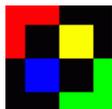
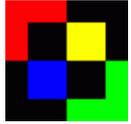


Новая версия программно-методического комплекса  
*Ge Spectra Analysis System – GeSAS*  
для HPGe гамма-спектрометрического радионуклидного анализа

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

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





**Программно-методический комплекс**  
**«*Ge Spectra Analysis System*»**  
**для прецизионного**  
**HPGe гамма-спектрометрического**  
**радионуклидного анализа**  
**(ПМК GeSAS)**

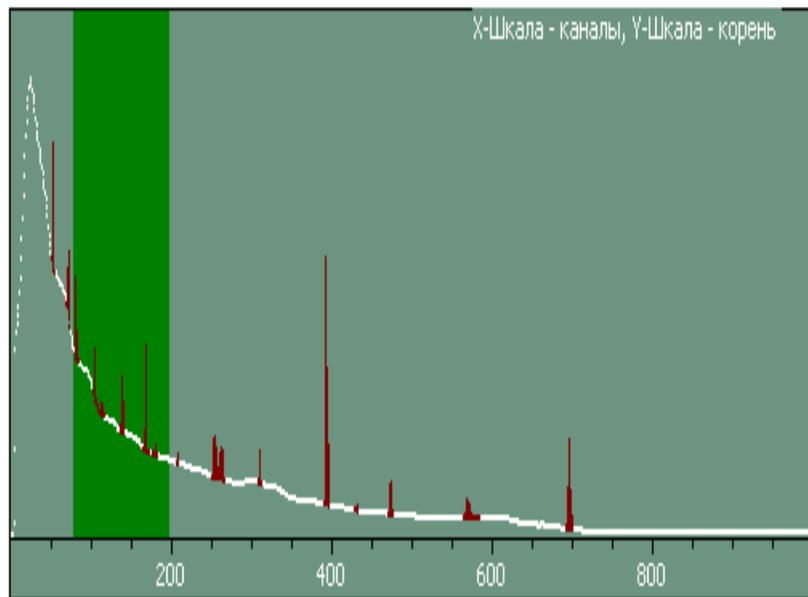
**Международные учения  
радионуклидных лабораторий МСМ ДВЗЯИ, 2002 г.**

Нуклид	Паспортные значения активности	<b>GeSAS</b> – значения активности
$^{210}\text{Pb}$	$335.0 \pm 16.1$	$357 \pm 21$
$^{124}\text{Sb}$	$105.71 \pm 3.45$	$99.9 \pm 6.5$
$^{125}\text{Sb}$	$7.05 \pm 0.16$	$7.31 \pm 0.52$
$^{154}\text{Eu}$	$6.88 \pm 0.18$	$7.00 \pm 0.56$
$^{155}\text{Eu}$	$6.81 \pm 0.27$	$6.55 \pm 0.62$
$^{207}\text{Bi}$	$12.80 \pm 0.32$	$11.7 \pm 0.8$
$^{134}\text{Cs}$	$6.80 \pm 0.15$	$6.88 \pm 0.69$
$^{137}\text{Cs}$	$6.78 \pm 0.16$	$6.70 \pm 0.29$
$^{22}\text{Na}$	$6.92 \pm 0.08$	$7.52 \pm 0.67$

