

УДК 546.798.22 : 572.025

© 2006

**ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТОК ДОЗИМЕТРИИ  
ПЛУТОНИЯ НА ПО “МАЯК”***В.Ф. Хохряков, В.В. Хохряков, К.Г. Сулова, В.В. Востротин, А.Е. Щадилов,  
А.Б. Соколова, А.В. Ефимов**Россия, г. Озерск, Южно-Уральский институт биофизики**M.P. Krahenbuhl, S.C. Miller**США, Солт Лейк Сити, Университет штата Юта, отдел Радиобиологии**K.F. Eckerman, R.W. Leggett**США, Тенесси, Окриджская Национальная Лаборатория*

Подведены итоги многолетних исследований, направленных на совершенствование методов дозиметрии инкорпорированного плутония, проводившихся учеными ЮУрИБФ в сотрудничестве с американскими учеными. Работа построена на материалах длительного мониторинга внутреннего облучения персонала ПО “Маяк” с использованием посмертных данных о распределении плутония в органах и тканях человека с учетом модифицирующего влияния курения и состояния здоровья на обмен нуклида в организме. Обмен плутония в организме исследован в зависимости от транспортабельности альфа-активных аэрозолей на рабочих местах людей, подвергавшихся ингаляционному облучению. Основная задача разработок была направлена на обеспечение эпидемиологов корректными дозами внутреннего облучения когорты персонала ПО “Маяк”. В статье описано последовательное совершенствование методик косвенной дозиметрии на основе реконструкции собственной биокинетической модели обмена плутония в организме человека с применением современных представлений о метаболизме актинидов. Приведена сравнительная оценка доз, полученных с применением трех биокинетических моделей, рассмотрен подход к оценке неопределенностей расчетов доз, проанализированы недостатки биокинетических моделей и указаны возможные пути их устранения.

Первое российское предприятие по производству оружейного плутония ПО “Маяк” начало функционировать в августе 1948 г. В короткий срок были введены в эксплуатацию реакторное, радиохимическое и химико-металлургическое производства. Из-за крупных технологических просчетов был нанесен ущерб здоровью некоторой части персонала. В связи с этим уже в начале 50-х гг. были созданы специализированная медсанчасть № 71 и на ее базе научно-исследовательский институт (ныне – ЮУрИБФ). В процессе обследования и лечения персонала были накоплены детальные сведения о здоровье работников наряду

с оценками уровней внутреннего и внешнего облучения. Сочетание документированной медицинской и дозиметрической информации представляло собой уникальный источник материалов для решения фундаментальных вопросов о действии ионизирующей радиации на здоровье человека. В связи с этим с середины 90-х на основе соглашения между правительствами РФ и США были начаты совместные российско-американские исследования проблемы в рамках нескольких проектов, одобренных “Объединенным координационным комитетом по изучению последствий радиационных воздействий” (ОККИРВ) в 1994 г. [1]. Исследования

медицинских последствий профессионального облучения у персонала "Маяка" были начаты эпидемиологами в проекте 2.2 "Оценка риска детерминированных и стохастических (канцерогенных) эффектов" [2]. В начале этого проекта были выделены 22300 работников реакторного, радиохимического и химико-металлургического производств, подвергавшиеся хроническому длительному комбинированному профессиональному внешнему и внутреннему облучению. Наряду с идентификацией когорт и восстановлением индивидуальных статуса здоровья, условий труда и историй облучения в рамках отдельных проектов была проведена работа по ревизии и реконструкции доз внешнего и внутреннего облучения.

Анализ аутопсийного материала показал, что проблема внутреннего облучения персонала ПО "Маяк" фактически сводилась к решению задач дозиметрии инкорпорированного плутония, поскольку дозы облучения от радиоактивных продуктов деления урана были на несколько порядков ниже, чем от плутония (рис. 1).

Облучение инкорпорированным плутонием зависит от скорости обмена в организме человека, поэтому получение надежных сведений о процессах накопления и выведения нуклида является важным условием для корректной оценки доз. Первые совместные работы российских и американских ученых, были начаты в рамках проекта 2.1 "Метаболизм и дозиметрия промышленных соединений плутония" [3]. Несмотря на разницу уровней активности анализируемых биосубстратов и различие радиохимических методик, исследования показали полную совместимость и совпадение результатов, полученных ранее учеными ЮУрИБФ и USTUR [4]. Последнее послужило основанием для продолжения совместной работы российских и американских ученых в рамках нового проекта 2.4 "Развитие и совершенствование дозиметрической системы для работников ПО "Маяк" [5]. Раздел проекта, посвященный внутреннему облучению, разрабатывался при участии американских ученых и сотрудников ЮУрИБФ с использованием материалов, накопленных в этом учреждении. Главная цель

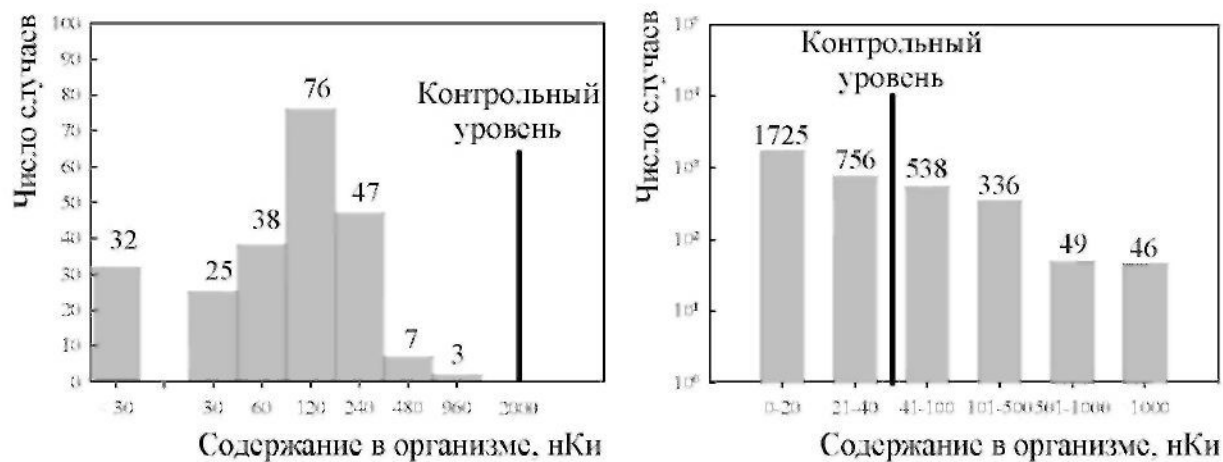


Рис. 1. Данные посмертных исследований о частоте распределения уровней накопления по сравнению с оценками допустимых уровней: а) продукты деления урана; б) плутоний

проекта состояла в обеспечении эпидемиологов по возможности корректной и полной информацией о дозах облучения 22300 работников из упомянутой когорты "Маяка". Однако, было понятно, что результаты по метаболизму, полученные в ходе исследований, могут также иметь самостоятельную ценность для радиобиологии плутония человека и разработки стандартов радиационной защиты.

Данное сообщение посвящено описанию разработок по созданию дозиметрической системы внутреннего облучения персонала "Маяка" с целью обеспечения необходимой информацией эпидемиологов, занимающихся анализом канцерогенных рисков облучения указанной группы людей.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Одна из трудностей, с которой пришлось столкнуться в начале проекта, заключалась в том, что к исследованиям экскреции и аутопсийного материала приступили спустя длительные сроки после начала профессионального контакта изучаемого контингента с плутонием (рис. 2).

Анализируемый материал был накоплен более чем за четыре десятилетия, в течение которых менялись как цели, так и методы исследований. В результате к началу проекта 2.4 менее трети упомянутой выше численности (22300 работников) были обеспечены весьма грубыми биофизическими оценками доз от плутония. Так что при выполнении исследований предстояло одновременно решать вопросы, связанные не только с усовершенствованием методики определения доз, но и с пополнением недостающей дозиметрической информации для изучаемых когорт.

Приоритетной задачей в начале указанных разработок являлись сбор, систематизация и критический анализ накопленной информации об обмене радионуклида в организме, индивидуальных историях облучения, изменениях физико-химических свойств перерабатываемых субстратов на рабочих местах и других факторах, способных повлиять на оценку уровней накопления и облучения.

На начальном этапе была заново спроектирована электронная база данных (ЭБД) результатов измерений содержания плутония

в экскретах, органах и тканях. Разработаны правила пополнения и поддержки разделов ЭБД, позволяющие в каждом случае обращаться к индивидуальному кодовому номеру и соответствующим разделам ЭБД, извлекать информацию, необходимую для научного анализа биокинетики обмена нуклида или расчетов поступления и доз. Обобщенная характеристика объема текущей информации по наиболее важным показателям ЭБД лаборатории внутренней дозиметрии приведена в табл. 1.

На 14.11.2005 численность измерений активности плутония в моче составляет – 99657, а в кале – 25449. Эти измерения выполнены методом измерения альфа-активности образцов. Число биофизических обследований, проведенных с помощью альфа-спектрометра, составляет на сегодня 450 (910 результатов измерений). В таблице отдельной строкой обозначены данные, переданные эпидемиологам, работающим в проекте 2.2. У всех индивидуумов, сведения на которых переданы эпидемиологам, изучены истории облучения (профмаршруты). Основная масса информации относится к хроническому ингаляционному облучению и лишь в 5,3 % случаях имело место острое ингаляционное воздействие или раневое поступление. Из-за малого объема информации дозы в этих случаях не оценивались. Данные измерений  $^{241}\text{Am}$  на СИЧ находятся в состоянии разработок для плутониевой дозиметрии. Они также не передавались эпидемиологам.

