

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

В.С. Трошин

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОНУКЛИДОВ
ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОВ**

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2011

УДК 539.1.074(075)
ББК 22.38я7
Т76

Трошин В.С. Характеристики радионуклидов для градуировки гамма-спектрометров: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 104 с.

Учебное пособие предназначено для обеспечения практических занятий по измерению эффективности полупроводниковых и сцинтилляционных гамма-спектрометров. Приведены основные характеристики 41 радионуклида (схема распада, период полураспада, квантовые выходы на распад для основных энергий фотонов) и аппаратурные спектры, измеренные на различных типах полупроводниковых спектрометров.

Пособие ориентировано на студентов, обучающихся по направлениям в области «Ядерная физика и технологии».

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент д-р физ.-мат. наук А.В. Бушуев

ISBN 978-5-7262-1514-3

© *Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2011*

Содержание

Введение	5
Характеристики радионуклидов	8
Na-22	8
Sc-46.....	10
Ti-44+Sc44.....	12
Cr-51.....	14
Mn-54.....	16
Fe-59.....	18
Co-57.....	20
Co-58.....	22
Co-60.....	24
Zn-65.....	26
Se-75.....	28
Y-88.....	30
Nb-93m.....	32
Nb-94.....	34
Nb-95.....	36
Ru-106+Rh-106.....	37
Ag-108m.....	40
Ag-110m.....	41
Cd-109.....	44
In-114m.....	46
Sn-113.....	48
I-125.....	50
Cs-134.....	51
Cs-137.....	53
Ba-133.....	55
Ce-139.....	58
Ce-144.....	60
Eu-152.....	63
Gd-153.....	67
Tm-170.....	69

Ta-182	70
Ir-192.....	73
Hg-203.....	75
Pb-210.....	77
Bi-207.....	79
Ra-226.....	81
Th-228.....	84
Np-237+Pa-233.....	88
Am-141.....	92
Am-243+Np-239.....	94
Cf-249.....	98
Список литературы.....	101

Введение

При решении некоторых прикладных задач радиационной физики и радиоэкологии необходимо определять активность радионуклидов в образцах окружающей среды, активационных детекторах и др. Наиболее распространенным средством измерений активности является однокристалльный гамма-спектрометр.

Измерение активности основано на определении числа импульсов в пике полного поглощения (ППП) аппаратурного спектра. Активность измеряемого источника (образца) рассчитывается следующим образом:

$$A_X = \frac{S_X(E) k_c(E) k_{\text{сп}}(E)}{\Delta t \varepsilon(E) \eta(E)},$$

где A_X – активность исследуемого источника (образца), $S_X(E)$ – число импульсов в ППП аппаратурного спектра от фотонов с энергией E , Δt – “живое время” измерения аппаратурного спектра, $\varepsilon(E)$ – эффективность регистрации по ППП в фиксированной геометрии, $\eta(E)$ – квантовый выход фотонов на распад, $k_c(E)$ – поправка на «утечку» импульсов из ППП за счет суммирования каскадных фотонов, $k_{\text{сп}}(E)$ – поправка на поглощение фотонов в источнике (образце).

Эффективность регистрации определяется на стадии аттестации спектрометра с помощью эталонных мер активности радионуклидов (образцовых источников гамма-излучения) в геометрии идентичной рабочим измерениям. Точечные значения эффективности рассчитываются следующим образом:

$$\varepsilon(E_i) = \frac{S_M(E_i) k_c(E_i) k_{\text{сп}}(E_i)}{\Delta t A_M \eta(E_i)},$$

где A_M – активность эталонной меры, $S_M(E_i)$ – число импульсов в ППП от фотонов с энергией E_i .

Основными характеристиками градуировочных источников является их активность и квантовый выход фотонов на распад (интенсивность). Квантовый выход на распад является ядерно-физической характеристикой, определяемой в результате экспериментов. Результаты экспериментальных исследований различных авторов анализируются, оцениваются и группируются в базы данных.

В РФ отсутствуют рекомендованные схемы распадов и соответствующие квантовые выходы. Единственным общим источником этих данных для РФ служат данные МКРЗ 38, изданные в 1987 году [1]. Из более поздних данных доступны TABLE 8 [2] и GECAT [3], полученные из базы данных ENSDF 98.

Ограниченное число характеристик радионуклидов приведено в IRDF2002 [4]. Наиболее современными базами данных являются ENDF/B 7.0 [5], NuDat 2.5 [6] и JEFF 3.1 [7], доступ к которым осуществлялся через ИНТЕРНЕТ.

В настоящем учебном пособии проведен анализ данных перечисленных источников и даны соответствующие рекомендации. Рассмотрены характеристики 41 радионуклида, которые могут быть применены для градуировки спектрометров.

Радионуклиды, приведенные в учебном пособии, можно разделить на три группы. В первую группу входят радионуклиды, активность которых определялась организацией-изготовителем. Для этих радионуклидов измерялись точечные значения эффективности регистрации по пику полного поглощения для нескольких типов полупроводниковых детекторов. По точечным значениям эффективности подбиралась аналитическая аппроксимация этой зависимости для последующего расчета эффективности для измеряемого источника. Неопределенность аппроксимации не превышала 4%.

Вторая группа радионуклидов содержит радионуклиды, полученные от организации-изготовителя, но не аттестованные по активности (Nb-94, Ag-110m, Np-237, Am-243, Cf-249) и радионуклиды, полученные автором активацией на реакторе ИРТ МИФИ, (Sc-46, Co-58, Fe-59, In-114m, Ta-182, Ir-192).

Для перечисленных радионуклидов активность определялась по наиболее интенсивным энергиям фотонов по аппроксимированным эффективным полупроводниковых детекторов.

К третьей группе относятся радионуклиды, которые отсутствовали в наличии у автора, и не могли пройти экспериментальную проверку (Nb-95, Ag108m, I-125, Tm-170, Hg-203).

В учебном пособии приведены периоды полураспада, схемы распада, квантовые выходы (интенсивности) основных фотонов и аппаратурные спектры радионуклидов, измеренные на различных типах полупроводниковых детекторов.

Схемы распада, незначительно ретушированные, компилированы из источника [3].

Характеристики радионуклидов

Na-22 ($T_{1/2}=950,64(37)$ сут.)

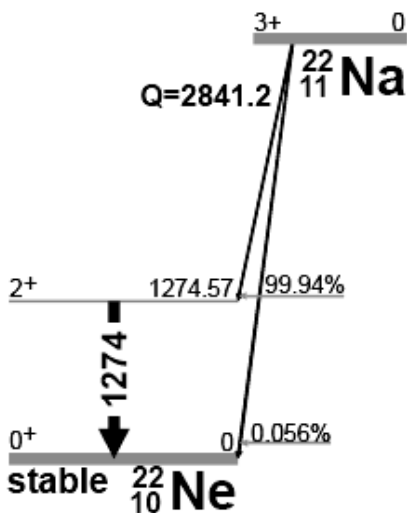
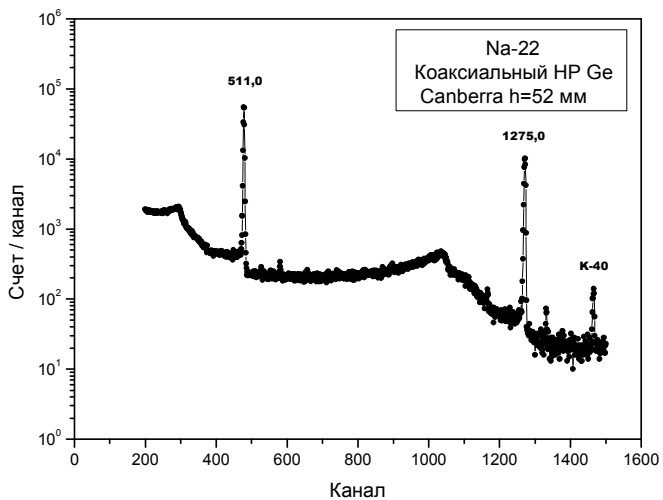


Схема распада Na-22

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
511,0 γ_{\pm}	180,76(4) *
1274,5	99,941(14)

*- при полном поглощении позитронов.



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Sc-46 ($T_{1/2}=83,79(4)$ сут.)

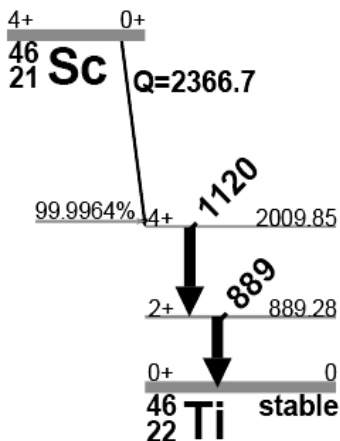
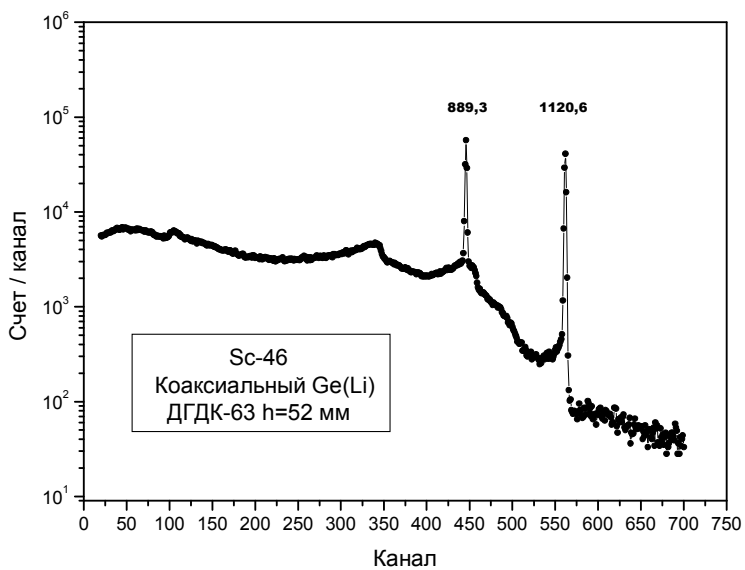


Схема распада Sc-46

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
889,3	99,984(1)
1120,5	99,987(1)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе ДГДК-63

Ti-44 + Sc-44 (T_{1/2}=60,0(11) лет)

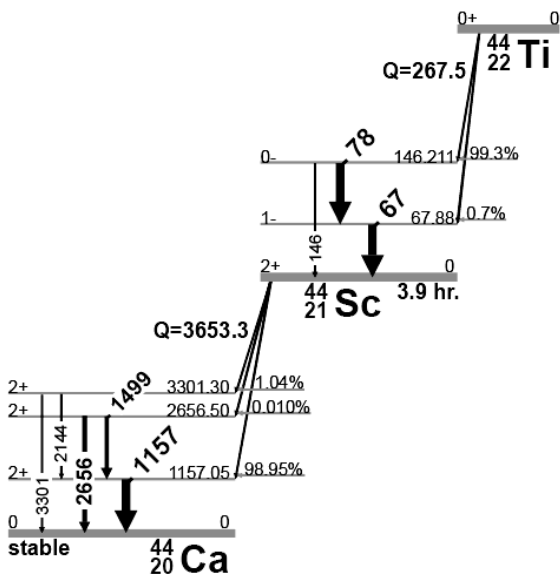
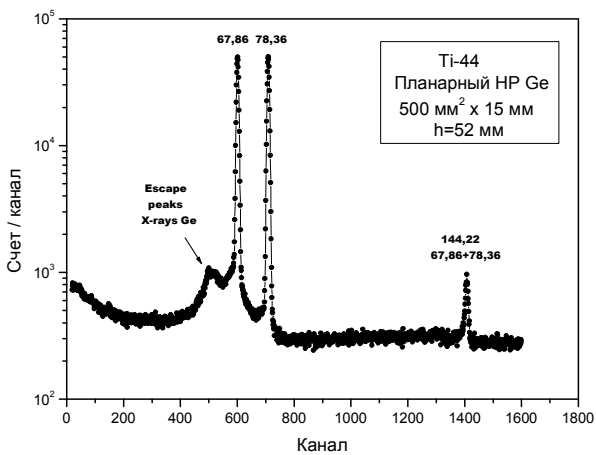


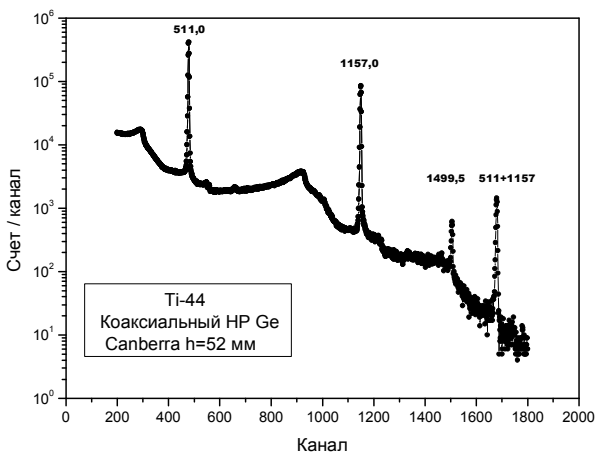
Схема распада Ti-44

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
67,87	93,0(20)
78,36	96,4(17)
146,2	0,092(3)
511,0 γ±	188,54(10) *
1157,0	99,9(4)
1499,5	0,908(15)
2656,5	0,112(3)

*- при полном поглощении позитронов.



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Cr-51 ($T_{1/2}=27,701(1)$ сут.)

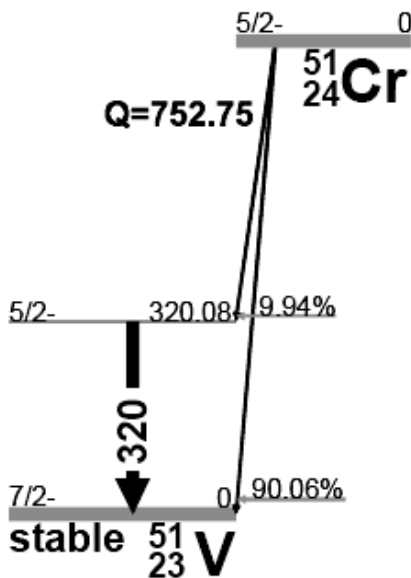
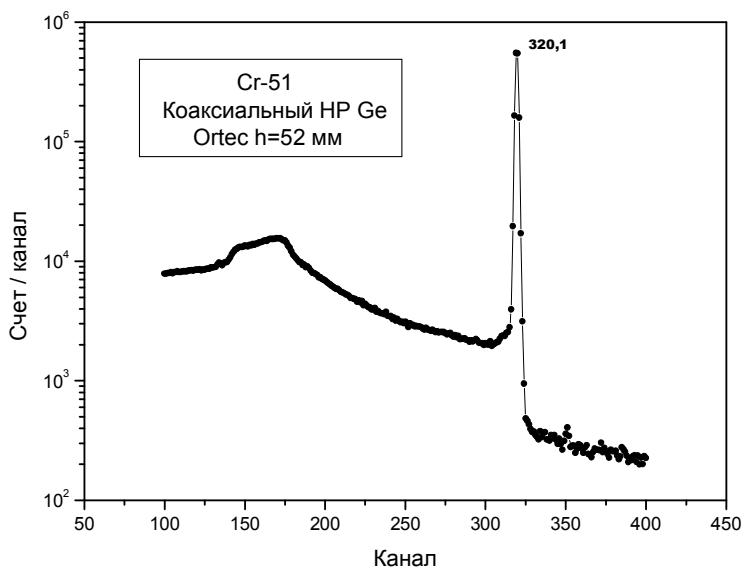


Схема распада Cr-51

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
320,1	9,91(1)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GEM25P4 ORTEC

Mn-54 ($T_{1/2}=312,05(4)$ сут.)

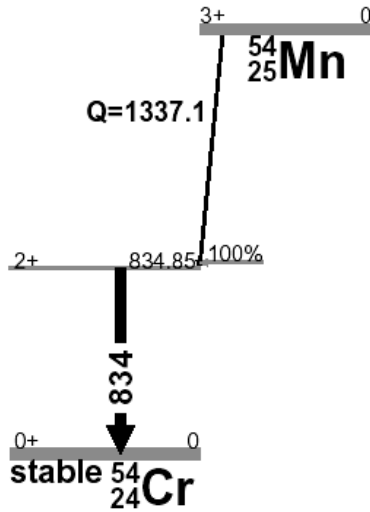
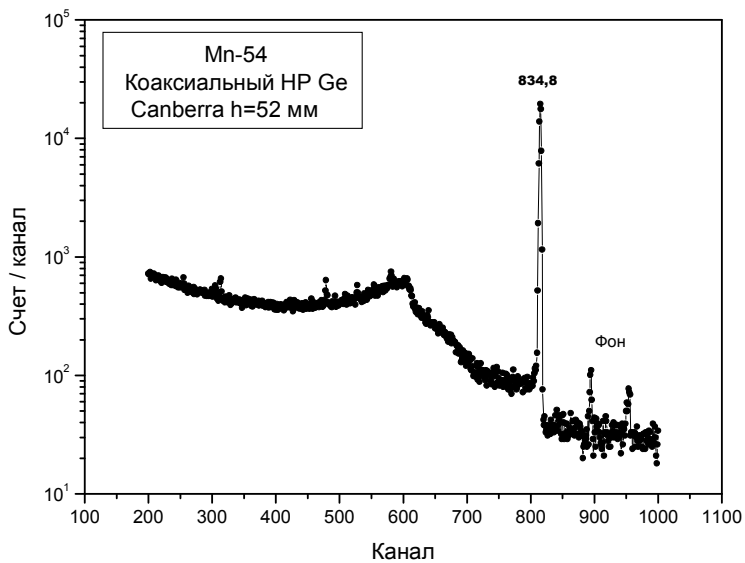


Схема распада Mn-54

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
834,8	99,976(1)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Fe-59 ($T_{1/2} = 44,495(9)$ сут.)

