

γ -квантов; σ_{in} — сечение неупругого рассеяния нейтронов, принято $\sigma_{in} = 2,5 \text{ б}$ ($1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$); T — температура остаточного ядра. По формуле баланса энергии рассчитывали T , предполагая, что сечение образования γ -квантов энергией $E_\gamma < 1 \text{ МэВ}$ постоянно и равно сечению в интервале $E_\gamma = (1-1,25) \text{ МэВ}$. Оказалось, что с увеличением энергии нейтронов в диапазоне $E_n = 3-9 \text{ МэВ}$ температура изменяется от 0,7 до 0,3 МэВ. Полученный результат не противоречит существующим представлениям статистической теории распада составного ядра.

Свинец. Полученные данные для свинца представлены на рис. 3, где приведены также результаты единственной опубликованной экспериментальной работы Пиркина [7], выполненной на электростатическом генераторе Ван-де-Граафа. Данные не противоречивы, однако результаты Пиркина для γ -квантов энергией 1,5–2 МэВ существенно превышают наши данные при $E_n = 3,5-6,5 \text{ МэВ}$, а для γ -квантов энергией 3–4 МэВ систематически ниже наших данных.

Природный свинец содержит в своем составе три изотопа: ^{206}Pb (24%), ^{207}Pb (23%), ^{208}Pb (53%). Для всех изотопов вплоть до энергии возбуждения $\sim 4 \text{ МэВ}$ γ -кванты образуются за счет переходов между дискретными уровнями остаточного ядра.

Гамма-излучение энергией 1–1,5 МэВ в области энергии нейтронов (приблизительно до 3 МэВ) обусловлено в основном переходами $1,462(2^+) \rightarrow 0(0^+)$ и $1,998(2^+) \rightarrow 0,803(2^+)$ в ядре ^{206}Pb . Гамма-кванты энергией 1,5–2 МэВ образуются ($E_n < 4 \text{ МэВ}$) преимущественно за счет трех переходов: $1,70(1^+) \rightarrow 0^+$; $2,634(3^-) \rightarrow 0,803(2^+)$ в ядре ^{206}Pb и $2,34(7/2^-) \rightarrow 0,570(5/2^-)$ в ядре ^{207}Pb . Суммарное сечение образования γ -линий этих переходов ($E_\gamma = 1,7$; 1,83 и 1,77 МэВ) составляет 0,150–0,250 б в диапазоне энергий нейтронов $E_n = 3-4 \text{ МэВ}$ [8], что совпадает с результатами, полученными в данном эксперименте.

Гамма-кванты энергией $E_\gamma = 2,5-3 \text{ МэВ}$ возникают в основном за счет перехода $2,615(3^-) \rightarrow 0(0^+)$ в ^{208}Pb . Действительно, сечение образования γ -квантов с $E_\gamma = 2,5-3 \text{ МэВ}$ в наших измерениях совпадает с сечением образования γ -линий 2,615 МэВ, измеренным в работе [9], где при $E_n = 4 \text{ МэВ}$ получено значение $\sim 0,400 \text{ б}$. При более высокой энергии нейтронов ($E_n > 5 \text{ МэВ}$) в спектре γ -квантов свинца начинает проявляться сплошное γ -излучение.

Заключение

Полученные значения сечений образования γ -линий ($E_\gamma = 4,44 \text{ МэВ}$) углерода в пределах погрешностей измерений согласуются с данными других авторов.

Результаты измерений для свинца качественно согласуются с нашими представлениями о высвечивании уровней в реакции $(n, n\gamma)$ при $E_n < 4 \text{ МэВ}$.

Энергетическое распределение γ -квантов рения плавно уменьшается с ростом E_γ . Не заметно каких-либо нерегулярностей, связанных с отдельными интенсивными γ -переходами в возбужденном ядре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин М. В. и др. В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 3-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 9–13 июня 1975 г.) Ч. 4. М., 1976, с. 191.
2. Савин М. В. и др. «Ядерная физика», 1976, т. 23, вып. 3, с. 512.
3. Двухшеретнов В. Г. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1969, № 4, с. 39.
4. Drake D. e.a. «Nucl. Sci. Engng», 1970, v. 40, p. 294.
5. Rogers V. e.a. Ibid., 1975, v. 58, p. 298.
6. Morgan G., Love T., Pery F. «Nucl. Instrum. Methods», 1975, v. 128, p. 125.
7. Perkin J. «Nucl. Phys.», 1964, v. 60, p. 561.
8. Дегтярев Ю. Г., Чулков В. В., Протопопов В. Н. В кн.: «Нейтронная физика». (Материалы 2-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 28 мая — 1 июня 1973 г.) Ч. 3. Обнинск, 1974, с. 120.
9. Nellis D., Morgan I., Hudspeth E. «Phys. Rev.», C9, 1974, N 5, p. 1972.