Учитывая неоднородность по срокам и качеству изучаемых материалов, значительные усилия были направлены на обеспечение надежности результатов измерений. Данные исследований, полученные в первые десятилетия работы лаборатории, были подвергнуты тщательной ревизии, включая экспериментальную проверку прошлых радиохимических методов определения актинидов и в некоторых случаях связанную с этим корректировку результатов измерения. Эта работа в частности включала в себя восстановление долгосрочных изменений фона лаборатории и отбраковку результатов с учетом уточненных значений минимальной детектируемой активности (МДА) плутония в проанализированных ранее образцах биосубстратов (экскретов и материала, взятого при аутопсии). Анализ архивных данных в сочета-

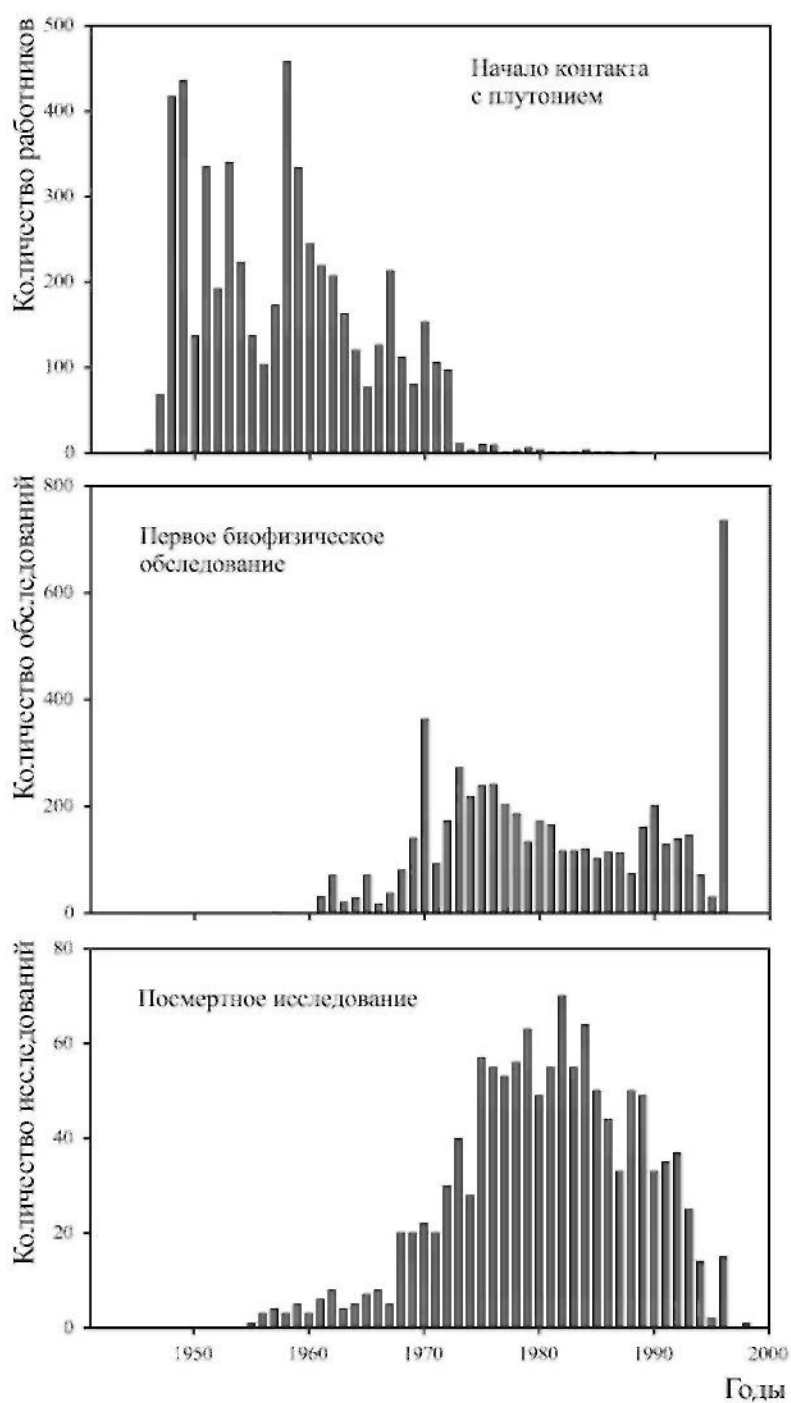


Рис. 2. Распределение количества случаев в зависимости от года начала контакта и наблюдения

Таблица 1

ЭБД лаборатории внутреннего облучения по состоянию на 14.11.2005 г.

Раздел	ЭБД Проект 2.2	Общее число работников	Число индивидуумов		
			побывавших в нештатных ситуациях	обеспеченных профмашрутом	обеспеченных информацией о курении
эксcretы	ЭБД	9505	504 (5,3 %)	9501 (~100 %)	7725 (81 %)
	Проект 2.2 Дозы-2005	6268	–	6268 (100 %)	5125 (82 %)
Аутопсия	ЭБД	1212	28 (2,3 %)	1212 (100 %)	1153 (95 %)
	Проект 2.2 Дозы-2005	949	–	949 (100 %)	927 (98 %)
СИЧ ( <sup>241</sup> Am)	ЭБД	4781	316 (6,6 %)	3502 (73 %)	4751 (99 %)

нии с воспроизведением и экспериментальной проверкой изменявшихся способов радиохимической обработки биосубстратов показал, что важнейшим фактором, способствующим повышению эффективности исследований, являлось внедрение чувствительного радиометрического, а позднее и альфа-спектрометрического оборудования. Внедрение в 70-х гг. сцинтилляционного альфа-радиометра, превосходившего по чувствительности на два порядка метод ионизационной камеры, стимулировало поиски способов снижения радиационного фона лаборатории, что сказалось на снижении МДА. Графики рис. 3 и 4 показывают, что изменение МДА суточных порций мочи повторяет временной тренд фона лаборатории.

Указанные корректировки по мере их выявления учитывались в процессе работы по совершенствованию моделей, что отражалось на изменении численных значений параметров обмена биокинетических моделей.

Учитывая доминирующий вклад ингаляционного поступления, значительные усилия были направлены на совершенствование биокинетической модели дыхательного тракта.

Данные об обмене радионуклида в легких анализировались в связи с физико-химическими свойствами альфа-излучающих аэрозолей на рабочих местах персонала. Систематического изучения дисперсного состава альфа-излучающих аэрозолей в воздухе рабочих помещений ПО "Маяк" не производилось. Однако эпизодические исследования [6] указывали, что в ранние годы работы предприятия значительную роль играли грубодисперсные фракции с размерами частиц порядка десяти и более мкм. Из-за отсутствия необходимых данных на разных стадиях исследований дисперсность аэрозолей характеризовали условно принятыми значениями АМАД: 15 или 5 мкм.

Распределение 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 промышленных аэрозолей плутония. Предварительный анализ аутопсийного материала выявил обратную зависимость содержания нуклида в легких от значения этого показателя (табл. 2).

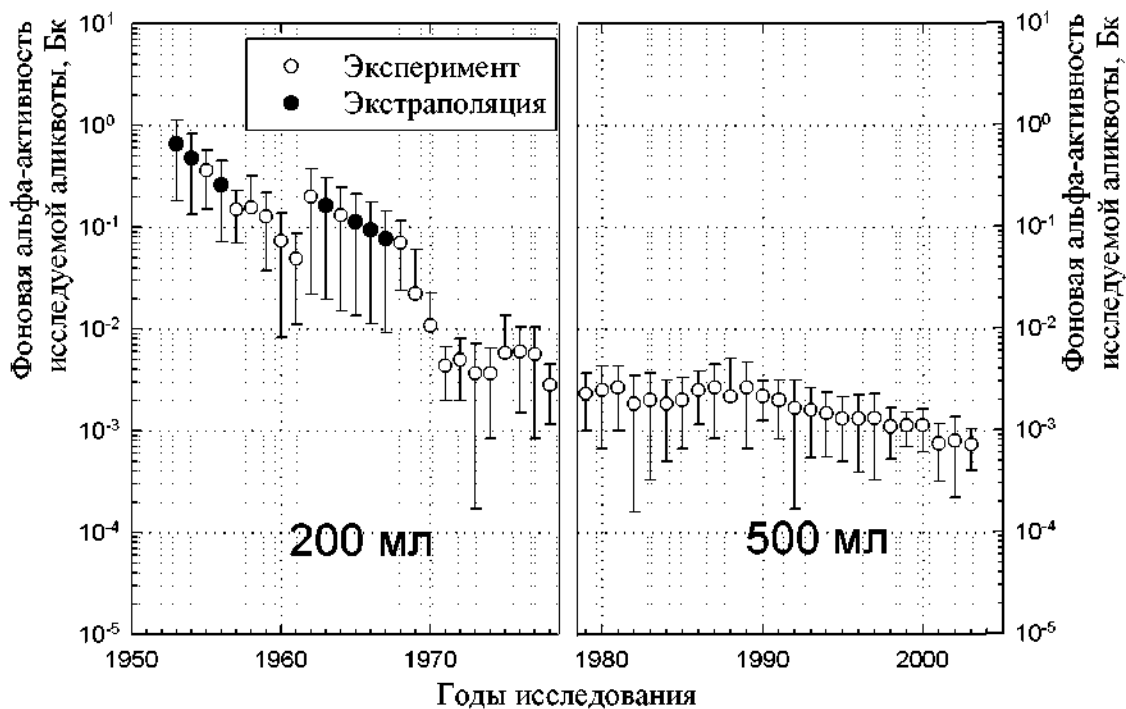


Рис. 3. Временной тренд фоновой компоненты альфа-активности суточной порции мочи с учетом объема исследуемой аликвоты

