

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



1/11-75

P6 - 9073

B-926

4634/2-75

Ц.Вылов, Л.А.Вылова, Н.А.Головков, Б.П.Осипенко,  
М.И.Фоминых, В.Г.Чумин, В.С.Александров,  
В.М.Горожанкин, Ш.Оманов

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ  
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ  
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

3. Спектрометрия гамма-лучей

**1975**

Р6 - 9073

Ц.Вылов, Л.А.Вылова, Н.А.Головков, Б.П.Осипенко,  
М.И.Фоминых, В.Г.Чумин, В.С.Александров,<sup>1</sup>  
В.М.Горожанкин,<sup>2</sup> Ш.Оманов<sup>3</sup>

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ  
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ  
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
3. Спектрометрия гамма-лучей

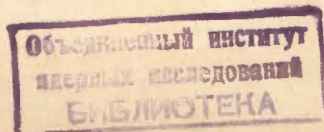
Направлено в сб. "Прикладная ядерная спектроскопия"

---

<sup>1</sup> ВНИИМ им. Д.И.Менделеева

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет

<sup>3</sup> Самаркандский государственный университет



Процедура построения сложных схем возбужденных состояний атомных ядер требует, в первую очередь, измерения энергий  $E$  и интенсивностей  $I$  гамма-лучей с возможно меньшей погрешностью. Усовершенствование технологии изготовления ППД /1/, а также широкое применение ЭВМ для обработок спектральных линий позволяет определить положение максимума пика  $P$  с погрешностью до  $\sim 10^{-3}$  канала /в энергетических единицах порядка нескольких эВ/ и площадь пика  $S$  с погрешностью  $\sim 0,3\%$  /2/. Однако достоверность сопоставления  $P-E$  и  $S-I$  связана с моделью вычислительной процедуры, с качествами применяемых нормалей энергий и интенсивностей гамма-лучей, а также с методами учета эффектов /2/, искажающих форму аппаратурного спектра.

Целью настоящей работы является описание методики измерения энергий и интенсивностей гамма-лучей с минимальной погрешностью. Методика рассчитана на проведение 3-5 серий измерений, что отвечает реальным экспериментальным условиям.

## ***1. НОРМАЛИ ЭНЕРГИЙ ГАММА-ЛУЧЕЙ***

### ***1. Рентгеновская спектроскопия***

В качестве нормали 1-го порядка в рентгеновской спектроскопии применяют длину волны рентгеновской линии  $K_{\alpha_1}$  (W) /3/;

$$\lambda_{W K_{\alpha_1}} = 0,2090100 \text{ \AA}^* .$$

Тогда с учетом переводного множителя напряжение - длина волны /3/- табл. 35/

$$E\lambda = hc/e = 12398,301 /73/ \text{ эВ } \text{Å}^*$$

имеем

$$EWK_{\alpha 1} = 59,31918 /26/ \text{ кэВ.}$$

Значение  $EWK_{\alpha 1}$  можно получить и путем непосредственного сравнения величины  $\lambda WK_{\alpha 1}$  с оптическими нормальными. Тогда /4/

$$EWK_{\alpha 1} = 59,31881 /22/ \text{ кэВ.}$$

С учетом  $\lambda WK_{\alpha 1}$  и более раннего значения  $E\lambda = 12398,10 /13/ \text{ эВ } \text{Å}$  рассчитаны длины волн многих рентгеновских линий /5/, а затем и энергии атомных уровней /6/. Эти значения применяются при определении энергии гамма-квантов по спектрам конверсионных и фото-электронов.

## 2. Ядерная спектроскопия

Единственной естественной нормалью энергии гамма-излучения, значение которой полностью определяется фундаментальными постоянными, является энергия аннигиляционного излучения /3/:

$$m_e c^2 = 511,0041 /16/ \text{ кэВ.}$$

Тогда энергия аннигиляции покоящегося позитрония с учетом половины энергии связи состояния  $^1S_0$  равна:

$$\gamma^\pm = h\nu^\pm = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{8h^2} = 511,0007 /16/ \text{ кэВ.}$$

К сожалению, использование этой величины затруднено из-за сложной формы спектральной линии /4/, что устанавливает предел максимально достижимой точности. Поэтому в качестве энергетической нормали 2-го порядка, форма спектральной линии которой не зависит от вторичных эффектов, выбран  $\gamma$ -переход 411,8 кэВ в  $^{198}\text{Hg}$  /об аргументах выбора см., например, /4/ /. Точное значение энергии этого перехода /8/

$$E_{\gamma/411,8/} = 411,794 /7/ \text{ кэВ.}$$

определено с помощью безжелезного бета-спектрометра / $\rho = 100 \text{ см/}$  при сравнении  $L_{III}$ -линии фотоэлектронов внешней конверсии гамма-излучения  $\gamma_{411,8}$  и K-линии  $\gamma^\pm$  в урановом радиаторе /7/.

## 3. Сравнение нормалей 1-го порядка

Сходимость нормалей 1-го порядка можно проверить как непосредственным сравнением энергии одной нормали с другой, так и сравнением энергии нормали 2-го порядка, определенной в шкалах нормалей первого порядка. Такой анализ проводился неоднократно /4,8,9/ и результаты говорят о хорошей сходимости нормалей /8/. При этом, однако, нужно помнить следующее:

А. Самое точное измерение энергии  $\gamma_{411,8}$  основано на сравнении с "узким" компонентом аннигиляционного излучения, а экспериментального доказательства принадлежности этого компонента покоящемуся позитронии нет /7/;

Б. Нужно с осторожностью относиться к данным, полученным при сравнении энергий  $\gamma$ -лучей с  $EWK_{\alpha 1}$ . Показано, /10/ что рентгеновское излучение W, испускаемое после  $\beta$ -распада  $^{182}\text{Ta}$ , сдвинуто на  $1,8 \pm 0,5 \text{ эВ}$  относительно "нормального" /естественная изотопная смесь/ рентгеновского излучения W.

Сходимость нормалей 1-го порядка можно проверить и путем сравнения энергий гамма-лучей, определенных при прямом сравнении с нормальными 1 и 2 порядков /нормали 3 порядка/. С помощью нормалей 3 порядка получены энергии ряда переходов /энергетические реперы/, значения которых применяются при измерении энергии гамма-лучей.

## 4. Выбор энергетических реперов

Методика измерения энергии гамма-лучей с помощью ППД основана на сравнении положений максимумов спектральных линий с положениями нормалей и реперов /для краткости далее будем применять понятие реперы/. Наи-

более полным набором реперов в предположении  $\gamma_{411,8} = 411,794(7)$  для энергетической области радиоактивных нуклидов /30-3600 кэВ/ являются данные Хельмера, Гринвуда и Герке, которые приведены в /12/ - табл. 1. Отличие некоторых других рекомендованных реперов от приведенных в табл. 1 показано на рис. 1. В области до 1000 кэВ все реперы согласуются в пределах ошибок. В области же выше 1000 кэВ видна ярко выраженная систематическая расходимость до 0,3 кэВ /при погрешности 0,05 - 0,08 кэВ/. Внутренняя согласованность данных табл. 1 подтверждается сходимостью каскадных и прямых переходов, полученной как в работе /12/, так и в наших измерениях.

## II. НОРМАЛИ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ $\gamma$ -ЛУЧЕЙ

В настоящее время имеется целый ряд нуклидов, активность /A/ которых в силу простоты схемы распада можно измерить различными методами с погрешностью 1-3% /табл. 1/. Эти данные чаще всего используются для измерения экспериментальной зависимости эффективности гамма-спектрометра в заданной геометрии /13/. Кроме того, при исследовании эффективности спектрометра используют относительные интенсивности гамма-лучей, возникающих при распаде  $^{182}\text{Ta}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  и  $^{56}\text{Co}$  /табл. 1/ /применяются данные с указанными ошибками/. Заметим, что вопрос использования значений относительных интенсивностей из различных литературных источников является сложным, и это иллюстрирует рис.2 /в качестве базиса используются данные /12/, которые получены в заранее выбранных условиях для сравниваемых нуклидов/. Видно, что:

а/ разброс точек находится в пределах  $\pm 5\%$  и этот факт согласуется с приведенными ошибками;

б/ наши данные /14/ о  $^{152}\text{Eu}$  /калибровка ППД проводилась с помощью ОСГИ/ хорошо согласуется с данными /12/, и систематический сдвиг - 2% - связан, по-видимому, со значением интенсивности нормировочных пиков 122, 344 кэВ/;

в/ расходимость в  $I_{\gamma}$  /14/ для переходов 186 и 295 кэВ  $^{226}\text{Ra}$  связана с условиями измерений в /12/, где, по-видимому, не выполнялись условия равновесия дочерних продуктов;

г/ нужно отметить плохую сходимость результатов при исследовании эффективности Ge(Li)-детекторов с помощью данных /15/ /на рис. 2 данные не приведены/.

