

УДК 546.799.4 : 572.025
© 2004

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДОЗИМЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО «МАЯК»

*В.В. Хохряков, В.Ф. Хохряков, К.Г. Сулова, А.В. Ефимов,
В.В. Востротин, А.Е. Щадилов
Россия, г. Озерск, Южно-Уральский институт биофизики*

Приводятся обобщенные результаты исследований в области внутренней дозиметрии персонала радиохимического и химико-металлургического переделов ПО «Маяк». Показана ведущая роль плутония в формировании доз внутреннего облучения работников указанных производств. Описаны биофизические принципы, методическая и аналитическая основа, которая в настоящее время используется для проведения контроля внутреннего облучения, обусловленного инкорпорацией плутония. Проанализированы возможности используемых методов. Показано, что метод альфа-радиометрии в ряде случаев не удовлетворяет требованиям контроля по чувствительности. Проведен анализ проблем, возникающих в процессе обследования профессионалов. Показано, что основными направлениями развития системы внутренней дозиметрии являются: совершенствование моделей метаболизма плутония (включая модели дыхательного тракта и внелегочного пула), переход на более чувствительную приборную базу при измерениях содержания плутония в биосубстратах, разработка методов оценки доз облучения при раневом поступлении плутония в организм человека, а также совершенствование методологии построения сценариев облучения профессиональных работников.

Работа предприятий атомной промышленности породила проблему радиационной безопасности персонала и населения, проживающего в зоне влияний предприятий ядерного топливного цикла. Практика радиационного мониторинга показала, что одним из важных факторов формирования радиационного прессинга на профессиональных работников является облучение, обусловленное инкорпорированными радионуклидами.

Более 30 лет биофизическая лаборатория ЮУрИБФ проводит исследования метаболизма основных дозообразующих радионуклидов, разработку методов измерения активности радиоактивных нуклидов в биосубстратах и определения доз облучения, обусловленных инкорпорированными нуклидами, а также осу-

ществляет мониторинг внутреннего облучения основного персонала радиохимического и химико-металлургического переделов ПО «Маяк».

Анализ данных многолетних исследований показывает следующее. Основной вклад в дозу внутреннего облучения профессиональных ПО «Маяк» вносит инкорпорированный плутоний. Значительное число профессиональных работников имело содержание плутония в организме, существенно превышавшие установленные нормативы (рис. 1). Дозы, создаваемые инкорпорированными продуктами деления были существенно ниже допустимых значений. Отсюда следует вывод: проблема внутреннего облучения работников ПО «Маяк» является проблемой дозиметрии плутония.

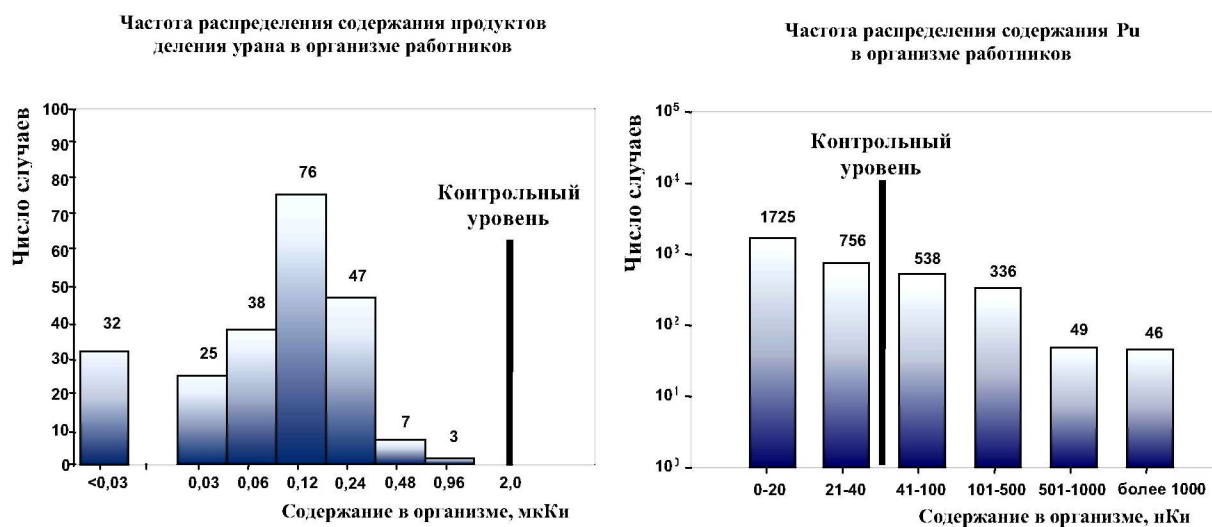


Рис. 1. Накопление продуктов деления и плутония в организме работников ПО «Маяк»

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА, ИСПОЛЪЗУЕМЫЕ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ ПЛУТОНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ПО «МАЯК»

Считается, что наиболее эффективным является метод косвенной дозиметрии плутония, основанный на измерениях активности нуклида в экскретах и последующей интерпретации результатов с использованием биокинетических моделей поведения радионуклида в органах первоначального отложения и последующего депонирования [1—3]. В процессе интерпретации результатов измерений активности плутония в экскретах используется дополнительная информация, характеризующая условия поступления радиоактивного вещества в организм человека (история облучения или профессиональный маршрут, а также физико-химические свойства промышленных аэрозолей плутония). Для повышения эффективности мониторинга внутреннего облучения используется метод спектрометрии излучения человека (СИЧ).

В настоящее время в биофизической лабо-

ратории ЮУрИБФ измерения активности плутония в биосубстратах проводятся двумя методами. Экспресс метод двойного фосфатного осаждения плутония из проб мочи заключается в осаждении радионуклида из пробы мочи концентрированным раствором аммиака на фосфатах кальция и магния, обработке осадка азотной кислотой и пергидролем, повторным осаждением нуклида с фосфатом висмута и последующим измерением активности плутония в осадке, смешанном со светосоставом, на альфа-радиометрической установке. Минимальная детектируемая активность плутония составляет 4 мБк/проба (12 мБк в суточной порции мочи). Метод сравнительно прост в реализации, обеспечен химическими реактивами и приборным парком, не требует высокой квалификации исполнителей. Обследование длится 3—4 сут [4]. Вторым методом определения активности плутония в моче — это метод альфа-спектрометрии. Он заключается в выделении плутония на ионообменной смоле BioRad из обработанной азотной кислотой суточной порции мочи, электролитическом

нанесении бессолевого слоя нуклида на стальные полированные подложки и альфа-спектрометрическом измерении активности ^{239}Pu . Для измерений используется альфа-спектрометр с кремниевыми поверхностно-барьерными детекторами системы EG&G Ortec ОСТЕТЕ РС. Минимальная детектируемая активность плутония составляет 1 мБк/проба (1 мБк в суточной порции мочи). Длительность одного измерения составляет около 7 сут. Метод достаточно сложен, требует использования дорогостоящих реактивов, а также радиоактивных меток, высокой квалификации исполнителей [5]. Ежегодно проводится порядка 500 обследований, из которых подавляющая часть проводится методом радиометрии.

