,2 \text{ мБк/л} \approx 0,13 \text{ расп/мин} \cdot \text{л} \approx 0,2 \text{ расп/мин} \cdot 1,5 \text{ л} \approx 0,2 \text{ расп/мин} \cdot \text{сут}$ [19]. Таким образом, по нашему мнению, в настоящее время сложились обоснованные предпосылки для осуществления на ПО «Маяк» контроля за внутренним облучением персонала в рамках требований НРБ-99.

Все сказанное в равной мере может быть применено и к другим предприятиям Минатома. Однако нужно принимать во внимание, что на ПО «Маяк», этом российском первенце атомной индустрии, впервые в СССР отработывалась технология переработки ТВЭЛов, и накапливался практический опыт в области радиационной безопасности. В связи с этим уровни облучения, в том числе и ингаляционного поступления, снижались весьма быстрым темпом, особенно в первые десятилетия, что учтено в графиках накопления и формирования до D-2000. Для других предприятий, а также для работников ПО «Маяк», трудовая деятельность которых началась после середины 80-х гг. и протекает в условиях медленного изменения уровней облучения, модель D-2000 должна давать консервативные, несколько завышенные оценки доз и содержаний в органах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен графический способ быстрого определения содержания и уровней облучения инкорпорированным плутонием, основанный на интерпретации скорости выведения нуклида

с мочой. Указанный способ может быть использован как экспресс метод для решения прикладных задач дозиметрического контроля и в научных исследованиях, направленных на выявление связи доза—эффект, обусловленной инкорпорацией радионуклида.

Оценки доз, выполненные с помощью двух биокинетических моделей, отражают этапы развития и современное состояние косвенной дозиметрии плутония. Сравнительно с моделью D-1999 модель D-2000 является более поздней и более совершенной модификацией. Можно ожидать, что будущие оценки доз, скорректированные в связи с дальнейшей модификацией модели, будут меньше отличаться от D-2000, чем от D-1999. Сравнительный анализ модельных дозовых оценок с позиций современного состояния косвенной дозиметрии плутония указывает на предварительный характер уже опубликованных коэффициентов канцерогенного риска от плутония, численные значения которых подвергнутся изменениям с дальнейшим развитием биокинетических моделей.

В рамках обеих моделей в силу их логичной внутренней завершенности можно оценить величину накопленной эффективной дозы. Согласно расчетам, выполненным с помощью модели D-2000, впервые установлен важный для практики контрольный уровень альфа-активности мочи — уровень вмешательства $УВ = 0,4$ расп/мин·сут.

Благодарность: Автор выражает признательность сотрудникам биофизической лаборатории ФИБ-1 В.В. Востротину и А.В. Ефимову за проведенные вычисления и помощь при построении графического материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выявление, учет и медицинское наблюдение за носителями плутония. Инструктивно-методические указания (ИМУ-88) / Под. ред. Любчанского Э.Р., Хохрякова В.Ф. «Утв. Минатомом 30.05.88». — М., 1987. — 101 с.
2. Российско-американский проект 2.4 «Разработка и совершенствование дозиметрической

- системы для рабочих «Маяка» // Development of an Improved Dosimetry System for the Workers at the Mayak Production Association. — М.: «CRDF Project Number Assigned RBO-20307-OZ-02(EN)». — 1998.
3. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Публикация 30 МКРЗ / Пер. с англ. Под ред. Рамзаева П.В., Моисеева А.А. — М.: «Энергоиздат», 1982. — 191 с.
4. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiation Protection. The report of Task Group of Committee 11. — Oxford, 1993. — 413 p.
5. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Востротин В.В. и др. Легочный клиренс промышленных соединений плутония в отдаленные сроки после начала ингаляции // Мед. радиология и радиационная безопасность. — 2000. — Т. 45. — № 2. — С. 28—34.
6. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Востротин В.В., Романов С.А. Адаптация модели легочного клиренса МКЗЗ-66 к данным о кинетике обмена плутония у персонала «Маяка» // Мед. радиология и радиац. безопасность. — 2001. — Т.46. — № 6. — С. 76—83.
7. Khokhrykov V.F., Suslova K.G., Filipi R.E. et al. Metabolism and dosimetry of actinide elements in occupationally-exposed personnel of Russia and United States: a summary progress report // Health Physics. — 2000. — V. 79(1). — P. 63—71.
8. Khokhrykov V.F., Suslova K.G., Vostrotin V.V., et al. The development of the plutonium clearance model for exposure estimation on the Mayak Production Association nuclear plant workers // Health Physics. — 2002. — V. 82(4). — P. 425—431.
9. Khokhrykov V.F., Kellerer A.M., Kreisheimer M., Romanov S.A. Lung cancer in nuclear workers of Mayak // Radiation Environment Biophysics. — 1998. — V. 37. — P. 11—17.
10. Kreisheimer M., Koshurnikova N.A., Nekolla E. et al. Lung cancer mortality among male nuclear workers of the Mayak facilities in the former Soviet Union // Radiation Research. — 2000. — V. 154. — P. 3—11.
11. Tokarskaya Z.B., Okladnikova N.D., Belayeva Z.D., Drozhko E.G. Multifactorial analysis of lung cancer dose-response relationships for workers at the Mayak nuclear enterprise // Health Physics. — 1997. — V. 73. — № 6. — P. 901—905.
12. Хохряков В.Ф., Меньших З.С., Сулова К.Г. и др. Базовые уравнения косвенной дозиметрии плутония // Атомная энергия. — 1993. — Т. 75, вып. 5. — С. 358—363.
13. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Цевелева И.А., Аладова Е.Е. Объективный способ классификации альфа-активных аэрозолей для целей дозиметрии внутреннего облучения // Мед. радиология и радиац. безопасность. — 1998. — № 4. — С. 41—45.
14. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. — Oxford: «Pergamon Press», 1993.
15. Сулова К.Г., Хохряков В.Ф., Токарская З.Б. и др. Распределение плутония в органах внелегочного пула в отдаленные сроки после начала ингаляции у работников радиохимического производства // Мед. радиология и радиац. безопасность. — 2000. — Т. 45. — № 1. — С. 17—25.
16. Публикация 60. Ч.1. Рекомендации МКРЗ 1990 года. / Пер. с англ. — М.: «Энергоатомиздат», 1994. — 191 с.
17. Человек. Медико-биологические данные: Публикация 23 МКРЗ / Пер. с англ. — М.: «Медицина», 1977. — 496 с.
18. Нормы радиационной безопасности (НРБ-69). — М.: Минздрав России, 1999. — 115 с.
19. Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования. Методические указания 2.6.1.026—2000). Минатом, ФУ ИБЭП Минздрава России. — М., 2000. — 51 с.