

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



13/III-78
Р6 - 11085

B-926

1198/2-78

Ц.Вылов, С.Бацев, В.М.Горожанкин, И.И.Громова,
Н.А.Лебедев, А.Ф.Новгородов, Ш.Оманов,
Б.П.Осипенко, В.Г.Чумин, А.Ф.Щусь, Я.Юрковски

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ

РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ

С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

7. Спектрометрия электронов внутренней конверсии

1977

Р6 - 11085

Ц.Вылов, С.Бацев, В.М.Горожанкин, И.И.Громова,
Н.А.Лебедев, А.Ф.Новгородов, Ш.Оманов,
Б.П.Осипенко, В.Г.Чумин, А.Ф.Щусь, Я.Юрковски

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ

РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ

С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

7. Спектрометрия электронов внутренней конверсии

Направлено в сб. "Прикладная ядерная спектроскопия"



Вылов Ц. и др.	Р6 - 11085
Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов. 7. Спектрометрия электронов внутренней конверсии	
Изложена методика измерения КВК с помощью полупроводниковых детекторов. В предположении:	
$\alpha_k (661,648 \text{ кэВ} - {}^{137}\text{Cs}) = 0,0905 \pm 0,0010$	
построен набор нормалей КВК второго порядка. При этом предполагалось, что обратное рассеяние электронов от поверхности детектора не зависит от энергии при нормальном падении. Показано, что для перехода 121,8 кэВ (распад ${}^{152}\text{Eu}$), являющегося чистым E2 переходом (типа $2^+ - 0^+$), экспериментальное значение α_k отличается от расчетного (таблицы Хагера и Зельтцера) на $(7,3 \pm 2,5)\%$. Приведены также относительные интенсивности ЭВК радиоактивных нуклидов, которые можно применить для исследования эффективности спектрометров. Экспериментальные данные являются результатом обработки более 800 аппаратурных спектров.	
Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.	
Преприят Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977	
Vylov Ts. et al.	Р6 - 11085
Spectrometry of Radioactive Nuclide Radiation Using Semiconductor Detectors. 7. Internal Conversion Electron Spectrometry	
The technique of internal conversion coefficient measurement with the aid of semiconductor detectors has been described. Assuming	
$\alpha_k (661,648 \text{ keV} - {}^{137}\text{Cs}) = 0,0905 \pm 0,0010$	
the set of internal conversion coefficient standards of the second order has been obtained. The opposite dispersion of electrons at the detector surface is assumed to be independent on the energy at a normal fall. It is shown that the experimental value of α_k for 121.8 keV transition (decay of ${}^{152}\text{Eu}$) being the clear E2-transition (type $2^+ - 0^+$) is distinctive (to $7.3 \pm 2.5\%$) from the calculated one (the Hager and Seltzer tables). Relative intensities of internal conversion electrons from radioactive nucleides are also given. These data obtained after processing more than 800 apparatus spectra can be used for the spectrometry efficiency investigation.	
The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Physics, JINR.	
Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977	

Основная задача гамма-спектроскопии сводится к измерению энергий и относительных интенсивностей ядерных переходов с возможно лучшей точностью^{/1-6/}. На базе этих результатов строятся различные варианты схем распада (часто с привлечением данных о совпадениях) и определяются энергии возбужденных состояний. Задача же спектроскопии электронов внутренней конверсии (ЭВК) сводится, в основном, к определению мультипольностей переходов, а следовательно, возможных квантовых характеристик l^{π} возбужденных состояний. Данные о коэффициентах внутренней конверсии (КВК) позволяют также проверить правильность предложенной схемы распада на основе баланса интенсивностей электромагнитных переходов.

В настоящей работе рассматриваются вопросы измерения КВК с помощью полупроводниковых детекторов. Характеристики применяемых спектрометров описаны в работах^{/1,2,7/}.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КВК ОТДЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Согласно определению, КВК на оболочке i равен:

$$\alpha_i = I_i / I_f, \quad (1)$$

где I_i и I_f - число i -электронов и f -квантов, соответственно, испускаемых в полном телесном угле за единицу времени. Очевидно, что можно построить отношения типа:

$$\alpha_i / \alpha_j = I_i / I_j. \quad (2)$$

Сравнивая экспериментальные значения α_i и α_i / α_j с теоретическими расчетами, определяют мультипольность перехода.

1. Абсолютные измерения

Пусть имеются бета- и гамма-спектрометры, эффективность которых в условиях фиксированного значения телесного угла измерена с помощью калиброванных по активности источников. Подставляя экспериментальные значения в (1), получаем α_i (метод АГГ^{/8/}). В предположении независимости ошибок погрешность γ -го измерения α равна:

$$\Delta \alpha_{if} = \alpha_{if} \left\{ \left(\frac{\Delta S_{if}}{S_{if}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_f}{S_f} \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь S_{if} и S_f - число импульсов i -электронов и f -квантов, ΔS_{if} и ΔS_f - соответствующие погрешности. В одиночных измерениях могут иметь место систематические ошибки, связанные с калибровкой источника, с учетом $T_{1/2}$ и просчетов^{/2/}. Поэтому измерения проводят на

разных ПЩ, спектрометрических трактах и анализаторах. Тогда:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad \Delta \alpha_i = \left\{ (\Delta \alpha_i^*)^2 + (\alpha_i \chi)^2 + (\alpha_i \eta)^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

Здесь χ - погрешность определения абсолютной эффективности гамма-спектрометра $^{3,4/}$; $W_j = (\Delta \alpha_{ij})^{-2}$, $\Delta \alpha_i^*$ - наибольшая из вычисленных по следующим формулам погрешностей:

$$(\Delta \alpha_i^*)^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad ; \quad (\Delta \alpha_i^*)^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{\sum_{j=1}^n W_j (\alpha_i - \alpha_{ij})^2}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (5)$$

Величина η характеризует погрешность определения абсолютной эффективности бета-спектрометра. Ее рассчитывают по формуле:

$$\eta = \left\{ \left(\frac{\Delta \alpha_{i\pi}}{\alpha_{i\pi}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{i\pi}}{S_{i\pi}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

Погрешность определения площади пика эталонного перехода $\Delta S_{i\pi}$ вычисляется по формулам, аналогичным (5).

На рис. 1 приведены фрагменты спектров излучений ^{207}Bi , измеренных с помощью $\text{Si}(\text{Li})$ - и $\text{Ge}(\text{Li}, \text{Au})$ -детекторов, а также полученные в этих экспериментах $\alpha_K, \alpha_{L_2}, \alpha_{L_3}$. Абсолютная эффективность бета-спектрометра определена с помощью α_K для перехода $661,7 \text{ кэВ } ^{137}\text{Cs}$.

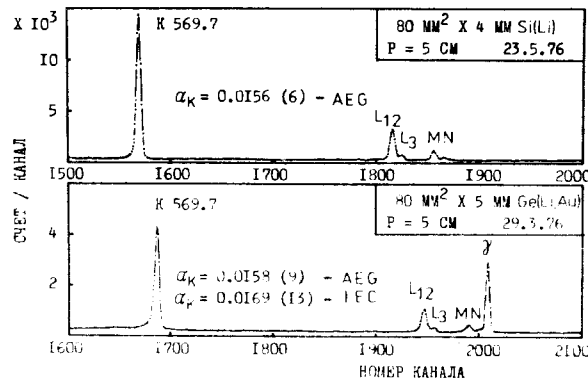


Рис. 1. Фрагменты спектров излучения ^{207}Bi , измеренные с помощью $\text{Si}(\text{Li})$ - и $\text{Ge}(\text{Li}, \text{Au})$ - детекторов.

Исключить указанные выше систематические ошибки можно, если применить один ПЩ для регистрации как бета-, так и гамма-излучения $^{1,7/}$ - см. рис. 1. Этот метод является полным (и более точным) аналогом метода внутренне-внешней конверсии (IEC) $^{8/}$.

