

Ключевые особенности программно-методического комплекса
Ge Spectra Analysis System – GeSAS
для HPGe гамма-спектрометрического радионуклидного анализа.

В.В Дровников, Н.Ю. Егоров, В.М. Живун, А.А. Кадушкин, В.В. Коваленко



Цифровые спектрометры, с которыми работает ПМК GeSAS

● ЦСУ-ПН-02



● Ortec *DSPECPro*



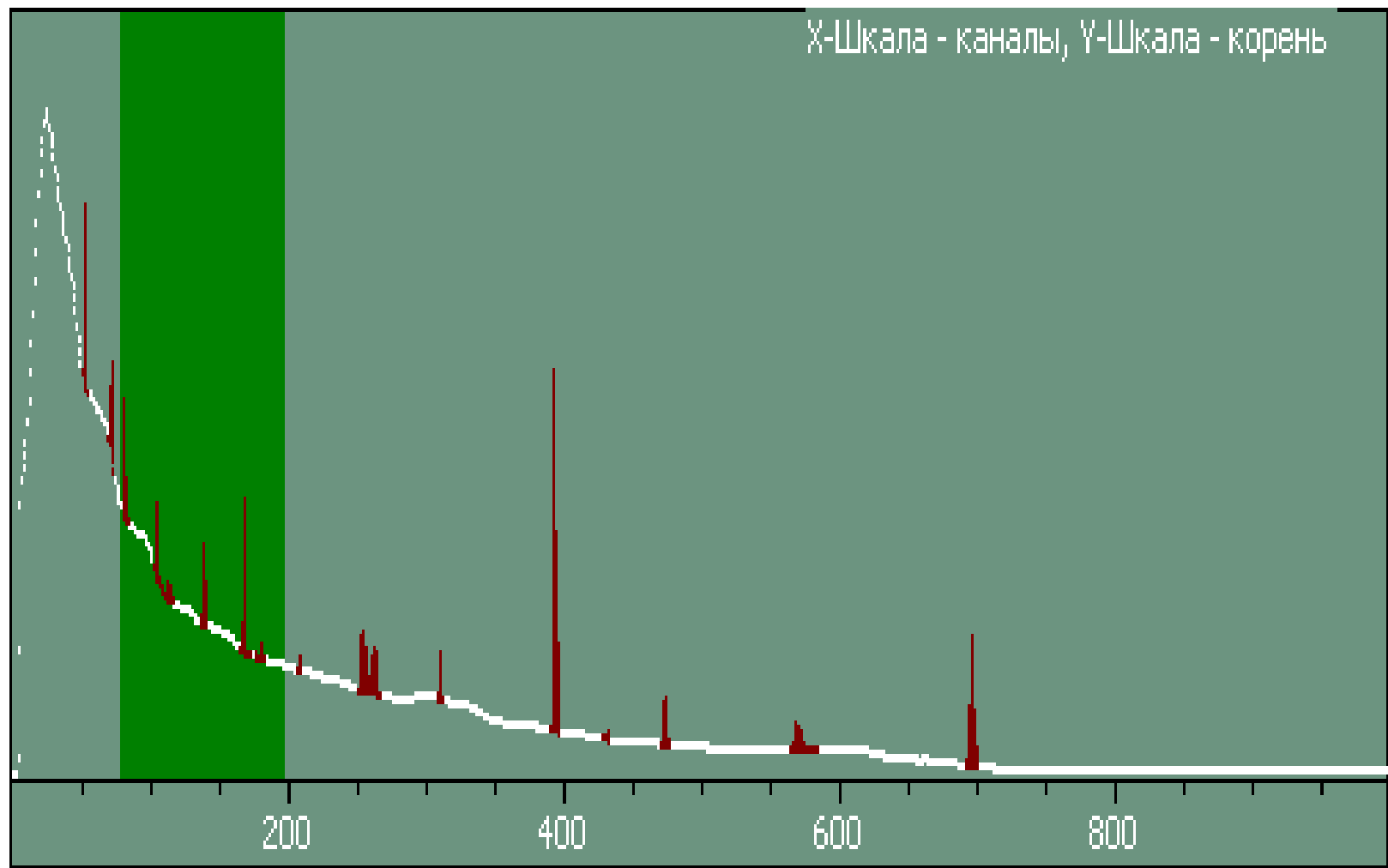
● Canberra DSA 1000



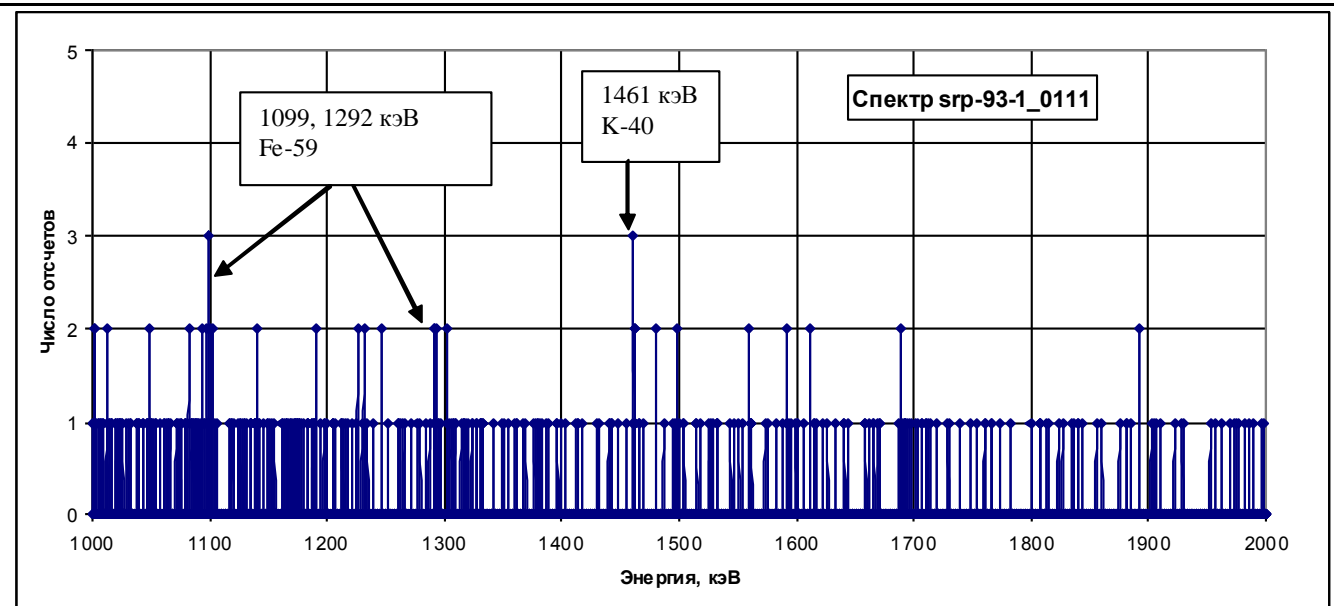
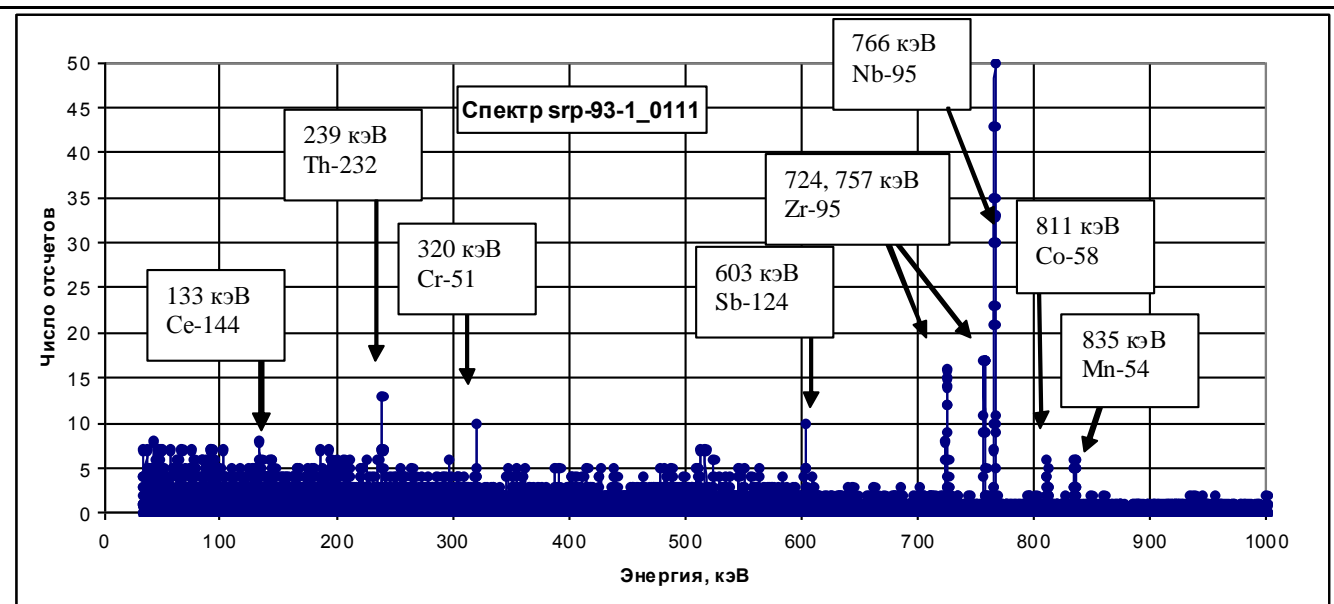
Форматы спектров, с которыми работает ПМК GeSAS

- собственный формат
SasGeSample (*.spa, *.spz)
- Ortec (*.chn, *.spe)
- Ortec GammaVision(*.spc)
- Canberra S100 (*.mca)
- Canberra Genie 2000 (*.cnf)
- AnGamma v3.3 (*.spc)
- LSRM (*.spe)
- Гринстар (*.sps)
- SBS v4.0 (*.spr)
- Прогресс-2000 (*.spc)
- Спектр (*.ani, *.clb)
- ASCII IEC (*.iec)
- IAEA (*.spe)
- Aptec v6.(*.sp0)
- GammaMCA-8000(*.spk)

Контроль качества обработки спектра



Детектор ~ 30%. Время измерения ~ 37 минут.
Измерительный образец: Вода в сосуде Маринелли 0.5 литра.



