

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



B-926

18/12-77
P6 - 10414

1424/2-77

Ц.Вылов, В.С.Александров, Л.А.Вылова,
В.М.Горожанкин, А.Ф.Новгородов, Ш.Оманов,
Б.П.Осипенко, М.И.Фоминых, В.Г.Чумин, Я.Юрковски

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ С ПОМОЩЬЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

4. Нормали энергий и относительных интенсивностей
гамма-лучей

1977

Р6 - 10414

Ц.Вылов, В.С.Александров,¹ Л.А.Вылова,
В.М.Горожанкин,² А.Ф.Новгородов, Ш.Оманов,³
Б.П.Осипенко, М.И.Фоминых, В.Г.Чумин, Я.Юрковски

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ С ПОМОЩЬЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

4. Нормали энергий и относительных интенсивностей
гамма-лучей

Направлено в сб. "Прикладная ядерная спектроскопия"

¹ ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Ленинград

² Воронежский государственный университет

³ Самаркандский государственный университет

Вылов Ц. и др.

P6 - 10414

Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов. 4. Нормали энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей

В предположении $E(411,8-^{198}\text{Hg}) = 411,794 \pm 0,007$ кэВ и с использованием значений энергий гамма-лучей ^{182}Ta (до 264 кэВ) и ^{192}Ir (до 612 кэВ), измеренных на кристалл-дифракционном спектрометре, построен полный набор нормалей энергий до 3500 кэВ. Эффективность спектрометров исследована с помощью 5 калиброванных по активности наборов ОСГИ. Измерены энергии и относительные интенсивности гамма-лучей радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки спектрометров.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Vylov Ts. et al.

P6 - 10414

Spectrometry of Radioactive Nuclide Radiation Using Semiconductor Detectors. 4. Standard Gamma-Ray Energies and Relative Intensities

Assuming $E(411,8-^{198}\text{Hg}) = 411,794 \pm 0,007$ keV and using the gamma-ray energies of ^{182}Ta (up to 264 keV) and ^{192}Ir (up to 612 keV) measured by means of a crystal-diffraction spectrometer, a complete set of gamma-ray energy standards has been obtained. The spectrometer efficiency was investigated using 5 sets of standard radiation sources with known activities. The energy and relative intensities of gamma-rays of radioactive nucleides used in spectrometer calibration have been measured.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1977

В работах /1-3/ изложена методика измерения энергий и интенсивностей гамма-лучей с помощью полупроводниковых детекторов (ПД). Целью настоящей работы является построение полного набора нормалей энергий, а также измерение относительных интенсивностей гамма-лучей радиоактивных источников, применяемых для калибровки спектрометров.

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Применяемая спектрометрическая аппаратура и ее характеристики описаны в /1-2/. В соответствии с более высокими требованиями, которые ставит сформулированная выше задача, увеличены число и типы применяемых детекторов и анализирующей аппаратуры (рис.1 и табл.1).

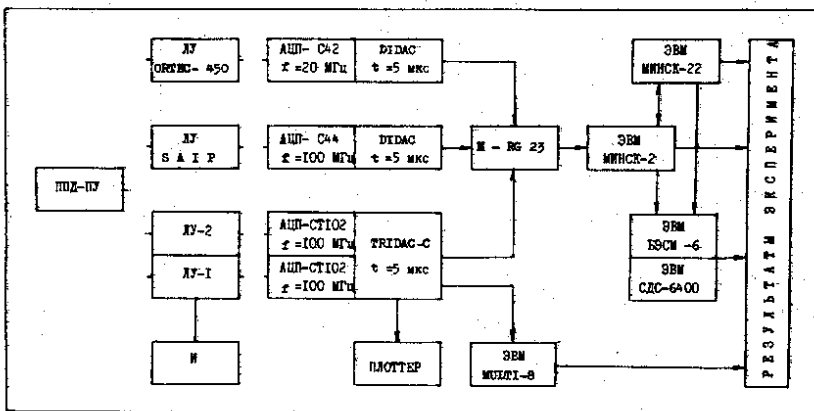


Рис.1. Структурная схема аппаратуры для исследования излучений радиоактивных нуклидов (см. /1/ - рис.20).

Табл. I. Характеристики применяемых ППД (коаксиальный¹- ППД с одним открытым переходом; коаксиальный²- ППД с двумя открытыми переходами).

№	ДЕТЕКТОР	ПАРАМЕТРЫ И ТИП ППД	ТОЛЩИНА УСТАНОВЛЕННОГО СЛОЯ	НАПРЯЖЕНИЕ СВЯЗЕВЫЙ	ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДЛЯ Е/КЭВ, МЭВ/			ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОМЕТРА	ИЗГОТОВИТЕЛЬ:
					5700 5.6 КЭВ	5700 122 КЭВ	6000 1.3 МЭВ		
1	КЛ(LI)	80 мм ² x 4 мм ПЛАНАРНЫЙ	4 мм	1500 В	290 ЭВ	600 ЭВ	-	5-160 5-20-70-160	ЛЭЦ - ОИЯИ
2	КЛ	26 мм ² x 5 мм ПЛАНАРНЫЙ	5 мм	1200 В	150 ЭВ	500 ЭВ	-	14-279 14-60-279	ПРИСЕТОН ГАММА-ТЕС
3	КЛ(LI)	1.3 см ³ ПЛАНАРНЫЙ	8 мм	1500 В	-	600 ЭВ	1.6 КЭВ	14-600 14-80-300-600	ЛЭЦ - ОИЯИ
4	КЛ(LI)	200 мм ² x 5 мм ПЛАНАРНЫЙ	5 мм	1000 В	240 ЭВ	550 ЭВ	1.6 КЭВ	14-600 14-80-300-600	ОИЯИ
5	КЛ	300 мм ² x 7 мм ПЛАНАРНЫЙ	7 мм	1500 В	250 ЭВ	550 ЭВ	-	14-600 14-80-300-600	ПРИСЕТОН ГАММА-ТЕС
6	КЛ(LI)	11 см ³ ПЛАНАРНЫЙ	12 мм	2500 В	-	1.3 КЭВ	2.2 КЭВ П/К-10/1	59-2750 59-250-700-2750	ЛЭЦ - ОИЯИ
7	КЛ(LI)	37 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ²	15 мм	3000 В	-	1.5 КЭВ	2.1 КЭВ П/К-20/1	72-2750 72-390-1115-2750	ЛЭЦ - ОИЯИ
8	КЛ(LI)	38 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ¹	16 мм	3000 В	-	0.9 КЭВ	1.9 КЭВ П/К-25/1	59-2750	ЛЭЦ - ОИЯИ
9	КЛ(LI)	48 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ¹	18 мм	2000 В	-	1.6 КЭВ	2.3 КЭВ П/К-26/1	82-2750 82-390-834-2750	ЛЭЦ - ОИЯИ
10	КЛ(LI)	50 см ³ КОАКСИАЛЬНЫЙ ¹	18 мм	3000 В	-	1.4 КЭВ	2.1 КЭВ П/К-35/1	120-2750 120-350-834-2750	ОИЯИ

Радиоактивные источники изготавливались на алюминиевой подложке толщиной 18 мм путем выпаривания или с помощью электромагнитного масс-сепаратора^{4/}. Лицевая часть покрывалась защитной полиэтиленовой пленкой толщиной 11 ± 3 мг/см². Исходная активность поставлялась В/О "Изотоп" или получалась в результате облучения танталовой мишени на внутреннем пучке синхротрона ОИЯИ с последующим радиохимическим выделением фракций гадолия, иттербия и лантана^{5/}.

II. НОРМАЛИ ЭНЕРГИЙ ГАММА-ЛУЧЕЙ

В качестве нормалей третьего порядка использованы энергии (табл.2) гамма-лучей ^{182}Ta и ^{192}Ir /6/, измеренные с помощью кристалл-дифракционного спектрометра в предположении

$$(4\text{II}.8 - ^{198}\text{Hg}) = 4\text{II}.794 \pm 0.007 \text{ кэВ.} \quad (\text{I})$$

Для сравнения в этой же таблице приведены энергии, рекомендованные другими авторами, а также данные контрольного эксперимента, полученные с помощью построенного нами набора нормалей энергий. Данные табл.2 являются поводом для многих размышлений, связанных с выбором нормалей энергий. Ряд расхождений говорит о наличии ошибок в экспериментах с кристалл-дифракционными спектрометрами (см. колонки 1, 2 и 3). Надо помнить, что ΔE включает погрешность нормали второго порядка (^{198}Hg) и это значение может создавать иллюзию сходимости энергий в пределах погрешности. Особое внимание следует уделить переходу с энергией 588 кэВ (^{192}Ir) - приведенное значение в /6/ (колонка 1) можно рассматривать как промах.