2. Сравнительные измерения

Метод аналогичен рассмотренному выше, но здесь достаточно предварительного исследования лишь относительных эффективностей бета- и гамма-спектрометров. Исследуемый и эталонный препараты измеряются вместе (метод NPG) $^{8/}$:

$$\alpha_{i\pi} = \frac{I_{i\pi}}{I_{\pi i\pi}} \frac{I_{\pi j}}{I_j} \alpha_{\pi j} \quad (7)$$

Погрешности рассчитываются по следующим формулам:

$$\Delta \alpha_{i\pi} = \alpha_{i\pi} \left\{ \left(\frac{\Delta S_{i\pi}}{S_{i\pi}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{\pi i\pi}}{S_{\pi i\pi}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_j}{S_j} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{\pi j}}{S_{\pi j}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$\Delta \alpha_i = \left\{ (\Delta \alpha_i^*)^2 + (\alpha_i \chi)^2 + (\alpha_i \eta)^2 + (\Delta \alpha_{\pi i})^2 \right\}^{1/2}$$

Величины χ и η характеризуют погрешность относительных эффективностей спектрометров.

Пример метода NPG показан на рис. 2. В качестве эталонного источника использован ^{137}Cs .

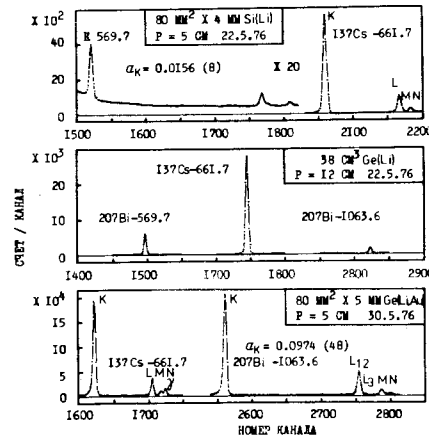


Рис. 2. Фрагменты спектров излучений ^{207}Bi и ^{137}Cs , измеренных с помощью $\text{Si}(\text{Li})$ -, $\text{Ge}(\text{Li})$ - и $\text{Ge}(\text{Li}, \text{Au})$ - детекторов.

3. Относительные измерения

Энергетическое разрешение полупроводниковых бета-спектрометров и применение ЭВМ для обработки спектральных линий $^{2/}$ позволяют разделять K- и L-конверсионные линии для $Z > 10$, L и M- для $Z > 35$, M и N- для $Z > 60$, L_2 и L_3 - для $Z > 70$ (см. рис. 3). В предположении независимости ошибок погрешность I_i/I_j равна:

$$\Delta \left(\frac{I_i}{I_j} \right) = \left(\frac{I_i}{I_j} \right) \left\{ \left(\frac{\Delta S_i}{S_i} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_j}{S_j} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

Здесь $i, j = K, L_1, L_2, L_3, M, N$ и т.д., S_i и S_j - число зарегистрированных i и j электронов, соответственно; $I = S/\varepsilon$ - интенсивность i и j -электронов; ε - соответствующая эффективность регистрации. Результаты многократных измерений обрабатываются по формулам, аналогичным (4) ($\alpha_{ij} = (I_i/I_j)$; $x=0$). Тогда величина η будет характеризовать предельную погрешность определения относительной эффективности спектрометра на участке $i-j$. Напомним, что эффекты суммирования X-лучей с i, j -электронами могут приводить к существенным искажениям отношений $I_i/I_j^{1/2}$. С этой точки зрения влияние условий измерения на данном спектрометре должно быть исследовано заранее.

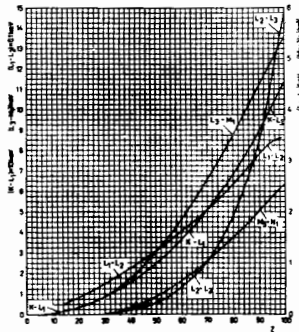


Рис. 3. Зависимость разностей энергий связи на оболочках от Z нуклида.

В табл. I приведены относительные интенсивности ЭВК, полученные с помощью $Si(Li)$ - и $Ge(Li, Au)$ -детекторов. Для сравнения там же приведены и результаты расчетов для принятых мультипольностей $^{10}/$.

НУКЛИД	E	αI	I_K	ΔI_K	I_{L12}	ΔI_{L12}	I_{L3}	ΔI_{L3}	I_L	ΔI_L	I_M	ΔI_M	I_N	ΔI_N
152Eu	121.8	E2	100.000	2.146	32.164	-	22.076	-	61.718	0.770	15.887	0.257	3.039	0.162
141Ce	145.4	M1	100.000	1.427	13.402	-	0.185	-	14.210	0.150	2.838	0.071	0.794	0.041
139Ce	165.9	M1	100.000	1.179	13.244	-	0.184	-	14.092	0.131	2.921	0.055	0.739	0.035
167Tm	207.8	E3	100.000	2.583	89.251	5.309	63.871	4.876	148.922	10.185	39.760	1.882	8.725	1.854
207Bi	569.7	E2	100.000	0.246	22.082	0.257	0.798	0.098	6.480	0.355	1.387	0.075	0.486	0.053
157Cs	661.7	M1	100.000	1.696	16.175	-	1.439	-	18.295	0.084	-	-	-	-
207Bi	1063.7	M1	100.000	1.025	24.599	0.665	1.400	0.136	25.999	0.801	6.889	0.446	1.786	0.071

Табл. I. Относительные интенсивности ЭВК и их сравнение с теоретическими расчетами $^{10}/$ для принятых мультипольностей.

4. Измерение отношений X/Γ

В случае β^- -распада, а также при наличии изомерных состояний, вакансии на оболочках нуклида возникают только за счет процесса внутренней конверсии. Следовательно, измерив за единицу времени число γ -квантов и число вакансий на соответствующей оболочке, нетрудно определить КВК для схемы распада с одним гамма-переходом (метод XPG)

$$\alpha_{ij} = \frac{I_{x,y}}{\omega_i I_j}, \quad \Delta \alpha_{ij} = \alpha_{ij} \left\{ \left(\frac{\Delta I_{x,y}}{I_{x,y}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I_j}{I_j} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Здесь α_{ij} - КВК на i -оболочке; I_x - интенсивность x -рентгеновских лучей; ω_i - выход флуоресценции на i -оболочке; I_j - интенсивность гамма-лучей; y - номер измерения. Результаты многократных измерений обрабатываются по формулам, аналогичным (4). В этом случае, однако, в качестве η используют погрешность измерения выхода флуоресценции.

Подход нетрудно расширить и для более сложных схем распада, когда относительные интенсивности i -электронов можно измерить с высокой точностью. Это относится, в основном, для случая $i=K$.

Для примера на рис. 4 приведены спектр гамма-лучей ^{176m}Lu и полученное в этом эксперименте значение КВК.

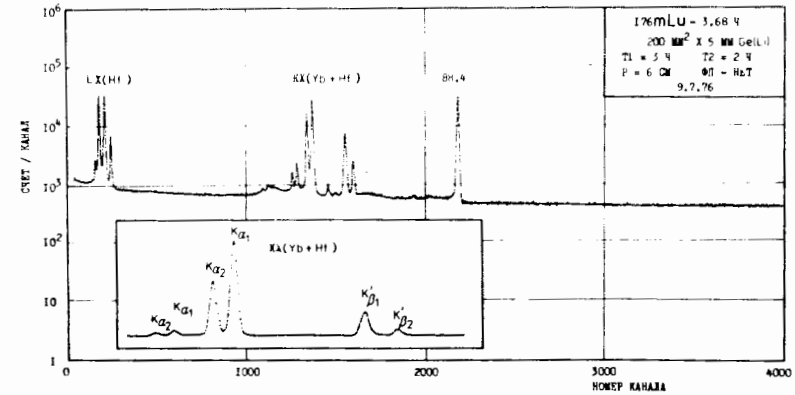


Рис. 4. Спектр гамма-лучей ^{176m}Lu , измеренный с помощью $200mm^2 \times 5mm$ $Ge(Li)$ -детектора (полученное в этом эксперименте значение КВК $\alpha_K = 1,16 \pm 0,019$).

II. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КВК ГРУППЫ ПЕРЕХОДОВ

В задачах по измерению КВК группы переходов мы используем методику измерения энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей^{/3,4,5/}. Сделаем некоторые замечания применительно к КВК:

1. Методика не предполагает прецизионных измерений энергий ядерных переходов и применяется лишь для идентификации спектральных линий и определения их интенсивностей.

2. Для исследования нелинейности спектрометра можно применять значения $E_{ij} = E_j - \varepsilon_i$, где E_j - энергия γ -лучей; ε_i - энергия связи электрона на i - оболочке нуклида^{/9/} (табл. 2).

