

УДК 546.799.4+572.025

© 1997 г.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАМКАХ СОВМЕСТНОГО  
РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОГО ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА  
“МЕТАБОЛИЗМ И ДОЗИМЕТРИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ПЛУТОНИЯ”**

*К.Г. Сулова, В.Ф. Хохряков, С.А. Романов*

*Россия, г. Озерск, ГНЦ “Институт биофизики”, Филиал №1*

*Р.Е. Филиппи, Р.Л. Катрен*

*США, г. Ричланд, штат Вашингтон, Вашингтонский университет, USTUR*

В 1995 г. ученые Дозиметрического Регистра Производственного Объединения “Маяк” (ДРПОМ), Фиб-1, г. Озерск, и Американского Трансуранового Регистра США (USTUR), г. Ричленд, включились в совместную программу по изучению метаболизма и дозиметрии Pu и  $^{241}\text{Am}$  в организме у профессионалов. В результате совместного анализа установлено, что оба Регистра - российский и американский - имеют большой объем накопленных данных по метаболизму плутония, включая результаты радиохимического анализа биосубстратов (экскретов и образцов органов), полученных для персонала радиохимических предприятий в обеих странах. Совместимость материалов ДРПОМ и USTUR доказывают результаты первого анализа объединенных данных по концентрации Pu и  $^{241}\text{Am}$  в скелете и печени. Медианные концентрации радионуклидов в органах у регистрантов ДРПОМ в среднем на два порядка выше, чем в случаях USTUR, однако величины отношений скелет/печень практически одинаковы при всех сроках профессионального контакта и при большой вариации уровней накопления в органах. ДРПОМ и USTUR имеют вместе данные по результатам радиохимического анализа образцов тканей на более, чем 1000 случаев и отдельно на несколько тысяч анализов мочи. Объединение этих данных позволит в рамках долгосрочных исследований более реально оценить соотношение между системным содержанием актинидов и уровнем мочевой экскреции, что повысит точность дозиметрических оценок и позволит исследовать зависимость (или независимость) этого соотношения от дозы.

### ВВЕДЕНИЕ

В 1994 г по соглашению между правительствами США и Российской Федерации был учрежден объединенный координационный комитет по исследованиям радиационных эффектов. В результате этого соглашения были сформированы пять научных программ международного сотрудничества между российскими и американскими учеными. В программах нашел отражение совместный опыт ученых

США и Российской Федерации по изучению влияния профессионального облучения на состояние здоровья (включая дозиметрию и радиационные эффекты) работников атомной промышленности и населения, подверженного радиационному влиянию выбросов этих производств [1].

В марте 1995 г ученые Дозиметрического Регистра Производственного Объединения “Маяк” (ДРПОМ), созданного в лаборатории внутренней дозиметрии Филиала №1 ГНЦ

Главные участники проекта:

США:

Ronald T. Filipy  
Ronald L. Kathren  
Royston R. Filby  
Ruth Neta

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ:

Валентин Федорович Хохряков  
Клара Гилимовна Сулова  
Сергей Анатольевич Романов  
Владимир Иванович Черников

“Институт биофизики” (г. Озерск), и Трансуранового и Уранового Регистров США (USTUR) включились в совместную исследовательскую программу по изучению метаболизма и дозиметрии Pu и <sup>241</sup>Am в организме у профессионалов (проект 2.1).

ДРПОМ был организован в Филиале №1 в начале 70-х годов. Регистр включает базы данных, содержащие результаты биофизического обследования на содержание плутония в организме по уровню экскреции с мочой (метод bioassay) и дозы облучения персонала ПО “Маяк”, а также результаты радиохимического анализа образцов органов и тканей, взятых при вскрытии умерших работников ПО “Маяк”.

USTUR основан в 1968 г и свою деятельность осуществляет в тесном контакте с Департаментом Энергетики США в Вашингтонском Университете, г. Ричленд, штат Вашингтон. USTUR так же имеет базы данных, содержащие дозы облучения, данные bioassay - метода, и результаты посмертного радиохимического анализа образцов органов и тканей. Регистранты USTUR работали на различных ядерных производствах США.

ДРПОМ и USTUR формировались при различных подходах, но с близкими целями. Основной целью исследований обоих Регистров является изучение метаболизма плутония и трансплутониевых элементов в организме у работников радиохимических производств обеих стран. Обе программы включают проведение аутопсий умерших рабочих, получивших профессиональное облучение, и радиохимический анализ образцов тканей.