Нуклид	Активность Бк	Относительная погрешность, %
Ce-144	4.1 ± 1.9	46
Co-58	3.10 ± 0.56	18
Cr-51	10.7 ± 3.0	28
Mn-54	3.80 ± 0.61	16
Sb-124	2.10 ± 0.50	24
Zr-95	19.1 ± 1.3	7
Nb-95	25.8 ± 1.5	6

Нуклид	Активность Бк	Относительная погрешность, %	Площадь пика, имп	Относительная погрешность, %
Ce-144	4.1 ± 1.9	46	17 ± 10	59
Co-58	3.10 ± 0.56	18	24 ± 16	67
Cr-51	10.7 ± 3.0	28	27 ± 11	41
Mn-54	3.80 ± 0.61	16	35 ± 19	54
Sb-124	2.10 ± 0.50	24	18 ± 17	94
Zr-95	19.1 ± 1.3	7	100 ± 27 124 ± 29	27 23
Nb-95	25.8 ± 1.5	6	305 ± 25	11.5

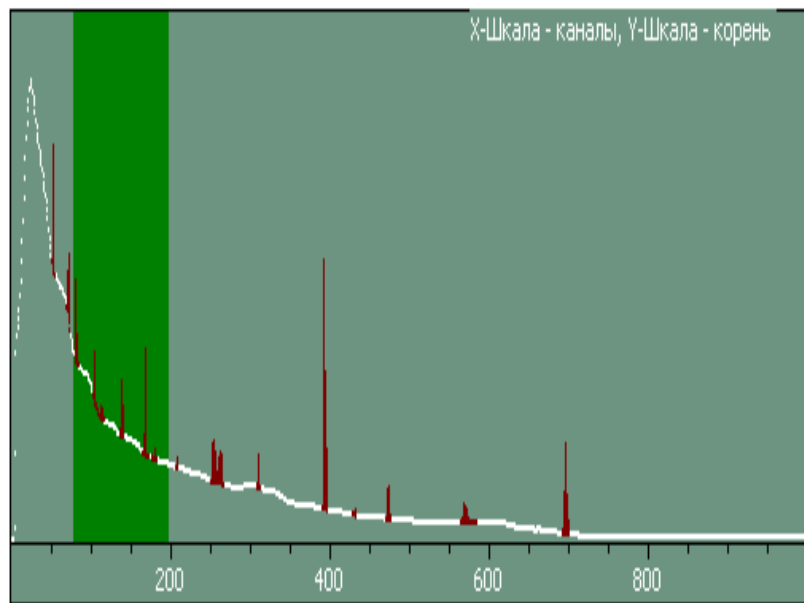
Из чего состоит пик в спектре

- ⚡ пики полного поглощения
- ⚡ пики истинных совпадений
- ⚡ пики случайных совпадений
- ⚡ пики одинарной утечки
- ⚡ пики двойной утечки

$$S_k - S_{\text{фон}} - S_{\text{сл}} = \frac{1}{K_c^k} \sum_{m=1}^{N_N} A_m \cdot \frac{Y_m(E_k)}{K_\tau^m}$$

$m = 1, \dots, N_N$ N_N – кол-во нуклидов

$k = 1, \dots, N_P$ N_P – кол-во пиков



$$K_c^k(\rho, E_k) = \frac{1 - e^{-\mu(E_k) \cdot \rho \cdot H_{\text{eff}}}}{1 - e^{-\mu(E_k) \cdot \rho_0 \cdot H_{\text{eff}}}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho}$$

$$K_\tau^m = \frac{\lambda_m \cdot t}{1 - e^{-\lambda_m \cdot t}}$$

Учет эффектов каскадного суммирования

$$Y_m(E_k) = Y_{1m}(E_k) + Y_{2m}(E_k) + Y_{3m}(E_k)$$

$$Y_{ij} = \frac{\varepsilon_j \cdot \eta_{ij}}{k_{cm}^{ij} \cdot k_c^j}$$

$$Y_{1m}(E_k) = \sum_{j=1}^{N_{k_1}^m} P_j^m \cdot \varepsilon_k \cdot \frac{1}{1 + \alpha_k^m} \cdot \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{L_j^m} \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha_l^m} \cdot \varepsilon_{lm}^T \right)$$

$$P_j = B_j \cdot \prod_{i=1}^j p_{i,i-1}$$

$$Y_{2m}(E_k) = \sum_{j=1}^{N_{k_2}^m} P_j^m \cdot \varepsilon_k \cdot \frac{1}{1 + \alpha_k^m} \cdot \varepsilon_{k_1}^m \cdot \frac{1}{1 + \alpha_{k_1}^m} \cdot \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k \\ l \neq k_1}}^{L_j^m} \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha_l^m} \cdot \varepsilon_{lm}^T \right)$$

$$Y_{3m}(E_k) = \sum_{j=1}^{N_{k_3}^m} P_j^m \cdot \varepsilon_k \cdot \frac{1}{1 + \alpha_k^m} \cdot \varepsilon_{k_1}^m \cdot \frac{1}{1 + \alpha_{k_1}^m} \cdot \varepsilon_{k_2}^m \cdot \frac{1}{1 + \alpha_{k_2}^m} \cdot \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k \\ l \neq k_1 \\ l \neq k_2}}^{L_j^m} \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha_l^m} \cdot \varepsilon_{lm}^T \right)$$