Табл.2. Энергии гамма-лучей ^{182}Ta и ^{192}Ir : $\Delta E'$ - относительная погрешность ($\alpha_4 = 0$ /3/); ΔE - полная погрешность ($\alpha_4 = 17 \cdot 10^{-6} E$). Литературные источники: 1 - /6/; 2 - /7/; 3 - /8/; 4 - /9/.

ИЗЛУЧЕНИЕ	1			2		3		4		5	
	E	ΔE	$\Delta E'$	E	ΔE	E	ΔE	E	ΔE	E	ΔE
^{182}Ta	31.7370	0.0004	0.0007	31.736	0.001	-	-	-	-	-	-
	42.7143	0.0006	0.0009	42.715	0.002	-	-	-	-	-	-
	65.7219	0.0006	0.0013	65.722	0.002	-	-	-	-	-	-
	67.7496	0.0006	0.0013	-	-	67.750	0.001	-	-	-	-
	84.6802	0.0008	0.0016	84.680	0.002	84.680	0.002	-	-	84.681	0.003
	100.1067	0.0009	0.0019	100.103	0.002	100.105	0.001	-	-	100.105	0.002
	113.6677	0.0011	0.0022	113.673	0.003	113.673	0.002	-	-	113.672	0.008
	116.4172	0.0011	0.0023	116.416	0.004	116.418	0.002	-	-	116.413	0.003
	152.4298	0.0013	0.0029	152.431	0.003	152.434	0.002	-	-	152.427	0.003
	156.3819	0.0014	0.0030	156.391	0.004	156.387	0.002	-	-	156.380	0.005
	179.3995	0.0016	0.0034	179.395	0.005	179.393	0.003	-	-	179.388	0.003
	198.3478	0.0017	0.0038	198.361	0.008	198.356	0.002	-	-	198.349	0.007
	222.1037	0.0019	0.0042	222.107	0.005	222.110	0.003	-	-	222.102	0.006
	229.3162	0.0025	0.0052	229.321	0.008	229.322	0.006	-	-	229.316	0.005
	264.0697	0.0022	0.0050	264.072	0.005	264.072	0.006	-	-	264.069	0.005
^{192}Ir	136.3480	0.0007	0.0024	-	-	-	-	-	-	-	-
	295.9483	0.0014	0.0052	295.942	0.009	295.949	0.006	295.949	0.004	295.946	0.005
	308.4464	0.0016	0.0054	308.430	0.010	308.445	0.007	308.444	0.005	308.445	0.006
	316.4977	0.0014	0.0052	316.487	0.010	316.497	0.007	316.496	0.005	316.495	0.006
	416.4501	0.0035	0.0079	-	-	416.450	0.008	-	-	416.454	0.014
	468.0546	0.0021	0.0082	468.059	0.014	468.062	0.010	-	-	468.056	0.009
	588.5562	0.0034	0.0106	588.567	0.017	588.572	0.012	588.566	0.008	588.572	0.012
	604.3942	0.0026	0.0106	604.396	0.017	604.401	0.012	604.393	0.008	604.394	0.012
	612.4460	0.0026	0.0106	612.446	0.017	612.450	0.013	612.445	0.008	612.446	0.013
	884.5037	0.0044	0.0156	-	-	884.523	0.018	884.514	0.012	-	-

Нормали энергий выше 600 кэВ создавались с использованием значений энергий переходов, полученных суммированием конкурирующих каскадных переходов (с учетом отдачи ядра) для нуклидов с хорошо исследованными схемами распада (табл.3). Верхняя граница энергий 600 кэВ (табл.2) накладывает ограничение 1200 кэВ для двух-каскадных переходов. Таким образом, возможными энергетическими диапазонами являются 1000, 2000 и 4000 кэВ. К сожалению, число конкурирующих каскадов для нуклидов с достаточно простыми спектрами и удобными в работе периодами полураспада ограничено. Поэтому мы использовали также факт сохранения нелинейности спектрометра при изменении коэффициента усиления с помощью частотно-независимого аттенуатора^{12/}.

Табл.3. Энергии гамма-лучей, полученные с помощью конкурирующих каскадных переходов. Обозначения: E(1) и E(2)- каскадные гамма-лучи; E(K) -расчетное значение прямого гамма-перехода; E(П)- измеренное значение прямого гамма-перехода; E- принятое значение прямого гамма-перехода; Ф- обозначение большей из ошибок α_1 и α_2 ^{13/}. Данные приводятся с учетом отдачи ядра.

НУКЛИД	E(1)	Ф(1)	E(2)	Ф(2)	E(K)	Ф(K)	E(П)	Ф(П)	E	Ф
169Tb	109.784	0.004	197.948	0.032	307.732	0.006				
75Se	130.525	0.004	177.208	0.033	307.733	0.006	307.721	0.006	307.730	0.006
	96.734	0.004	303.908	0.038	400.642	0.009				
	121.117	0.002	279.535	0.033	400.652	0.004				
173La	136.000	0.003	264.652	0.001	400.652	0.003	400.646	0.004	400.650	0.003
	286.369	0.005	350.750	0.005	636.119	0.007				
	179.363	0.004	456.771	0.036	636.134	0.007				
95m Tc	204.119	0.003	582.068	0.005	636.133	0.007	786.194	0.007	636.129	0.013
95 Tc	204.119	0.003	616.497	0.019	786.194	0.006	820.640	0.013	786.188	0.015
134Cs	569.322	0.005	795.856	0.008	820.614	0.013	820.640	0.013	820.632	0.019
	563.231	0.005	801.943	0.016	1365.173	0.011				
110m Ag	620.353	0.017	763.936	0.013	1365.173	0.017	1365.180	0.011	1365.177	0.007
	677.613	0.036	705.672	0.037	1384.285	0.021				
	446.802	0.013	937.507	0.034	1384.286	0.019				
110m Ag	687.744	0.005	818.028	0.019	1475.777	0.023	1384.274	0.007	1384.279	0.010
110m Ag	687.001	0.012	818.028	0.019	1505.043	0.023	1475.781	0.010	1475.778	0.008
110m Ag	620.353	0.017	894.695	0.004	1505.043	0.023	1505.043	0.023	1505.028	0.009
	877.613	0.006	894.695	0.004	1562.293	0.023				
	744.271	0.012	818.028	0.019	1562.302	0.008	1562.319	0.020	1562.308	0.007
144Ce	696.492	0.010	1489.132	0.017	2185.617	0.020				
58Co	1238.271	0.008	1360.269	0.017	2598.450	0.019	2598.429	0.013	2598.436	0.011
88Zr	898.048	0.014	1836.074	0.006	2794.103	0.016			2734.103	0.016
58Co	1238.271	0.008	2015.196	0.027	3253.423	0.028	3253.410	0.019	3253.414	0.016

Процедура построения полного набора нормалей энергий состояла в следующем:

а) Диапазон до 260 кэВ. Выбор такой энергетической области связан со стремлением снизить значения погрешностей при оптимальном выборе коэффициента усиления для спектрометров с высоким энергетическим разрешением^{/2/}.

б) Диапазон до 600 кэВ. Использован полный набор данных табл.2. Типичный аппаратурный спектр показан на рис.2. С помощью конкурирующих каскадных переходов определены энергии трех прямых переходов: 636, 786 и 820 кэВ (табл.3).

в) Диапазон до 820 кэВ. В рабочей по каналам области спектрометра измерялись гамма-лучи до 612 кэВ (см. табл.2), исследовалась нелинейность и проводилась ее аппроксимация полиномом^{/3/}. Затем коэффициент усиления изменялся так, что в рабочей области укладывался энергетический диапазон рассчитанных прямых переходов до 820 кэВ (табл.3). Завершение этого этапа позволило определить энергии четырех прямых переходов (1365, 1384, 1475 и 1505 кэВ - табл.3).

г) Диапазон до 1505 кэВ. Уточнены и определены энергии девяти прямых переходов: 786, 820, 1365, 1384, 1475, 1505, 1562, 2185 и 2598 кэВ (табл.3). Затем все измерения, проведенные до этого момента, были перекалиброваны с помощью уточненных данных табл. 3. Типичный аппаратурный спектр показан на рис.3.

