

оптимальные концентрации светосостава и вычислить энергетическую характеристику полученного дозиметрического детектора.

Поступила в Редакцию 22/IX 1967 г.  
В окончательной редакции 18/VII 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Цирлин и др. В сб. «Сцинтилляторы и сцинтилляционные материалы». Харьков, Изд. Харьковск. Гос. ун-та, 1963.

2. Д. Хайн, Р. Браунелл. Радиационная дозиметрия. М., Изд-во иностр. лит., 1958.  
3. И. Г. Гусев и др. Защита от излучения протяженных источников. М., Госатомиздат, 1961.  
4. A. Flammersfeld. Naturwiss., 33, 280 (1946).  
5. Ю. А. Цирлин и др. «Укр. физ. ж.», 13, 1309 (1968).  
6. Л. Е. Пергаманик, М. А. Стржеменный, Ю. А. Цирлин. «Ж. прикл. спектроскопии», 2, 440 (1965).  
7. М. И. Арсаев, О. Х. Белов. Доклад № Д-53 на Научно-технической конференции по ядерной электронике (Москва, 1967).  
8. R. Kempe. Kernenergie, 6, 553 (1963).

## Исследование оптимальной геометрии измерений $K^{40}$ на спектрометре излучений человека

Ю. В. Сивинцев, В. С. Юзгин

УДК 539.1.074.3:539.122.164:539.12.08

Одним из наиболее распространенных методов регистрации излучений человека является сцинтилляционная спектрометрия. Геометрию измерений и число детекторов выбирают, исходя из необходимой чувствительности спектрометра излучений человека (СИЧ) и возможности идентификации источника внутреннего облучения. В нашей стране [1] и за рубежом [2] чаще других используется такая геометрия измерений, при которой человек (источник излучения) лежит на носилках, а один или несколько детекторов располагаются над или под ним.

Характер инкорпорированной активности, вес и размеры людей колеблются в значительной степени. Однако физические характеристики СИЧ невозможно изменить при переходе от одного обследуемого лица к другому, поэтому при разработке СИЧ необходимо заранее выявить оптимальные размеры, число и расположение сцинтилляционных детекторов. Задача по определению наиболее выгодных параметров спектрометра и геометрии измерений может быть решена методом Монте-Карло по разработанной в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова программе для ЭВМ. Эта программа реализует на ЭВМ алгоритм метода Монте-Карло для оценок спектральных характеристик  $\gamma$ -излучения, выходящего из геометрически сложной системы источников (набор цилиндрических тел) и регистрируемого сцинтилляционным детектором. Особенности алгоритмов, описывающих прохождение  $\gamma$ -квантов через вещество, хорошо известны [3, 4]. Различия подобных алгоритмов чаще всего определяются геометрическими условиями решаемой задачи. С усложнением геометрии приходится

больше внимания уделять той части алгоритма, в которой осуществляется слежение за траекторией кванта, с целью снизить до минимума затраты машинного времени. Выполнение последнего условия необходимо в задачах о прохождении  $\gamma$ -квантов через сильно рассеивающие среды, когда квант на протяжении одной истории многократно меняет направление полета.

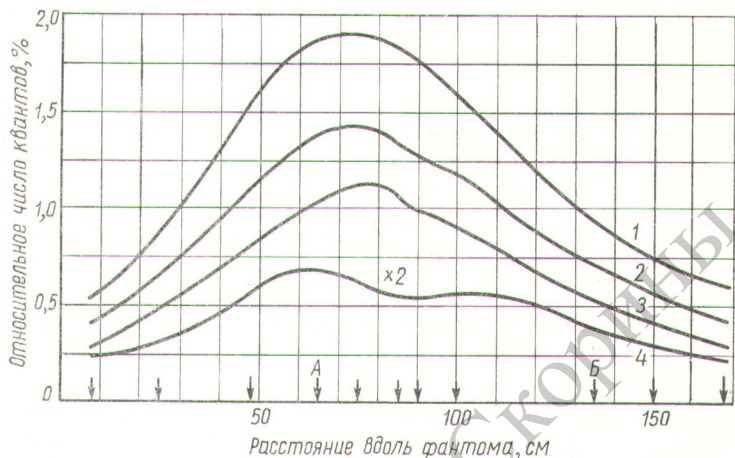
Упомянутая программа позволяет с разумными затратами времени решать на ЭВМ многие задачи о прохождении  $\gamma$ -квантов через системы, состоящие из набора цилиндров. С ее помощью проведены исследования реакции большого кристалла NaI(Tl) (диаметр 140 мм, высота 100 мм) при его продольном перемещении над горизонтально расположенным фантомом (имитатором тела человека). Исследовалось также влияние высоты кристалла и его удаленности от поверхности фантома на спектр излучения, поглощенного кристаллом.