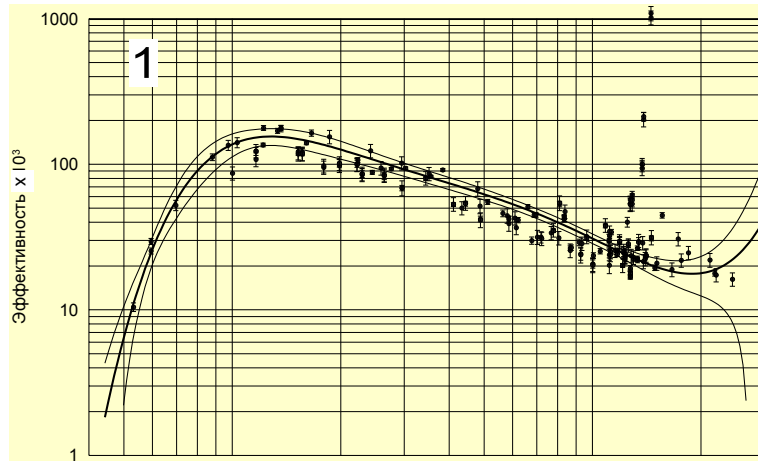
Коррекция чувствительностей для ^{134}Cs

Энергия, кэВ	Квантовый выход, %		Чувствительность, 1/ксек/Бк *1000		
	Табличное значение	Из схемы распада	Из кривой эффективности	С коррекцией совпадений	Измерения
475.36	1.49 ± 0.02	1.48	1.35 ± 0.05	0.83 ± 0.04	0.86 ± 0.10
563.25	8.39 ± 0.08	8.38	6.89 ± 0.22	4.00 ± 0.16	3.99 ± 0.24
569.33	15.38 ± 0.12	15.32	12.53 ± 0.40	7.26 ± 0.29	7.44 ± 0.38
604.72	97.62 ± 0.06	97.61	77.2 ± 2.5	55.0 ± 2.1	54.6 ± 2.8
795.86	85.53 ± 0.08	85.46	58.2 ± 2.0	42.8 ± 1.7	41.2 ± 2.1
801.95	8.69 ± 0.08	8.72	5.91 ± 0.20	3.65 ± 0.15	3.64 ± 0.20
1038.61	0.99 ± 0.01	1.00	0.577 ± 0.024	0.51 ± 0.03	0.50 ± 0.06
1167.97	1.79 ± 0.02	1.81	0.960 ± 0.040	1.14 ± 0.05	1.14 ± 0.09
1174.05	0	0	0	0.744 ± 0.036	0.770 ± 0.055
1365.18	3.012 ± 0.024	3.014	1.39 ± 0.07	2.03 ± 0.11	2.06 ± 0.13
1400.59	0	0	0	4.38 ± 0.21	4.26 ± 0.25
1406.67	0	0	0	0.29 ± 0.02	0.28 ± 0.03
1643.33	0	0	0	0.065 ± 0.004	0.046 ± 0.013
1969.92	0	0	0	0.26 ± 0.02	0.27 ± 0.03

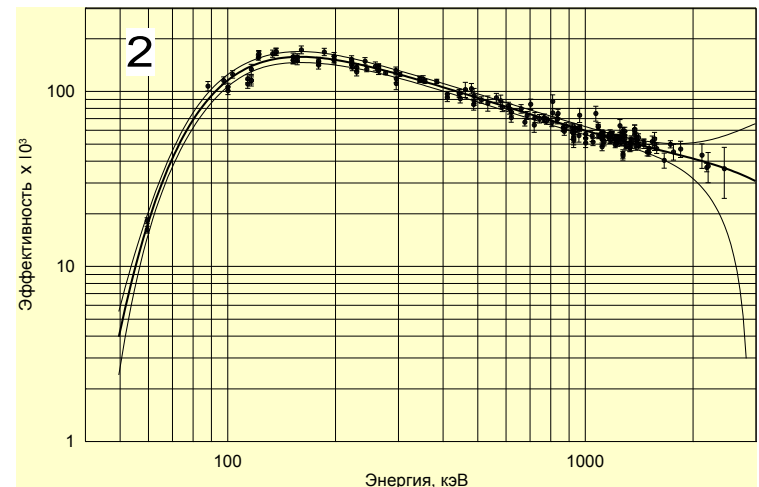
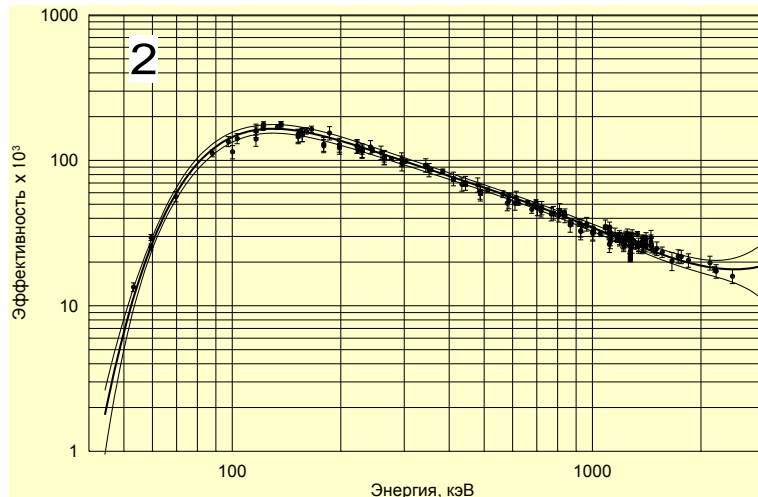
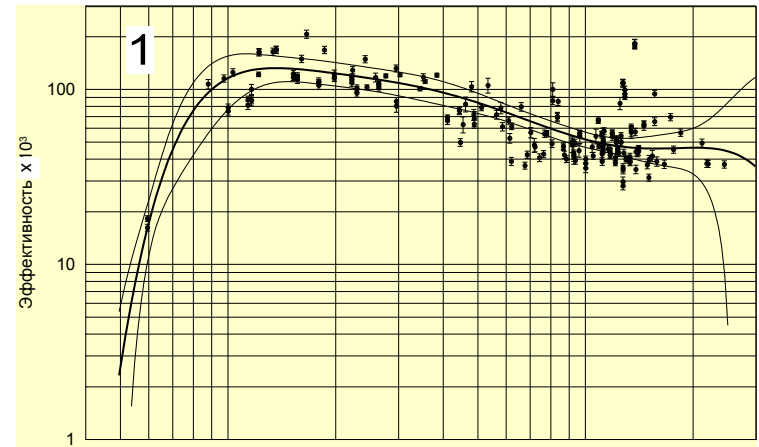
Погрешности на уровне 95%.