д) Диапазон выше 1500 кэВ. Измерения проводились в трех этапах: до 2185, 2598 и 3500 кэВ (табл. 3). Типичный аппаратурный спектр показан на рис.4.

Проведено более 800 серий измерений на различных детекторах, спектрометрических трактах и при разных коэффициентах усиления. При этом учитывались эффекты, искажающие форму аппаратурного спектра^{/2/}. Результаты экспериментов приведены в табл.4. Следующим^{/7/}, мы приводим порядки нормалей. Нормали 4-го порядка получены в непосредственном сравнении с данными^{/6/}. Нормали 5-го порядка получены в сравнении с нормальми 3-го и 4-го порядков. Знак + указывает на то, что значение энергии получено путем суммирования энергий конкурирующих каскадных переходов.

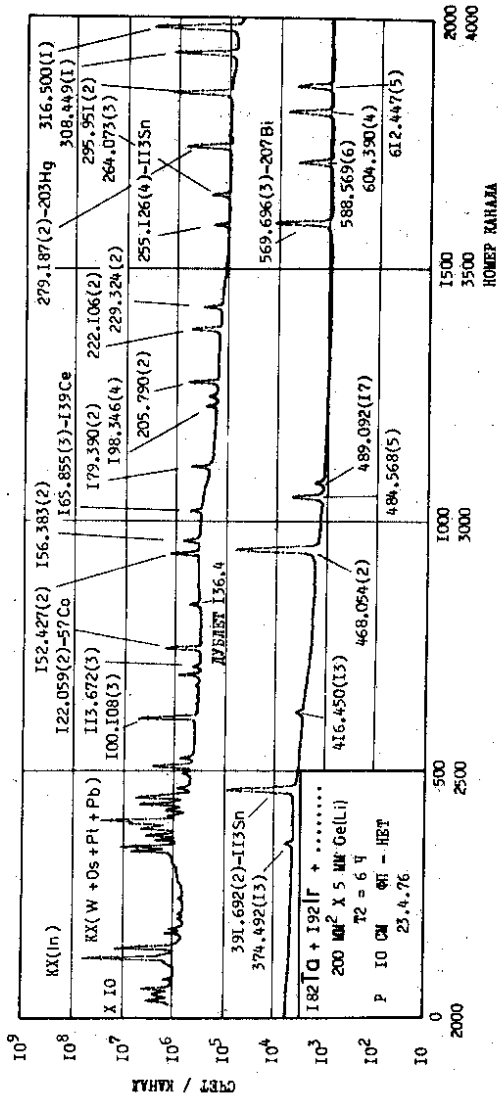


Рис. 2. Аппаратурный гамма-спектр в диапазоне до 600 кэВ. Приведены полученные в данном эксперименте значения энергий и их (в скобках) погрешности.

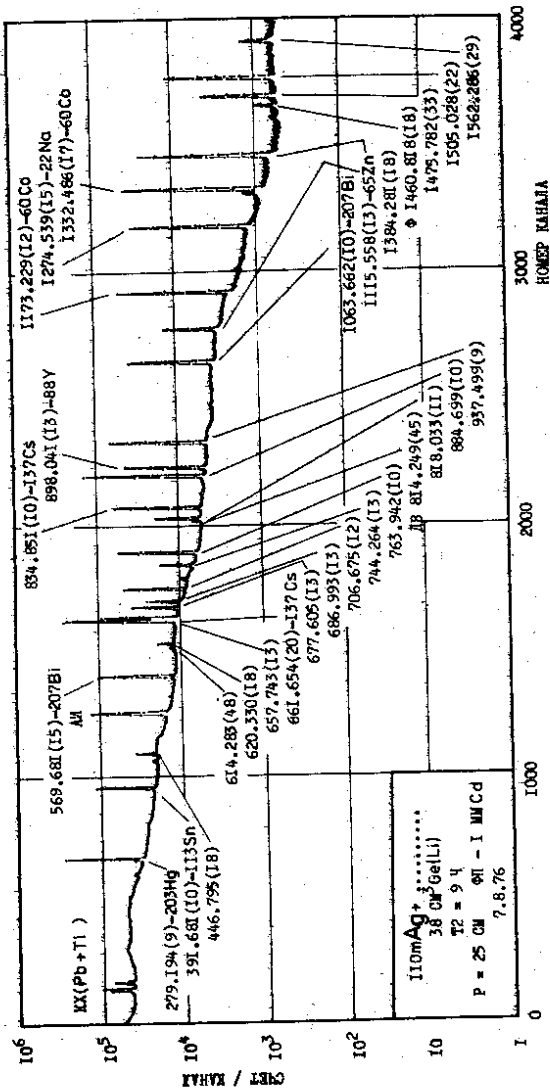


Рис. 3. Аппаратурный гамма-спектр в диапазоне до 1505 кэВ. Приведены полученные в данном эксперименте значения энергий и их (в скобках) погрешности.

Табл. 4. Нормалы энергий гамма-лучей радиоактивных нуклидов. Обозначения:
 $\Phi 1 = \alpha 1$, $\Phi 2 = \alpha 2$, см. /3/; Q - порядок нормалы; q - число серий измерений.

НУКЛИД	Q	q	E	$\Phi 1$	$\Phi 2$	ΔE	НУКЛИД	Q	q	E	$\Phi 1$	$\Phi 2$	ΔE
182Th	3	1	31,7370	-	-	0,0007	182Th	3	3	222,1037	-	-	0,0042
182Th	3	6	42,7143	0,002	-	0,0009	182Th	3	3	223,3182	0,002	0,003	0,0062
182Th	3	1	59,538	-	-	0,003	182Th	3	3	233,600	0,001	0,004	0,006
182Th	3	1	63,1182	-	-	0,0011	182Th	3	3	245,133	0,007	0,006	0,008
182Th	3	1	65,7219	-	-	0,0013	182Th	3	3	261,056	0,007	0,006	0,012
182Th	3	1	67,7496	-	-	0,0013	182Th	3	3	264,0711	0,001	0,001	0,0090
182Th	3	1	84,2517	-	-	0,0016	182Th	3	3	272,111	0,001	0,002	0,006
182Th	3	1	86,790	0,001	0,001	0,002	182Th	3	3	276,397	0,003	0,007	0,008
182Th	3	1	88,032	0,001	0,003	0,003	182Th	3	3	279,189	0,001	0,003	0,006
182Th	3	1	97,423	0,002	0,004	0,004	182Th	3	3	279,535	0,001	0,003	0,006
182Th	3	1	97,423	0,001	0,002	0,002	182Th	3	3	285,369	0,001	0,006	0,007
182Th	3	1	100,181	0,001	0,002	0,002	182Th	3	3	285,9483	0,002	0,003	0,0062
182Th	3	1	103,187	0,001	0,004	0,004	182Th	3	3	288,571	0,002	0,003	0,006
182Th	3	1	103,187	0,001	0,002	0,002	182Th	3	3	302,850	0,002	0,003	0,006
182Th	3	1	116,4172	-	-	0,0025	182Th	3	3	307,930	0,004	0,006	0,010
182Th	3	1	118,191	0,001	0,004	0,004	182Th	3	3	316,4877	0,001	0,003	0,0064
182Th	3	1	121,117	0,001	0,002	0,002	182Th	3	3	324,267	0,002	0,003	0,007
182Th	3	1	121,7820	0,001	0,001	0,001	182Th	3	3	325,768	0,004	0,006	0,011
182Th	3	1	122,080	0,001	0,004	0,004	182Th	3	3	333,631	0,003	0,002	0,008
182Th	3	1	130,525	0,001	0,001	0,001	182Th	3	3	339,688	0,002	0,007	0,010
182Th	3	1	133,518	0,001	0,003	0,003	182Th	3	3	400,650	0,006	0,006	0,008
182Th	3	1	136,000	0,001	0,004	0,004	182Th	3	3	411,084	0,005	0,007	0,009
182Th	3	1	136,478	-	-	0,0029	182Th	3	3	416,4501	0,005	0,003	0,0079
182Th	3	1	152,3578	0,001	0,004	0,004	182Th	3	3	443,940	0,004	0,013	0,016
182Th	3	1	152,3578	0,001	0,003	0,003	182Th	3	3	446,802	0,004	0,013	0,016
182Th	3	1	171,412	0,001	0,004	0,004	182Th	3	3	468,0546	0,004	0,006	0,012
182Th	3	1	177,208	0,001	0,003	0,003	182Th	3	3	563,231	0,003	0,003	0,012
182Th	3	1	179,363	0,001	0,004	0,004	182Th	3	3	569,683	0,001	0,006	0,012
182Th	3	1	179,363	0,003	0,004	0,004	182Th	3	3	588,5562	0,001	0,006	0,0106
182Th	3	1	197,026	0,001	0,002	0,002	182Th	3	3	604,3942	-	-	-
182Th	3	1	197,026	0,003	0,004	0,004	182Th	3	3	-	-	-	-
182Th	3	1	198,3478	0,001	0,002	0,002	182Th	3	3	-	-	-	-
182Th	3	1	198,3478	0,002	0,003	0,003	182Th	3	3	-	-	-	-
182Th	3	1	215,641	0,001	0,002	0,002	182Th	3	3	-	-	-	-