Поступила в Редакцию 24.03.80

УДК 539.172.4

Групповые и полные сечения образования гамма-квантов при неупругом взаимодействии 14-МэВ нейтронов с различными ядрами

БЕЗОТСЫН В. М., ГОРБАЧЕВ В. М., ШВЕЦОВ М. С., СУРОВ Л. М.

К настоящему времени опубликовано сравнительно большое число работ по измерению спектров и сечений образования γ -квантов, возникающих при неупругом взаимодействии 14-МэВ нейтронов с различными ядрами [1–9, 11–13].

В работах [1–5] приведены результаты измерений сечений лишь для отдельных дискретных γ -линий. Однако в ряде задач, связанных с использованием быстрых нейтронов, практический интерес представляют полные сечения образова-

Групповые сечения образования γ -квантов при неупругом взаимодействии 14-МэВ нейтронов со средними и тяжелыми ядрами ($A = 24 - 239$), мб

Интервал E_γ , МэВ	Mg [9]	Al [6]	Si [9]	P [9]	S [9]	Ti [9]	Fe [6]	Cu настоящая работа	Zn [9]	Zr [9]	Mo [9]
0,5-1,0	58±10	236±47	210±30	560±108	145±30	700±105	1430±210	2750±550	1617±307	1415±270	3100±585
1,0-1,5	506±120	292±48	155±30	487±100	240±43	1250±175	890±134	1350±270	1792±288	788±180	1450±215
1,5-2,0	170±30	285±40	480±98	229±51	340±60	360±60	340±60	475±100	642±105	657±140	780±120
2,0-2,5	140±22	281±37	90±15	469±97	640±100	300±63	273±51	280±60	300±50	1010±206	380±60
2,5-3,0	136±24	232±31	120±20	120±24	200±36	225±38	264±47	160±35	238±42	374±85	320±60
3,0-3,5	90±16	64±13	130±20	100±20	110±20	160±27	175±35	135±30	200±40	290±65	170±29
3,5-4,0	75±21	58±12	98±15	90±20	106±20	160±22	131±28	102±25	133±28	260±54	132±20
4,0-4,5	65±14	65±13	58±15	77±18	100±20	100±20	100±20	88±22	115±19	186±36	105±17
4,5-5,0	60±17	59±12	87±20	74±17	80±14	130±36	86±17	75±23	93±13	140±35	80±11
4,5-5,5	55±10	51±10	76±18	46±10	55±10	122±18	76±15	65±20	86±13	116±25	45±10
5,0-5,5	50±9	46±9	60±11	43±9	60±11	87±22	75±15	54±17	73±11	104±26	54±10
5,5-6,0	45±11	43±9	45±8	76±20	40±8	70±15	74±14	47±15	58±10	90±20	45±10
6,0-6,5	45±8	44±9	70±14	35±8	44±8	95±16	62±13	49±15	55±10	86±23	45±10
6,5-7,0	40±7	40±9	77±14	48±13	35±9	60±13	70±14	41±13	50±10	75±32	36±10
7,0-7,5	45±8	32±7	59±10	19±5	25±6	65±13	60±12	40±13	37±7	63±32	12±6
7,5-8,0	40±7	30±8	40±6	10±5	17±5	40±10	53±11	30±15	28±6	58±30	12±6
8,0-8,5	26±6	20±5	30±8	8±6	7±4	30±8	44±9	28±14	22±8	45±26	12±6
8,5-9,0	25±6	17±5	40±6	9±9	3±2	25±8	31±6	25±12	11±7	32±20	9±5
9,0-9,5	21±9	11±5	34±7	6±6	2±2	11±5	19±5	22±11	6±4	21±15	6±4
9,5-10,0	18±9	8±6	20±6	4±4	1±2	10±6	15±5	15±8	6±5	10±7	3±2
10,0-10,5	15±9		10±4	7±3	2±2	5±5	3±3		4±3	5±7	2±2
10,5-11,0	5±5		7±3	2±2		3±3	5±5		2±2	4±5	1±1
11,0-11,5	2±2		4±2	1±1		2±2			2±2	1±1	1±1
11,5-12,0											