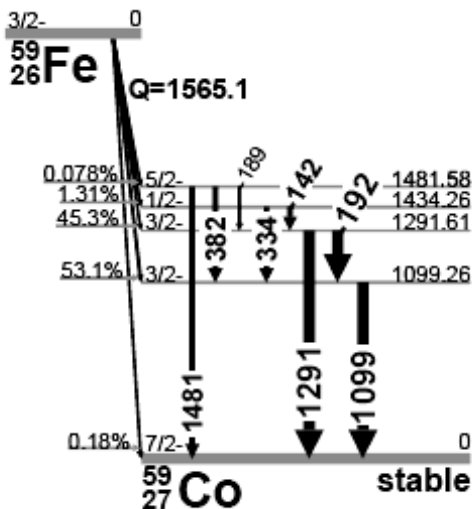
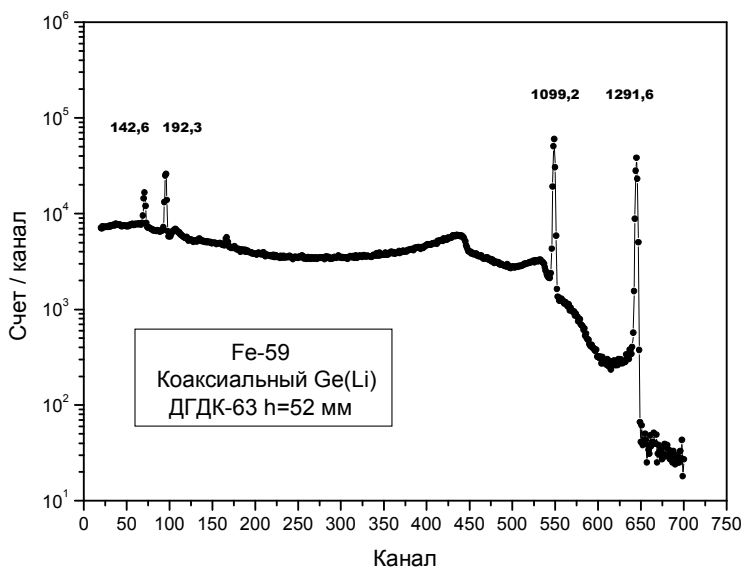


Схема распада Fe-59

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (JEFF 3.1)	Квантовый выход на распад, % (NuDat 2.5)
142,65	0,972(15)	1,02(4)
192,34	2,918(29)	3,08(12)
1099,2	56,59(21)	56,5(18)
1291,6	43,21(25)	43,2(14)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе ДГДК-63

Co-57 ($T_{1/2}=271,74(6)$ сут.)

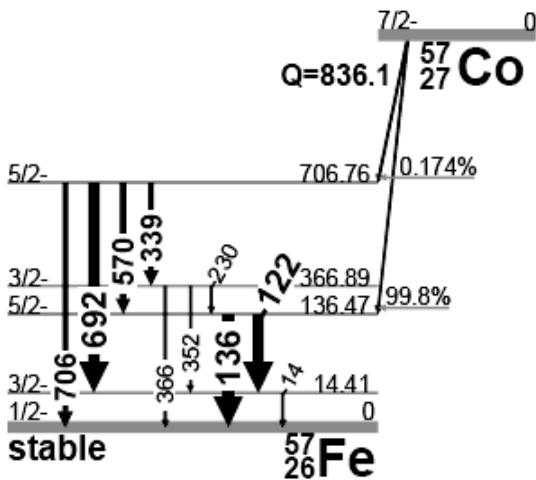
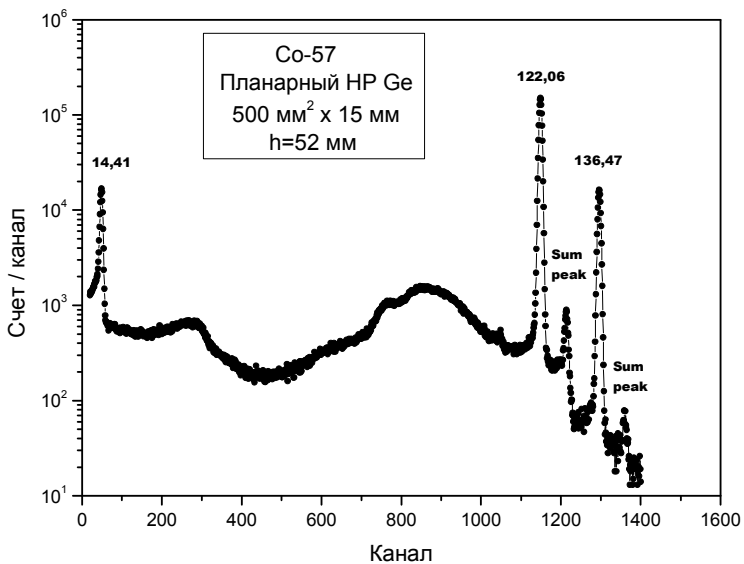


Схема распада Co-57

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
14,41	9,16(15)
122,06	85,60(17)
136,47	10,68(8)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Co-58 ($T_{1/2}=70,86(6)$ сут.)

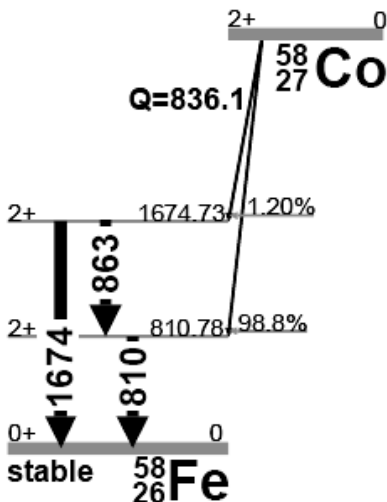
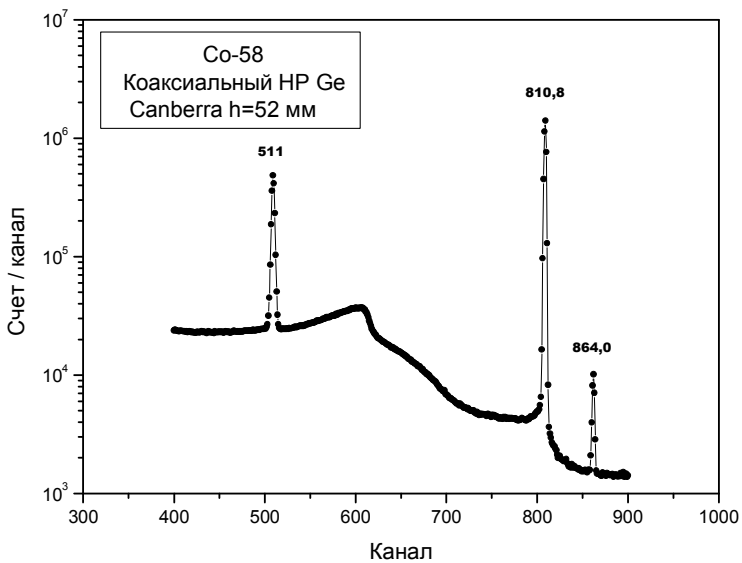


Схема распада Co-58

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
511,0 γ^\pm	29,8(4) *
810,8	99,45(1)
864,0	0,69(1)
1674,7	0,52(1)

* - при полном поглощении позитронов.



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Co-60 ($T_{1/2}=5,271(1)$ лет)

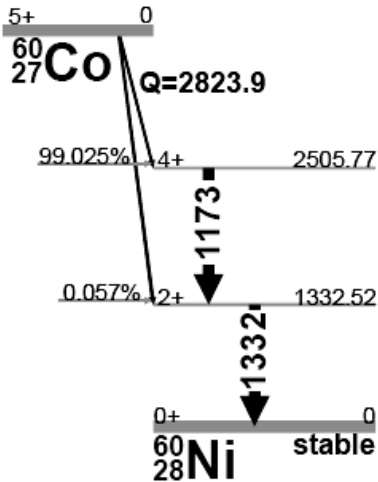
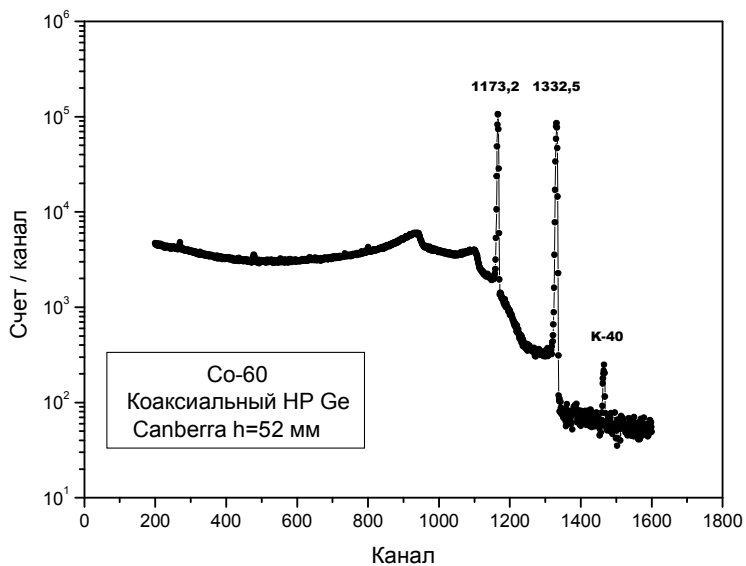


Схема распада Co-60

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
1173,2	99,85(3)
1332,5	99,983(1)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Zn-65 ($T_{1/2}=244,06(10)$ сут.)

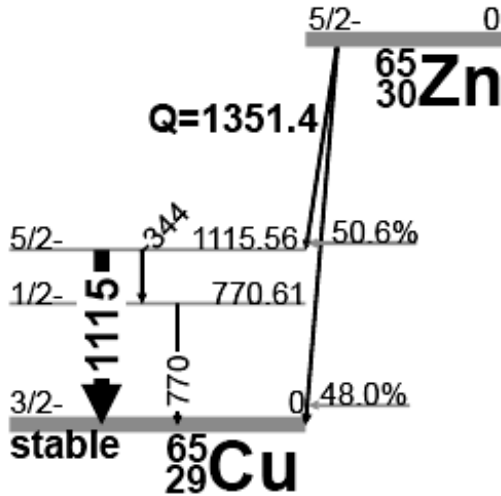
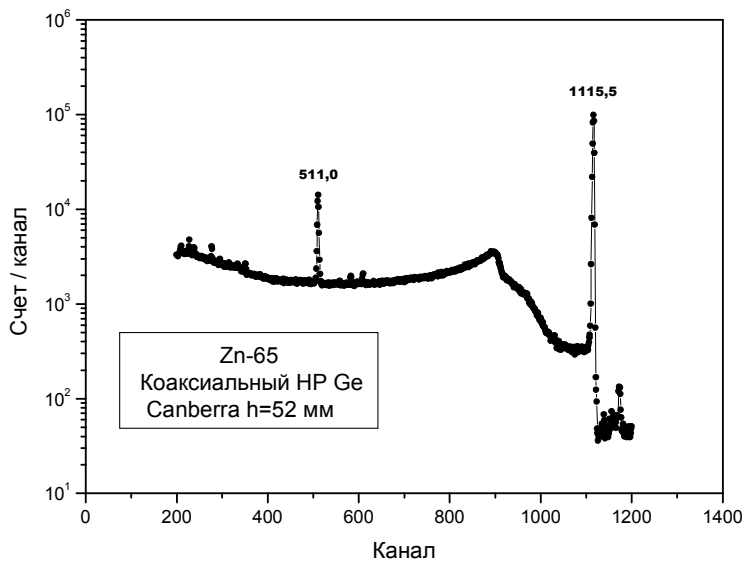


Схема распада Zn-65

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
511,0 γ_{\pm}	2,84(4) *
1115,5	50,60(22)

* - при полном поглощении позитронов.



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Se-75 ($T_{1/2} = 119,79(4)$ сут.)

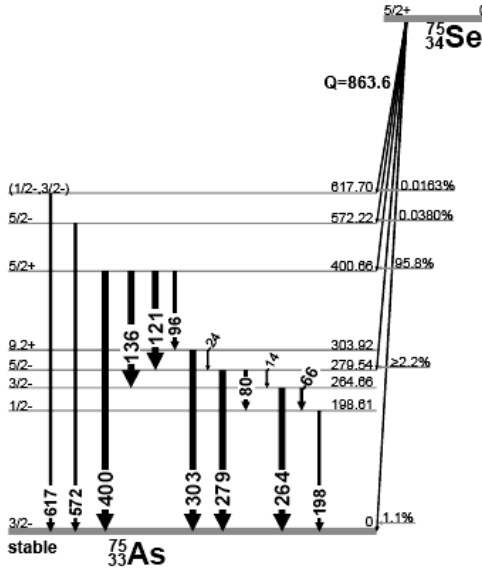
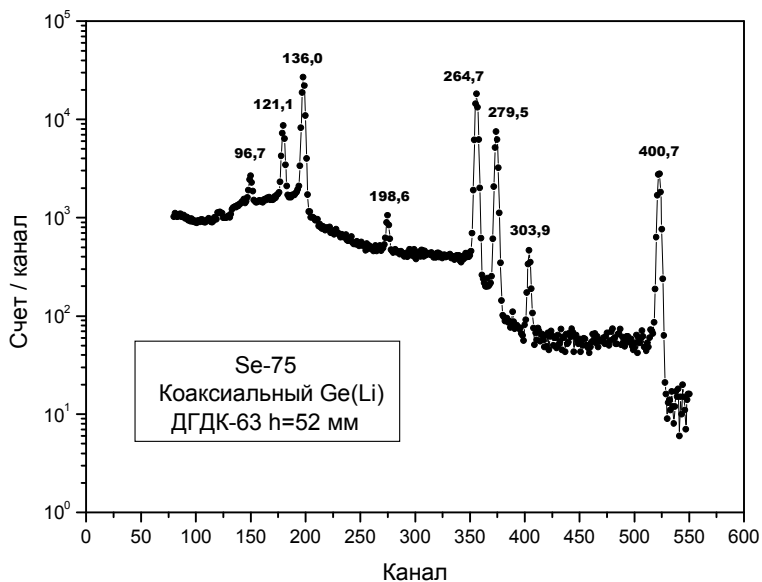


Схема распада Se-75

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
66,05	1,112(12)
96,73	3,42(3)
121,1	17,2(3)
136,0	58,3(7)
198,6	1,48(4)
264,7	58,9(3)
279,5	24,99(14)
303,9	1,316(8)
400,7	11,47(9)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе ДГДК-63

Y-88 ($T_{1/2}=106,63(2)$ сут.)

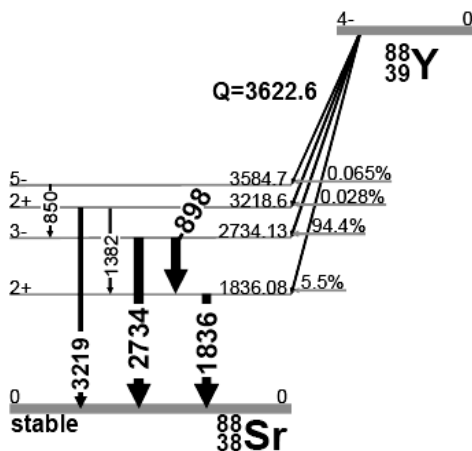
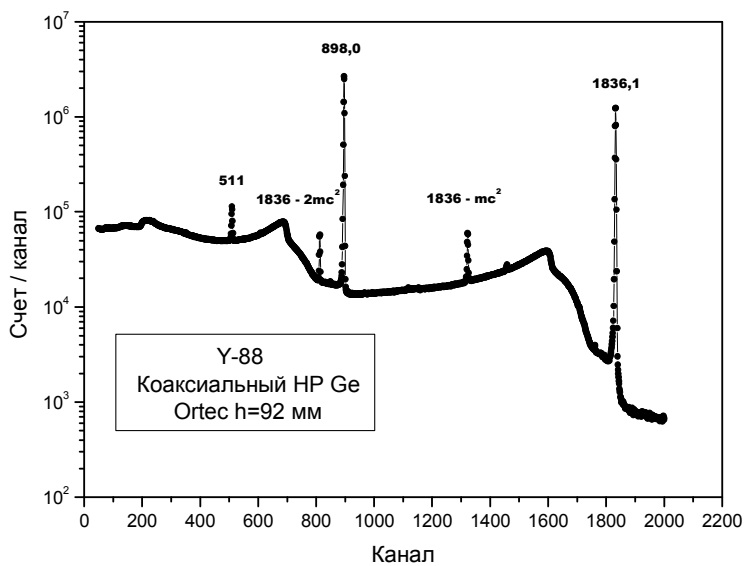


Схема распада Y-88

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
511,0 γ_{\pm}	0,42(4) *
898,0	93,7(3)
1836,1	99,2(3)

* - при полном поглощении позитронов.