3. Предполагаем, что для нормального падения β - частиц обратное рассеяние и эффективность сбора зарядов не зависят от энергии. В случае косого падения нужно применять способ исследования эффективности, аналогичный применяемому в γ - спектроскопии.

4. Энергетическая калибровка спектров ЭВК осуществляется с помощью ранее применяемых энергий γ -лучей. Лишь в редких случаях (например, нуклид с малым числом интенсивных переходов) появляется необходимость примешивания источников с простыми спектрами или применения методики "внешней калибровки"^{/5/}.

Для определения КВК группы переходов в дальнейшем применяют метод сравнения (NPG) с эталонным γ -переходом.

III. ПОСТРОЕНИЕ НАБОРА НОРМАЛЕЙ КВК

В качестве нормали КВК первого порядка мы принимаем^{/8/}

$$\alpha_k(661,648 \text{ кэВ} - {}^{137}\text{Cs}) = 0,0905 \pm 0,0010. \quad (\text{II})$$

Выбор этой нормали сделан по следующим причинам:

1. Считают, что мультипольность перехода 661,7 кэВ является чистой М4. В этом случае можно провести сравнение теоретических и экспериментальных данных.

2. Нуклид ${}^{137}\text{Cs}$ испытывает β -распад и имеет только один переход (рис. 5). Следовательно, α_k можно определить с помощью методов лишь гамма-спектроскопии (XPG).

3. Переход 661,7 кэВ находится в той области энергии, где входное окно ПД несущественно рассеивает или поглощает бета-частицы и для достаточно толстых детекторов (≥ 3 мм) эффективность регистрации не зависит от энергии.

4. Нуклид ${}^{137}\text{Cs}$ имеет большой период полураспада (30,18 г) и источник высокой удельной активности можно получить на реакторах. Это значительно облегчает задачу изготовления высококачественных

бета-источников. Кроме того, высокая эффективность разделения Cs с помощью электромагнитных масс-сепараторов позволяет изготовить тонкие источники без носителя.

5. Источник ${}^{137}\text{Cs}$ входит в набор ОСГИ. Это позволяет калибровать изготовленные бета-источники по активности с помощью методики сравнения интенсивностей γ -лучей^{/4/}.

6. Распад ${}^{137}\text{Cs}$ исследован неоднократно и практически на всех типах бета-спектрометров.

7. Используя изложенную выше методику и относительные интенсивности γ -лучей (табл. 7), любые изменения α_k 661,7 кэВ в дальнейшем можно легко учесть, не проводя эксперимента заново.

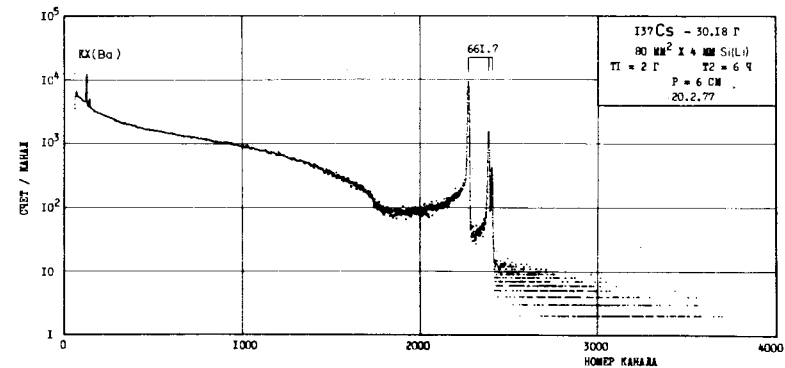


Рис. 5. Спектр излучения ${}^{137}\text{Cs}$, измеренный с помощью Si(Li)-детектора.

Полученные нами экспериментальные значения α_k приведены в табл. 3 и мы будем считать их нормальными второго порядка. Там же приведены число экспериментов q и результаты различных методов. Для каждого метода указано значение систематической погрешности δ , включающее погрешность нормы первого порядка (661,7 кэВ - ${}^{137}\text{Cs}$), равной 1,1%. При обработке результатов, полученных разными методами, в качестве статистических весов используют наибольшую из погрешностей $\phi_{k2} = \Delta \alpha_i$ (см. ф-лу (4)) вне зависимости от числа проведенных экспериментов. Тогда в качестве δ использовалась наилучшая из систематических погрешностей примененных методов. Для определения α_i каждого перехода использованы, как минимум, два различных радиоактивных источника.

$K\alpha_2$ $K \rightarrow L_{II}$ $K\alpha_1$ $K \rightarrow L_{III}$
 $K\alpha_1$ $K \rightarrow L_{III}$

Табл. 2. Энергии связи электронов на оболочках нуклидов.

Продолжение таблицы 2.

Z	Э	K	L ₁	L ₂	L ₃	M ₁	M ₂	M ₃	N ₁	N ₂	N ₃	O ₁
1	H	0,014										
2	He	0,025										
3	Li	0,055										
4	Be	0,111										
5	B	0,188			0,005							
6	C	0,284			0,007							
7	N	0,402			0,007							
8	O	0,532	0,024		0,007							
9	F	0,686	0,031		0,009							
10	Ne	0,867	0,045		0,018							
11	Na	1,072	0,063		0,031	0,001						
12	Mg	1,305	0,089		0,052	0,002						
13	Al	1,560	0,118	0,074	0,073	0,001						
14	Si	1,839	0,149	0,100	0,099	0,018		0,003				
15	P	2,149	0,189	0,136	0,135	0,016		0,010				
16	S	2,472	0,229	0,165	0,164	0,018		0,008				
17	Cl	2,823	0,270	0,202	0,200	0,018		0,007				
18	Ar	3,203	0,320	0,247	0,245	0,025		0,012				
19	K	3,608	0,377	0,297	0,294	0,034		0,018				
20	Ca	4,038	0,438	0,350	0,347	0,044		0,026				
21	Sc	4,493	0,500	0,417	0,402	0,054		0,032				
22	Ti	4,965	0,564	0,461	0,455	0,051		0,034				
23	V	5,465	0,628	0,520	0,513	0,066		0,038				
24	Cr	5,989	0,695	0,584	0,575	0,074		0,043				
25	Mn	6,539	0,769	0,652	0,641	0,084		0,049				
26	Fe	7,114	0,846	0,723	0,710	0,095		0,056				
27	Co	7,709	0,929	0,794	0,779	0,101		0,060				
28	Ni	8,333	1,008	0,872	0,855	0,112		0,068				
29	Cu	8,979	1,096	0,951	0,931	0,120		0,074				
30	Zn	9,659	1,194	1,044	1,021	0,137		0,087				
31	Ga	10,367	1,298	1,143	1,116	0,158	0,107	0,103			0,001	
32	Ge	11,104	1,413	1,249	1,217	0,181	0,129	0,123			0,003	
33	As	11,867	1,527	1,359	1,323	0,204	0,147	0,141			0,003	
34	Se	12,658	1,654	1,476	1,436	0,232	0,168	0,162			0,006	
35	Br	13,474	1,782	1,596	1,550	0,257	0,189	0,182	0,027	0,005	0,005	
36	Kr	14,326	1,921	1,727	1,675	0,289	0,223	0,214	0,024	0,011	0,011	
37	Rb	15,200	2,065	1,864	1,805	0,322	0,248	0,233	0,030	0,015	0,014	
38	Sr	16,105	2,216	2,007	1,940	0,355	0,280	0,269	0,038	0,020	0,020	
39	Y	17,039	2,373	2,155	2,080	0,389	0,313	0,301	0,046	0,026	0,026	
40	Zr	17,998	2,532	2,307	2,223	0,431	0,345	0,331	0,052	0,039	0,039	
41	Nb	18,986	2,698	2,465	2,371	0,469	0,377	0,363	0,055	0,044	0,044	
42	Mo	20,000	2,866	2,625	2,520	0,505	0,410	0,393	0,062	0,055	0,055	
43	Tc	21,044	3,043	2,793	2,677	0,544	0,445	0,425	0,065	0,053	0,053	
44	Ru	22,117	3,224	2,967	2,838	0,585	0,483	0,461	0,075	0,063	0,063	
45	Rh	23,220	3,412	3,146	3,004	0,627	0,521	0,496	0,081	0,068	0,068	
46	Pd	24,350	3,605	3,331	3,173	0,670	0,559	0,531	0,086	0,071	0,071	
47	Ag	25,514	3,806	3,524	3,351	0,717	0,602	0,571	0,092	0,072	0,072	
48	Cd	26,711	4,018	3,727	3,538	0,770	0,651	0,617	0,105	0,087	0,087	
49	In	27,940	4,238	3,938	3,730	0,826	0,702	0,664	0,112	0,097	0,097	
50	Sn	29,201	4,465	4,156	3,929	0,884	0,757	0,715	0,137	0,089	0,089	0,001

