

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

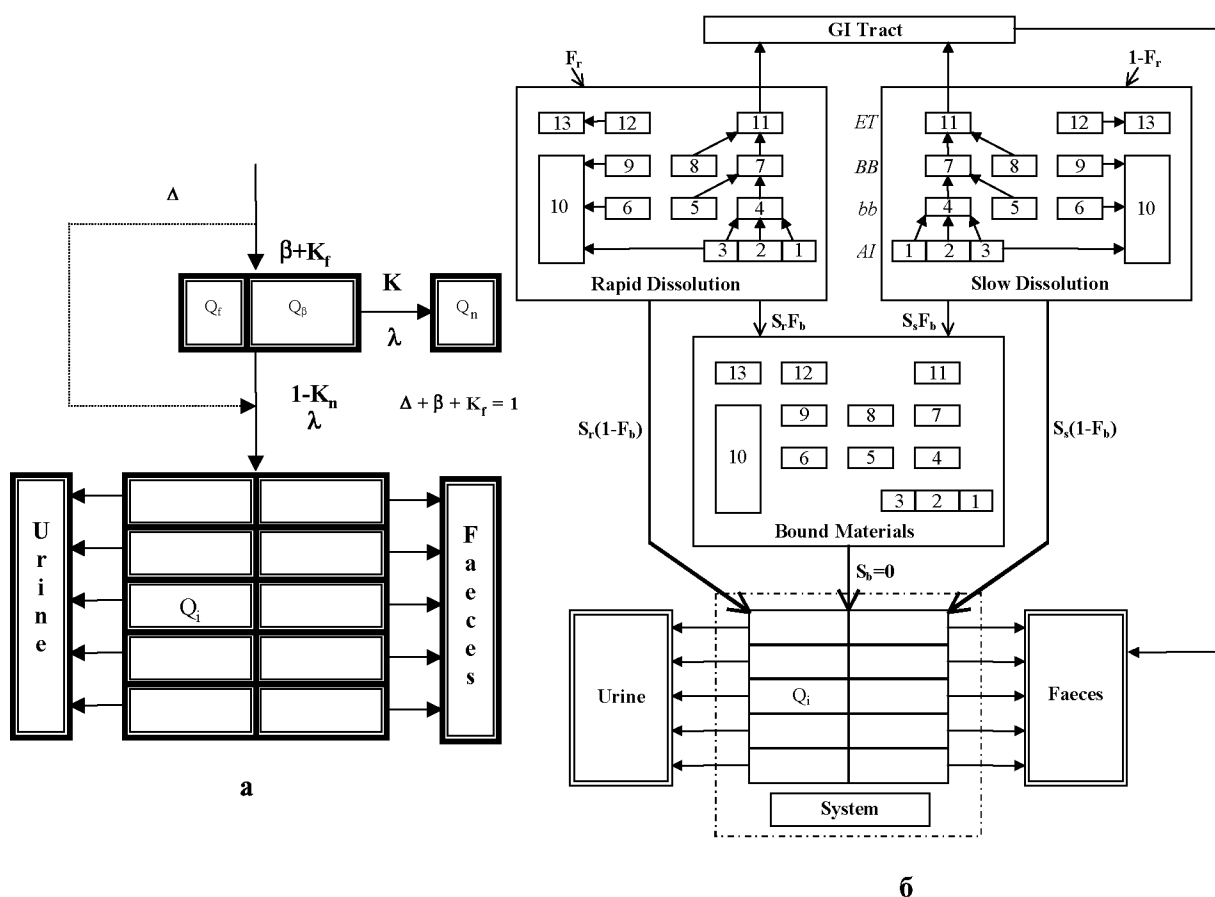


Рис. 1. Структурные схемы биокинетических моделей:
а — Модель D-1999; **б** — Модель — D-2000. В обеих моделях использованы 10-камерные блоки для описания обмена системного плутония [12]. Обозначения камер и коммуникаций дыхательного тракта с подробными комментариями приведены в работах [5-8].

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_b — 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

