

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



18/IV-77

B-926

P6 - 10416

1426/2-77

Ц.Вылов, В.С.Александров, Ю.А.Андреев,
В.М.Горожанкин, А.И.Иванов, Ш.Оманов,
Б.П.Осипенко, Э.К.Степанов, В.Г.Чумин

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ С ПОМОЩЬЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

6. Гамма-лучи радиоактивных нуклидов,
применяемые для калибровки спектрометров

1977

Р6 - 10416

Ц.Вылов, В.С.Александров,¹ Ю.А.Андреев,²
В.М.Горожанкин,³ А.И.Иванов,¹ Ш.Оманов,⁴
Б.П.Осипенко, Э.К.Степанов,² В.Г.Чумин

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ С ПОМОЩЬЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

6. Гамма-лучи радиоактивных нуклидов,
применяемые для калибровки спектрометров

Направлено в сб. "Прикладная ядерная спектроскопия"

¹ ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Ленинград.

² ВНИИФТРИ, Москва

³ Воронежский государственный университет.

⁴ Самаркандский государственный университет.

Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов.

6. Гамма-лучи радиоактивных нуклидов, применяемые для калибровки спектрометров

Измерены энергии и относительные интенсивности гамма-лучей радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки полупроводниковых гамма-спектрометров. Сводные данные таблиц являются результатом обработки более 3000 аппаратурных гамма-спектров. Приведены характерные аппаратурные спектры гамма-лучей исследованных нуклидов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Spectrometry of Radioactive Nuclide Radiation Using Semiconductor Detectors. 6. Gamma- Rays of Radioactive Nucleides Used in Spectrometer Calibration

The energies and relative intensities of gamma-rays of radioactive nucleides used in semiconductor spectrometer calibration have been measured. The data tables are the result of the processing of more than 3000 gamma-ray spectra. Characteristic gamma-ray spectra of the investigated nucleides are shown.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

Методика измерения энергий и интенсивностей гамма-лучей с помощью полупроводниковых детекторов (ППД) основана на сравнении аппаратурных спектров исследуемого и эталонного нуклидов. На пути этих сравнений есть много причин, значительно ухудшающих предельно достижимую точность^{/1-5/}. Следовательно, процесс сопоставления положения максимума спектральной линии (Р) и энергии (Е), а также площади спектральной линии (S) и интенсивности (I) должен быть последовательным с точки зрения учета данных эталонных нуклидов и четким относительно расчета погрешностей. Тогда, с учетом того, что в настоящее время спектрометры на основе кремния и германия обладают характеристиками, близкими к предельно возможным, изменение данных об эталонных нуклидах приведет лишь к простым коррекциям результатов без повторения эксперимента.

Для метрологического обеспечения измерений в СССР выпускаются наборы образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСТИ). Зарубежным аналогом, весьма близким по своим параметрам, является набор источников, выпускаемый МАГАТЭ. Нуклиды, включенные в набор ОСТИ, имеют относительно простую схему распада. Следовательно, в экспериментальной работе возникают трудности, связанные с недостаточным числом эталонных линий, необходимых для исследования характеристик спектрометров - нелинейности и эффективности. К тому же подобные исследования связаны с длительными циклами измерений, с повышенными требованиями к параметрам спектрометрической аппаратуры, со сроком изготовления ОСТИ (обычно набор ОСТИ поставляется один раз в год) и предусматривают высокую квалификацию экспериментатора. С целью ускорения процедуры подготовки и проведения эксперимента без потерь в точности и достоверности получаемых результатов, нами построен полный набор нормалей энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей радиоактивных нуклидов со сложными схемами распада ("многомерные источники"), применяемых для калибровки спектрометров^{/4/}. В данной работе мы приводим таблицы гамма-лучей и соответствующие аппаратурные спектры. Приведены также формулы, по которым обработаны экспериментальные данные.

Г. НОРМАЛИ ЭНЕРГИЙ ГАММА-ЛУЧЕЙ^{4/}

В качестве нормалей третьего порядка использованы значения энергий гамма-лучей ^{182}Tl и ^{192}Ir ^{7/}, измеренные на кристалл-дифракционном спектрометре в предположении

$$mc^2 = 511.0041 \pm 0.0016 \text{ кэВ} \quad (1)$$

$$E(411.8 - ^{198}\text{Hg}) = 411.794 \pm 0.007 \text{ кэВ.} \quad (2)$$

Результаты обработки более 800 серий измерений на различных детекторах и спектрометрических трактах сведены в табл. I. Следуя^{7/}, мы приводим порядки нормалей. Нормали каждого следующего порядка получены в непосредственном сравнении с нормальми предыдущих. Знак + указывает на то, что значение энергии получено путем суммирования энергий конкурирующих каскадных переходов с учетом отдачи ядра. Расчет проводился по следующим формулам:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i (I/\Delta E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)^2} \quad \Delta E_1 = \alpha_1^2 + \alpha_3^2 + \alpha_4^2 + \alpha_5^2 I/2 \quad (3)$$

$$\Delta E_2 = \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \alpha_4^2 + \alpha_5^2 I/2$$

$$\alpha_1^2 = \frac{I}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)^2} \quad \alpha_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)(E - E_i)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (I/\Delta E_i)^2}$$

$$\alpha_3^2 = \rho^2 E^2 \quad \left[\begin{array}{l} \alpha_5^2 = 1/3 [B(2)]^2 [\bar{\Delta}]^2 \\ \alpha_4^2 = 0. \end{array} \right.$$

Здесь n - число измерений; E - энергия, кэВ; α_3 - погрешность нормалей 3-го порядка в предположении $E(411.8) = 411.794 \pm 0.000$ кэВ; $\rho = 5 \times 10^{-6}$; α_4 - погрешность нормали второго порядка $\mu = 17 \times 10^{-6}$; α_5 - погрешность, связанная с аппроксимацией нелинейности для измерения на одном спектрометре (для разных спектрометров эта погрешность из систематической переходит в случайную, т.е. $\alpha_5 = 0$). В качестве ΔE выбиралась погрешность, наибольшая из ΔE_1 и ΔE_2 .

Табл. I. Нормали энергий гамма-лучей /4/.