# Из чего состоит пик в спектре

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

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



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

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

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

# Учет эффектов каскадного суммирования, самопоглощения в образце, химического состава и распада за время измерения

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

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

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

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

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

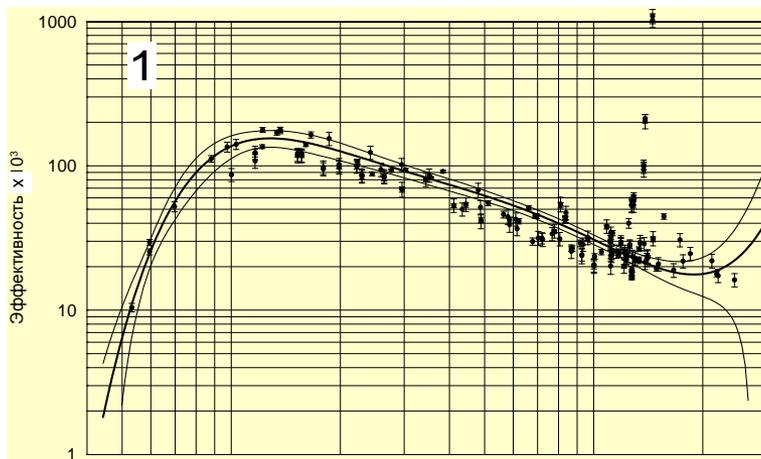
## Коррекция чувствительностей для $^{134}\text{Cs}$

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

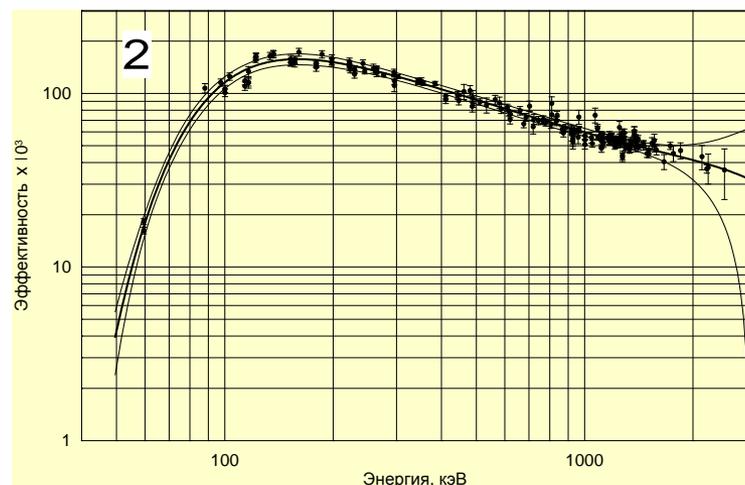
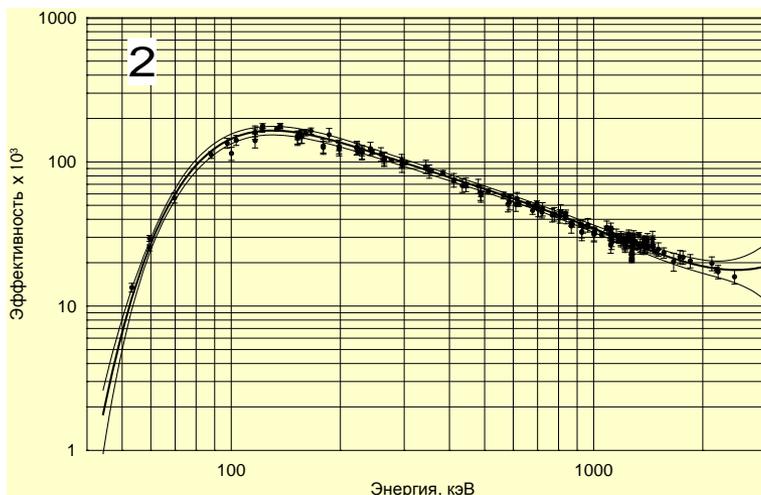
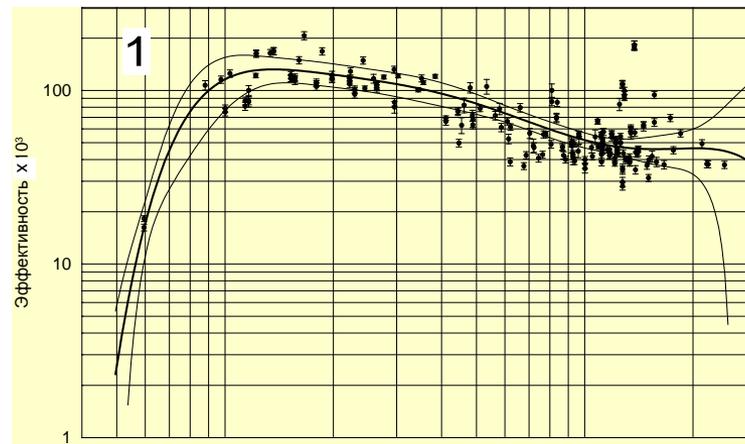
**Погрешности на уровне 95%.**