Основная задача совместного российско-американского пилотного проекта “Метаболизм и дозиметрия промышленных соедине-

ний плутония” состояла в следующем: оценить возможность сопоставления и сравнительного анализа материалов, накопленных российским и американским Регистрами, на основе результатов сравнения методических подходов, используемых в 2-х аутопсийных программах, посвященных посмертному исследованию метаболизма актинидов в организме у профессионалов предприятий атомной промышленности США и Российской Федерации (ПО “Маяк”).

Первый совместный отчет был посвящен сравнению методов отбора и радиохимического анализа образцов секционного материала, используемых обоими Регистрами, и сопоставлению некоторых накопленных в Регистрах данных по метаболизму Pu [2]. Результаты сравнения указанных методов подробно описаны в “Radiation Protection Dosimetry” [3]. Несмотря на некоторые отличия в содержании, объемах и методах ДРПОМ и USTUR, предварительная оценка некоторых материалов показала, что данные сопоставимы и могут быть объединены в рамках будущего долгосрочного проекта для совместного анализа.

#### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ РЕГИСТРОВ, СХОДСТВО И ОТЛИЧИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Ознакомление с деятельностью обоих Регистров показало, что ДРПОМ и USTUR создавались примерно в одно время и с близкими целями, хотя и формировались при разных подходах к проблеме изучения поведения плутония в организме человека. Каждый владеет большим объемом ценной информации по метаболизму Pu и Am - процессам распре-

Таблица 1

Характеристики БД “Аутопсия” ДРПОМ и USTUR

Регистр	Нуклид	Начало программы	Количество исследованных случаев	Диапазон измеренных содержаний в организме
ДРПОМ	Pu	1965	750	40Бк - 175 кБк
	<sup>241</sup> Am	1975	460	2 Бк - 4,5 кБк
USTUR	<sup>239</sup> Pu, <sup>240</sup> Pu	1968	280 (5 целых тел доноров)	40 Бк - 300 Бк 5 кБк <sup>*)</sup>
	<sup>241</sup> Am	1968	280 (2 целых тела доноров)	40 Бк 144 МБк <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup> - один случай.

деления, транспорта и выведения, включая медицинские данные и результаты радиохимических анализов образцов органов и тканей.

ДРПОМ и USTUR имеют компьютерные базы данных (БД) в виде систем из нескольких отдельных файлов, в которых хранится информация об истории профессионального облучения работников ПО “Маяк” (ДРПОМ) и радиохимических предприятий США (USTUR), дозиметрические данные - о результатах радиохимического анализа экскретов - мочи и образцов органов и тканей, взятых при вскрытии умерших работников предприятий, а также результаты измерений <sup>241</sup>Am на установках СИЧ.

В табл.1 представлены некоторые характеристики баз данных ДРПОМ и USTUR, содержащих результаты радиохимического анализа образцов секционного материала.

В результате совместных исследований, проведенных на первом этапе Пилотного проекта, установлено, что оба Регистра - российский и американский - имеют большой объем накопленных данных по дозиметрии плутония, включая результаты радиохимических анализов биосубстратов - мочи и образцов органов и тканей, полученных для профессионалов радиохимических предприятий в обеих странах.

В первых совместных работах [2-4] сделано несколько важных выводов относительно

но различий в деятельности, объемах и методах, используемых обоими Регистрами, которые состоят в следующем:

- ДРПОМ осуществляет прижизненный дозиметрический контроль за персоналом, включающий скрининг работников ПО “Маяк” на СИЧ и биофизическое обследование по скорости экскреции радионуклидов с мочой, аутопсию, радиохимический анализ образцов органов, а также проводит обработку и обобщение результатов исследований в одном месте: лаборатории внутренней дозиметрии Филиала №1, используя отработанные годами методы; располагает подробной информацией об истории облучения (профмаршрутах) регистрантов и имеет собственный метод классификации альфа-активных аэрозолей с рабочих мест по показателю транспортабельности, учитывающему физико-химические свойства вдыхаемых аэрозолей.

Поскольку ДРПОМ занимается вопросами дозиметрического контроля за персоналом только одного предприятия - ПО “Маяк”, то вся занесенная в Регистр информация по истории облучения и дозиметрические данные - однородны, представлены в универсальной форме. Вскрытие умерших работников ПО “Маяк” производится группой местных патологоанатомов в г. Озерск по единой методике, образцы органов, взятые при вскрытии,

Таблица 2

Характеристики средств измерений, применяемых в регистрах.

Характеристика детекторов	Методы ДРПОМ		Метод USTUR Кремневый поверхностно-барьерный ППД
	Ионизационная камера	Сцинтилляционный а-радиометр	
Фон	0,0003 сек <sup>-1</sup>	0,0006 сек <sup>-1</sup>	0,0004 сек <sup>-1</sup>
Эффективность	45%	90%	30%
Разрешение	50 кэВ	-	< 50 кэВ
Мин. измеренное количество Pu в пробе	1,0 мБк	5 мБк	0,7 мБк

анализируются в одной лаборатории в течение всего периода деятельности ДРПОМ.