Калибровка по эффективности в пике полного поглощения

GEM30185, точечная геометрия



GC 130210, точечная геометрия



1 - без учета коррекции на каскадные совпадения гамма-квантов;
2 - с учетом коррекции на каскадные совпадения гамма-квантов.

$$S_k - S_{fon}^k - S_{сл}^k = \frac{1}{K_c^k} \sum_{m=1}^{N_N} A_m \cdot \frac{Y_m(E_k)}{K_\tau^m}$$

$m = 1, \dots, NN$ NN – кол-во нуклидов

$k = 1, \dots, NP$ NP – кол-во пиков

Контроль качества обработки спектра. Дисбаланс пика D.

$$D_j = S_j - S_{фон}^j - S_{сл}^j - S_N$$

Параметры пика			
Положение	:	1451.96 ± 0.55	
Границы	:	1442.00 - 1458.00 ампл.	
	:	525.72 - 531.55 кэВ.	
Площадь	:	16553 ± 492	
Скорость счета	:	10.83 ± 0.32 1/сек	
Номинальная ПППВ	:	8.26 канала	
		3.01 кэВ	
ПППВ	:	3.93 ± 0.15 канала	
	:	1.43 ± 0.06 кэВ	
ППДВ	:	7.63 ± 0.40 канала	
	:	2.78 ± 0.14 кэВ	
Формфактор	:	1.065 ± 0.069	
Асимметрия на 0.5	:	-0.037 ± 0.077	
Асимметрия на 0.1	:	-0.106 ± 0.183	
Энергия	:	529.53 ± 0.11 кэВ	
Состав пика :			
	Фон	0.00 ±	0.00 1/сек
I-135	526.56 кэВ	1.80 ±	0.11 1/сек
Tс-104	527.20 кэВ	0.04 ±	0.00 1/сек
Ва-141	527.60 кэВ	0.02 ±	0.00 1/сек
I-133	529.87 кэВ	7.44 ±	0.39 1/сек
Tс-104	530.50 кэВ	1.46 ±	0.09 1/сек
I-135	530.80 кэВ	0.00 ±	0.00 1/сек
Tс-101	531.42 кэВ	0.10 ±	0.01 1/сек

	Дисбаланс	-0.02 ±	0.52 1/сек

OK

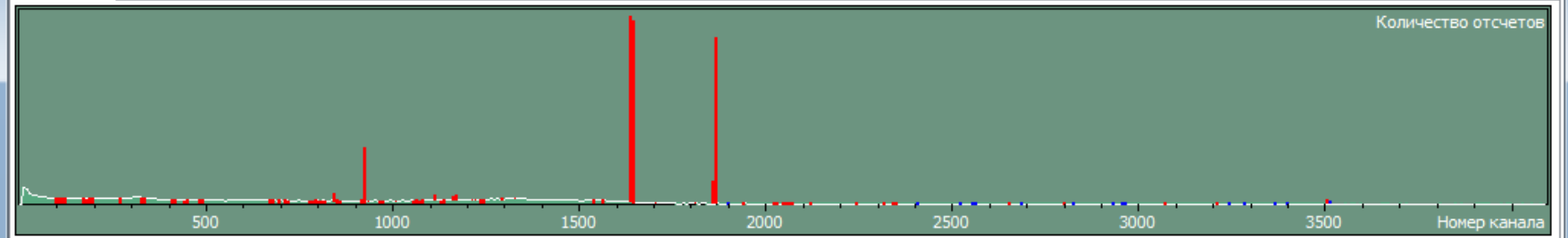
Контроль качества обработки спектра. Показатель качества QF

$$QF = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} W_j \cdot \left(s_j - s_{fon}^j - s_{cl}^j - \sum_{i=1}^{N_N} A_i \cdot \frac{Y_{ij}}{k_{\tau}^i} \right)^2}{N_p}$$

$$W_m = \frac{1}{\sigma_{s_m}^2 + \sigma_{s_{fon}^m}^2 + \sigma_{s_{cl}^m}^2 + \sum_{i=1}^{N_N} \left(A_i \cdot \frac{Y_{im}}{k_{\tau}^i} \right)^2 \cdot \left(u_{Y_{im}}^2 + u_{k_{\tau}^i}^2 \right)}$$

Загрузка, имп/с		Статус набора спектра	
Интегральная	300	Время набора, сек	3767.4
Эффективная	284	«Живое» время, сек	3762.2
«Мертвое» время 0.00%		Всего импульсов	260046
		«Мертвое» время	0.14%

Спектр Зоны принудительного поиска пиков Анализ спектра



Спектр Измерительный образец Проба

Добавить новый нуклид
Провести калибровку по энергии
Печатать/сохранить протокол
Перейти в базовый режим