^{241}Am является радиоактивным нуклидом, который сопутствует ^{239}Pu . Это позволяет использовать некоторые свойства ^{241}Am в методах и аппаратном оформлении элементов системы мониторинга внутреннего облучения, обусловленного инкорпорированным ^{239}Pu . В период с 1999 по 2000 гг. в биофизической лаборатории ЮУрИБФ были установлены современные спектрометры излучения человека (СИЧ) с более высокой чувствительностью, чем те, что использовались ранее. Спектрометры получили наименование СИЧ-7.5 и СИЧ-7.7. Установки СИЧ представляют собой защитные камеры, выполненные из свинца или низкофоновой стали. Характерный размер камер составляет ≈ 3 м. Толщина стен, пола и потолка камер в зависи-

мости от материала защиты меняется в пределах от 50 до 150 мм. Камеры снабжены дополнительными защитными слоями из кадмия и меди для поглощения рассеянного фотонного излучения. Установки СИЧ оборудованы полупроводниковыми детекторами Canberra. Более подробное описание установок содержится в работе [6]. Определение энергетической зависимости чувствительности детекторов является одним из важных шагов в процессе измерений содержания радиоактивных нуклидов в организме человека. В условиях детектирования низкоэнергетического фотонного излучения, сопровождающего альфа-распад ^{241}Am , корректная градуировка спектрометра излучения человека приобретает особенно большое значение. Определение численных значений градуировочных коэффициентов установок СИЧ проводилось с использованием антропоморфного фантома LLNL и фантома черепа человека. По результатам измерений были оценены эффективность и минимально детектируемая активность ^{241}Am в органах первоначального отложения и последующего депонирования. Численные значения МДА для двух установок СИЧ приведены в табл. 1.

За период эксплуатации установок СИЧ с 1999 по 2003 гг. проведено более 5000 обследований работников радиохимического и химикометаллургического производства, а также бывших работников ПО «Маяк». Всего обследовано более 3600 человек.

Таблица 1

Значения МДА для ^{241}Am (Бк) установок СИЧ

Геометрия измерения	Установка СИЧ			
	7.5 NaI(Tl)	7.3 NaI(Tl)	7.5 HPGe	7.7 HPGe
Легкие	—	—	12,5	11,5
Печень	—	—	12,5	10,6
Череп	—	9,6	5,3	3,9
Скелет	—	—	37,0	28,0
Организм	74,0	74,0	62,0	54,0

Для корректной интерпретации результатов измерений на основе биокинетических моделей поведения плутония в организме человека необходима дополнительная информация, которая характеризует условия ингаляционного поступления нуклида, а также физико-химические свойства вдыхавшихся промышленных аэрозолей плутония. Под профессиональным маршрутом подразумеваются следующие данные: год начала контакта, год окончания контакта, тип помещения, в котором данный работник проработал большую часть времени, в соответствии с классификацией по транспортабельности аэрозолей плутония. Информация собирается на каждого обследованного работника и заносится в соответствующие разделы базы данных. Под физико-химическими свойствами промышленных аэрозолей плутония подразумевается их дисперсный состав в терминах АМАД и транспортабельность. Последний показатель является объективной характеристикой промышленных аэрозолей плутония, показывающей их способность к резорбции [7].

Интерпретация результатов измерений активности плутония в экскретах на основе биокинетических моделей является завершающей фазой процесса дозиметрического контроля персонала. Для этого этапа оценки доз облучения принципиально важным является использование моделей, адекватно описывающих поведение плутония в органах первоначального отложения и последующего депонирования. В этом контексте целесообразно изложить сущность моделей поведения плутония в организме человека, которые используются при расчете доз облучения работников ПО «Маяк».

С конца 80-х годов (1988) вплоть до начала двухтысячного года для оценки содержания плутония в органах основного депонирования, а также доз облучения использовалась модель «Дозы-1999» (рис. 2).

Сущность модели состоит в следующем. Поведение Pu в легком, которое включает трахеобронхиальное дерево и альвеолярный отдел, описывается с помощью трех камер: депо фиксации, из которого отложившийся нуклид не выводится (K_f), камера компонента со срав-

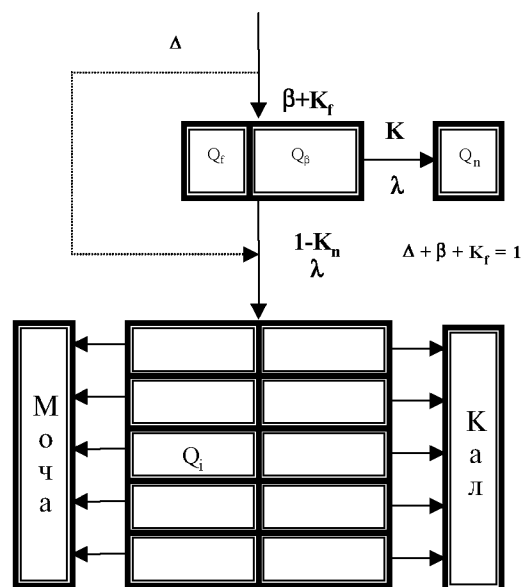


Рис. 2. Модель Дозы-1999

нительно большим периодом полувыведения (β), виртуальная камера, которая соответствует мгновенному компоненту (Δ). Последняя камера используется для описания процессов транспорта в ранней стадии клиренса плутония, динамику которых не представляется учесть, основываясь на секционном материале, но действие которых отражается на распределении нуклида между легкими и внелегочным пулом. Допущение для условий легочного клиренса в отдаленные после ингаляции сроки оправдано, так как модель верифицировалась на результатах отсроченных измерений. Отличительной особенностью модели «Дозы-1999» от рекомендованных в то время моделей МКРЗ является наличие депо фиксации плутония в легких [8].

