

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P6-85-268

В.М.Горожанкин, А.И.Иванов<sup>1</sup>, В.Б.Бруданин,  
Ц.Вылов, А.Т.Маринов, Н.И.Рухадзе<sup>2</sup>, И.Ф.Учеваткин<sup>1</sup>

НОРМАЛИ ЭНЕРГИЙ ГАММА-КВАНТОВ,  
ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ  
СПЕКТРОМЕТРОВ С ППД

<sup>1</sup> ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Ленинград

<sup>2</sup> Тбилисский государственный университет

## ВВЕДЕНИЕ

Методика измерения энергий гамма-квантов с помощью полупроводниковых детекторов /ППД/ основана на сравнении аппаратурных спектров исследуемого и эталонных нуклидов. Прецизионная спектрометрия дискретных излучений, использующая современную спектрометрическую технику и ЭВМ для обработки спектральной линии, позволяет получать результаты, погрешности которых сравнимы с погрешностями применяемых нормалей. Естественно, что в таких условиях последние приобретают определяющее значение.

Методика прецизионной спектрометрии дискретных излучений радионуклидов с помощью ППД, развитая в нашей Лаборатории в 1972-1975 гг, базировалась на процедуре градуировки аппаратурных спектров с помощью ЭВМ /см.<sup>1/</sup> и приведенные там ссылки/. Эта методика позволяет достичь точностей измерения:

а/ энергий гамма-квантов в диапазоне 10-3500 кэВ - от 1 до 50 эВ, относительных интенсивностей гамма-квантов - /1±2%/;

б/ относительных интенсивностей ЭВК - до 1%, коэффициентов внутренней конверсии - 2%;

в/ энергий  $\alpha$ -частиц - до 0,5 кэВ, а их относительных интенсивностей - до 2%.

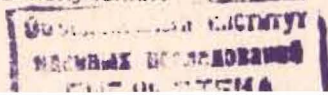
При построении набора нормалей энергий гамма-квантов в качестве исходных значений нами были приняты значения энергий гамма-квантов  $^{182}\text{Tl}$  и  $^{192}\text{Ir}$  <sup>/2/</sup>, измеренные в помощью кристалл-дифракционного гамма-спектрометра /КДГС/ в предположении:

$$E_{\gamma 411,8}(^{198}\text{Hg}) = 411,794 \pm 0,007 \text{ кэВ} \quad /3/$$

Между тем усовершенствование кристаллических гамма-спектрометров, и, в частности, использование оптико-рентгеновской интерферометрии, позволило провести прямое сравнение длин волн ряда ядерных переходов в области до 600 кэВ с оптической нормалью - длиной волны  $^{86}\text{Kr}$ . При этом для  $E_{\gamma 411,8}(^{198}\text{Hg})$  было получено значение <sup>/4/</sup>

$$E_{\gamma 411,8}(^{198}\text{Hg}) = 411,804 \pm 0,0011 \text{ кэВ}, \quad /2/$$

что почти на порядок точнее значения /1/. Метрологическая значимость этой гамма-линии подробно проанализирована в <sup>/5/</sup>. Напомним лишь, что она является главной ядерно-спектроскопической нормалью, и ее уточнение приводит к уточнению всей энергетической шкалы гамма-излучения.