USTUR осуществляет анализ целых тел доноров, что обеспечивает уникальную подробную информацию о распределении Pu и <sup>241</sup>Am в организме и, что особенно важно для актинидов, в скелете; USTUR владеет точными методами радиохимического анализа, т.к. использует более чувствительный метод измерения - альфа-спектрометрический с меткой <sup>242</sup>Pu, имеющий очень низкий уровень измеряемой активности в пробе (<1 мБк), что пока недоступно при проведении рутинных анализов для ДРПОМ. USTUR занимается исследованием случаев со всех основных предприятий США. Прижизненные и посмертные исследования выполняются несколькими лабораториями, использующими различные методы дозиметрии, bioassay и радиохимии: аутопсии для USTUR проводятся разными патологоанатомами по месту жительства и смерти регистрантов; радиохимические анализы образцов секционного материала до настоящего времени выполняли 4 лаборатории по месту работы регистрантов.

Отмечено несколько принципиальных отличий в содержании и методах отбора и радиохимического анализа аутопсийных образцов.

Радиохимический метод определения Pu и Am в образцах органов и тканей - способы озоления и анионообменного разделения, применяемый Регистрами, во многом сходен, однако методы измерения выделенных альфа-активных препаратов, различны: ДРПОМ применяет на последней стадии соосаждение и сцинтилляционный метод радиометрии осадка в слое ZnS(Ag) и только в особых случаях электролиз и альфа-спектрометрию; USTUR - всегда электролиз и альфа-спектрометрию с введением радиоактивной метки (табл.2).

Уровни альфа-активности в образцах органов, зарегистрированные в ДРПОМ, в основном на 1-2 порядка выше по сравнению с данными USTUR и измерены с более высокой точностью.

Имеется одно важное преимущество USTUR: исследование целых тел доноров, в результате которых получена ценная информация по накоплению Pu и Am в каждом органе и подробному распределению радионуклидов в организме человека.

Таким образом, в компьютерных базах данных в обоих Регистрах накоплено большое количество результатов радиохимического анализа образцов секционного материала: в USTUR - на 280 случаев; в ДРПОМ - на 750 случаев. При совместной деятельности Реги-

стров общее количество исследованных случаев для анализа увеличивается в 4 раза по отношению к количеству случаев в USTUR при диапазоне уровней накопления актинидов в организме, колеблющихся в пределах нескольких порядков: от десятков Бк до нескольких сотен кБк. Очевидно, что совместный анализ большого объема уникальных материалов обоих Регистров приведет к усовершенствованию применявшихся методов дозиметрии и к повышению точности стандартов радиационной защиты.

Возможность интегрирования накопленных материалов была доказана на следующем этапе пилотного проекта, основной задачей которого было проведение сравнения и анализа существующих биокинетических моделей и сопоставления их с данными по метаболизму Pu и  $^{241}\text{Am}$ , накопленными в ДРПОМ и USTUR, а также оценка возможности модификации и уточнения моделей на основе накопленных данных. Эти материалы приведены в следующем разделе.

#### УТОЧНЕНИЕ ДАННЫХ О МЕТАБОЛИЗМЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ Pu И $^{241}\text{Am}$ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА И СОПО- СТАВЛЕНИЕ ИХ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ БИОКИНЕТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

Сравнительный анализ методов и некоторых данных, проведенный в первый год совместной программы, показал, что в материалах Регистров имеется больше подобия, чем различия. Совместимость баз данных ДРПОМ и USTUR доказывают результаты первого предварительного анализа объединенных данных для нескольких десятков случаев по концентрации плутония и америция в основных органах депонирования - в скелете и печени. Сравнение информации, накопленной в результате осуществления двух независимых исследовательских программ - USTUR и ДРПОМ - более, чем за 20-летний период, показало, что в большинстве исследованных случаев, зарегистрированных в ДРПОМ, в

органах отмечено более высокое содержание актинидов по сравнению со случаями в USTUR. Вместе с тем отмечено удовлетворительное совпадение данных о соотношении концентраций радионуклидов в основных органах депонирования - скелете и печени. Медицинские концентрации Pu и  $^{241}\text{Am}$  в органах у лиц, зарегистрированных в ДРПОМ, в среднем на два порядка выше, чем у доноров USTUR [3]. Однако, величины отношений концентраций скелет : печень близки для обеих групп регистрантов при большой вариации сроков облучения и уровней накопления в органах. На рис.1 показано отношение концентраций плутония скелет/печень для случаев ДРПОМ и USTUR как функция времени облучения (срок между началом поступления и датой смерти). Обработка материалов, полученных как USTUR, так и ДРПОМ, не выявила статистически значимого изменения отношения скелет/печень на протяжении длительных сроков, начиная от первых нескольких лет до 40 лет после начала поступления нуклида в организм. Это означает, что относительная скорость динамических процессов накопления-выведения в обоих органах одинакова.