Z	Э	K	L ₁	L ₂	L ₃	M ₁	M ₂	M ₃	N ₁	N ₂	N ₃	O ₁
51	Sb	30,491	4,699	4,381	4,132	0,944	0,812	0,766	0,152	0,097	0,097	0,007
52	Te	31,614	4,939	4,612	4,341	1,006	0,870	0,819	0,166	0,110	0,110	0,012
53	I	33,170	5,188	4,852	4,557	1,072	0,931	0,875	0,186	0,123	0,123	0,014
54	Xe	35,562	5,713	5,360	5,104	1,145	0,999	0,937	0,208	0,147	0,147	0,018
55	Cs	37,985	5,987	5,624	5,352	1,217	1,065	0,999	0,231	0,172	0,172	0,023
56	Ba	37,441	5,987	5,624	5,352	1,217	1,065	0,999	0,231	0,172	0,172	0,023
57	La	38,925	6,267	5,891	5,624	1,293	1,137	1,063	0,253	0,190	0,190	0,028
58	Ce	40,444	6,549	6,165	5,724	1,375	1,205	1,124	0,271	0,206	0,206	0,032
59	Pr	41,991	6,835	6,441	5,965	1,455	1,273	1,186	0,290	0,224	0,224	0,038
60	Nd	43,569	7,126	6,722	6,206	1,536	1,341	1,243	0,305	0,237	0,237	0,044
61	Pm	45,185	7,428	7,017	6,460	1,650	1,422	1,357	0,331	0,255	0,255	0,050
62	Sm	46,855	7,737	7,312	6,717	1,724	1,542	1,421	0,347	0,267	0,267	0,059
63	Eu	48,519	8,052	7,618	6,977	1,800	1,614	1,481	0,360	0,284	0,284	0,062
64	Gd	50,239	8,376	7,931	7,243	1,881	1,689	1,544	0,376	0,299	0,299	0,066
65	Tb	51,996	8,709	8,252	7,515	1,968	1,768	1,612	0,398	0,311	0,311	0,070
66	Dy	53,788	9,047	8,581	7,790	2,047	1,842	1,676	0,416	0,332	0,332	0,075
67	Ho	55,618	9,395	8,919	8,071	2,128	1,923	1,741	0,436	0,345	0,345	0,080
68	Er	57,486	9,752	9,265	8,358	2,207	2,006	1,812	0,454	0,366	0,366	0,085
69	Tm	59,390	10,116	9,618	8,648	2,287	2,090	1,885	0,472	0,386	0,386	0,090
70	Yb	61,332	10,488	9,978	8,943	2,367	2,172	1,949	0,487	0,396	0,396	0,095
71	Lu	63,314	10,870	10,349	9,244	2,431	2,264	2,024	0,506	0,410	0,410	0,100
72	Hf	65,351	11,272	10,739	9,561	2,501	2,365	2,108	0,538	0,437	0,437	0,105
73	Ta	67,417	11,680	11,136	9,881	2,578	2,469	2,194	0,566	0,465	0,465	0,110
74	W	69,525	12,099	11,542	10,205	2,620	2,575	2,281	0,595	0,492	0,492	0,115
75	Re	71,677	12,527	11,957	10,535	2,692	2,682	2,367	0,625	0,518	0,518	0,120
76	Os	73,871	12,968	12,385	10,871	2,769	2,792	2,457	0,655	0,547	0,547	0,125
77	Ir	76,111	13,419	12,824	11,215	2,847	2,909	2,551	0,684	0,577	0,577	0,130
78	Pt	78,395	13,880	13,273	11,564	2,926	3,027	2,646	0,712	0,604	0,604	0,135
79	Au	80,725	14,353	13,733	11,918	3,006	3,150	2,743	0,739	0,644	0,644	0,140
80	Hg	83,103	14,839	14,209	12,284	3,086	3,274	2,847	0,767	0,677	0,677	0,145
81	Tl	85,531	15,347	14,698	12,657	3,174	3,416	2,957	0,796	0,727	0,727	0,150
82	Pb	88,005	15,861	15,200	13,035	3,251	3,554	3,067	0,824	0,764	0,764	0,155
83	Bi	90,526	16,388	15,709	13,418	3,329	3,697	3,177	0,852	0,806	0,806	0,160
84	Po	93,105	16,939	16,244	13,814	3,408	3,854	3,302	0,880	0,851	0,851	0,165
85	At	95,730	17,495	16,785	14,214	3,488	4,008	3,426	0,908	0,886	0,886	0,170
86	Rn	98,404	18,047	17,357	14,619	3,568	4,159	3,551	0,936	0,929	0,929	0,175
87	Fr	101,137	18,639	17,906	15,031	3,648	4,327	3,663	0,964	0,960	0,960	0,180
88	Ra	103,922	19,237	18,484	15,444	3,728	4,490	3,795	0,992	0,988	0,988	0,185
89	Ac	106,755	19,840	19,083	15,871	3,808	4,656	3,904	1,020	1,016	1,016	0,190
90	Th	109,651	20,472	19,693	16,300	3,888	4,831	4,046	1,048	1,044	1,044	0,195
91	Pa	112,601	21,105	20,314	16,733	3,968	5,001	4,174	1,076	1,072	1,072	0,200
92	U	115,606	21,758	20,948	17,168	4,048	5,181	4,304	1,104	1,100	1,100	0,205
93	Np	118,676	22,420	21,599	17,608	4,128	5,366	4,435	1,132	1,128	1,128	0,210
94	Pu	121,818	23,102	22,266	18,057	4,208	5,546	4,562	1,158	1,154	1,154	0,215
95	Am	125,027	23,773	22,944	18,504	4,288	5,710	4,667	1,184	1,180	1,180	0,220
96	Cm	128,220	24,460	23,779	18,930	4,368	5,895	4,797	1,210	1,206	1,206	0,225
97	Bk	131,590	25,275	24,585	19,452	4,448	6,075	4,977	1,236	1,232	1,232	0,230
98	Cf	135,960	26,110	25,250	19,930	4,528	6,255	5,107	1,262	1,258	1,258	0,235
99	Es	139,490	26,900	26,020	20,410	4,608	6,435	5,252	1,288	1,284	1,284	0,240
100	Fm	143,090	27,700	26,810	20,900	4,688	6,615	5,397	1,314	1,310	1,310	0,245
101	Md	146,780	28,530	27,610	21,390	4,768	6,795	5,546	1,340	1,336	1,336	0,250
102	No	150,540										

Табл. 3. Экспериментальные значения КВК, полученные с помощью различных методов на ППД.