БУКЛИЦА Q	Э	ΔЕ	БУКЛИЦА Q	Э	ΔЕ	БУКЛИЦА Q	Э	ΔЕ	БУКЛИЦА Q	Э	ΔЕ
180Ta	31,7370	0,0007	182Ta	222,1037	0,0042	184Cs	604,7077	0,0114	56Co	1175,065	0,003
182Ta	42,7143	0,0009	182Ta	229,3062	0,0062	182Ir	612,4460	0,0106	182Ta	1189,034	0,021
182Ta	59,5316	0,003	172Lu	233,3093	0,0095	110Ir	820,353	0,021	182Ta	1212,391	0,022
182Ta	65,1162	0,0011	173Lu	241,128	0,008	113La	836,128	0,013	182Ta	1230,568	0,023
182Ta	69,7288	0,0013	169Er	255,1932	0,008	137Cs	857,744	0,014	182Ta	1238,271	0,027
182Ta	84,2517	0,0015	182Ta	261,069	0,012	137Cs	861,648	0,014	182Ta	1257,416	0,027
182Ta	84,8602	0,0016	182Ta	264,0711	0,0050	110mAg	677,613	0,018	182Ta	1274,511	0,027
182Ta	88,7990	0,002	173La	272,111	0,006	144Ce	687,001	0,018	182Ta	1289,516	0,027
182Ta	88,002	0,004	133Ba	276,937	0,008	110mAg	696,452	0,018	182Ta	1289,516	0,027
182Ta	96,734	0,003	133Ba	279,189	0,008	110mAg	706,277	0,018	182Ta	1289,516	0,027
182Ta	97,432	0,003	173Lu	279,535	0,007	132mBa	706,277	0,018	182Ta	1289,516	0,027
182Ta	103,181	0,002	182Ir	286,2463	0,0062	35mNb	753,516	0,020	182Ta	1332,106	0,025
182Ta	108,784	0,002	182Ir	298,571	0,006	134Cs	778,914	0,017	182Ta	1332,106	0,025
182Ta	113,9172	0,0023	303mPo	303,908	0,010	110mAg	795,856	0,015	182Ta	1365,177	0,025
182Ta	118,1917	0,006	307mPo	307,770	0,007	110mAg	801,957	0,020	182Ta	1365,177	0,025
182Ta	121,117	0,003	308,4464	308,4464	0,0054	83a	818,038	0,025	182Ta	1407,574	0,026
182Ta	121,762	0,003	316,4977	316,4977	0,007	83a	820,532	0,025	182Ta	1407,574	0,026
182Ta	122,050	0,004	344,267	344,267	0,007	132mI	834,558	0,019	182Ta	1425,175	0,026
182Ta	130,565	0,004	365,069	365,069	0,007	176Lu	845,762	0,016	182Ta	1425,175	0,026
182Ta	133,518	0,003	387,631	387,631	0,011	187Yb	854,5037	0,016	182Ta	1456,022	0,026
182Ta	136,000	0,003	391,698	391,698	0,011	187Yb	854,5037	0,016	182Ta	1456,022	0,026
182Ta	136,4268	0,0029	400,650	400,650	0,011	182Lu	884,695	0,016	182Ta	1456,022	0,026
182Ta	152,3619	0,009	411,084	411,084	0,008	110mAg	898,043	0,023	182Ta	1471,347	0,026
182Ta	155,854	0,005	411,794	411,794	0,007	152u	937,577	0,017	182Ta	1471,347	0,026
182Ta	171,402	0,004	416,4501	416,4501	0,0079	152u	954,070	0,018	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	177,208	0,004	446,902	446,902	0,009	152u	964,070	0,017	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	179,363	0,006	446,902	446,902	0,009	152u	964,070	0,017	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	179,363	0,0034	468,0546	468,0546	0,008	103Yb	1005,235	0,034	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	197,026	0,006	483,723	483,723	0,012	152u	1037,841	0,034	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	197,948	0,0048	569,533	569,533	0,012	182Lu	1083,660	0,034	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	198,240	0,003	588,5862	588,5862	0,012	182Lu	1115,559	0,034	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	215,641	0,004	604,3842	604,3842	0,0105	60u	1121,290	0,033	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	215,641	0,004	604,3842	604,3842	0,0105	60u	1121,290	0,033	182Ta	1536,764	0,026
182Ta	215,641	0,004	604,3842	604,3842	0,0105	60u	1121,290	0,033	182Ta	1536,764	0,026

II. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАММА-ЛУЧЕЙ

Относительные интенсивности гамма-лучей измерены с помощью калиброванных по активности пяти наборов ОСГИ и с учетом данных, приведенных в табл. 8 работы ^{/4/}. Вопросы исследования эффективности спектрометров изложены в ^{/3,4,5/}. Расчет проводился по следующим формулам:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n I_i (I/\Delta I_i)^2}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta I_i)^2} \quad \Delta I_1 = \left[\beta_1^2 + \beta_3^2 \right] I/2 \quad (4)$$

$$\beta_1^2 = \frac{I}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta I_i)^2} \quad \Delta I_2 = \left[\beta_2^2 + \beta_3^2 \right] I/2$$

$$\beta_3^2 = \frac{I}{\sum_{i=1}^n (I/\Delta I_i)^2} \quad \beta_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (I/\Delta I_i)^2 (I - I_i)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (I/\Delta I_i)^2}$$

$$\beta_3^2 = \chi^2 I^2$$

Здесь n - число измерений; χ - погрешность, связанная с погрешностью измерения эффективности спектрометра ($\chi = 1,8\%$ ^{/4/}). В качестве ΔI выбиралась погрешность, наибольшая из ΔI_1 и ΔI_2 .

III. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Применяемая спектрометрическая аппаратура и ее характеристики описаны в ^{/1,2,4/}. Радиоактивные источники изготовлены на алюминиевой подложке толщиной 18 мкм путем выпаривания или с помощью электромагнитного масс-сепаратора (энергия внедрения ионов 25 кэВ). Лицевая часть, как и в наборе ОСГИ, покрыта защитной полиэтиленовой пленкой толщиной 11 ± 3 мг/см². Исходные радиоактивные препараты доставлены из В/О "Изотоп" или получены в результате облучения танталовой мишени на внутреннем пучке синхротронотрона ОИЯИ ^{/8/}. Данные о радиоактивных источниках приведены в табл. 2.

Вопросы организации и проведения экспериментов по измерению спектров гамма-лучей изложены в ^{/3-5/}.

Табл. 2. Радиоактивные источники: способ получения исходных препаратов, способ изготовления источников и возможные примеси.

№	ИСТОЧНИК	T _{1/2}	МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНОЙ АКТИВНОСТИ:	АКТИВНОСТЬ ДОСТАВЛЕНА ИЗ		СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ		ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕСИ:
				В/О "РАДОИСТ"	ЭПИ-ОБЕИ	МАСС-СП БАРАБОТ	ВЫПАРКА ИЛИ	
1	22Ne	2.602 Г	23 (n, 2n)	ОСТИ	ДА	-	ДА	54Mn
2	24Ne	15.030 Ч	Al(p, xp; 2n)	-	ДА	-	ДА	-
3	54Mn	312.5 Д	54Fe (n, p)	ОСТИ	-	-	ДА	22Ne, 57Co, 65Zn, 170Tm
4	56Co	78.76 Д	56Fe (p, n)	ДА	-	-	ДА	57Co, 109Cd
5	57Co	269.8 Д	56Fe (p, n)	ОСТИ	-	-	ДА	22Ne, 58Co, 60Co, 65Zn
6	60Co	5.275 Г	59Co (n, γ)	ОСТИ	-	-	ДА	58Co, 134Cs, 137Cs, 144Cs
7	65Zn	245.7 Д	64Zn (n, γ)	ОСТИ	-	-	ДА	55Fe, 59Fe, 60Co, 109Cd, 124Sb
8	75Se	120.4 Д	74Se (n, γ)	ДА	-	-	ДА	-
9	88Y	107.4 Д	88Sr (p, n)	ОСТИ	ДА	ДА	ДА	-
10	109Cd	452.2 Д	108Cd (n, γ)	ДА	-	-	ДА	-
11	110mAg	255.0 Д	109Ag (n, γ)	ДА	-	-	ДА	108mAg
12	113Sn	115.2 Д	112Sn (n, γ)	ОСТИ	-	-	ДА	51Cr, 55Fe, 59Fe, 65Zn, 124Sb
13	133Ba	10.9 Г	132Ba (n, γ)	ДА	-	-	ДА	-
14	134Cs	2.06 Г	133Cs (n, γ)	ДА	-	-	ДА	60Co, 65Zn, 137Cs
15	137Cs	30.18 Г	ДЕЛЕНИЕ U	ОСТИ	-	ДА	ДА	60Co, 65Zn, 106Ru, 134Cs
16	139Ce	137.2 Д	138Ce (n, γ)	ОСТИ	-	-	ДА	-
17	144Ce	284.4 Д	ДЕЛЕНИЕ U	ДА	-	-	ДА	54Mn, 60Co, 134Cs, 137Cs
18	152Eu	13.2 Г	151Eu (n, γ)	ДА	-	-	ДА	-
19	153Gd	242 Д	Ta(p, xp, γp)	-	ДА	ДА	-	-
20	160Tb	72.3 Д	159Tb (n, γ)	ДА	-	-	ДА	152Eu, 155Gd, 169Tb, 170Tm
21	169Yb	30.6 Д	Ta(p, xp, γp)	-	ДА	ДА	-	169Tb
22	171Lu	8.24 Д	Ta(p, xp, γp)	-	ДА	ДА	-	171Lu
23	173Lu	499 Д	Ta(p, xp, γp)	-	ДА	ДА	-	173Lu
24	182Tm	115.0 Д	181Tm (n, γ)	ДА	-	-	ДА	54Mn, 60Co
25	192Ir	74.02 Д	191Ir (n, γ)	ДА	-	-	ДА	60Co, 65Zn, 137Cs, 207Bi
26	203Hg	46.76 Д	202Hg (n, γ)	ДА	-	-	ДА	65Zn, 134Cs, 137Cs, 204Tl
27	207Bi	30.2 Г	207Pb (p, n)	ДА	-	-	ДА	208Bi
28	241Am	432.9 Г	РАСПАД 241Pu	ДА	-	-	ДА	-