Согласно Публикациям МКРЗ №30 [5], №48 [6] и №67 [7] обмен плутония в печени осуществляется быстрее, чем в скелете и, соответственно, предполагается, что период полувыведения из печени короче, чем из скелета. Отсутствие зависимости показателя скелет/печень от времени в изученные сроки может свидетельствовать о возникновении состояния динамического равновесия между процессами накопления и выведения. Из графиков на рис.1 следует, что такое состояние проявляется уже через первые несколько лет после начала отложения нуклида в органах. Принимая во внимание медленное удаление плутония из скелета, можно заключить, что период полуобмена в печени исчисляется несколькими годами, а не десятилетиями, как это рекомендуется Публикациями МКРЗ-30, 56 [5, 8].

Среднее геометрическое отношение кон-

Скелет/печень

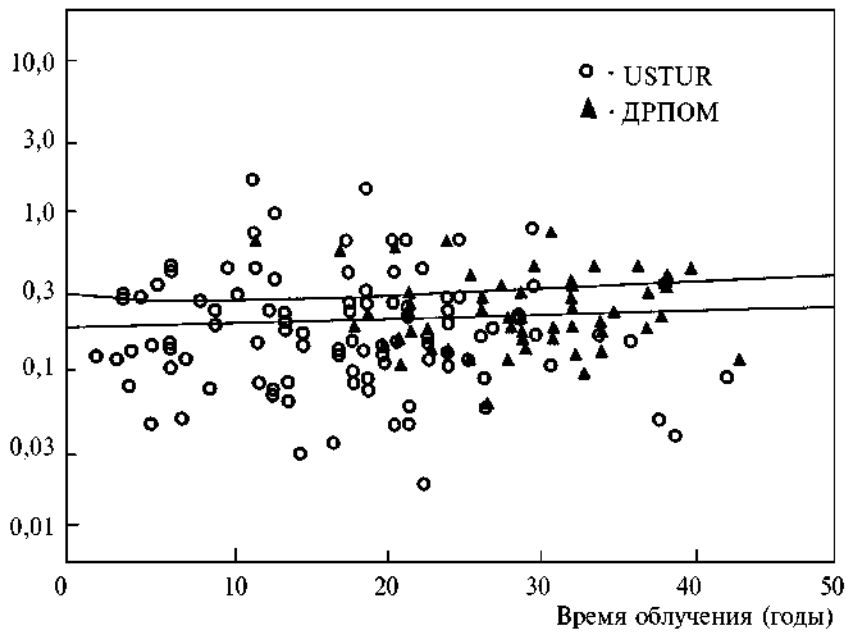


Рис.1. Соотношение концентраций скелет/печень для Pu по данным ДРПОМ и USTUR (верхняя кривая - МКРЗ, нижняя - по данным регистров)

Скелет/печень

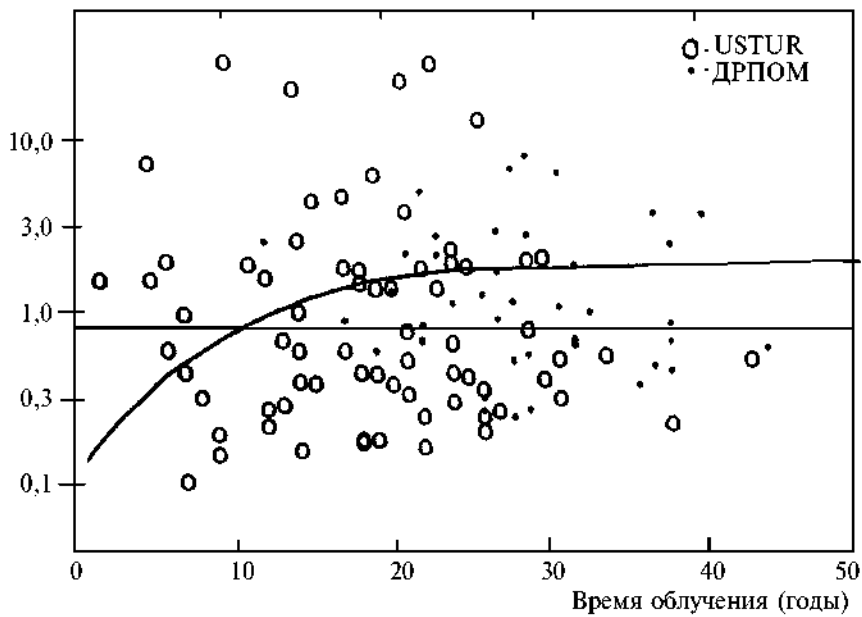


Рис.2. Соотношение концентраций скелет/печень для  $^{241}\text{Am}$  по данным ДРПОМ и USTUR (верхняя кривая - МКРЗ, нижняя - по данным регистров)