Упрощенная модель обмена плутония в организме человека обладает целым рядом достоинств. Она достаточно хорошо описывает метаболизм нуклида в организме человека, включая легочный клиренс и экскрецию нуклида из внелегочного пула в отдаленные сроки. В данной модели введено депо фиксации плутония в дыхательном тракте, существование которого было

доказано как в макродозиметрических исследованиях на аутопсийном материале, так и в ходе изучения микрораспределения нуклида в легких человека. Тем не менее, следует указать на ряд недостатков этой модели, ограничивающих ее применение. Модель, рассматривая легкое как единую камеру, не берет во внимание ряд биологических механизмов, с помощью которых происходит очищение дыхательного тракта радиоактивных аэрозолей. Следствием намеренного упрощения было некорректное описание легочного клиренса в ранних его фазах, когда мукоцилиарный эскалатор может играть значимую роль в очищении легких.

Появление в 1994 г. Публикации МКРЗ-66 [9] ознаменовало переход в дозиметрии дыхательного тракта к новому более глубокому по-

ниманию тех биологических процессов, которые обеспечивают транспорт радиоактивных веществ из легких. Модель «Дозы-2000» (рис. 3) представляет собой попытку объединить детальные представления о легочном клиренсе с результатами исследований, доказавшими существование депо фиксации.

Способ объединения легочной модели МКРЗ-66 с результатами исследований, показавшими существование депо фиксации плутония, заключается в следующем. При описании резорбции плутония в кровь рассматриваются три фактора, определяющие этот процесс: быстро резорбируемая фракция, медленно резорбируемая фракция, депо фиксации нуклида. Наличие первых двух факторов постулировано моделью МКРЗ-66. Существование депо фиксации

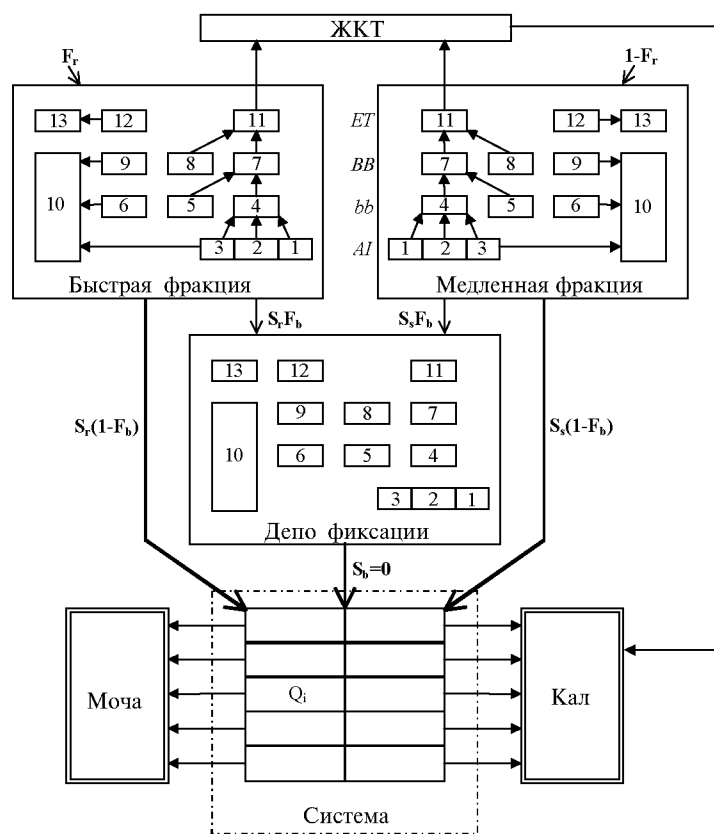


Рис. 3. Модель Дозы-2000

было доказано исследованиями. Модель состоит из трех блоков дыхательного тракта по тринадцать камер, отвечающих трем рассмотренным факторам, камеры ЖКТ, блока из десяти камер внелегочного пула (рис. 3). Модифицированная модель позволяет более точно и детально оценивать формирование дозы облучения дыхательного тракта в ранних фазах легочного клиренса. На рис. 4 приведена зависимость от продолжительности поступления отношения доз облучения легких, рассчитанных по двум моделям: Д(1999) — модель «Дозы-1999» и Д(2000) — модель «Дозы-2000» для аэрозолей ^{239}Pu .

Благодаря учету особенностей легочного клиренса в ранней фазе после ингаляции, «Дозы-2000» в первые недели превышают «Дозы-1999» почти на порядок. Со времени оценки сближаются. Верификация модели «Дозы-2000», осуществленная путем сравнения прижизненных оценок содержания с использованием данных о

скорости выведения с мочой с данными посмертных определений показала (рис. 5), что модель недооценивает накопление в легких для низко растворимых и переоценивает для более растворимых соединений. Мы предполагаем, что указанные несоответствия будут устранены по мере развития модели «Дозы-2005».

ДЕЙСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ РАБОТНИКОВ ПО «МАЯК»

В настоящее время радиационным контролем охвачена наиболее облучаемая группа профессиональных работников рассматриваемых производств. Численность и списочный состав лиц, подлежащих биофизическому обследованию, определяется тем, имеет ли данный работник по роду выполняемых профессиональных