Для расчетов был взят фантом, состоящий из десяти однородных водных цилиндров. Предполагалось также, что источник моноэнергетического  $\gamma$ -излучения (энергия квантов  $E_\gamma = 1,46$  Мэв) распределен равномерно по фантому. Указанной энергией обладают  $\gamma$ -кванты, испускаемые изотопом  $K^{40}$ , всегда присутствующим в теле человека и поэтому часто используемым для калибровки СИЧ.

Параметры фантома и геометрические условия расчетов даны на рис. 1. Здесь приведены кривые, характеризующие изменение физических характеристик спектрометра при перемещении кристалла NaI вдоль фантома. Из рисунка следует, что в этих условиях количество

Рис. 1. Зависимость физических характеристик спектрометра от расположения кристалла NaI(Tl) диаметром 140 мм и высотой 100 мм вдоль фантома.

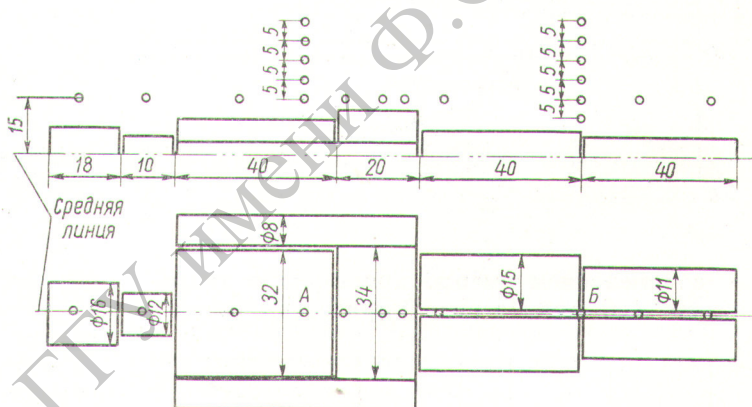
Кружками отмечено положение центра нижнего основания кристалла. Размеры даны в см. 1 — число квантов, падающих на кристалл, отнесенное к числу всех квантов, излученных источником (коэффициент ослабления излучения); 2 — число квантов, зарегистрированных детектором, отнесенное к числу всех квантов, излученных источником; 3 — число квантов, оставшихся в кристалле энергии, меньшую 1,46 Мэв, отнесенное к числу всех квантов, излученных источником; 4 — число квантов, полностью потерявших энергию в кристалле, отнесенное к числу всех квантов, излученных источником («фотопик») (ординаты этой кривой увеличены в 2 раза для удобства рассмотрения деталей).



квантов, падающих на кристалл, изменяется примерно в четыре раза (кривая 1). Кривая 2, характеризующая изменение количества квантов, поглощенных в кристалле, по форме сходна с кривой 1. С помощью кривых 1 и 2 можно вычислить общую эффективность кристалла (отношение числа квантов, поглощенных в кристалле, к числу падающих на кристалл).

Соответствующие расчеты показали, что изменение эффективности при перемещении кристалла вдоль фантома невелико (от 71 до 78%) и составляет около 9% максимальной величины. По кривым 3 и 4 на рис. 1 можно судить об изменении спектра поглощения при перемещении кристалла вдоль фантома: кривая 3 соответствует общему числу квантов в спектре, за исключением фотопика, а кривая 4 — числу квантов в фотопике. Отношение числа квантов, полностью потерявших энергию в кристалле («фотопик»), к числу всех квантов, излученных источником, мы называем далее фотоэффективностью.