Табл. 4. Продолжение

НУМЕРА	q	Р	Φ1	Φ2	ΔE
134Ср	11	604,707	0,001	0,007	0,014
135Лр	9	612,4460	-	0,0106	0,021
110МА\$	8	620,353	0,005	0,017	0,021
123ЛУ	8	636,129	0,004	0,007	0,013
110МА\$	8	657,744	0,002	0,005	0,014
137Ср	11	661,648	0,002	0,005	0,015
110МА\$	9	677,613	0,003	0,012	0,018
110МА\$	10	687,001	0,004	0,010	0,016
144Ср	9	686,492	0,002	0,007	0,015
110МА\$	10	706,572	0,003	0,012	0,019
110МА\$	9	744,271	0,003	0,013	0,020
152Ел	9	763,936	0,003	0,009	0,017
95МАС	9	778,914	0,005	0,006	0,015
130Ср	10	786,188	0,005	0,005	0,016
130Ср	9	793,856	0,004	0,013	0,020
110МА\$	9	801,257	0,004	0,013	0,020
95МАС	14	804,826	0,004	0,012	0,019
95МАС	15	846,772	0,004	0,016	0,025
95МАС	15	847,856	0,006	0,016	0,026
150Ср	9	867,383	0,006	0,016	0,026
150Ср	9	884,5037	0,002	0,014	0,0156
191Лр	11	884,635	0,004	0,014	0,023
188У	11	888,048	0,026	0,008	0,023
152Ел	9	919,472	0,003	0,004	0,017
152Ел	8	937,507	0,003	0,009	0,018
152Ел	8	964,070	0,024	0,009	0,020
56Ср	10	1005,235	0,003	0,006	0,014
207Р1	14	1007,841	0,002	0,009	0,019
152Ел	18	1063,660	0,004	0,009	0,021
152Ел	7	1089,725	0,004	0,008	0,021
152Ел	7	1112,065	0,004	0,010	0,024
152Ел	8	1115,555	0,004	0,004	0,020
182Ел	8	1121,290	0,004	0,004	0,020
60Ср	8	1173,236	0,006	0,010	0,023

НУМЕРА	q	Р	Φ1	Φ2	ΔE
1175,095	11	1175,095	0,006	0,025	0,039
1189,034	8	1189,034	0,004	0,010	0,024
1212,895	8	1212,895	0,004	0,010	0,024
1221,391	8	1221,391	0,004	0,005	0,023
1230,988	8	1230,988	0,004	0,007	0,023
1238,271	18	1238,271	0,003	0,008	0,023
1257,416	8	1257,416	0,007	0,015	0,027
1273,711	8	1273,711	0,014	0,014	0,027
1274,531	8	1274,531	0,004	0,006	0,027
1288,119	8	1288,119	0,007	0,014	0,027
1293,109	8	1293,109	0,007	0,014	0,027
1332,466	8	1332,466	0,006	0,007	0,026
1363,177	8	1363,177	0,006	0,007	0,026
1383,279	15	1383,279	0,005	0,002	0,025
1407,778	15	1407,778	0,005	0,002	0,027
1489,132	10	1489,132	0,009	0,009	0,028
1505,028	10	1505,028	0,006	0,017	0,031
1562,303	10	1562,303	0,007	0,006	0,028
1770,347	6	1770,347	0,007	0,013	0,034
1810,768	13	1810,768	0,006	0,023	0,039
1836,760	7	1836,760	0,018	0,052	0,051
1963,760	7	1963,760	0,008	0,052	0,051
2015,156	10	2015,156	0,018	0,059	0,068
2034,772	13	2034,772	0,018	0,057	0,068
2113,154	13	2113,154	0,009	0,020	0,045
2186,607	7	2186,607	0,030	0,036	0,041
2212,859	7	2212,859	0,013	0,033	0,041
2698,456	7	2698,456	0,016	0,033	0,041
3009,567	7	3009,567	0,011	0,010	0,047
3201,964	7	3201,964	0,013	0,010	0,047
3273,000	7	3273,000	0,016	0,016	0,040
3451,173	7	3451,173	0,024	0,024	0,043

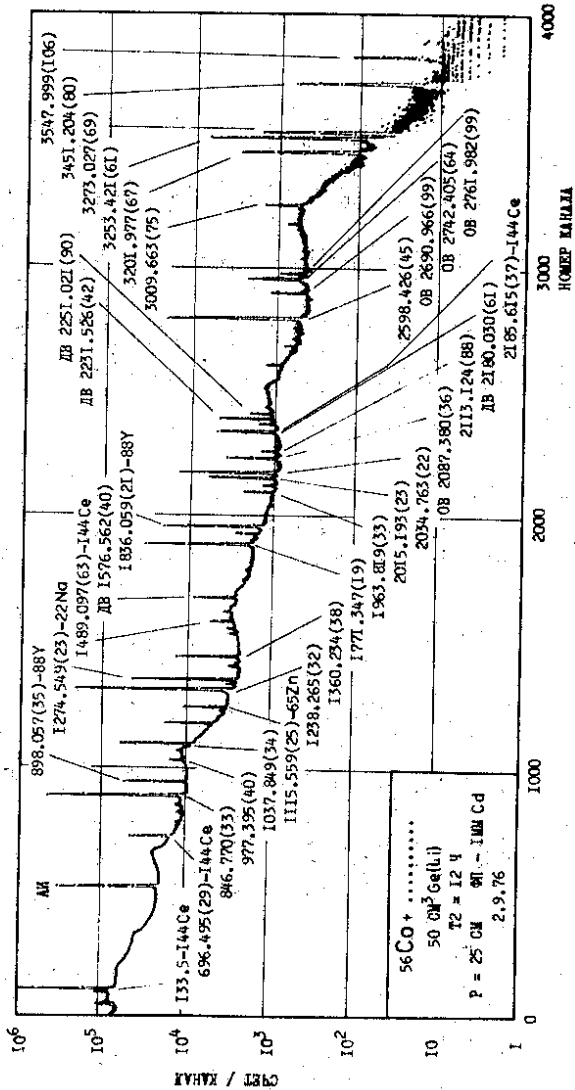


Рис. 4. Аппаратурный гамма-спектр в диапазоне до 3500 кэВ. Приведены полученные в данном эксперименте значения энергий и их (в скобках) погрешности.

Проверка надежности нормалей энергий до 600 кэВ проводилась путем решения обратной задачи - измерения энергий гамма-лучей ^{182}Ta и ^{192}Ir с помощью данных табл. 4. Результаты трех серий измерений приведены в табл.2 (колонка 5). Они говорят о хорошей сходимости наших данных с рекомендованными. Проверка надежности в более широкой области проводилась с помощью конкурирующих прямых и каскадных переходов (конечно, в пределах только α_1 или α_2 ^{13/}) для нуклидов с хорошо исследованными схемами распада. Данные о 45 каскадных переходах для II нуклидов приведены в табл.5. Из приведенных результатов 71% (32 каскада) совпадают в пределах σ , 96% (43 каскада) - в пределах 2σ , 98% (44 каскада) - в пределах 3σ . Этот факт можно толковать как подтверждение правильности модели расчета погрешностей.

Отметим, что ранее предлагалось применять пики одиночного (ОВ) и двойного (ДВ) вылетов для прецизионных измерений энергий высокоэнергетических гамма-переходов. Мы провели 6 серий измерений спектра гамма-лучей ^{56}Co - табл.6. Очевидно, что сложные кинематические процессы в электрическом поле детектора при регистрации пары электрон-позитрон являются источником систематических ошибок. Кстати, полученные значения энергий гамма-переходов с помощью пиков ДВ для ^{56}Co совпадают со значениями, рекомендованными в /10/.