Нуклид T _{1/2}	E (ΔE) E _K	I(ΔI) I _K (ΔI _K)	α _k	Φ1			Δα _k	Результаты разных методов					
				Φ2	ζ	Δα _k		q	Метод	α _k	Φ1	Φ2	ζ
176mLu 3,68 ч	88,367(7) 23,016	100,000(1830)	1,161	0,004	0,018	0,019	5	XPG	1,161	0,004	0,004	0,018	0,019
152Eu 13,2 г	121,782(3) 74,947	100,000(2476) 100,000(2146)	0,636	0,007 0,002	0,023	0,016	7 5	AEG NPG	0,638 0,635	0,009 0,010	0,003 0,003	0,023 0,023	0,017 0,018
169Yb 30,6 д	130,525(4) 71,135	30,956(733) 44,525(839)	0,499	0,012 0,010	0,023	0,017	2 1	AEG NPG	0,506 0,483	0,014 0,022	0,006 -	0,023 0,023	0,018 0,025
141Ce 32,51 д	145,443(3) 103,452	100,000(1827) 100,000(1179)	0,365	0,004 0,007	0,023	0,011	5 3 5	AEG NPG XPG	0,366 0,350 0,374	0,007 0,008 0,007	0,004 0,008 0,007	0,023 0,023 0,032	0,011 0,011 0,012
149Gd 9,5 д	149,733(6) 101,214	100,000(1827) 100,000(3393)	0,459	0,010 0,001	0,023	0,015	2 2	AEG NPG	0,458 0,460	0,014 0,013	0,000 0,006	0,023 0,023	0,018 0,017
151Gd 120 д	153,605(4) 105,086	100,000(1829) 51,307(686)	0,426	0,008 0,003	0,023	0,013	2 1	AEG NPG	0,428 0,422	0,010 0,013	0,003 -	0,023 0,023	0,018 0,016
139Ce 137,5 д	165,854(5) 126,929	100,000(1827) 100,000(1179)	0,226	0,004 0,003	0,023	0,007	4 3	AEG NPG	0,228 0,222	0,005 0,007	0,004 0,005	0,023 0,023	0,017 0,009
173Lu 1,37 г	171,402(4) 110,070	13,834(379) 62,488(1008)	0,0657	0,0013 0,0013	0,023	0,020	2 3 1	AEG NPG IEC	0,0662 0,0634 0,0703	0,0016 0,0023 0,0042	0,0012 0,0009 -	0,023 0,023 0,032	0,0022 0,0027 0,0048
151Gd 120 д	174,697(4) 126,178	47,342(970) 100,000(1348)	1,731	0,014 0,015	0,023	0,043	2 1	AEG NPG	1,722 1,754	0,016 0,025	0,010 -	0,023 0,023	0,043 0,048
173Lu 1,37 г	179,363(5) 118,031	6,362(177) 62,952(1551)	0,214	0,004 0,004	0,023	0,006	2 3 1	AEG NPG IEC	0,214 0,210 0,229	0,005 0,008 0,013	0,003 0,004 -	0,023 0,023 0,032	0,007 0,009 0,015
172Lu 6,7 д	181,530(4) 120,198	32,801(1182) 100,000(2698)	0,210	0,006 0,002	0,023	0,008	2 1	AEG NPG	0,211 0,206	0,006 0,013	0,001 -	0,023 0,023	0,008 0,014
169Yb 30,7 д	197,948(4) 138,558	100,000(1834) 100,000(1631)	0,355	0,007 0,007	0,023	0,011	2 1	AEG NPG	0,352 0,369	0,008 0,016	0,001 -	0,023 0,023	0,011 0,018
156Tb 5,35 д	199,216(5) 148,977	61,229(1126) 100,000(2506)	0,155	0,006 0,002	0,023	0,008	2 1	AEG NPG	0,154 0,157	0,007 0,013	0,006 -	0,023 0,023	0,008 0,014
172Lu 6,7 д	203,436(4) 142,104	7,626(378) 17,049(531)	0,150	0,004 0,002	0,023	0,005	2 1	AEG NPG	0,149 0,154	0,004 0,010	0,000 -	0,023 0,023	0,005 0,011
167Tm 9,25 д	207,797(3) 150,311	100,000(1824) 100,000(2583)	0,479	0,010 0,002	0,023	0,015	3 2	AEG NPG	0,481 0,478	0,016 0,013	0,003 0,007	0,023 0,023	0,019 0,017
151Gd 120 д	243,293(14) 194,774	89,836(1836) 2,196(28)	0,0202	0,0004 0,0003	0,023	0,0006	2 1	AEG NPG	0,0204 0,0197	0,0005 0,0009	0,0007 -	0,023 0,023	0,0008 0,0010
152Eu 13,2 г	244,691(6) 197,856	25,839(522) 3,424(42)	0,0846	0,0014 0,0023	0,023	0,0029	3 5 1	AEG NPG IEC	0,0869 0,0827 0,0835	0,0022 0,0020 0,0074	0,0006 0,0008 -	0,023 0,023 0,032	0,0028 0,0027 0,0079

Продолжение таблицы 3.

Нуклид T _{1/2}	E(ΔE) E _K	I(ΔI) I _K (ΔI _K)	α _k	Φ1			Δα _k	Результаты разных методов					
				Φ2	ζ	Δα _k		q	Метод	α _k	Φ1	Φ2	ζ
156Tb 5,35 д	262,587(13) 212,348	9,105(171) 7,010(130)	0,0769	0,0024 0,0006	0,023	0,0030	2 1	AEG NPG	0,0771 0,0754	0,0026 0,0056	0,0025 -	0,023 0,023	0,0031 0,0059
152Tb 17,5 ч	271,085(14) 220,774	14,776(279) 29,966(350)	0,0620	0,0018 0,0011	0,023	0,0030	2 1	AEG NPG	0,0614 0,0636	0,0022 0,0034	0,0016 -	0,023 0,023	0,0026 0,0037
173Lu 1,37 г	272,111(5) 210,779	100,000(1886) 100,000(1286)	0,0210	0,0004 0,0001	0,023	0,0007	2 1 1	AEG NPG IEC	0,0209 0,0214 0,0210	0,0005 0,0010 0,0015	0,0001 -	0,023 0,023 0,032	0,0008 0,0011 0,0016
149Eu 93,1 д	277,081(5) 230,246	83,534(1975) 100,000(2697)	0,0808	0,0014 0,0008	0,023	0,0023	2 2	AEG NPG	0,0800 0,0815	0,0021 0,0020	0,0021 0,0011	0,023 0,023	0,0027 0,0027
203Pb 52,1 ч	279,189(6) 193,658	100,000(1893) 100,000(2795)	0,166	0,003 0,002	0,023	0,006	2 2 2	AEG NPG IEC	0,163 0,168 0,173	0,006 0,006 0,010	0,003 0,002 0,001	0,023 0,023 0,032	0,007 0,006 0,011
149Gd 9,5 д	298,617(9) 250,098	59,080(1176) 9,217(240)	0,0723	0,0011 0,0007	0,023	0,0020	2 2	AEG NPG	0,0729 0,0716	0,0016 0,0016	0,0009 0,0001	0,023 0,023	0,0024 0,0022
169Yb 30,7 д	307,721(6) 248,331	29,270(654) 3,729(72)	0,0446	0,0014 0,0006	0,023	0,0017	2 2	AEG NPG	0,0450 0,0437	0,0016 0,0024	0,0012 0,0002	0,023 0,023	0,0019 0,0026
151Gd 120 д	307,500(9) 258,981	17,417(344) 1,341(39)	0,0605	0,0015 0,0014	0,023	0,0020	2 1	AEG NPG	0,0592 0,0619	0,0020 0,0021	0,0003 -	0,023 0,023	0,0025 0,0026
149Eu 93,1 д	327,527(6) 280,692	100,000(1982) 70,766(2547)	0,0514	0,0009 0,0008	0,023	0,0015	2 2	AEG NPG	0,0521 0,0504	0,0012 0,0015	0,0002 0,0015	0,023 0,023	0,0017 0,0019
152Eu 13,2 г	344,267(7) 294,028	96,528(1784) 4,729(39)	0,0313	0,0005 0,0005	0,023	0,0009	3 6 1	AEG NPG IEC	0,0317 0,0310 0,0322	0,0007 0,0007 0,0020	0,0003 0,0002 -	0,023 0,023 0,032	0,0010 0,0010 0,0022
152Tb 17,5 ч	344,267(7) 294,028	100,000(1923) 100,000(1755)	0,0308	0,0008 0,0002	0,023	0,0011	4 1	AEG NPG	0,0308 0,0306	0,0008 0,0017	0,0002 -	0,023 0,023	0,0011 0,0018
149Gd 9,5 д	346,660(9) 298,141	49,781(1188) 20,070(1004)	0,187	0,003 0,001	0,023	0,006	2 2	AEG NPG	0,188 0,187	0,006 0,005	0,003 0,002	0,023 0,023	0,007 0,007
156Tb 5,35 д	356,431(11) 306,192	20,816(388) 6,091(119)	0,0277	0,0009 0,0002	0,023	0,0011	2 1	AEG NPG	0,0278 0,0273	0,0011 0,0017	0,0011 -	0,023 0,023	0,0013 0,0018
156Tb 5,35 д	534,323(11) 484,084	100,000(1967) 3,691(83)	0,0035	0,0002 0,0000	0,023	0,0002	2 1	AEG NPG	0,0035 0,0035	0,0002 0,0003	0,0002 -	0,023 0,023	0,0002 0,0003
207Bi 30,2 г	569,683(12) 481,678	100,000(1834) 22,082(246)	0,0161	0,0002 0,0003	0,023	0,0005	7 5 2	AEG NPG IEC	0,0158 0,0162 0,0175	0,0003 0,0003 0,0010	0,0003 0,0003 0,0003	0,023 0,023 0,032	0,0005 0,0005 0,0012
207Bi 30,2 г	1063,660(19) 975,655	76,205(1461) 100,000(1025)	0,0966	0,0012 0,0002	0,023	0,0025	3 10	AEG NPG	0,0963 0,0968	0,0022 0,0015	0,0004 0,0009	0,023 0,023	0,0027 0,0031

Сделаем несколько замечаний о деталях экспериментов:

1. Все радиоактивные источники получены с помощью электромагнитного масс-сепаратора, за исключением ^{207}Bi , изготовленного выпариванием раствора.

