

УДК 546.799+599.9:681.2.082/.083  
© 2003

## ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЕТЧИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ МОНИТОРИНГА НАКОПЛЕНИЯ АКТИНИДОВ У ПЕРСОНАЛА ПО «МАЯК»

*В.Ф.Хохряков, В.И.Черников, А.В.Ефимов*  
*Россия, г.Озерск, Филиал № 1 ГНЦ РФ «Институт биофизики»*

В работе описан применявшийся в ФИБ-1 до конца 90-х гг метод сцинтилляционного счетчика для прижизненного определения содержания актинидов у персонала ПО «Маяк». Метод основан на регистрации с помощью детектора на основе кристалла NaI(Tl) гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$  с энергией 59,6 кэВ — нуклида, играющего роль радиоактивной метки для плутония. Описаны характеристики установки и принципы проведения калибровки. Минимальная детектируемая активность по  $^{241}\text{Am}$  составляла 37 Бк (1нКи), что соответствовало содержанию плутония на уровне, не превышающем временно принятой в отрасли предельно допустимой нормы в 1480 Бк. Сравнение оценок содержания плутония в организме, полученных аппаратурным методом, с результатами биофизических обследований, основанными на интерпретации скорости экскреции радионуклида с мочой, выявило положительную корреляцию между данными, полученными двумя методами. При этом аппаратурный метод чаще приводил к более высоким оценкам по сравнению с биофизическим.

Уже на ранней стадии разработки аппаратурного метода определения содержания  $^{239}\text{Pu}$  в организме человека возникли существенные трудности. Они были обусловлены тем, что  $^{239}\text{Pu}$  является практически чистым альфа-излучателем, а сопровождающее альфа-распад характеристическое рентгеновское излучение обладает слабой интенсивностью (примерно 4% на одно ядерное превращение), низкой энергией (10—25 кэВ), что приводит к сильному ослаблению этого излучения в тканях тела человека. Поэтому определить, например, содержание плутония в костной ткани человека по испускаемому им характеристическому рентгеновскому излучению практически чрезвычайно трудно.

Наиболее перспективным методом аппаратурного контроля за содержанием  $^{239}\text{Pu}$  в организме человека является метод, основанный на результатах измерения гамма-излучения сопутствующего ему  $^{241}\text{Am}$ , при альфа-распаде которого образуются относительно

слабо (по сравнению с рентгеновским излучением) поглощающиеся гамма-кванты с энергией 59,6 кэВ, а интенсивность их на порядок выше, чем у  $^{239}\text{Pu}$ . Это значительно облегчает регистрацию этого излучения и повышает нижний предел чувствительности метода определения этого радионуклида. Зная соотношение  $^{241}\text{Am}:\text{Pu}$  в организме человека или его отдельных органах, можно на основании данных измерений гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$ , исходящего из тела человека, оценить содержание в нем  $^{239}\text{Pu}$ .

### КАЛИБРОВКА УСТАНОВКИ СИЧ

В биофизической лаборатории филиала № 1 Института биофизики, начиная с середины семидесятых годов, для мониторинга за накоплением актинидов в организме персонала ПО «Маяк» используется установка СИЧ-7.5, предназначенная для прижизненного определения содержания в организме человека  $^{241}\text{Am}$ ,

депонированного в основном в трех органах депонирования — легких, печени и скелете.

Установка СИЧ-7.5 представляет собой многоканальный спектрометр на основе четырех датчиков с кристаллом NaI(Tl), диаметром 140 мм и толщиной 3 мм, сочлененных с фотоэлектронным умножителем типа ФЭУ-49Б. Датчики со стандартными делителями напряжения и согласующими преусилителями прикреплены к измерительному креслу и устанавливаются вплотную к поверхности тела пациента в положениях:

- два над легкими,
- один над печенью,
- один над спиной в области поясницы.

Сигналы с датчиков через соответствующие линейные усилители поступают на многоканальные амплитудные анализаторы.