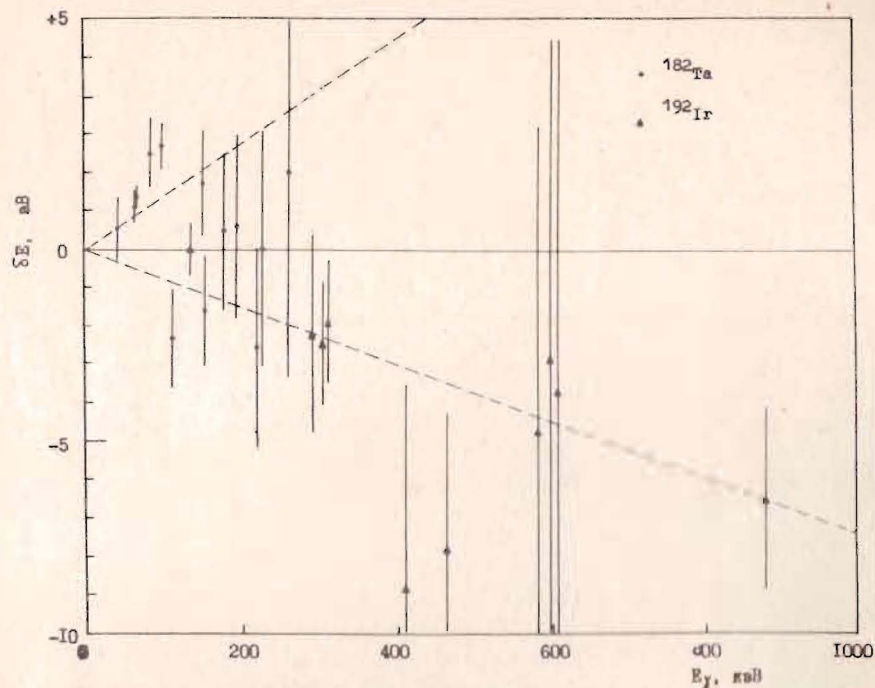


Рис. 1. Разность значений нормалей энергий гамма-квантов, полученных в работе <sup>12/</sup> и в работах <sup>4/</sup> - <sup>192</sup>Ir и <sup>6/</sup> - <sup>182</sup>Ta. Данные приведены к одному значению  $E_{\gamma 411,8}({}^{198}\text{Hg}) = 411,8044$ . Пунктиром показаны средние отклонения для <sup>182</sup>Ta и <sup>192</sup>Ir.

Казалось бы, что изменение значения  $E_{\gamma 411,8}({}^{198}\text{Hg})$  не должно приводить к большим трудностям в пересчете экспериментальных данных, и мы ранее предлагали простой метод такой процедуры:

$$E_{\gamma} / \text{новое} / = E_{\gamma} / \text{старое} / \frac{E_{411,8} / \text{новое} /}{E_{411,8} / \text{старое} /} \quad /3/$$

К сожалению, новые и намного более точные данные измерений энергий гамма-квантов <sup>182</sup>Ta и <sup>192</sup>Ir <sup>4,6/</sup>, выполненные на КДСГ, обнаружили серьезные расхождения с результатами работы <sup>12/</sup> /см. рис. 1/. Это не позволяет ограничиться пересчетом наших данных по формуле /3/ и заставляет заново провести процедуру градуировки, принимая в качестве новых нормалей результаты <sup>4,6/</sup> /табл. 1/.

#### ПРОЦЕДУРА ПОСТРОЕНИЯ НАБОРА НОРМАЛЕЙ ЭНЕРГИЙ ГАММА-КВАНТОВ

В настоящей работе использована та же процедура, что и в <sup>1/</sup>. Условия измерений подбирались таким образом, чтобы минимизиро-

Таблица 1

Нормали энергий гамма-квантов <sup>182</sup>Ta и <sup>192</sup>Ir, использованных в настоящей работе в качестве первичных