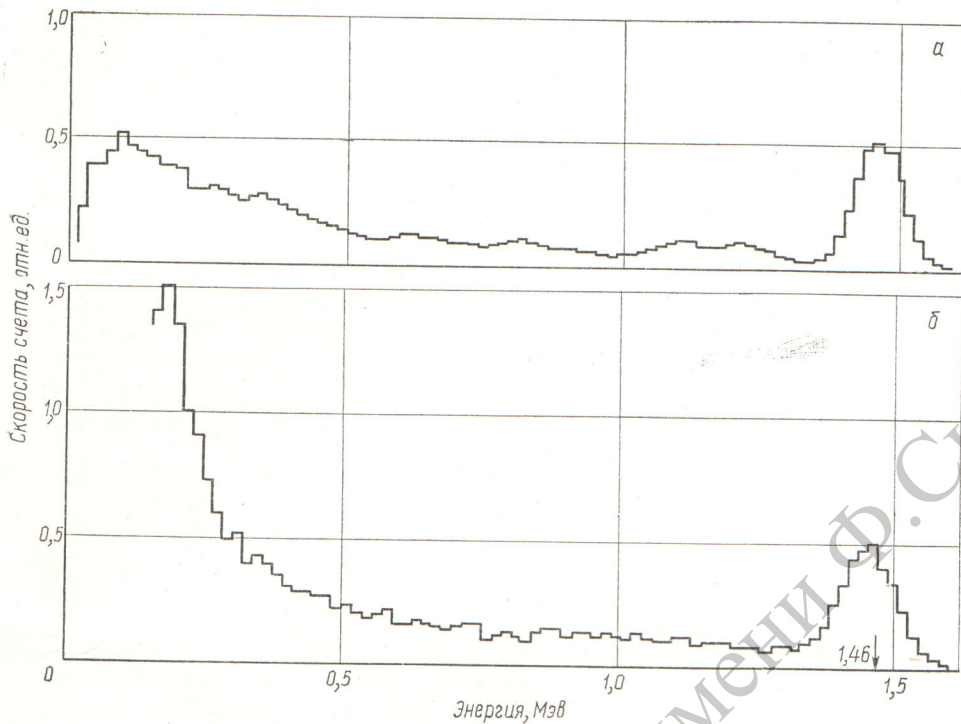
Величина площади фотопика связана с активностью  $\gamma$ -излучателей, содержащихся в теле человека; поэтому с помощью кривой 4 можно обосновать выбор местоположения кристаллов NaI(Tl) при определении содержания калия в организме человека. Очевидно, что в таких измерениях выгодно располагать кристалл в области максимума кривой. В тех случаях, когда  $\gamma$ -излучение  $K^{40}$  оказывается фоном, на котором регистрируется излучение другого изотопа, инкорпорированного в человека, кристалл следует смещать из области максимума кривой 4



к максимуму аналогичной кривой для  $\gamma$ -излучения измеряемого изотопа.

На рис. 2 типичный спектр, полученный нами расчетным путем для кристалла NaI диаметром 140 мм и высотой 100 мм, сопоставлен с экспериментальным, полученным над фантомом (позиция А на рис. 1), с помощью одиночного детектора СИЧ, описанного в работе [1]. В результате данного расчета (а) была введена обработка для учета ряда факторов, превращающих монолинию в гауссово распределение амплитуд импульсов на выходе детектора (б). Площадь мягкой части расчетного спектра (а) меньше аналогичной области спектра (б). Это связано с тем, что в расчете не учитывались  $\gamma$ -кванты, рассеянные конструктивными элементами спектрометра и защиты. В целом результаты сопоставления свидетельствуют о достаточно близком соответствии экспериментальных и расчетных данных.

