

УДК 577.391:546.799.4
© 2000

ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ ПЕРСОНАЛА ПО «МАЯК»

***В.Ф. Хохряков, К.Г. Сулова, С.А. Романов, Т.И. Кудрявцева,
З.С. Меньших, В.В. Востротин***
Россия, г. Озерск, ГНЦ РФ «Институт биофизики», Филиал №1

Основной вклад в дозу внутреннего облучения персонала ПО «Маяк», работающего с открытыми радиоактивными источниками, вносит инкорпорированный плутоний. Контроль за накоплением плутония в организме осуществляется на основе комбинированного биофизического и аппаратурного метода, а определение доз облучения производится по анализам мочи на содержание нуклида с использованием биокинетической модели, которая постоянно совершенствуется по мере углубления знаний о метаболизме актинидов. По материалам многолетних исследований создана база данных, содержащая сведения об индивидуальных дозах внутреннего и внешнего облучения более чем 10 тыс. работников ПО «Маяк». Накопленная к 01.01.99 коллективная эффективная доза суммарного внутреннего и внешнего облучения, 6845 работниками двух наиболее опасных производств – радиохимического и плутониевого, составила около 13 кЗв. На долю внутреннего облучения приходится 61% этого количества.

Контроль облучения персонала первого промышленного радиохимического предприятия СССР ПО «Маяк» начал осуществляться непосредственно после пуска производства. В первые годы основное внимание службы радиационной безопасности было сосредоточено на ограничении уровней внешнего гамма-бета облучения. В результате постоянного совершенствования технологических процессов и мероприятий, осуществляемых службой радиационной безопасности, опиравшейся в своих действиях на данные индивидуального фотоконтроля, уже к концу первого десятилетия удалось добиться резкого снижения доз внешнего облучения персонала основных производственных участков. И эта проблема в методическом и организационном плане в основном была решена к середине 60-х гг.

Организация контроля внутреннего облучения, обусловленного радионуклидами, поступающими в организм, в ранние годы сталкивалась с методическими трудностями из-за

слабого развития научной базы и отсутствия соответствующих технических средств. Налаживание мониторинга внутреннего облучения на предприятии приходилось осуществлять одновременно с научными разработками в области дозиметрии и радиобиологии, которые проводились в МСО-71 и ФИБ-1 ГНЦ «Институт биофизики» РФ. Разрабатывались и внедрялись в практику как методы аппаратурного (счетчики излучения человека – СИЧ) так и косвенного (биофизического) способов определения содержания радионуклидов в организме.

Оба метода требуют привлечения сведений о метаболизме инкорпорированных радионуклидов в организме человека. В связи с этим проводились интенсивные радиохимические исследования образцов аутопсийного материала, экскретов и других биосубстратов. Полученные данные, а также последующие измерения на установках СИЧ показали, что накопление в организме радионуклидов, а так-

Таблица 1

Состав регистра внутреннего облучения работников ПО «Маяк»

№	Предмет исследования	Число случаев	Число анализов
1	Плутоний в экскретах (моча, кал)	12 000	100 000
2	Плутоний аутопсия (персонал)	970	20 000
3	Плутоний аутопсия (население)	680	2 500
4	Америций-241 аутопсия (персонал)	460	5 600
5	Америций-241 аутопсия (население)	150	450
6	Америций -241 СИЧ (персонал)	4 000	5 000
7	Цезий-137 СИЧ (персонал+население)	5 000	11 200
8	Стронций-90 аутопсия (население)	1 200	3 000

же таких долгоживущих продуктов деления урана, как ^{90}Sr и ^{137}Cs у персонала, работающего с открытыми радиоактивными источниками, в подавляющем числе случаев составляло сотые и даже тысячные доли от допустимого содержания, регламентированного «Нормами Радиационной Безопасности». Исключение составляли несколько случаев поступления радионуклидов в организм при нештатных ситуациях.

Уже в 50-е годы данные посмертных исследований выявили в нескольких случаях накопление плутония в организме, в десятки раз превышающие допустимое содержание. Учитывая сказанное, главное внимание было сосредоточено на разработке методов прижизненной оценки содержания плутония в организме и реконструкции соответствующих дозовых нагрузок на органы и ткани. По материалам описанных исследований был создан дозиметрический регистр, содержащий результаты *in vivo* и *in vitro* измерений по инкорпорации радионуклидов и оценке уровней внутреннего облучения. Некоторые общие сведения об объеме и составе регистра по состоянию на 01.01.99 г приведены в табл. 1.