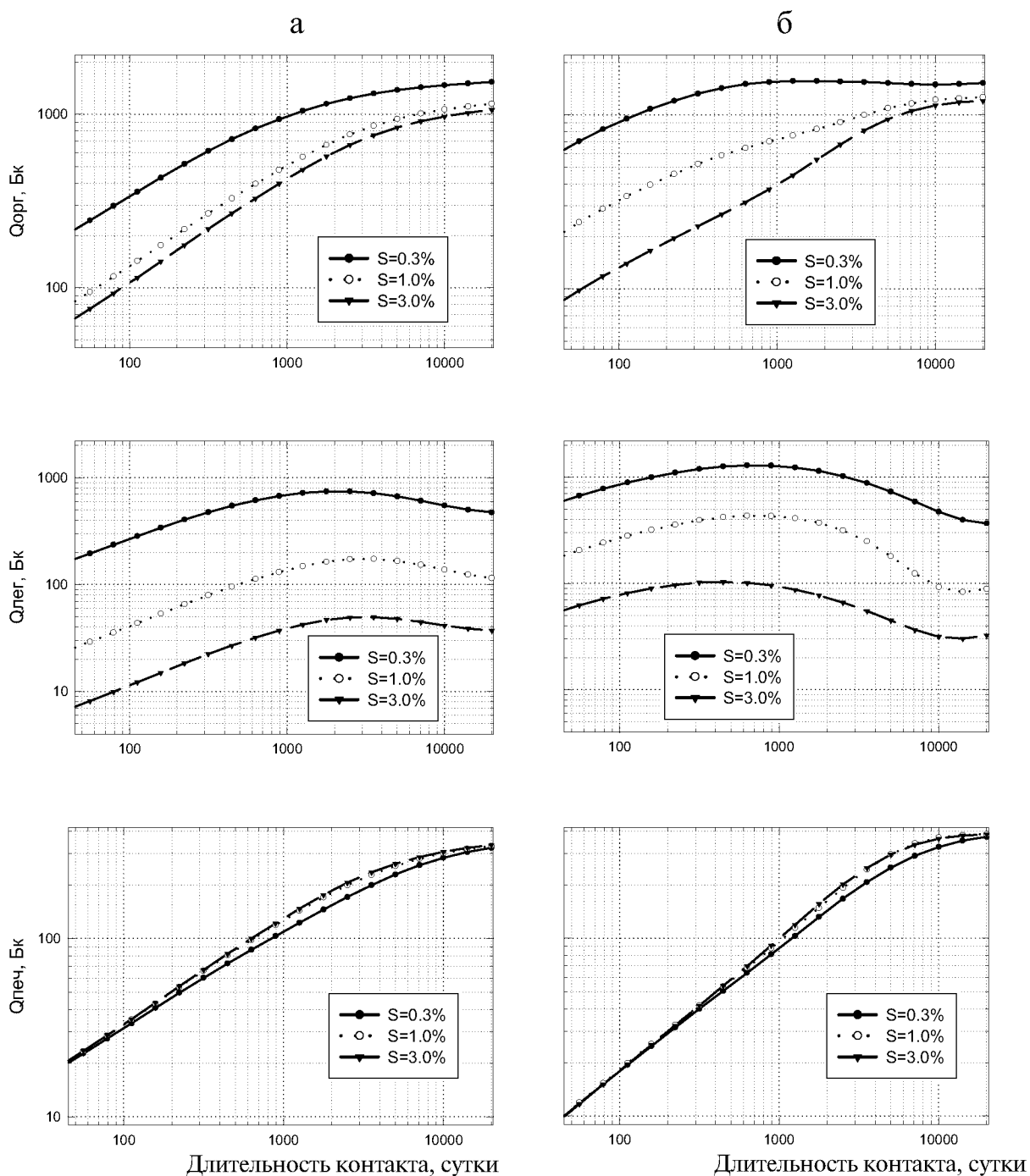


Рис. 2. Содержание в организме, легких, печени человека для разных классов транспортабельности S при $U_m = 1$ расп/мин: а — дозы-1999, б — дозы-2000

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

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

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

$$D_i = D_n \cdot (\eta_i / \eta_n) \cdot (\phi_n / \phi_i) \cdot F_i \quad (4)$$

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 | $(\eta_i/\eta_n)(\phi_n/\phi_i)F_iW_i$ |
|--|----------|-------------|-------|-------|--|
| 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.