2. Особое внимание уделялось правильному учету эффектов, связанных с радиоактивным распадом.

3. В качестве эталонов использовались 6 различных источников ^{137}Cs . Лишь в одном случае наблюдалось ухудшение качества источника, связанное с поглощением и рассеянием бета-частиц за счет загрязнений поверхности. Контроль каждого источника проводился путем измерения α_k в шкале другого источника. Приведем пример:

$$\alpha_k(661,7 \text{ кэВ} - ^{137}\text{Cs}) = \begin{matrix} 0,0900 \pm 0,0040 \\ 0,0896 \pm 0,0028 \\ 0,0874 \pm 0,0042 \end{matrix}$$

Этот результат демонстрирует и воспроизводимость геометрических условий для трех различных источников.

4. Результаты, приведенные в табл. 3, получены с помощью 8 различных ПЦД. В энергетических рабочих областях систематические отклонения экспериментальных значений α_k в зависимости от применяемых детекторов не наблюдались. Этот факт подтверждает предположение о независимости сбора зарядов от энергии бета-частиц. Заметим, что для изготовления ПЦД использован базовый материал различных фирм с разными параметрами.

5. Измерены относительные интенсивности ЭВК некоторых нуклидов, которые можно применять для калибровки бета-спектрометров (см. табл. 1 и 4). Характерные аппаратные спектры показаны на рис. 6 - 14. Приняты следующие обозначения: T1 - время, прошедшее с момента получения источника; T2 - время измерения; P - расстояние источник - ПЦД; С, М, Ч, Д и Г - обозначения времени: секунда, минута, час, день и год, соответственно; П - примесный нуклид; Д - дочерний нуклид. В дальнейшем мы предполагаем расширить область калибровочных источников.

IV. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных данных можно провести как в сравнении с литературными результатами, так и в сопоставлении с теоретическими расчетами (табл. 5). Отметим, что имеющиеся в настоящее время данные о КВК противоречивы и выбрать критерий отбора наиболее достоверных значений трудно. Формальная же процедура взвешивания

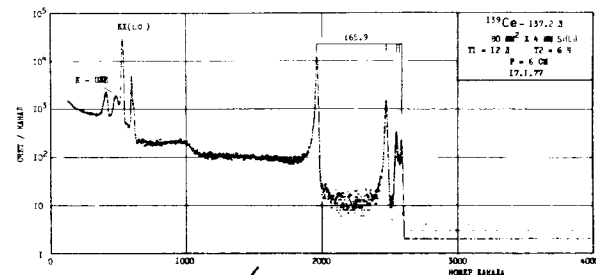


Рис. 6.

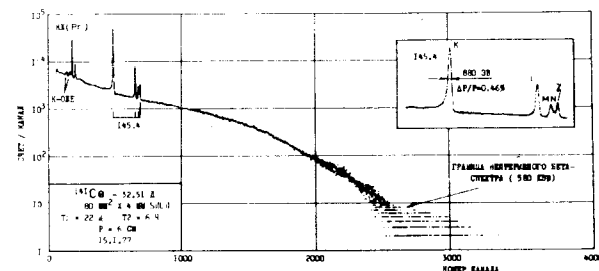


Рис. 7.

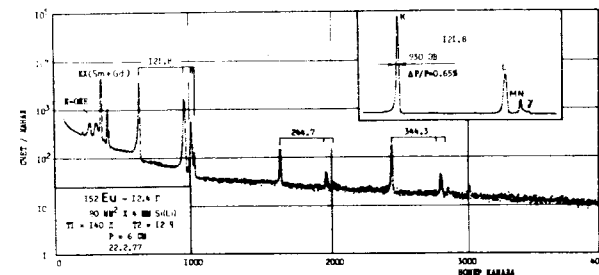
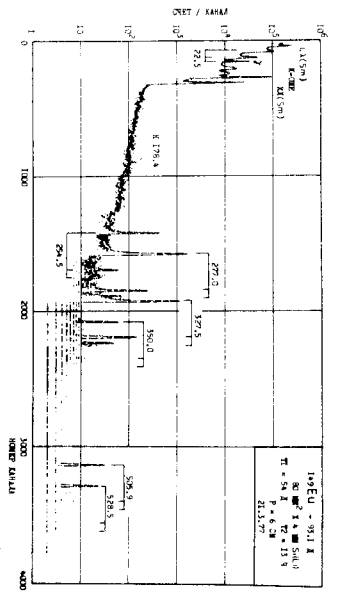
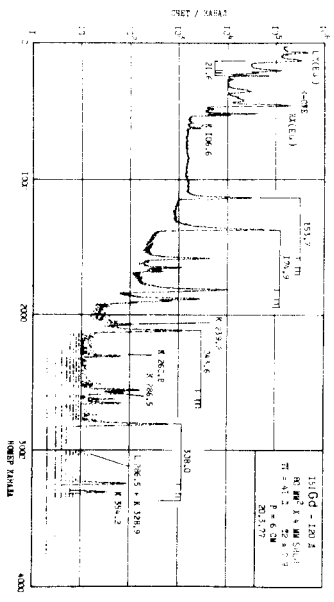


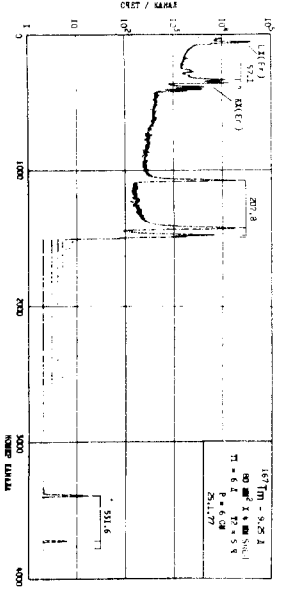
Рис. 8.



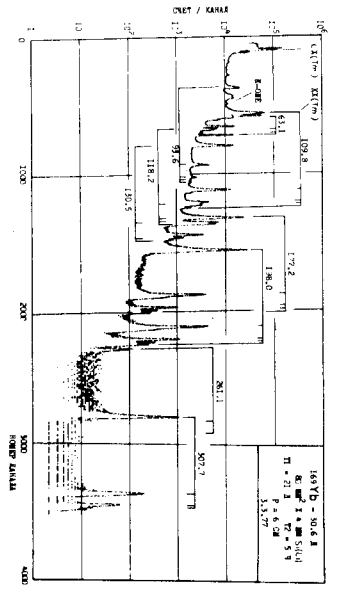
Pmc. 9.



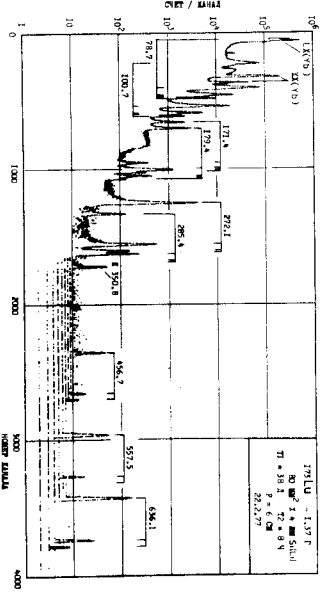
Pmc. 10.