# Калибровка по эффективности в пике полного поглощения

GEM30185, точечная геометрия

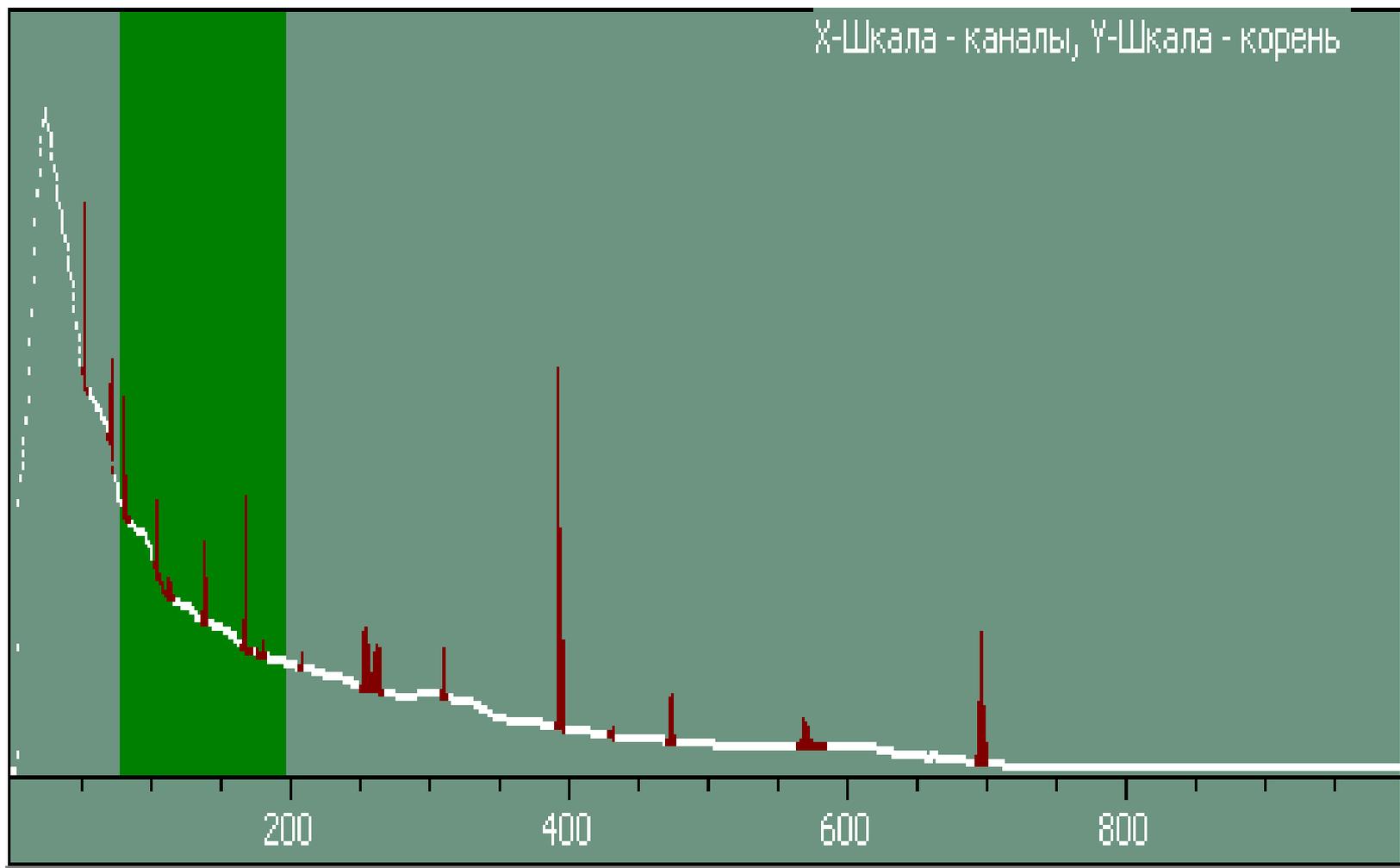


GC 130210, точечная геометрия



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

# Контроль качества обработки спектра



# Контроль качества обработки спектра

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

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

$$D_j = s_j - s_{fon}^j - s_{сл}^j - s_N$$

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 ПШПВ	:	8.26 канала	
		3.01 кэВ	
ПШПВ	:	3.93 ± 0.15 канала	
	:	1.43 ± 0.06 кэВ	
ПШДВ	:	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	
Tc-104	527.20 кэВ	0.04 ± 0.00 1/сек	
Ba-141	527.60 кэВ	0.02 ± 0.00 1/сек	
I-133	529.87 кэВ	7.44 ± 0.39 1/сек	
Tc-104	530.50 кэВ	1.46 ± 0.09 1/сек	
I-135	530.80 кэВ	0.00 ± 0.00 1/сек	
Tc-101	531.42 кэВ	0.10 ± 0.01 1/сек	
-----			
	Дисбаланс	-0.02 ± 0.52 1/сек	

OK

# Добавление радионуклидов в рабочую библиотеку

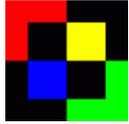
Добавление нуклида в рабочую библиотеку

Список нуклидов, не включенных в рабочую библиотеку

№-94

Нуклид	N	Все пики	Неидент. пики	Корреляция	Период полураспада	Е, кэВ	Чувств.	Е пика
№-94	3	2 ( 98.5 %)	0 ( 0.0 %)	0.96 ± 0.32	20.3 КилоЛет	702.62	24.108	700.7
Sb-125	20	4 ( 73.0 %)	0 ( 0.0 %)	0.12 ± 0.17	1.01 КилоЛет	871.10	20.731	869.1