Попытки измерения на установке СИЧ содержания изотопов плутония в легких по интенсивности рентгеновского излучения,

сопровождающего альфа-распад нуклида, не увенчались успехом из-за низкой чувствительности метода и трудностей калибровки. В связи с этим указанный прибор впоследствии стали использовать при скрининге персонала на содержание плутония, осуществляемом путем измерения интенсивности испускаемого ^{241}Am гамма-излучения с энергией 60 кэВ, который рассматривался как радиоактивная метка плутония с колеблющимся в некоторых пределах соотношением $\text{Pu}: ^{241}\text{Am}$. Исследования показали, что в настоящее время биофизический метод, основанный на интерпретации данных об уровне экскреции плутония с мочой, является наиболее чувствительным и эффективным способом прижизненной оценки содержания в организме данного нуклида и обусловленных им доз облучения персонала. По мере накопления практического опыта взаимодействия биофизической лаборатории ФИБ-1 со службой радиационной безопасности предприятия сложилась следующая схема действий, позволяющая наиболее эффективно использовать имеющиеся средства контроля накопления плутония у работников ПО «Маяк» (рис. 1).

Разработанный в ФИБ-1 биофизический метод для случая хронического ингаляционного поступления промышленных соединений ра-

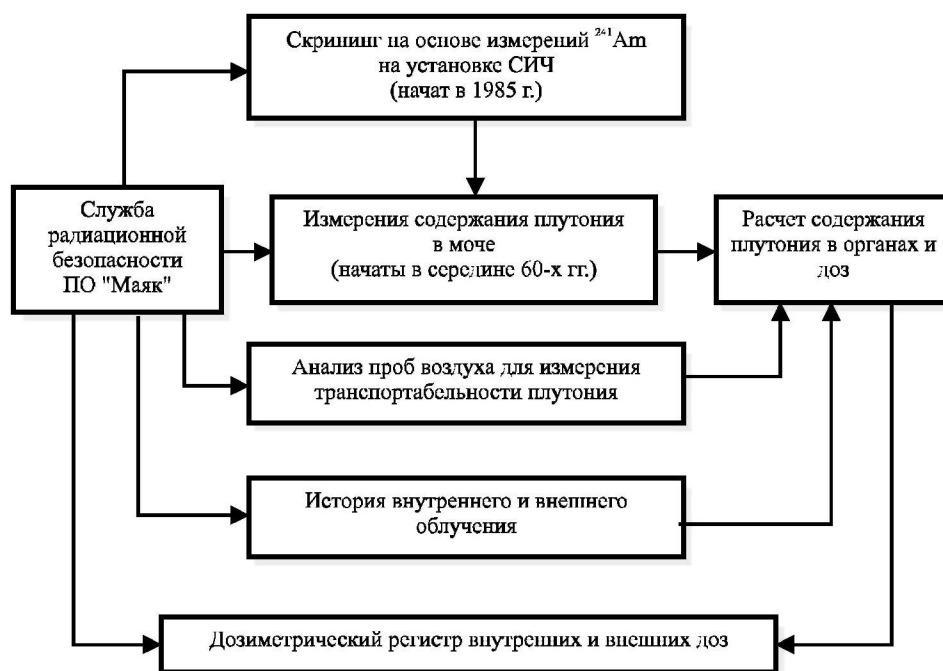
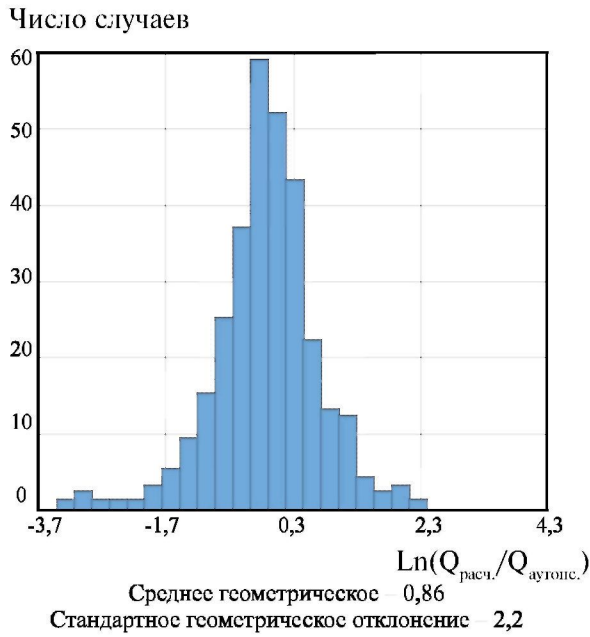