центраций скелет/печень, вычисленное по результатам анализа 173 случаев (объединенные данные двух регистров), составило 0,22 при стандартном геометрическом отклонении 1,39. Соответственно, с вероятностью 95% отношение концентраций скелет/печень колеблется в интервале значений 0,12-0,42. Принимая, согласно рекомендациям МКРЗ-23, сырой вес скелета равным 10 кг, а печени - 1,8 кг [9], находим, что в течение наблюдаемого периода (до 40 лет) после поступления в кровь наиболее вероятное отношение содержаний скелет/печень составит 1,2 при 95% доверительном интервале, колеблясь между 0,65 и 2,3. Значение 1,2 слабо отличается от рекомендованного МКРЗ-30 начального распределения между двумя органами в равных количествах [5] и в большей мере разнится с рекомендациями МКРЗ-48 и 67 [6,7], согласно которым указанное отношение в разные сроки колеблется в пределах от 1,4 до 2,1. Линия регрессии, предсказываемая МКРЗ-67 для отношения концентраций скелет/печень (см рис.1), расположена для всех сроков наблюдения несколько выше линии, полученной при обработке результатов Регистров (с фактором 1,5). Похоже, что МКРЗ-67 - модель завышает скелетное содержание, соответственно занижая его для печени. Из-за варибельности фактических данных различия между кривой, соответствующей модели МКРЗ, и линией регрессии, построенной по данным наблюдений, статистически не значимы, хотя, необходимо отметить, что большинство значений отношения скелет/печень расположено ниже кривой МКРЗ.

На рис.2 показаны отношения концентраций скелет/печень, полученных в ДРПОМ и USTUR для америция-241, в сравнении с отношением, предсказанным по модели МКРЗ-67 [7]. Различия между значениями указанного отношения для плутония (рис.1) и америция (рис.2) заметны. Большинство значений для  $^{241}\text{Am}$  лежит между 0,1 и 10,0, в то время как для Pu - между 0,03 и 1,0. Линия регрессии для  $^{241}\text{Am}$  располагается между 0,8 и 0,9, что указывает на отношение содержаний

скелет/печень  $\approx 5$  для всех сроков, прошедших между облучением и смертью.

Данные наблюдений указывают на отсутствие различий в периодах полувыведения америция, как и плутония, из скелета и печени. Модель МКРЗ-67 предсказывает для америция отношение содержаний скелет/печень между значениями 9 и 12 при сроках, более 20 лет. Предполагая, что содержание  $^{241}\text{Am}$  в остальных органах внелегочного пула, кроме скелета и печени, составляет около 10%, отложение в скелете и печени будет составлять около 82% и, соответственно, 8% от содержания в экстрапульмональной части организма. Фактические данные указывают на отношение содержаний скелет/печень  $\approx 5$ , что соответствует распределению  $^{241}\text{Am}$  между скелетом и печенью как 75% :15% от содержания во внелегочном пуле. Различия между 75% и 82% не достоверны, однако МКРЗ-модель вероятно несколько недооценивает содержание в печени при больших сроках. Как и в случаях с плутонием, большинство отношений скелет/печень для америция меньше значений, предсказанных по модели, особенно при сроках облучения более 20 лет. Также, как и в случаях с плутонием, из-за варибельности данных наблюдений различия между моделью МКРЗ и линией регрессии статистически не значимы.

Фактические данные, полученные в результате анализа аутопсийного материала, указывают на высокую степень рассеяния индивидуальных отношений скелет/печень. Погрешности, возникающие при выполнении разных операций в ходе радиохимического анализа, в том числе и ошибки измерения альфа - активности исследуемых образцов, в большинстве случаев не объясняют это рассеяние. Вместе с тем исследования по программе ДРПОМ в нескольких случаях выявили резкие аномалии отношения скелет/печень у лиц с выраженной патологией физиологических функций печени. Следует отметить, что при обследовании в условиях клиники у этих же людей выявлены аномально высокие значения относительной скорости выведения Pu

и  $^{241}\text{Am}$  с мочой [10, 11]. Это наводит на мысль, что основная причина наблюдаемой индивидуальной вариабельности относительного распределения радионуклидов между двумя органами состоит в разной степени нарушения нормальной деятельности печени у разных индивидуумов. Изучение данного феномена представляется одним из важных направлений дальнейших исследований по метаболизму и дозиметрии трансурановых нуклидов.