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GEM25P4 ORTEC

Nb-93m ($T_{1/2}=16,13(14)$ лет)

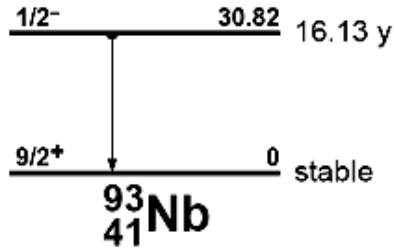
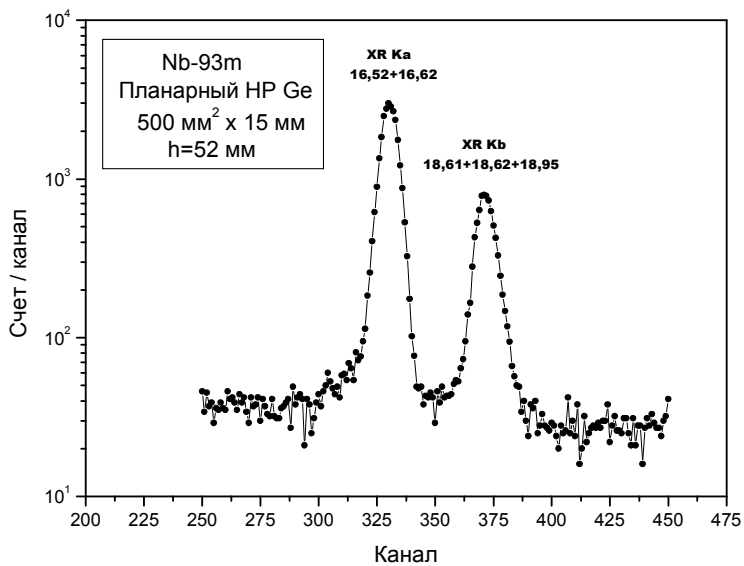


Схема распада Nb-93m

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (IRDF 2002)	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
16,52 XR $k\alpha_2$	3,24(22)	3,29(9)
16,62 XR $k\alpha_1$	6,21(42)	6,28(18)
16,59 XR $k\alpha$ *	9,45	9,57
18,61 XR $k\beta_3$		0,493(14)
18,62 XR $k\beta_1$		0,95(3)
18,95 XR $k\beta_2$		0,216(6)
18,65 XR $k\beta$ *	1,78(12)	1,66



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Nb-94 ($T_{1/2}=20300(1600)$ лет.)

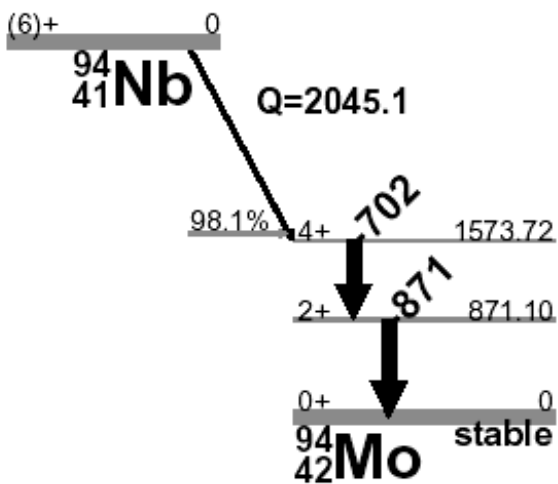
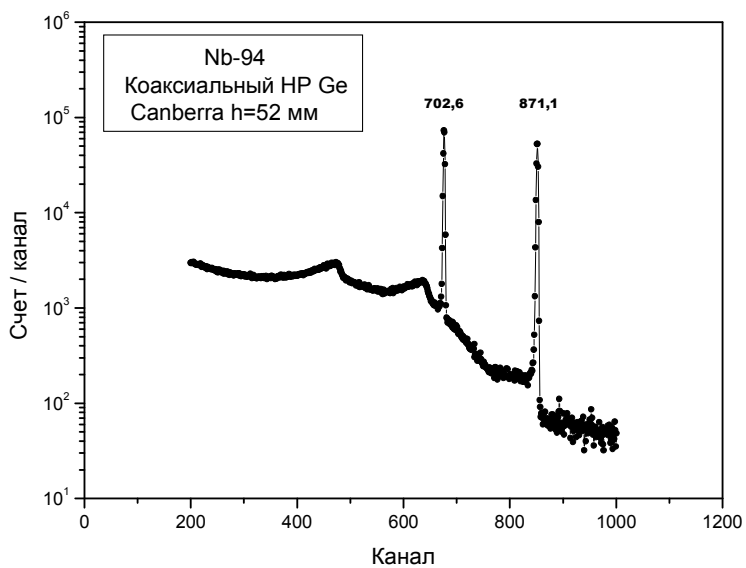


Схема распада Nb-94

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
702,6	99,81	97,9(2)
871,1	99,89	99,9(1)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Nb-95 ($T_{1/2}=34,991(6)$ сут.)

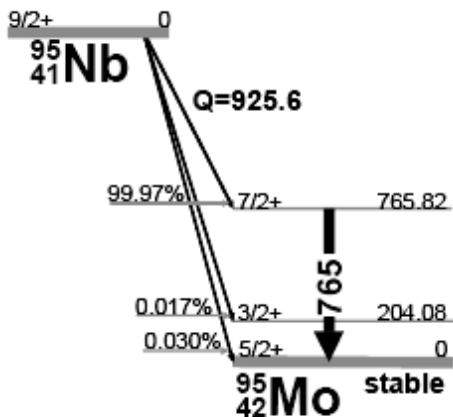


Схема распада Nb-95

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
765,8	99,808(7)

Ru-106+Rh-106 ($T_{1/2}=373,60(15)$ сут.)

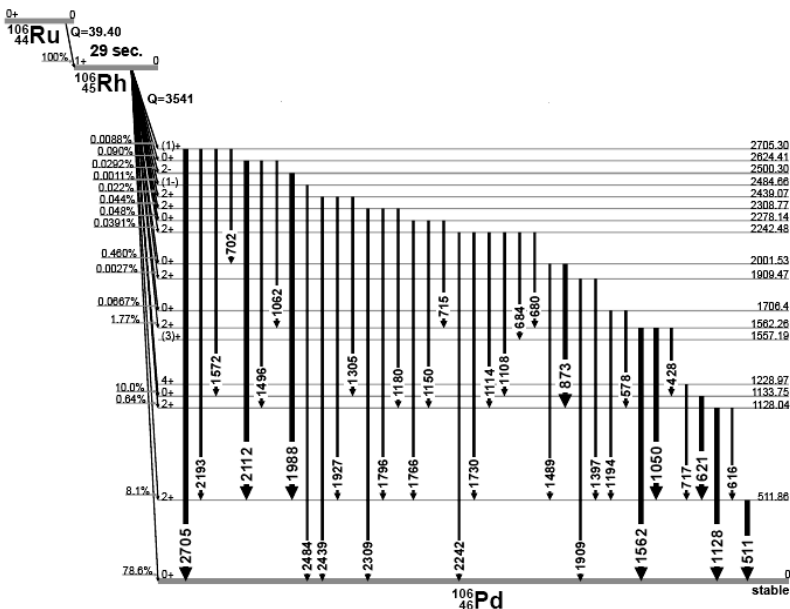


Схема распада Ru-106

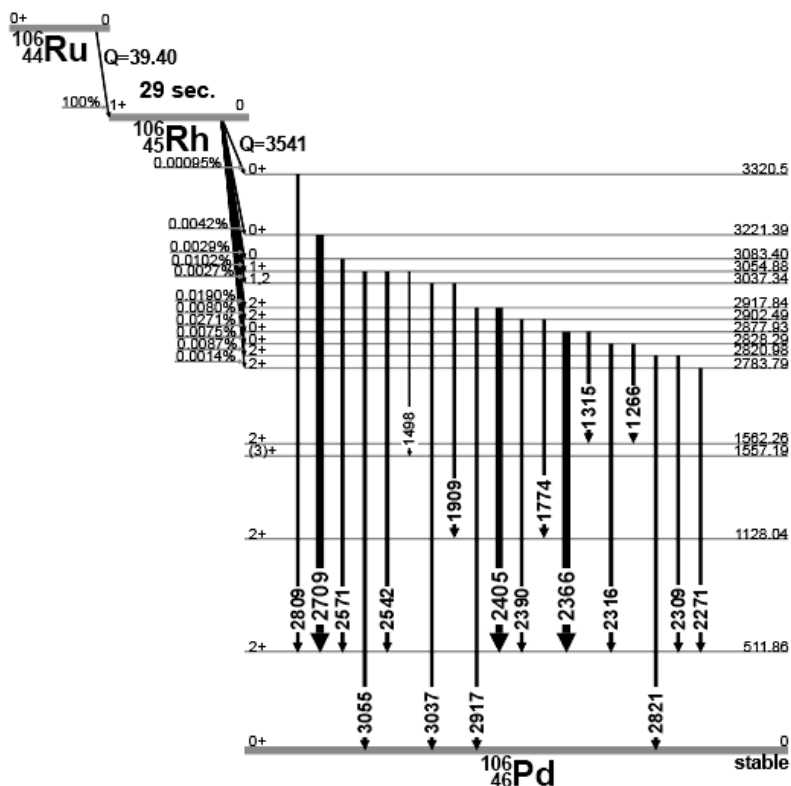
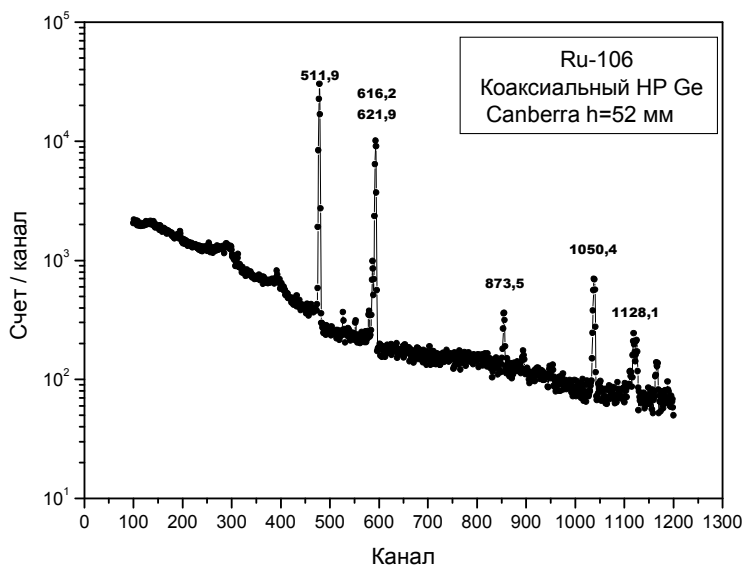


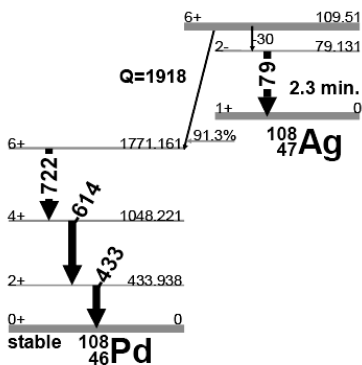
Схема распада Ru-106

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
511,9	20,4
616,2	0,75(8)
621,9	9,93(23)
873,5	0,439(11)
1050,4	1,56(4)
1128,1	0,404(10)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Ag-108m+Ag-108 (T_{1/2}=438(9) лет)



Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
79,13 Ag-108m	6,6(5)
433,94 Ag-108m	90,5
433,96 Ag-108	0,50
614,28 Ag-108m	89,8(19)
618,86 Ag-10□	0,261(22)
632,98 Ag-108	0,176(10)
722,91 Ag-108m	90,8(19)

Схема распада Ag-108m

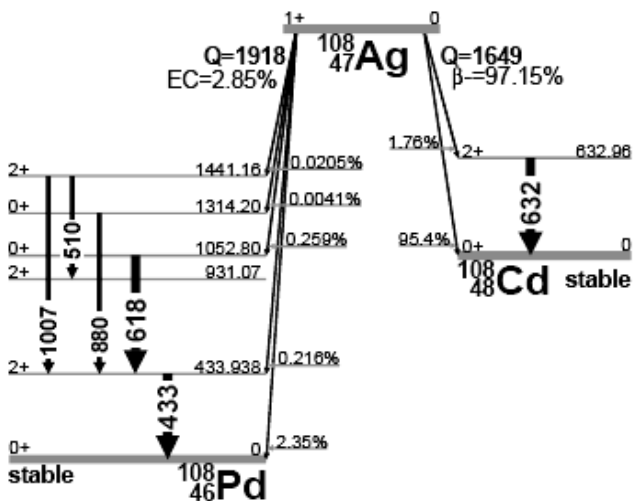


Схема распада Ag 108

Ag-110m ($T_{1/2}=249,76(4)$ сут.)

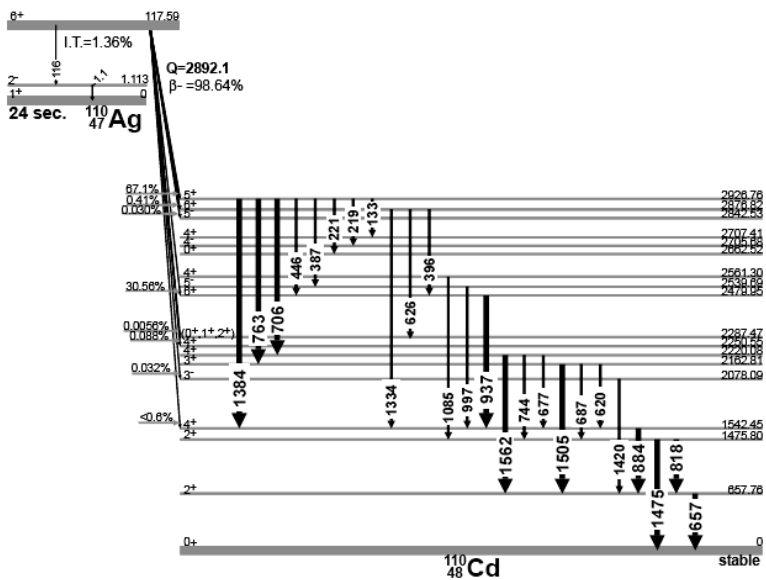
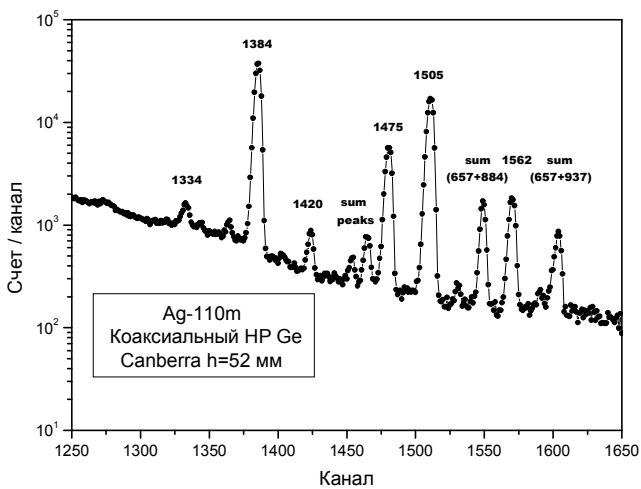
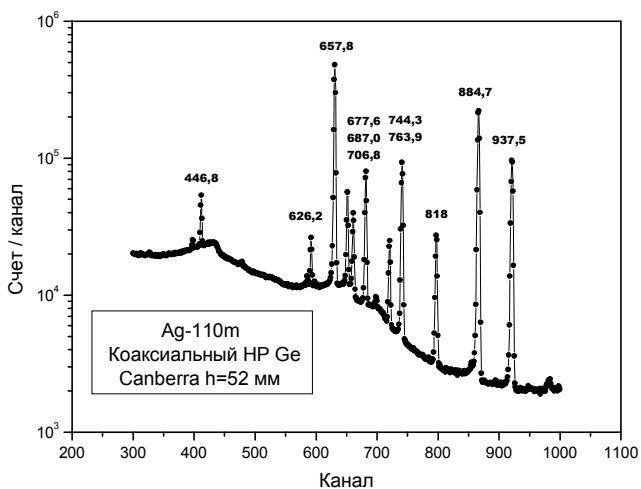


Схема распада Ag-110m

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
446,8	3,62(4)
620,4	2,67(3)
626,2	0,211(2)
657,8	94,3
677,6	10,56(4)
687,0	6,44(5)
706,8	16,33(7)
708,1	0,230(3)
744,3	4,77(9)
763,9	22,62(21)
818,0	7,34(8)
884,7	72,7(4)
937,5	34,2(6)
1384,3	24,9(8)
1475,8	4,17(7)
1505,0	13,60(18)
1562,3	1,244(17)



Аппаратурные спектры, измеренные на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Cd-109 ($T_{1/2}=461,4(12)$ сут.)