Значения некоторых нормалей энергий, рекомендованные разными авторами, сравниваются в табл.7. Соотношение же двух полных наборов нормалей (предлагаемых в настоящей работе и в ^{14/}), иллюстрируется рис.5. Как видно, с ростом энергий наблюдается систематическая расхожимость данных, доходящая до 100 эВ. Разумеется, этот результат может быть комментирован. Здесь нам кажется целесообразнее отметить лишь тот факт, что такую расхожимость при необходимости легко можно учесть позднее, если будет доказана правильность какого-либо набора.

Табл. 5. Энергии гамма-лучей, полученные с помощью конкурирующих каскадных переходов и измеренные с помощью нормальной энергии (табл.4). Обозначения в подписи к табл.3. Проводился учет энергии отдачи ядра.

ИЗЛОЧЕНИЕ	E(I)	φ(I)	E(2)	φ(2)	E(K)	φ(K)	E(Π)	φ(Π)	E(K) - E(Π)	
56 Co	1238.271	0.006	1360.209	0.017	2598.450	0.019	2598.429	0.013	-0.021	0.023
	1238.271	0.008	2015.196	0.027	3253.423	0.028	3253.410	0.019	-0.013	0.034
	1238.271	0.008	2034.769	0.033	3272.995	0.033	3273.000	0.022	+0.006	0.040
75 Se	96.734	0.004	303.908	0.008	400.642	0.004	400.646	0.006	+0.004	0.007
	121.117	0.002	279.535	0.003	400.652	0.003	400.646	0.006	-0.006	0.007
	136.000	0.003	264.652	0.001	400.652	0.003	400.646	0.006	-0.006	0.007
95m Tc	204.119	0.003	582.068	0.005	786.184	0.006	786.194	0.007	+0.010	0.009
	204.119	0.003	616.497	0.019	820.640	0.013	820.640	0.013	0.000	0.018
110mAg	657.744	0.005	818.028	0.019	1475.777	0.020	1475.781	0.010	+0.004	0.022
	620.353	0.017	884.695	0.004	1505.024	0.017	1505.028	0.011	+0.004	0.022
	687.001	0.012	818.028	0.019	1505.043	0.023	1505.028	0.011	-0.015	0.025
	677.613	0.006	884.695	0.004	1562.293	0.008	1562.319	0.020	+0.026	0.022
	744.271	0.012	818.028	0.019	1562.302	0.023	1562.302	0.023	+0.017	0.030
	620.353	0.017	763.936	0.013	1384.285	0.021	1384.274	0.037	-0.011	0.022
	677.613	0.006	706.672	0.027	1384.280	0.009	1384.274	0.037	-0.006	0.011
	446.802	0.013	937.507	0.004	1384.306	0.014	1384.274	0.037	-0.031	0.016
134Cs	475.350	0.006	563.231	0.006	1038.580	0.008	1038.608	0.013	+0.028	0.015
	563.231	0.006	604.707	0.008	1167.937	0.010	1167.946	0.014	+0.008	0.017
	569.322	0.006	795.866	0.009	1365.177	0.011	1365.180	0.011	+0.003	0.016
563.231	0.006	801.943	0.016	1365.173	0.017	1365.180	0.011	+0.007	0.020	
140La	328.763	0.004	487.012	0.010	815.773	0.011	815.770	0.015	-0.003	0.019
152Eu	121.782	0.002	964.070	0.006	1086.851	0.007	1086.835	0.009	-0.016	0.012
	244.691	0.004	867.383	0.006	1112.073	0.007	1112.065	0.010	-0.008	0.012
	443.940	0.005	964.070	0.006	1408.008	0.008	1407.974	0.009	-0.034	0.012
	244.691	0.004	1212.895	0.010	1457.592	0.011	1457.590	0.009	+0.002	0.036
367.768	0.014	411.084	0.007	778.850	0.016	778.914	0.009	+0.064	0.019	
169Yb	109.784	0.004	197.948	0.002	307.732	0.005	307.721	0.006	-0.011	0.008
	130.525	0.004	177.208	0.003	307.733	0.006	307.721	0.006	-0.012	0.008
171Lu	72.382	0.006	667.357	0.010	739.738	0.012	739.747	0.018	+0.009	0.022
	72.382	0.006	780.656	0.022	863.038	0.023	863.033	0.018	-0.005	0.029
173Lu	78.651	0.006	100.719	0.006	179.370	0.008	179.363	0.004	-0.007	0.009
	100.719	0.006	171.402	0.003	272.120	0.007	272.111	0.002	-0.009	0.007
	171.402	0.003	179.363	0.004	350.764	0.005	350.750	0.005	-0.014	0.007
	171.402	0.003	286.369	0.005	456.771	0.006	456.769	0.006	-0.002	0.014
	100.719	0.006	456.769	0.013	557.468	0.014	557.466	0.016	-0.008	0.021
	286.369	0.005	350.750	0.006	636.120	0.007	636.129	0.007	+0.009	0.010
	456.769	0.013	179.363	0.004	636.132	0.014	636.129	0.007	-0.003	0.016
	557.466	0.016	78.651	0.006	636.136	0.017	636.129	0.007	-0.007	0.018
	100.105	0.002	1189.034	0.004	1289.139	0.005	1289.119	0.014	-0.020	0.015
	100.105	0.002	1187.308	0.022	1257.410	0.022	1257.416	0.015	+0.006	0.027
229.316	0.005	928.023	0.042	1157.338	0.043	1157.308	0.022	-0.030	0.046	
229.316	0.005	1001.705	0.006	1231.018	0.008	1230.988	0.007	-0.020	0.011	
84.661	0.003	1189.034	0.004	1273.714	0.006	1273.711	0.014	-0.003	0.007	
116.413	0.003	1187.308	0.022	1273.716	0.022	1273.711	0.014	-0.006	0.026	
152.427	0.003	1121.290	0.004	1273.717	0.026	1273.711	0.014	-0.006	0.015	

Табл. 6. Энергии гамма-лучей, полученные с помощью пиков полного поглощения (ФП), одиночного (ОВ) и двойного (ДВ) вылетов.

Е(ДВ)	Ф(ДВ)	Е(ОВ)	Ф(ОВ)	Е	Ф
749.448	0.041	1260.320	0.052	1771.450	0.041 ДВ
				1771.321	0.052 ОВ
				1771.347	0.023 ФП
1576.530	0.042	2087.424	0.046	2598.532	0.042 ДВ
				2598.425	0.046 ОВ
				2598.435	0.011 ФП
2180.148	0.105	2690.970	0.070	3202.150	0.105 ДВ
				3201.971	0.070 ОВ
				3201.987	0.019 ФП
2231.572	0.031	2742.399	0.055	3253.574	0.031 ДВ
				3253.400	0.055 ОВ
				3253.414	0.016 ФП
2251.179	0.047	2761.987	0.107	3273.181	0.047 ДВ
				3272.988	0.107 ОВ
				3273.000	0.022 ФП

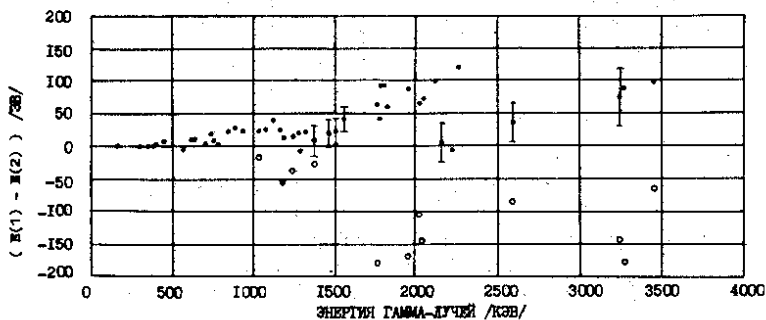


Рис.5. Разность значений нормалей энергий гамма-лучей, рекомендованных в настоящей работе (E(1)) и в ^{1/4} (E(2)). В качестве погрешности приведено значение:

$([\Phi(1)]^2 + [\Phi(2)]^2)^{1/2}$, где погрешность Φ является большей из α_1 или $\alpha_2^{1/3}$.

Табл.7. Нормали энергий гамма-лучей, рекомендованные разными авторами.