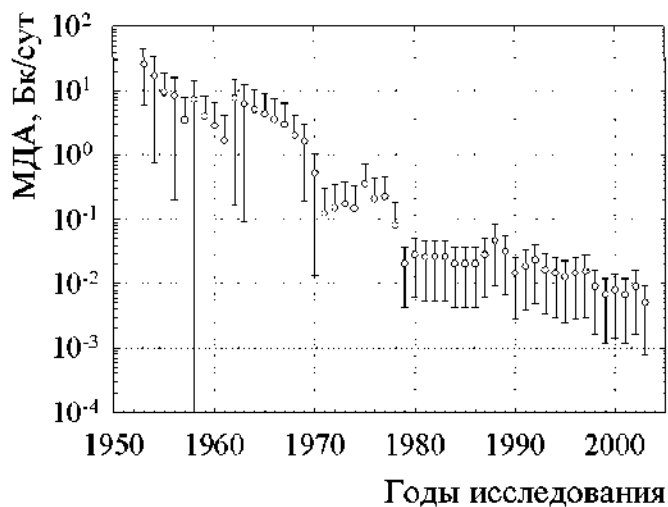


Рис. 4. Изменение МДА плутония в суточной порции мочи в связи со снижением фона и повышением чувствительности радиохимического анализа

Таблица 2

Относительное содержание плутония в легком  $\dot{\eta}_l$  и легочных лимфоузлах  $\dot{\eta}_v$  (доли в % от содержания в организме) в зависимости от транспортабельности альфа-илучающих аэрозолей

Рабочее место	Радиохимическое производство	Химико-металлургическое производство	Металлургическое производство
Транспортабельность S, % (станд. геом. отклонение)	3,21 (1,69)	1,0 (3,0)	0,2 (1,55)
$\dot{\eta}_l$ , %	2,56±2,26	6,50±2,47	22,6±1,81
$\dot{\eta}_v$ , %	3,60±2,30	13,2±2,47	43,2±1,80
Число случаев	281	112	45

Это было учтено, как фундаментальный, экспериментально установленный факт, для теоретического обоснования зависимости легочного клиренса от физико-химических свойств аэрозолей. Под транспортабельностью понимается доля (в %) альфа-активности, задержанной на аэрозольном фильтре при отборе пробы воздуха, которая подвергается диализу в растворе Рингера через полупроницаемую мембрану пористостью 0,15 мкм в течение двух суток. Установлено [8], что промышленные аэрозоли, содержащие нитрат плутония, характеризуются средним значением транспортабельности порядка 3 %, а аэрозоли с диоксидом – показателем, колеблющемся в пределах нескольких десятых процента. Указанные значения в терминах современной модели, рекомендуемой МКРЗ-66 [9] соответствуют двум классам растворимости плутониевых аэрозолей: П – промежуточному (moderate) и М-медленному (slow). К настоящему времени проанализированы более тысячи проб воздуха с различных участков плутониевого и радиохимического заводов. Исследования показали, что в зависимости от химического соединения, перерабатываемого на технологическом участке, показатель транспортабельности S колеблется в пределах двух порядков от сотых долей до нескольких единиц процента.

В производственных условиях встречаются смеси аэрозолей двух классов. Это можно выявить по измеренному показателю транспортабельности. Смеси трудно растворимых (ди-

оксид) и ограниченно растворимых (нитраты, оксалаты и др.) на участках химико-металлургического производства, как показали исследования [7, 8], обычно характеризовались среднегеометрическим значением транспортабельности двух классов, колеблющемся около 1 %.

Одна из главных задач проекта заключалась в совершенствовании косвенно дозиметрических оценок за счет совершенствования биокинетических моделей МКРЗ путем их адаптации к указанным материалам о метаболизме. В этих разработках были использованы результаты посмертного анализа перераспределения плутония между органами и тканями более чем у 900 умерших работников ПО «Маяк», данные об экскреции нуклида с мочой и калом у 430 лиц из той же группы, а также результаты изучения историй облучения, включая исследования физико-химических свойств аэрозолей в воздухе рабочих помещений.

#### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ДОЗИМЕТРИИ ИНКОРПОРИРОВАННОГО ПЛУТОНИЯ

*Методики «Дозы-1999» и «Дозы-2000»*

Основные этапы работы по созданию и совершенствованию метода определения содержания плутония в организме и доз облучения органов и тканей инкорпорированным радионуклидом отражены в трех последовательно

подготовленных методиках, условно названных “Дозы-1999”, “Дозы-2000” и “Дозы-2005”. Указанные методики опираются на модельную трактовку экскреции нуклида с мочой. Задача построения биокинетических моделей “Дозы-1999”, “Дозы-2000” и “Дозы-2005” состояла в выборе и/или изменении структурных схем биокинетических моделей, рекомендованных МКРЗ и подгонке параметров обмена к наблюдаемым данным о распределении и экскреции плутония у работников ПО “Маяк”.

*Модель “Дозы-1999”*

Методика “Дозы-1999” опирается на модельную трактовку экскреции нуклида с мочой. Она построена, исходя из допущения, что экскреция системного плутония с мочой  $U_m$  и калом  $U_k$  после однократного поступления в кровь единицы активности нуклида описывается с помощью суммы десяти убывающих во времени экспоненциальных членов:

$$U_k = \sum_{i=6}^{i=10} a_i \cdot \exp(-x_i \cdot t) \quad (1)$$

$$U_m = \sum_{i=1}^{i=5} a_i \cdot \exp(-x_i \cdot t) \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) представляют собой модифицированную модель экскреции P. Durbin [11]. Модификация выполнена в ЮУрИБФ с использованием результатов исследования экскреции плутония у работников ПО “Маяк” [12, 13]. Она коснулась только изменения последних пятих слагаемых под знаком каждой из сумм. Это, в отличие от модели P. Durbin, позволяет более корректно описывать экскрецию не только в ранние, но и в отдаленные сроки (более десяти лет) после острого поступления нуклида в кровь. Модификация модели построена так, что для очень больших сроков содержание системного плутония стремится к нулю. Показано [12, 14], что необходимым условием для этого являются такие значения модифицированных параметров, которые удовлетворяют соотношению:

$$\sum_{i=1}^{i=10} \frac{a_i}{x_i} = 1 \quad (3)$$

Модификация упрощенно предполагает постоянное распределение нуклида между тка-

нами внелегочного пула, т.е. отсутствие обмена между ними. Тем не менее, применение ее на ранних стадиях проекта позволило достаточно эффективно анализировать обмен нуклида в дыхательном тракте.

Методика “Дозы-1999” является уточняющей модификацией ранее разработанных в ЮУрИБФ Инструктивно-Методических Указаний 1988 (ИМУ-1988) [15]. Обе методики ИМУ-1988 и “Дозы-1999” основаны на использовании биокинетических моделей с одинаковыми структурными схемами обмена, но различающимися численными значениями параметров обмена. Последнее вызвано пересмотром входных данных при адаптации моделей в результате упомянутой выше ревизии радиохимических методов. Структурная схема блока дыхательного тракта этих моделей (рис. 5) представляет собой редуцированный вариант модели МКРЗ-30 [16], состоящей из трех камер:  $Q_\beta$  – компонент, медленно абсорбируемый в кровь,  $Q_f$  – депо фиксации в пульмональном отделе и камеру  $Q_n$ , отвечающую накоплению нуклида в легочных лимфоузлах.

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. Предполагалось, что поступившее при ингаляции количество нуклида распределяется следующим образом:

- доля, равная  $\beta$ , подвергается медленной резорбции в кровь с постоянной  $\lambda$ ;
- доля, равная  $K_f$ , фиксируется в пульмональном отделе;
- доля, равная  $\Delta$ , мгновенно всасывается в кровь.

Так что имеет место:

$$\beta + K_f + \Delta = 1 \quad (4)$$

Разработка модели состояла в определении этих трех параметров наряду с неизвестным коэффициентом  $K_n$ , определяющим долю нуклида, медленно транслоцирующуюся из камеры медленного обмена в легочные лимфоузлы. При равномерном хроническом ингаляционном поступлении со скоростью ( $V$ ) процессы



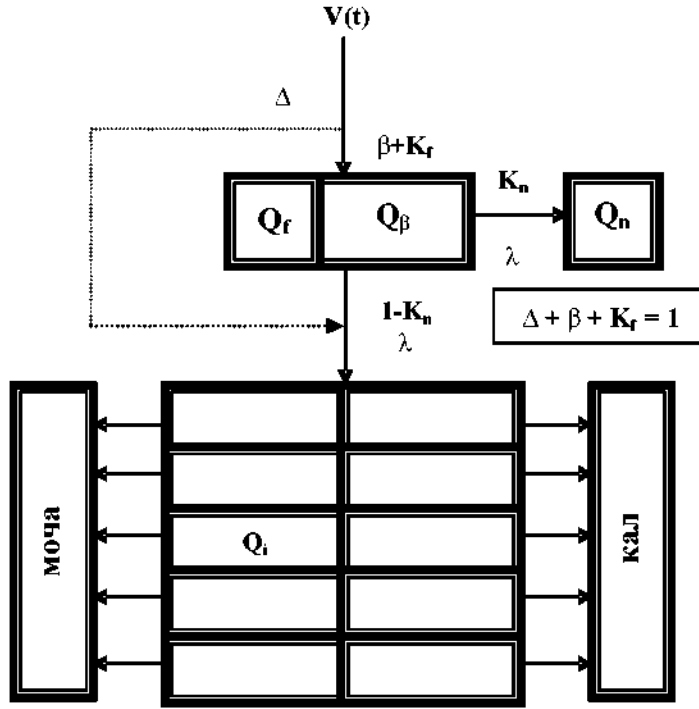


Рис. 5. Структурная схема модели “Дозы-1999”

транспорта в дыхательном тракте и экскреции из организма в рамках модели описываются системой из тринадцати уравнений:

$$\frac{dQ_\beta}{dt} = \beta \cdot V - \lambda \cdot Q_\beta \quad (5)$$

$$\frac{dQ_f}{dt} = K_f \cdot V \quad (6)$$

$$\frac{dQ_n}{dt} = K_n \cdot \lambda \cdot Q_\beta \quad (7)$$

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{a_i}{x_i} [(1 - K_n) \cdot \lambda \cdot Q_\beta + \Delta \cdot V] - x_i \times Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (8)$$

Обмен после прекращения ингаляционного поступления описывается той же системой при  $V = 0$ . Решая указанную систему уравнений, можно найти выражения для относительного

содержания плутония в легких  $\eta_l$  и трахеобронхиальных лимфоузлах  $\eta_{лу}$ . Подгонка этих выражений к посмертно выявленным индивидуальным значениям  $\eta_l, \eta_{лу}$  путем минимизации суммы квадратов отклонений:

$$\text{Min} \sum_i (\eta_{лi} - \eta_{ли})^2 \text{Min} \sum_i (\eta_{луi} - \eta_{луи})^2 \quad (9)$$

позволила получить следующие численные значения искомых параметров обмена в зависимости от транспортабельности.