Br-82	72	5 ( 8.8 %)	0 ( 0.0 %)	0.09 ± 0.06	1.47 дн.	1573.72	0.672	
Yb-169	98	1 ( 19.4 %)	0 ( 0.0 %)	0.00 ± 0.07	32 дн.			
As-76	62	2 ( 0.1 %)	0 ( 0.0 %)	-0.03 ± 0.00	1.09 дн.			
Sb-124	62	2 ( 5.5 %)	0 ( 0.0 %)	-0.04 ± 0.01	60.2 дн.			
Eu-156	81	3 ( 4.2 %)	0 ( 0.0 %)	-0.04 ± 0.02	15.2 дн.			
U-232e	133	8 ( 22.0 %)	0 ( 0.0 %)	-0.04 ± 0.04	68.9 лет			
Eu-154m	84	3 ( 4.5 %)	0 ( 0.0 %)	-0.04 ± 0.01	46.2 мин.			
I-132	126	3 ( 0.1 %)	1 ( 0.0 %)	-0.05 ± 0.00	2.3 час.			
I-133	36	1 ( 1.9 %)	0 ( 0.0 %)	-0.05 ± 0.00	20.8 час.			
Eu-152m	63	5 ( 1.4 %)	0 ( 0.0 %)	-0.05 ± 0.00	9.31 час.			
Ba-131	70	5 ( 0.1 %)	0 ( 0.0 %)	-0.05 ± 0.00	11.5 дн.			
Ta-182	123	3 ( 0.1 %)	0 ( 0.0 %)	-0.06 ± 0.00	114 дн.			
La-140	35	1 ( 2.3 %)	0 ( 0.0 %)	-0.06 ± 0.01	1.68 дн.			
Zr-97	28	3 ( 6.4 %)	1 ( 1.2 %)	-0.06 ± 0.01	16.7 час.			
W-187	81	3 ( 0.5 %)	0 ( 0.0 %)	-0.06 ± 0.00	23.7 час.			
Th-228e	53	3 ( 4.0 %)	0 ( 0.0 %)	-0.07 ± 0.01	1.91 лет			
Tb-160	71	3 ( 0.0 %)	0 ( 0.0 %)	-0.07 ± 0.00	72.3 дн.			
Ce-144e	26	0 ( 0.0 %)	0 ( 0.0 %)	-0.07 ± 0.00	285 дн.			
Ho-166	18	0 ( 0.0 %)	0 ( 0.0 %)	-0.07 ± 0.00	1.12 дн.			
Ce-143	23	1 ( 4.1 %)	0 ( 0.0 %)	-0.07 ± 0.00	1.38 дн.			
Am-243	53	2 ( 0.0 %)	0 ( 0.0 %)	-0.08 ± 0.00	7.37 КилоЛет			
Ru-103	10	0 ( 0.0 %)	0 ( 0.0 %)	-0.08 ± 0.00	39.3 дн.			
Te-131	79	2 ( 1.4 %)	1 ( 1.3 %)	-0.08 ± 0.00	1.25 дн.			