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сведения об энергиях и относительных интенсивностях гамма-лучей радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки спектрометров с ППД, приведены в табл. 3. Аппаратурные спектры этих нуклидов показаны на рис. I-17. На каждом рисунке указаны условия измерения. Введены следующие обозначения: АИ - аннигиляционное излучение; Т1 - время, прошедшее с момента получения источника (или исходной радиоактивности, если не применялись различные химические методы); Т2 - время измерения; Р - расстояние источник-ППД; ФП - фильтр поглощения между источником и ППД; Ф - естественный радиоактивный фон; С, М, Ч, Д и Г - обозначения времени: секунда, минута, час, день и год, соответственно; ОВ - пик одиночного вылета аннигиляционных квантов; ДВ - пик двойного вылета аннигиляционных квантов; П - примесный нуклид (в случае нескольких примесей обозначены их порядковые номера); Д - дочерний нуклид (в случае нескольких дочерних нуклидов обозначены их порядковые номера). Визуальный анализ аппаратурных спектров показывает, что эксперименты по прецизионным измерениям энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей нужно готовить тщательно, с учетом всех эффектов, искажающих форму аппаратурного спектра (см. табл. I в работе /2/).

В литературе часто приводят данные о гамма-лучах ^{226}Ra и его дочерних продуктов, предлагаемых для калибровки спектрометров с ППД. К сожалению, аппаратурный спектр ^{226}Ra является исключительно сложным (рис. 18) и, кроме того, не всегда легко можно осуществлять условия равновесия изотопов, так как некоторые дочерние продукты являются газами.

Сравнение полученного нами полного набора нормалей энергий с приведенным в работе /9/ иллюстрирует рис. 19. Как видно, с ростом энергии наблюдается систематическая расходямость, доходящая до 100 эВ. На этом же рисунке приведены и данные о гамма-лучах ^{56}Co , предложенные в /10/. Обратим внимание на тот факт, что эти значения совпадают с энергиями, получающимися с помощью пиков ДВ без учета вклада кинематических процессов в электрическом поле детектора при регистрации пары электрон-позитрон /4/. Особый интерес представляет сравнение полученных нами результатов с нормальями 3-го порядка, измеренными на магнитном безжелезном бета-спектрометре /11/:

НУКЛИД	НАСТОЯЩАЯ РАБОТА		РАБОТА /II/	
	Е	ΔЕ	Е	ΔЕ
⁶⁰ Со	1173.236	0.023	1173.226	0.040
⁶⁰ Со	1332.485	0.025	1332.483	0.046
²⁴ Na	1368.656	0.036	1368.526	0.044
²⁴ Na	2753.989	0.056	2753.920	0.120

(5)

Как видно, значения энергий гамма-лучей ⁶⁰Со согласуются отлично. Беспокойство вызывает значение энергии перехода 1368 кэВ (²⁴Na), но мы считаем, что расходимость может быть связана только с какой-нибудь ошибкой в /II/. Подтверждением может служить и анализ данных по измерению энергии связи дейтона /I2/ из реакции ${}^1_0\text{n}(\text{p}\gamma){}^2_0\text{D}$ с помощью данных работы /II/.

Сравнение результатов относительных интенсивностей гамма-лучей различных нуклидов и данных настоящей работы иллюстрирует рис. 20. Наибольшая расходимость наблюдается в области меньше 600 кэВ. Заметим, что любые изменения относительных интенсивностей легко перенести на принятый нами базис. В этом случае достаточно построить отношения:

$$K(E) = [I_1(E) - I_2(E)] \times (I_1(E))^{-1} \quad (6)$$

Далее, значения $K(E)$ аппроксимируют полиномом - это и есть коэффициент коррекции. Здесь $I_1(E)$ - наши данные; $I_2(E)$ - новые, уточненные результаты.

Возможные калибровочные точки, которые можно получить с помощью исследованного нами набора радиоактивных нуклидов, проиллюстрированы рис. 21. Обращает на себя внимание ограниченность количества экспериментальных данных в области выше 1500 кэВ. В дальнейшем мы предполагаем заполнить эту область. На основании накопленного опыта нам кажется целесообразным рекомендовать начать изготовление набора радиоактивных препаратов, аналогичного ОСГИ, который имел бы в своем составе ⁷⁵Se, ¹⁵²Eu, ¹⁸²Ta, ^{110m}Ag и ⁵⁶Co. Эти источники нетрудно калибровать по выходу гамма-лучей с помощью методики /4/.

Табл. 3. Энергии и относительные интенсивности гамма-лучей радиоактивных нуклидов, применяемые для калировки спектрометров с ППД.

E	171Lu			75Se			153Gd			192Ir						
	E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI
19.017	0.010	0.000	0.760	0.071	40.90	KX	90.084	2.719	61.49	KX	1.235	0.075				
24.510	0.010	0.000	0.699	0.254	41.54	KX	162.097	4.690	62.00	KX	2.599	0.063				
51.510	0.017	0.003	0.553	0.254	46.0	KX	172.982	4.748	62.16	KX	3.367	0.074				
52.319	0.011	0.003	0.603	0.767	48.0	KX	172.982	4.748	71.3	KX	0.756	0.026				
55.690	0.011	0.003	0.567	0.081	69.632	KX	100.000	1.810	73.4	KX	0.504	0.016				
71.0	0.005	0.002	0.395	0.339	97.432	KX	100.000	1.810	75.7	KX	1.860	0.056				
86.718	0.005	0.002	0.437	0.082	103.181	KX	100.000	1.810	77.8	KX	0.370	0.018				
75.891	0.002	0.002	11.595	21.252	103.181	KX	100.000	1.810	136.310	KX	0.034	0.008				
85.588	0.011	0.007	2.071	0.039	103.181	KX	100.000	1.810	201.700	KX	0.015	0.003				
136.319	0.009	0.006	0.067	0.003	51.35	KX	192.578	5.806	201.700	KX	0.015	0.003				
132.153	0.009	0.006	0.067	0.003	52.40	KX	324.872	8.541	203.178	KX	0.056	0.012				
134.747	0.015	0.010	0.080	0.008	59.4	KX	110.414	2.602	295.946	KX	0.006	0.001				
183.889	0.041	0.027	0.129	0.017	61.0	KX	28.259	0.892	308.445	KX	0.006	0.001				
170.765	0.041	0.027	0.107	0.004	78.651	KX	55.582	2.149	316.495	KX	0.006	0.001				
184.877	0.019	0.016	0.222	0.022	100.118	KX	20.300	0.663	326.629	KX	0.012	0.002				
177.579	0.019	0.016	0.268	0.031	171.402	KX	19.208	0.630	416.454	KX	0.012	0.002				
630.951	0.021	0.016	1.816	0.011	179.363	KX	5.796	0.109	420.345	KX	0.129	0.077				
699.272	0.026	0.026	3.068	0.034	193.200	KX	0.038	0.027	468.056	KX	0.009	0.009				
713.977	0.027	0.027	3.068	0.031	233.603	KX	2.453	0.061	489.069	KX	0.079	0.048				
757.597	0.022	0.022	3.068	0.034	252.111	KX	0.005	0.001	489.069	KX	0.012	0.007				
780.656	0.027	0.027	3.068	0.034	330.312	KX	0.008	0.002	593.237	KX	0.012	0.007				
825.865	0.024	0.024	3.068	0.034	330.312	KX	0.008	0.002	612.446	KX	0.015	0.008				
835.691	0.026	0.026	3.068	0.034	456.769	KX	0.019	0.019	884.524	KX	0.015	0.008				
923.071	0.031	0.031	3.068	0.034	456.769	KX	0.019	0.019	1061.439	KX	0.359	0.208				
902.007	0.031	0.031	3.068	0.034	636.129	KX	0.013	0.013								
948.785	0.031	0.031	3.068	0.034	72.81	KX	19.543	1.010	475.356	KX	0.011	0.001				
985.681	0.031	0.031	3.068	0.034	74.97	KX	33.232	1.408	565.231	KX	0.011	0.001				
998.007	0.031	0.031	3.068	0.034	84.5	KX	11.647	0.358	565.232	KX	0.012	0.001				
1094.785	0.031	0.031	3.068	0.034	87.2	KX	33.232	1.408	604.707	KX	0.012	0.001				
1202.237	0.031	0.031	3.068	0.034	89.2	KX	11.647	0.358	604.707	KX	0.012	0.001				
1311.579	0.038	0.038	3.068	0.034	93.658	KX	100.000	1.810	795.656	KX	0.018	0.001				
					106.126	KX	70.126	0.031	1013.608	KX	0.019	0.001				
					144.228	KX	70.126	0.031	1167.946	KX	0.014	0.001				
					170.253	KX	70.007	0.143	1365.177	KX	0.025	0.001				
					207Bi											
					207Bi											