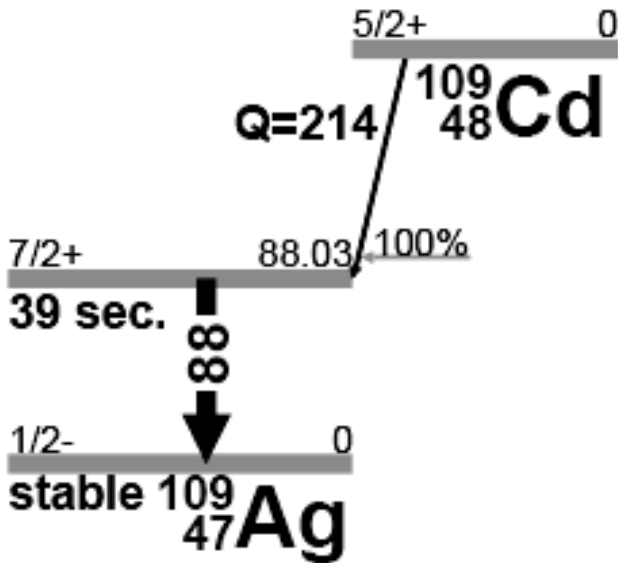
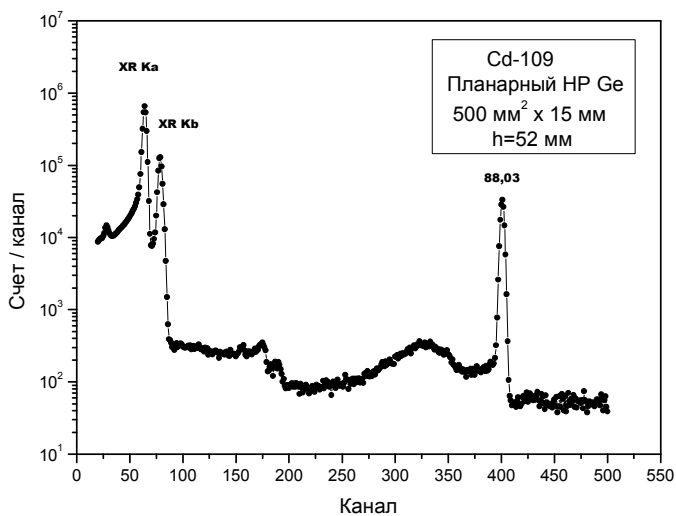


Схема распада Cd-109

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
21,99 $k\alpha_2$	29,8(10)
22,16 $k\alpha_1$	56,1(18)
22,10 $k\alpha^*$	85,9
24,91 $k\beta_3$	4,80(15)
24,94 $k\beta_1$	9,2(3)
25,46 $k\beta_2$	2,31(7)
25,01 $k\beta^*$	16,31
88,03	3,7(1)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

In-114m ($T_{1/2}=49,51(1)$ сут.)

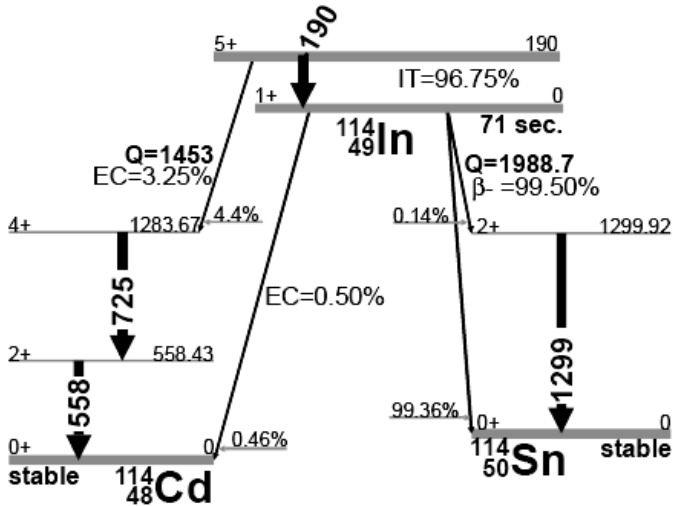
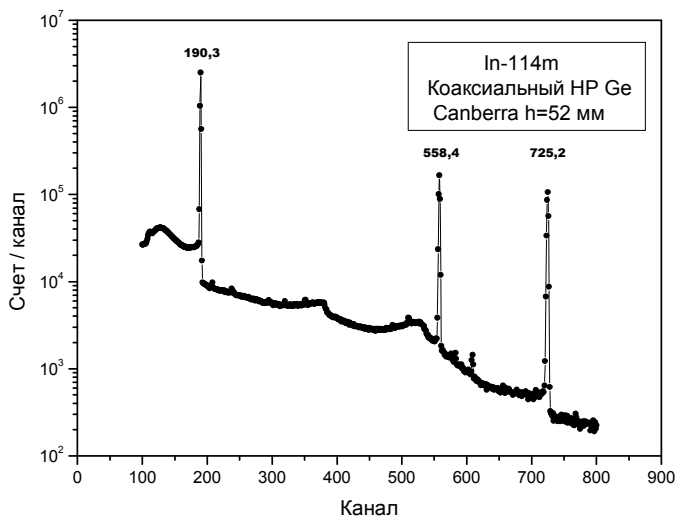


Схема распада In-114m

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
190,3	15,56(15)
558,4	3,2(22)
725,2	3,2(22)
1299,8	0,139



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Sn-113 ($T_{1/2}=115,09(3)$ сут.)

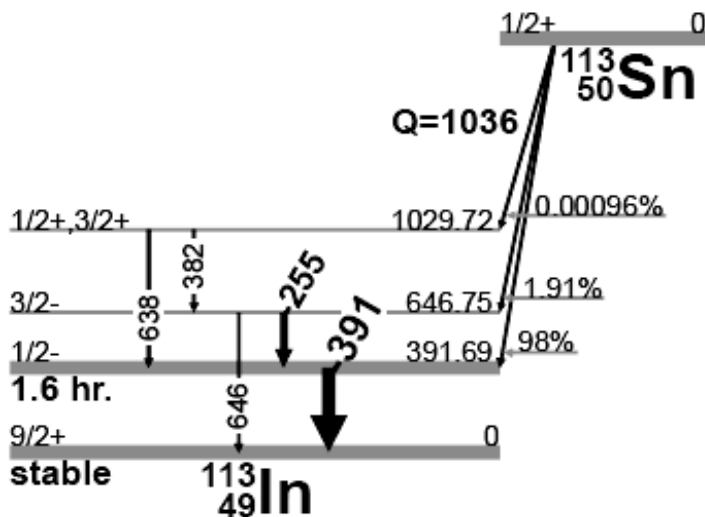
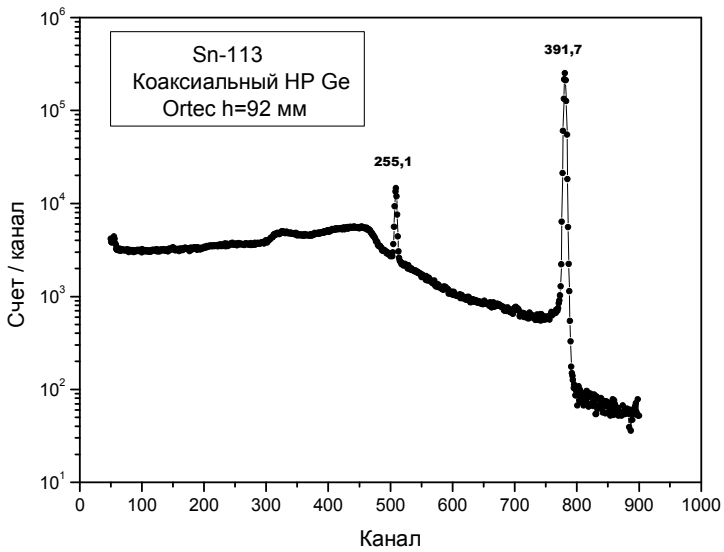


Схема распада Sn-113

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
24,00 XR $k\alpha_2$	27,9(8)
24,21 XR $k\alpha_1$	51,6(15)
24,14 XR $k\alpha^*$	79,5
27,24 XR $k\beta_3$	4,64(14)
27,28 XR $k\beta_1$	8,9(3)
27,86 XR $k\beta_2$	2,38(7)
27,35 XR $k\beta^*$	15,92
255,13	2,11(8)
391,70	64,97(17)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GEM25P4 ORTEC

I-125 ($T_{1/2}=49,51(1)$ сут.)

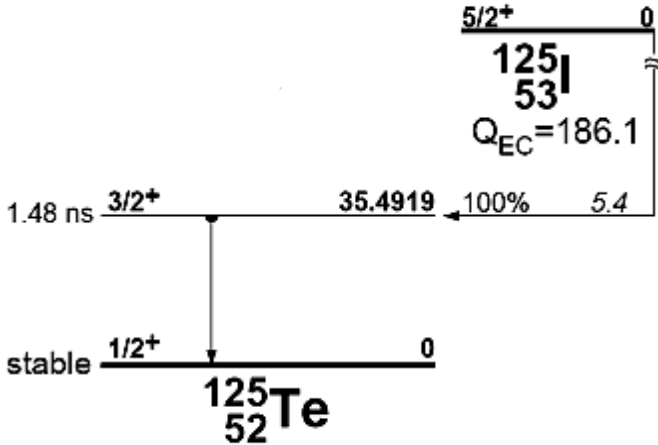


Схема распада I-125

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
27,20 XR $k\alpha_2$	40,1(10)
27,47 XR $k\alpha_1$	74,0(19)
27,38 XR $k\alpha^*$	114,1
30,94 XR $k\beta_3$	6,83(17)
31,00 XR $k\beta_1$	13,2(3)
31,07 XR $k\beta_2$	3,80(9)
31,09 XR $k\beta^*$	23,83
35,49	6,68(13)

Cs-134 ($T_{1/2}=2,062(5)$ лет)

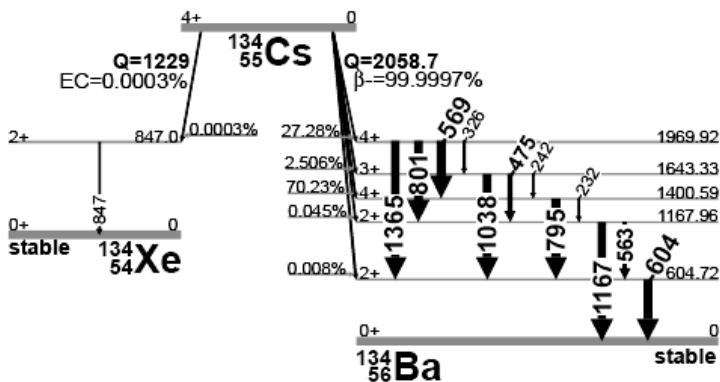
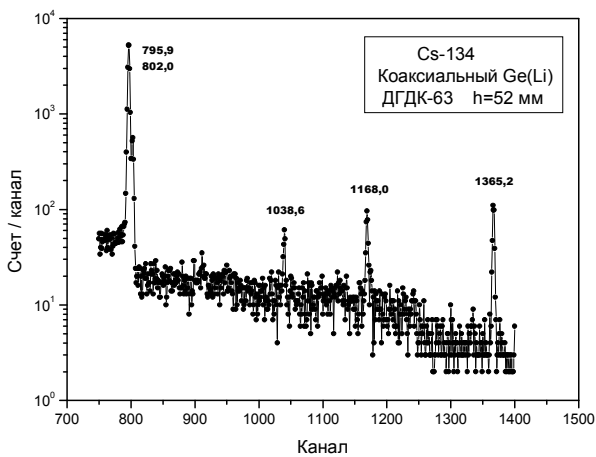
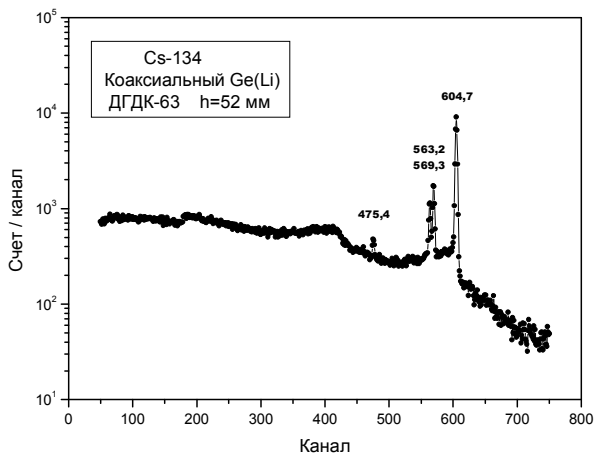


Схема распада Cs-134

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
475,4	1,477(7)
563,2	8,338(14)
569,3	15,373(17)
604,7	97,62(11)
795,9	85,46(6)
802,0	8,688(16)
1038,6	0,990(3)
1168,0	1,790(5)
1365,2	3,017(8)



Аппаратурные спектры, измеренные на коаксиальном полупроводниковом детекторе ДГДК-63

Cs-137 ($T_{1/2}=30,07(3)$ лет)

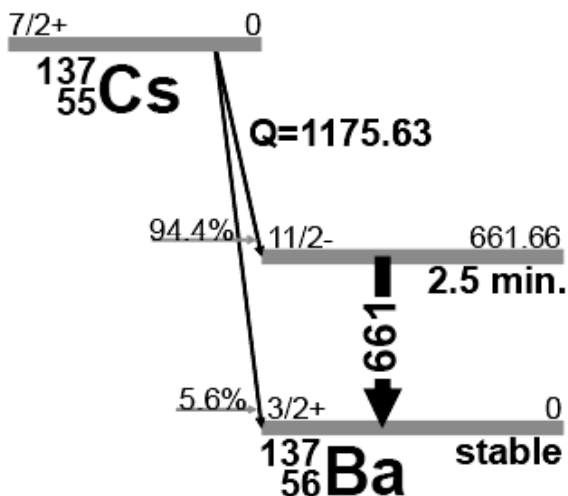
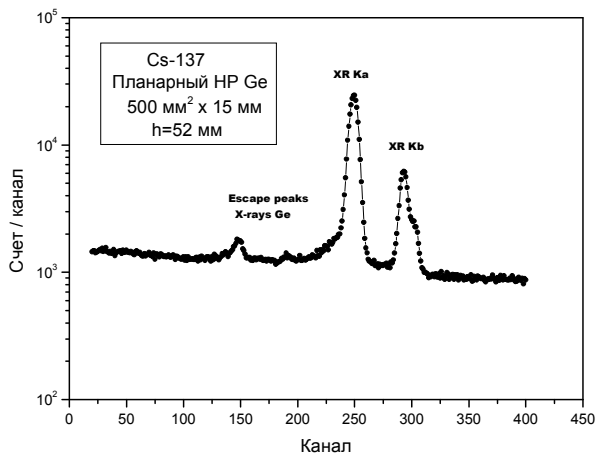
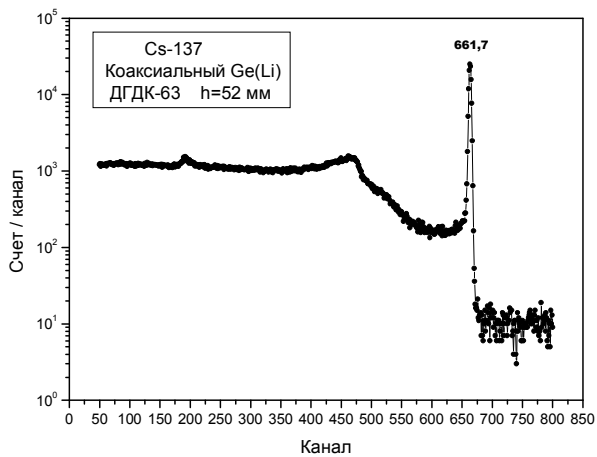


Схема распада Cs-137

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (JEFF 3.1)
31,82 XR $k\alpha_2$	1,99(5)	1,95(9)
32,19 XR $k\alpha_1$	3,64(10)	3,60(16)
32,06 XR $k\alpha^*$	5,63	5,95
36,30 XR $k\beta_3$	0,348(9)	
36,38 XR $k\beta_1$	0,672(18)	
37,26 XR $k\beta_2$	0,213(6)	
36,51 XR $k\beta^*$	1,233	1,31(6)
661,7	85,1(2)	85,0(2)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе ДГДК-63

Ba-133 ($T_{1/2}=10,52(13)$ лет)

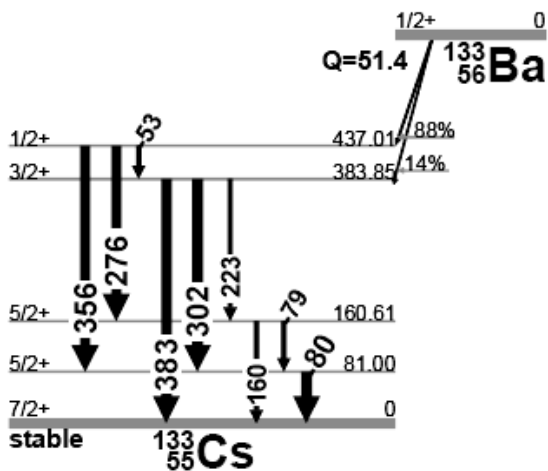
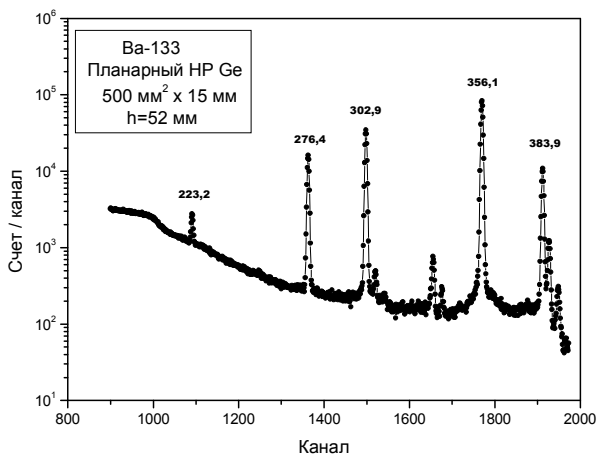
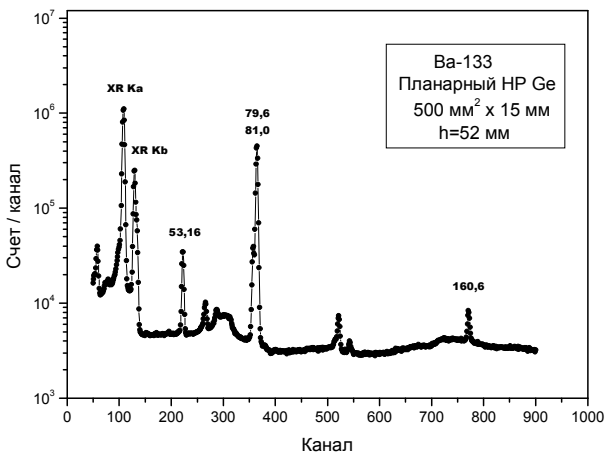


Схема распада Ba-133

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
30,63 XR kα2	34,9(9)	35,1(10)
30,97 XR kα1	63,9(17)	64,3(18)
30,85 XR kα*	98,8	99,4
34,92 XR kβ3	6,05(16)	6,09(16)
34,99 XR kβ1	11,7(3)	11,8(3)
35,82 XR kβ2	3,61(9)	3,64(10)
35,11 XR kβ*	21,36	21,53
53,16	2,199(22)	2,199(22)
79,61	2,62(6)	2,62(6)
81,00	34,06(27)	34,1(3)
79.61+81.00	36,68	36,63
160,6	0,645(8)	0,645(8)
223,2	0,450(4)	0,450(4)
276,4	7,164(22)	7,164(22)
302,9	18,33(6)	18,33(6)
356,0	62,05(19)	62,05(19)
383,8	8,94(3)	8,94(3)



Аппаратурные спектры, измеренные на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Ce-139 ($T_{1/2}=137,64(2)$ сут.)