## III. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Методика измерений энергий гамма-лучей с помощью ППД основана на сравнении с энергетическими реперами. При этом отличают два подхода в разработке программ калибровок с помощью ЭВМ: в первом случае зависимость  $E_{\gamma}$  от номера канала для всего спектра описывается полиномом степени  $n$ :

$$E_{\gamma} = \sum_{i=0}^n A(i) p^i ;$$

во втором случае эта же зависимость описывается на ограниченном участке спектра /метод сплайнов /16//. Следовательно, оба подхода требуют примешивания большого числа реперных пиков в исследуемый спектр, что практически невозможно в ядерноспектроскопических экспериментах из-за больших искажений аппаратного спектра /2/.

Разработанная нами методика предполагает использование только 6 энергетических реперов. При этом необходимо предварительное исследование нелинейности и эффективности спектрометра в заранее выбранных условиях /коэффициенты усиления; телесные углы; поглощающие фильтры; эффекты, искажающие форму аппаратного спектра /2// и аппроксимирование их аналитическими выражениями. В частном случае, когда сложность спектра позволяет примешивание большого количества реперов, метод переходит в один из вышеуказанных подходов.

## 1. Нелинейность спектрометра /2/

Нелинейность спектрометра исследуется в предположении, что два произвольных /"опорных"/ пика разных энергий лежат на прямой, коэффициенты  $B(1)$  и  $B(2)$  которой находятся из уравнения:

$$E = B(1) + B(2) p \quad B(1) = \frac{E_1 p_2 - E_2 p_1}{p_2 - p_1} \quad B(2) = \frac{E_1 - E_2}{p_1 - p_2} \quad /1/$$

Затем по этому уравнению рассчитываются положения максимумов пиков с известной энергией и строится зависимость  $\delta = p - p_{расч.}$  от номера канала  $K$ .

Процедура построения и аппроксимации кривой нелинейности показана на *рис. 3* и состоит в следующем. Для каждого режима выбраны постоянные "опорные" пики и измерения проводятся с помощью различных реперов, указанных в *табл. 1*. Программа предусматривает проведение нескольких серий измерений, причем суммарное количество пиков во всех сериях  $\leq 500$ . Экспериментальные точки аппроксимируются полиномом /веса точек в расчетах приняты одинаковыми/:

$$\delta_j = \sum_{i=1}^M A(i) p_j^{i-1}, \quad /2/$$

где  $M = 2 \div 5$ . Оптимальное значение  $M$  на данном участке выбирается по анализу значений

$$\Delta_j = \delta_{эксп.}(p_j) - \delta_{расч.}(p_j).$$

Число участков для аппроксимации всей кривой нелинейности  $\leq 5$ .

В качестве примера на *рис. 4* показана построенная кривая нелинейности для спектрометра с  $Ge(Li)$  - детектором /диапазон 30 - 1100 кэВ; опорные точки - 122 кэВ -  $^{57}Co$  и 834 кэВ -  $^{54}Mn$  / и области ее аппроксимации.

## 2. Эффективность спектрометра

### А. Абсолютная эффективность

Эффективность спектрометра строится с помощью абсолютно-калиброванных источников в стандартной /заранее выбранной /2/ / геометрии. При этом приняты меры для уменьшения возможной ошибки из-за методики измерения: погрешность геометрической воспроизводимости условий измерений доведена до величины  $\sim 0,1\%$ ; учет мертвого времени системы ведется с применением таймерной системы TRIDAC-C, время набора выбирается с учетом требования получения минимального значения  $\Delta S/S^{1/2}$ ; все измерения проводятся в течение времени  $< T_{1/2}$ . Аттестация абсолютной активности стандартного набора ОСГИ с высокой точностью проведена во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

Процедура построения кривой эффективности показана на *рис. 5* и состоит в следующем. Для выбранных условий измерений /телесный угол и фильтр поглощения/ рассчитываются значения абсолютной эффективности

$$\epsilon_{абс} = \frac{S/\tau}{I e^{-\lambda t}}, \quad /3/$$

где  $S$  - площадь пика данной энергии;  $\tau$  - время измерения /с/;  $I$  - число  $\gamma$ -квантов данной энергии в  $4\pi$  за 1 с;  $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$  - вероятность радиоактивного распада /1/дн/;  $t$  - время, прошедшее от момента аттестации до момента измерения /дн/. Количество калибровочных пиков  $\leq 70$ . Контроль качества каждой измеренной точки  $\epsilon_{абс}$  ведется по анализу величины:

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \left\{ \left( \frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left( \frac{\Delta S}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 + \left( \frac{0,693 \Delta t}{T_{1/2}} \right)^2 + \left( \frac{0,693 \cdot t \cdot \Delta T_{1/2}}{T_{1/2}^2} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad /4/$$

Здесь все значения даны в %.

## Б. Относительная эффективность

В некоторых задачах эффективность спектрометра исследуют с помощью относительных интенсивностей  $\gamma$ -лучей ряда изотопов /табл. 1/. При этом разделяют два подхода: связь с абсолютными точками  $\epsilon_{\text{абс}}$  и связь с базовыми точками некоторого нуклида. В последнем случае в левую ветвь блок-схемы программы /рис. 5/ вводятся данные выбранного нуклида /например,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{160}\text{Tb}$  и др./.

Процедура построения кривой эффективности состоит в следующем. Для каждого нуклида рассчитываются значения:

$$\epsilon_{\text{отн}} = S / I \quad /5/$$

и с помощью нормировочного множителя  $\bar{q}$  переводятся в абсолютные /или базовые/ значения. Величина  $q$  определяется следующим образом: с помощью программы интерполяции параболы по трем ближайшим точкам  $\epsilon_{\text{абс}}$  для тех пиков, энергия которых удовлетворяет условию

$$E_{\text{абс, min}} < E < E_{\text{абс, max}}, \text{ рассчитываются значения } q_i = \frac{\epsilon_{\text{абс, i}}}{\epsilon_{\text{отн, i}}};$$

полученные значения  $q_i$  усредняются:  $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$ , где

$n$  - число найденных точек. После расчетов всех серий значения  $\epsilon$  выстраиваются в порядке возрастания энергии для последующей обработки. Суммарное количество пиков во всех сериях  $\leq 350$ .

## В. Аппроксимация кривой эффективности

Процедура аппроксимации кривой эффективности аналогична описанной для нелинейности и проводится с помощью полинома:

$$\ln \epsilon_j = \sum_{i=1}^M C(i) \ln E_j^{i-1}, \quad /6/$$

где  $M = 2 \div 5$ . Оптимальное значение  $M$  на данном участке выбирается по анализу значений

$$\Delta [\%] = \frac{\epsilon_{\text{абс}} - \epsilon_{\text{расч}}}{\epsilon_{\text{абс}}} \cdot E_i$$

Число участков для аппроксимации всей кривой эффективности  $\leq 5$ .

В качестве примера на рис. 6 показана построенная кривая эффективности для  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора /37 см<sup>2</sup>/, а также области аппроксимации.

## IV. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОДИНОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ

Блок-схема программы обработки одиночного измерения приведена на рис. 7. После учета нелинейности спектрометра /коррекция  $p_i \rightarrow p'_i$  /, по МНК производится расчет коэффициентов  $B$  калибровочной прямой

$$E_i = B(1) + B(2) p'_i \quad /7/$$

с помощью данных для 6 реперных линий. В качестве весов используются величины  $(\Delta E_i^2 + [B(2) \Delta p_i]^2)^{-1}$ . Ошибка одиночного измерения энергии гамма-перехода рассчитывается по формуле:

$$\Delta E_i = \{ [\Delta B(1)]^2 + [\Delta B(2)]^2 p_i^2 + r p_i + [B(2) \Delta p_i]^2 \}^{1/2}, \quad /8/$$

в которой 3 первых члена определяют коридор ошибок при проведении калибровочной прямой /  $r p_i$  - корреляционный член/, а четвертый - погрешностью определения положения максимума пика.

Контроль качества эксперимента ведется по анализу  $\Delta E_i = E_i - E_{i \text{ расч}}$ , где  $E_{i \text{ расч}}$  - полученное в результате калибровки значение энергии реперного пика;  $E_i$  - вводимое значение энергии реперного пика.