Табл. 3. Продолжение

182Ta				152Eu				160Tb				56Co			
E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI	E	ΔE	I	ΔI
11,237	0.001	1,990	0.046	121,722	0.003	92,512	2,200	42,271	0.002	18,001	0,354	263,743	0,245	56Co	0,035
45,714	0.001	0,606	0,017	244,691	0.006	29,040	0,039	52,160	0,019	31,017	0,634	787,805	0,194	100,000	1,876
57,98	KX	27,317	0,604	295,263	0,007	100,000	1,868	53,5	0,003	10,694	0,214	846,778	0,016	100,000	1,876
59,32	KX	46,068	0,964	347,264	0,016	3,245	0,063	86,790	0,002	2,750	0,066	896,486	0,279	1,172	0,069
65,722	0.001	8,528	0,137	411,084	0,010	8,016	0,178	197,026	0,003	42,232	1,211	1072,336	0,019	1,272	0,070
69,760	KX	112,677	2,108	443,940	0,009	10,993	0,269	238,571	0,006	16,131	0,227	1140,242	0,212	1,272	0,070
75,547	0.001	3,547	0,165	488,735	0,053	1,405	0,057	358,571	0,006	103,327	2,564	1159,735	0,147	0,185	0,110
84,681	0.003	7,784	0,184	564,062	0,082	1,247	0,087	337,546	0,035	1,359	0,097	1198,955	0,033	2,284	0,070
100,106	0.014	40,598	0,852	628,553	0,045	1,057	0,081	392,480	0,033	5,147	0,090	1238,721	0,023	63,106	0,019
110,406	0.018	0,320	0,023	719,406	0,055	1,057	0,081	765,305	0,036	6,843	0,354	1328,430	0,053	0,176	0,072
112,572	0.003	7,709	0,038	778,914	0,017	40,206	1,028	874,382	0,039	100,000	0,822	1442,515	0,039	0,176	0,072
115,437	0.003	19,114	0,161	867,383	0,018	12,177	0,319	927,148	0,037	89,105	1,560	1771,547	0,039	15,797	0,338
158,380	0.003	8,631	0,163	967,070	0,018	43,236	0,098	1002,871	0,041	1,905	0,043	1863,760	0,068	9,708	0,026
179,388	0.007	4,035	0,032	1095,532	0,021	35,156	0,897	1115,086	0,041	5,103	0,099	2012,546	0,007	3,068	0,025
198,349	0.006	7,022	0,032	1089,722	0,024	5,328	1,145	1177,914	0,040	50,672	0,175	2012,546	0,007	3,068	0,025
222,102	0.006	10,232	0,387	1112,065	0,021	43,340	1,141	1197,875	0,040	8,386	0,101	2212,359	0,101	0,380	0,043
229,749	0.005	10,700	0,230	1212,895	0,024	5,248	0,193	1297,875	0,040	2,836	0,602	2524,466	0,200	0,146	0,045
928,023	0.046	1,625	0,055	1295,108	0,026	67,615	0,193	1311,078	0,042	2,702	0,190	2524,466	0,200	17,082	0,490
1001,705	0.019	5,794	0,148	1407,244	0,029	0,393	0,025	1446,802	0,016	4,307	0,090	2598,435	0,047	1,124	0,100
111,547	0.024	2,228	0,245	1528,172	0,104	0,393	0,025	446,802	0,016	2,856	0,143	3009,587	0,068	1,124	0,100
112,290	0.020	100,937	0,733	1528,172	0,104	0,393	0,025	628,553	0,021	100,298	0,143	3201,987	0,060	7,293	0,172
113,290	0.020	42,231	0,371	1528,172	0,104	0,393	0,025	677,741	0,014	16,844	0,146	3201,987	0,060	7,293	0,172
1227,331	0.022	47,336	1,458	132,318	0,003	100,000	6,298	687,601	0,018	17,502	0,187	3201,987	0,060	7,293	0,172
1330,988	0.023	32,555	0,619	236,432	0,014	6,032	0,148	744,271	0,015	4,852	0,174	3547,961	0,053	0,131	0,013
1357,416	0.027	4,309	0,094	236,432	0,014	6,032	0,148	763,536	0,020	22,519	0,242	3547,961	0,053	0,131	0,013
1273,711	0.027	1,084	0,034	818,028	0,025	27,704	0,379	818,028	0,025	27,704	0,379	36,461	0,017	26,668	0,086
1289,119	0.027	1,084	0,034	934,467	0,017	36,461	0,226	934,467	0,017	26,668	0,113	4,372	0,028	14,372	0,282
1375,670	0.043	0,731	0,036	1384,279	0,027	26,668	0,113	1384,279	0,027	26,668	0,113	4,372	0,028	14,372	0,282
1387,310	0.043	0,205	0,028	1675,028	0,028	14,372	0,282	1675,028	0,028	14,372	0,282	1,296	0,029	1,296	0,025
				1562,503	0,029	1,296	0,025	1562,503	0,029	1,296	0,025				