Рис. 1. Схема взаимодействия ФИБ-1 и службы радиационной безопасности ПО «Маяк»

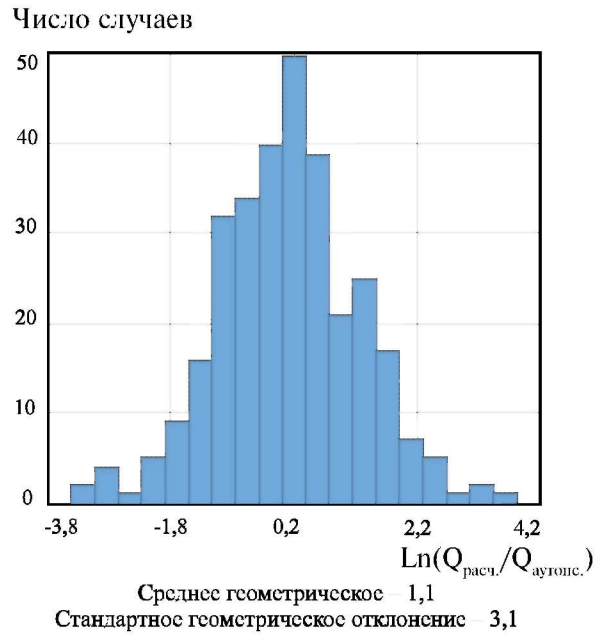
дионуклида в организм, отраженный в методических указаниях [1], был внедрен в практику в отрасли для дозиметрического контроля облучения персонала, работающего с открытыми источниками этого альфа-излучателя. При разработке методических указаний применялись биокинетические модели, построенные с учетом общих подходов, рекомендованных публикациями МКРЗ [2, 3], и собственных данных, полученных при изучении метаболизма нуклида. При этом были внесены существенные корректировки в структурные схемы и численные значения параметров моделей легочного клиренса [4] коэффициентов распределения [5] и экскреции системного плутония [6]. Так, например, уточнены известные уравнения W. Langham [7] и P. Durbin [8], связывающие уровень экскреции нуклида с мочой и системным содержанием в отдаленные сроки после попадания вещества в кровь. Это позволило внести су-

щественные исправления в оценку содержания плутония в организме по анализам мочи при пролонгированном поступлении. Определены коэффициенты распределения системно депонированного плутония в 21 органе и ткани. В ходе исследований введен новый экспериментальный способ классификации аэрозолей плутония, основанный на определении их свойств методом диализа.

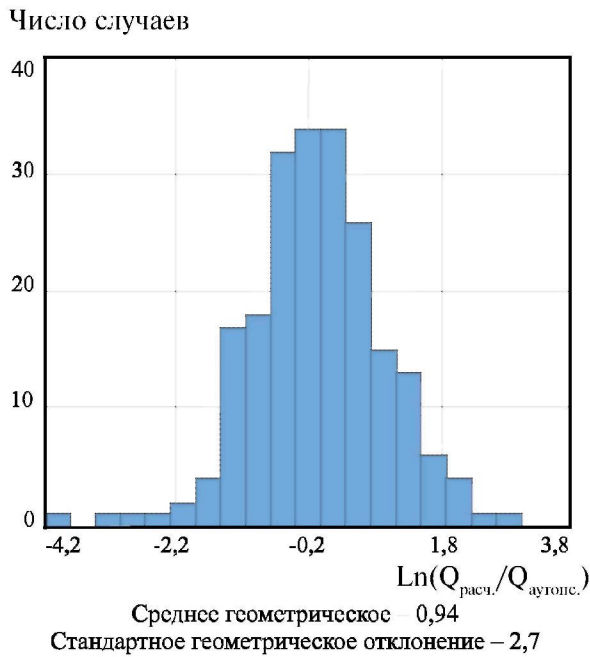
Классификация производится по параметру «транспортабельности», под которым понимается доля радионуклида (выраженная в процентах) от количества, задержанного на аэрозольном фильтре при отборе пробы воздуха, которая подвергается диализу в физрастворе в течение двух суток [9]. Оценка уровней накопления в органах и тканях по данным о скорости экскреции плутония с мочой осуществляется путем расчета с помощью комбинированной биокинетической модели, объединяющей упомянутые выше модифицирован-