Относительные интенсивности гамма-лучей и их ошибки вычисляются по формулам:

$$I_i = \frac{S_i}{\epsilon_i} \frac{I_H}{S_H / \epsilon_H}; \quad \Delta I_i = I_i \sqrt{\left(\frac{\Delta S_i}{S_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_H}{S_H}\right)^2}, \quad /9/$$

где  $\epsilon_i$  - эффективность спектрометра для  $\gamma$ -лучей с энергией  $E_i$ ;  $I_N$  и  $S_N$  - интенсивность и площадь пика, выбранного в качестве нормировочного;  $S_i$  - площадь калибруемого пика.

В результате обработки на АЦПУ выводятся значения  $P_i$ ;  $\Delta P_i$ ;  $\delta_i$  расч;  $S_i$ ;  $\Delta S_i$ ;  $\epsilon$  расч;  $E_i$ ;  $\Delta E_i$ ;  $I_i$ ;  $\Delta I_i$ ;  $\sigma_i = 2,354 \sigma_{i, B(2)}$ . Пример обработки спектра  $\gamma$ -лучей при распаде  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{110m}\text{Ag}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{207}\text{Bi}$  и набора источников ОСГИ /рис. 8/ приведен в табл. II. Заметим следующее:

а/ для наглядности приведены данные, относящиеся к изотопам ОСГИ,  $^{56}\text{Co}$  и  $^{110m}\text{Ag}$ ;

б/ колонки 2-6 - данные об энергиях, полученные при обработке с различными наборами 6 реперов из ОСГИ /использованные реперы помечены крестиками/; А - данные с использованием кривой нелинейности, построенной только по точкам ОСГИ /14 точек/; Б - данные с использованием кривой нелинейности, проведенной через 62 точки, сведения о которых приведены в табл. I;

в/ характерные коэффициенты аппроксимированных кривых нелинейности и эффективности /кривые аппроксимированы одним участком/

случай А	A(1)=3,524673	C(1)=-9,453329	B(1)=-2,668707
	A(2)=-8,236195	C(2)=6,572416	$\Delta B(1)=2,083 \cdot 10^{-3}$
	A(3)=5,694439	C(3)=-3,433892	B(2)=0,5157484
	A(4)=-1,320537	C(4)=0,6472691	$\Delta B(2)=1,0265 \cdot 10^{-6}$
	A(5)=0,08233769	C(5)=-0,0440858	B(2)=1,0265 $\cdot 10^{-6}$
	для колонки /2А/		

случай Б	A(1)=3,530652		B(1)=-2,668547
	A(2)=-8,254420	- " -	$\Delta B(1)=3,5383 \cdot 10^{-3}$
	A(3)=5,653887		B(2)=0,5157438
	A(4)=-1,281474		$\Delta B(2)=1,7432 \cdot 10^{-6}$
	A(5)=0,0745985		/для колонки /2Б/

#### IV. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты одиночных измерений на различных ППД, спектрометрических трактах и при различных коэффициентах усиления обрабатываются по следующим формулам:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \left(\frac{1}{\Delta E_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta E_i}\right)^2} + E_0 \quad I = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \left(\frac{1}{\Delta I_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta E_i}\right)^2}$$

$$\Delta E_1 = \{ a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \}^{1/2}$$

$$\Delta E_2 = \{ a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 \}^{1/2}$$

$$\Delta I_1 = \{ \beta_1^2 + \beta_3^2 \}^{1/2}$$

$$\Delta I_2 = \{ \beta_2^2 + \beta_3^2 \}^{1/2}$$

/10/

$$a_1^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/\Delta E_i)^2} \quad a_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta E_i}\right)^2 (E - E_i)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta E_i}\right)^2}$$

$$a_3^2 = \rho^2 E^2$$

$$a_4^2 = \mu^2 E^2$$



$$\beta_1^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/\Delta I_i)^2} \quad \beta_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta I_i}\right)^2 (I - I_i)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta I_i}\right)^2}$$

$$\beta_3 = \kappa^2 I^2,$$

где  $n$  - число измерений; энергия  $E$  дается в /кэВ/;  $\alpha_3$  - погрешность, связанная с погрешностью применяемых энергетических реперов в предположении  $E(411,8) = 411,794 \pm 0,000$  кэВ /в частности, для энергетических реперов, приведенных в табл. I -  $\rho = 10 \cdot 10^{-6}$  /;  $\alpha_4$  - погрешность, связанная с погрешностью нормали второго порядка  $E_\gamma(411,8) = 411,794 \pm 0,007$  кэВ / $\mu = 17 \cdot 10^{-6}$  /;  $\beta_3$  - погрешность, связанная с погрешностью измерения эффективности спектрометра;  $E_0$  - поправка на отдачу свободного неподвижного нуклида  $M(A, Z)$  после высвечивания  $\gamma$ -кванта с энергией  $E$ :

$$E_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{E}{m_e c^2} \right)^2 \frac{m_e}{M(A, Z)} m_e c^2.$$

Поправка на величину  $E_0$  существенна при использовании правила Ритца в построении схем возбужденных состояний радиоактивных нуклидов.

Программа обработки результатов измерений действует следующим образом:

а/ на вход ЭВМ поступают массивы  $E$ ,  $\Delta E$ ,  $I$  и  $\Delta I$ , полученные в результате обработки одиночных измерений /число пиков  $\leq 500$ /;

б/ массивы входных данных выстраиваются в порядке возрастания  $E_i$ ;

в/ проводится последовательный отбор энергий, значения которых совпадают в пределах погрешности /число пиков  $\leq 120$ /;

г/ отобранные значения  $E_i$  обрабатываются по формулам /10/;

д/ на АЦПУ печатаются как входные данные, так и рассчитанные значения;

е/ для дальнейшей обработки на перфоратор выводятся массивы  $E \pm \Delta E$  и  $I \pm \Delta I$  /среди значений  $\Delta E$  и  $\Delta I$  берутся большие из полученных по формулам /10//.

В качестве примера в табл. II /колонка 1/ приведены результаты обработки данных с помощью описанной программы. Заметим, что:

а/ применение формул /10/ в этом случае некорректно /разные реперные пики, но одно измерение/, однако данные иллюстрируют хорошую сходимость результатов обработок с различными комбинациями 6 реперов между собой;

б/ в качестве ошибки взята большая из  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_2$  /формула /10// - основной вклад в приведенные ошибки вносит систематическая погрешность первичных реперов;

в/ в области  $E_\gamma > 1836$  кэВ/см.  $^{56}\text{Co}$  /наблюдается расходимость данных в  $E_\gamma$ , что связано с исследованием линейности спектрометра только с помощью ОСГИ - колонка А; при использовании же всех данных табл. I эта расходимость исчезает - колонка Б;

г/ колонка  $I_\gamma$  /табл. I/ и  $I_{\text{расч}}$  демонстрируют сходимость результатов определения интенсивностей  $\gamma$ -лучей /в расчетах принималось  $\kappa = 2,5\%$ /.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ спектрометрической системы с ППД<sup>1/</sup>, выбраны оптимальные условия работы<sup>2/</sup>, отработана методика с широким применением ЭВМ для измерения энергий и интенсивностей  $\gamma$ -лучей /программы калибровок написаны на языке "ФОРТРАН"/. Приведены данные об энергетических реперах и некоторых относительных интенсивностях  $\gamma$ -лучей, которые по мнению авторов являются наиболее достоверными в настоящий момент. При исследованных условиях погрешность определения энергий может достигать 10-30 эВ, а погрешность определения интенсивностей -  $\pm 2\%$ .