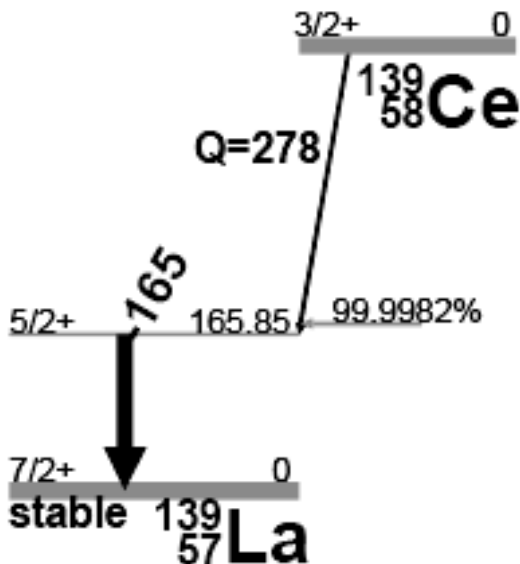
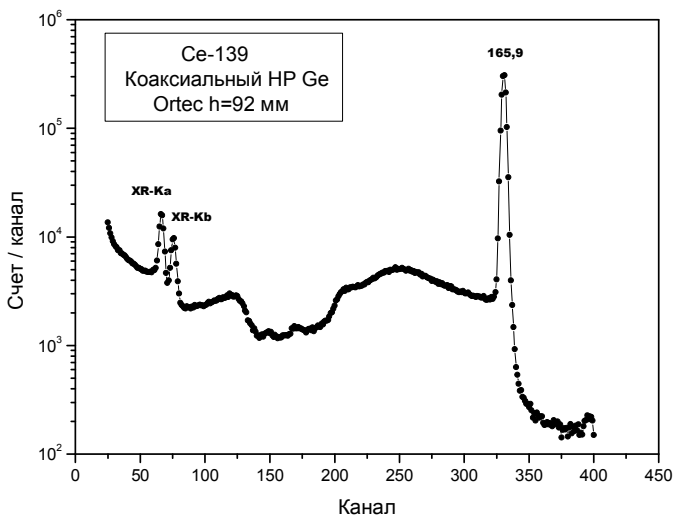


Схема распада Ce-139

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (JEFF 3.1)	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
33,03 XR $\kappa\alpha_2$	22,79(75)	22,5(5)
33,44 XR $\kappa\alpha_1$	41,97(1,3)	41,0(10)
33,30 XR $\kappa\alpha^*$	64,76	63,5
37,72 XR $\kappa\beta_3$		3,95(9)
37,80 XR $\kappa\beta_1$		7,62(17)
38,73 XR $\kappa\beta_2$		2,46(6)
37,94 XR $\kappa\beta^*$	15,42	14,03
165,9	79,90(4)	80(8)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GEM25P4 ORTEC

Ce-144 ($T_{1/2}=284,91(5)$ сут.)

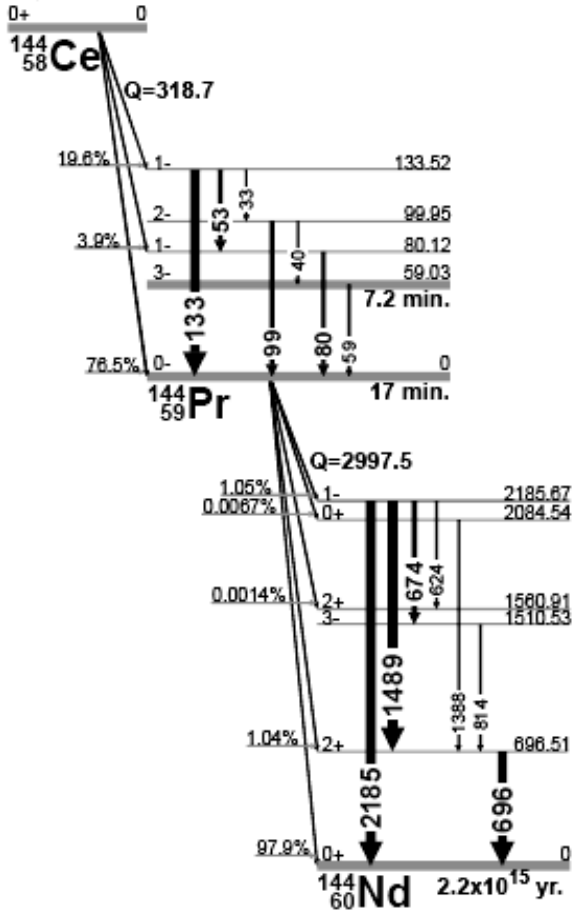
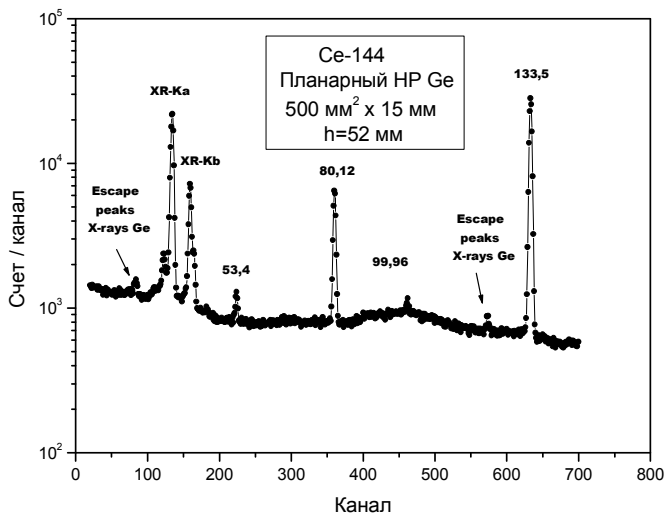


Схема распада Ce-144

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
33,57	0,200(22)	0,200(22)
35,55 XR $k\alpha_2$	2,48(7)	2,36(7)
36,03 XR $k\alpha_1$	4,48(13)	4,26(14)
35,86 XR $k\alpha^*$	6,96	6,62
40,65 XR $k\beta_3$	0,438(12)	0,417(12)
40,75 XR $k\beta_1$	0,846(24)	0,804(3)
41,76 XR $k\beta_2$	0,274(16)	0,260(9)
40,90 XR $k\beta^*$	1,558	1,481
40,98	0,257(16)	0,257(16)
XR $k\beta+40,98$	1,815	1,738
53,40	0,100(8)	0,100(8)
80,12	1,36(6)	1,13(11)
133,52	11,09(19)	11,09(19)
696,51	1,342	1,342(14)
1489,2	0,278(5)	0,278(5)
2185,7	0,694(15)	0,694(16)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Eu-152 ($T_{1/2}=13,537(6)$ лет)

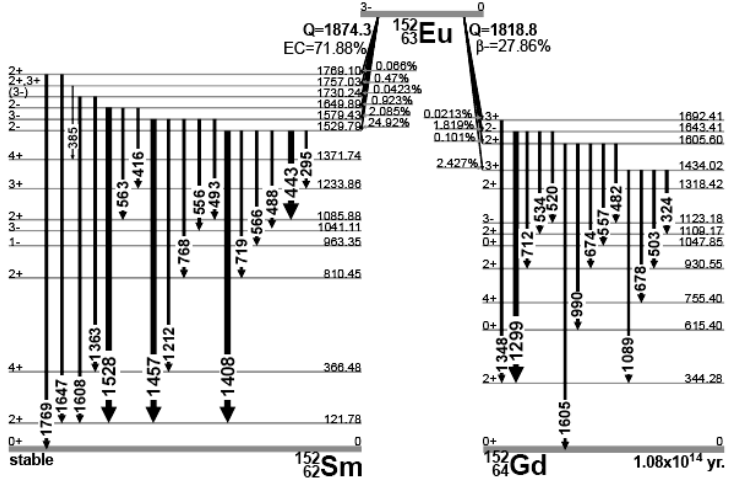
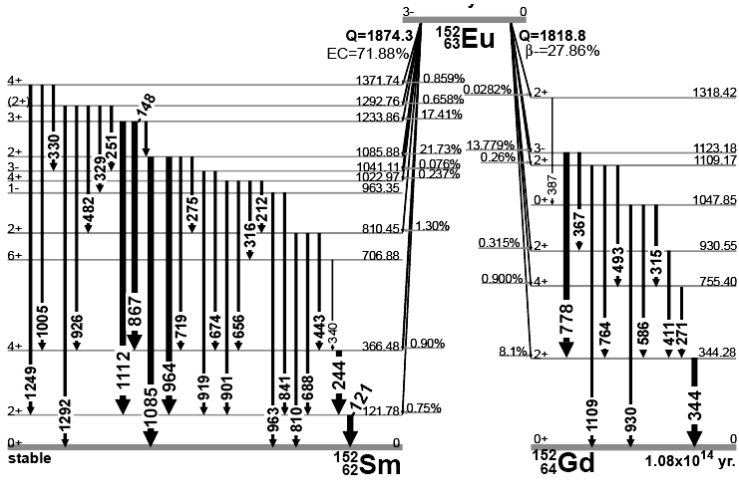
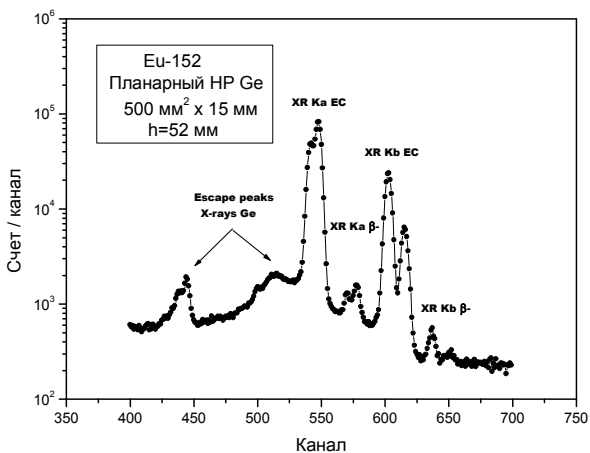
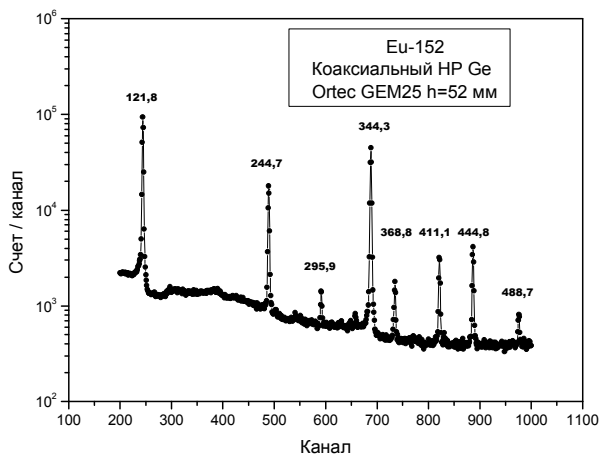


Схема распада Eu-152

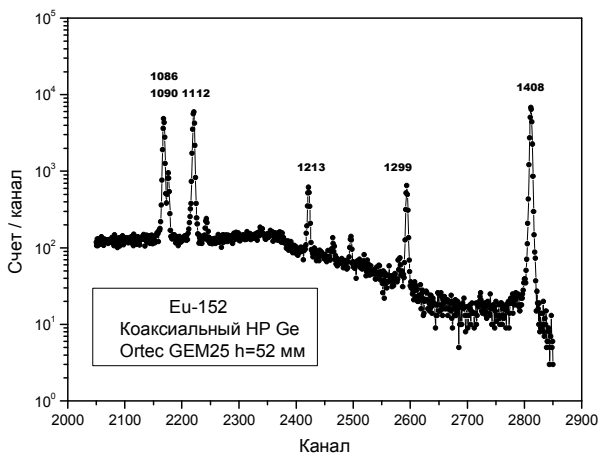
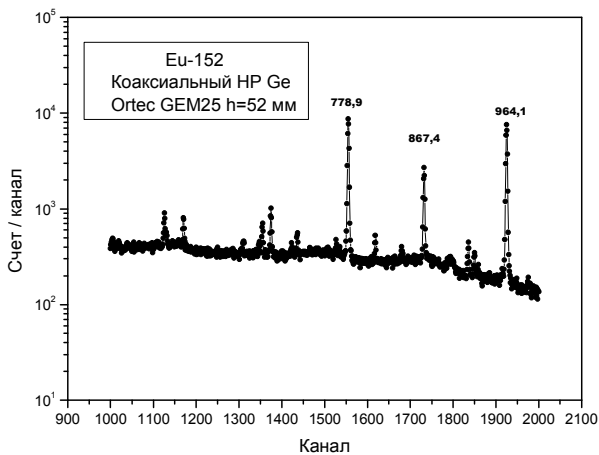
Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
39,52 XR α_2 EC	21,0(5)	21,0(5)
40,12 XR α_1 EC	37,7(8)	37,9(8)
39,91 XR α EC*	58,7	58,9
45,29 XR $k\beta_3$ EC	3,76(8)	3,77(8)
45,41 XR $k\beta_1$ EC	7,27(15)	7,29(15)
46,58 XR $k\beta_2$ EC	2,40(5)	2,41(5)
45,59 XR $k\beta$ EC*	13,43	13,47
42,31 XR α_2 β^-	0,246(8)	0,251(7)
43,00 XR α_1 β^-	0,439(13)	0,448(12)
42,75 XR α β^- *	0,685	0,699
48,55 XR $k\beta_3$ β^-	0,0445(13)	0,0453
48,70 XR $k\beta_1$ β^-	0,0860(25)	0,0876
49,96 XR $k\beta_2$ β^-	0,0288(8)	0,0293
48,88 XR $k\beta$ β^- *	0,160	0,162
121,78	28,67(15)	28,67(15)
244,70	7,61(4)	7,61(4)
295,94	0,448(6)	0,448(6)
344,28	26,6(5)	26,6(5)
411,12	2,237(25)	2,237(25)
440,86	0,0133(16)	0,0133(16)
443,97	3,16(3)	3,16(2)
778,90	12,96(14)	12,96(14)
867,37	4,26(3)	4,26(3)
964,08	14,65(7)	14,65(7)
1085,87	9,916(48)	10,24(5)
1089,74	1,73(2)	1,73(2)
1112,07	13,69(7)	13,69(7)
1212,95	1,426(9)	1,426(9)
1299,14	1,625(19)	1,625(19)
1408,01	21,07(10)	21,07(10)
1457,64	0,496(8)	0,503(5)
1528,10	0,282(5)	0,282(5)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GEM25P4 ORTEC



Аппаратурные спектры, измеренные на коаксиальном полупроводниковом детекторе GEM25P4 ORTEC

Gd-153 ($T_{1/2}=240,4(10)$ сут.)