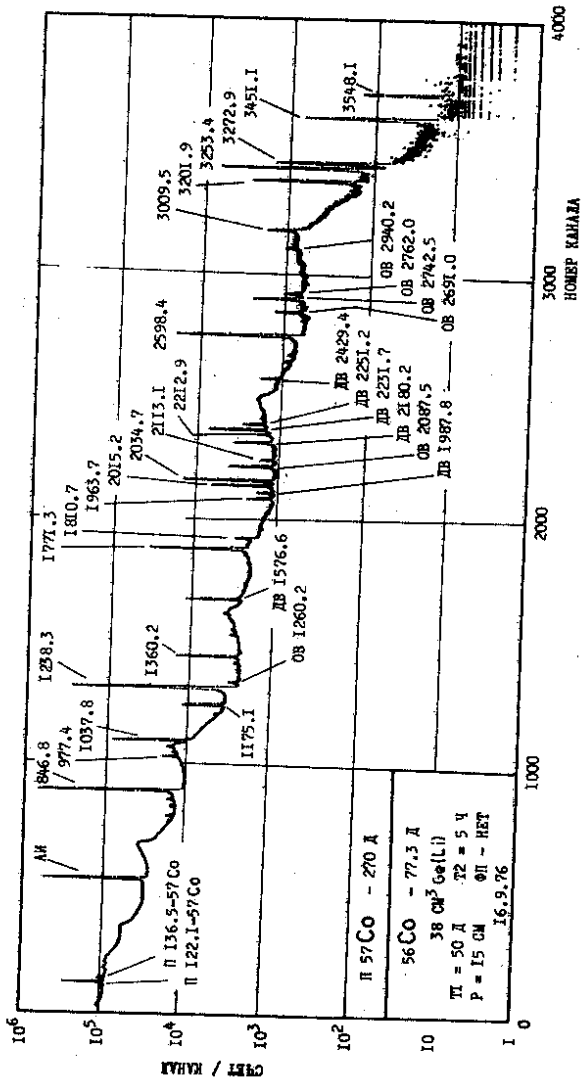


Рис. I

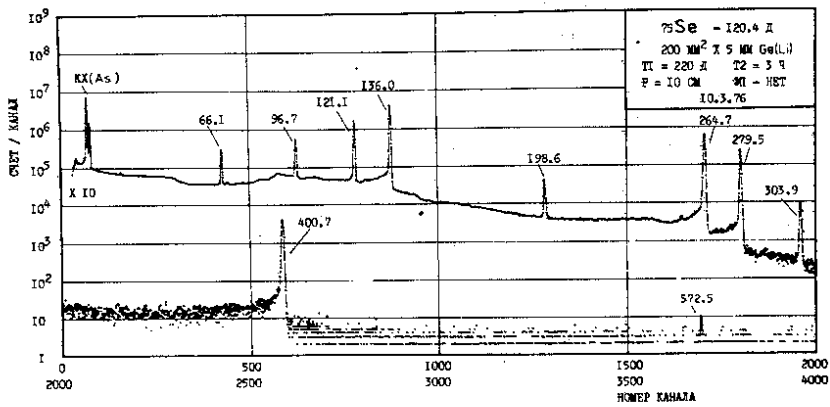


Рис. 2

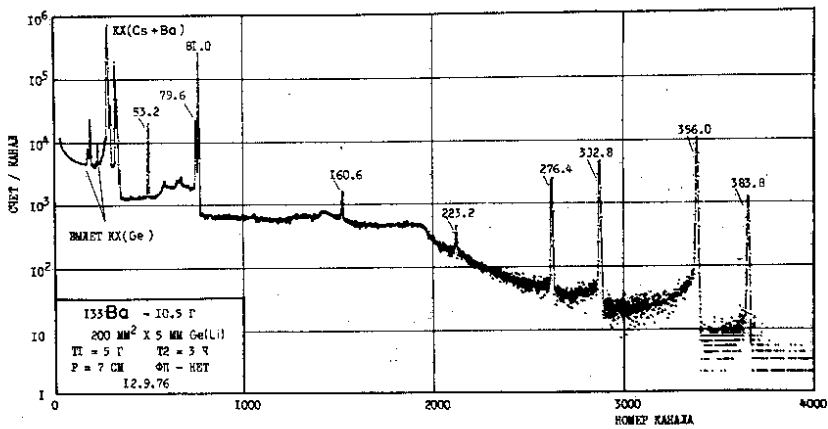


Рис. 3

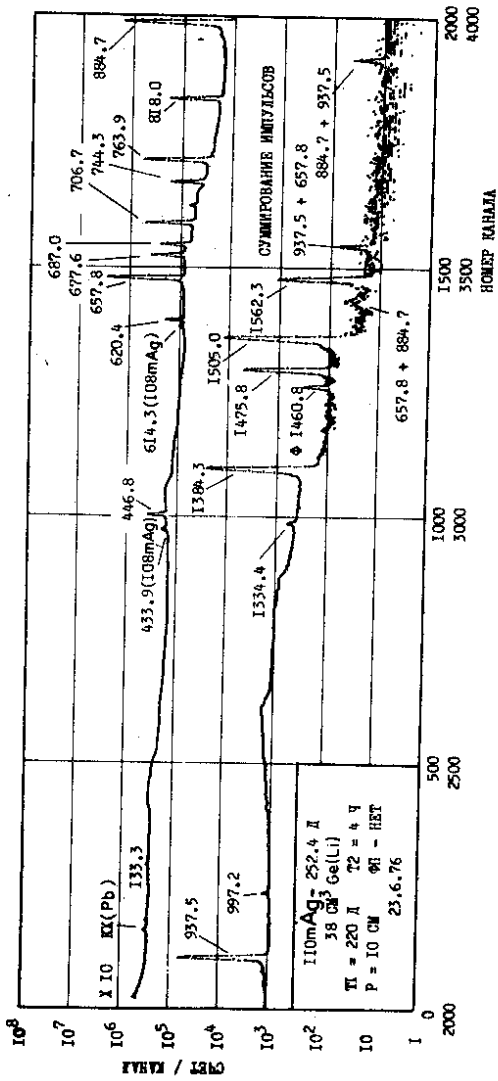


Рис. 4

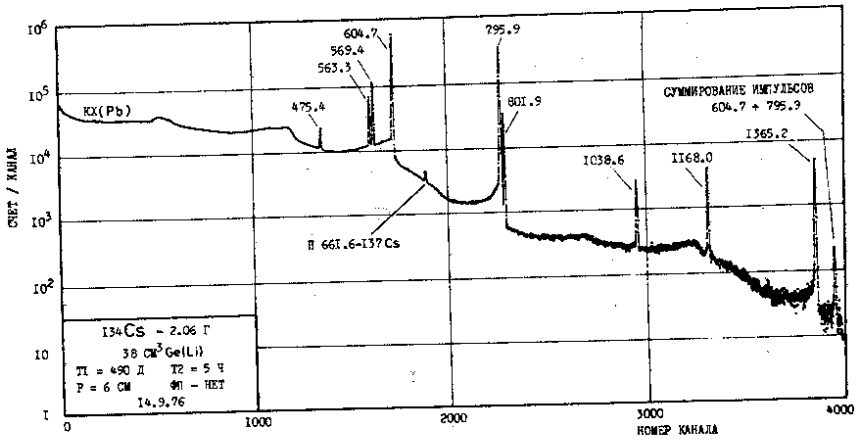


Рис. 5

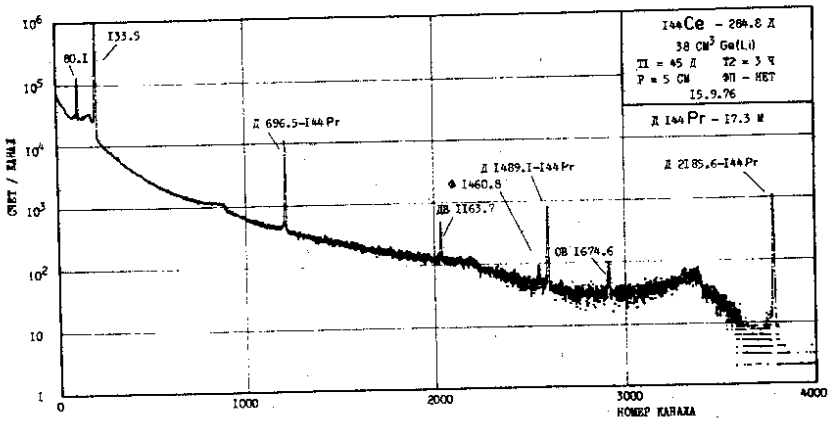


Рис. 6.