Таблица I  
Энергии и интенсивности гамма-лучей, применяемых для  
калибровочных измерений спектров гамма-лучей  
с помощью ПИД

Ист.	T <sub>1,2</sub>		ΔA%	Принятые значения			
	T <sub>1,2</sub>	Л-ра		E <sub>γ</sub> [кэВ]	Л-ра	I <sub>γ</sub>	Л-ра
I	2	3	4	5	6	7	8
<sup>241</sup> Am	432,9(8) л	I	-	3,3 K <sub>x</sub>	-	6,35(60)	4
			-	11,9 L <sub>x</sub>	-	0,86(3)	5
			-	13,9 L <sub>u</sub>	-	13,20(35)	5
			-	17,8 L <sub>μ</sub>	-	19,25(60)	5
			-	20,8 L <sub>ν</sub>	-	4,85(20)	5
			1	26,345(I)	2	2,4(I)	5
<sup>57</sup> Co	269,8(4) д	6	-	6,46 K <sub>x</sub>	-	55,3(15)	4
			-	14,408(5)	7	9,5(2)	4
			1	122,063(4)	3	85,6(4)	4
			1	136,473(4)	3	10,75(30)	4
<sup>139</sup> Ce	137,2(4) д	6	1,5	165,853(7)	3	80,35(8)	8
<sup>203</sup> Hg	46,76(8) д	6	-	10,3 L <sub>x</sub>	-	5,63(50)	9
			-	72,9 K <sub>u</sub>	-	9,77(50)	4
			-	82,5 K <sub>μ</sub>	-	2,73(20)	4
			1,5	279,188(6)	3	81,55(15)	4
<sup>113</sup> Sn	115,2(8) д	6	-	3,3 L <sub>x</sub>	-	13,5(1)	9
			-	24,7 K <sub>x</sub>	-	96,6(3)	9
			1,5	391,688(10)	3	64,4(3)	9
<sup>137</sup> Cs	30,18(10) л	6	-	4,5 L <sub>x</sub>	-	1,25(1)	9
			-	32,1 K <sub>u</sub>	-	5,67(18)	4
			-	36,5 K <sub>μ</sub>	-	1,34(5)	4
			1	661,638(19)	3	85,1(5)	4
<sup>54</sup> Mn	312,5(3) д	I	-	5,5 K <sub>x</sub>	-	25,0(2)	4
			0,5	834,827(21)	3	100	4
<sup>88</sup> Y	107,4(8) д	I	-	14,4 K <sub>x</sub>	-	63,40(32)	4
			1,5	898,021(19)	3	91,40(7)	4
			1,5	1836,014(37)	3	99,40(7)	4

I	2	3	4	5	6	7	8
<sup>60</sup> Co	5,275(5) л	I	0,5	1173,208(25)	3	99,74(5)	4
			0,5	1332,464(28)	3	99,85(3)	4
<sup>22</sup> Na	2,602(5) л	I	1	1274,511(28)	3	99,95(2)	4
<sup>65</sup> Zn	245,7(11) д	10	-	8,1 K <sub>x</sub>	-	35,2(3)	9
			1	1115,518(25)	3	50,6(4)	9
<sup>207</sup> Pb	30,2 л	II	-	569,689(13)	3	100	3
			-	1063,635(24)	3	77,0	3
			-	1770,188(37)	3	7,39	3
<sup>144</sup> Ce	284,4 л	I2	-	133,53	3	804	3
			-	696,492(19)	3	100	3
			-	1489,124(32)	3	21,4	3
			-	2185,608(46)	3	57,0	3
<sup>182</sup> Ta	115,0(2) д	6	-	31,737(1)	I2	-	-
			-	42,714(1)	I2	-	-
			-	67,750(1)	3	125,1	3
			-	84,680(2)	3	7,56	3
			-	100,105(1)	3	40,2(10)	3
			-	113,673(2)	3	4,92	3
			-	116,418(2)	3	1,13	3
			-	152,434(2)	3	20,5(5)	I3
			-	156,387(2)	3	7,6(2)	I3
			-	179,393(3)	3	8,8(3)	I3
			-	198,356(4)	3	4,25	3
			-	222,110(3)	3	21,30(55)	I3
			-	229,322(6)	3	10,3(3)	I3
			-	264,072(6)	3	10,1(3)	I3
			-	927,6	-	1,88	3
-	1001,6	-	6,68	3			
-	1113,1	-	1,04	3			
-	1121,272(26)	3	100	I3			
-	1157,4	-	2,78	3			
-	1189,022(27)	3	46,5(7)	I3			
-	1221,376(27)	3	77,3(12)	I3			
-	1230,989(28)	3	32,8(5)	I3			

I	2	3	4	5	6	7	8
			-	I257,390(28)	3	4,38	3
			-	I273,703(28)	3	1,86	3
			-	I289,126(29)	3	4,05	3
			-	I342,7	-	0,76	3
			-	I373,8	-	0,64	3
			-	I387,4	-	0,19	3
I <sup>92</sup> Ir	74,02(18) <sub>n</sub>	I4	-	I36,340(3)	I2	0,22	3
			-	201,28	3	0,55	3
			-	205,77	3	3,86	3
			-	295,949(6)	3	34,64	3
			-	308,445(7)	3	35,77	3
			-	316,497(7)	3	100	3
			-	374,47	3	0,88	3
			-	416,450(8)	I2	0,80	3
			-	468,062(10)	3	58,0	3
			-	484,570(11)	3	3,81	3
			-	489,06	3	0,48	3
			-	588,572(12)	3	5,52	3
			-	604,401(12)	3	10,04	3
			-	612,450(13)	3	6,55	3
			-	884,523(18)	3	0,36	3
			-	1061,48	3	0,07	3
I <sup>10m</sup> Ag	255,0(8) <sub>n</sub>	I0	-	446,791(10)	3	3,6(2)	I5
			-	620,342(16)	3	2,9(1)	I5
			-	657,744(17)	3	100	I5
			-	677,601(18)	3	12,0(4)	I5
			-	686,998(19)	3	7,3(4)	I5
			-	706,669(20)	3	17,3(5)	I5
			-	744,254(20)	3	4,65(20)	I5
			-	763,928(19)	3	23,8(6)	I5
			-	818,018(22)	3	7,7(3)	I5
			-	884,667(18)	3	78,9(15)	I5
			-	937,483(20)	3	36,2(8)	I5
			-	1384,267(29)	3	27,6(6)	I5
			-	1475,757(34)	3	4,47(15)	I5
			-	1505,006(32)	3	14,7(3)	I5
			-	1562,264(33)	3	1,31(6)	I5

I	2	3	4	5	6	7	8
I <sup>133</sup> Ba	10,9(I) <sub>n</sub>	6	-	30,8 K <sub>α</sub>	-	-	-
			-	35,3 K <sub>β</sub>	-	-	-
			-	53,12	-	3,2	I6
			-	79,6	-	3,7(4)	I6
			-	80,998(8)	3	56,1(57)	I6
			-	160,59	-	1,4(2)	I6
			-	223,22	-	0,66(2)	I6
			-	276,397(12)	3	11,35(25)	I6
			-	302,851(15)	3	29,4(6)	I6
			-	356,005(17)	3	100	I6
			-	383,851(20)	3	14,3(3)	I6
I <sup>160</sup> Tb	72,3 <sub>n</sub>	3	-	86,786(2)	3	46,80	3
			-	197,030(4)	3	17,20	3
			-	215,641(4)	3	13,05	3
			-	298,572(6)	3	88,89	3
			-	309,56	3	2,73	3
			-	337,35	3	1,14	3
			-	392,49	3	4,34	3
			-	765,26	3	6,63	3
			-	879,364(18)	3	100	3
			-	962,295(20)	3	35,37	3
			-	966,151(20)	3	84,80	3
			-	1002,87	3	3,47	3
			-	1115,12	3	5,05	3
			-	1177,934(24)	3	52,1	3
			-	1199,90	3	8,28	3
			-	1271,850(26)	3	26,0	3
			-	1312,16	3	9,99	3
I <sup>56</sup> Co	78,76(12) <sub>n</sub>	6	-	787,84	3	0,33(3)	I5
			-	846,751(19)	3	100	I7
			-	977,41	3	1,440(15)	I7
			-	1037,815(22)	3	14,00(10)	I7
			-	1175,067(26)	3	2,280(20)	I7
			-	1238,256(27)	3	67,60(40)	I7
			-	1360,175(29)	3	4,330(40)	I7
			-	1771,303(37)	3	15,70(15)	I7
			-	1963,669(40)	3	0,710	3
			-	2015,133(40)	3	3,080(30)	I7

1	2	3	4	5	6	7	8
-	-	-	2034,706(41)	3	7,890(70)	17	17
-	-	-	2113,049(45)	3	0,37	3	3
-	-	-	2212,862(49)	3	0,38	3	3
-	-	-	2598,400(53)	3	16,90(15)	17	17
-	-	-	3201,879(64)	3	3,040(30)	17	17
-	-	-	3253,341(65)	3	7,410(65)	17	17
-	-	-	3272,912(65)	3	1,750(20)	17	17
-	-	-	3451,064(69)	3	0,875(10)	17	17

1. L.J.Jardine. Nucl. Instr. and Meth. 96 (1971) 259.
2. G.C.Nelson and B.G.Saunders. Nucl. Instr. and Meth. 84 (1970) 90.
3. R.L.Neeth. "Gamma-ray spectrum catalogue"; 3-edition, v. 2, ANCR-1000-2, 1974.
4. J.S.Hansen et al. Nucl. Instr. and Meth. 106 (1973) 365.
5. J.L.Sampbell and L.A.Mellev. Nucl. Instr. and Meth. 117 (1974) 519.
6. J.F.Emergy et al. Nucl. Science and engineering. 48 (1972) 319.
7. J.Konijn and W.A.Lindeman. Nucl. Instr. and Meth. 94 (1971) 389.
8. J.Legrand. Nucl. Instr. and Meth. 112 (1973) 101.
9. M.J.Martin and P.H.Vichert-Toft. Nucl. Data Tables. 48 (1970).
10. H.T.Easterday, R.L.Smith. Nucl. Phys. 20 (1960) 155.
11. G.Narboffle, J.Inorg. Nucl. Chem. 12, 6 (1959).
12. W.Beer and J.Kern. Nucl. Instr. and Meth. 117 (1974) 183.
13. L.J.Jardine. Nucl. Instr. 96 (1971) 259, DLB - 246 (1971).
14. M.R.Schmoger. Nucl. Data Sheets. 9 (1973) 195.
15. J.Kern. Proc. Panel Meeting Charged-particle-induced radiative capture (IAEA, Vienna, 1972).
16. J.Legrand. Nucl. Instr. and Meth. 112 (1973) 229.
17. D.C.Samp, G.L.Meredith. Nucl. Phys. A166 (1971) 349.