Интервал E_γ , МэВ	Cd [9]	In [9]	Sn [9]	Ta [6]	W [6]	Hg [9]	Pb [6]	Bi [9]	²³⁵ U настоящая работа	²³⁸ U настоящая работа	²³⁹ Pu настоящая работа
0,5-1,0	3100±510	2468±395	1930±386	3000±600	4250±850	4200±700	2960±405	2500±620	7600±1230	5200±780	8950±1510
1,0-1,5	1150±210	1605±265	2330±375	2600±460	2340±460	1800±310	1215±200	4585±940	4060±650	2480±375	3560±660
1,5-2,0	766±134	793±121	710±114	1170±230	1280±260	1140±180	653±115	1350±260	2130±340	1660±255	1770±310
2,0-2,5	530±95	640±107	421±84	920±180	950±190	710±112	485±80	900±190	1129±190	1200±185	920±150
2,5-3,0	405±80	322±50	370±74	746±150	650±130	520±100	322±76	587±117	590±110	560±90	470±77
3,0-3,5	313±60	256±40	211±47	290±60	270±60	300±51	190±40	364±106	370±80	320±55	330±56
3,5-4,0	180±34	153±36	114±25	185±37	230±60	180±31	110±20	223±56	210±55	161±35	225±35
4,0-4,5	132±26	90±20	73±14	150±30	167±35	150±26	98±20	153±48	178±40	154±30	170±27
4,5-5,0	120±27	75±19	68±14	100±85	80±20	90±20	88±20	148±47	96±25	70±17	101±20
5,0-5,5	83±20	63±18	40±7	44±15	65±18	84±20	56±12	185±20	79±25	94±20	70±17
5,5-6,0	73±17	52±12	41±7	40±12	45±15	60±15	45±10	106±40	40±20	68±16	48±20
6,0-6,5	62±16	35±10	35±7	36±10	39±15	26±8	31±10	105±47	28±18	90±18	30±15
6,5-7,0	81±26	46±11	34±9	32±11	4±4	48±10	24±7	109±30	54±20	89±20	9±5
7,0-7,5	70±24	40±18	27±14	21±10		28±10	25±7	136±65	29±14	38±16	6±6
7,5-8,0	41±19	33±15	19±11	13±7		21±10	22±7	131±65	3±3	19±12	1±1
8,0-8,5	24±15	19±10	19±11			14±8	22±7	62±30			
8,5-9,0	15±9	22±10	10±6			9±7	19±7	52±26			
9,0-9,5	20±15	13±9	7±5			7±6	18±6	39±20			
9,5-10,0	10±8	10±9	6±5			8±6	14±7	29±18			
10,0-10,5	8±6	9±8	5±5			5±5	15±7	13±15			
10,5-11,0	6±5	7±9	5±5				10±7				
11,0-11,5	4±4	2±4	3±3				8±7				
11,5-12,0	2±2	2±4	2±2								

ния γ -квантов, состоящие из сечений образования дискретных γ -линий и сечений образования γ -квантов, обусловленных неразрешенной частью спектра. Результаты измерений таких сечений приведены в работах [6-9, 11-13]. Расчетные значения групповых сечений образования γ -квантов для ²³⁸U приведены в работе [14].

Авторами на импульсном 14-МэВ генераторе проведены измерения сечений образования отдельных γ -линий и групповых сечений $\sigma_\gamma = f(E_\gamma)$ для ядер от ¹⁰B до ²⁰⁹Bi [6, 7, 9]. В настоящей работе приведены также результаты наших измерений $\sigma_\gamma = f(E_\gamma)$ для Cu и делящихся ядер ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁹Pu. Эти данные наряду с ранее опубликованными использованы для определения полных сечений образования γ -квантов при неупругом взаимодействии 14-МэВ нейтронов с различными ядрами.