Имя образца Новый спектр(907)	Старт 05.12.2016 16:22:51	Экспозиция 1 час 2 мин 41 с (3761 с)	Показатель качества 6.9
Контейнер Фильтр АФА	Объем 0 мл	Масса 0 грамм	Химический состав Не задан

СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ОБРАЗЦЕ НА НАЧАЛО ИЗМЕРЕНИЯ

Нуклид	Активность, Бк	Статистическая неопределенность	Систематическая неопределенность
Ag-110m	< 0.92		
Cd-109	< 4.6		
Ce-144	< 0.88		
Co-57	0.15 ± 0.12 (82%)	± 0.12 (82%)	± 0.01 (8%)
Co-58	< 0.73		
Co-60	217 ± 15 (7.0%)	± 2 (1.1%)	± 15 (6.9%)
Cr-51	< 3.7		
Cs-134	3.74 ± 0.45 (12%)	± 0.36 (10%)	± 0.27 (7%)
Cs-137	26.9 ± 1.8 (6.9%)	± 0.9 (3.5%)	± 1.6 (5.9%)

Добавление радионуклидов в рабочую библиотеку

Добавление нуклида в рабочую библиотеку

Выберите нуклид и нажмите кнопку «OK»

Список нуклидов, не включенных в рабочую библиотеку Ra-226

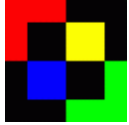
Нуклид	N	Все пики	Неидент. пики	Корреляция	Период полураспада	Эфф. акт.	Е, кэВ	Чувств.	Пик, кэВ
Ra-226	8	7 (95.1 %)	0 (0.0 %)	0.64 ± 0.23	1.6 КилоЛет	325.54	351.93	32.264	351.7
U-234e	119	31 (89.8 %)	0 (0.0 %)	0.64 ± 0.11	2.46 лет	293.26	609.31	23.025	608.9
Ra-226p	88	26 (89.7 %)	0 (0.0 %)	0.66 ± 0.12	1.6 КилоЛет	287.04	295.22	19.528	295.1
Ir-192	39	4 (14.5 %)	0 (0.0 %)	0.22 ± 0.02	73.8 дн.	87.75	186.21	5.010	186.2
Ir-190	141	17 (31.1 %)	0 (0.0 %)	0.19 ± 0.04	11.8 дн.	85.53	1120.29	4.308	
U-235e	111	21 (41.9 %)	0 (0.0 %)	0.35 ± 0.08	704 МегаЛет	73.55	1764.49	2.803	1762.8
U-235	26	3 (59.2 %)	0 (0.0 %)	0.87 ± 0.23	704 МегаЛет	71.00	2204.21	0.700	2202.3
Ra-234	366	34 (6.9 %)	0 (0.0 %)	0.08 ± 0.01	6.7 час.	48.81	2447.86	0.185	2446.3
Th-234e	379	35 (6.6 %)	0 (0.0 %)	0.08 ± 0.01	24.1 дн.	48.46			
Ac-227t	24	6 (45.4 %)	0 (0.0 %)	0.40 ± 0.32	21.8 лет	41.46			
Zr-89	5	2 (99.5 %)	0 (0.0 %)	0.99 ± 0.82	3.27 дн.	27.15			
Sb-125	20	3 (16.1 %)	0 (0.0 %)	-0.03 ± 0.03	2.76 лет	19.08			
Cd-115m	25	1 (50.0 %)	0 (0.0 %)	0.89 ± 0.37	44.6 дн.	15.89			

Нуклид
 Энергия от до кэВ
 Период полураспада от до дн.

Участники теста

«2014 IAEA High-Resolution Gamma Spectrometry Proficiency Test»

- Atomic Weapons Establishment, United Kingdom
- IAEA Environmental Sampling Laboratory, Austria
- Japan Atomic Energy Agency
- Korea Atomic Energy Research Institute, Republic of Korea
- Los Alamos National Laboratory - LANL, USA
- Lawrence Livermore National Laboratory - LLNL, USA
- Oak Ridge National Laboratory - ORNL, USA
- Pacific Northwest National Laboratory - PNNL, USA.
- Лаборатория анализа микрочастиц, Россия



**Результаты теста МАГАТЭ
«2014 IAEA High-Resolution Gamma
Spectrometry Proficiency Test»**

Участники теста

«2014 IAEA High-Resolution Gamma Spectrometry Proficiency Test»

- Atomic Weapons Establishment, United Kingdom
- IAEA Environmental Sampling Laboratory, Austria
- Japan Atomic Energy Agency
- Korea Atomic Energy Research Institute, Republic of Korea
- Los Alamos National Laboratory - LANL, USA
- Lawrence Livermore National Laboratory - LLNL, USA
- Oak Ridge National Laboratory - ORNL, USA
- Pacific Northwest National Laboratory - PNNL, USA.
- Лаборатория анализа микрочастиц, Россия

2014 IAEA High-Resolution Gamma Spectrometry Proficiency Test

Внешний вид «тряпочки»



Паспортные данные

Нуклид	Активность, Бк
^{60}Co	3.68 ± 0.26
^{134}Cs	0.0735 ± 0.0077
^{137}Cs	2.74 ± 0.16
^{152}Eu	0.143 ± 0.017
^{154}Eu	1.96 ± 0.13
^{155}Eu	3.40 ± 0.29
^{241}Am	5.08 ± 0.32