Таблица II  
 Данные обработки экспериментального спектра гамма-лучей /рис. 8/ с помощью программы калибровок /рис. 7/, объяснения в тексте

E (табл. I)	1		2		3		4		5		6		I (табл. I)	I (расч.)
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
							I10 <sub>Ag</sub>							
446,791(10)	793(10)	799(10)	788(25)	794(27)	794(24)	799(28)	792(28)	798(33)	789(28)	795(28)	801(26)	809(28)	3,6(2)	3,67(10)
657,744(17)	742(12)	749(12)	737(7)	743(10)	743(6)	748(11)	741(11)	748(17)	739(11)	748(11)	747(8)	758(11)	100	100
677,601(18)	596(12)	604(13)	592(12)	598(14)	598(10)	603(16)	596(16)	603(19)	594(15)	603(16)	601(13)	612(15)	12,0(4)	11,46(29)
686,998(19)	990(12)	997(13)	986(16)	991(19)	991(15)	996(21)	990(20)	996(26)	988(20)	997(20)	995(17)	006(20)	7,3(4)	7,02(18)
706,669(20)	665(12)	671(13)	660(13)	666(16)	666(11)	671(17)	664(17)	670(23)	663(16)	671(17)	669(14)	680(16)	17,3(5)	17,79(44)
744,254(20)	254(13)	261(14)	251(16)	255(19)	256(15)	260(21)	254(20)	260(26)	253(20)	261(20)	258(17)	269(20)	4,65(20)	4,8(13)
763,928(19)	928(13)	934(14)	924(8)	928(11)	930(7)	933(13)	928(12)	933(18)	927(12)	935(13)	932(9)	942(12)	25,8(6)	24,28(61)
818,018(22)	068(16)	072(16)	064(30)	066(33)	069(29)	071(35)	068(35)	071(41)	066(34)	074(35)	071(32)	080(34)	7,7(3)	8,30(22)
884,667(18)	652(15)	654(16)	649(7)	648(10)	654(6)	653(12)	652(12)	653(18)	651(11)	657(12)	654(8)	662(11)	78,9(15)	81,81(205)
937,483(20)	465(16)	465(17)	462(7)	459(18)	467(6)	463(12)	465(12)	464(18)	465(11)	469(12)	466(8)	473(11)	36,2(8)	38785(98)
1334,267(29)	259(24)	243(25)	257(15)	236(19)	261(14)	238(21)	260(21)	241(29)	262(21)	254(22)	253(17)	247(21)	27,6(6)	29,74(75)
1475,757(34)	775(26)	760(27)	775(35)	753(39)	778(33)	755(41)	777(41)	758(49)	779(41)	772(42)	769(37)	764(41)	4,47(15)	4,53(12)
1505,006(32)	005(26)	990(27)	004(11)	983(15)	007(10)	985(18)	007(17)	988(25)	009(17)	003(18)	998(13)	994(17)	14,7(3)	15,46(39)
1562,264(33)	263(31)	250(32)	262(73)	242(77)	265(71)	244(79)	265(79)	247(87)	267(79)	263(80)	255(75)	253(79)	1,31(6)	1,36(5)

E (редж. I)	1		2		3		4		5		6		I (редж. I)	I (редж.)
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
59.537(1)	547(8)	543(8)	+540(15)	+538(16)	548(14)	545(17)	545(17)	543(21)	+540(16)	+533(17)	561(15)	555(17)	-	-
122.063(4)	052(8)	049(8)	045(7)	045(9)	052(6)	051(10)	050(10)	049(14)	046(9)	040(10)	065(8)	060(9)	-	-
136.473(4)	467(8)	464(8)	460(10)	460(12)	+467(9)	+467(13)	465(13)	464(17)	461(12)	456(12)	+479(11)	+476(12)	-	-
165.853(7)	834(8)	832(8)	828(7)	828(9)	835(6)	835(10)	832(10)	832(14)	828(9)	824(10)	+846(8)	+843(9)	-	-
279.188(6)	192(8)	194(8)	186(9)	189(11)	+192(8)	+195(13)	190(13)	193(17)	+186(12)	+187(12)	202(10)	204(12)	-	-
391.688(10)	689(9)	694(9)	+684(10)	+689(12)	+699(9)	+695(13)	+688(13)	+694(18)	685(12)	689(13)	698(10)	704(12)	-	-
661.638(19)	643(12)	650(12)	+638(12)	+646(15)	644(11)	649(16)	+642(16)	+649(22)	+640(16)	+649(16)	648(13)	659(16)	-	-
834.827(21)	826(14)	830(15)	822(7)	824(10)	+827(6)	+828(12)	826(12)	828(18)	+825(11)	+832(12)	+828(8)	+837(11)	-	-
898.021(19)	020(15)	022(16)	+016(6)	+015(9)	021(5)	020(11)	+020(11)	+020(17)	019(10)	025(11)	+021(8)	+029(11)	-	-
1115.518(25)	503(19)	496(20)	501(8)	490(11)	505(7)	493(14)	+504(13)	+495(20)	+504(13)	+503(14)	502(10)	503(13)	-	-
1173.208(25)	201(20)	192(21)	199(9)	185(12)	203(7)	189(14)	202(14)	190(21)	203(13)	199(14)	199(10)	198(14)	-	-
1274.511(28)	508(22)	495(23)	507(14)	488(17)	+510(12)	+491(19)	510(19)	493(26)	510(18)	504(19)	+505(15)	+500(18)	-	-
1332.464(28)	473(23)	458(24)	+471(8)	+451(12)	475(7)	+53(14)	+474(14)	+456(21)	+475(13)	+468(14)	+468(10)	+463(14)	-	-
1836.014(37)	010(32)	031(33)	+011(15)	+023(19)	+013(13)	+024(22)	+013(21)	+028(30)	016(21)	049(22)	999(17)	033(21)	-	-
							<sup>56</sup> Co							
846.751(19)	754(15)	758(15)	751(7)	752(10)	756(6)	756(12)	754(12)	756(18)	753(11)	760(12)	757(8)	765(11)	100	100
1037.815(22)	823(18)	820(19)	821(22)	813(25)	825(21)	817(27)	824(27)	818(34)	824(27)	825(27)	825(23)	826(27)	14.00(10)	14.29(25)
1238.256(27)	242(21)	230(22)	240(9)	223(13)	244(8)	227(15)	244(15)	228(22)	244(14)	239(15)	239(11)	236(14)	67.60(40)	70.28(176)
1360.175(29)	190(24)	175(25)	189(33)	168(36)	192(31)	170(39)	192(38)	173(46)	193(38)	185(39)	185(34)	179(38)	4.330(40)	4.371(120)
2015.133(40)	060(35)	135(36)	062(32)	126(36)	063(29)	127(39)	063(38)	132(48)	068(38)	155(40)	046(34)	136(38)	3.080(30)	3.112(80)
2034.706(41)	588(36)	671(37)	590(27)	662(31)	592(25)	663(34)	592(34)	668(44)	596(34)	692(35)	574(29)	672(34)	7.890(70)	8.217(210)