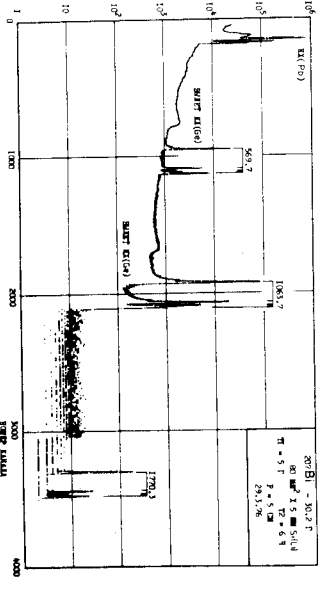
Pmc. 11.



Pmc. 12.



Pmc. 13.



Pmc. 14.

приводит к большим значениям погрешности разброса, что исключает возможность сравнения с теоретическими расчетами. Проводить полный физический анализ результатов мы не будем, ибо основная цель работы - изложение методики измерений. Некоторые замечания, однако, сделать следует.

1. В табл. 5 приведены КВК, которые можно получить для переходов чистой мультиполюльности из табл. 4. С точки зрения планирования

Табл. 4. Относительные интенсивности некоторых конверсионных линий, предлагаемые для калибровки полупроводниковых бета-спектрометров по эффективности.

E	ΔE	I	ΔI	E _α		E	ΔE	I	ΔI	E _α		E _α
				I _α	ΔI _α					I _α	ΔI _α	
149Gd - 9.5 М												
149.753	0.004	100.000	1.627	100.000	3.334	95.615	0.005	8.261	0.271	52.007	1.022	34.229
169Yb - 30.6 М												
						109.784	0.004	52.467	1.940	40.607	0.405	100.2
197Au - 1.17 Г												
						173Lu	0.006	55.582	2.149	252.826	29.544	1.688
152Eu - 13.2 Г												
						152Eu	0.003	97.912	2.500	100.000	2.146	74.347

эксперимента эти результаты полезны тем, что можно узнать реальные погрешности, достижимые в подобном подходе. Там же приведены расчетные КВК и их отклонения от экспериментальных значений, а также данные литературных источников.

2. Объектом специальных экспериментов был переход $I_{21,8}$ кэВ - ^{152}Eu . Считают, что он является чистым E_2 , разряжающим первое возбужденное состояние $^{152}\text{Sm}(2^+)$. Благоприятным обстоятельством для проведения экспериментов являлось наличие в наборе ОСТИ калиброванных по активности источников ^{57}Co (переход $I_{22,1}$ кэВ) и ^{137}Cs (переход $66I_{,7}$ кэВ). Благодаря этому исключалась погрешность

Табл. 5. Экспериментальные значения КВК и их сравнение с теоретическими расчетами /10/ для принятых мультиполюностей и литературными данными.

НУКЛИД	E(ΔE)	α _l	α _l	Δα _l , %	α _l (теор)	РАЗН. %	α _l	Δα _l , %	л-РА
172Lu	78.738(5)	E2 L	5.268	6.2	5.091	+ 3.4	-	-	-
			1.319	4.9	1.253	+ 5.1	-	-	
			0.342	6.7	-	-	-	-	
176mLu	88.367(7)	E2 K	1.161	1.8	1.210	- 4.1	1.10	5.5	14
			0.636	2.5	0.684	- 7.3	0.65	9.2	+14
			0.393	3.7	0.375	+ 4.7	0.38	13.2	12
152Eu	121.782(3)	E2 L	0.0883	3.8	0.081	+ 5.0	-	-	-
			0.0193	6.3	0.0198	- 2.6	-	-	
			-	-	0.0030	- 10.3	-	-	
169Yb	130.525(4)	E2 K	0.499	3.3	0.546	- 9.0	0.53	5.7	17
			0.365	3.0	0.388	- 6.1	0.379	1.1	8
			0.0519	3.5	0.0522	- 0.6	-	-	
141Ce	145.443(3)	M1 K	0.0104	4.4	0.0111	- 6.5	-	-	-
			0.0027	5.8	0.0030	- 10.3	-	-	
			-	-	-	-	-	-	
149Gd	149.733(6)	M1 K	0.459	3.3	0.507	- 9.9	0.475	2.7	18
			0.0699	5.6	0.072	- 3.0	-	-	
			0.0146	10.8	0.0155	- 6.0	-	-	
151Gd	153.605(4)	M1 K	0.426	3.1	0.471	- 10.0	0.475	3.2	21
			0.0623	3.5	0.0669	- 7.1	-	-	
			0.0144	4.3	0.0144	- 1.4	0.023	30.4	21
139Ce	165.854(5)	M1 K	0.226	3.1	0.225	+ 0.5	0.2142	0.7	8
			0.0319	3.5	0.0302	+ 5.5	-	-	
			0.00660	3.8	0.00625	+ 5.5	-	-	
173Lu	171.402(4)	E1 K	0.0657	3.1	0.0698	- 6.1	0.065	15.4	19
			1.731	2.5	1.896	- 9.1	-	-	
			0.330	3.6	0.384	- 15.1	0.38	18.4	21
173Lu	179.363(5)	E2 K	0.214	3.0	0.231	- 7.6	0.20	15.0	19
			0.210	3.8	0.224	- 6.5	0.210	6.0	22
			-	-	-	-	-	-	
156Tb	199.216(5)	E2 K	0.155	5.2	0.158	- 2.6	-	-	-
			0.150	3.3	0.161	- 7.1	0.160	6.3	22
			0.479	3.2	0.461	- 0.4	0.510	8.8	+20
167Tm	207.797(3)	E3 K	0.709	2.2	0.703	+ 0.9	-	-	-
			0.186	6.1	0.174	+ 6.7	-	-	
			0.042	21.7	-	-	-	-	
151Gd	243.293(14)	E1 K	0.0202	3.1	0.0222	- 9.4	0.025	16.0	21
			0.0846	3.6	0.0813	+ 4.0	0.0946	9.0	+20
			0.0769	3.9	0.0685	+ 11.6	0.0673	3.3	24
152Tb	271.085(14)	E2 K	0.0620	3.8	0.0622	- 0.2	0.0640	12.0	23
			0.0210	3.1	0.0214	- 1.9	0.0222	1.4	19
			0.0808	2.8	0.0861	- 6.4	0.079	6.3	18
149Eu	327.527(6)	E1 K	0.0446	3.8	0.0485	- 8.4	0.0488	3.7	17
			0.0514	2.8	0.0557	- 8.0	0.050	6.0	18
			0.0313	2.9	0.0311	+ 0.6	0.0296	4.4	+14
152Eu	344.267(7)	E2 K	0.00671	5.3	0.00684	- 1.9	-	-	-
			0.0277	4.0	0.0282	- 1.8	0.0285	7.7	24
			0.0035	4.8	0.0035	+ 0.1	0.0032	6.9	24
207Bi	569.683(12)	E2 K	0.0161	3.2	0.0159	+ 1.3	0.0160	2.5	+14
			0.00474	13.9	0.00459	+ 7.7	-	-	
			-	-	-	-	-	-	
137Cs	661.648(14)	M1 K	0.0205	1.1	0.0220	- 1.6	-	-	-
			0.0166	2.1	0.0168	- 1.2	-	-	
			0.0251	4.0	0.0251	- 0.0	0.026	4.0	+14
207Bi	1063.660(19)	M4 K	0.0251	2.6	0.0251	- 0.4	-	-	-
			0.0251	4.0	0.0251	- 0.0	-	-	
			-	-	-	-	-	-	

определения эффективности гамма-спектрометра. В общей сложности использовались 4 различных источника ^{152}Eu и 5 источников ^{137}Cs . Как видно из данных табл. 5, α_k (121,8 кэВ) отличается от расчетного значения на $(7,3 \pm 2,5)\%$.

Можно допустить, что эффективность ПДЦ играет роль в области ~ 80 кэВ. Однако наши эксперименты проводились с помощью 4 различных Si(Li) -детекторов и оказалось, что полученные значения совпадают. Кроме того, полученные нами относительные интенсивности ЭВК ^{152}Eu совпадают в пределах погрешности с данными, приведенными в /11/ и /12/ - (табл. 6). Сходятся также и относительные интенсивности ЭВК в области до 35 кэВ для ^{169}Yb (табл. 4) с результатами экспериментов на магнитных спектрометрах, приведенными в /17/.