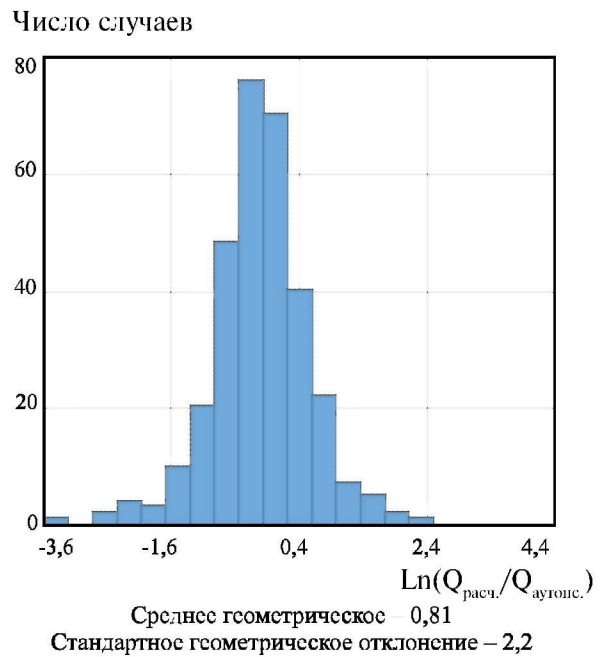
а



б



в



г

Рис. 2. Распределение частоты отношений предсказанного по анализам мочи $Q_{расч.}$ к фактически выявленному при посмертном исследовании $Q_{аутопс.}$ содержаниям плутония в организме и трех основных органах депонирования: а – организм; б – легкие; в – печень; г – скелет

ные модели легочного клиренса и экскреции системного плутония. При расчете учитывается длительность ингаляционного поступления и показатель транспортабельности плутониевого аэрозоля. Поглощенная доза в органе рассчитывается согласно алгоритмам, вытекающим из комбинированной биокинетической модели, как величина, пропорциональная интегралу числа распадов в органе-мишени [1].

На рис. 2 приведены гистограммы частоты распределения отношения содержания плутония, рассчитанного по анализам мочи, к измеренному посмертно содержанию нуклида в организме и трех органах основного депонирования (скелете, печени и легких), которые характеризуют эффективность биофизического метода оценок уровня накопления. Гистограммы отвечают логнормальному закону распределения со средним геометрическим, мало отличающимся от единицы, что указывает на несмещенность оценок содержания, и стандартными геометрическими отклонениями, возрастающими в порядке: организм — 2,2; скелет — 2,2; печень — 2,7; легкие — 3,1. Наиболее высокое значение стандартного геометрического отклонения выявлено для легкого, что объясняется быстрым обменом нуклида в нем по сравнению с двумя другими органами. Расчетное содержание во многом определяется темпом поступления, который, как правило, в каждом индивидуальном случае трудно восстановить с необходимой степенью корректности, в результате расчетное содержание в этом органе с большей степенью вероятности может отклоняться от фактического, чем таковое для других органов или для целого организма. Этим объясняется наиболее высокое значение стандартного геометрического отклонения для данного органа.

Приведенные гистограммы характеризуют точность расчета текущих уровней накопления. При оценке аккумулированной дозы облучения необходимо учитывать также ту ее часть, которая формируется в ранней фазе после ингаляционного поступления. Биокинетическая модель, заложенная в основу расчетных оце-

нок, игнорирует наличие этой фазы. Этот недостаток в настоящее время анализируется с целью повышения надежности определения уровней облучения. Заметим, что по предварительным оценкам, описание которых выходит за рамки настоящей статьи, фактические дозы облучения легких (органа, для которого наиболее вероятно недооценка дозы) могут в зависимости от транспортабельности аэрозолей плутония отличаться в более высокую сторону на 20–50% от ныне оцениваемых значений.

По результатам оценки доз внутреннего облучения, обусловленного инкорпорированным плутонием, и сведениям о дозах внешнего облучения, представляемым службой радиационной безопасности ПО «Маяк», в ФИБ-1 создана база данных (БД) индивидуального внутреннего и внешнего облучения персонала предприятия. Указанная БД содержит идентифицированные на основе анализа архивных данных результаты измерения содержания плутония в моче у более чем 10 тыс. рабочих нескольких основных и вспомогательных заводов предприятия, по которым с использованием упомянутой выше биокинетической модели и специально разработанным программам можно рассчитать текущие, ретроспективные, а также прогнозируемые содержание и дозы облучения органов, создаваемые инкорпорированным плутонием.