Для снижения влияния посторонних источников гамма-излучения на результаты измерения датчики и измерительное кресло располагается в защитной камере, представляющей собой сварной каркас из стальных швеллеров. Стены, пол и потолок выложены свинцовыми кирпичами. Толщина стен и потолка по свинцу — 50 мм, пола — 100 мм. Изнутри камера дополнительно футерована листами кадмия толщиной 2 мм, меди 2 мм и оргстекла — 15 мм.

Калибровка установки СИЧ-7.5 осуществлялась с помощью фантома грудной клетки. На основании исследования [1] материалов, имитирующих рассеяние и поглощение гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$  в организме человека, был изготовлен фантом туловища.

Корпус фантома был изготовлен из прочной ткани (малескин), свергнутой вдвое. Для изготовления полостей ткань прострачивалась через каждые 3 см. Затем выкраивался жилет по форме грудной клетки. В образующиеся полости засыпалось тканеэквивалентное вещество (пшено). Толщина засыпки составляла 2 см.

Фантом легких представлял собой оболочку из оргстекла, выполненную по форме натуральных легких человека. Чтобы достичь плотности  $0,3 \text{ г/см}^3$ , характерную для легких

человека, оболочку заполняли кусочками поролона, пропитанным раствором  $^{241}\text{Am}$  известной удельной активности. Оболочка фантома печени также изготовлена из оргстекла. Заполнение фантома печени проводили тканеэквивалентным раствором (плотностью  $1,08 \text{ г/см}^3$ ), содержащим известное количество  $^{241}\text{Am}$ . Состав раствора приведен в работе [2].

В связи с тем, что значительная доля  $^{241}\text{Am}$  накапливается в скелете, был изготовлен фантом скелета. Подробное описание конструкции фантома и его отдельных органов изложено в работе [1].

Перед началом калибровки определяли место положения датчика над соответствующим органом фантома. Датчики располагались в тех местах, где наблюдалась максимальная скорость счета от легких, печени и скелета. В процессе калибровки с помощью фантома были получены коэффициенты эффективности для каждого из датчиков.

Для уточнения фоновых характеристик установки были проведены многократные измерения спектров гамма-излучения 26 человек, не имевших профессионального контакта с радионуклидами. Данные измерений неэкспонированных пациентов были обработаны по методу наименьших квадратов в соответствии с линейным регрессионным уравнением, позволяющим вычислять индивидуальный, характерный для данного пациента фон в рабочей области спектра (40—80 кэВ) по скорости счета во вспомогательной области (140—180 кэВ) при каждом измерении. В результате для четырех датчиков получены следующие фоновые характеристики:

$$\begin{aligned}
 &\text{датчик № 1 (правое легкое)} \\
 &N\phi_1 = 1,44N_{B_1} + 4 \\
 &\text{датчик № 2 (левое легкое)} \\
 &N\phi_2 = 2,31N_{B_2} - 57,2 \\
 &\text{датчик № 3 (печень)} \\
 &N\phi_3 = 1,35N_{B_3} + 92,4 \\
 &\text{датчик № 4 (поясница)} \\
 &N\phi_4 = 2,10N_{B_4} - 33,4,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $N\phi_1$  — расчетные значения скорости сче-

Таблица 1

Показания датчиков (имп/мин), полученные при 15-кратном измерении пациента — «носителя»  $^{241}\text{Am}$  при  $t=20$  мин

Параметры	Номер датчика			
	1	2	3	4
$N_{B_i}$	114	134	131	133
$N\Phi_i$	206	253	269	246
$N\sigma_i$	234	324	331	257
$\Delta_i$	28	71	62	11
$r_i$	0,7	0,63	0,73	0,83
$\delta N\Phi_i$	6,5	13,5	8,4	16,6
$\sqrt{\frac{N\Phi_i}{t}}$	3,2	3,6	3,7	3,5

та импульсов фона в рабочей области, имп/мин;

$N_{B_i}$  - скорость счета во вспомогательной области, имп/мин.