Нуклид	Энергии гамма-квантов /эВ/							
	Kessler et al. <sup>4/</sup>		Borchert et al. <sup>6/</sup>		Принятые значения			
	E	$\Delta E_{\text{exp}}$	E	$\Delta E_{\text{exp}}$	E	$\Delta E_{\text{exp}}$	$\Delta E_{\text{tot}}$	
<sup>182</sup> Ta			42 714.99	0.37	42 714.99	0.37	0.39	
			65 722.48	0.15	65 722.48	0.15	0.23	
			67 749.97	0.13	67 749.97	0.13	0.22	
			84 680.47	0.43	84 680.47	0.43	0.48	
			100 106.52	0.20	100 106.52	0.20	0.27	
			113 672.46	0.26	113 672.46	0.26	0.40	
			152 430.63	0.27	152 430.63	0.27	0.48	
			156 387.60	0.35	156 387.60	0.35	0.54	
			179 394.95	0.53	179 394.95	0.53	0.71	
			198 352.72	0.44	198 352.72	0.44	0.68	
			222 109.48	0.45	222 109.48	0.45	0.74	
			229 321.97	0.63	229 321.97	0.63	0.87	
			264 075.74	0.61	264 075.74	0.61	0.92	
	<sup>192</sup> Ir	136	343.04	0.49	136 343.75	0.70	136 343.27	0.40
205		795.49	0.07	205 796.10	0.60	205 795.50	0.07	0.54
295		958.25	0.13	295 958.48	0.50	295 958.27	0.13	0.79
308		456.89	0.15	308 455.10	2.20	308 456.88	0.15	0.83
316		507.89	0.18	316 508.50	0.30	316 508.05	0.15	0.85
416		471.36	0.74	416 470.63	3.00	416 471.32	0.72	1.31
468		071.47	0.27	468 072.03	0.60	468 071.56	0.25	1.26
484		577.97	0.41	484 576.85	1.80	484 577.91	0.40	1.34
588		584.46	0.72	588 587.88	4.00	588 584.57	0.71	1.70
604		414.15	0.47	604 413.38	2.20	604 414.12	0.46	1.66
612		465.04	0.78	612 466.78	2.60	612 465.18	0.75	1.75
884		541.74	0.79	884 545.39	4.03	884 541.88	0.78	2.45

вать искажения формы линии. Для исключения вклада "эффекта поля" все измерения проводились в одинаковой геометрии, что требовало подбора активности источников. Обработка спектральной линии осуществлялась подгонкой симметричного гауссиана по программе "КАТОК" <sup>7/</sup>. В выбранном энергетическом диапазоне на основе данного набора реперов определялись поправки на нелинейность спектрометра, после чего осуществлялась его энергетическая градуировка. Заметим, что эти поправки при длительных измерениях не изменялись, и по ходу эксперимента за ними велся периодический контроль.

На основании этой градуировки определялись энергии исследуемых гамма-квантов. Подобные измерения выполнялись многократно на разных ППД, спектрометрических трактах и при различных коэффициентах усиления.

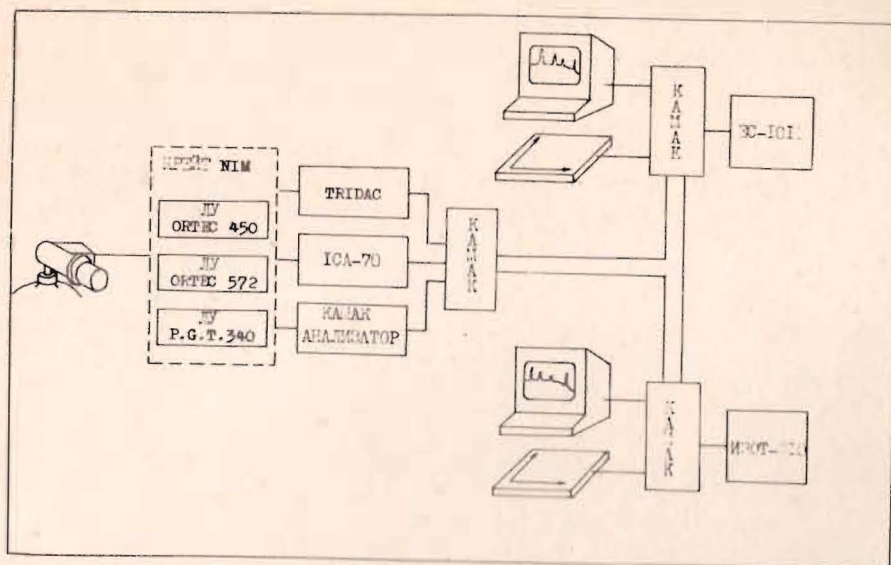


Рис.2. Структурная схема аппаратуры для прецизионных измерений энергий гамма-квантов с помощью ПЦД.