Таким образом, предварительные результаты сопоставления и сравнения моделей метаболизма актинидов в организме человека с данными наблюдений в ДРПОМ и USTUR не выявили достоверных отличий для Pu и  $^{241}\text{Am}$  между предсказанными по моделям МКРЗ значениями и фактическими данными.

Совместимости данных двух регистров свидетельствует о возможности проведения долгосрочных совместных исследований с целью более углубленного изучения метаболизма Pu и  $^{241}\text{Am}$  в организме человека по материалам, накопленным в американском и российском Регистрах. Таково основное заключение, сделанное в рамках пилотного проекта [4].

### БУДУЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Результаты совместной деятельности ученых ДРПОМ и USTUR, полученные на этапах пилотного проекта, доказали, что дальнейшие исследования необходимы: при тесном сотрудничестве российских и американских ученых становится возможным решение многих задач дозиметрии, в том числе - верификации и усовершенствования существующих биокинетических моделей, на которых основаны оценки доз внутреннего облучения и стандарты радиационной защиты.

На заключительной стадии пилотного проекта определены направления и подходы для проведения долгосрочных исследований. В целом главная цель предлагаемого проекта долгосрочного сотрудничества направлена на выполнение двух основных задач:

**1-я задача** заключается в унификации, координации методов и оценке качества по-

лученных данных в обоих Регистрах путем проведения параллельных межлабораторных сравнений с использованием Стандартных Образцов органов из Национального Института Стандартов и Технологий США.

**Подходы.** Межлабораторное сравнение (тест) радиохимических методов и характеристик измерительной аппаратуры, проводимое с использованием образцов органов, является одним из наиболее эффективных методов проверки качества и надежности применяемых методов и получаемых результатов. Такое исследование было проведено USTUR для сравнения результатов, получаемых Лос-Аламосской лабораторией, Университетом в Вашингтоне и лабораторией USTUR WSU [12]. Тесты включали сравнение всех стадий радиохимического анализа: озоление и кислотное растворение образцов тканей, разделение актинидов, электроосаждение на стальные подложки и альфа-спектрометрию. Сравнение проводилось с использованием стандартных образцов органов - Стандартных Условных Материалов (ткани человека) из Национального Института Стандартов и Технологий США (NIST). Лаборатория ДРПОМ должна включиться в межлабораторное сравнение при определенных условиях, а именно при условии приобретения за рубежом высокоэффективных реагентов и чистой, без примесей радиоактивной метки  $^{242}\text{Pu}$ .

**2-я задача** состоит в более углубленном совместном исследовании особенностей метаболизма и параметров обмена актинидов в организме человека при разных уровнях накопления и усовершенствование моделей на основе объединенных многолетних научных данных, накопленных в российском и американском Регистрах.

Эта задача включает совместный анализ данных по определению коэффициентов перехода различных соединений Pu и  $^{241}\text{Am}$  из легких в кровь, основываясь на анализе отношений активностей - внелегочный пул : легкие : лимфоузлы - в обоих Регистрах, сравнение коэффициентов с предсказанными по новой модели Публикации №66 МКРЗ с целью



верификации и модификации модели на основании данных, полученных для персонала при длительном облучении.

Будут исследованы также соотношения между посмертным содержанием актинидов в легких и органах внелегочного пула (системное содержание) и предсказанным по скорости мочевой экскреции на основании современных моделей МКРЗ для Pu и  $^{241}\text{Am}$ . Как часть этой задачи будет проведено сравнение некоторых процессов метаболизма - скорости длительной экскреции с мочой и распределения в организме - у здоровых людей и у лиц с нарушением здоровья, особенно с различными заболеваниями печени.