Уровень фона  $N\Phi_i$  зависит от технических характеристик датчика, а также от расположения датчика по отношению к телу чело-века, которое определяет поток рассеянных фотонов в область детектора. Поэтому численные значения эмпирических коэффициентов (1) неодинаковы для разных датчиков. Анализ данных 15 измерений (табл.1) одного пациента — «носителя»  $^{241}\text{Am}$ , проводившихся в разное время в течение месячного срока, показал, что среднее квадратическое отклонение расчетного фона  $\delta N\Phi_i$  не укладывается в размах колебаний  $\sqrt{\delta N\Phi_i / t}$ , отвечающий пуассоновскому распределению.

Поэтому в соответствии с классификаци-

ей, рекомендуемой в работе [3], СИЧ-7.5 относится к установкам с непостоянным фоном. По-видимому, высокие колебания фона связаны в основном с изменением содержания радиоактивных веществ в воздухе рабочего помещения здания, о чем свидетельствуют данные измерений фона пустой защитной камеры установки. Наряду с этим, определенный вклад в колебания фона могут вносить инкорпорированные жесткие гамма-излучатели, а также недостаточная воспроизводимость положения датчиков по отношению к телу человека. Последнее приводит к неодинаковому детектированию датчиками рассеянного излучения.

Чистую скорость счета каждого датчика в рабочей области спектра  $\Delta_1$ , обусловленную излучением  $^{241}\text{Am}$ , определяли как разность из-

меренной скорости счета в этой области  $N_{0i}$  и рассчитанным согласно уравнениям (1) значениям  $N\Phi_i$ :

$$\Delta_i = N_{0i} - N\Phi_i \quad (2)$$

Обработка результатов 15 измерений одного пациента, о которых упоминалось выше, позволила оценить дисперсию интенсивности фона  $\delta^2 N\Phi_i$  для каждого датчика, которая при 20-минутных измерениях пациента вносила основной вклад в ошибку чистой скорости счета. Ошибку отдельного измерения оценивали, используя выражение для среднего квадратического отклонения чистой скорости счета:

$$\delta\Delta_i = \sqrt{2\delta^2 N\Phi_i(1-r) + \frac{\Delta_i}{t}}, \quad (3)$$

где  $r$  — коэффициент корреляции, учитывающий связь между расчетной скоростью счета фона  $N\Phi_i$  и скоростью счета в рабочей области  $N_{0i}$ ;

$t$  — время измерения, мин.

Анализ результатов показал (табл. 1), что для четырех датчиков значения коэффициента корреляции, оцененные с мерой надежности 0,95%, колебались в пределах от 0,63 до 0,83, а значения  $\delta N\Phi_i$  для данного пациента — от 6,5 до 16,6 имп/мин, что свидетельствовало об основном вкладе в ошибку измерений чистого счета, вносимом дисперсией интенсивности фона.

После набора значительного количества измерений работников ПО «Маяк» была внесена поправка в фантомную калибровку СИЧ-7.5 путем сравнения показаний датчиков установки с данными посмертных определений содержания  $^{241}\text{Am}$  в организме у лиц, ранее обследовавшихся на установке.

Поскольку для скрининга, т.е. грубой предварительной оценки уровня накопления радионуклидов в организме, не требуется информации о распределении вещества по органам, то с целью упрощения методики общее содержание  $^{241}\text{Am}$   $Q$  оценивали как величину, пропорциональную сумме чистых скоростей

счета четырех датчиков:

$$Q = \frac{P \sum \Delta_i}{K}, \quad (4)$$

где  $K$  — калибровочный коэффициент установки,  $\text{имп} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$ ;

$P$  — поправочный коэффициент, учитывающий поглощение гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$  в организме, отн. ед.

Согласно данным [4] величина последнего рассчитывалась по формуле:

$$P = \exp [0,103 \cdot (15,3 \cdot M/H - 0,01C - 3,52)], \quad (5)$$

где

$M$  — масса тела, кг;

$H$  — рост, см;

$C$  — объем грудной клетки.