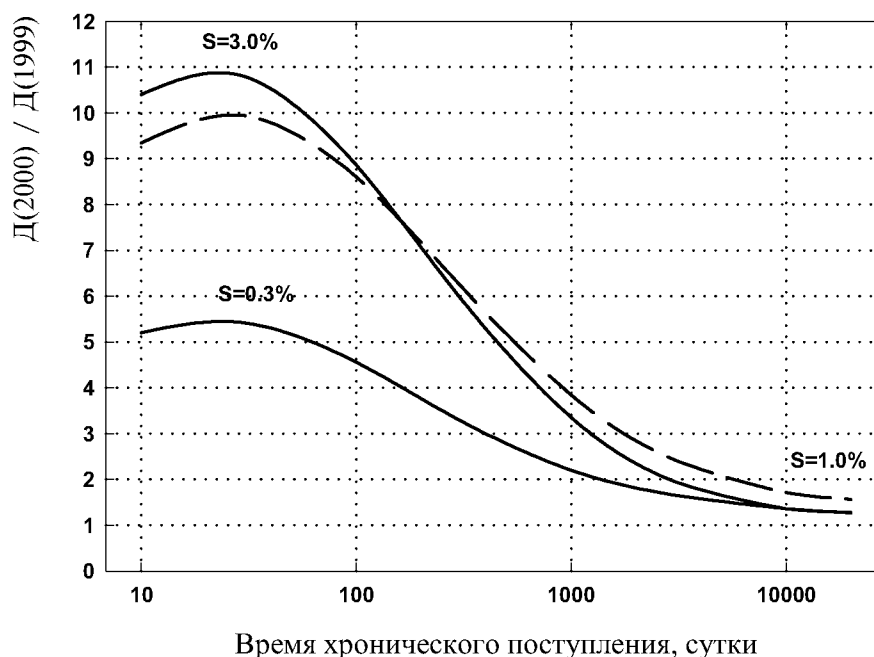
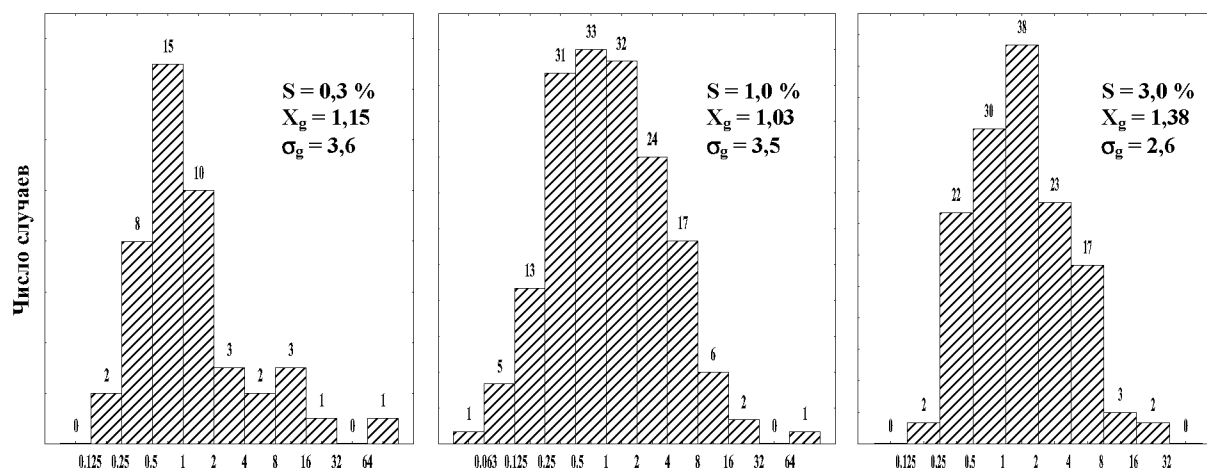


Рис. 4. Отношение поглощенных доз при хроническом поступлении аэрозолей ^{239}Pu с различной транспортабельностью S



Частота отношения прижизненных оценок содержания ^{239}Pu в легких, рассчитанного по данным анализов мочи к посмертным измерениям, для трех групп с различной транспортабельностью

Рис. 5. Верификация модели Дозы-2000

обязанностей непосредственный контакт с аэрозолями плутония. Следует отметить, что не все представители указанной группы обеспечены одинаковым числом обследований. Значительная часть контролируемого контингента подвергалась биофизическому обследованию всего лишь 1—2 раза за весь период работы в контакте с плутонием.

В настоящее время в биофизической лаборатории при обследовании персонала используется скрининговый метод, который заключается в предварительном обследовании работника на установках СИЧ, по результатам которого (при обнаружении достоверно детектируемой активности ^{241}Am или достоверного увеличения содержания данного нуклида по сравнению с предыдущим обследованием) делается вывод о необходимости проведения биофизического обследования. Обследования работников, попавших в нештатные или аварийные ситуации, проводятся сразу же после возникновения происшествия. При этом вне зависимости от того, в каком помещении произошла ситуация, работ-

ник направляется сперва на обследование на установке СИЧ, а затем направляется на углубленное биофизическое обследование. Последнее включает измерения содержания альфа-излучающих нуклидов (уран, плутоний, америций) в моче, кале и крови с использованием альфа-спектрометрического метода.

В табл. 2 приведены результаты обследований работников радиохимического и химико-металлургического производств в виде распределения численности работников 1948—1982 гг. найма по дозам облучения, накопленным к 2000 г. в результате инкорпорации плутония. Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что лица, нанятые в более ранний период времени, к 2000 г. накопили дозы, существенно большие, чем работники, нанятые в более поздние периоды. Это является следствием не только различий в длительности контакта с аэрозолями плутония, но и резкого улучшения радиационной обстановки как на радиохимическом, так и на химико-металлургическом производствах.

Таблица 2

Распределение профессиональных работников радиохимического и химико-металлургического производств ПО «Маяк» по накопленной к 2000 г. эффективной дозе

Эффективная доза внутреннего облучения, Зв		<0,01	0,01—0,04	0,04—0,1	0,1—0,4	0,4—1,0	1,0—4,0	4,0—10	>10
Завод	Год найма								
Химико- металлургический	1948—1953	119	91	120	180	81	105	33	6
	1954—1958	124	115	99	126	43	18	0	0
	1959—1963	270	185	100	99	22	5	0	0
	1964—1972	491	210	41	16	1	1	0	0
	1973—1982	302	126	16	6	1	0	0	0
Радиохимический	1948—1953	179	316	375	338	74	27	2	0
	1954—1958	194	270	158	137	14	2	0	0
	1959—1963	202	207	122	54	8	0	0	0
	1964—1972	243	118	30	8	1	0	0	0
	1973—1982	355	153	25	5	0	0	0	0

ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДОЗИМЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО «МАЯК»

С методологической точки зрения можно выделить три составных части, которые лежат в основе всей системы мониторинга внутреннего облучения, обусловленного инкорпорированным плутонием:

- измерительная часть, охватывающая радиохимические методы анализа содержания плутония в биосубстратах, а также методы спектрометрии излучения человека;
- методическая часть, касающаяся моделей метаболизма плутония, используемых для интерпретации результатов измерений и последующего расчета содержания нуклида в органах основного депонирования и соответствующих доз облучения;
- сбор и подготовка дополнительной исходной информации, необходимой для корректного применения моделей метаболизма.

Недостатки в каждом из блоков, составляющих основу контроля внутреннего облучения, в конечном итоге определяют пути дальнейшего совершенствования дозиметрии плутония.

В настоящее время биофизическое обследование основной части профессиональных работников ПО «Маяк» проводится с использованием альфа-радиометрического метода. В качестве иллюстрации возможностей данного метода измерений для целей контроля внутреннего облучения приведем зависимость содержания ^{239}Pu в организме человека от продолжительности контакта его с аэрозолями при условии, когда активность в моче равна МДА данного метода измерения (рис. 6), иначе говоря, нижнего предела определения содержания нуклида в организме человека при контроле радиометрическим методом. Из рис. 6 следует, что для аэрозолей Pu, характеризующихся транспортабельностью $S = 0,3\%$, в зависимости от времени контакта минимально определяемое содержание в течение первых 60 суток характеризуется ростом значений, который затем сменяется их спадом. При

этом максимальное значение рассматриваемого показателя составляет ≈ 930 Бк, а минимальное значение ≈ 630 Бк. При ингаляции аэрозолей с транспортабельностью $S = 1\%$ наблюдается иная картина. В первые 100 суток контакта рассматриваемый параметр претерпевает незначительный рост (до ≈ 260 Бк), который затем прекращается. После приблизительно 3 лет контакта минимально определяемая активность нуклида в организме человека начинает расти и примерно к 30 годам достигает ≈ 440 Бк. В условиях ингаляции нитрата плутония ($S = 3\%$) рассматриваемый показатель характеризуется непрерывным ростом со значения ≈ 74 Бк до ≈ 410 Бк.