*Подходы.* Анализ скорости экскреции радионуклидов с мочой является основным методом оценки содержания актинидов в организме у рабочих атомной промышленности. Определение соотношения между содержанием актинидов в организме и уровнем мочевой экскреции изначально было основной целью деятельности Регистров [10, 11, 13, 14]. Оценка содержания в организме по скорости экскреции также является задачей биокинетических моделей, что нашло отражение в моделях МКРЗ-67 [7] и предложенной В.Ф. Хохряковым [15]. ДРПОМ и USTUR вместе имеют данные по результатам анализа образцов тканей на более, чем 1000 случаев и отдельно на несколько тысяч анализов мочи. Объединение этих данных позволит более реально оценить соотношение между системным содержанием актинидов и уровнем мочевой экскреции, что повысит точность дозиметрических оценок благодаря увеличению количества исследованных случаев. Это позволит также исследовать зависимость или (независимость) этого соотношения от дозы. Для решения этой задачи будет выбран наиболее полный набор дозиметрической информации по каждому индивидууму, включающий достоверные данные об истории облучения - времени и типе поступления, результатах биофизического обследования по скорости мочевой экскреции и посмертного определения содержания в легких и других органах тела при аутопсии. В

каждом случае для оценки эффективной скорости абсорбции актинидов из легких и расчета полной дозы на органы, как функции времени от начала облучения, будут использованы данные Регистров по радиохимическому анализу образцов органов и современные модели МКРЗ респираторного тракта и метаболизма радионуклидов в экстрапульмональном пуле. В результате этих исследований будут отмечены некоторые наиболее важные недостатки МКРЗ-модели путем последовательного использования фактических отношений содержаний легкие/органы тела. Комбинация данных обоих Регистров по результатам анализа мочи и образцов органов позволит верифицировать или модифицировать предложенные модели и объяснить влияние некоторых факторов, таких как дозовая зависимость и сроки облучения, на соотношение между содержанием в организме и уровнем экскреции.

Таковы будущие направления долгосрочного проекта 2.1, который начнется в 1997 г.

Таким образом, в результате выполнения пилотного проекта сотрудничества российских и американских ученых доказана осуществимость развития полномасштабных долгосрочных совместных исследований метаболизма Pu и  $^{241}\text{Am}$  в организме человека, направленных на усовершенствование существующих биокинетических моделей реконструкции доз облучения персонала инкорпорированными радионуклидами.

С основными теоретическими достижениями долговременного проекта "Метаболизм и дозиметрия промышленных соединений плутония" тесно связано выполнение задач другого совместного российско-американского проекта "Реконструкция индивидуальных доз облучения персонала производственного объединения "Маяк" (проект 2.4), направленного на создание компьютерной базы данных внешнего и внутреннего облучения работников предприятия с целью дозиметрического обеспечения исследований по оценке рисков возникновения детерминированных и стохастических эффектов (проекты 2.2 и 2.3)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате совместных исследований, проведенных в рамках Пилотного проекта, установлено, что оба Регистра - российский и американский - имеют большой объем накопленных данных - дозиметрических и медицинских, включая результаты радиохимических анализов биосубстратов - мочи и образцов органов и тканей, полученных для профессионалов предприятий по переработке плутония в обеих странах.

Несмотря на некоторые принципиальные отличия в задачах, содержании, объемах и методах отбора и радиохимического анализа, в материалах обоих Регистров больше подобия, чем различий. Результаты первого предварительного сравнения материалов по метаболизму Pu и  $^{241}\text{Am}$ , накопленных при выполнении двух независимых исследовательских программ, показали удовлетворительное совпадение данных о соотношении концентраций радионуклидов в основных органах депонирования - скелете и печени. Медианные концентрации Pu и  $^{241}\text{Am}$  в органах у лиц, зарегистрированных в ДРПОМ, в большинстве случаев на два порядка выше, чем у доноров USTUR. Однако, величины отношений концентраций скелет/печень при одинаковых сроках профессионального контакта практически одинаковы для обеих групп при большой вариации сроков облучения и уровней накопления в органах.

На основании объединенных данных выявлены различия между значениями указанного отношения для плутония и америция. Плутоний распределяется между скелетом и печенью почти в равных количествах: отношение содержаний скелет/печень=1,2, тогда как для  $^{241}\text{Am}$  указанное отношение близко к 5 для всех сроков, прошедших между облучением и смертью.

Предварительные результаты сопоставления и сравнения моделей метаболизма актинидов в организме человека с данными наблюдений не выявили достоверных отличий для Pu и  $^{241}\text{Am}$  между предсказанными по моделям

МКРЗ значениями и линиями регрессии, построенными по данным наблюдений.

Несмотря на то, что оба Регистра формировались при разных подходах и с разными задачами, тем не менее сравнительный анализ данных, проведенный в рамках пилотного проекта, дал положительный результат. Сравнение методик и некоторых материалов, накопленных в обоих Регистрах, показало, что базы данных ДРПОМ и USTUR хорошо совместимы и увеличение числа исследованных случаев повысит статистическую надежность данных. Теперь, когда началось тесное сотрудничество ученых обоих Регистров, возможна унификация методов и объединение собранных данных в рамках долгосрочных исследований. Это позволит существенно уточнить наши представления о метаболизме плутония при разных уровнях накопления радионуклида в организме у профессионалов в зависимости от длительности воздействия и на основе этих данных модифицировать биокинетические модели обмена для случаев пролонгированного хронического облучения.