Сравнение модельных прижизненных биофизических оценок с данными посмертных определений о содержании нуклида в дыхательном тракте, показало удовлетворительное соответствие модельных оценок для отдаленных сроков, порядка десяти и более лет после начала контакта. Модель по анализам мочи на плутоний предсказывает несмещенные оценки относительного содержания в легком с неопределенностью, характеризуемой стандартным

Таблица 3

Параметры редуцированного варианта модели легочного клиренса (наиболее вероятное значение  $\pm$  среднее квадратичное отклонение) [17]

S, %	K <sub>r</sub> , %	Δ, %	β, %	λ, год <sup>-1</sup>	K <sub>п</sub> , %
0,3	15,5±4,2	26,5±46,5	58,0±46,4	0,134±0,103	26,0±4,2
1,0	4,2±0,7	70±9,1	24,0±9,1	0,133±0,045	21,0±1,6
3,0	1,8±0,2	86±3,5	8,1±3,5	0,170±0,063	11,0±0,9

геометрическим отклонением, колеблющимся от 2,6 до 3,6 в зависимости от транспортабельности плутониевого аэрозоля [17]. Методика применялась при обследовании биофизическими лабораториями персонала радиохимических предприятий более двух десятилетий. Полученные результаты, были использованы также для предварительных оценок риска проявления канцерогенных эффектов, вызванных облучением персонала "Маяка" инкорпорированным плутонием [18,19].

*Модель "Дозы-2000"*

Модель "Дозы-1999" основана на упрощенном описании обмена в дыхательном тракте в ранней фазе после ингаляции. Это приводит к недооценке аккумулярованных доз облучения. Особенно большие ошибки возможны при оценке уровней облучения в ранние сроки после острых, т.е. однократных случаев ингаляционного поступления. Указанные недостатки были устранены при разработке биокинетической модели "Дозы-2000".

Структурная схема модели "Дозы-2000" (рис. 6) включает в себя транспортные коммуникации, рекомендуемые МКРЗ-66 [9] для описания процессов, обусловленных поглощением нуклида в кровь и действием мерцательного эпителия в трахеобронхиальном дереве как в ранние, так и в поздние сроки после ингаляции. Структурная схема охватывает 39 камер, входящих в состав трех блоков дыхательного тракта по 13 камер каждый, отвечающих процессам быстрого (доля  $f_r$ ), медленного (доля  $1-f_r$ ) рас-

творения и блока, описывающего образование промежуточного связанного состояния (доля  $f_b$ ). Кроме того, модель "Дозы-2000" включает в себя однокамерный вариант модели ЖКТ и взятые из модели "Дозы-1999" 10 камер системного пула. Таким образом, для описания транспорта и экскреции при ингаляционном поступлении плутония используется 50 камер. Кинетика обмена описывается следующей системой 50 линейных дифференциальных уравнений первого порядка [20]:

$$\frac{dq_i}{dt} = \dot{I}(t)D_i + \sum_{j=1}^N \lambda_{j,i} q_j - (\lambda_r + \sum_{j=1}^N \lambda_{i,j}) q_i \quad (10)$$

- где  $q_i, q_j$  - альфа активность плутония в  $i$ -ой и  $j$ -ой камерах момент времени  $t$  (Бк);
- $\dot{I}$  - скорость ингаляционного поступления в момент времени  $t$  (Бк/сут);
- $D_i$  - доля проингаляционной активности, отложившаяся в  $i$ -ой камере респираторного тракта;
- $\lambda_{ij}$  - коэффициент перехода (сут<sup>-1</sup>) из камеры  $i$  в камеру  $j$ ;
- $\lambda_r$  - постоянная радиоактивного распада (сут<sup>-1</sup>);
- $N$  - число камер.

Решение системы уравнений осуществляли экспоненциальным матричным методом, описанным в [21]. Из-за отсутствия данных об обмене нуклида в респираторном тракте на самой ранней стадии после ингаляции для модели "Дозы-2000" было принято допущение о том, что доля  $f_r$  быстро резорбируемая в кровь,

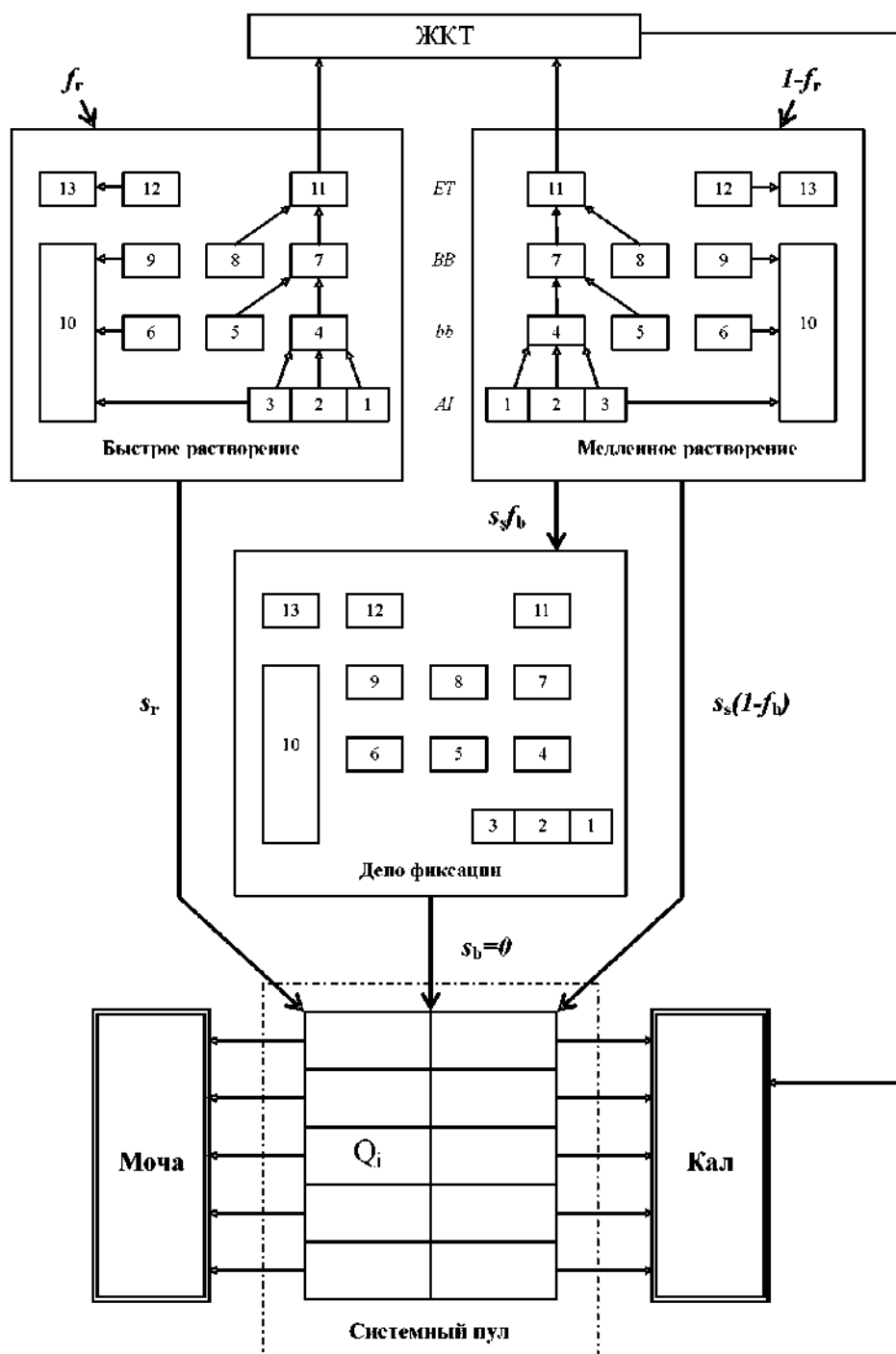


Рис. 6. Структурная схема модели "Дозы-2000"

пропорциональна показателю транспортабельности и равна  $S/100$ . Следуя МКРЗ-66 принимали также относительную скорость быстрой резорбции равной  $S_r = 100 \text{ сут}^{-1}$ . Так как данные посмертных исследований указывали на наличие длительной задержки нуклида в дыхательном тракте, то этот факт трактовался в рамках модели как образование депо фиксации, т.е. приписывали  $S_b = 0$ .