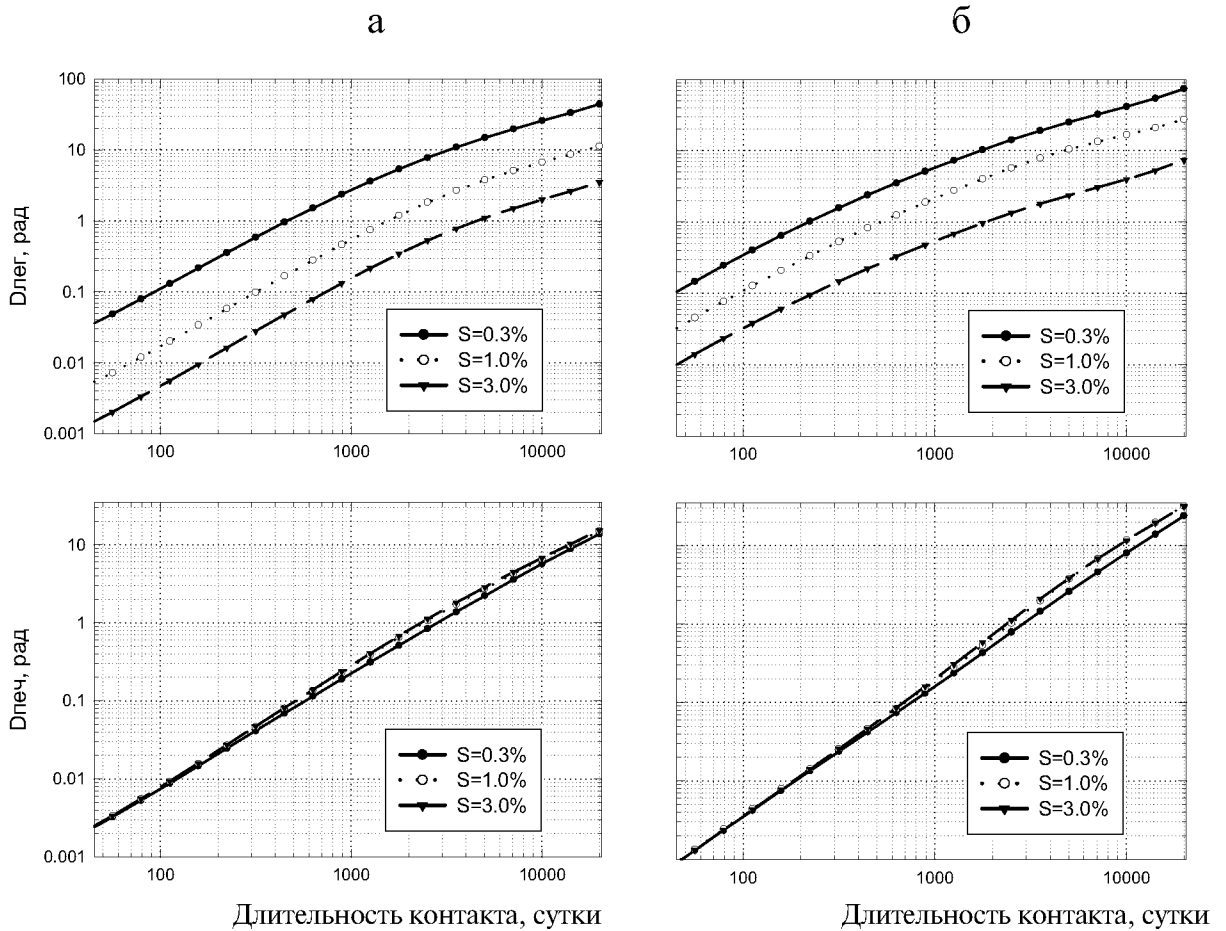


Рис. 3. Поглощенные дозы на легкие, печень человека при $U_m = 1$ расп/мин:
а — дозы-1999, б — дозы-2000.

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:

$$q_i = q_{li} (U_m / U_{lm}), \quad (5)$$

$$D_{mi} = D_{li} (U_m / U_{lm}), \quad (6)$$

где q_{li} и D_{li} — содержание и доза, отвечающие содержанию в моче $U_{lm} = 1$ 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 $U_{lm} = 1$ 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 $(U_m/U_{lm}) = 2$, 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: $q_{ккм}^{1999} = q_{п}^{1999} (\eta_i/\eta_{п}) = q_{п}^{1999} (1,1/42) = 360 \cdot (1,1/42) = 9,43$ 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 $(U_m/U_{lm}) = 2$ 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 $D_{л}^{1999} = 2,6 \cdot 1,17 = 3,04 \approx 3,0$ рад, $D_{п}^{1999} = 1,5 \cdot 1,17 = 1,76 \approx 1,8$ рад. В соответствии с формулой (4) дозу на красный костный мозг $D_{ккм}^{1999(a)}$ можно рассчитать путем введения в $D_{п}^{1999}$ поправок на распределение, массу и фракции поглощенной энергии в органе мишени из табл. 1:

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

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:

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

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:

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

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 $(D_{л}^{2000}/D_{л}^{1999})$ возрастет и в отдаленные до 10^4 суток (~30 лет) оценка $D_{л}^{2000}$ в зависимости от транспортабельности также в 1,5–2 раза превышает оценку $D_{л}^{1999}$. Это является следствием разного описания моделями процессов обмена в дыхательном тракте в ранней фазе легочного клиренса. Наряду со сказанной разницей 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 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 100 сЗв. 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 $2,2 \text{ мБк/л} \approx 0,13 \text{ расп/мин} \cdot \text{л} \approx 0,2 \text{ расп/мин} \cdot 1,5 \text{ л} = 0,2 \text{ расп/мин} \cdot \text{сут}$ [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(ЕН)». — 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.