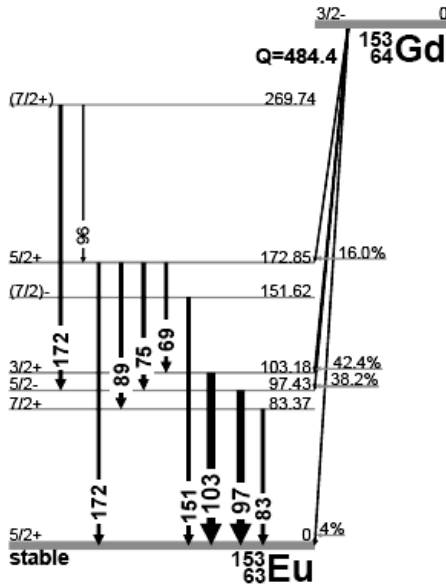
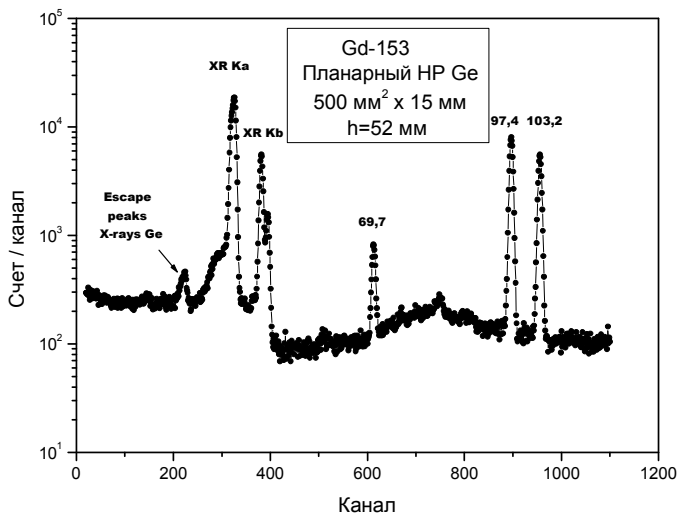


Схема распада Gd-153

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
40,90 XR $k\alpha_2$	34,9(12)
41,54 XR $k\alpha_1$	62,4(20)
41,31 XR $k\alpha^*$	97,3
46,91 XR $k\beta_3$	6,24(20)
47,04 XR $k\beta_1$	12,1(4)
48,25 XR $k\beta_2$	4,00(13)
47,22 XR $k\beta^*$	22,34
69,67	2,42(7)
97,43	29,0
103,18	21,1(6)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Tm-170 ($T_{1/2}=128,6(3)$ сут.)

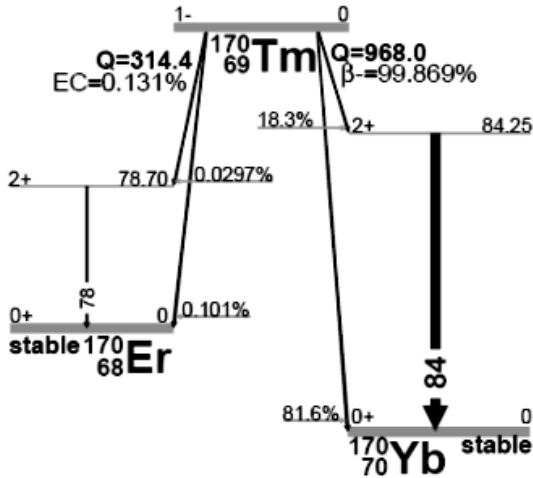


Схема распада Tm-170

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
48,22 XR $\kappa\alpha_2$ ε	0,029(5)
49,13 XR $\kappa\alpha_1$ ε	0,051(5)
51,35 XR $\kappa\alpha_2$ β^-	0,971(21)
52,39 XR $\kappa\alpha_1$ β^-	1,69(4)
XR $\kappa\alpha$	2,741
55,48 XR $\kappa\beta_3$ ε	0,0055(5)
55,67 XR $\kappa\beta_1$ ε	0,0105(10)
57,14 XR $\kappa\beta_2$ ε	0,0035(3)
59,16 XR $\kappa\beta_3$ β^-	0,185(4)
59,38 XR $\kappa\beta_1$ β^-	0,357(7)
60,96 XR $\kappa\beta_2$ β^-	0,1207(25)
XR $\kappa\beta$	0,6822
84,25	2,48

Ta-182 ($T_{1/2}=114,43(4)$ сут.)

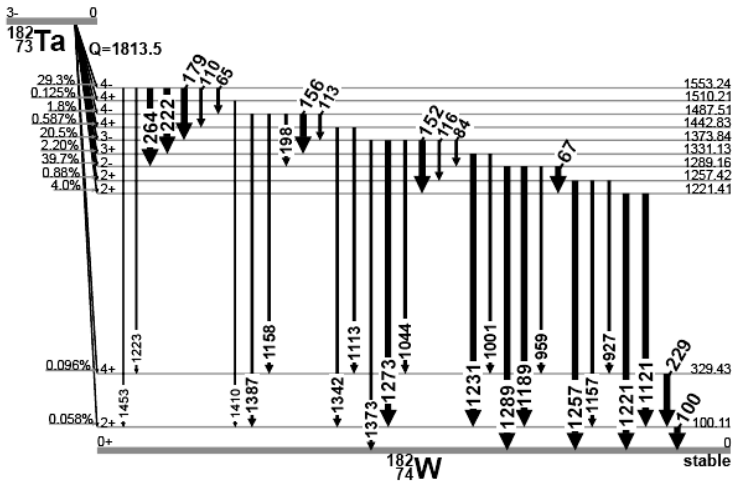
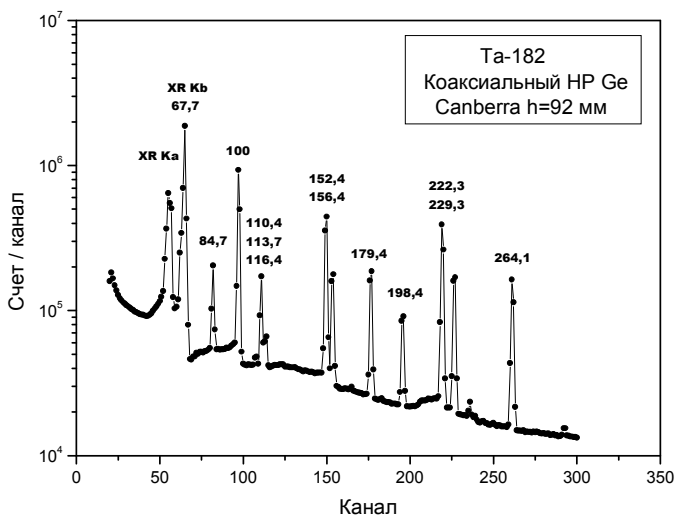


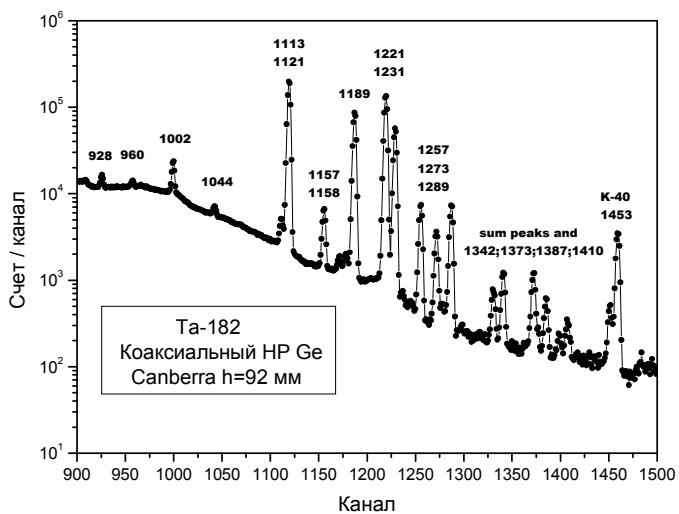
Схема распада Ta-182

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
84,68	2,65(7)	1044,41	0,237(6)
100,11	14,1(3)	1113,40	0,446(9)
152,43	6,93(13)	1121,30	34,9(6)
156,39	2,64(5)	1189,05	16,2(3)
179,39	3,08(6)	1221,41	27,0(5)
198,35	1,44(3)	1223,80	0,23(8)
222,11	7,49(14)	1231,02	11,44(20)

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
229,32	3,63(7)	1257,42	1,49(3)
264,08	3,61(7)	1273,73	0,651(11)
927,99	0,619(13)	1289,16	1,349(24)
959,73	0,348(8)	1342,72	0,251(5)
1001,70	2,07(4)	1373,84	0,218(4)



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra



Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Ir-192 ($T_{1/2}=73,827(13)$ сут.)

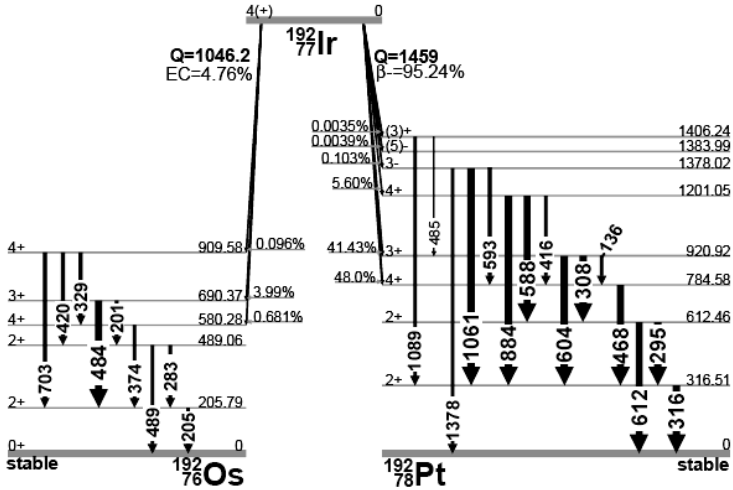
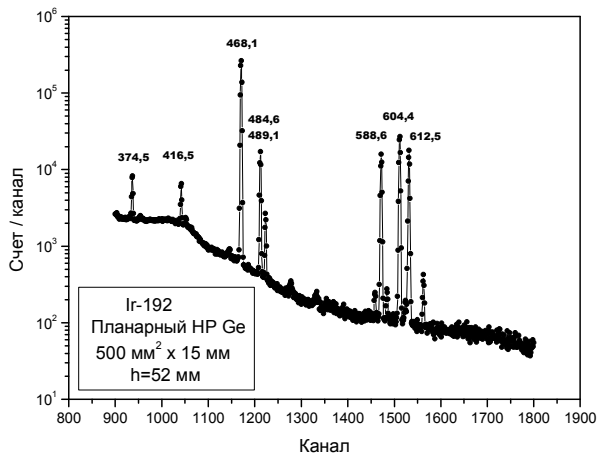
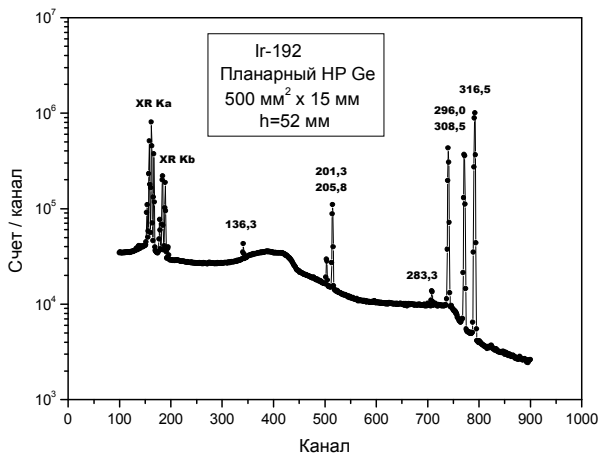


Схема распада Ir-192

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
61,49 XR $\kappa\alpha_2$ EC	1,20(4)
63,00 XR $\kappa\alpha_1$ EC	2,05(6)
62,44 XR $\kappa\alpha$ EC*	3,25
65,12 XR $\kappa\alpha_2$ β^-	2,63(6)
66,83 XR $\kappa\alpha_1$ β^-	4,46(10)
66,20 XR $\kappa\alpha$ β^- *	7,09
71,08 XR $\kappa\beta_3$ EC	0,241(7)
71,41 XR $\kappa\beta_1$ EC	0,466(13)
73,36 XR $\kappa\beta_2$ EC	0,163(5)
71,69 XR $\kappa\beta$ EC*	0,87

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
75,37 XR кβ3 β-	0,533(11)
75,75 XR кβ1 β-	1,025(21)
77,83 XR кβ2 β-	0,365(8)
76,04 XR кβ β-*	1,923
201,31	0,473(8)
205,79	3,34(4)
283,27	0,266(3)
295,95	28,72(14)
308,46	29,68(15)
316,51	82,71(21)
374,48	0,726(6)
416,49	0,669(21)
468,09	47,81(24)
484,58	3,187(24)
489,06	0,438(14)
588,58	4,517(22)
604,41	8,20(4)
612,46	5,34(8)
884,54	0,291(7)



Аппаратурные спектры, измеренные на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Hg-203 ($T_{1/2}=47,594(12)$ сут.)

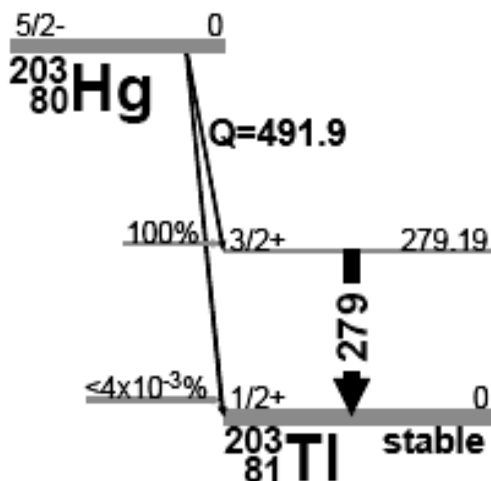


Схема распада Hg-203

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
70,83 XR $k\alpha_2$	3,69(8)
72,87 XR $k\alpha_1$	6,19(12)
72,11 XR $k\alpha^*$	9,88
82,11 XR $k\beta_3$	0,748(15)
82,57 XR $k\beta_1$	1,43(3)
84,86 XR $k\beta_2$	0,522(11)
82,89 XR $k\beta^*$	2,70
279,20(10)	81,56

Pb-210 ($T_{1/2}=22,20(22)$ лет)

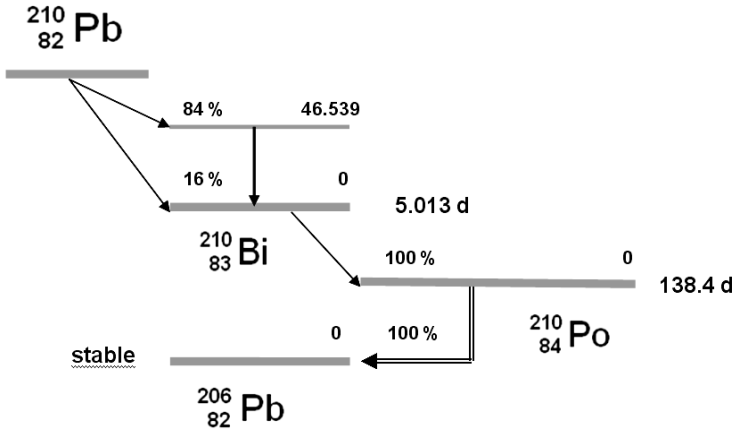
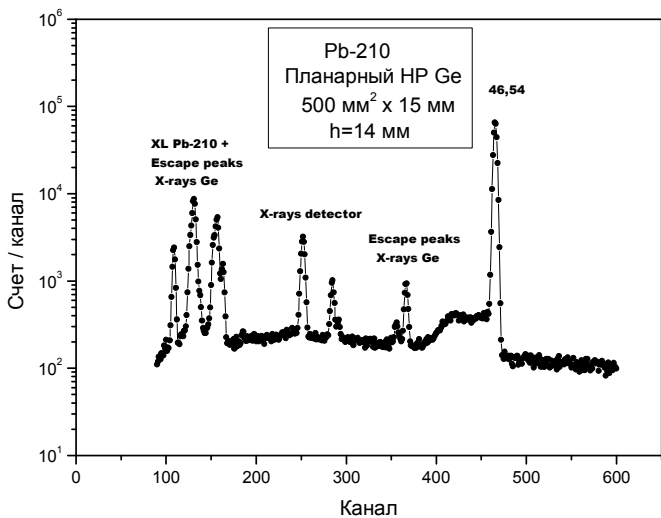


Схема распада Pb-210

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
10,8 XR L	23,6(10)	24,3(8)
46,54	4,25(4)	4,05(8)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Bi-207 ($T_{1/2}=32,9(14)$ лет)