Таблица 2

Характеристики применяемых детекторов

№	ДЕТЕКТОР	ПАРАМЕТРЫ ТИП ПЦД	ГОТОВИТЕЛЬ НОГО СЛОЕ	НАПРЯЖЕНИЕ СЧЕТЧИКА	ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛЯ E/КЭВ, E30/			ИЗГОТОВИТЕЛЬ
					<sup>57</sup> Co 5,6 КЭВ	<sup>57</sup> Co 122 КЭВ	<sup>60</sup> Co 1,3 МЭВ	
1	GE(II)	300 мм <sup>2</sup> X 5 мм ПЛАНАРНЫЙ	5 мм	1000 В	240 ЭВ	550 ЭВ	1,6 КЭВ	ОРТЕС
2	GE(II)	38 см <sup>3</sup> КОАКСИАЛЬНЫЙ	16 мм	3000 В	-	0,9 КЭВ	1,9 КЭВ	ДЛЛ ОБИИ
3	GE(II)	50 см <sup>3</sup> КОАКСИАЛЬНЫЙ	16 мм	3000 В	-	1,4 КЭВ	2,1 КЭВ	ОРТЕС
4	GE(II)	30 см <sup>3</sup> КОАКСИАЛЬНЫЙ	20 мм	4500 В	-	1,3 КЭВ	2,1 КЭВ	ОРТЕС
5	GE(II)	100 см <sup>3</sup> КОАКСИАЛЬНЫЙ	20 мм	5000 В	-	1,1 КЭВ	1,9 КЭВ	ОРТЕС
6	GE	70 см <sup>3</sup> КОАКСИАЛЬНЫЙ	20 мм	4000 В	-	1,1 КЭВ	1,9 КЭВ	ОСНОВИТЕЛЬСОН

В качестве среднеквадратичной ошибки отдельного измерения принималась погрешность, определяемая коридором ошибок градуировки и ошибкой положения пика, и с ее помощью находилась средне-взвешенная оценка. За меру точности результата принималась величина, обратная сумме весов, которая домножалась на  $X^2$  приведенное, если последняя оказывалась больше единицы.

Приводя наши результаты в качестве  $\Delta E_{exp}$ , мы даем величину, включающую в себя, помимо указанной выше ошибки, погрешность исходных нормалей (1,8 ppm) /а при измерении на одном спектрометре - также ошибку, связанную с аппроксимацией его нелинейности/. В величину  $\Delta E_{tot}$ , согласно общепринятым правилам, входит дополнительно погрешность нормали второго порядка  $E_{\gamma} 411,8(^{198}\text{Hg}) /2,63\text{ppm}/^{15/}$ .

В области энергий до 600 кэВ, с использованием ранее измеренных аппаратурных спектров, была заново проведена градуировочная процедура с новыми значениями исходных нормалей /табл.1/, позволявшая переопределить значения нормалей <sup>1/</sup> фактически без проведения дополнительных измерений. Выше 600 кэВ, помимо использования некоторых из ранее измеренных аппаратурных спектров, были проведены новые измерения с помощью более качественных детекторов /табл.2/ и аппаратуры /рис.2/. В частности, для сохранения точности определения положения спектральной линии при ее обработке в измерениях применялись 13-разрядные АЦП с цифровыми порогами. Полная переобработка ранее полученных данных и обработка аппаратурных спектров в новых сериях измерений выполнены с помощью трехуровневой системы накопления, обработки и анализа спектрометрической информации <sup>18/</sup>.

При построении настоящего набора нормалей энергий гамма-квантов расширение энергетического диапазона градуировок спектрометров до 3500 кэВ было осуществлено в шесть этапов /табл.3/. На первых двух этапах, непосредственно с использованием принятых значений реперов табл.1, выполнены измерения энергий гамма-квантов каскадных переходов в радионуклидах, приведенных в первой колонке. Расширение диапазона градуировки на последующих этапах проведено с помощью значений реперов, указанных в колонках  $E_{cal}$ . Как правило, это энергии гамма-квантов прямых /кроссовер/ переходов, значения которых получены путем суммирования энергий конкурирующих каскадных переходов с обычными малыми поправками на энергию ядра отдачи /см., например, <sup>1/</sup> /. Слева от каждого значения  $E_{cal}$  обозначены энергии слагаемых каскадных переходов /в колонках  $E_{exp}$  /, полученные на предшествующих этапах.