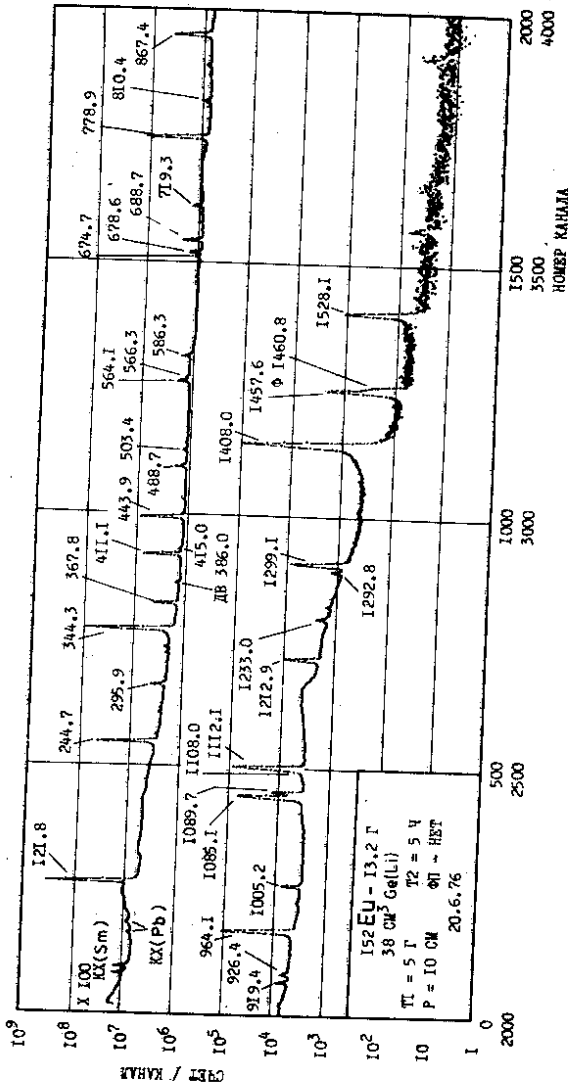


FIG. 7

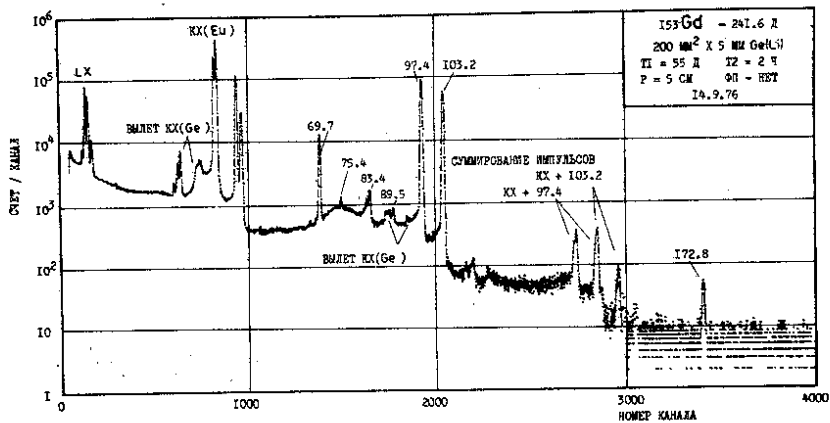


Рис. 8

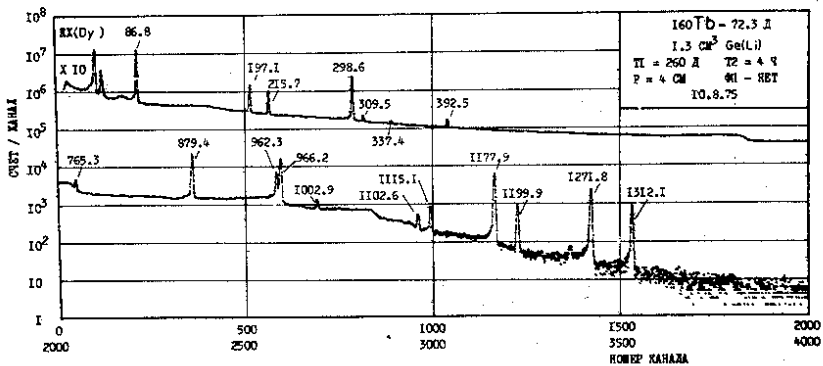


Рис. 9

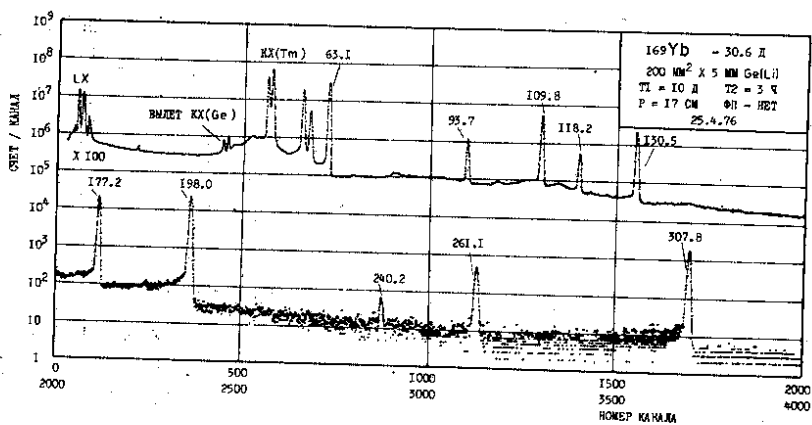


Рис. 10

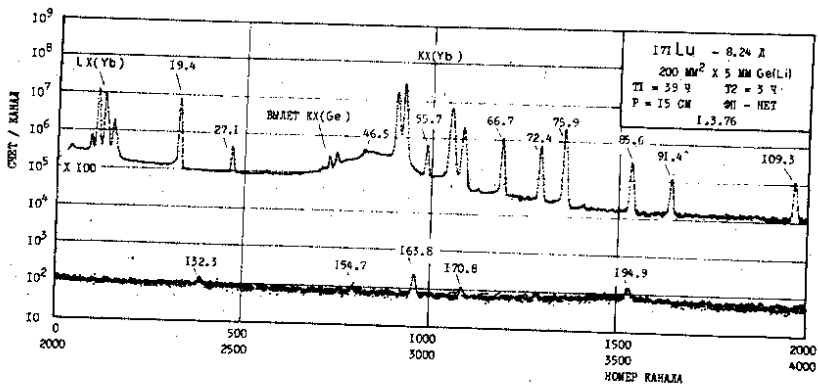


Рис. 11

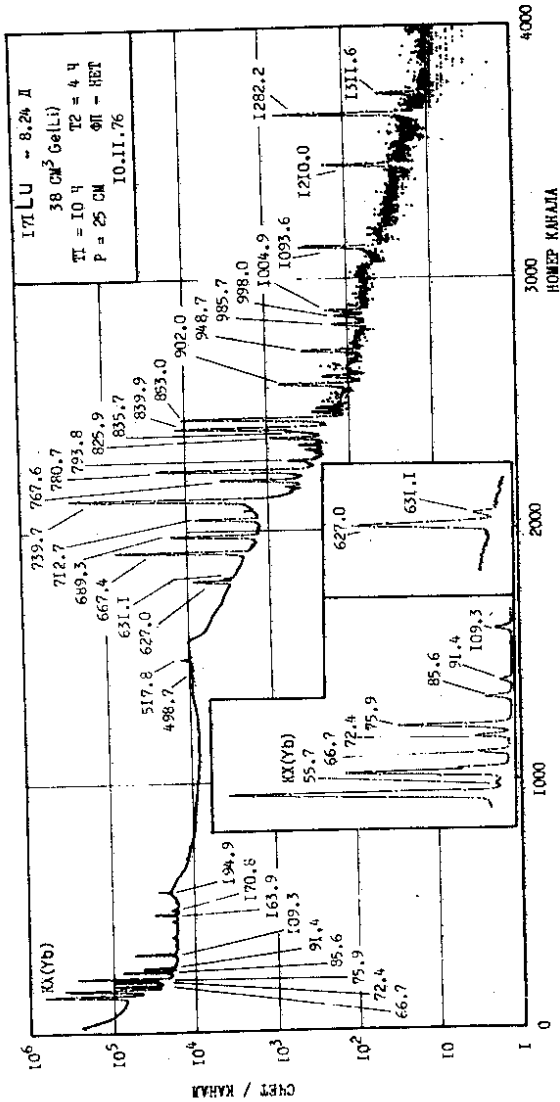


Рис. 12.