В табл. 2, где наряду с данными измерения людей использованы результаты, полученные на фантоме, под  $Q$  понимается содержание  $^{241}\text{Am}$ , найденное при посмертном исследовании, а  $n$  означает число прижизненных измерений на установке, вычисленное в соответствующем случае. Индивидуальные значения коэффициента  $K$  колеблются в пределах от 0,66 до 2,33 единиц со средним значением 1,35 и квадратичным отклонением, составляющим около половины среднего. Эти результаты вносят корректировку по сравнению с прежней калибровкой с фактором  $1,35/0,99=1,37$ . Одной из причин, влияющих на вариабельность коэффициентов, по-видимому, являются индивидуальные различия в распределении нуклида по органам. Во всех посмертно исследованных случаях основная часть  $^{241}\text{Am}$  выявлена в скелете (более 70%), эффективность измерения нуклида в котором, вследствие относительно большей пространственной протяженности ниже, чем для легких и печени. Депонированные в печени и легких количества нуклида вследствие близкого расположения к ним датчиков регистрируются гораздо эффективнее и поэтому можно ожи-

Таблица 2

Сравнительные данные показаний СИЧ-7.5 и посмертных определений, использованные для калибровки

Случай	$\Sigma \Delta_i$	n	P, отн.ед	Q, Бк	K, имп·мин <sup>-1</sup> ·Бк <sup>-1</sup>
1	162,2	1	1,22	167,24	1,18
2	182,2	1	1,01	249,75	0,74
3	228	1	1,34	131,35	2,33
4	292	1	1,37	199,8	2,00
5	501	1	1,26	308,58	2,21
6	439,8	1	1,23	669,7	0,81
7	739	1	1,20	1332	0,66
8	960,5	1	1,40	1332	1,25
фантом	5869	10	1,02	6031	0,99

дать, что даже при незначительных изменениях в распределении между этими органами и скелетом суммарная чистая скорость датчиков должна сильно изменяться, что сказывается на величине калибровочного коэффициента.

Из табл. 2 следует, что среднее  $\pm$  квадратичное отклонение составляет,  $K=1,35 \pm 0,65$  имп·мин<sup>-1</sup>·Бк<sup>-1</sup>.

Так как не выявлено достоверной корреляции между чистыми скоростями разных датчиков спектра  $\Delta_i$  при измерении одного и того же пациента, то ошибку суммарной чистой скорости счета вычисляли как  $\Sigma \delta^2 \Delta_i$ . Учитывая сказанное, а также, принимая во внимание данные табл. 2, оценивали минимальную детектируемую активность (МДА)  $Q_{\min}$  по формуле:

$$Q_{\min} = \frac{\sqrt{\sum_i 2\delta^2 N\Phi_i(1-r)}}{\psi \cdot K} \quad (6)$$

Под МДА согласно [3] понимается минимальное содержание <sup>241</sup>Am, измеряемое с заданной ошибкой  $\psi$ . Оценка показала, что при  $\psi=0,3$  (30%),  $Q_{\min}$  составляет 37 Бк (1 нКи).

По результатам измерения <sup>241</sup>Am на установке СИЧ-7.5 у обследованных пациентов I, II и III групп, соответствующих разным производственным участкам, рассчитывали содержание плутония по наиболее вероятному отношению <sup>241</sup>Am:Pu. Учитывая возможное отклонение фактического отношения <sup>241</sup>Am:Pu от ожидаемого, которое характеризуется соответствующим стандартным геометрическим отклонением, характерным для каждого производственного участка, а также, используя данные о чувствительности определения на установке <sup>241</sup>Am, можно оценить с заданной мерой надежности минимальное содержание плутония, которое позволяет выявлять рассматриваемый аппаратурный метод.

Если  $\varepsilon_g$  и  $\sigma_g$  — расчетное содержание  $^{241}\text{Am}$  по отношению к плутонию и соответствующее стандартное геометрическое отклонение, то, применяя односторонний критерий в терминах логнормальной статистики, можно утверждать, что с доверительной вероятностью 0,95 содержание  $^{241}\text{Am}$  по отношению к плутонию у данного индивидуума не превышает значения  $\varepsilon_g \sigma_g^{-1.65}$ , и, соответственно, если  $Q^\alpha$  — измеренное на установке содержание  $^{241}\text{Am}$  в организме, то с доверительной вероятностью 0,95 определяемое содержание плутония не превзойдет величины значения  $Q^\alpha \cdot \varepsilon_g^{-1} \cdot \sigma_g^{1.65}$ .