E	I	ΔI	I	$\Delta I/II/$	I	$\Delta I/12/$	I	$\Delta I/16/$
K121.8	100.000	2.146	100.000	3.821	-	-	100.000	1.988
L121.8	61.718	0.770	78.025	6.242	61.465	7.092	56.989	1.080
K244.7	3.424	0.042	3.376	0.127	3.593	0.236	2.045	0.102
L244.7	0.927	0.028	0.840	0.102	-	-	0.545	0.028
K344.3	4.729	0.039	4.586	-	4.729	-	3.409	0.171
L344.3	1.018	0.033	1.102	0.159	-	-	0.767	0.039

Табл. 6. Сравнение экспериментальных значений относительных интенсивностей ЭВК ^{152}Eu с литературными данными.

Таким образом, возможны два предположения: либо неверны данные об активности и схеме распада ^{57}Co и ^{137}Cs , либо расчеты по какой-либо причине дают завышенные значения КВК.

3. Переходы типа E2 для четно-четных ядер, разряжающие состояние 2^+ в основное состояние 0^+ , систематизировались в /14/. Расходимость для α_k (121,8 кэВ - ^{152}Eu) отмечалась и там, но погрешность была больше. Кстати, в /14/ указано и на отклонение отношений L_1/L_2 и L_1/L_3 для чистых E2 - переходов от расчетных значений.

4. В работах /4,6/ нами указывалось на расхождение наших и литературных результатов об относительных интенсивностях гамма-лучей в области 200 - 600 кэВ. Применение данных /4,6/ для калибровки гамма-спектрометров привело к тому, что полученные значения в конфликтной области отличались от расчетных до значений, например, 10,1% для чистого E2 перехода 344,3 кэВ - ^{152}Eu . С другой

стороны, нет сходимости между относительными интенсивностями гамма-лучей, ЭВК и расчетных значений α_k для чистых E2 - переходов (121,8 и 344,3 кэВ) при распаде ^{152}Eu . В связи с этим мы проанализировали еще раз результаты экспериментов по измерению относительных интенсивностей гамма-лучей на примере ^{152}Eu , так как нормировку I_f осуществляют с помощью перехода 344,3 кэВ, находящегося в центре конфликтной области.

Во-первых, проанализированы условия экспериментов у разных авторов:

а) в работе /26/ эффективность спектрометра определялась методом Монте-Карло, причем проверка правильности расчета проводилась на узком энергетическом участке с помощью относительных интенсивностей гамма-квантов ^{133}Ba ;

б) в работе /27/ эффективность спектрометра исследовалась с помощью IAEA источников. Обратим внимание на три факта: был использован маленький планарный Ge(Li) -детектор; экспериментальные точки не аппроксимировались аналитическим выражением; нет переходов в области 279 - 661 кэВ;

в) в работе /28/ нет деталей калибровки спектрометра;

г) в работе /13/ эффективность $45 \text{ см}^3 \text{ Ge(Li)}$ -детектора исследовалась с помощью NBS источников (^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{88}Y). Экспериментальные точки аппроксимировались выражением:

$$1/\varepsilon = 0,0023 \times E^{1,0625} + 6,0 \times 10^6 \times E^{-2,5} \quad (12)$$

Следовательно, в двойном логарифмическом масштабе при $E > 200$ кэВ относительная эффективность представлена прямой. Этот факт противоречит результатам исследований в /25/.

В целом эти работы характеризуют подход к калибровке спектрометров. Как видно, нет детальных исследований эффективности спектрометров в области 200 - 600 кэВ.

Во-вторых, еще раз были проанализированы условия наших экспериментов /4/. В принципе, возможны три предположения для объяснения расходимости: неверно рассчитаны схемы распада ^{203}Hg и ^{113}Sn ; имеется ошибка в экспериментах; неверно аттестуются по активности ^{203}Hg и ^{113}Sn . В настоящее время первое предположение мы отвергаем. Эффективность же детекторов измеряли с помощью 5 различных источников ^{203}Hg и ^{113}Sn ; полученные результаты совпадают между собой в пределах $\pm 1,5\%$ и $\pm 1,1\%$ соответственно. Поэтому осо-

большое внимание было уделено третьему предположению. С этой целью мы провели новую контрольную серию измерений с помощью трех новых наборов ОСГИ (1977 г.). Оказалось, что новая партия источников по активности отличается (занижена) от старой на $(9,6 \pm 2,7)\%$ и $(8,3 \pm 2,4)\%$ для ^{203}Hg и ^{113}Sn , соответственно. Результаты повторной процедуры калибровки спектрометров показаны на рис. 15. Для наглядности там же приведены зависимости эффективности $38\text{ см}^3\text{ Ge(Li)}$ -детектора при использовании данных /4/ и /13/. Заметим, что ошибка в аттестации ^{203}Hg приведет к коррекциям данных и в области $\sim 80\text{ кэВ}$. Полученные в новых условиях относительные интенсивности гамма-лучей набора многореперных источников приведены в табл. 7. Внутренняя же сходимости данных из табл. 7 иллюстрируется рис. 16.

Относительно калибровки гамма-спектрометров по эффективности полезно сделать следующие замечания. Применение ЭВМ для обработки аппаратных спектров привело к тому, что площадь пика может быть определена с погрешностью меньше 1%. С другой стороны, усредненные погрешности относительных интенсивностей гамма-квантов калибровочных источников могут быть меньше 1% (см., например, /29/). Однако если использовать эти результаты для калибровки спектрометров, обнаруживаем расхождение значений относительных эффективностей, определенных с помощью различных источников. Это и есть основная причина того, что относительные интенсивности гамма-квантов, приводимые разными авторами, имеют значительный разброс. Поэтому разумным шагом является решение обратной задачи, т.е. исследование эффективности набора спектрометров с помощью аттестованных по активности источников и измерение в этих условиях относительных интенсивностей гамма-квантов калибровочных источников. Поскольку задачу решают в одной группе и с одними и теми же источниками, такие условия мы называем базисными. Конечно, эти данные могут иметь систематическую погрешность, но в целом они обладают высокой внутренней сходимостью, и этот факт в дальнейшем можно использовать для поиска таких ошибок. Кстати, в силу ряда обстоятельств (см. выше), имеющиеся ОСГИ недостаточны для полного решения задачи калибровки спектрометров и только привлечение различных физических критериев (баланс интенсивностей, КВК и т.д.) может помочь в достижении погрешностей относительных интенсивностей менее 2%. Кроме того, полученные в таком базисе данные удовлетворяют самому главному требованию к физическим результатам: возможности пересчета данных в случае изменения нормалей, относи-

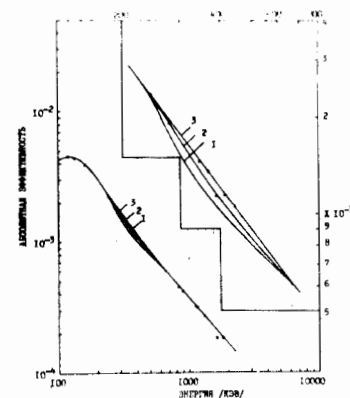


Рис.15. Эффективность спектрометра с $38\text{ см}^3\text{ Ge(Li)}$ -детектором, исследованная с помощью различных литературных результатов: кривая 1- данные /4/, кривая 2- новые наборы ОСГИ (1977 год), кривая 3- данные /13/. В правом верхнем углу - фрагмент области расходимости.

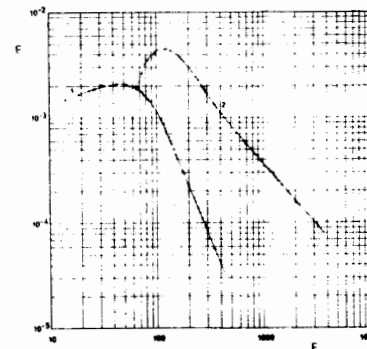


Рис.16. Эффективности спектрометров с $200\text{ мм}^2 \times 5\text{ мм}$ (кривая 1) и 38 см^3 (кривая 2) Ge(Li) -детекторами, полученные с помощью данных из табл. 7. Точки - экспериментальные значения, непрерывная линия - аппроксимация полиномом.

26. Aubin G. et al., Nucl. Instr. and Meth., 76, 1969, p. 93.
27. Mowatt R.S., Can. J. Phys., 48, 1970, p. 2606.
28. Riedinger L.L. et al., Phys. Rev., 32, 1970, p. 2356.
29. Legrand J. et al., Table de radionuclides, Commissariat a l'Energie Atomique, 1975, Paris.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 ноября 1977 года.