Нуклид  
 Энергия от  до  кэВ 
 Период полураспада от  до  дн.



**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
$^{60}\text{Co}$	$3.68 \pm 0.26$
$^{134}\text{Cs}$	$0.0735 \pm 0.0077$
$^{137}\text{Cs}$	$2.74 \pm 0.16$
$^{152}\text{Eu}$	$0.143 \pm 0.017$
$^{154}\text{Eu}$	$1.96 \pm 0.13$
$^{155}\text{Eu}$	$3.40 \pm 0.29$
$^{241}\text{Am}$	$5.08 \pm 0.32$

# Приготовление счетных образцов



# На чем измеряли



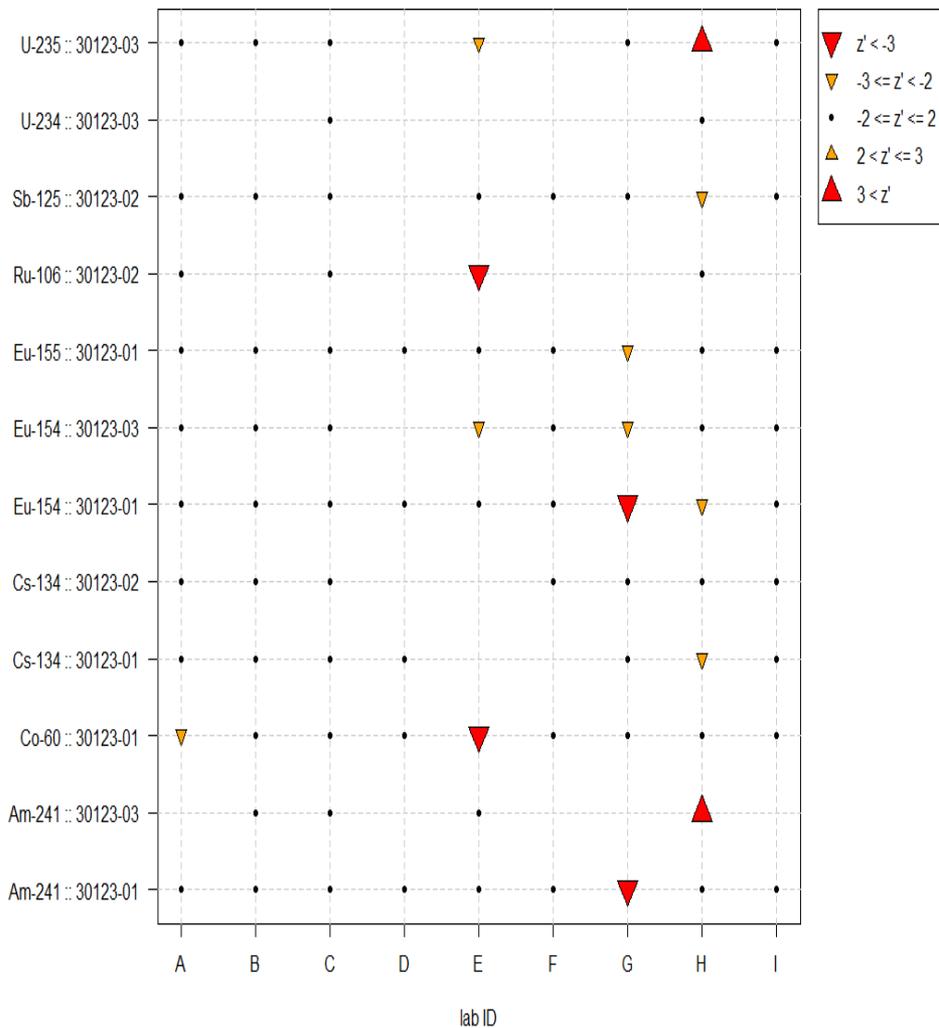
Детектор #1: ORTEC GEM 30185-P  
Диапазон энергий: 50 кэВ ÷ 3000 кэВ  
Разрешение на 1332 кэВ: 1.95 кэВ  
Эффективность: 32%