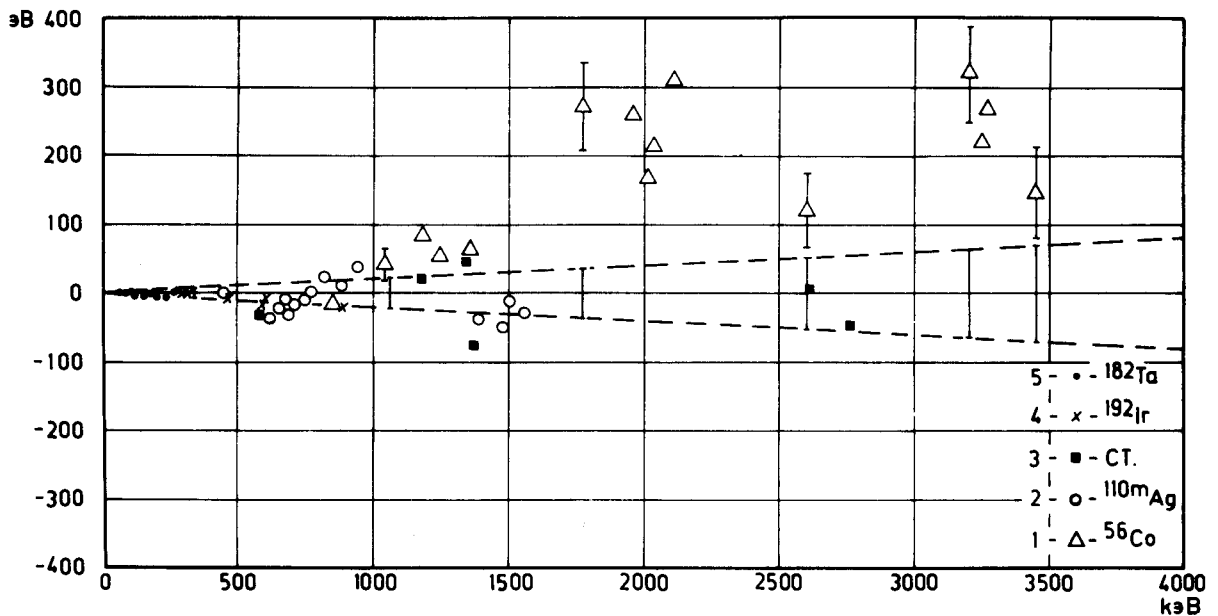


Рис. 1. Отклонения энергий различных рекомендованных реперов от данных Хельмера, Гринвуда и Герке /12/.  
 1 - <sup>56</sup>Co /17/; 2 - <sup>110m</sup>Ag /18/; 3 - нормали третьего порядка /7,8/; 4 - <sup>192</sup>Ir /18/; 5 - <sup>182</sup>Ta /18/.

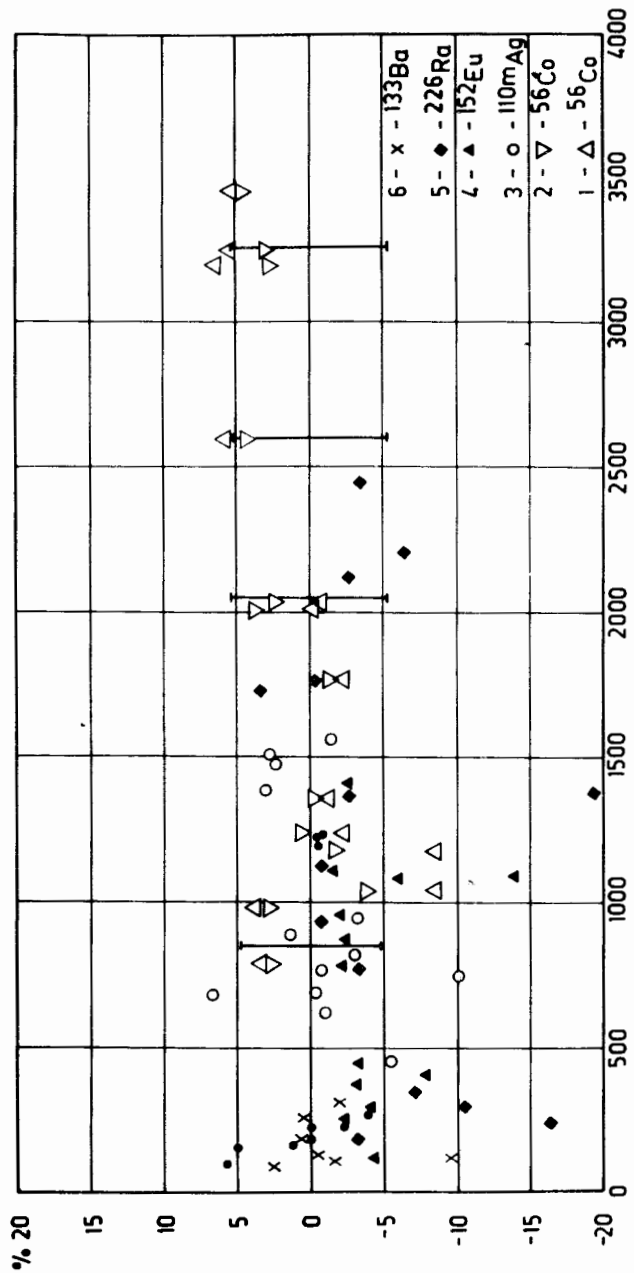


Рис. 2. Отклонения интенсивностей различных нуклидов от данных Хица /12/; 1 -  $^{56}\text{Co}$  /8/; 2 -  $^{56}\text{Co}/17/$ ; 3 -  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  /8/; 4 -  $^{152}\text{Eu}$  /18/; 5 -  $^{226}\text{Ra}$  /11/; 6 -  $^{133}\text{Ba}$  /13/.

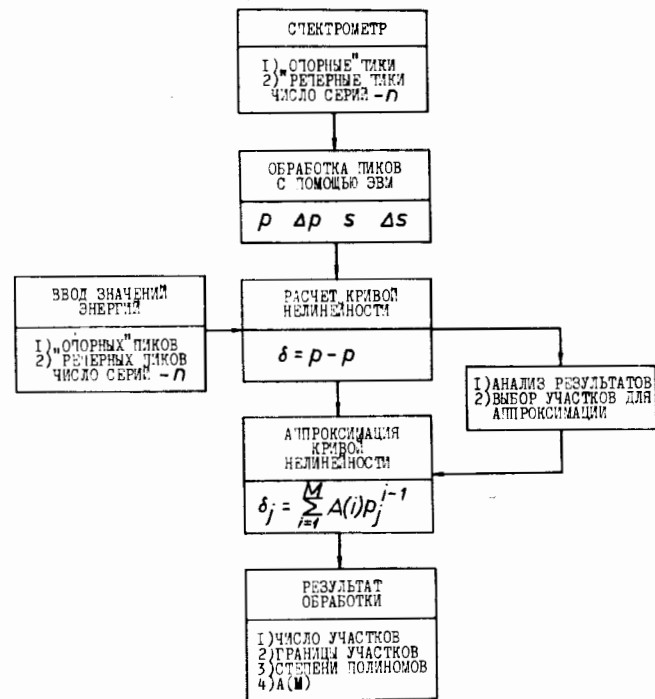


Рис. 3. Блок-схема программы построения нелинейности спектрометра и ее аппроксимации полиномом  $\delta_j = \sum_{i=1}^M A(i) p_j^{i-1}$ .

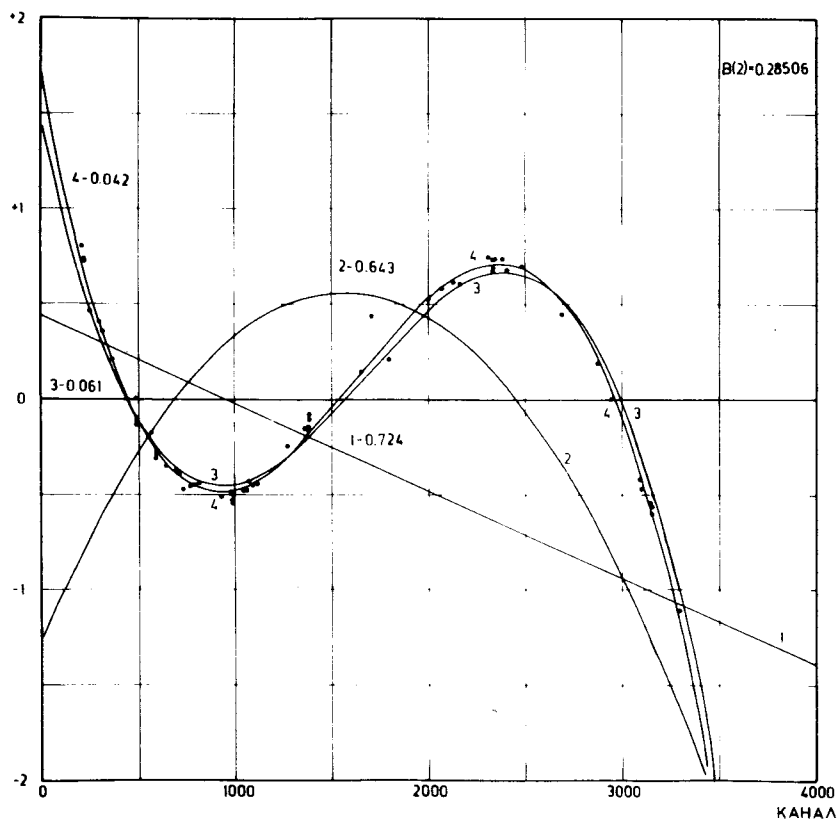


Рис. 4а. Нелинейность спектрометра с Ge(Li) - детектором и ее аппроксимация с помощью полинома

$\delta_j = \sum_{i=1}^M A(i) p_j^{i-1}$ ; точки - экспериментальные значения; непрерывные линии - расчетные значения;  $B(2) = 0,28506$ ; на рисунке указаны степень полинома  $M$  и соответствующее ему значение  $\bar{\Delta}$  в каналах.