Исследованиями показано, что при содержании ^{239}Pu в организме на уровне 740 Бк, сформированном ингаляционным поступлением аэрозолей диоксида или металла плутония, ожидаемая эффективная доза облучения, создаваемая данным нуклидом, будет равна пределу дозы, уставленному НРБ-99. Таким образом, при дозиметрическом контроле лиц, имеющих контакт с аэрозолями, характеризующимися

транспортабельностью $S = 0,3\%$, методика измерения содержания плутония в моче, основанная на радиометрическом измерении активности, является не достаточно чувствительной.

Зависимость содержания ^{239}Pu в организме человека от продолжительности контакта его с аэрозолями при условии, когда активность в моче равна минимальной детектируемой активности метода измерения, основанного на альфа-спектрометрическом методе измерения, приведена на рис. 7.

Анализ значений нижнего предела определения содержания ^{239}Pu в организме человека при спектрометрическом измерении активности нуклида показывает, что указанный метод обладает достаточной чувствительностью для проведения мониторинга внутреннего облучения. Отсюда следует вывод о необходимости перехода на новую приборную базу при радиационном мониторинге внутреннего облучения персонала, создаваемого инкорпорированным ^{239}Pu .

Как указывалось выше, ^{241}Am является спутником плутония, что позволяет использовать

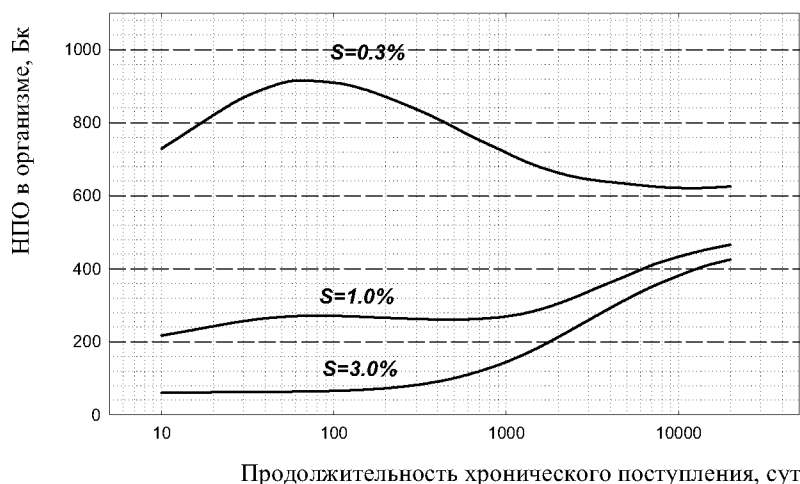


Рис. 6. Зависимость минимально определяемой активности ^{239}Pu в организме от продолжительности контакта при использовании метода альфа-радиометрии

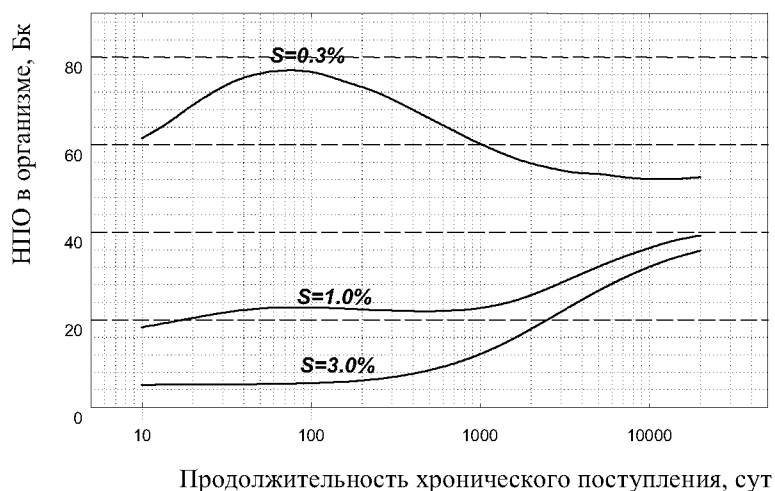


Рис. 7. Зависимость минимально определяемой активности ^{239}Pu в организме от продолжительности контакта при использовании метода альфа-спектрометрии

результаты измерений содержания ^{241}Am в организме профессиональных работников в методах и аппаратурном оформлении элементов системы мониторинга внутреннего облучения, обусловленного инкорпорированным ^{239}Pu . Отдельные лица из персонала основного производства подверглись многократному обследованию на установках СИЧ. Как правило, в эту категорию входят работники с повышенным содержанием радиоактивных нуклидов (главным образом ^{241}Am) в организме, а также профессионалы, попавшие в аварийные и нештатные ситуации. В целях оценки возможности применения метода спектрометрии излучения человека для определения содержания плутония в организме профессиональных работников ПО «Маяк» были проведены предварительные исследования связи результатов измерений содержания ^{241}Am на установках СИЧ и оценок на основе результатов биофизического обследования содержания ^{239}Pu . С использованием двух методов было обследовано 1553 человека. У 557 человек было обнаружено превышение МДА ^{241}Am хотя бы для одного органа. Из числа обследованных на СИЧ у

324 человек зарегистрировано содержание ^{241}Am , превышающее МДА для каждого из трех органов основного депонирования. Была проведена сортировка по принадлежности обследованных работников и приписанных им результатов измерений к одной из трех групп производственных помещений. Классификация помещений проводилась по результатам исследований транспортабельности промышленных аэрозолей плутония (выделялись помещения с показателем транспортабельности 0,3; 1,0 и 3,0 %). Из числа обследованных лиц были исключены те, кто имел поступление ^{239}Pu и ^{241}Am через травмированные кожные покровы, для исключения влияния загрязнения кожных покровов на результаты измерения на СИЧ. Ввиду широкого разброса значений содержания рассматриваемых радионуклидов в организме обследованных лиц, обработку результатов измерений проводили в двойном логарифмическом масштабе. Пример результатов обработки для аэрозолей с транспортабельностью $S = 0,3\%$ приведен на рис. 8.