Анализ материалов БД подтверждает известный факт, что в первые годы эксплуатации предприятия из-за отсутствия опыта и экстремальных условий работы часть персонала подвергалась облучению с уровнями, значительно превышающими допустимые значения. С накоплением опыта, улучшением условий труда и ужесточением дозиметрического контроля уровни облучения снижались. Это демонстрируют данные динамики уровней накопления плутония и доз внешнего облучения у работников радиохимического и плутониевого производств (табл. 2)

Из табл. 2 следует, что среднегрупповые дозы внешнего облучения D_{γ} , накопленные в первое пятилетие и составлявшие 52–

Таблица 2

Среднегрупповые дозы внешнего облучения и среднегрупповые оценки содержания плутония в организме у лиц, начавших работу в разный период эксплуатации радиохимического и плутониевого производств (сред. \pm ср. кв. откл.)

Период	Радиохимический завод		Плутониевый завод	
	D_{γ} , сЗв	$Q_{\text{орг}}$, нКи	D_{γ} , сЗв	$Q_{\text{орг}}$, нКи
1948–1953	54 ± 51	48 ± 11	$25 \pm 29,0$	270 ± 610
1954–1959	12 ± 10	$25 \pm 6,4$	$6,1 \pm 7,3$	54 ± 120
1960–1969	$3,4 \pm 4,8$	14 ± 50	$2,1 \pm 3,2$	$13,5 \pm 60$
1970–1979	$0,76 \pm 0,72$	$6,0 \pm 16$	$0,40 \pm 0,50$	$4,6 \pm 13$
1980–1989	$0,55 \pm 0,56$	$3,3 \pm 9,1$	$0,37 \pm 0,53$	$3,3 \pm 10$
1990–1999	$0,41 \pm 0,29$	0,0	$0,36 \pm 0,48$	$0,7 \pm 2,5$

54 сЗв на обоих производствах, уже во втором десятилетии снизились на порядок. В дальнейшем продолжалось неуклонное снижение вплоть до десятых долей сЗв в 90-х гг. Это означает, что для лиц, начавших работу в первые годы деятельности ПО «Маяк» и продолжавших производственную деятельность в последующие десятилетия, основная часть аккумулированной дозы внешнего облучения сформировалась в течение первых нескольких лет после пуска предприятия. Подобная картина наблюдается и с накоплением плутония. Данные табл. 2 отображают среднее накопление в организме у лиц, сгруппированных по периоду начала работы на данном производстве. Особенно высокое содержание плутония выявлено у начавших работу в 1948–1953 гг. на обоих производствах. У лиц, поступивших на производство позже, темп накопления и облучение, создаваемое инкорпорированным плутонием, резко снижались. В течение всего периода эксплуатации внутреннее облучение у работников плутониевого производства, как правило, в среднем было выше, чем у работников радиохимического производства, начавших работу одновременно с первыми.

Анализ имеющихся в БД значений доз

внутреннего облучения, а также результатов биофизических исследований показал, что у работников, подвергавшихся воздействию труднорастворимых соединений плутония, легкое является наиболее критичным органом, занимающим первое место по вкладу в эффективную дозу облучения. Для соединений плутония типа диоксида, характеризующихся показателем транспортабельности порядка десятых долей процента, на долю легкого приходится три четверти эффективной дозы. К категории лиц с доминирующей ролью облучения легкого относятся все работники плутониевого производства, а также некоторая часть персонала радиохимического завода, занятая переработкой облученного ядерного топлива. Для основной части последнего, имеющей дело с относительно растворимыми соединениями нуклида, приблизительно в равной мере с легкими критическим органом являются клетки костных поверхностей, красного костного мозга и печени.