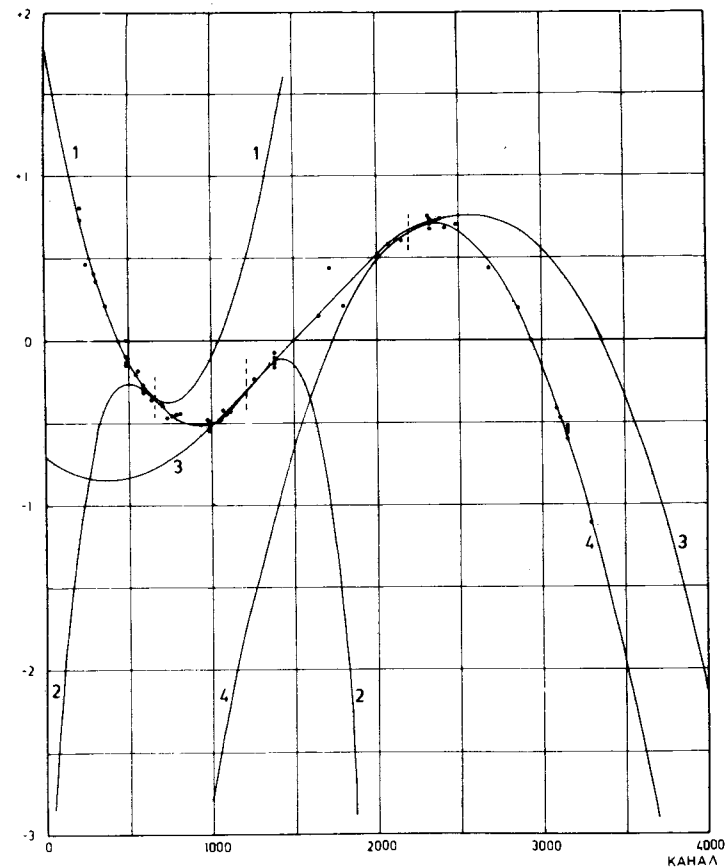


Рис. 4б. Нелинейность спектрометра с Ge(Li)-детектором

и ее аппроксимация с помощью полинома  $\delta_j = \sum_{i=1}^M A(i) p_j^{i-1}$   
/число участков - 4/: 1 -  $M=2$  ;  $\bar{\Delta} = 0,033$  канала;  
2 -  $M=4$  ;  $\bar{\Delta} = 0,024$  канала; 3 -  $M=3$  ;  $\bar{\Delta} = 0,035$  канала;  
4 -  $M=2$  ;  $\bar{\Delta} = 0,023$  канала;  $B(2) = 0,28506$  кэВ/кан.

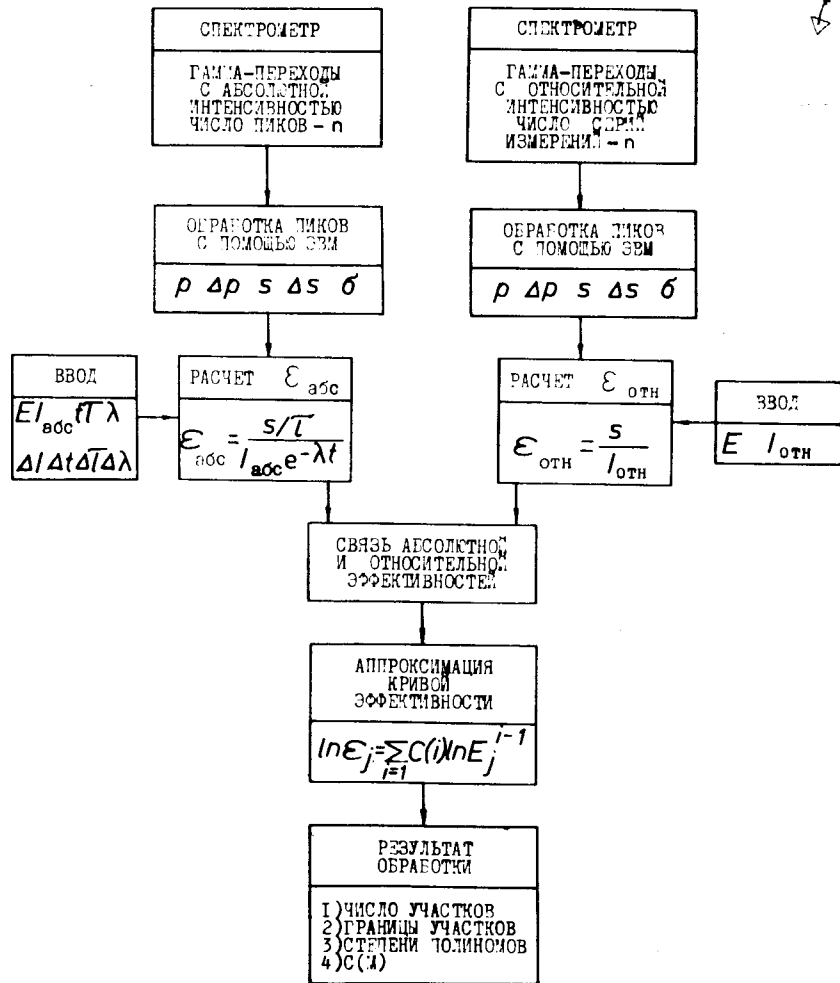


Рис. 5. Блок-схема программы построения эффективности спектрометра и ее аппроксимации полиномом

$$\ln \epsilon_j = \sum_{i=1}^M C(i) \ln E_j^{i-1}$$

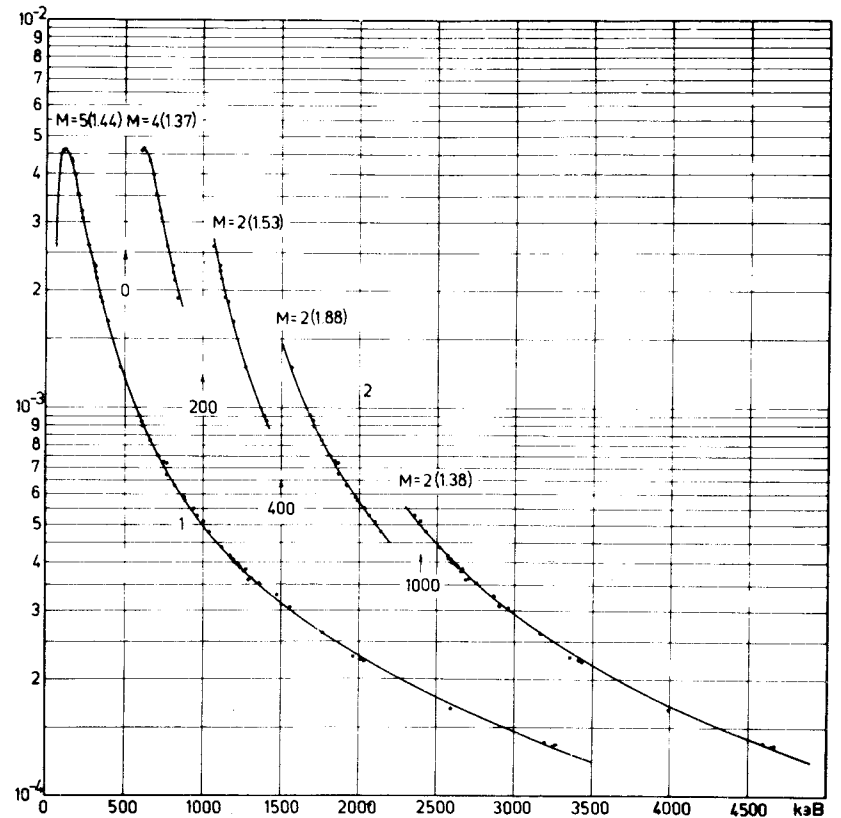


Рис. 6. Эффективность спектрометра с Ge(Li)-детектором /37 см<sup>3</sup>/ и ее аппроксимация полиномом  $\ln \epsilon_j =$

$$= \sum_{i=1}^M C(i) \ln E_j^{i-1} \quad \text{точки - экспериментальные значения;}$$

непрерывные линии - аппроксимация полиномом; в скобках указано значение  $\Delta/\%$ ; для наглядности кривые аппроксимации по участкам сдвинуты между собой на 300 кэВ.