В результате обработки было показано, что связь значений содержания ^{239}Pu и ^{241}Am в орга-

низме обследованных лиц выражается степенной функцией, из которой можно получить численное значение нижнего предела оценки содержания ^{239}Pu на основе значений МДА ^{241}Am методом СИЧ. Результаты приведены в табл. 3.

Сравнение значений нижнего предела определения содержания ^{239}Pu методом СИЧ с ана-

логичными значениями методом биофизического обследования радиометрическим методом показывает близость полученных значений. Доверительный интервал при данном подходе в настоящее время оказался слишком большим, что позволяет использовать метод СИЧ только для выявления носителей ^{239}Pu .

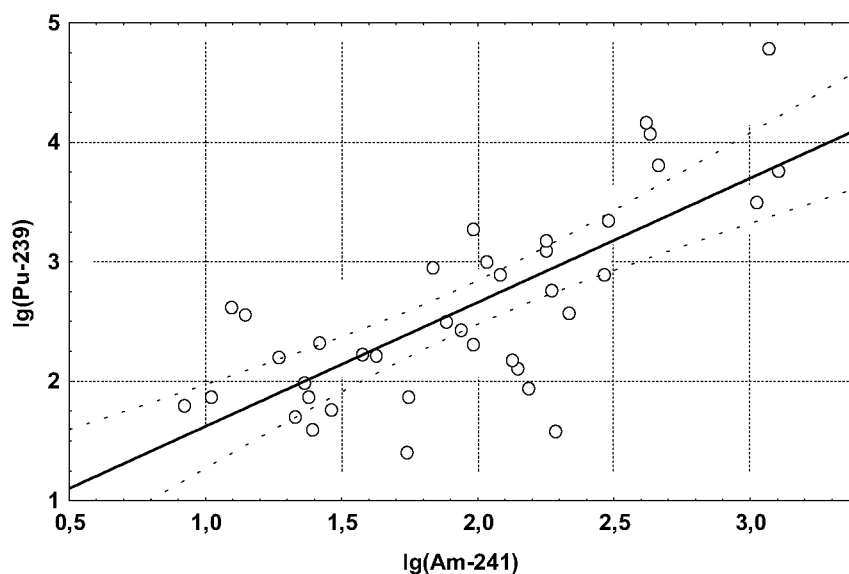


Рис. 8. Связь между содержанием ^{239}Pu и ^{241}Am в организме (транспортабельность — 0,3 %, коэффициент корреляции — 0,74)

Таблица 3

Значения нижнего предела определения содержания ^{239}Pu на основе результатов измерений ^{241}Am на установке СИЧ

Транспортабельность, %	Нижний предел определения содержания ^{239}Pu , Бк (доверительная вероятность 95 %)		
	среднее	нижняя граница	верхняя граница
0,3	200	52	810
1,0	600	330	1100
3,0	450	240	890

Применение метода спектрометрии человека для контроля внутреннего облучения, обусловленного инкорпорированным плутонием сдерживается тремя основными причинами.

1. Калибровка СИЧ проведена с использованием фантома LLNL, который недостаточно корректно отражает антропометрические характеристики конкретного индивида.

2. Наблюдается слишком большой доверительный интервал, который может быть обусловлен:

— различными значениями отношения активности ^{241}Am к активности ^{239}Pu в аэрозолях, присутствующих в различных производственных помещениях;

— некорректным (слишком грубым) описанием профессионального маршрута.

3. Присутствие экзогенного ^{241}Am в организме профессиональных работников, которые имели длительный контакт с промышленными аэрозолями ^{239}Pu .

Исследования динамики отношения активности плутония в экскретах (кал-моча) (рис. 9), которые продемонстрировали несоответствие расчетных значений изучаемого показателя экспериментально наблюдаемым, позволили выявить необходимость радикального пересмотра структурной схемы транспорта плутония в отдаленные сроки после ингаляции. Требуется провести пересмотр и уточнение как модели дыхательного тракта, так и системного плутония.

На распределение плутония между органами и тканями, а, следовательно, и соответствующие дозы облучения влияет ряд модифицирующих факторов, а именно: курение и состояние здоровья. Это обстоятельство не принимается во внимание ни действующими в России нормативными и отраслевыми документами, ни Рекомендациями МКРЗ. Анализ результатов длительных аутопсийных исследований, проведенный с учетом перечисленных факторов показал следующее. На легочный клиренс промышленных соединений плутония существенным образом влияет фактор курения. Для нерастворимых соединений ^{239}Pu курение достоверно усиливает задержку в легких нерастворимых соединений нуклида, в случае растворимых со-

единений разница стирается. Нерастворимые соединения больше накапливаются в лимфоузлах у курильщиков. Курение снижает накопление растворимых соединений в лимфатических узлах. В настоящее время завершен анализ 1200 случаев аутопсии. Показано, что распределение системного ^{239}Pu не зависит от класса транспортабельности ингалируемого аэрозоля, но зависит от состояния здоровья. С усилением патологических процессов в печени увеличивается тенденция к перераспределению нуклида из этого органа в скелет. Отношение скелет-печень изменяется от 1,04 до 5,28 (рис. 10).

Основное направление развития представлений о метаболизме внелегочного плутония заключается во включении основных положений, изложенных в Рекомендациях МКРЗ-66, а также учете влияния здоровья на распределение и экскрецию системного плутония.

Известно, что основными путями поступления ^{239}Pu в организм человека в производственных условиях являются ингаляционное поступление и поступление через поврежденные кожные покровы (т.н. наколы, ожоги и т.п.). В данный момент среди профессиональных работников ПО «Маяк» зарегистрировано достаточно большое число случаев поступления ^{239}Pu через поврежденные кожные покровы. Всего зарегистрировано 297 человек, у которых отмечено 385 инцидентов. К сожалению, в настоящее время мы не располагаем действующей и утвержденной в качестве нормативного документа методики расчета доз облучения человека в случаях поступления радиоактивных нуклидов через поврежденные кожные покровы. В связи с этим в каждом отдельном случае оценку доз приходится проводить на основе Публикации МКРЗ-67, предполагая мгновенное поступление в кровь радиоактивного вещества из места ранения. Таким образом, насущной задачей современной дозиметрии ^{239}Pu является разработка модели оценки доз облучения, обусловленных поступлением радионуклида через поврежденные кожные покровы.