Для цилиндрического кристалла NaI с диаметром 140 мм исследовались эффекты, связан-



Р и с. 2. Сопоставление расчетного и экспериментального спектров  $\gamma$ -излучения  $K^{40}$  для кристалла диаметром 140 мм и высотой 100 мм при измерении в положении А:

а — спектр, рассчитанный методом Монте-Карло, с учетом конечного энергетического разрешения спектрометра; б — экспериментально полученный спектр.

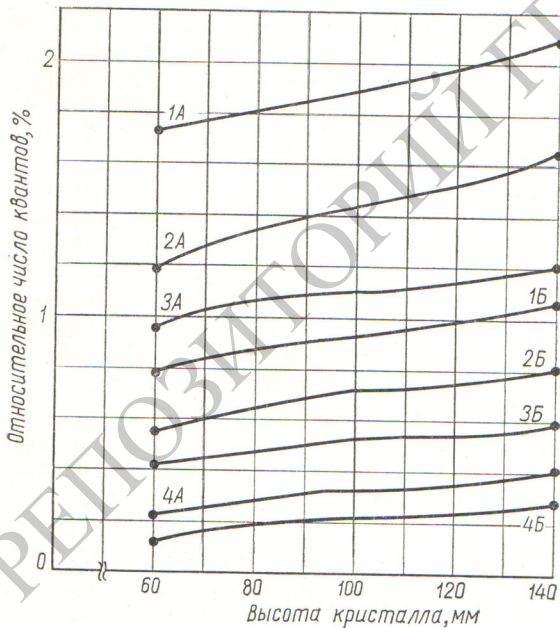
ные с изменением высоты кристалла в диапазоне 60—140 мм. На рис. 3 приведены резуль-

таты этих расчетов, сделанных для двух позиций кристалла над фантомом, отмеченных буквами А и В на рис. 1.

Увеличение высоты кристалла от 60 до 140 мм приводит к почти двукратному увеличению площади фотопика (кривая 4) при незначительном росте эффективности (~15% минимального значения).

Чем выше располагается кристалл над фантомом, тем меньше  $\gamma$ -квантов регистрируется. Количественные характеристики этого эффекта приведены на рис. 4. Резкое уменьшение числа регистрируемых квантов происходит вблизи поверхности фантома: при удалении кристалла примерно на 10 см от фантома интенсивность квантов снижается вдвое. Последние вычисления проведены для тех же двух позиций кристалла над фантомом.

Точность, с которой рассчитаны характеристики спектрометра, представленные на рис. 1, 3 и 4, находится в пределах 2—5% для кривых 1—3 и 5—9% для кривых 4. При этом лучшая статистическая точность соответствует тому диапазону параметров и тем геометрическим условиям, которые представляют практический интерес (участок вдоль фантома от 25 до 150 см, высота кристалла от 80 до 120 мм, расстояние детектора над фантомом от 15 до 25 см).



Р и с. 3. Зависимость физических характеристик спектрометра от высоты цилиндрического кристалла NaI(Tl) диаметром 140 мм для двух положений (А и В) детектора.

Обозначения те же, что на рис. 1.

На основании проведенных расчетов предложена схема расположения детекторов СИЧ для определения содержания изотопа  $K^{40}$  в теле человека. Согласно этой схеме над субъектом следует разместить два детектора: один — над грудью, другой — над бедрами на расстоянии 60–65 см от первого детектора. Оба детектора должны быть приподняты на 4–5 см от тела. Выбранные позиции детекторов приблизительно соответствуют расположению максимумов на зависимости площади фотопика от расположения детекторов над фантомом (см. рис. 1, кривая 4). Расстояние между осями кристаллов выбрано большим, чем расстояние между максимумами кривой 4, что позволяет избежать взаимной экранировки детекторов. Фотоэффективность такого двухкристалльного спектрометра составляет  $\sim 0,55–0,6\%$ . Располагая по такому же принципу еще пару детекторов под субъектом, можно удвоить фотоэффективность СИЧ. Эти величины соответствуют кристаллам высотой 100 мм; дальнейшее увеличение высоты кристаллов не дает существенного выигрыша в фотоэффективности спектрометра, хотя и требует больших материальных затрат.