Таким образом, складываются хорошие перспективы дальнейших исследований метаболизма актинидов и развития дозиметрии на основе объединенной базы данных американского и российского трансурановых регистров. При тесном сотрудничестве российских и американских ученых становится возможным решение многих задач дозиметрии, в том числе - верификации и усовершенствования существующих биокинетических моделей, на которых основаны оценки доз внутреннего облучения и стандарты радиационной защиты. Дополнительно к увеличению статистики проанализированных случаев обобщение данных обоих Регистров в рамках долгосрочного проекта позволит исследовать то, что ранее было невозможно - дозовую зависимость (или независимость) параметров биокинетических моделей. Усовершенствование моделей на базе объединенных данных обоих Регистров может существенно улучшить методы косвенной дозиметрии внутреннего облучения актинидов,

что, в свою очередь, позволит корректно оценить радиобиологический эффект, в том числе риск возникновения злокачественных новообразований у работников производства по переработке и получению плутония.

ЛИТЕРАТУРА

1. Department of Energy. Record of the first meeting of the Joint Coordinating Committee for Radiation Effects Research, October 24-26, 1994, Published by the U.S. department of Energy, Office of International Health Studies, Washington, D.C.; November 2, 1994.  
 2. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Романов С.А., Филиппи Р.Е., Катрен Р.Л. Сравнение аутопсийно-дозиметрических программ: дозиметрический регистр производственного объединения "Маяк" Р.Ф.(ДРВОМ) и трансураниевый регистр США (USTUR). Отчет о НИР по проекту 2.1 совместного российско-американского сотрудничества (1 этап). Озерск.- 1995 - 28с.  
 3. Suslova K.G., Filipy R.E., Khokhryakov V.F., Romanov S.A., Kathren R.L. Comparison of the Dosimetry Registry of the Mayak Industrial Association and the United States Transuranium Registries: A preliminary report. // Rad. Protect.Dosim. -1996 - Vol.67.- №1 - P.13-22.  
 4. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Романов С.А., Филиппи Р.Е., Катрен Р.Л. Сопоставление данных аутопсийных исследований ДРВОМ и USTUR с биокинетическими моделями МКРЗ и объединение материалов двух Регистров для изучения метаболизма актинидов в организме человека. Отчет о НИР по проекту 2.1 совместного российско - американского сотрудничества (2 этап).- Озерск-1996- 30с.  
 5. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30. // Annals ICRP2(3/4). Oxford: Pergamon Press. 1979 - 116 p.  
 6. The Metabolism of Plutonium and Related Elements. ICRP Publication 48 // Annals ICRP

16 (2/3). Oxford:Pergamon Press - 98 p.  
 7. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 2. ICRP Publication 67. // Annals ICRP 23 (3/4). Oxford: Pergamon Press. 1994. - - - 167 p.  
 8. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Oxford: Pergamon Press. 1989-139 p.  
 9. Человек. Медико-биологические данные: Публикация №23 МКРЗ.- М.: Атомиздат, 1977-495с.  
 10. Khokhryakov V.F.,Menshikh Z.S., Suslova K. G., Kudryavtseva T.I., Tokarskaya Z.B., Romanov S. A. Plutonium excretion model for the healthy man. // Rad. Protect. Dosim. -1994-53- P.235-239.  
 11. Suslova K. G., Khokhryakov V. F. Urinary excretion rate of Am-241 by occupationally exposed workers of radiochemical plant. In: Health effects of internally deposited radionuclides: Emphasis on radium and thorium: World Scientific Co. Pte. Ltd. 1995 - P.121- 125.  
 12. Kathren R.L., Harwick L.A., Toohey R.E. eds. Annual report of the United States Transuranium and Uranium Registries. April 1992- September 1993. // USTUR, Washington State University, Tri-Cities, Richland, WA. 1994 - 143 p.  
 13. Kathren R. L., Heid K. R. Comparison of estimates of systemic Pu from urinary excretion with estimates from post-mortem tissue analysis. // Health Phys. - 1987 - n.53- P. 497-493.  
 14. Kathren R.L., McInroy J.F. Comparison of systemic plutonium deposition estimates from urinalysis and autopsy data in five whole-body donors. // Health Phys. - 1991 - n.60.- P.481-488.  
 15. Khokhryakov V.F., Romanov S. A., Suslova K. G. A model of lung clearance of plutonium. In: Health effects of internally deposited radionuclides: Emphasis on radium and thorium: World Scientific Co. Pte. Ltd. 1995 - P.117-121.