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

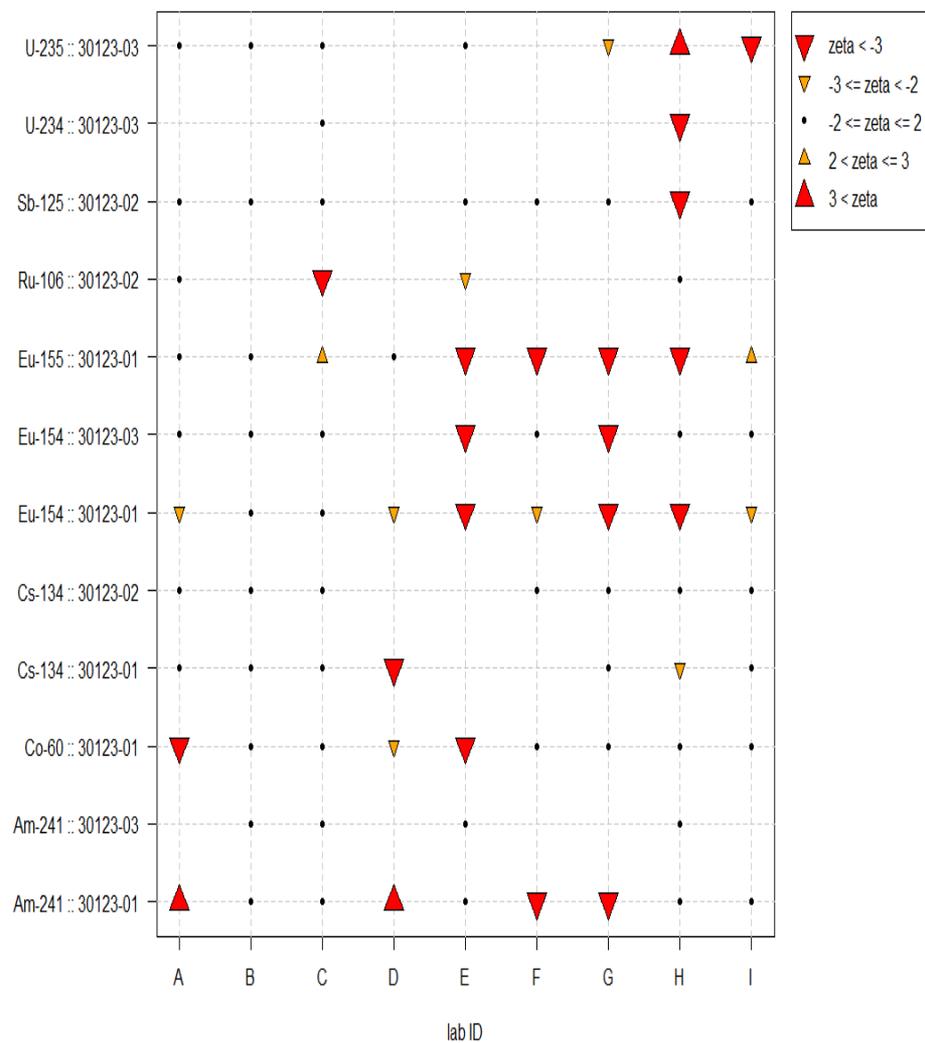
Обработка экспериментальных  
данных: ПМК **GeSAS**