НУКЛИД	1		2		3		4	
	E	ΔE	E	ΔE	E	ΔE	E	ΔE
109Cd	88.032	0.003	88.035	0.006	88.037	0.006	88.032	0.002
153Gd	97.432	0.003	97.429	0.003	97.432	0.003	-	-
153Gd	103.181	0.002	103.179	0.004	103.180	0.002	-	-
152Eu	121.782	0.003	121.780	0.004	-	-	-	-
57Co	122.060	0.002	-	-	122.063	0.004	-	-
57Co	136.475	0.005	-	-	136.473	0.004	-	-
139Ce	165.854	0.005	-	-	165.857	0.007	165.853	0.007
160Tb	215.641	0.004	-	-	215.641	0.004	-	-
209Hg	279.189	0.006	279.190	0.009	279.188	0.006	279.190	0.006
160Tb	298.571	0.006	-	-	298.572	0.006	-	-
152Eu	344.267	0.007	344.267	0.010	-	-	-	-
113Sn	391.688	0.011	-	-	391.688	0.010	-	-
207Bi	569.683	0.012	-	-	569.689	0.013	-	-
134Cs	604.707	0.014	604.748	0.030	-	-	-	-
137Cs	661.648	0.014	661.633	0.012	661.638	0.019	-	-
110mAg	763.936	0.020	-	-	763.928	0.019	-	-
54Mn	834.858	0.015	-	-	834.827	0.021	-	-
88Y	898.048	0.023	-	-	898.021	0.019	-	-
207Bi	1063.660	0.019	-	-	1063.635	0.024	-	-
65Zn	1115.555	0.020	-	-	1115.518	0.025	1115.39	0.10
60Co	1173.236	0.023	1173.263	0.040	1173.206	0.025	1173.22	0.08
22Na	1274.531	0.023	-	-	1274.511	0.028	-	-
60Co	1332.485	0.025	1332.524	0.046	1332.464	0.028	1332.52	0.10
144Ce	1489.132	0.031	-	-	1489.124	0.032	-	-
207Bi	1770.253	0.034	-	-	1770.188	0.037	-	-
88Y	1836.074	0.034	-	-	1836.014	0.037	-	-
144Ce	2185.607	0.041	-	-	2185.606	0.046	-	-
56Co	2598.435	0.047	-	-	2598.400	0.053	-	-
56Co	3253.414	0.060	-	-	3253.341	0.065	-	-
56Co	3451.173	0.075	-	-	3451.064	0.069	-	-

1. Настоящая работа.
2. Б.С.Джеленов. Методы разработки сложных схем распада. "Наука", Л., 1974, с.22,
3. R.L.Neath. Gamma-Ray Spectrum Catalogue. ANCR-1000 -2, 1974.
4. J.J.Reidy. "The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy", ed. W.D.Hamilton, N-H PC, 1975, p.839.

III. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАММА-ЛУЧЕЙ РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СПЕКТРОМЕТРОВ.

Для исследования эффективности спектрометров использовались пять различных наборов образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСИ): один, изготовленный специально, имел препараты с активностью 10^6 расп./с; четыре, полученные из В/О "Изотоп", содержали препараты с активностью 10^5 расп./с. Три набора были аттестованы по активности с более высокой точностью во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. Толщина полиэтиленовых пленок, между которыми находился активный слой источников, составляла (11 ± 3) мг/см². Радиоактивные источники, погрешность измерения их активности (ΔA) и выход гамма-лучей на 100 распадов приведены в табл.8. Там же приведены минимальные погрешности для эффективностей, которые можно получить при различных значениях ΔA . Величины $\Delta A = 1,5\%$ относятся к стандартному набору ОСИ для 66% доверительной вероятности. Интенсивности КХ-лучей ^{139}Ce получены в соответствии со схемой распада /11/. Тогда /12/:

$$I_{\text{КХ}}(L_{\alpha}) = I(I65) \left[P_{\text{К}} (1 + \alpha_{\text{T}}(I65)) + \alpha_{\text{К}}(I65) \right] \omega_{\text{К}} \quad (2)$$

Использованы следующие значения: $P_{\text{К}} = 0,68 \pm 0,02 /^{139}\text{Ce}/$;
 $\omega_{\text{К}} = 0,906 \pm 0,026 /^{14}\text{C}/$; $\alpha_{\text{К}} = 0,2142 \pm 0,0015 /^{15}\text{N}/$; $K_{\beta}/K_{\alpha} = 0,242 /^{16}\text{O}/$;
 $\alpha_{\text{T}} = 0,2446 \pm 0,0012 /^{17}\text{O}/$. Здесь $P_{\text{К}}$ и $\alpha_{\text{К}}$ - вероятности электронного захвата и коэффициент внутренней конверсии (КВК) перехода I65 кэВ на К-оболочке; α_{T} - полный КВК перехода I65 кэВ; $\omega_{\text{К}}$ - выход флуоресценции на К-оболочке L_{α} . Суммарная погрешность рассчитана в предположении независимости ошибок.

Для сведения к минимуму возможных систематических ошибок приняты следующие предосторожности:

а) Расстояние источник-ППД выбрано таким, чтобы соблюдались условия точности для калиброванных источников и исключались искажения интенсивностей гамма-лучей за счет истинных и случайных совпадений /2/;

б) Источники устанавливались так, чтобы воспроизводимость телесных углов была лучше 0,3%;

Табл. 8. Радиоактивные источники: погрешность измерения активности ($\Delta A\%$), выход гамма-лучей на 100 распад и минимальные значения погрешности, которые можно получить при измерении эффективности спектрометра. Обозначения:

$$\epsilon_1 \% = \Delta I / I$$

$$\epsilon_2 \% = \left[(\Delta I / I)^2 + (\Delta A)^2 \right]^{1/2}$$

$$\epsilon_3 \% = \left[(\Delta I / I)^2 + (\Delta A = I, 5\%)^2 \right]^{1/2}$$

ИЗУКЛИД	Д-РА	$T_{1/2}$	A%	E	I	ΔI	$\Delta \epsilon_1$	$\Delta \epsilon_2$	$\Delta \epsilon_3$
241Am	I	432.9(8) Г	I	59.54	35.9	0.6	1.7	1.9	2.3
109Cd	2	453.12(18) Д	2.5	22.1 КХ 25.0 КХ 88.03	83.00 17.81 3.79	3.06 0.64 0.07	3.6 3.6 1.8	4.4 4.4 3.1	- - -
57Co	I	269.8(4) Д	I	6.5 КХ 14.41 122.66 136.47	55.3 9.5 85.6 10.75	1.5 0.2 0.4 0.30	2.7 2.1 0.5 2.8	2.9 2.3 1.1 3.0	3.1 2.6 1.6 3.2
139Ce	I	137.2(4) Д	I	33.4 КХ 37.8 КХ 165.85	62.53 15.13 80.35	0.57 0.14 0.08	3.8 3.8 0.1	3.9 3.9 1.0	4.1 4.1 1.5
203Hg	I	46.76(8) Д	1.5	10.3 ЛХ 72.9 КХ 82.5 КХ 279.19	5.63 9.77 2.73 81.55	0.08 0.50 0.20 0.15	1.4 5.1 7.3 0.2	2.1 5.3 7.5 1.5	2.1 5.3 7.5 1.5
113Sn	I	115.2(8) Д	1.5	3.3 ЛХ 24.7 КХ 255.12 391.69	13.5 96.6 1.9 64.4	0.1 0.3 0.1 0.3	0.7 0.3 5.3 0.5	1.7 1.5 5.5 1.6	1.7 1.5 5.5 1.6
137Cs	I	30.18(10) Г	I	4.5 ЛХ 32.1 КХ 36.5 КХ 661.65	1.25 5.67 1.34 85.1	0.01 0.18 0.05 0.5	0.8 3.2 3.7 0.6	1.3 3.3 3.9 1.2	1.7 3.5 4.0 1.6
54Mn	I	312.5(3) Д	0.5	5.5 КХ 834.86	25.0 100	0.2 -	0.8 -	0.9 0.5	1.7 1.5
68Y	I	107.4(8) Д	1.5	14.4 КХ 898.01 1836.07	63.40 91.40 99.40	0.32 0.07 0.07	0.5 0.1 0.1	1.6 1.5 1.5	1.6 1.5 1.5
65Zn	I	245.7(11) Д	I	8.1 КХ 1115.56	35.2 50.6	0.3 0.4	0.9 0.8	1.3 1.3	1.7 1.7
60Co	I	5.275(5) Г	0.5	1173.24 1332.49	99.74 99.85	0.05 0.03	0.1 0.1	0.5 0.5	1.5 1.5
22Na	I	2.602(6) Г	I	1274.53	99.95	0.02	0.1	1.0	1.5
241Pu	3;4	15.030(3) Ч	-	1368.60 2753.97	100 99.85	- 0.02	- 0.02	- -	- -

1. Ц.Вывлов, Л.А.Вывлова и др. Препринт ОИЯИ, Р6-9073, Дубна, 1975.
2. R.J.Gehrke and R.A.Lokken. Nucl.Instr. and Meth., 97 (1971) 219.
3. M.J.Martin and P.H.Blichert-Toft. Nucl. Data Tables, A8 (1970) No. 1-2.
4. J.F.Emery, S.A.Reinols and E.I.Wyatt. Nucl.Sci. and Energ., 48 (1972) 319.