При интерпретации результатов измерения активности ^{239}Pu в моче и иных биосубстратах на основе биокинетических моделей поведения нук-

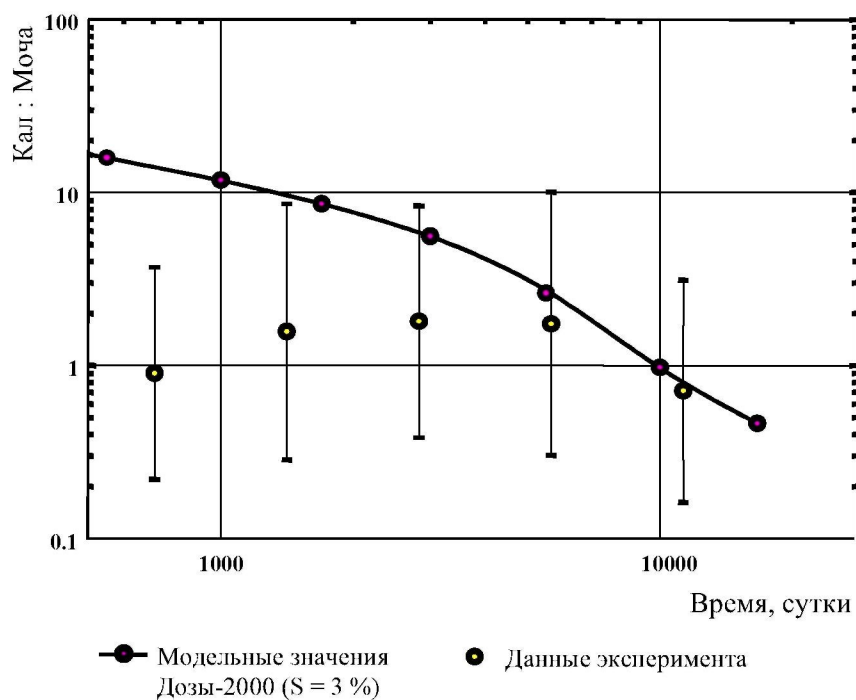
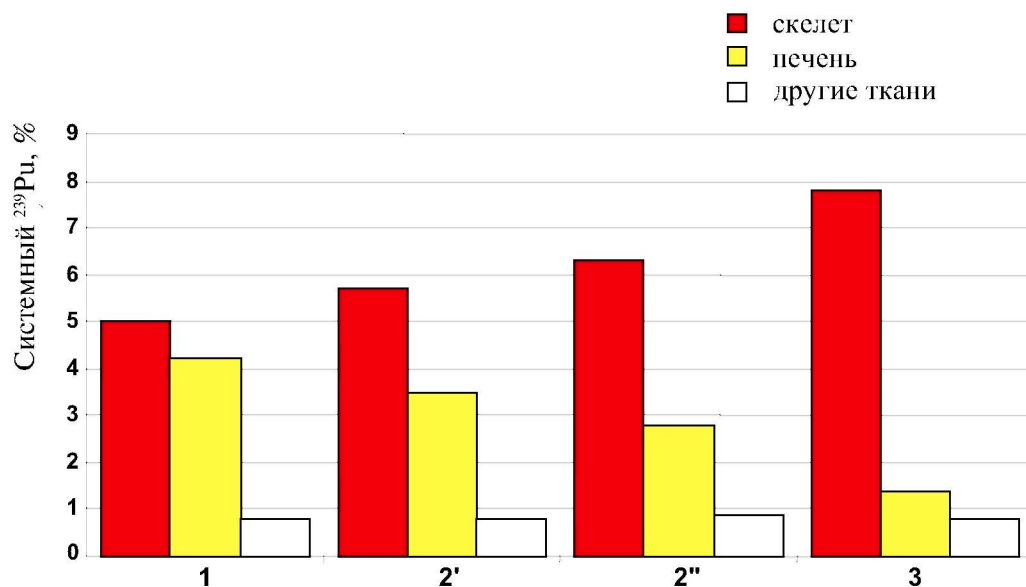


Рис. 9. Динамика отношения активности Pu в экскретах (кал/моча) при хронической ингаляции аэрозолей ^{239}Pu ($S=3\%$)



1-здоровые, 2' - больные (кроме заболеваний печени),
2''- сердечно-сосудистые заболевания, 3 – заболевания печени

Рис. 10. Распределение ^{239}Pu в системном пуле

лида в организме человека используется дополнительная информация, характеризующая условия ингаляционного поступления нуклида в организм работника. Это — история облучения работника и параметры, характеризующие физико-химические свойства промышленных аэрозолей Pu. Под историей облучения работника, как указывалось выше, подразумевается следующая информация: начало контакта с аэрозолями плутония, конец контакта, категория помещения (в зависимости от класса транспортабельности), в котором данный работник находился большую часть рабочего времени. Под физико-химическими свойствами промышленных аэрозолей подразумевается их дисперсный состав в терминах АМАД, а также транспортабельность.

Все помещения постоянного пребывания профессиональных работников радиохимического и химико-металлургического переделов разделены на три группы в зависимости от транспортабельности присутствующих в воздухе рабочих помещений аэрозолей. Для каждой из трех групп помещений получены численные значения постоянных экспоненциального снижения темпа ингаляционного поступления Pu в организм работника. При интерпретации результатов мочевого контроля и последующего расчета доз облучения выбор численного значения параметров биокинетических моделей («Дозы-1999» или «Дозы-2000») осуществляется в зависимости от того, в помещении какой из трех категорий данный работник провел большую часть времени на протяжении всей трудовой деятельности. Для нас является очевидным, что такой обобщенный способ описания условий формирования ингаляционного поступления Pu в организм конкретного профессионального работника в настоящее время не может считаться удовлетворительным. Описанный подход не учитывает: динамику изменения удельной активности Pu в воздухе рабочих помещений, хронометраж рабочего времени конкретного работника или группы работников с типичным поведением (выполняемыми технологическими операциями), тот факт, что средства индивидуальной защиты начали применяться далеко не с первого дня работы предприятия (с 1956 г.), того,

что отдельные работники меняли место своей работы, профессию и т.д.

Проведенные в последнее время предварительные исследования показали возможность в будущем создания более совершенной методологии описания истории облучения. Задача состояла в группировке лиц по профессиям с учетом хронометража времени, необходимого для проведения технологических операций, с одной стороны, и к сбору данных об изменениях объемной активности Pu в воздухе рабочих помещений, где проводились такие операции с учетом того, что в 1956 г. на предприятии были внедрены средства индивидуальной защиты. О возможности учета этих факторов при оценке доз облучения судили по степени корреляции суммы взвешенных (с учетом хронометража рабочего времени) концентраций Pu и уровнем накопления нуклида в организме работников, полученных по результатам биофизических обследований. Результаты приведены на рис. 11.

При анализе данных о дозах внешнего облучения персонала и уровнях накопления Pu в организме этих работников была установлена связь между этими величинами, что также может быть использовано для уточнения истории облучения.