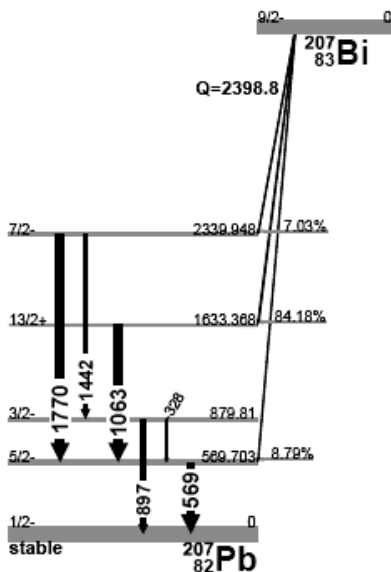
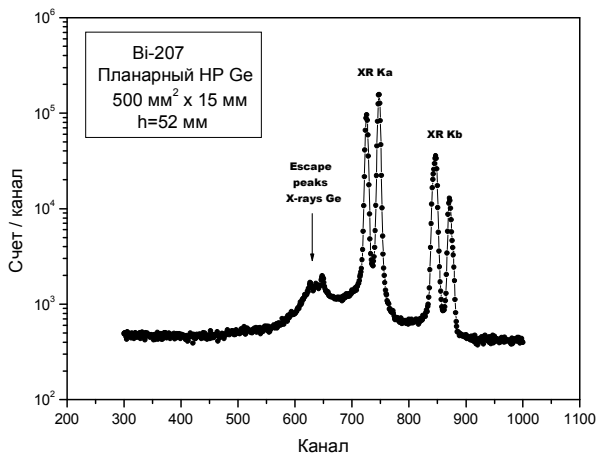
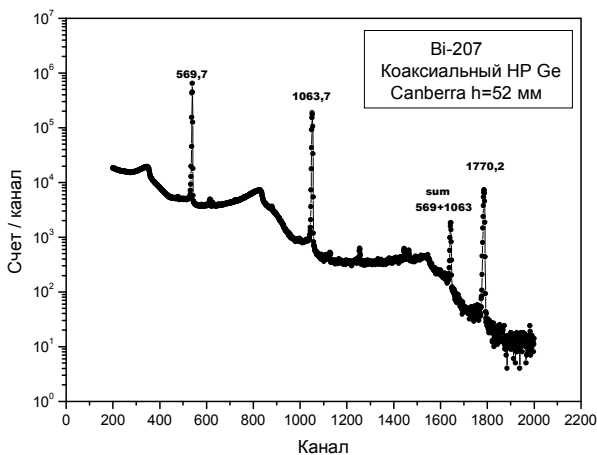


Схема распада Bi-207

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
72,81 XR $k\alpha_2$	21,4(5)
74,97 XR $k\alpha_1$	35,7(7)
74,16 XR $k\alpha^*$	57,1
84,45 XR $k\beta_3$	4,31(9)
84,94 XR $k\beta_1$	8,27(17)
87,30 XR $k\beta_2$	3,72(6)
85,26 XR $k\beta^*$	15,6
569,70	97,76(3)
1063,66	74,60(5)
1770,23	6,87(3)

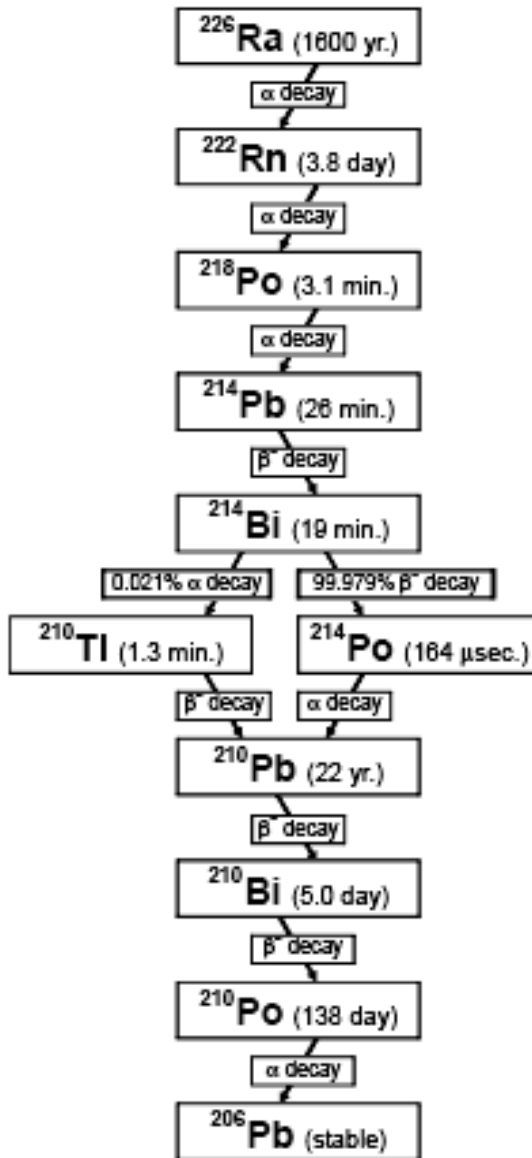


Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

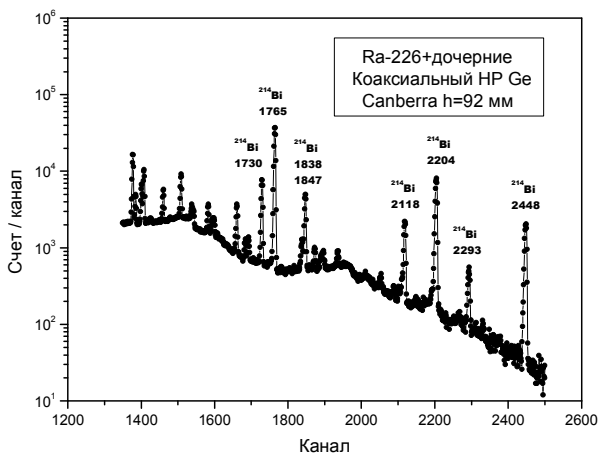
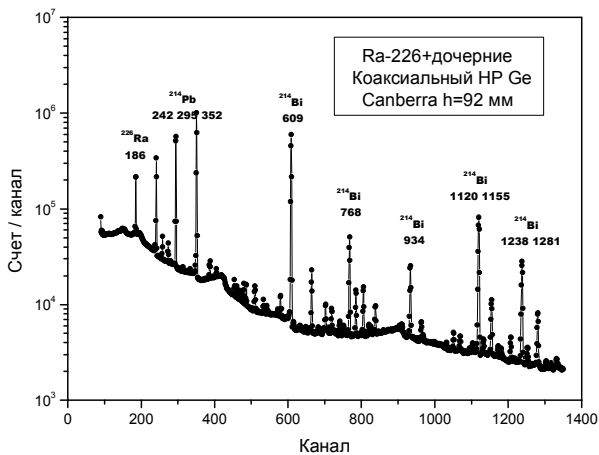


Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Ra-226 ($T_{1/2}=1600(7)$ лет)



Энергия кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
186,21 Ra-226	3,59(6)
242,00 Pb-214	7,25(16)
295,22 Pb-214	18,42(4)
351,93 Pb-214	35,60(7)
609,31 Bi-214	45,49(16)
665,45 Bi-214	1,531(6)
768,36 Bi-214	4,894(11)
769,70 Bi-214	0,03(1)
785,96 Pb-214	1,06(3)
786,35 Bi-214	0,32(4)
788,60 Bi-214	0,013(2)
806,18 Bi-214	1,264(5)
934,06 Bi-214	3,107(10)
1118,9 Bi-214	0,04(1)
1120,3 Bi-214	14,92(3)
1155,2 Bi-214	1,65(5)
1238,1 Bi-214	5,834(15)
1281,0 Bi-214	1,434(6)
1377,7 Bi-214	3,988(11)
1401,5 Bi-214	1,330(5)
1408,0 Bi-214	2,394(7)
1509,2 Bi-214	2,13(1)
1661,3 Bi-214	1,047(6)
1729,6 Bi-214	2,878(8)
1764,5 Bi-214	15,30(3)
1847,4 Bi-214	2,025(9)
2118,6 Bi-214	1,160(6)
2204,2 Bi-214	4,924(18)
2447,9 Bi-214	1,548(7)



**Аппаратурные спектры, измеренные на коаксиальном
полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra**

Th-228 ($T_{1/2}=1,912(2)$ лет)

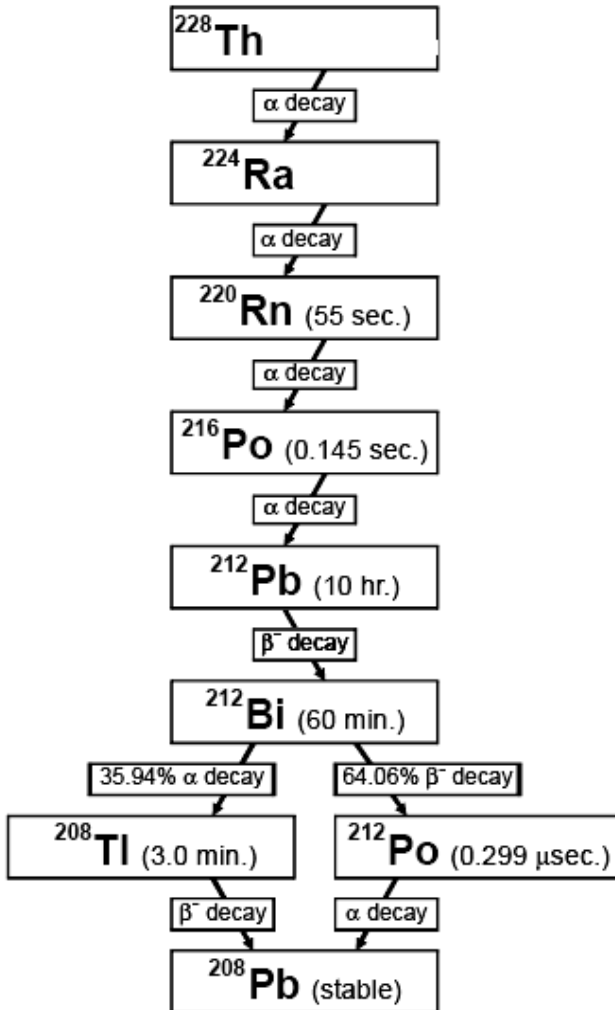
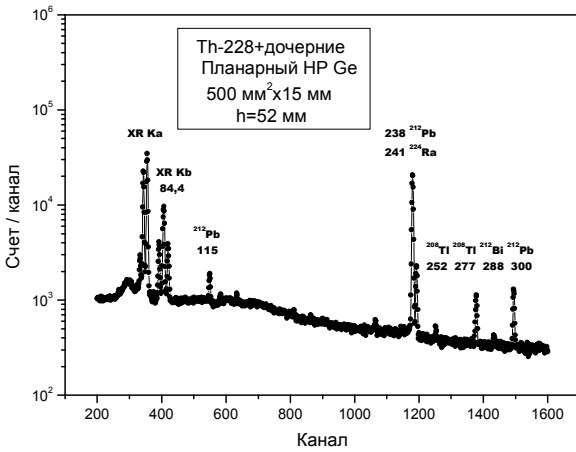
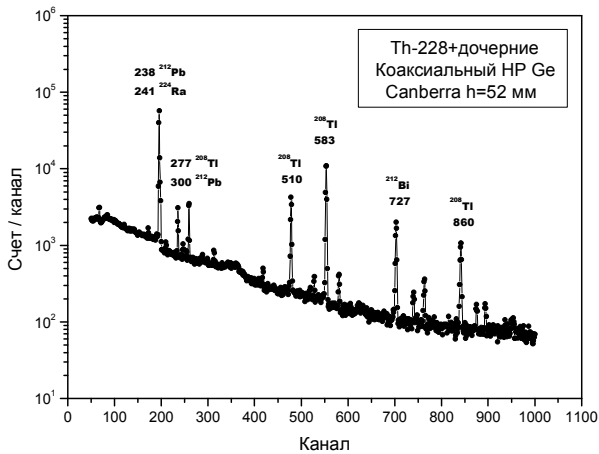


Схема распада Th-228

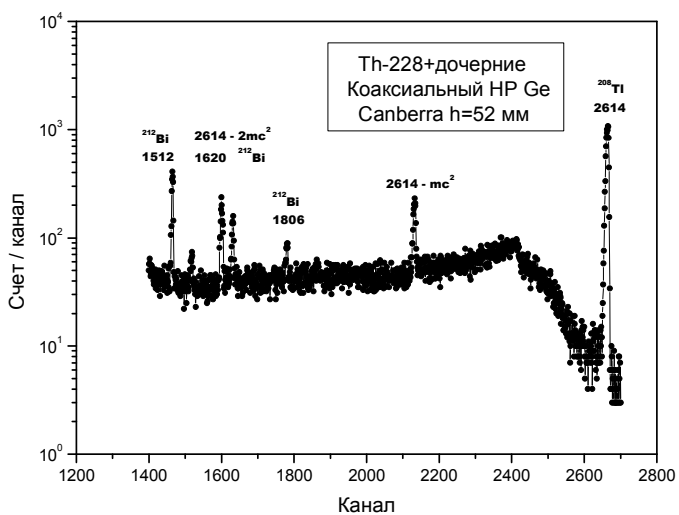
Энергия, кэВ		Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
84,37	Th-228	1,22(2)
238,63	Pb-212	43,6(5)
240,99	Ra-224	4,10(5)
277,36	Tl-208	2,37(11)
300,09	Pb-212	3,30(4)
583,19	Tl-208	30,55(11)
727,33	Bi-212	6,67(9)
785,37	Bi-212	1,102(13)
860,56	Tl-208	4,49(4)
893,41	Bi-212	0,378(19)
1078,62	Bi-212	0,564(19)
1620,50	Bi-212	1,47(3)
2614,53	Tl-208	35,85(1)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra



Аппаратурные спектры, измеренные на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra



Аппаратурные спектры, измеренные на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Np-237 + Pa-233 ($T_{1/2} = 2,144(7) 10^6$ лет)

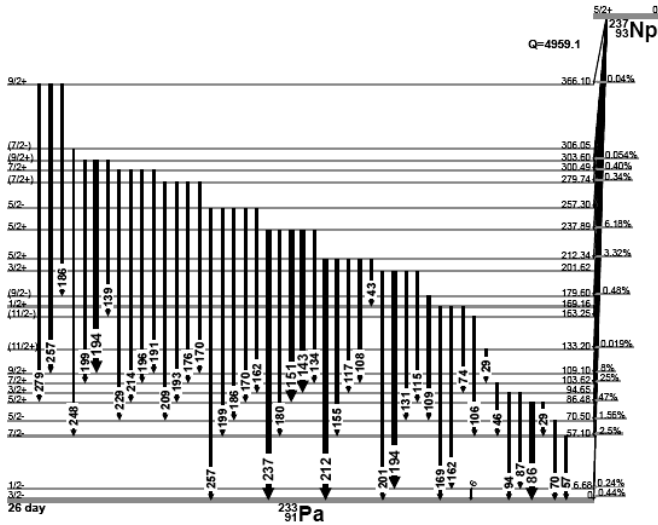
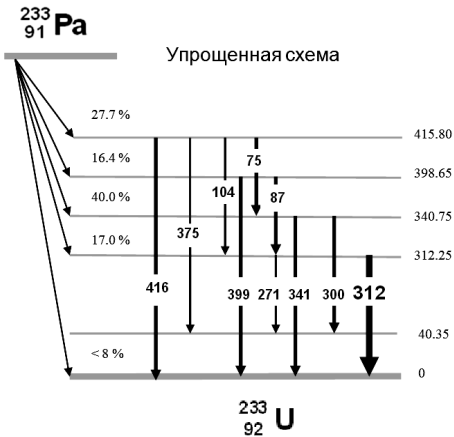


Схема распада Np-237



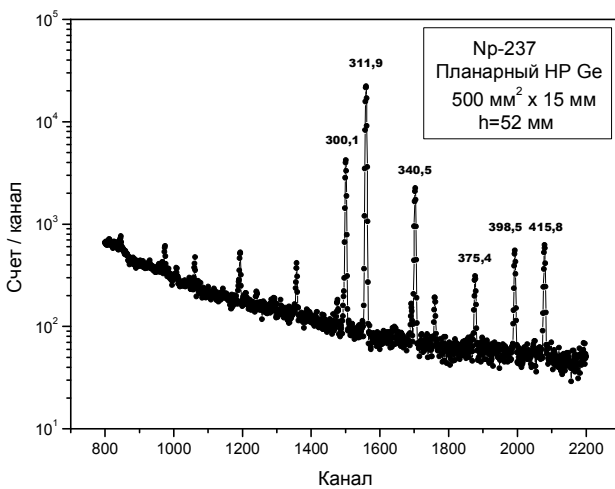
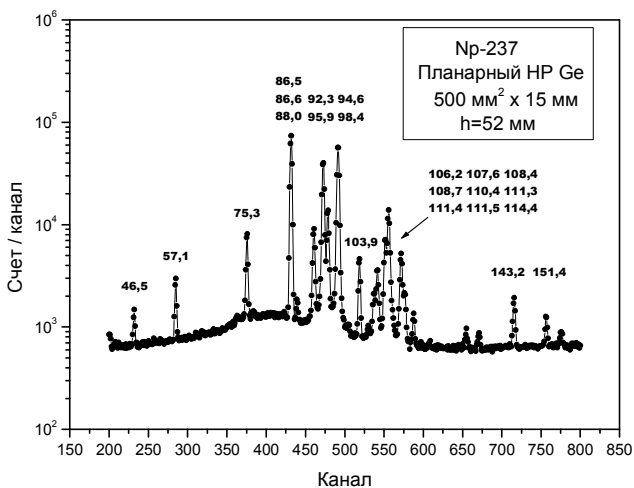
Упрощенная схема распада Pa-233

Энергия, кэВ №р-237	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
29,37	14,12(15)	14,12(15)
46,53	0,104(4)	0,104(4)
57,10	0,354(8)	0,354(8)
86,48	12,4(3)	12,4(3)
87,99	0,167(4)	0,167(4)
92,28 XR к α 2	1,66(5)	1,49(11)
95,86 XR к α 1	2,68(7)	2,41(17)
94,64	0,615(23)	0,615(23)