# Результаты статистической обработки результатов измерений

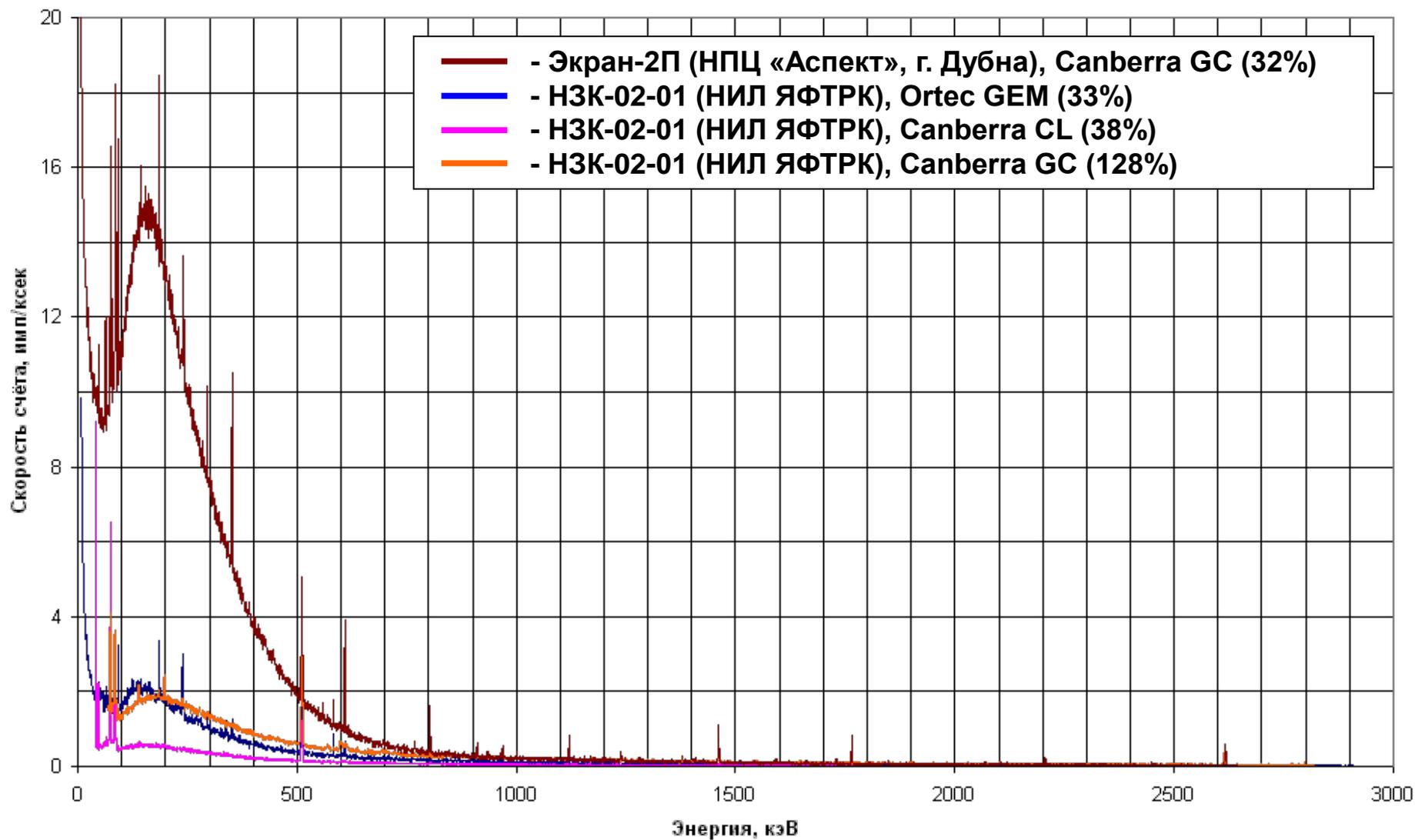