Приготовление счетных образцов



На чем измеряли



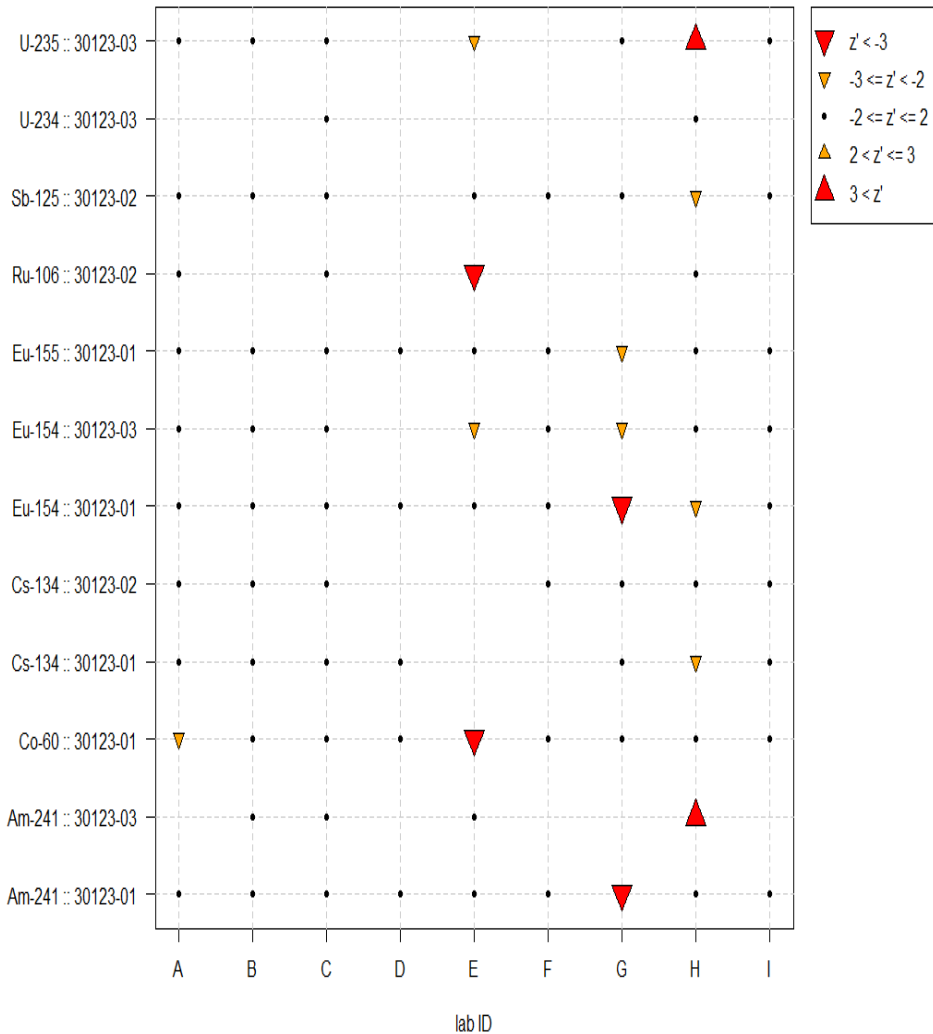
Детектор #1: ORTEC GEM 30185-P
Диапазон энергий: 50 кэВ ÷ 3000 кэВ
Разрешение на 1332 кэВ: 1.95 кэВ
Эффективность: 32%

Детектор #2: CANBERRA GL 3830 LBG
Диапазон энергий: 3 кэВ ÷ 3000 кэВ
Разрешение на 1332 кэВ: 2.05 кэВ
Эффективность: 38%

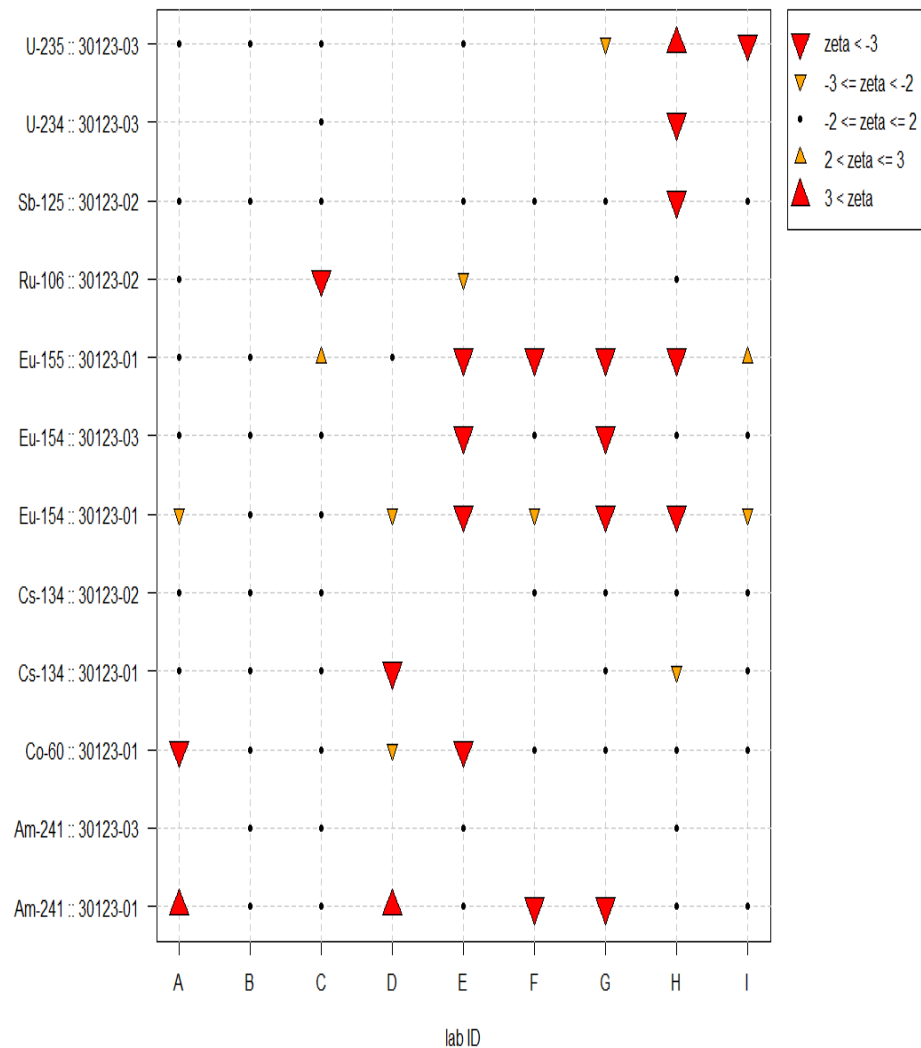
Обработка экспериментальных
данных: ПМК **GeSAS**