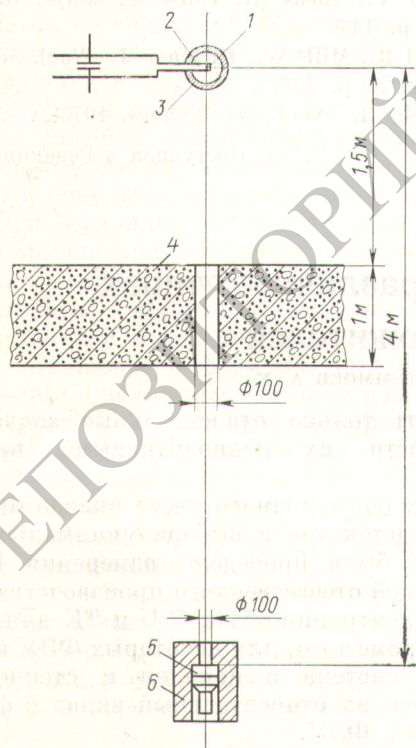
Методика эксперимента. Измерения выполнены на импульсном источнике 14-МэВ нейтронов на сферических образцах (4л-геометрия) с использованием методики времени пролета, сцинтилляционного гамма-спектрометра полного поглощения с кристаллом NaI(Tl) диаметром 200 × 100 мм и анализатора импульсов АИ-256. Схема опыта приведена на рис. 1. Гамма-детектор размещали за бетонной защитой на пролетном расстоянии 4 м от источника нейтронов. Поверхность кристалла NaI (Tl), обращенная в сторону исследуемого образца, ограничивалась свинцовым коллиматором внутренним диаметром 100 мм.

Исследуемые образцы, в основном, естественного изотопного состава выполнены в форме полых сфер. Цирконий-третиевая мишень нейтронного генератора находилась в центре образца. Такая

геометрия измерений позволяет не учитывать зависимость выхода γ -квантов от угла вылета относительно направления движения нейтрона и оптимально использовать поток нейтронов.

Для получения аппаратурного спектра γ -излучения проводили два измерения: с исследуемым образцом и без образца (фоновое распределение). При этом учитывали также фон от γ -квантов, возникающих в устройстве мишени генератора нейтронов. Эффективность регистрации гамма-детектора определяли экспериментально и с помощью расчетных данных, приведенных в работе [10]. Более подробно эксперимент описан в наших работах [6, 7, 9].

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 приведены групповые сечения образования γ -квантов, полученные умножением дифференциальных сечений в мб/ср на 4π . В табл. 2 даны полные сечения σ_γ , полученные суммированием групповых сечений от $E_{\gamma}^{\text{мин}}$ до $E_{\gamma}^{\text{макс}}$. Как видно, наши результаты по сечениям γ -образования для большинства ядер в пределах погрешности измерений совпадают с опубликованными данными. По результатам наших измерений и работ [1—5, 8, 11, 12] получены взвешенные средние значения сечений σ_γ (оцененные данные), которые также приведены в табл. 2.



Р и с. 1. Схема опыта: 1 — мишень ZrT; 2 — «хобот» ускорительной трубки; 3 — образец; 4 — бетон; 5 — кристалл NaI(Tl) диаметром 200×100 мм; 6 — свинец

Таблица 2

Полные сечения образования γ -квантов при неупругом взаимодействии 14-МэВ нейтронов, мб