Адаптация модели МКРЗ-66 к данным о метаболизме у работников ПО "Маяк" состояла в определении доли  $f_b$ , приходящейся на депо фиксации связанного плутония, и оценке медленной скорости  $S_s$  абсорбции нуклида в кровь для трех групп персонала, работавших с соединениями плутония разной транспортабельности.

Численные значения адаптированных  $f_b$  и  $S_s$  были получены, используя аналогичный подход, который применялся при расчете параметров модели "Дозы-1999", т.е. путем фитирования расчетных значений относительного содержания нуклида в дыхательном тракте  ${}^i\eta_i$  у  $i$ -го индивида к фактически измеренному посмертно  ${}^i\eta_i$ , исходя из требования минимизации суммы квадратов отклонений логарифмов указанных показателей:

$$\text{Min} \sum_i [\text{Ln}({}^i\eta_i) - \ln({}^i\eta_i)]^2 \quad (11)$$

Поиск параметров модели, отвечающих условию (11), осуществляли методом деформирующегося многогранника [22] отдельно для каждой из трех групп персонала с разной транспортабельностью. Вычисления параметров

легочного клиренса в рамках модели "Дозы-2000" было выполнено при допущении о том, что АМАД = 15 мкм. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры легочного клиренса в зависимости от транспортабельности, вычисленные по модели "Дозы-2000" [25]

$S, \%$	Количество исследованных случаев	$f_r$	$f_b$	$S_s, \text{сут}^{-1}$ (лет <sup>-1</sup> )
0,3	59	0,003	0,22	0,00025 (0,09)
1,0	261	0,01	0,077	0,00051 (0,19)
3,0	223	0,03	0,035	0,002 (0,73)

Показатели табл. 4 получены при обработке того же массива данных (543 случая), который был использован при расчете параметров модели "Дозы-1999" (табл. 3). Сравнение таблиц показывает, что новые численные значения  $f_b$  приблизительно в полтора – два раза выше аналогичных цифр табл. 3, и они закономерно, как и в табл. 3, находятся в обратном соотношении с показателем транспортабельности. Численные значения  $S_s$ , приведенные в табл. 4 и табл. 3, различаются. В отличие от модели "Дозы-1999", где не выявлена связь рассматри-

Таблица 5

Среднее геометрическое отношение, рассчитанного по модели "Дозы-2000" содержания плутония в легком к посмертно измеренному в тех же случаях

Транспортабельность $S, \%$	Число случаев	Отношение относительных содержаний	Отношение абсолютных содержаний
0,3	12	1,01 (1,71)	0,48 (1,61)
1,0	115	1,04 (2,32)	1,18 (3,63)
3,0	73	1,02 (2,18)	1,36 (2,47)

Примечание – В скобках указано стандартное геометрическое отклонение.

ваемого показателя с транспортабельностью, данные табл. 4 указывают на закономерное, согласующееся с физиологией, увеличение скорости резорбции в кровь по мере возрастания транспортабельности.

Верификацию модели "Дозы-2000", выполненную путем сравнения предсказываемого моделью группового среднего геометрического содержания с посмертно обнаруженным в легком и организме, отражают данные табл. 5.

Модель "Дозы-2000", как и следовало ожидать, обеспечивает несмещенные оценки для относительного содержания, т.к. используемые параметры модели получены из требования минимизации выражения (11), фактически означающего требование минимума смещенности. Однако, когда расчет содержания выполняется по данным об уровне экскреции с мочой, для отношения абсолютных значений получают смещенные оценки.

Поскольку определение отношений абсолютных содержаний опирается на трактовку абсолютных значений скорости экскреции с мочой, одна из возможных причин упомянутого смещения могла заключаться в использовании некорректной десяти камерной модели обмена (и экскреции) системного плутония. К этому недостатку 10-камерной модели относится также ее внутренняя противоречивость, заключающаяся в заведомо упрощенном допущении об отсутствии процесса перераспределения нуклида между органами и тканями, что исключает возможность корректного описания процесса формирования доз облучения органов внелегочного пула.

Модель "Дозы-2005"

Модель "Дозы-2005" основывается на использовании модели, представляющей собой комбинацию МКРЗ-66 [20] модели легочного клиренса и физиологически обоснованной модели МКРЗ-67 [23], взятой взамен десяти камерной модели. В ходе работы над проектом Модель МКРЗ-67 была модифицирована R.Leggett'ом с учетом дополнительных данных о метаболизме плутония, полученных при исследованиях в ЮУрИБФ [24]. После пересмотра структурной схемы модифицированная модель обмена системного плутония МКРЗ-67А была пополнена дополнительными камерами в печени, крови. Данная модель содержит 22 камеры характеризуется новыми численными значениями 43 параметров обмена.

Структурная схема полной модели "Дозы-2005", включающая в себя модификацию МКРЗ-67А и блок дыхательного тракта, представлена на рис. 8. Изменение структурной схемы и параметров повлекло за собой изменение способа описания экскреции из системного пула. На рис. 7 показана зависимость от времени уровней экскреции с мочой после однократного поступления нуклида в кровь, рассчитанная с помощью двух системных моделей. Из графиков рис. 7 следует, что переход к "леггеттовской" модификации обуславливает в 1,5–2 раза более высокие, сравнительно с 10-камерной моделью, оценки расчетного уровня выведения с мочой в период от ста до нескольких тысяч суток после поступления нуклида в кровь. Это должно привести к более низкой биофизической оценке

Таблица 6

Параметры адаптированной модели легочного клиренса МКРЗ-66А

S <sub>г</sub> , %	f <sub>г</sub>	f <sub>г</sub> <sup>b</sup>	курящие			некурящие		
			N	f <sub>г</sub>	S <sub>г</sub> , сут <sup>-1</sup>	N	f <sub>г</sub>	S <sub>г</sub> , сут <sup>-1</sup>
0,3	0,003	10 <sup>-5</sup>	50	0,193	3,22·10 <sup>-4</sup>	8	0,147	3,61·10 <sup>-4</sup>
1,0	0,01	3·10 <sup>-5</sup>	188	0,0657	1,17·10 <sup>-3</sup>	69	0,0332	4,75·10 <sup>-4</sup>
3,0	0,03	10 <sup>-4</sup>	157	0,0203	7,11·10 <sup>-3</sup>	58	0,0226	1,77·10 <sup>-3</sup>

<sup>a</sup> AMAD of 5 мкм.

<sup>b</sup> Доля, резорбируемая в ЖКТ.

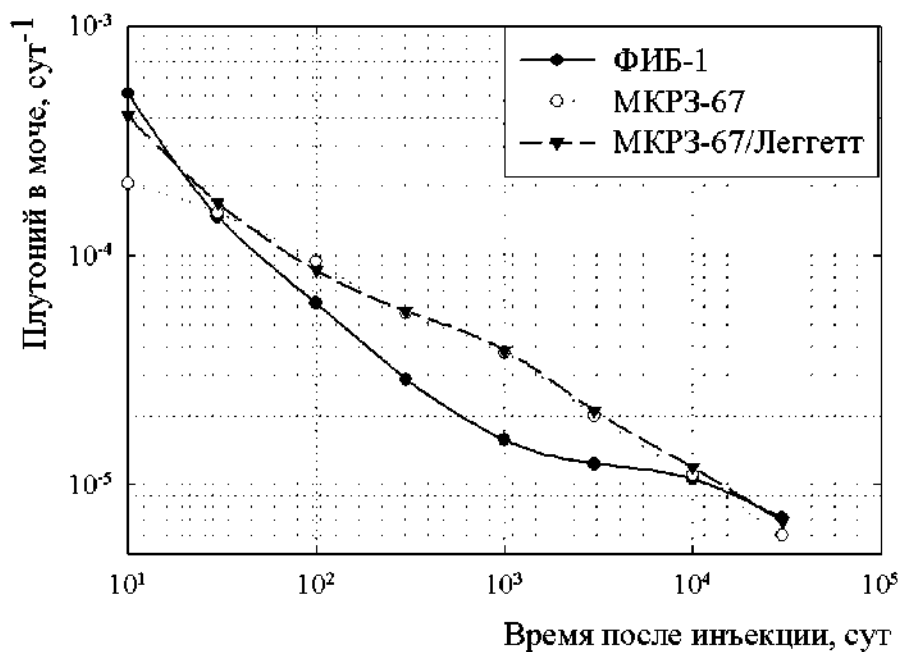


Рис. 7. Экскреция системного плутония с мочой после однократной инъекции единицы активности, рассчитанная с помощью трех моделей

Таблица 7

Эквивалентная доза облучения легкого (мЗв), накопленная за 50 лет после однократного ингаляционного поступления (при АМАД = 5 мкм) [20]

Транспортабельность	Наличие Фактора курения	Модель легочного клиренса		
		МКРЗ-66	МКРЗ-66А "Дозы-2005"	"Дозы-1999"
оксид (S=0,3 %)	Да	0,116	0,164	0,132
	Нет	0,0767	0,0976	
нитрат (S=3,0 %)	Да	0,0117	0,0349	0,0357
	Нет	0,00938	0,0380	