С использованием данных табл.1 и 3 были осуществлены градуировки в различных энергетических диапазонах более, чем в 600 сериях измерений, результаты которых систематизированы в табл.4.

В настоящее время известен лишь один согласованный набор нормалей энергий гамма-квантов <sup>19/</sup>, созданный в предположении <sup>2/</sup>. Сравнение наших результатов и данных <sup>19/</sup>, приведенное на рис.3, показывает, что между ними наблюдается хорошее согласие.



Таблица 4 /продолжение/

НУКЛИД	E	E <sub>exp</sub>	E <sub>tot</sub>	НУКЛИД	E	E <sub>exp</sub>	E <sub>tot</sub>
<sup>12</sup> C	201.26	4	5	<sup>152</sup> Eu	1408.012	4	6
<sup>12</sup> C	271.31	2	3	<sup>152</sup> Gd	1457.619	4	6
<sup>14</sup> N	324.43	2	3	<sup>152</sup> Er	1474.878	3	5
<sup>15</sup> O	335.151	3	4	<sup>110</sup> Ag	1475.792	4	6
<sup>16</sup> O	341.769	3	4	<sup>144</sup> Sm	1489.156	4	6
<sup>16</sup> O	363.166	3	6	<sup>110</sup> As	1505.043	3	5
<sup>152</sup> Eu	367.379	4	5	<sup>156</sup> Gd	1528.124	6	7
<sup>162</sup> Tb	379.382	2	3	<sup>110</sup> Se	1562.310	3	5
<sup>192</sup> Ir	384.543	3	2,5	<sup>182</sup> Er	1650.337	4	6
<sup>110</sup> Ag	384.638	2	3	<sup>58</sup> Co	1674.716	7	9
<sup>88</sup> Y	398.049	2	3	<sup>207</sup> Pb	1770.230	7	9
<sup>110</sup> Ge	397.434	2	3	<sup>56</sup> Co	1771.349	6	8
<sup>160</sup> Tb	362.317	3	4	<sup>56</sup> Co	1810.729	8	10
<sup>12</sup> u	344.053	3	4	<sup>88</sup> Y	1836.267	7	9
<sup>160</sup> Tb	346.172	2	3	<sup>56</sup> Co	1965.723	7	9
<sup>112</sup> Ta	1301.132	3	4	<sup>26</sup> Co	2015.181	7	9
<sup>163</sup> Tb	1302.370	4	5	<sup>56</sup> Co	2034.753	6	8
<sup>12</sup> u	1305.208	4	5	<sup>56</sup> Co	2113.105	11	13
<sup>56</sup> Co	1037.844	7	8	<sup>144</sup> Sm	2185.661	5	8
<sup>134</sup> Ce	1038.014	3	4	<sup>56</sup> Co	2212.921	9	11
<sup>158</sup> Ta	1331.207	4	5	<sup>56</sup> Co	2538.466	9	12
<sup>82</sup> Ir	1044.002	5	6	<sup>88</sup> Y	2734.096	7	10
<sup>237</sup> Fr	1063.659	3	4	<sup>24</sup> Na	2754.029	11	14
<sup>152</sup> Eu	1385.36	3	4	<sup>54</sup> Co	3209.596	10	13
<sup>152</sup> Eu	1089.740	3	4	<sup>54</sup> Co	3211.966	12	14
<sup>160</sup> Tb	1102.510	4	5	<sup>56</sup> Co	3253.422	12	15
<sup>152</sup> Eu	1112.071	3	4	<sup>54</sup> Co	3272.194	11	14
<sup>160</sup> Tb	1115.114	4	5	<sup>54</sup> Co	3451.161	13	16
<sup>15</sup> u	1115.145	3	4				