в) Для обеспечения минимального искажения интенсивностей гамма-лучей за счет наложений импульсов в аналоговых блоках измерения проводились при $\tau = 0,5 \text{ мкс}^{1/2}$;

г) Чтобы избежать систематической ошибки, связанной со значением $T_{1/2}$, весь цикл измерений проводился в период времени $< T_{1/2}$;

д) Учет мертвого времени ($< 0,5\%$) анализаторов проводился с помощью таймерной системы "ДИДАК" и "ТРИДАК-Ц". Кроме того, когда было возможно, применялась аналоговая дискриминация верхней и нижней частей спектра (относительно исследуемого пика) в АЦП;

е) При обработке спектральных линий с помощью ЭВМ^{1/2} особое внимание обращалось на задание начальных приближений. Сложные рентгеновские линии обрабатывались неоднократно разными экспериментаторами.

Полученные в этих условиях экспериментальные значения эффективности спектрометров (табл.9) приведены на рис.6. Непрерывной линией показан результат аппроксимации с помощью полинома:

$$\ln \varepsilon_j = \sum_{i=1}^M C(i) (\ln E_j)^{i-1} \quad (3)$$

Особо следует отметить трудности, связанные с выбором области аппроксимации. В основном они обусловлены сложным процессом регистрации гамма-лучей с помощью $G_e(Li)$ -детекторов в области от 100 до 400 кэВ, когда идет сильная конкуренция между фотоэффектом и процессом многократного рассеяния в чувствительном объеме ППД. Трудности усугубляются еще тем, что в этой энергетической области нет достаточного количества калиброванных по активности источников. Это замечание относится также и к энергетической области 35-120 кэВ. В результате тщательного анализа различных вариантов аппроксимация экспериментальных значений эффективности спектрометров велась в областях, приведенных в табл.1. Заметим, что на сильный излом в области 200-400 кэВ указывалось и в ^{1/18}, где эффективность $G_e(Li)$ -детекторов определялась полуэмпирическим путем.

Табл. 9. Экспериментальные значения эффективности, их аппроксимация полиномом (3), разность экспериментальных и расчетных значений эффективности для спектрометров.

λ/μм	λ/мкм	80 мк² X 4 мм Si(Li)		I.3 см² Ge(Li)		II см² Ge(Li)		37 см² Ge(Li)	
		ε (ЭФЭП)	ε (РАСУ)	ε (ЭФЭП)	ε (РАСУ)	ε (ЭФЭП)	ε (РАСУ)	ε (ЭФЭП)	ε (РАСУ)
5.6	56	3.453(-3)	5.526(-3)	6.323(-4)	5.043(-4)	1.186	1.186	3.354	3.354
10.3	103	4.408(-3)	3.031(-3)	7.9	6.988	1.857	1.857	5.104	5.104
14.1	141	5.079(-3)	4.586(-3)	7.4	7.445	2.476	2.476	6.124	6.124
22.1	221	5.184(-3)	5.134(-3)	1.6	1.6	3.776	3.776	7.550	7.550
24.7	247	3.761(-3)	3.618(-3)	3.6	3.6	4.241	4.241	8.124	8.124
26.2	262	4.1	3.84	0	0	4.276	4.276	8.124	8.124
37.7	377	4.61	3.97	0.0235	0.0235	4.526	4.526	8.124	8.124
56.5	565	5.740(-4)	5.725(-4)	0.5	0.5	6.434	6.434	11.856	11.856
82.9	829	7.839(-4)	7.833(-4)	1.3	1.3	6.434	6.434	11.856	11.856
122.0	1220	6.212(-5)	5.871(-5)	5.252	5.252	6.434	6.434	11.856	11.856
136.5	1365	4.421(-5)	4.322(-5)	5.2	5.2	6.434	6.434	11.856	11.856
170.0	1700	2.421(-5)	2.548(-5)	5.2	5.2	6.434	6.434	11.856	11.856
213.2	2132	7.422(-6)	4.396(-6)	10.6	10.6	6.434	6.434	11.856	11.856
346.0	3460	1.1	1.1	1.1	1.1	6.434	6.434	11.856	11.856
565.0	5650	1.1	1.1	1.1	1.1	6.434	6.434	11.856	11.856
829.0	8290	1.1	1.1	1.1	1.1	6.434	6.434	11.856	11.856
1174.0	11740	1.1	1.1	1.1	1.1	6.434	6.434	11.856	11.856
1365.0	13650	1.1	1.1	1.1	1.1	6.434	6.434	11.856	11.856
2650.0	26500	1.1	1.1	1.1	1.1	6.434	6.434	11.856	11.856
3770.0	37700	1.1	1.1	1.1	1.1	6.434	6.434	11.856	11.856

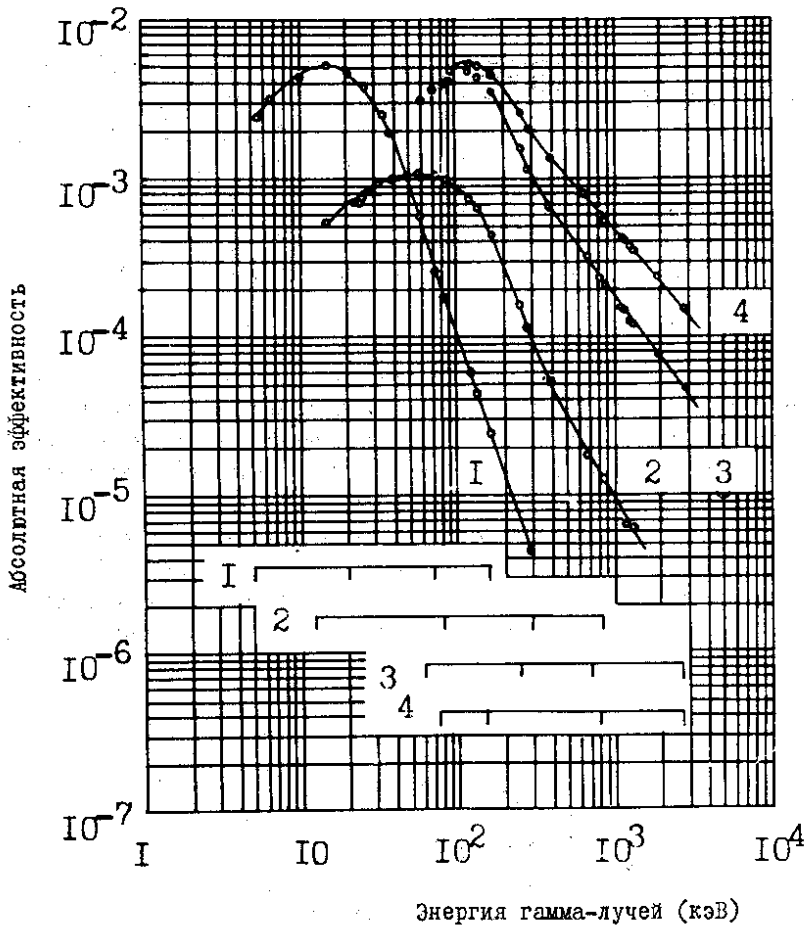


Рис. 6. Экспериментальные значения эффективности гамма-спектрометров по пикам полного поглощения и их аппроксимация полиномом (3) - непрерывная линия. Показаны также области аппроксимации.

Поиск возможных систематических ошибок в методике эксперимента проводился путем сравнения относительных интенсивностей гамма-лучей ряда нуклидов, измеренных на различных ППД. Проведено по 3 серии измерений каждого источника на каждом детекторе. Обработка данных велась по следующим формулам:

$$\nu \text{ \%} = [I(n) - I(m)] \times [I(n)]^{-1} \times 100 \quad (4)$$

$$\Delta \nu \text{ \%} = [\Delta I(n) + \Delta I(m)] \times [I(n)]^{-1} \times 100$$

$$I(N) = \sum w_i I_i \quad \Delta I(N) = \left(\sum w_i \right)^{-1}$$

Здесь $w_i = (\Delta I_i)^{-2}$ - вес i -го измерения; $n = n$ - число измерений на всех детекторах; $m = m$ - число измерений на данном детекторе; $I(n)$ и $I(m)$ - относительные интенсивности, полученные с помощью всех или только данного детектора, соответственно. Результаты расчета для двух детекторов иллюстрируются рис.7. Как видно, максимальные отклонения доходят до $(3 \pm 1)\%$. Считая, что распределение отклонений равномерно от 0 до 3%, можно предположить ($/7/$ -стр.154), что систематическая компонента среднеквадратической погрешности ($/3/$ - формула (10)) равна $\chi = 0.6 \nu_{\text{макс}} = 1,8\%$. Напомним, что величина χ для стандартного набора ОСГП равна 1,5% (табл.8).