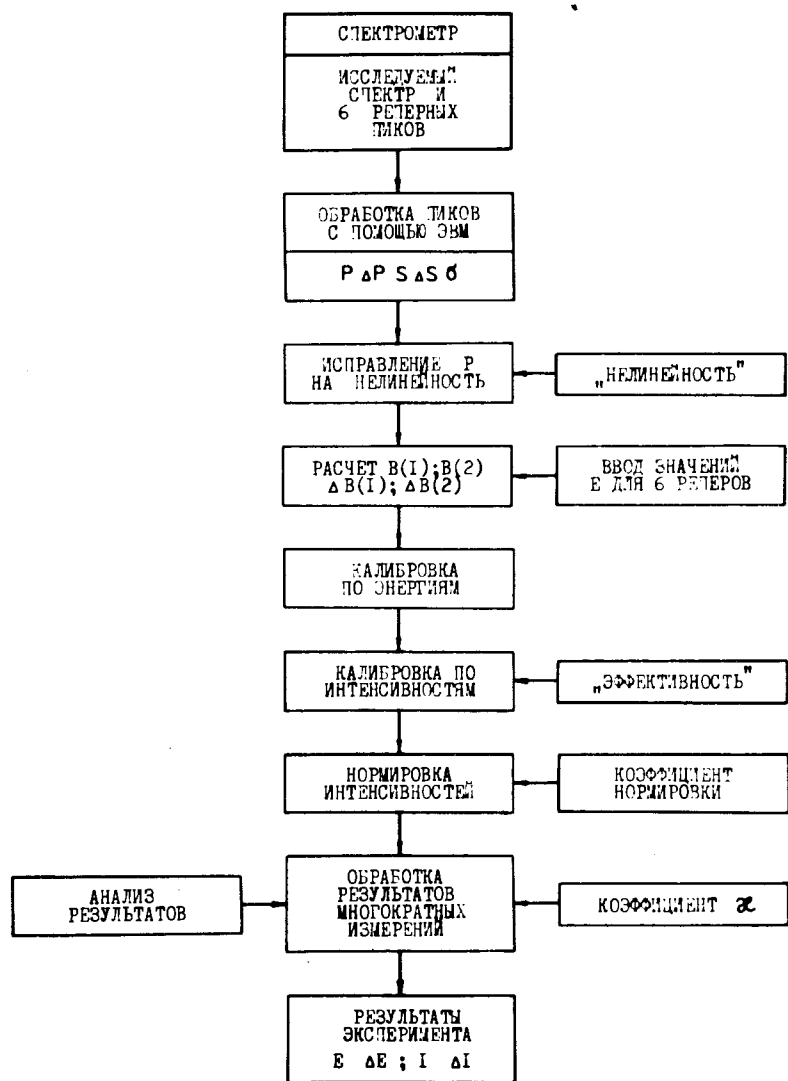


Рис. 7. Блок-схема программы обработки измерений спектров  $\gamma$ -лучей с помощью ПЭД.

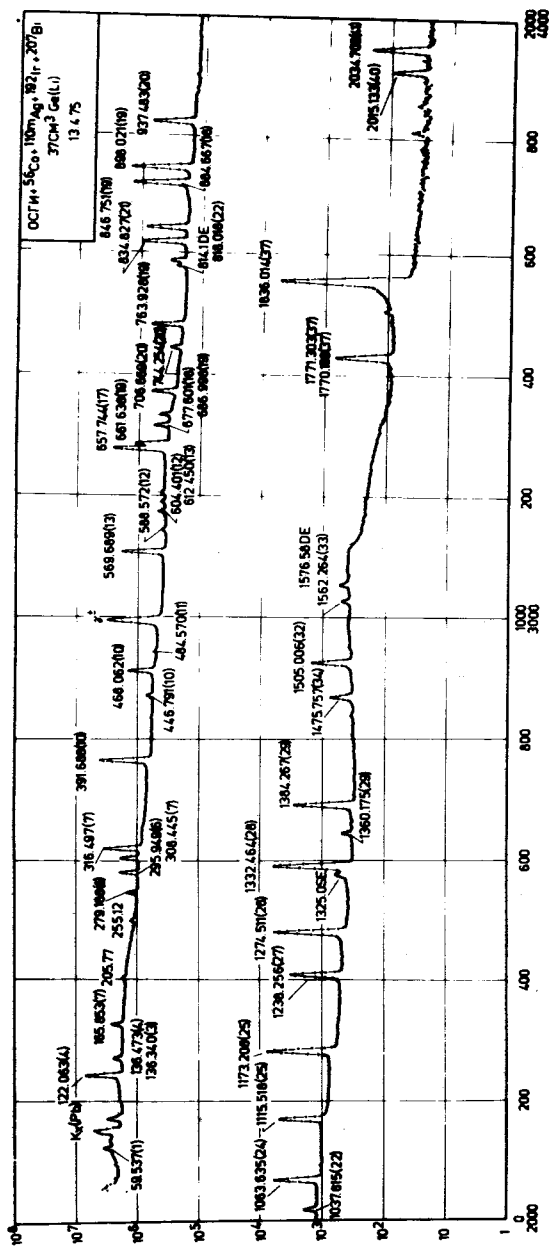


Рис. 8. Спектр  $\gamma$ -лучей при распаде  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  +  $^{207}\text{Bi}$  + ОСГИ, измеренный с помощью Ge(Li) - детектора /37 см<sup>3</sup>/ - результатами обработки приведены в табл. II.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников ЛВТА Г.И.Макаренко, Э.А.Лопатину и коллектив ЭВМ "Минск-22" за большую помощь при разработке и отладке всех программ калибровок, Т.В.Сазонову и С.В.Сэпмана - за аттестацию образцовых спектрометрических  $\gamma$ -источников /ОСГИ/. Мы искренне благодарим Г.Е.Щукина за полезные замечания при чтении рукописи.

### Литература

1. Ц.Вылов, И.Н.Егошин, Е.Т.Кондраш и др. Препринт ОИЯИ, Р6-9071, Дубна, 1975.
2. Ц.Вылов, Л.А.Вылова, И.Н.Егошин и др. Препринт ОИЯИ, Р6-9072, Дубна, 1975.
3. Б.Тейлор, В.Паркер, Д.Лангенберг. "Фундаментальные константы и квантовая электродинамика", Атомиздат, 1972.
4. Б.С.Джелепов. "Методы разработки сложных схем распада", "Наука", Л., 1974.
5. J.A.Bearden. Rev.Mod.Phys., 39, 78 (1967).
6. J.A.Bearden and A.F.Burr. Rev.Mod.Phys., 39, 125 (1967).
7. G.Murray, R.L.Graham and J.S.Geiger. Nucl.Phys., 63,313 (1965).
8. J.Kern. Proc. Panel Meeting Charged-Particle-
9. R.G.Greenwood, K.C.Helmer and R.J.Gerke. Nucl. Inst. and Meth., 77, 141 (1970).
10. W.Beer and J.Kern. Phys.Lett., 47B, 345 (1973).
11. O.Piller, W.Beer, J.Kern. Nucl.Instr. and Meth., 107, 61 (1973).
12. R.L.Heath. Gamma-Ray Spectrum Cataloge ANCR-1000-2, 1974.
13. J.Legrand. Nucl. Instr. and Meth., 112, 229 (1973).
14. В.С.Александров, Ц.Вылов и др. Сообщение ОИЯИ, Р6-6708, Дубна, 1973.
15. N.Lavi. Nucl.Instr. and Meth., 117, 475 (1974).
16. Н.Г.Волков, В.Г.Чубченко, О.Х.Белов. В сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", вып. 4, М., Атомиздат, стр. 177 /1974/.
17. D.C.Camp, G.L.Meredith. Nucl.Phys., A166, 349 (1971).
18. W.Beer and J.Kern. Nucl.Instr. and Meth., 117, 183 (1974).

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 июля 1975 года.