Таким образом, для более точных оценок доз облучения, обусловленных инкорпорацией Pu, необходима разработка более совершенной методологии построения сценария облучения профессионального работника радиохимического и химико-металлургического переделов ПО «Маяк». Она должна включать в себя, кроме перечисленных выше параметров, дополнительную информацию:

- динамику значений удельной объемной активности плутония в воздухе рабочих помещений;
- использование средств индивидуальной защиты;
- характер профессий и соответствующее им поведение работника (частота посещений тех или иных помещений, продолжительность пребывания в них, характер выполняемых технологических операций и т.д.);

- дозы внешнего облучения;
- информацию о смене профессий или переводе работника на другое место работы.

Разработка более совершенной, чем в настоящее время, методологии построения сценария облучения преследует две основных цели: повышение точности оценок доз облучения в рамках текущего контроля, решение задачи ретроспективного восстановления доз облучения представителей персонала, которые не были охвачены системой дозиметрического контроля в первые годы работы предприятия и не могут быть обследованы в настоящее время по причине смерти. Численность указанной группы составляет приблизительно 3500 человек и это — значительный информационный ресурс для эпидемиологических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В биофизической лаборатории ЮУрИБФ накоплен уникальный опыт исследований в области дозиметрии и метаболизма ^{239}Pu . Он охватывает методическое и аппаратное обеспечение мониторинга внутреннего облучения, а также большой объем фактических данных. Создана дозиметрическая модель «Дозы-2000».

2. До начала 80-х годов метрологические характеристики методов анализа удовлетворяли условиям контроля. В настоящее время при текущем дозиметрическом контроле необходимо переходить к использованию более чувствительных методов измерения активности ^{239}Pu в биосубстратах.

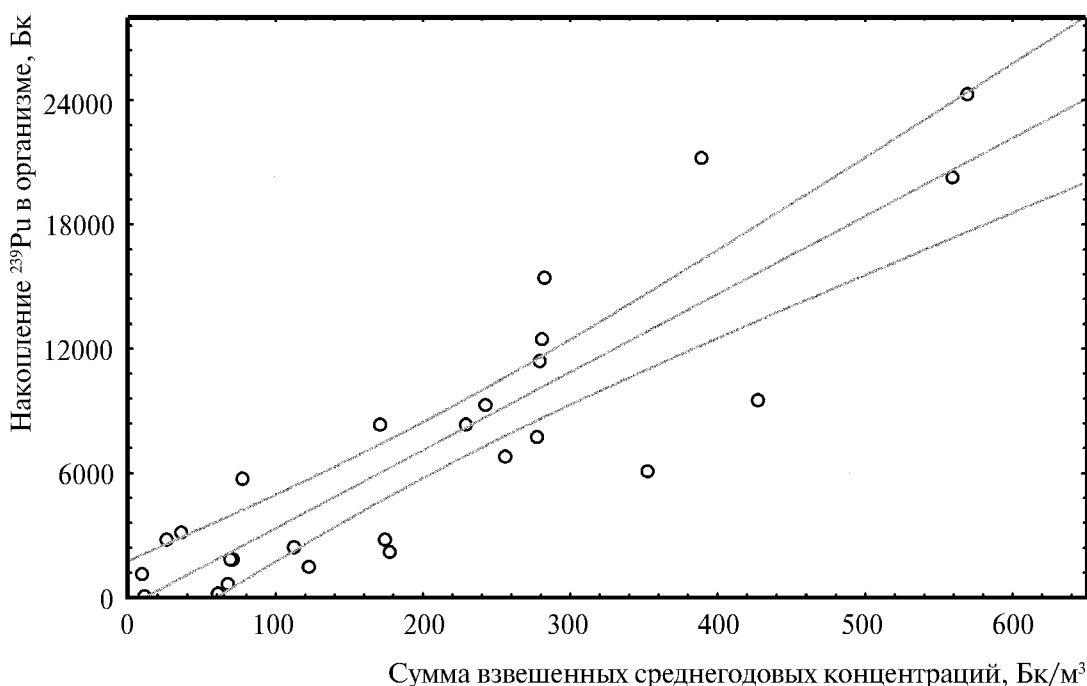


Рис. 11. Зависимость накопления ^{239}Pu в организме от суммы взвешенных среднегодовых концентраций аэрозолей в период 1950—1955 гг. (1 период)

3. Совершенствование моделей метаболизма ^{239}Pu необходимо вести в двух направлениях. Модель дыхательного тракта будет учитывать фактор курения. Модель метаболизма системного ^{239}Pu будет включать основные положения МКРЗ-67 и учитывать состояние здоровья работника.

4. Необходима разработка методов оценки уровней облучения профессиональных работников при поступлении ^{239}Pu через поврежденные кожные покровы.

5. Необходима разработка более совершенной методологии построения сценариев облучения профессиональных работников для повышения точности дозиметрических оценок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хохряков В.Ф. и др. Базовые уравнения косвенной дозиметрии плутония // Атомная энергия. — 1994. — Т. 57, вып. 1. — С. 69—72.
2. Сулова К.Г., Хохряков В.Ф., Романов С.А., Филиппи Р.Е., Катрен Р.Л. Результаты исследований в рамках российско-американского пилотного проекта «Метаболизм и дозиметрия промышленных соединений плутония» // Вопросы радиационной безопасности. — 1997. — № 1. — С. 36—46.
3. Выявление, учет и медицинское наблюдение за носителями плутония: Инструктивно-методические указания / Под ред. Э.Р.Любчанского и В.Ф.Хохрякова. — М., 1987. — 101 с.
4. Государственный Стандарт РФ «Плутоний. Экспресс-методика двойного фосфатного осаждения из проб мочи». - ФИБ-1 ИБФ МЗ МПРФ. Утв. НПО «ВНИИМ им. Менделеева», 1998. — 9 с.
5. МВИ изотопов плутония и америция в биосубстратах на спектрометре альфа-излучения системы EG&G Ortec ОСТЕТЕ. Утв. НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1999. — 25 с.
6. Хохряков В.В., Ефимов А.В. Опыт применения установок СИЧ для контроля содержания америция-241 в организме работников ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. — 2004. — № 1. — С. 57—70.
7. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Цевелева И.А., Аладова Е.Е. Объективный способ классификации альфа-активных аэрозолей для целей дозиметрии внутреннего облучения // Мед. радиол. и радиац. безопасность. — 1998. — № 4. — С. 14—45.
8. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Романов С.А., Востротин В.В. Легочный клиренс промышленных соединений плутония в отдаленные сроки после начала ингаляции // Мед. радиология и радиац. безопасность. — 2000. — № 2. — С. 28—24.
9. International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. — Oxford: Pergamon Press, 1994. — 482 p.