Следует заметить, что проблема создания регистра возникла в 90-х гг., то есть более чем через сорок лет после начала облучения персонала. Из-за отсутствия целевых установок формирование архивов и хранилищ в начальные годы происходило стихийно с применением

Таблица 3

Коллективные эффективные дозы внешнего бета-гамма и внутреннего за счет инкорпорированного плутония облучения рабочих двух производств ПО «Маяк»

Тип производства	Количество людей	Количество человеко-лет	Коллективная эффективная доза, кЗв		
			Внутренняя	Внешняя	Сумма
Радиохимическое производство	3747	128 792	2,394	4,241	6,635
Плутониевое производство	3098	99 659	5,389	0,781	6,170
Итого	6845	228 451	7,783	5,022	12,805

бумажных носителей информации, без учета изменявшихся методик определения внешнего и внутреннего облучения, без учета дополнительных деталей, необходимость знания которых стала понятной позднее в связи с совершенствованием методов дозиметрии. Исследования по метаболизму плутония в организме человека, дают возможность постоянно совершенствовать методику определения содержания данного нуклида в органах и тканях и обусловленных им доз внутреннего облучения. Другой потенциальный источник корректировки доз состоит в уточнении индивидуальных историй облучения. Существующие оценки доз внутреннего и внешнего облучения рабочих из регистра ПО «Маяк» произведены в соответствии с уровнем дозиметрии, достигнутым к началу 1999 г., и поэтому они условно названы нами «дозы 1999». Эти дозы будут уточняться в течение 2000 г. с учетом анализа индивидуальных историй облучения и использованием улучшенных моделей метаболизма.

В табл. 3 представлены в обобщенном виде данные по состоянию на 01.01.99 относящиеся к двум основным производствам предприятия, которые могут дать некоторое представление о значимости БД для медико-дозиметрических исследований последствий внутреннего и внешнего облучения человека.

Данные табл. 3 свидетельствуют о том,

что в целом для обоих производств на долю внутреннего облучения приходится около 61% суммарной эффективной дозы. При этом у персонала производства по переработке ядерного топлива только 36% коллективной дозы связано с внутренним облучением, тогда как у персонала плутониевого завода на внутреннее облучение приходится 86%. Таким образом, особенности соотношения уровней внешнего и внутреннего облучения, а также структура эффективной дозы показывают, что у работников этих заводов, и особенно на плутониевом производстве, ведущим фактором специфической профессиональной вредности должны являться патологические эффекты, связанные с облучением легкого. Это согласуется с результатами медико-гигиенических обследований персонала. Из сказанного выше следует, что уникальные сведения дозиметрической БД в сочетании с достаточно хорошо документированными историями болезни соответствующих групп работников ПО «Маяк» могут служить серьезной основой для разработки оценок риска проявления текущих и отдаленных эффектов облучения, выработки стандартов радиационной защиты и способствовать решению социальных вопросов для категории лиц, подвергшихся высоким уровням внутреннего и внешнего облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выявление, учет и медицинское наблюдение за носителями плутония: Методические указания (ИМУ-88) / Под. ред. Э.Р. Любчанского, В.Ф. Хохрякова; Утв. 30.05.88. — М. — 1987. — 101 с.
2. Публикация 30 МКРЗ. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Докл. Комитета II Международной Комиссии по Радиологической защите / Пер. с англ.; Под ред. П.В. Рамзаева, А.А. Моисеева. — М.: Энергоиздат. — 1982. — 135 с.
3. ICRP Publication 66: Human Respiratory Tract Model for Radiation Protection. The report of Task Group of Committee. Oxford. — 1993. — 413 p.
4. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Востротин В.В. Легочный клиренс промышленных соединений плутония в отдаленные сроки после начала ингаляции // Медицинская радиология (в печати).
5. Хохряков В.Ф., Кудрявцева Т.И., Сулова К.Г. Эффективная эквивалентная доза облучения персонала инкорпорированным плутонием // Бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра «Радиация и риск». — 1995. — Вып. 5. — С. 133–136.
6. Хохряков В.Ф., Меньших З.С., Сулова К.Г., Кудрявцева Т.И., Токарская З.Б., Романов С.А. Базовые уравнения косвенной дозиметрии плутония // Атомная энергия. — 1993. — Т. 75. — Вып. 5. — С. 358 — 363.
7. Langham W. H. Physiology and toxicology of ²³⁹Pu and its industrial medical control // Health. Phys. — 1959. — V. 2, no. 2, P. 172 — 185.
8. Durbin P.W. Plutonium in Man: a new look at the old data // Radiobiology of Plutonium. — Salt Lake City, U.N. Press. — 1972. — P. 469–530.
9. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Цвелёва И.А., Аладова Е.Е. Объективный способ классификации альфа-активных аэрозолей для целей дозиметрии внутреннего облучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 1998. — №4. — С. 41–45.