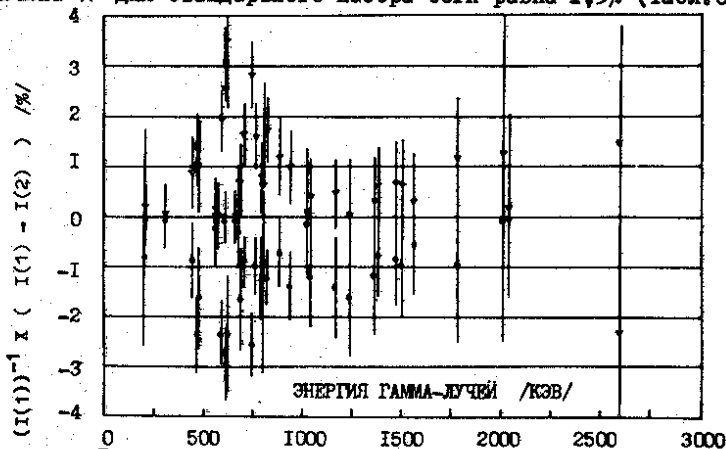


Рис.7. Разность значений относительных интенсивностей для каждого детектора $I(2)$ и всех детекторов $I(1)$. Обозначения: \bullet - ^{37}Ge (Li); ν - ^{113}Ge (Li).

С помощью описанной методики измерены относительные интенсивности гамма-лучей многореперных источников, применяемых для калибровки спектрометров (табл.10). Согласованность этих данных с ранее приведенными нами в работе /3/ иллюстрируется рис.8. Заметим, что любые изменения и уточнения данных как калиброванных по активности источников, так и исследованных препаратов, легко перенести на принятый нами базис. В этом случае достаточно построить отношения:

$$K(E) = [I_1(E) - I_2(E)] \times (I_1(E))^{-1} \quad (5)$$

Далее, значения $K(E)$ аппроксимируют полиномом - это и есть коэффициент коррекции. Здесь $I_1(E)$ - наши данные; $I_2(E)$ - новые, уточненные результаты. Разумеется, желательна перенормировка относительных интенсивностей по переходу, находящемуся в области хорошей сходимости данных.

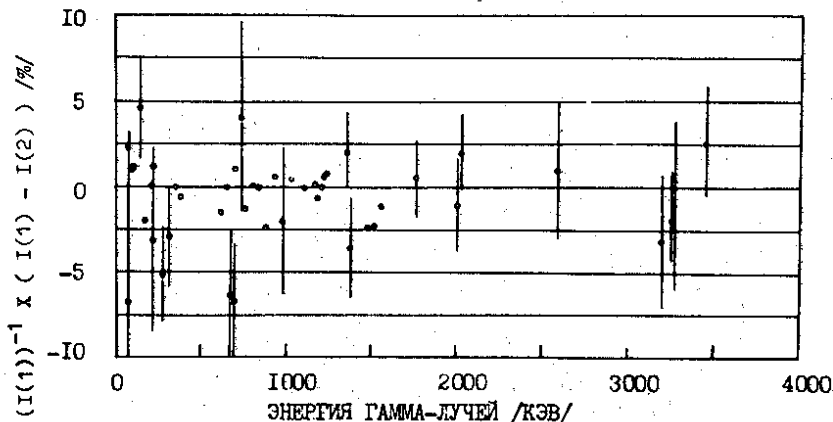


Рис.8. Разность значений относительных интенсивностей гамма-лучей, полученных в настоящей работе $I(1)$ и рекомендованных в /3/. В качестве погрешности приведены значения $[\frac{I(1)}{I(1)}]^2 + [\frac{I(2)}{I(2)}]^2]^{1/2}$. Точки относятся к распаду ^{152}Eu , ^{75}Se , ^{110m}Ag и ^{56}Co .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанной нами методики /1-3/, в предположении $E(4II, 8 - {}^{198}\text{Hg}) = 4II, 794 \pm 0, 007 \text{ кэВ}$ и с использованием пяти калиброванных по активности наборов ОСГИ измерены энергии и относительные интенсивности гамма-лучей радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки гамма-спектрометров (табл.4 и 10). Сводные данные таблиц являются результатом обработки более 3000 аппаратных спектров гамма-лучей.

Несколько замечаний:

а) Измерение энергий гамма-лучей в области меньше 100 кэВ связано со значительными трудностями при выборе нормалей энергии из-за искажения аппаратного спектра характеристическим излучением эталонных нуклидов, а также вылета КХ-лучей в ПНД. Для уменьшения этих искажений необходим тщательный анализ условий эксперимента.

б) Отметим, что в области 35-120 и 200-600 кэВ имеется сравнительно мало переходов, интенсивность которых можно было бы калибровать с высокой точностью. Имеется также и ряд трудностей при использовании ОСГИ в низкоэнергетической области. Поэтому полученные нами относительные интенсивности гамма-лучей мы надеемся исследовать путем детального анализа ряда сравнительно простых схем распада. Очевидно, эта задача связана с разработкой методики прецизионных измерений КВК. В этой связи приведенные нами данные об относительных интенсивностях гамма-лучей следует рассматривать как предварительные.

в) Опыт показал, что исследование нелинейности и эффективности спектрометров, а также планирование экспериментов немислимо без наличия аппаратных спектров гамма-лучей калиброванных источников и полных таблиц их энергий и относительных интенсивностей. Эти данные приведены в /19/.

Считаем своим приятным долгом поблагодарить проф.К.Я.Громова за постоянный интерес к данной работе, Н.А.Лебедева и И.И.Громову - за приготовление источников, Е.Б.Озерова - за большую помощь при обработке экспериментальных данных на ЭВМ, А.И.Иванова, С.К.Васильева и С.Бацева - за содействие и помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ц.Вылов, И.Н.Егошин и др. ОИЯИ, Р6-9071, Дубна, 1975.
2. Ц.Вылов, Л.А.Вылова и др. ОИЯИ, Р6-9072, Дубна, 1975.
3. Ц.Вылов, Л.А.Вылова и др. ОИЯИ, Р6-9073, Дубна, 1975.
4. В.П.Афанасьев, А.Т.Василенко и др. ОИЯИ, 13-4763, Дубна, 1969.
5. Ф.Мольнар, В.Халкин и Э.Херрман. ЭЧАЯ, т.3, вып.4(1973) 1077.
6. R.L.Heath. Gamma-Ray Spectrum Catalogue, ANCR-1000-2, 1974.
7. Б.С.Джелепов. Методы разработки сложных схем распада. "Наука" Л., 1974.
8. W.Beer and J.Kern. Nucl. Instr. and Meth., 117, (1974), 183.
9. H.Inoue and Y.Yoshizawa. Nucl. Instr. and Meth., 108 (1973) 385.
10. J.Kern. Proc. Panel Meeting Charged-Particle Induced Radiative Capture (IAEA, Vienna, 1972).
11. C.M.Lederer, J.M.Hollander and I.Perlman. Tables of Isotopes (Wiley, New York, 1967).
12. R.L.Gehrke and R.A.Lokken. Nucl. Instr. and Meth., 97(1971) 219.
13. A.Marelins, P.Sparrman and S.E.Hangglund. Nucl. Phys., A95
14. W.Bambynek, B.Grasmannebal. Rev. Mod. Phys., 44(1972). ^{(1967) 632.}
15. J.H.Hamilton. In "The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy", ed. W.D.Hamilton, p.490, NHRС, Amsterdam, 1975.
16. G.C.Nelson, B.G.Sandres and S.I.Salem. Atomic Data, 1(1970) 377.
17. J.Legrand et al. Nucl. Instr. and Meth., 112 (1973) 101.
18. F.Harnal and C.Klusek. Nucl. Instr. and Meth., 122 (1974) 183.
19. Ц.Вылов, В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р6-10416, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 февраля 1977 года.