Энергия, кэВ №р-237	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
106,15	0,049(1)	0,049(1)
107,60 XR к β 3	0,333(9)	0,300(22)
108,42 XR к β 1	0,63(3)	0,568(41)
111,49 XR к β 2	0,244(12)	0,219(16)
108,70	0,068(15)	0,068(15)
117,70	0,169(4)	0,169(4)
143,25	0,443(8)	0,443(8)
151,41	0,232(24)	0,232(24)
194,95	0,177(5)	0,177(5)
212,29	0,151(3)	0,151(3)

Энергия, кэВ Ra-233	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
75,27	1,32(3)	1,32(4)
86,60	1,95(11)	1,97(12)
94,65 XR ka2	10,56(24)	9,94(25)
98,43 XR ka1	16,9(4)	15,91(38)
103,86	0,854(6)	0,854(6)
110,42 XR kb3	2,12(5)	1,993(48)
111,30 XR kb1	4,01(9)	3,77(9)
114,45 XR kb2	1,55(3)	1,46(3)
300,13	6,63(6)	6,63(6)
311,9	38,5(4)	38,5(4)

Энергия, кэВ Ra-233	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
340,48	4,45(5)	4,45(5)
375,40	0,679(10)	0,679(10)
398,49	1,391(20)	1,391(20)
415,76	1,73(3)	1,73(3)



Аппаратурные спектры, измеренные на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Am-241 (T_{1/2}= 432,6(6) лет)

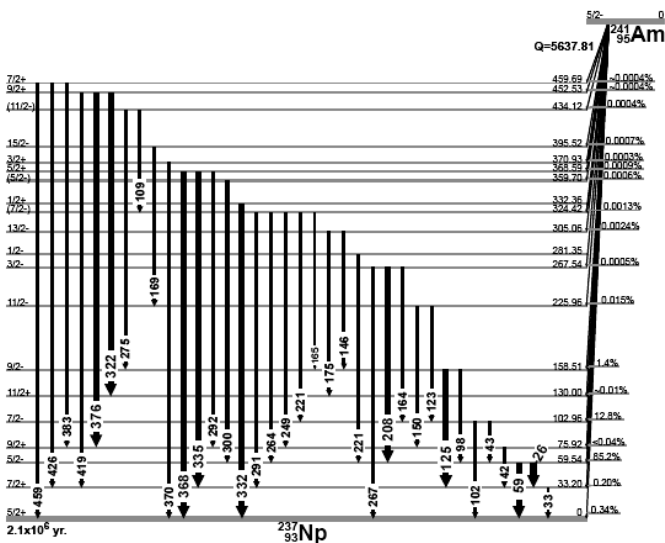
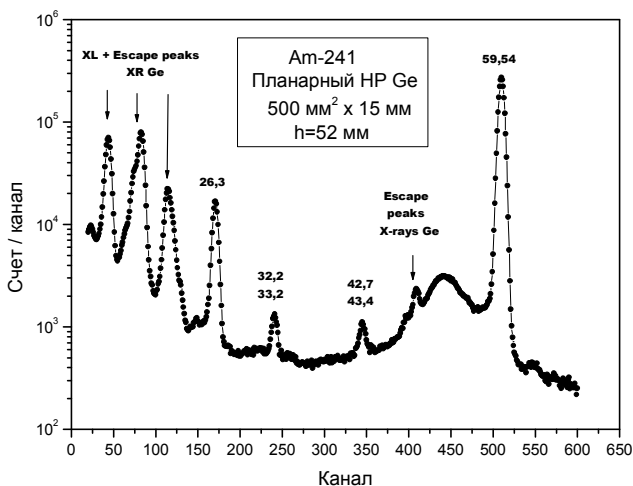
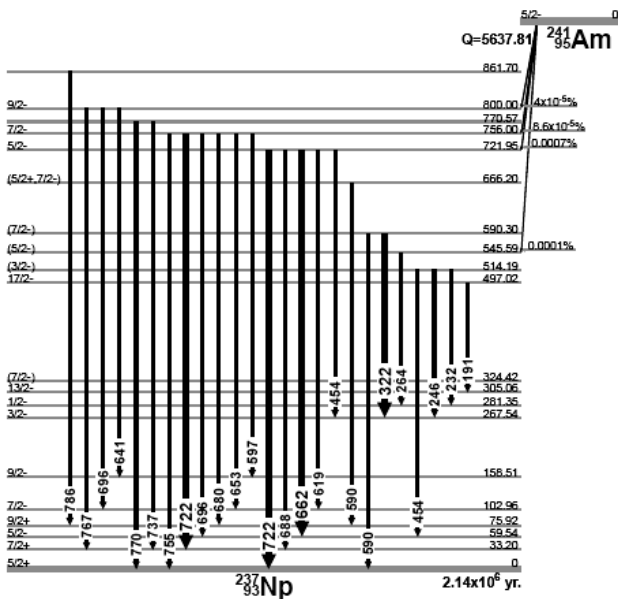


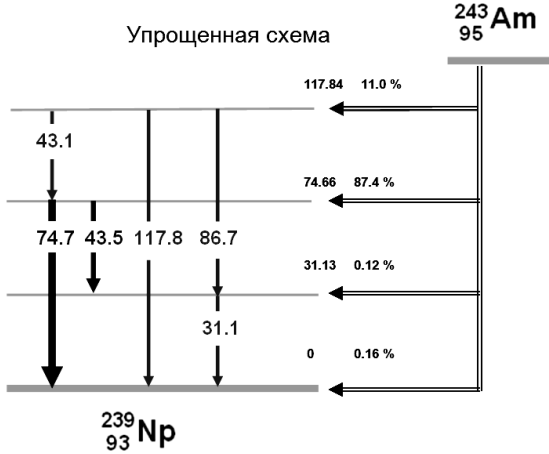
Схема распада Am-241

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (ENDF/B 7.0)
13,9 XR L	37(3)	24,3(2)
26,34	2,27(12)	2,40(3)
33,20	0,126(3)	0,126(3)
43,42	0,073(8)	0,073(8)
59,54	35,9(4)	35,9(4)



Аппаратурный спектр, измеренный на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

Am-243 + Np-239 ($T_{1/2}=7370(15)$ лет)



Упрощенная схема распада Am-243

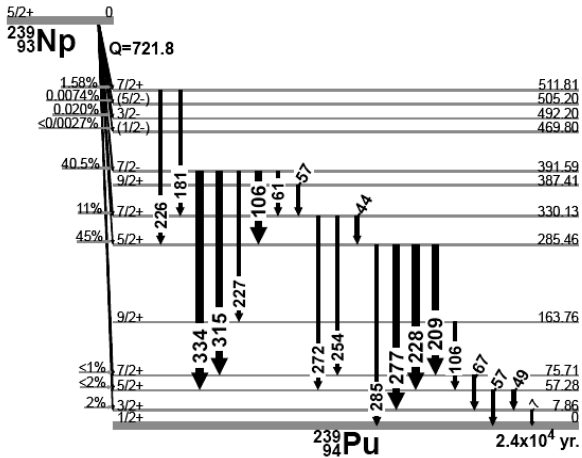
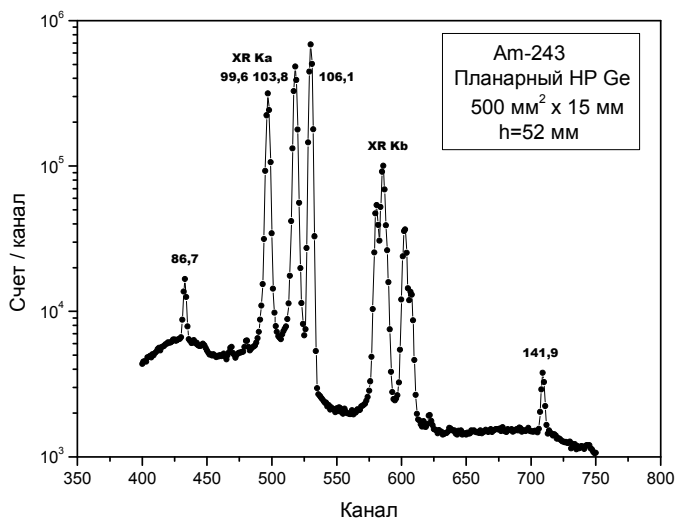
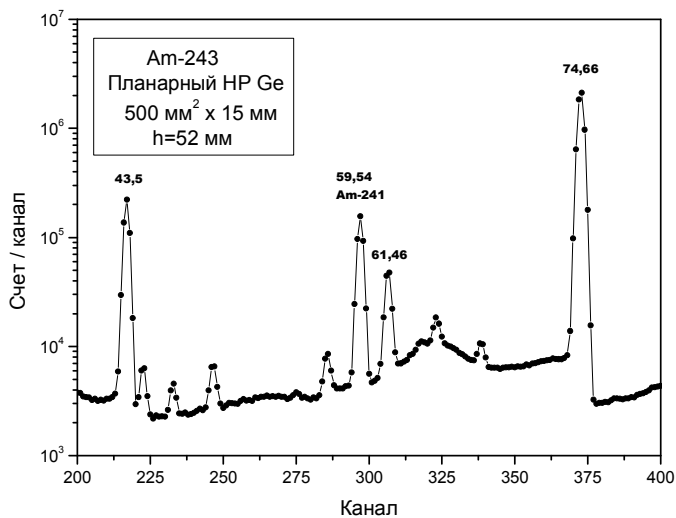
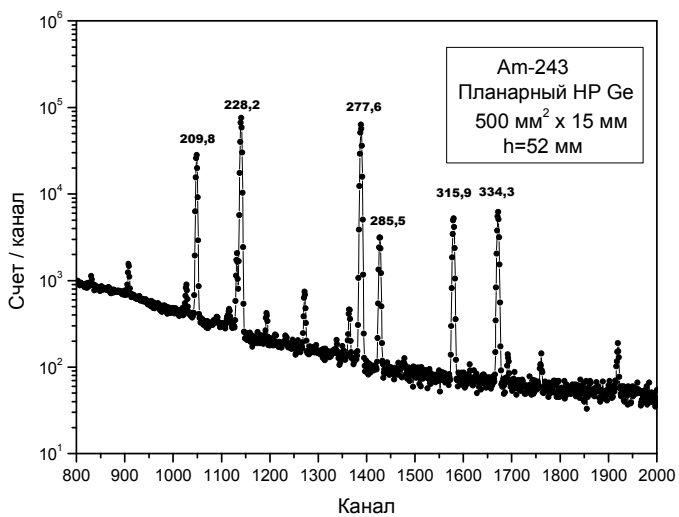


Схема распада Np-239

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
43,10 Am-243	0,0652
43,53 Am-243	5,90(15)
43,10 + 43,53	5,965
61,46 Np-239	1,30(2)
74,66 Am-243	67,2
86,71 Am-243	0,346(11)
99,53 XR α_2 Np-239	14,0(5)
103,37 XR α_1 Np-239	22,2(8)
106,12 Np-239	26,3(10)
106,47 Np-239	0,049(8)
116,24 XR $k\beta_3$ Np-239	2,68(9)
117,23 XR $k\beta_1$ Np-239	5,26(18)
120,54 XR $k\beta_2$ Np-239	2,06(7)
XR $k\beta$ Np-239	10,00(13)
117,60 Am-243	0,56(8)
117,6 + XR $k\beta$ Np-239	10,56(15)
141,89 Am-243	0,115(8)
209,75 Np-239	3,42(3)
226,38 Np-239	0,259(16)
227,83 Np-239	0,259(16)
228,18 Np239	0,51(5)
226,4+227,8+228,2	11,14(11)
277,60 Np239	11,91(17)
285,46 Np-239	14,44(10)
315,88 Np239	0,79(1)
334,31 Np-239	1,60(2)

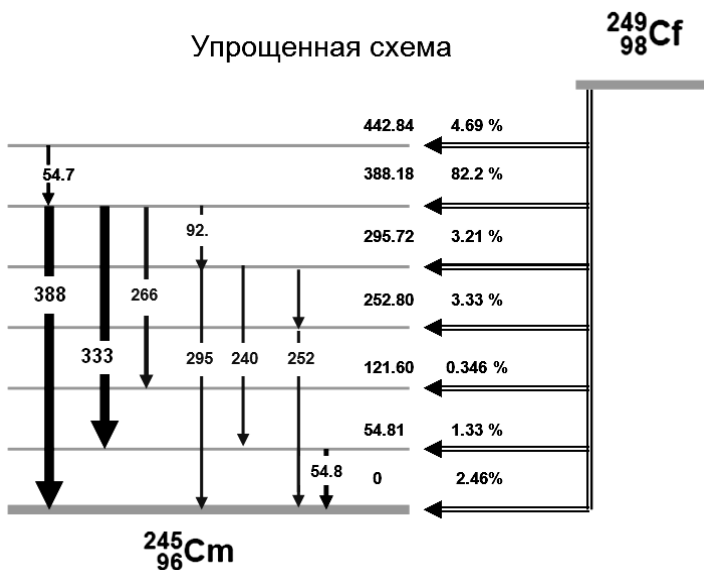




Аппаратурные спектры, измеренные на планарном полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra

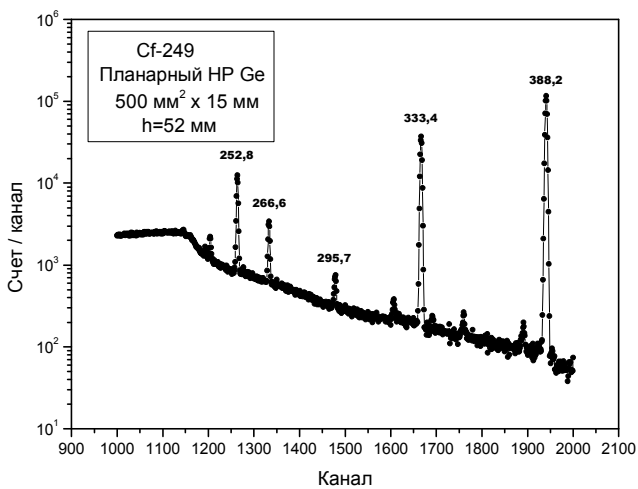
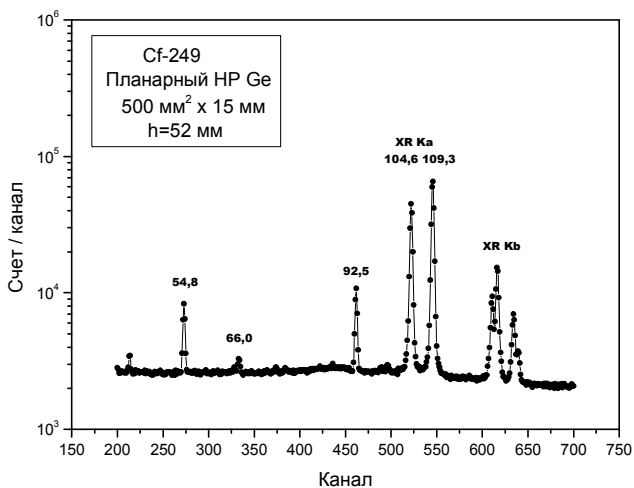
Cf-249 ($T_{1/2}=351(2)$ лет)

Упрощенная схема



Упрощенная схема распада Cf-249

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (JEFF 3.1)
54,81	0,198(12)	0,218(7)
92,51	0,326(11)	0,297(7)
104,59 XR $\alpha 2$	2,06(8)	1,82(18)
109,27 XR $\alpha 1$	3,23(12)	2,87(29)
120,80	0,0205(21)	0,013(10)
121,60	0,036(3)	0,046(13)
122,304 XR $k\beta 3$	0,406(15)	0,339(34)
123,403 XR $k\beta 1$	0,77(3)	0,640(64)
126,889 XR $k\beta 2$	0,302(11)	0,368(37)
XR $k\beta$	1,478	1,347
252,80	2,50(11)	2,732(66)
266,62	0,69(3)	0,746(20)
333,37	14,6(6)	15,51(7)
388,16	66,0	66,0



**Аппаратурные спектры, измеренные на планарном
 полупроводниковом детекторе GLO515R Canberra**

Список литературы

1. Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения. Публикация 38 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Richard B. Firestone Table of Isotopes CD-ROM. Eight Edition, 1998 Update.
3. Helmer R.G., Davidson J.R., Gehrke R.J. Gamma-Ray Spectrum Catalogue. Ge and Si Detector Spectra. CD-ROM. Fourth Edition: 1998 Update.
4. Интернет <http://www-nds.iaea.org/ENDF Archive/irdf2002>
5. Интернет <http://www-nds.iaea.org/ENDF Archive/ENDF-B 7.0>
6. NUDAT 2.5 Интернет <http://www-nds.iaea.org/nudat2/>
7. Интернет <http://www-nds.iaea.org/ENDF Archive/JEFF 3.1>

Владимир Сергеевич Трошин

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОНУКЛИДОВ
ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОВ**

Учебное пособие

Редактор Н.В. Шумакова

Оригинал-макет изготовлен В.С. Трошиным

Подписано в печать 15.12.2010. Формат 60x84 1/16

Печ.л. 6,5. Уч.-изд.л. 6,5. Тираж 100 экз.

Изд. № 1/4/89. Заказ № 34

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

*ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42*