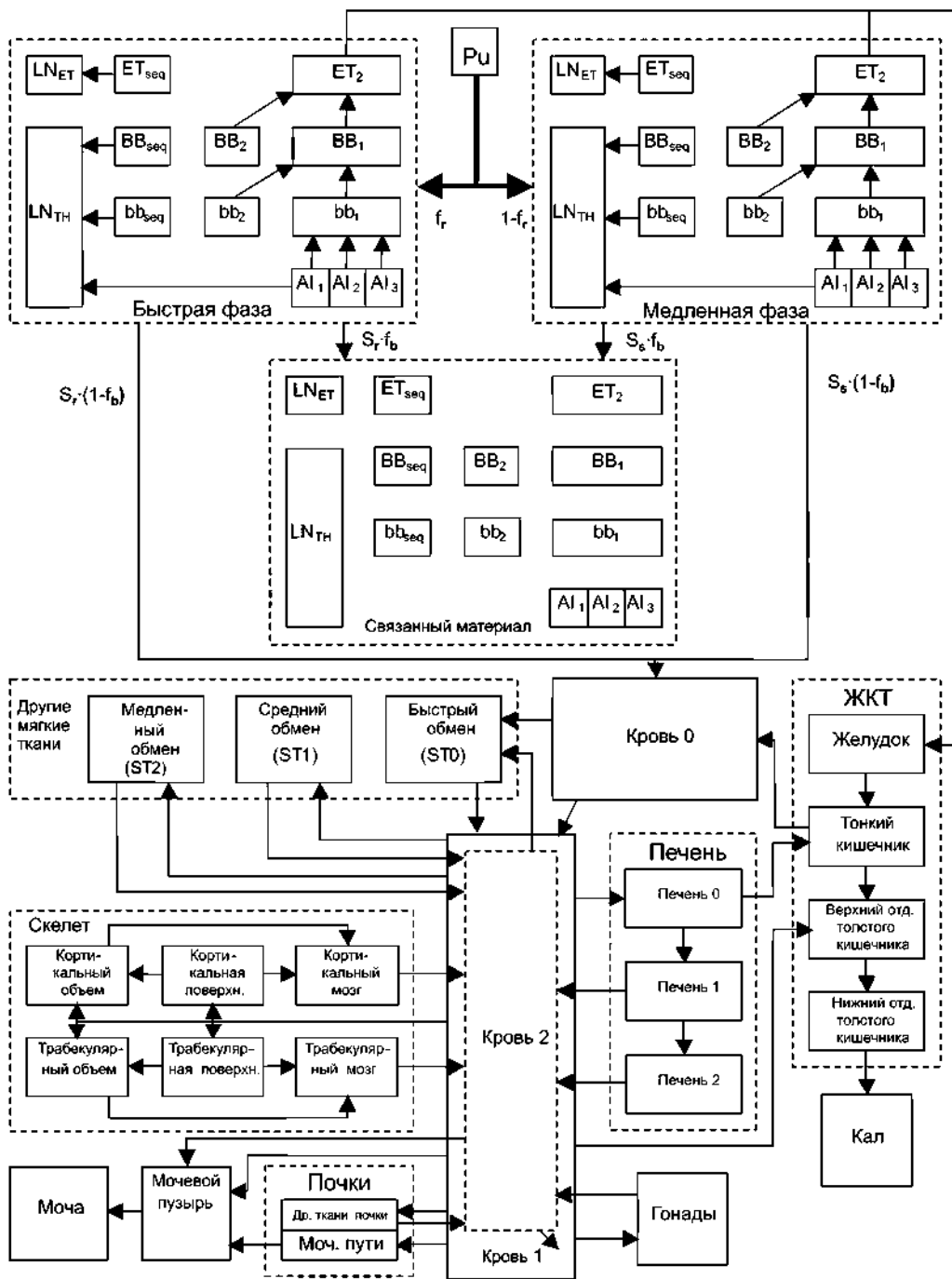


Рис. 8. Структурная схема модели "Дозы-2005"

содержания нуклида в организме для модели "Дозы-2005" по сравнению с моделью "Дозы-2000".

Наряду с совершенствованием блока камер системного плутония были проведены исследования модифицирующего влияния курения, а также замены АМАД = 15 мкм на АМАД = 5 мкм на изменение параметров обмена в легком. Новый модифицированный блок дыхательного тракта модели "Дозы-2000", скорректированный на влияние курения и дисперсности, получил условное название МКРЗ-66А и далее он рассматривается как часть структурной схемы модели "Дозы-2005". В табл. 6 приведены значения параметров адаптированного блока легочного клиренса модели "Дозы-2005". Курение повлияло на численные значения параметров  $f_b$  и  $S_b$  и, соответственно, на дозу облучения дыхательного тракта. Из табл. 7, где сравниваются оценки уровней облучения легких, выполненные с помощью моделей МКРЗ-66 и МКРЗ-66А, по-разному учитывающих курение, следует, что этот фактор увеличивает в 1,5–1,7 раза дозу облучения органа в случае диоксида, однако оказывает меньшее влияние при ингаляции нитрата. Вместе с тем табл. 7 указывает на заниженную оценку дозы в рамках модели МКРЗ-66 для соединений типа диоксида (в 1,3–1,4 раза) по сравнению с оценкой МКРЗ-66А ("Дозы-2005"). Особенно значительное (3–4-кратное) расхождение получено для соединений типа нитратов, что объясняется влиянием фиксированного компонента, который отвергается моделью МКРЗ-66.

При разработке общей схемы комбинированной модели были проведены также исследования модифицирующего влияния состояния здоровья на изменение параметров обмена во внелегочном пуле. Анализ аутопсийного материала показал, что у лиц с заболеваниями, сопровождающимися жировой дистрофией печени, происходило перераспределение плутония из этого органа в скелет, что способствовало формированию в последнем более высокой дозы облучения. Отношение содержания скелет/печень в зависимости от степени заболевания и возраста может колебаться в пределах от 1,2 до 5,5 [26]. В связи с этим оценка доз, когда имелись посмертные данные о распределении нуклида, установленные при аутопсии, выпол-

нялись путем одновременного фитирования параметров моделей легочного клиренса и измеренного системного содержания в органах. Однако закономерности биокинетики указанного перераспределения в зависимости от тяжести заболевания еще не изучены. Выработка подходов к прижизненному уточнению дозовых нагрузок на органы с учетом тяжести заболевания является задачей будущих исследований.

## ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

Следует отметить, что наряду с совершенствованием биокинетических моделей разработка дозиметрической системы включала в себя также совершенствование подходов к использованию факторов, влияющих на оценку доз. Выбор и учет этих факторов определялся уровнем и состоянием разработок к моменту выдачи информации эпидемиологам. К числу таких факторов, кроме отмеченных выше курения табака и статуса здоровья, также относятся реконструкция историй облучения (ритма ингаляционного поступления, учет аварийных или нештатных ситуаций), влияние на экскрецию хелатотерапии и выбор АМАД. Учет модифицирующих факторов при переходе от одной методики к другой отражен в табл. 8.

С учетом факторов, приведенных в табл. 8 на разных этапах разработки проекта эпидемиологам были последовательно представлены файлы с результатами расчетов доз облучения, проведенных по трем, описанным выше моделям:  $D_{1999}$ ,  $D_{2000}$ ,  $D_{2005}$ . Для предварительных оценок риска канцерогенных и детерминированных эффектов, вызванных облучением персонала ПО "Маяк". Наряду с этим был выдан отдельно файл с оценками доз в 949 случаях, выполненными по данным посмертных исследований с применением способа расчета, который, как уже отмечалась выше, отличался от методики прижизненных оценок. Часть случаев из указанного числа имела наряду с посмертными также прижизненные оценки, выполненные по данным биофизических обследований.

В число 7217 индивидуумов, обеспеченных биофизическими анализами, не включены 501 человек, подвергавшихся воздействию в нештатных ситуациях либо с плохо документированной историей ингаляционного облуче-



Таблица 8

Факторы, влияющие на результаты дозиметрических оценок

Фактор	Методика		
	“Дозы-1999”	“Дозы-2000”	“Дозы-2005”
Модель дыхат тракта	Редуцированная модель МКРЗ-30	Адаптированная модель МКРЗ-66	Адаптированная модель МКРЗ-66А
Модель системного пула	10-камерная ФИБ-1	10-камерная ФИБ-1	Модифицированная МКРЗ-67А
Принятое значение АМАД	–	15мкм	5мкм
Модель ЖКТ	–	Однокамерная, транзит через ЖКТ, без резорбции в нем	4-камерная МКРЗ-30, резорбция зависит от транспортабельности
Транспортабельность	Определяют методом диализа, три класса	Определяют методом диализа, три класса	Определяют методом диализа, три класса
Способ учета ритма поступления	Средне групповой, хроническое, равномерное во времени	Средне групповой, Хроническое, убывающее экспоненциально во времени	Индивидуальный, изменяющийся во времени с учетом профмаршрута
Учет курения	нет	нет	учитывается
Органы, для которых рассчитываются дозы	Легкие, печень, скелет	Легкие, печень, клетки костных поверхностей, красн. костн. мозг	Те же, что и для “Дозы-2000” плюс девять других органов и тканей
Дата передачи эпидемиологам (число обследованных)	Сентябрь 1999 (6270)	Октябрь 2001 (6904)	Ноябрь 2005 (7217)
Кратность ускорения экскреции с мочой при ДТПА-терапии	70	70	62,3

Таблица 9

Среднегрупповые значения доз облучения (Гр) инкорпорированным плутонием, рассчитанные с помощью трех моделей по данным анализов мочи на содержание нуклида и переданные эпидемиологам, работающим по проекту 2.2

Завод	Дозы	Легкие	Печень	Клетки костных поверхностей	Красный костный мозг	Число людей
Химико-металлургическое производство S = 0,3–1,0 %	D <sub>1999</sub>	14,7±1,2	20,1±1,6	126±10	10,1±1,4	2973
	D <sub>2000</sub>	21,7±1,7	20,5±1,6	130±10	10,1±0,8	3267
	D <sub>2005</sub>	17,3±1,6	21,5±1,8	81,7±6,8	4,1±0,3	3318
Радиохимическое производство S = 3,0 %	D <sub>1999</sub>	4,9±0,2	13,3±0,7	83,7±4,2	6,7±0,33	2973
	D <sub>2000</sub>	7,3±0,3	14,5±0,8	91,8±5,4	7,2±0,4	3267
	D <sub>2005</sub>	4,8±0,2	15,5±0,8	58,8±3,0	2,9±0,1	3318

ния, либо с раневым поступлением. Методика восстановления доз облучения в указанных случаях еще не разработана и является предметом дальнейших исследований для дозиметрии плутония. В табл. 9 приведены средние групповые оценки индивидуальных доз облучения инкорпорированным плутонием для четырех органов, выполненные с использованием трех моделей. В рамках каждой из трех моделей дозы облучения легкого и органов внелегочного пула у персонала плутониевого производства ( $S = 0,3-1,0 \%$ ) выше, чем у персонала радиохимического ( $S = 3,0 \%$ ) производства, что согласуется с известным фактом о более высоких концентрациях альфа-активных аэрозолей на первом производстве по сравнению со вторым. Для легкого дозы  $D_{1999}$  меньше доз  $D_{2000}$  при всех значениях транспортабельности. Это является следствием недоучета в рамках методики "Дозы-1999" фактора облучения органа в ранней фазе легочного клиренса. Для других органов указанный фактор не является существенным и  $D_{1999}$  для них практически не отличаются от  $D_{2000}$ .