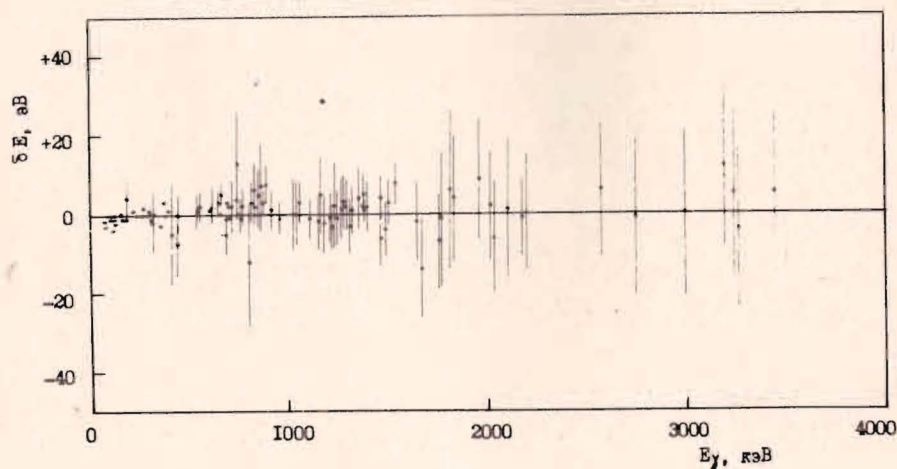


Рис.3. Разность значений нормалей энергий гамма-квантов, полученных в настоящей работе и в работе /9/.

Таблица 5

Нормали энергий гамма-квантов из (n,γ)-реакции. При вычислении погрешности ΔE<sub>EM</sub> использована вариант-ковариантная матрица, рассчитанная в работе /13/ /см.табл.3 в /13/ для смешанных уравнений масса - длина волны

НУКЛИД	S <sub>n</sub> ( <sup>A+1</sup> Z)	E'	E <sub>γ</sub>	ΔE <sub>exp</sub>	ΔE <sub>expM</sub>	ΔE <sub>EM</sub>	ΔE <sub>γ</sub>
<sup>3</sup> T	6257.272	6.953	6250.319	0.005	0.003	0.017	0.018
<sup>13</sup> C	4946.327	1.010	4945.317	0.005	0.011	0.013	0.018
<sup>14</sup> C	8176.475	2.561	8173.914	0.005	0.012	0.022	0.026
<sup>15</sup> N	10833.295	4.196	10829.099	0.005	0.008	0.029	0.031

Область нормалей гамма-квантов нуклидов, претерпевающих радиоактивный распад и имеющих достаточно большие периоды полураспада, ограничена сверху разностью масс ≈ 4 МэВ. Однако для решения некоторых ядерно-физических задач требуются нормали энергий > 4000 кэВ. Наиболее удобными для этого являются гамма-кванты, испускаемые в реакции захвата тепловых нейтронов ядрами. В этом случае можно воспользоваться предложенным в работе /10/ методом получения точных значений энергий гамма-квантов при помощи некоторых масс-спектроскопических дублетов и энергии связи дейтрона S<sub>n</sub>(<sup>2</sup>H). В табл.5 представлены энергии гамма-квантов и их погрешности, рассчитанные с помощью наиболее точных масс-дублетных данных /11/, и значения

$$S_n(^2\text{H}) = 2224,562 \pm 0,008 \text{ кэВ},$$

/4/

полученного из пересчета нашего значения /12/ относительно нормалей табл.4.

#### ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Поскольку построенный ранее /1/ набор нормалей энергий гамма-квантов в ряде лет использовался при измерениях, результаты которых вошли, в частности, в компиляцию /14/, возникает вопрос об ошибках, связанных с переходом к новому набору нормалей, предложенному в настоящей работе. В рамках применявшейся нами процедуры представляется естественным допустить, что подобные ошибки определяются разностями энергий двух указанных наборов, которые изображены на рис.4. Как видно из рис.4, эти разности носят систематический характер и могут быть учтены, по крайней мере, приближенно. Эксперименты же, выполненные на пределе достижимой точности, могут потребовать их повторения.