Используя численные значения  $\sigma_g$  для трех групп персонала и внося поправку в этот показатель, связанную с вариабельностью калибровочного коэффициента (табл.2), была рассчитана верхняя граница  $Q^{\text{вп}}$  содержания плутония, ожидаемого с вероятностью 0,95 при минимально измеряемом на установке содержании  $^{241}\text{Am}$ , равном 37 Бк. Величина  $Q^{\text{вп}}$  зависит от периода контакта с перерабатываемым продуктом и при среднем значении  $\varepsilon_g$  равном 0,1,  $\sigma_g$  равном 2,3 и содержании  $^{241}\text{Am}$

на уровне МДА  $Q^{\text{вп}}$  составляет 1462 Бк, что не превышает установленных в отрасли до 1999 г. норм на допустимое содержание плутония.

Это означает, что на данном производстве при массовом обследовании персонала с помощью установки СИЧ-7.5 с вероятностью 0,95 не будут пропущены носители плутония с указанным содержанием.

### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДВУХ МЕТОДОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ

Расчитанное содержание плутония у лиц, прошедших обследование на установке СИЧ-7.5, сравнивали с данными оценок, выполненных для тех же пациентов по анализам мочи с использованием действовавшей в отрасли методики [5]. Сравнение результатов выявило положительную корреляцию между оценками содержания плутония, произведенными двумя методами. При этом аппаратный метод чаще приводил к более высоким оценкам, чем биофизический.

Таблица 3

Среднее геометрическое отношение содержания плутония в организме, полученное двумя методами

Группа персонала	I	II	III
Количество обследованных лиц	33	49	60
Количество обследований	67	71	96
Оценка СИЧ / Оценка по моче	1,6	1,9	1,0
Стандартное геометрическое отклонение	3,2	2,0	2,9

Из данных табл. 3 следует, что указанное расхождение характерно для лиц I и II групп персонала. Возможно, это обусловлено заниженным значением показателя  $\epsilon_0$  для данных участков производства. Изучение динамики относительного содержания нуклидов в аэрозолях может пролить свет на причину расхождения двух методов. К завышению оценки могут также приводить невыявленные загрязнения кожных покровов при входном контроле, осуществляемом с использованием блока детектирования БДЗА2-01. Не исключено, что расхождение оценок может быть связано с существованием систематической ошибки косвенного метода.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования показали, что прямой метод сцинтилляционного счетчика дает, как правило, консервативную оценку, которая коррелирует с оценкой косвенного биофизического метода. Указанный аппаратный метод менее точен и уступает по чувствительности косвенному приблизительно в 3—5 раз, однако, обладая высокой оперативностью, позволяет осуществ-

лять мониторинг с целью выявления носителей плутония. Сочетание обоих методов, при котором результаты аппаратного скрининга уточняются косвенным методом, может обеспечить эффективный контроль за уровнями облучения инкорпорированным плутонием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Драчев В.П., Волошин В.Н., Хохряков В.Ф. Калибровка счетчика СИЧ-7.2: Отчет/ФИБ № 1; Инв. № 934. — 1973.
2. Левочкин Ф.К., Девятайкин Е.В. Гетерогенный тканеэквивалентный фантом грудной клетки человека. (Описание). — М.: ИБФ, 1970.
3. Дементьев В.А. Измерение малых активностей препаратов. — М.: Атомиздат, 1967 г.
4. Ramsden D., Peabody C.O., Spreight R.G. The use of ultrasonics to investigate soft tissue thicknesses on the human chest / Winfrith; AEEW-R 493. — 1967.
5. Выявление, учет и медицинское наблюдение за носителями плутония: Методические указания. / Под ред. Любчанского Э.Р., Хохрякова В.Ф.; Инв. № 1340. — М. — 1987.