Результаты статистической обработки результатов измерений

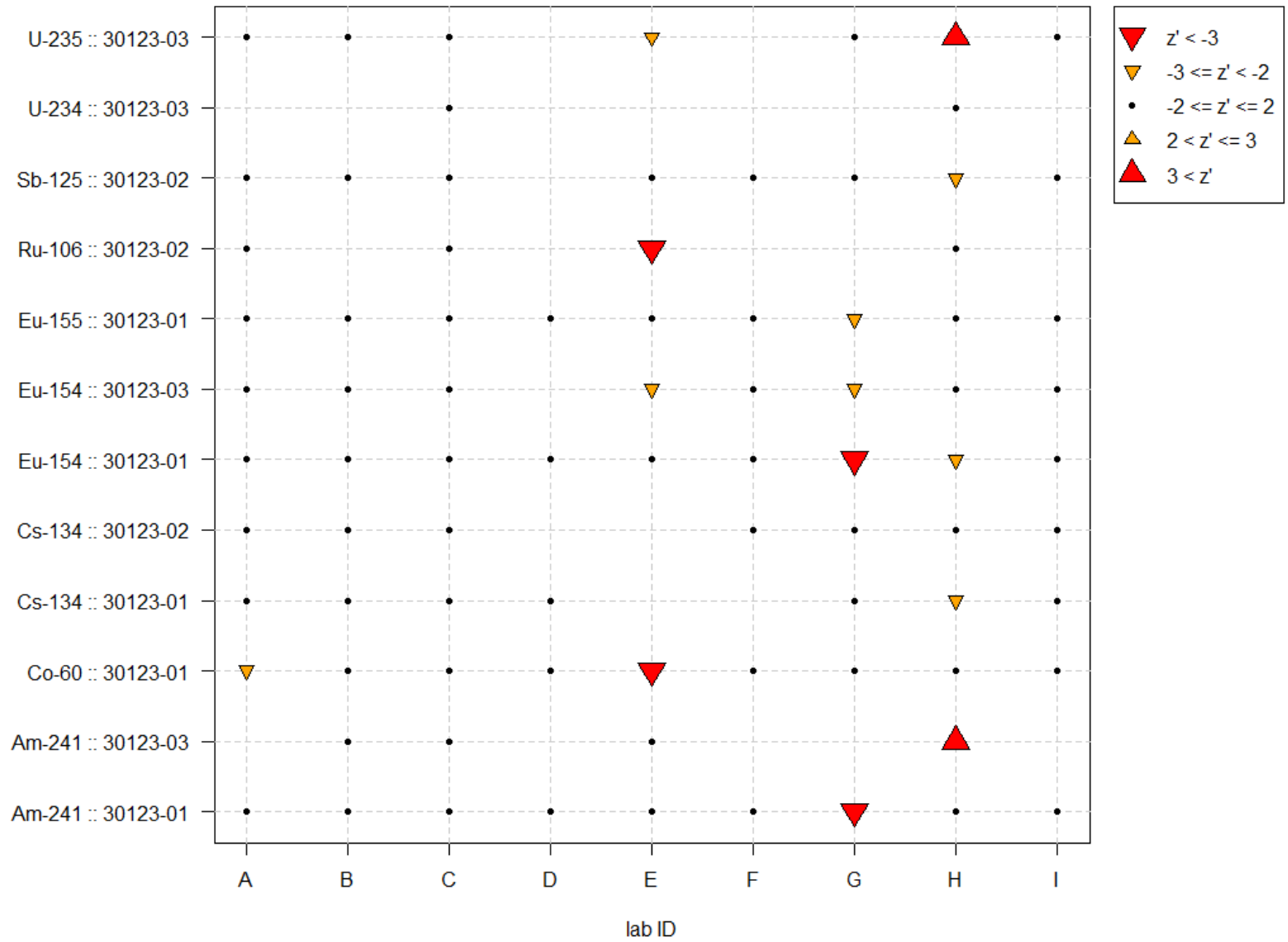
Overall Test Summary: z'-scores



Overall Test Summary: zeta-scores



Overall Test Summary: z'-scores



Overall Test Summary: zeta-scores