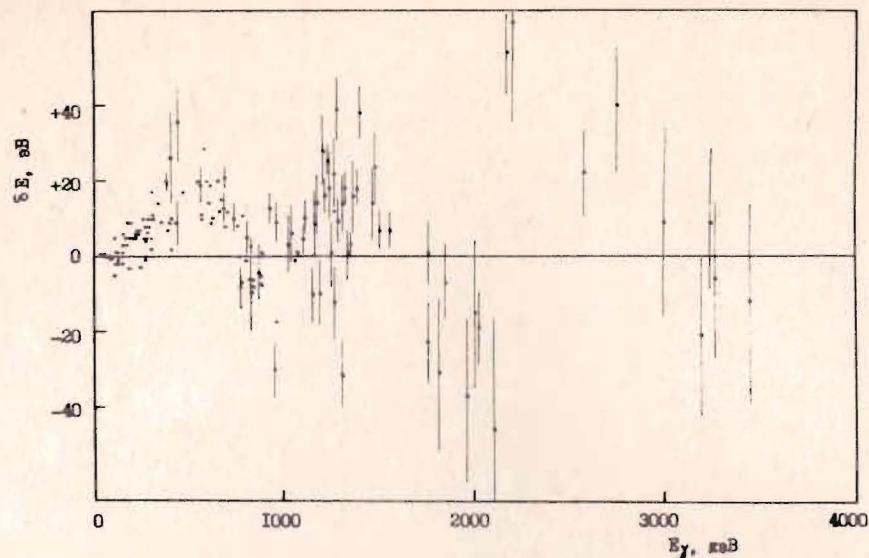


Рис.4. Разность значений нормалей энергий гамма-квантов, полученных в работе <sup>11/</sup> и в настоящей работе.

В заключение можно отметить, что в работе <sup>15/</sup> предложена новая процедура пересчета "длина волны - энергия", приводящая к формальному снижению систематической погрешности в энергиях гамма-квантов. Вытекающее из этой процедуры заметно более точное значение коэффициента пересчета "масса - энергия" уже было использовано в новом "переопределении масс ядер 1983" <sup>16/</sup>. Не вдаваясь в детали этой проблемы, заметим, что принятие такой процедуры приведет к значительному снижению погрешностей  $\Delta E_{tot}$ , полученных в данной работе, но мало изменит сами значения  $E$  и  $\Delta E_{exp}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вылов Ц., Осипенко Б.П., Чумин В.Г. ЭЧАЯ, Атомиздат, М., 1978, т.9, вып.6, с.1350-1459.
2. Beer W., Kern I. Nucl.Instr. and Meth., 1974, vol.117, p.183.
3. Murray G. et al. Nucl.Phys., 1963, vol.45, 2, p.177.
4. Kessler E.G. et al. Phys.Rev.Lett., 1978, vol.40, p.171.
5. Желепов Б.С., Шестопалова С.А. Ядерно-спектроскопические нормали. Атомиздат, М., 1980.
6. Borchert G.L. et al. Z.Naturforsch, 1975, vol.30, p.274.
7. Гаджиков В. ПТЗ, 1970, №5, с.82.

8. Бруданин В.Б. и др. ОИЯИ, 6-82-23, Дубна, 1982; Богомолова Е.С. и др. ОИЯИ, 10-82-158, Дубна, 1982; Бруданин В.Б. и др. ОИЯИ, 6-82-624, Дубна, 1982; Баганов Д. и др. ОИЯИ, 10-82-838, Дубна, 1982.
9. Greenwood R.C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1979, vol.159, p.465; Helmer R.G. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1978, vol.155, p.189.
10. Greenwood R.C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1974, vol.121, p.385; Wapstra A.H. Proc. II Inst. Symp. Neutron Capture, 1975.
11. Smith L.G., Wapstra A.H. Phys.Rev.C, 1975, vol.11, 4, p.1392.
12. Вылов Ц. и др. ЯФ, 1972, т.32, вып.3, с.812.
13. Greenwood R.C., Chrien R.E. Phys.Rev.C, 1980, 21, p.498.
14. Вылов Ц. и др. Спектры излучений радиоактивных нуклидов. "Фан", Ташкент, 1980.
15. Cohen E.R., Wapstra A.H. Nucl.Instr. and Meth., 1983, vol.211, p.153.
16. Wapstra A.H. Proc. 7th Int.Conf. Atomic Masses and Fundamental Constants. Darmstadt, 1984, p.29.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 апреля 1985 года.