Обращает внимание факт, что дозы  $D_{2005}$  для всех органов (кроме печени) и для различных производств (т.е. разных значений транспортабельности), как правило, ниже доз  $D_{2000}$ . Поскольку обе методики "Дозы-2005" и "Дозы-2000" опираются на одинаковые модельные представления о легочном клиренсе, то расхождения дозовых оценок, полученных на основе анализов мочи, могут быть объяснены двумя причинами:

– использованием разных моделей обмена системного плутония: МКРЗ-67А и десяти камерной модели;

– учетом в рамках методики "Дозы-2005" дополнительных по сравнению с методикой "Дозы-2000" факторов, которые могли оказывать модифицирующее влияние на оценку уровня облучения.

Применение "леггеттовской" модификации (МКРЗ-67А), учитывая соображения, высказанные выше при ознакомлении с графиком рис. 7 может обуславливать более низкие биофизические оценки содержания (и, соответственно, доз) сравнительно с 10-камерной моделью. Это является главной причиной снижения дозовых оценок при переходе от методики "Дозы-2000" к методике "Дозы-2005".

В табл. 10 представлены результаты сравнения прижизненных модельных оценок содержания в органах с данными посмертных измерений, выполненные в рамках двух методик "Дозы-2000" и "Дозы-2005", в виде средних геометрических отношений теоретически рассчитанного к посмертно обнаруженному  $X_g = Q_{\text{модель}} / Q_{\text{факт}} / Q_{\text{автопсия}}$  и соответствующих стандартных геометрических отклонений  $\sigma$ .

Данные табл. 10 не позволяют отдать предпочтение ни одной из моделей. Обе модели приводят для труднорастворимых соединений ( $S = 0,3 \%$ ) к смещенным оценкам в сторону низких значений для предсказываемого содержания в легком, системе и организме. Отличия прижизненных оценок от фактического содержания в организме, выявленного

Таблица 10

Отношение модельного расчетного содержания плутония в органах к посмертно измеренному

S, %	N	Модель	Системный блок	Легкие		Л/У		Система		Организм	
				$X_g$	$\sigma_g$	$X_g$	$\sigma_g$	$X_g$	$\sigma_g$	$X_g$	$\sigma_g$
0,3	12	"Дозы-2005"	Леггетт	0,31	1,63	0,01	3,38	0,53	1,68	0,29	1,42
		"Дозы-2000"	10 камер	0,48	1,61	0,02	3,50	0,92	1,62	0,49	1,40
1,0	115	"Дозы-2005"	Леггетт	0,86	3,68	0,01	5,36	0,84	2,18	0,72	2,21
		"Дозы-2000"	10 камер	1,18	3,63	0,02	5,29	1,30	2,19	1,10	2,21
3,0	73	"Дозы-2005"	Леггетт	1,06	2,50	0,01	3,99	0,94	1,95	0,92	1,94
		"Дозы-2000"	10 камер	1,36	2,47	0,01	4,06	1,36	1,96	1,32	1,95

посмертно, характеризуются стандартными геометрическими отклонениями, варьирующими в пределах от 1,4 до 2,21. При этом для обеих моделей проявляется тренд к смещению оценок в сторону увеличения с ростом транспортабельности. Зависимость верифицируемых оценок от транспортабельности свидетельствует о неадекватном описании легочного клиренса в рамках обеих моделей. Неадекватность особенно проявляется в расчетах накопления нуклида в легочных лимфоузлах, выполненных при соблюдении рекомендации МКРЗ-66, что указывает на необходимость дальнейшего совершенствования модели "Дозы-2005" в части, касающейся обмена в дыхательном тракте. Физиологически более обоснованная модель Леггетта выглядит более привлекательной для дальнейших разработок с учетом предполагаемых изменений блока легочного клиренса, однако ее адекватность не подтверждена верификацией с использованием данных посмертных исследований.

Таим образом, с учетом данных о метаболизме промышленных соединений плутония в организме человека следует считать, что модель "Дозы-2005" нуждается в доработке. Представляется, что с большой долей вероятности должны подвергнуться изменению оба блока: дыхательный тракт и системный.

### ОШИБКИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ДОЗ

Ошибки определения доз косвенным методом имеют два источника: компонент, связанный с измерением альфа-активности нуклида в биосубстратах (в экскретах или в органах и тканях, взятых при аутопсии), и компонент, обусловленный некорректной трактовкой результатов измерения. Пределы относительной ошибки измерения альфа активности  $q_0$  плутония в образце при доверительном уровне  $P = 0,95$  рассчитываются по формуле:

$$\Delta(q_0) = \Delta_{q_0} + 2 \cdot \sigma(q_0) \quad (12)$$

где  $\Delta(q_0)$  - относительная ошибка определения доз косвенным методом;

$\Delta_{q_0}$  - максимальная систематическая ошибка коэффициента эффективности

радиометра, взятая из паспорта калибровочного источника, равная 0,22;

$\sigma(q_0)$  - стандартное отклонение для случайной ошибки определения активности образца, включающее в себя учет активности аликвоты исследуемого образца, фоновой составляющей, а также случайные ошибки, связанные с химико-аналитическими процедурами при подготовке образца к измерению.

Анализ измерений, результаты которых использованы при разработке системы плутониевой дозиметрии, показал, что при низком содержании нуклида неопределенности в основном были связаны со статистической ошибкой отсчета импульсов измерительным прибором. Ошибки, обусловленные химическими процедурами сравнительно невелики и характеризовались относительным стандартным отклонением, не превышающим 10–15 %. Общая ошибка должна сильно зависеть от фонового уровня лаборатории, который, как следует из графика на рис. 3 снизился в период с 50-х гг. до 2000 г. на два порядка. Так, расчеты показывают, что верхняя граница неопределенности измерения плутония в суточных порциях мочи до 1979 г. находилась в пределах 80–130 % для уровней МДА  $\cong 0,8$ –9 Бк/сут. После 2000 г. со снижением фона (рис. 4) неопределенность уменьшилась до 60 % при МДА 10 мБк/сут. Очевидно, что все сказанное о влиянии фонового уровня на неопределенность относится также к измерению содержания плутония в образцах органов и тканей, взятых на исследование при аутопсии.

Другой компонент неопределенностей связан как с недостатками теории, так и с недостаточно надежными входными данными, которые использовались при расчете доз. Подходы к решению этих вопросов в рамках модели "Дозы-1999" рассмотрены в [28]. В этой работе методом Монте-Карло было показано, что изменение параметров модели системного пула в пределах 5–25 %, может привести к изменениям биофизических оценок содержания нуклида в организме со стандартной ошибкой, варьирующей от 48 % до 280 %. На неопределенность оценки доз наряду с ошибками измерений оказывают большое влияние ненадежные данные об истории инкорпорации плутония. Особенно

большие ошибки при трактовке результатов биофизического обследования могут возникать из-за неправильного отнесения рассматриваемого случая к тому или иному классу транспортабельности, поскольку параметры обмена в зависимости от значения этого показателя могут изменяться в пределах целого порядка, оказывая столь же сильное влияние на определение дозы. Оценка дозы и ее неопределенности в каждом случае должны производиться с учетом сценария облучения, которому подвергался данный индивидуум. В связи с перемещением по рабочим местам персонал может подвергаться воздействию аэрозолей разной транспортабельности. Неопределенность оценок в этом случае достаточно трудно охарактеризовать, т.к. индивидуальный хронометраж работы на каждом участке не осуществлялся. В работе [28] эту проблему предложено решать путем введения пяти категорий для историй облучения, каждая из которых ориентирована на анализ облучения с учетом длительности ингаляционного поступления аэрозолей разного класса транспортабельности. Указанные категории охватывают неопределенности оценок доз как по данным посмертных определений, так и прижизненных – по данным биофизических обследований. Наименьшая неопределенность при таком подходе в рамках модели “Дозы-1999” достигается в случае определения доз на органы по данным посмертных определений, если человек работал постоянно на одном и том же участке. Так, для этого случая ошибка оценки доз в легком при достаточно высокой активности исследуемого образца колеблется в пределах 32–38 % [28]. Однако, для наиболее распространенного случая, когда оцениваются результаты биофизического обследования и работник сменил несколько участков производства, этот показатель может варьировать от 90 до 375 % в зависимости от предполагаемого соотношения длительностей времени работы на разных участках.