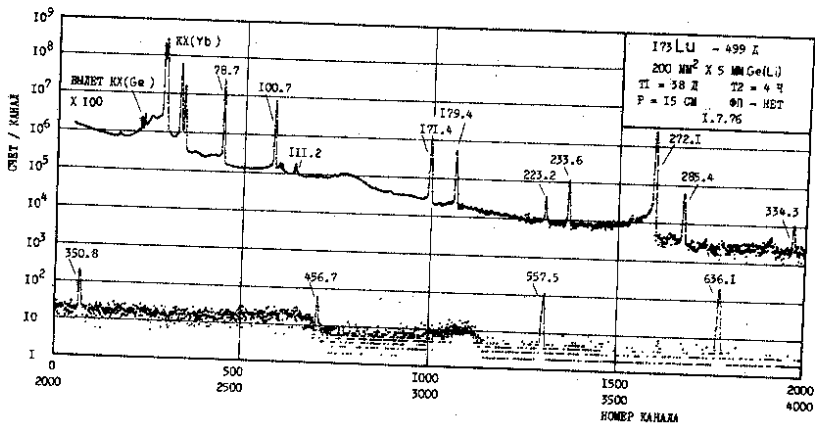


Рис. 13

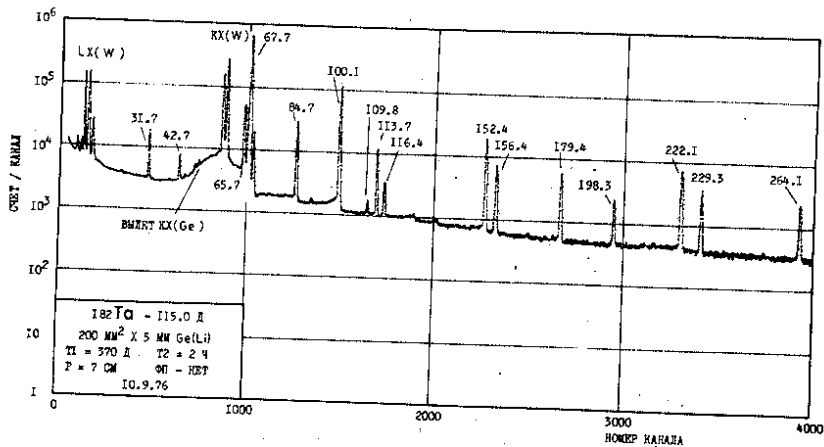


Рис. 14

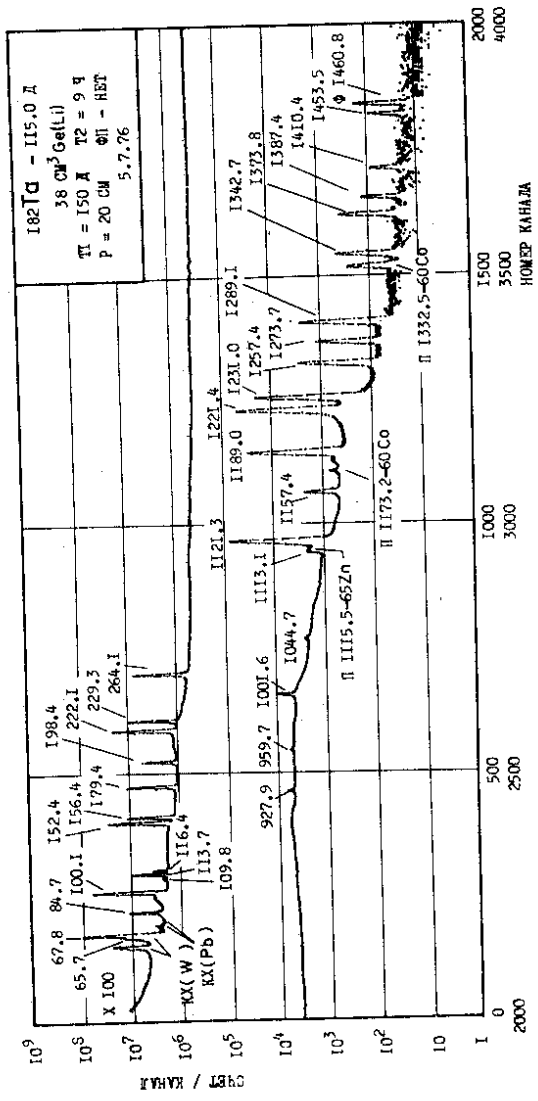


Рис. 15

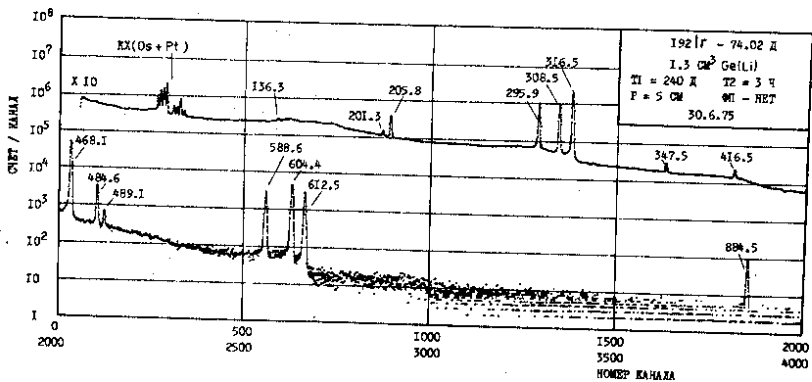


Рис. 16

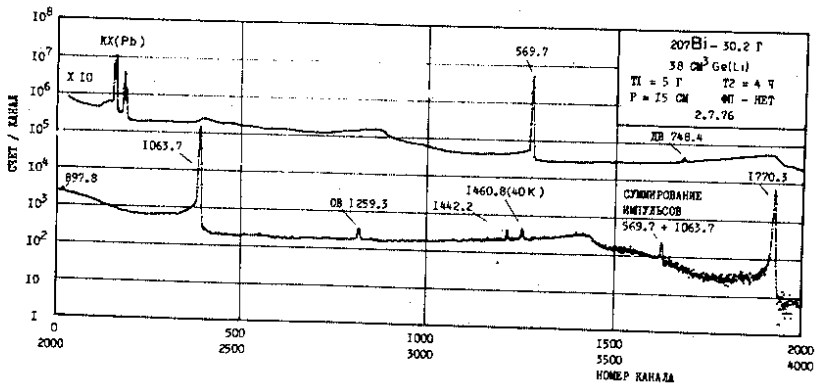


Рис. 17

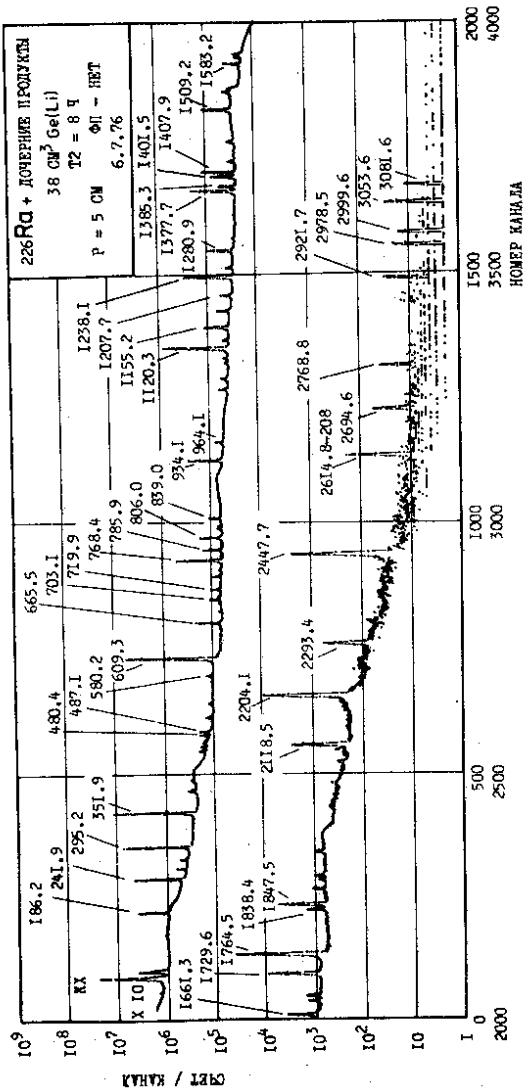


Рис. 18

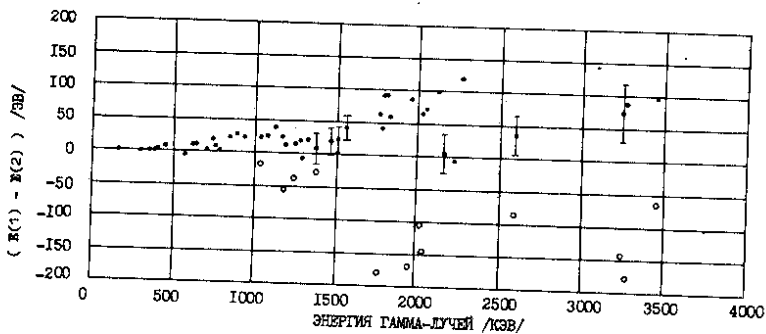


Рис. 19. Разность значений нормалей энергий гамма-лучей, рекомендованных в настоящей работе ($E(1)$) и в /4/ ($E(2)$). В качестве погрешности приведено значение: $[\Phi(1)^2 + \Phi(2)^2]^{1/2}$, где погрешность Φ является большей из α_1 или α_2 /3/.

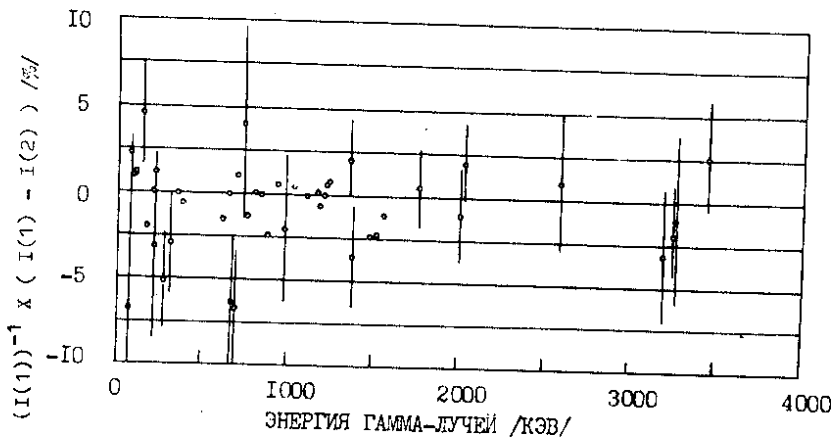


Рис. 20. Разность значений относительных интенсивностей гамма-лучей, полученных в настоящей работе $I(1)$ и рекомендованных в /3/. В качестве погрешности приведены значения $[[I(1)]^2 + [I(2)]^2]^{1/2}$. Точки относятся к распаду ^{152}Eu , ^{75}Se , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ и ^{56}Co .

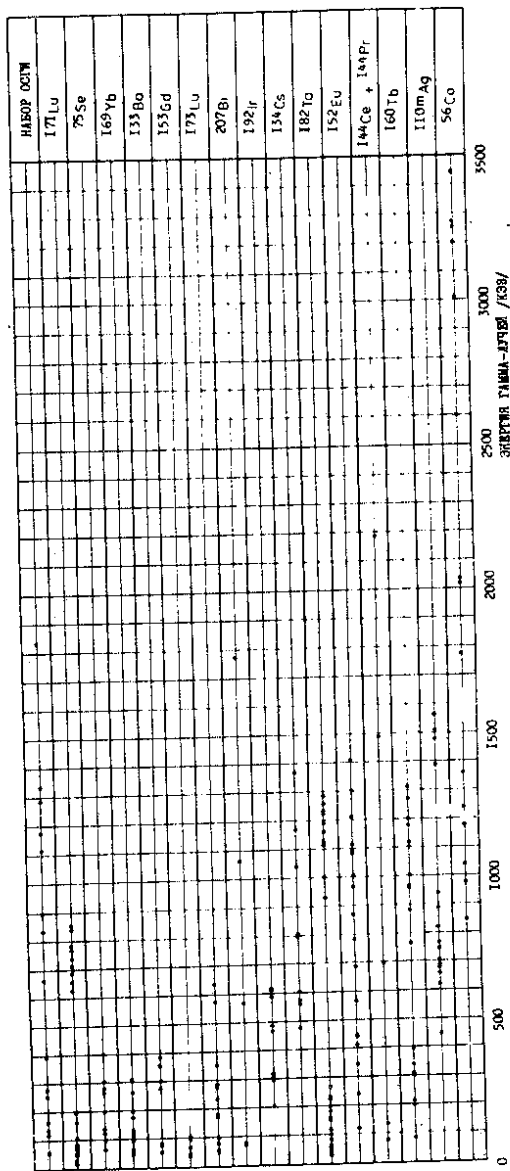


Рис. 21. Калибровочные точки по энергиям и относительным интенсивностям гамма-лучей, которые можно получить с помощью исследованного нами набора радиоактивных нуклидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанной нами методики /I-5/ измерены энергии и относительные интенсивности