Из ранее проведенных исследований известно, что в теле человека содержится от 1,50 до 2,00 г калия на 1 кг веса. При этом удельная активность  $K^{40}$  составляет около  $10^{-11}$  кюри/кг, изменяясь с возрастом (уменьшается каждые 10 лет примерно на 5%, начиная с юношеских лет [5]). Такой удельной активности соответствует значение  $\sim (250–300)$  имп/мин, зарегистрированное в фотопике суммарного спектра двумя кристаллами NaI диаметром 140 мм и высотой 100 мм, которые расположены по вышеуказанной схеме.

Для лучших отечественных низкофоновых кристаллов таких размеров в сочетании с бескалийными ФЭУ удается понизить  $\gamma$ -фон спектрометра до 6–8 имп/ч на 1 г сцинтиллятора при измерениях под стальной защитой толщиной 20 см [6], причем в области энергий 1,3–1,6 Мэв этому уровню соответствует фоновая скорость счета двухкристалльного спектрометра, равная 60–80 имп/мин.

Возможности аппаратуры для измерения малой активности зависят от уровня фона, эффективности регистрации, времени и допустимой ошибки измерений (см., например, [7]). Естественная активность  $K^{40}$  в теле человека при указанном уровне фона может быть измерена двухкристалльным спектрометром с достоверностью 0,98 за 30 мин, либо с достоверностью 0,95 за 5 мин, если расположение кри-

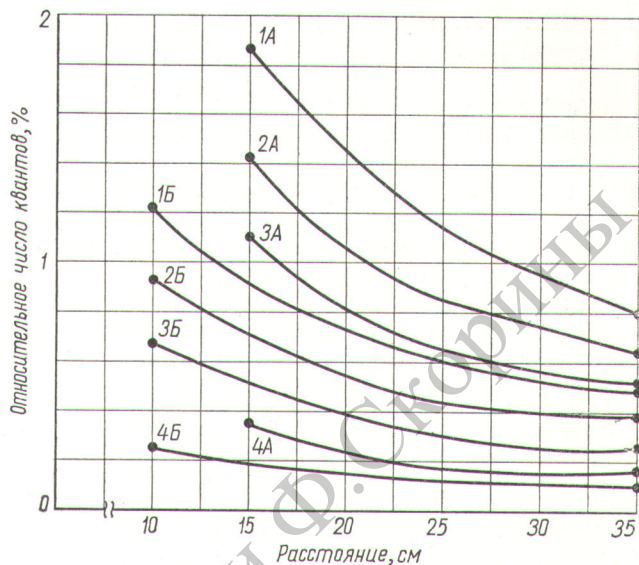


Рис. 4. Физические характеристики спектрометра в зависимости от расстояния между кристаллом NaI(Tl) диаметром 140 мм и высотой 100 мм и поверхностью фантома для двух положений (А и Б) детектора.

Обозначения те же, что на рис. 1 и 3.

сталлов соответствует вышеприведенной схеме. В случае спектрометра с четырьмя кристаллами достоверность 0,98 соответствует измерениям длительностью 20 мин и достоверность 0,95 соответствует 3 мин.

Поступила в Редакцию 2/IX 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Сивинцев и др. «Атомная энергия», 18, 141 (1965).
2. Рундо. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии» (Женева, 1958). Избр. докл. иностр. ученых. Т. 9. М., Атомиздат, 1959, стр. 212.
3. О. И. Лейпунский и др. Распространение гамма-квантов в веществе. М., Физматгиз, 1960.
4. Н. П. Бусленко и др. Метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло). М., Физматгиз, 1962.
5. Ю. В. Сивинцев. Фоновое облучение человеческого организма. М., Атомиздат, 1960.
6. Ю. В. Сивинцев и др. «Атомная энергия», 22, 60 (1967).
7. В. А. Дементьев. Измерение малых активностей радиоактивных препаратов. М., Атомиздат, 1967.