В заключение отметим, что верификация методики оценки доз может быть осуществлена лишь до стадии сверки накопления нуклида в органах, в тех случаях, когда представляется возможность сравнить посмертные данные с прижизненными определениями. Данные табл. 10 согласуются с рассмотренной выше

концепцией в работе [28]: стандартные геометрические отклонения, характеризующие отношения модельных и посмертно выявленных содержаний нуклида в легком варьируют в похожих пределах 1,6–3,7, независимо от выбора модели системного пула. При этом в согласии с [28] наибольшее значение 3,7 выявлено на производстве со средним значением транспортабельности  $S \approx 1$  %, где наблюдалось наиболее частое перемещение персонала между рабочими участками с разной растворимостью.

Рассмотренные выше подходы выполнены в рамках методики “Дозы-1999”, но использованные приемы принципиально применимы и для двух других методик с ожидаемыми результатами, которые, по нашему мнению, предположительно не должны сильно отличаться от уже полученных. Будущие исследования покажут насколько справедливо данное предположение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие дозиметрической системы внутреннего облучения персонала ПО “Маяк” подразумевает действия в двух направлениях:

- разработка и совершенствование методики определения доз облучения инкорпорированным плутонием;
- обеспечение по возможности полного охвата результатами дозиметрического обследования персонала, работавшего в контакте с плутонием.

Изложенный выше материал показывает, что в рамках российско-американского сотрудничества на основе материалов о метаболизме плутония в организме человека, накопленных в ЮУрИБФ, проанализированы три типа биокинетических моделей обмена нуклида в организме человека. Разработаны методики косвенной оценки уровней облучения инкорпорированным плутонием при хроническом ингаляционном поступлении, согласующиеся с современными представлениями о метаболизме и дозиметрии промышленных соединений радионуклида.

Наиболее отработанные в теоретическом отношении методики “Дозы-2000” и “Дозы-2005” обеспечивают возможность оценки индивидуального содержания плутония в организме с ошибкой, характеризуемой стандартным геометрическим отклонением, колеблющемся в пределах 1,4–2,21.

Указанные методики чаще приводят к оценкам содержания плутония в организме, смещенным в сторону низких значений; вместе с тем выявлен тренд к повышению оценок с ростом транспортабельности, что свидетельствует о неадекватном описании легочного клиренса в рамках обеих моделей.

С учетом указанных недостатков модель "Дозы-2005" нуждается в доработке, вероятнее всего это должно касаться обоих блоков, как дыхательного тракта, так и экстрапульмонального плутония. Указанные доработки позволят приступить к оценке неопределенностей в рамках модели "Дозы-2005".

Представленные в данном сообщении материалы свидетельствуют также, что в первом приближении решена главная задача по обеспечению эпидемиологов предварительными грубыми оценками доз с охватом 7217 человек, что составляет чуть более 30 % когорты работников ПО "Маяк", представляющих интерес с точки зрения оценки риска, обусловленного инкорпорацией плутония. Дальнейшее пополнение когорты индивидуумами с уровнями накопления, близкими или превосходящими допустимые значения, может осуществляться за счет включения в нее около 500 человек, подвергшихся облучению при нештатных ситуациях, однако это потребует разработки методик дозовых оценок для случаев острого поступления. Расширение числа лиц, обеспеченных дозиметрическими оценками, также, по-видимому, возможно на пути создания методики определения суррогатных доз. Методика предположительно может основываться на сравнительном анализе историй облучения контролировавшихся и не контролировавшихся работников и определении путем экстраполяции уровней накопления у индивидуумов, не имеющих дозиметрических оценок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Документы первого совещания "Объединенного Координационного Комитета по Изучению Последствий Радиационных Воздействий" (ОККИРВ). 24-26 октября 1994 г., Вашингтон, О.К., США.
2. Проект 2.2 "Оценка риска детерминированных и стохастических (канцерогенных) последствий профессионального облучения". См. "Меморандум рабочего совещания ОККИРВ, Москва, сентябрь 1994 г."
3. Проект 2.1 "Метаболизм и дозиметрия промышленных соединений плутония", там же что и [2].
4. Suslova K.G., Filipy R.E., Khokhryakov V.F., et. al. Comparison of the dosimetry of the Mayak Industrial Association and United States Transuranium and Uranium Registries: preliminary report // Radiat. Prot. Dosim. – 1996. – V. 67. – P. 13–22.
5. Проект 2.4 "Разработка усовершенствованной дозиметрической системы работников "Маяка". – 1998. – МЕДБИОЭКСТРЕМ МЗ РФ, Offis EH-51-DOE USA // CRDF Project Number Assigned RBO-20397-oz (EH).
6. Лызлов А.Ф., Мелентьева Р.В., Щербакова Л.М. Применение оптико-радиографического метода для исследования дисперсности промышленных альфа-активных аэрозолей // Вопросы радиационной безопасности. – 2001. – № 3. – С. 63–78.
7. Хохряков В.Ф., Цевелёва И.А., Семененко Т.В. и др. К вопросу о классификации промышленных альфа-активных аэрозолей // БРМ. – 1983. – № 2. – С. 47–53.
8. Хохряков В.Ф., Суслова К.Г., Цевелёва И.А., Лызлов А.Ф. Транспортабельность альфа-активных аэрозолей радиохимического предприятия // БРМ. – 1987. – № 1. – С. 98–103.
9. International Commission on Radiation Protection (ICRP). Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // Publication-66. – 1994. (Oxford: Pergamon press).
10. Хохряков В.Ф., Суслова К.Г., Цевелёва И.А., Аладова Е.Е. Объективный способ классификации альфа-активных аэрозолей для целей дозиметрии внутреннего облучения // Мед. радиология и рад. безопасность. – 1998. – Т. 43. – № 4. – С. 41–45.
11. Durbin P.W. Plutonium in Mammals: Influences of Plutonium Chemistry, Route of Administration and Physiological Status of the Animal on Initiation Distribution and Long-term Metabolism // Health Phys. – 1975. – V. 29. – № 4. – P. 495–510.
12. Хохряков В.Ф., Ерохин Р.А., Кудрявцева Т.И. О коэффициенте выведения плутония из организма с мочой // НТК, г. Обнинск, 24–27 декабря 1979 г. / Материалы конференции: "Дозиметрия, радиометрия ионизирующих из-

- лучений и радиационная безопасность” в 3-х т.; Ч. III. – М., 1980. – С. 237–243.
13. 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.
14. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Кудрявцева Т.И. и др. Уточнение уравнений экскреции плутония на основе новых данных о выведении радионуклида с мочой и калом в отдаленные сроки // Мед. радиол. и радиац. безопасность. – 2004. – Т. 49. – № 4. – С. 12–20.
15. Инструктивно-методические указания (ИМУ-88): “Выявление, учет и медицинское наблюдение за носителями плутония” // Под ред. Любчанского Э.Р., Хохрякова В.Ф. – Утв. Минатомом 30.05.88. – М., 1987. – 101 с.
16. Публикация 30 МКРЗ. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением. Доклад Комитета II Международной Комиссии по Радиологической защите // Пер. с англ. Под ред. Рамзаева П.В., Моисеева А.А. – М.: Энергоиздат, 1982. – 135 с.
17. Хохряков В.Ф. Модель лёгочного клиренса производственных соединений плутония // НТК, г. Обнинск, 24–27 декабря 1979 г. / Материалы конференции: “Дозиметрия, радиометрия ионизирующих излучений и радиационная безопасность” в 3-х т.; Ч. III. – М., 1980. – С. 328–334.
18. Khokhryakov V.F., Kellerer A.M., Kreisheimer M., Romanov S.A. Lung Cancer in Nuclear Workers of Mayak. A Comparison of Numerical Procedures // Radiat. Environ. Biophys. – 1998. – V. 37. – P. 11–17.
19. Khokhryakov V.F., Romanov S.A. Estimation of the Temporal Distribution and dose Dependence of Lung Cancers among Workers of Nuclear Fuel Reprocessing Plants // Health Physics. – 1996. – V. 71. – P. 83–85.
20. Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vostrotnin V.V. et. al. Adaptation of the ICRP Publication 66 respiratory tract model to data on plutonium biokinetics for Mayak workers // Health Physics. – 2005. – V. 88. – № 2. – P. 125–132.
21. A microcomputer algorithm for solving first-order compartmental models involving recycling // Health Physics. – 1989. – V. 56. – P. 857–868.
22. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: 1974. – 534 с.
23. ICRP67, Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 2. Pergamon Press, ICRP Publication 67, 1994b.
24. Leggett R.W., Ecerman K.F., Khokhryakov V.F., et. al. Mayak Worker Study: An Improved Biokinetic Model for Reconstructing Doses from Internally Deposited Plutonium // Radiat. Res. – 2005. – V. 164. – P. .
25. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Востротин В.В., Романов С.А. Адаптация модели лёгочного клиренса МКРЗ-66 к данным о кинетике обмена плутония у персонала “Маяка” // Мед. радиология и рад. безопасность. – 2001. – Т. 46. – № 6. – С. 76–83.
26. Suslova K.G., Khokhryakov V.F., Tokarskaya Z.B., et. al. The effect of state of health on organ distribution and excretion of systemic plutonium in the Mayak workers // Radiat. Prot. Dosim. – 2003. – V. 105. – № 1–4. – P. 229–233.
27. Распределение плутония в органах внелёгочного пула в отдаленные сроки после начала ингаляции у работников радиохимического производства. Сулова К.Г., Хохряков В.Ф., Токарская З.Б. и др. // Мед. радиология и рад. безопасность. – 2000. – Т. 45. – № 1. – С. 17–25.
28. Krahenbuhl M.P., Bess J.d., Wilde J.L., et. al. Uncertainties Analyses of doses resulting from chronic inhalation of plutonium at Mayak production // Health Physics. – 2005. – V. 89(1). – P. 33–45.