гамма-лучей 15 радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки полупроводниковых гамма-спектрометров. Сводные данные таблиц являются результатом обработки более 3000 аппаратурных спектров.

Мы считаем своим приятным долгом поблагодарить проф. К.Я. Громова и В.Г.Калинникова за постоянный интерес к работе, Е.Б.Озерова за большую помощь при обработке всех экспериментальных данных на ЭВМ, А.Ф.Новгородова, Н.А.Лебедева и И.И.Громову - за изготовление радиоактивных препаратов.

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. Ц.Вылов, В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р6-10414, Дубна, 1977.
5. Ц.Вылов, В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р6-10415, Дубна, 1977.
6. W. Beer and J. Kern. Nucl. Instr. and Meth., 117, 183 (1974).
7. Б.С.Джелепов. "Методы разработки сложных схем распада", Наука, Л., 1974.
8. Ф.Мольнар, В.Халкин, Э.Херрман. ЗЧАЯ, т.3, вып.4 (1973)1077.
9. R.L. Heath. Gamma-Ray Spectrum Catalogue, ANCR-100-2, 1974.
10. J. Kern. Proc. Panel Meeting Charged-Particle-Induced Radiative Capture (IAEA, Vienna, 1972).
11. G. Murray, R.L. Graham and J.S. Geiger. Nucl. Phys., 63, 353 (1975).
12. R.C. Greenwood and W.W. Black. Phys. Lett., 21, (1966) 702.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 февраля 1977 года.