Ядро-мишень	Энергия или интервал энергии E_γ , МэВ	Данные настоящей работы	Данные других работ	Усредненные данные
¹⁰ B	0,48—6,4	161±31 [6]	146±9 [4]	147±8,6
¹¹ B	1,1—9,3	410±62 [6]	245±35 [1]	230±12
C	4,45	255±26 [7]	232±18 [2]	
			202±26 [8]	
N	0,73—7,0	333±60 [6]	298±56 [5]	314±41
	1,63—7,0	317±58 [6]	298±82 [3]	
O	0,74—7,1	500±65 [6]	451±80 [3]	474±49
	0,98—7,1	488±62 [6]	520±130 [12]	
Mg	0,5—7,1	1732±380 [9]	1400±169 [8]	1445±151
	0,5—12,0	1620±334 [9]	1600±228 [8]	
Al	0,2—8,5	1914±335 [6]	1700±425 [12]	1832±263
	0,5—10,5	1858±314 [6]	1430±166 [8]	
	0,5—8,5	1858±314 [6]	1537±195 [8]	1524±147
	0,2—8,5	1100±200 [6]	800±400 [13]	
Si	2,0—11,0	2000±380 [9]	—	1620±162
	0,5—12,0	1855±344 [9]	1553±183 [8]	
	0,5—8,5	—	1580±192 [8]	
P	0,4—8,5	2315±555 [9]	—	—
	0,5—12,0	2483±525 [9]	—	
S	0,5—8,5	2250±410 [9]	—	—
	0,5—10,5	2237±400 [9]	—	
Ti	0,5—12,0	4010±690 [9]	—	3220±297
	0,5—8,5	3924±653 [9]	3037±334 [8]	
Fe	0,2—8,5	4273±726 [6]	3333±415 [8]	4495±412
	0,5—11,0	4159±700 [6]	4600±500 [11]	
	0,5—8,5	—	3156±354 [8]	5985±984
	0,2—8,5	1600±320 [6]	3539±460 [8]	
Cu	2,0—11,0	5831±1268	1350±575 [13]	—
	0,5—10,5	5785±1260	6300±1575 [12]	
	0,5—10,0	5740±1223	2822±309 [8]	5985±984
	0,5—8,5	—	3419±500 [8]	
Zn	0,2—8,5	5570±990 [9]	—	—
	0,5—12,0	5517±959 [9]	—	
Zr	0,5—8,5	5830±1340 [9]	—	—
	0,5—12,0	5712±1259 [9]	—	
Mo	0,5—8,5	6800±1200 [9]	—	5232±495
	0,5—12,0	6766±1179 [9]	4903±545 [8]	
	0,5—8,5	—	5870±833 [8]	
Cd	0,2—8,5	7195±1362 [9]	—	—
	0,5—12,0	7130±1313 [9]	—	
In	0,5—8,5	6815±1200 [9]	—	—
	0,5—12,0	6750±1147 [9]	—	
Sn	0,5—8,5	6480±1220 [9]	—	—
	0,5—12,0	6442±1189 [9]	—	
Ta	0,5—8,5	9000±1830 [6]	4975±998 [8]	5896±876
	0,3—9,0	—	6704±1217 [8]	
W	0,5—7,0	10400±2100 [6]	—	—
Hg	0,5—10,5	9400±1640 [9]	—	
	0,5—8,5	9371±1616 [9]	—	—
Pb	0,5—8,5	6500±1080 [6]	—	
	0,5—12,0	6338±1032 [6]	—	5225±712
	0,5—5,0	6100±970 [6]	4200±1050 [12]	
Bi	0,5—12,0	11680±2780 [9]	—	—
	0,5—8,5	11547±2700 [9]	—	
²³⁵ U	0,3—8,0	16596±2820	15382±1848 [8]	15730±1545
	0,5—8,0	—	20632±2376 [8]	
²³⁸ U	0,3—8,0	12203±1924	9140±1036 [8]	9829±912
	0,5—8,0	—	10546±1358 [8]	
	0,4—8,5	—	9885±1660 [14]	16623±1830
	0,5—8,0	—	16332±2356 [8]	
²³⁹ Pu	0,5—8,0	17060±2910	23150±3056 [8]	
	0,3—8,0	—	—	

Значения полных сечений σ_γ , полученных нами, в зависимости от $A^{1/3}$ приведены на рис. 2. Для ядер от кислорода до ²³⁸U (за исключением Pb) в пределах погрешностей измерений наблюдается линейная зависимость $\sigma_\gamma = f(A^{1/3})$. Для легких ядер от бора до кислорода также наблюдается линейная зависимость $\sigma_\gamma = f(A^{1/3})$, но с другим наклоном. Сечение γ -образования для ²³⁵U и ²³⁹Pu

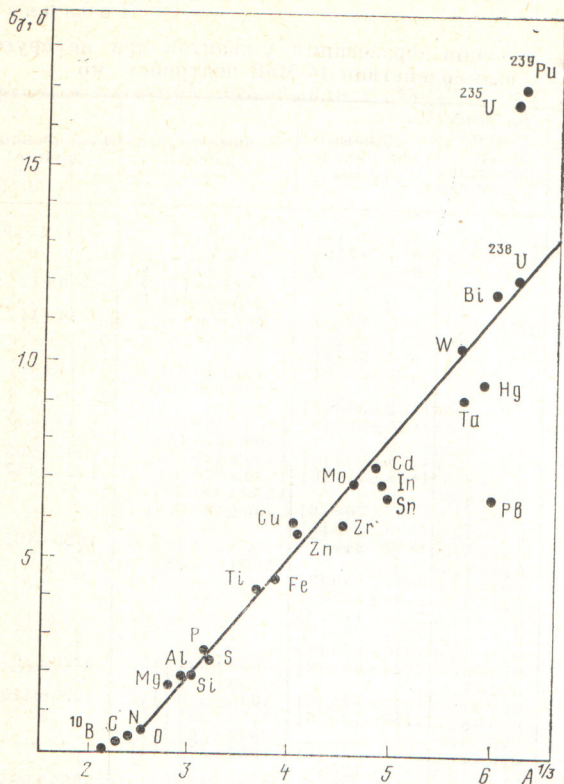


Рис. 2. Зависимость сечения образования γ -квантов от массового числа $\sigma_{\gamma} = f(A^{1/3})$

не подчиняется такой простой зависимости и примерно в полтора раза больше, чем для ^{238}U . Это, по-видимому, можно объяснить тем, что для ^{235}U

и ^{239}Pu основным процессом γ -образования является деление, а сечение деления этих ядер примерно в два раза больше, чем для ^{238}U .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batatt M., Graves E. «Phys. Rev.», 1955, v. 97, p. 1266.
2. Stewart D., Martin P. «Nucl. Phys.», 1964, v. 60, p. 349.
3. Engesser F., Thompson W. «J. Nucl. Energy», 1967, v. 21, p. 487.
4. Nellis D., Tucker W., Morgan Ira L. «Phys. Rev. C», 1970, v. 1, p. 847.
5. Nyberg-Ponnert K., Jönson B., Bergqvist I. «Physica Scripta», 1971, v. 4, p. 165.
6. Безотосный В. М. и др. В кн.: Ядерные константы. Вып. 19. М., Атомиздат, 1975, с. 77.
7. Безотосный В. М. и др. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Ч. 4. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1976, с. 133.
8. Drake D., Arthur E., Silbert M. «Nucl. Sci. Engng», 1978, v. 65, p. 49.
9. Безотосный В. М. и др. В кн.: Ядерные константы. Вып. 3 (30). М., ЦНИИатоминформ, 1978, с. 21.
10. Варганов Н. А., Самойлов П. С. Практические методы сцинтилляционной гамма-спектрометрии. М., Атомиздат, 1964.
11. Scherrer V., Theus R., Faust W. «Phys. Rev.», 1953, v. 89, p. 1268.
12. Scherrer V., Theus R., Faust W. «Phys. Rev.», 1953, v. 91, p. 1476.
13. Caldwell R., Mills W., Hickman J. «Nucl. Sci. Engng», 1960, v. 8, p. 173.
14. Takahashi H. «Nucl. Sci. Engng», 1973, v. 51, p. 296.

Поступила в Редакцию 05.11.79

УДК 539.107.43

Содержание ^{232}Th , ^{238}U и ^{40}K в различных типах фотоэлектронных умножителей

КОВАЛЬЧУК Е. Л., СМОЛЬНИКОВ А. А., ТЕММОВЕВ А. Х.

При сцинтилляционной гамма-спектрометрии ультрамалого количества радионуклидов необходимо точно знать собственный фон детектирующей установки и в первую очередь — фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), если монокристалл NaI (Tl) имеет низкое содержание радиоактивных примесей. Как следует из анализа спектра α -излучения [1], концентрации ^{232}Th и ^{238}U для монокристалла NaI (Tl), с помощью которого выполнены данные измерения, составляют $\sim 10^{-11}$ г на 1 г кристалла. Таким образом, большая часть фона используемой детектирующей установки, за исключением внешнего фона, принадлежит упаковке кристалла и ФЭУ. В большинстве работ, посвященных исследованиям вклада ФЭУ в фон детектора, рассмотрены либо отдельные типы ФЭУ,

либо даны только относительные значения загрязненности их радиоактивными примесями [2].

В целях более точного учета вклада ФЭУ в общий фон детектора и выбора минимально активных ФЭУ были проведены измерения 14 типов умножителей отечественного производства и вычислена концентрация ^{232}Th , ^{238}U и ^{40}K для каждого из них. Кроме того, для некоторых ФЭУ измерены диодная система с цоколем и стекло колбы и определен их относительный вклад в фон, обусловленный ФЭУ.

Сравнивалось также содержание ^{232}Th , ^{238}U и ^{40}K в стекле колбы некоторых ФЭУ и в образцах кварцевого песка — возможного исходного сырья для изготовления кварцевых колб умножителей.