Overall Test Summary: z'-scores



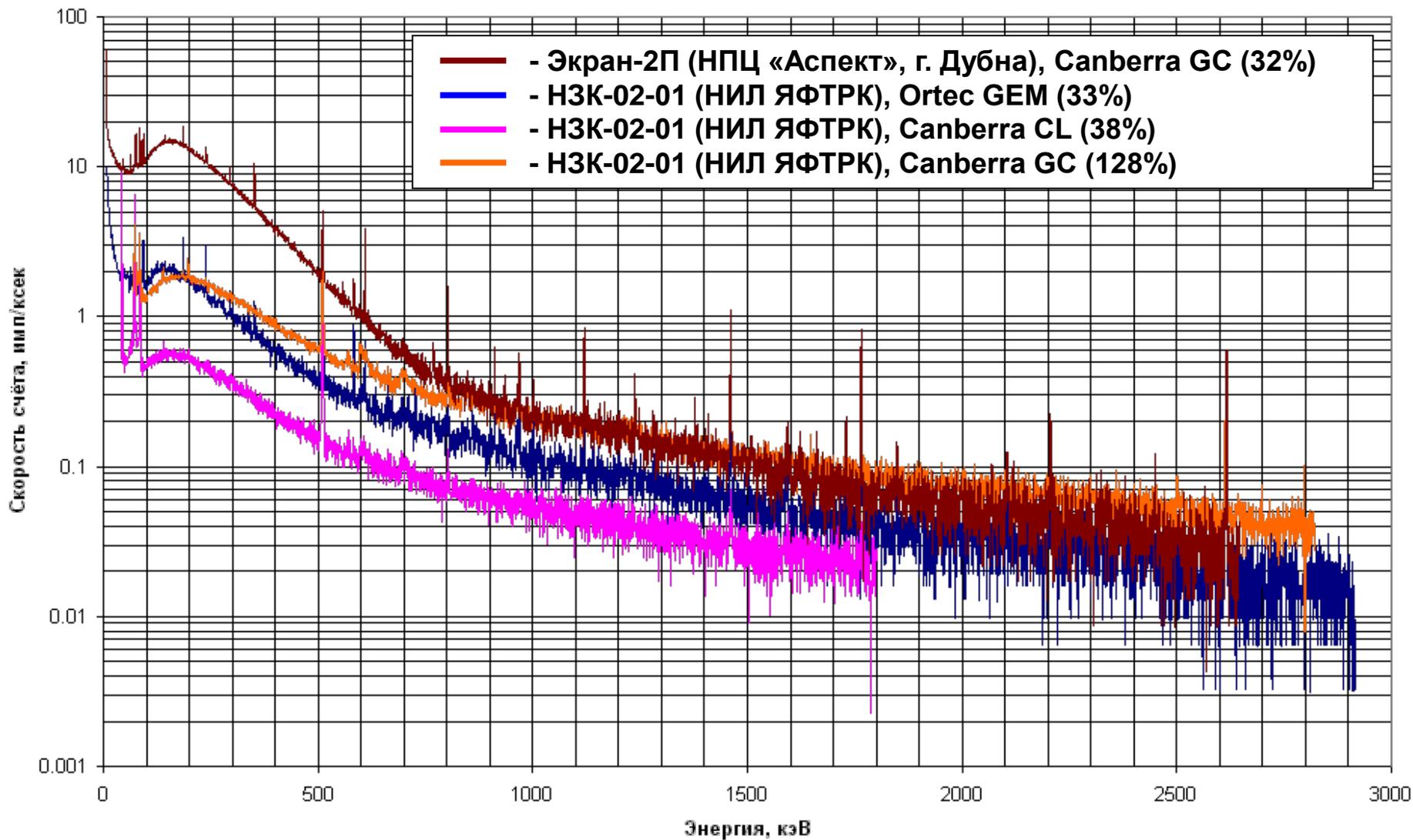
Overall Test Summary: zeta-scores



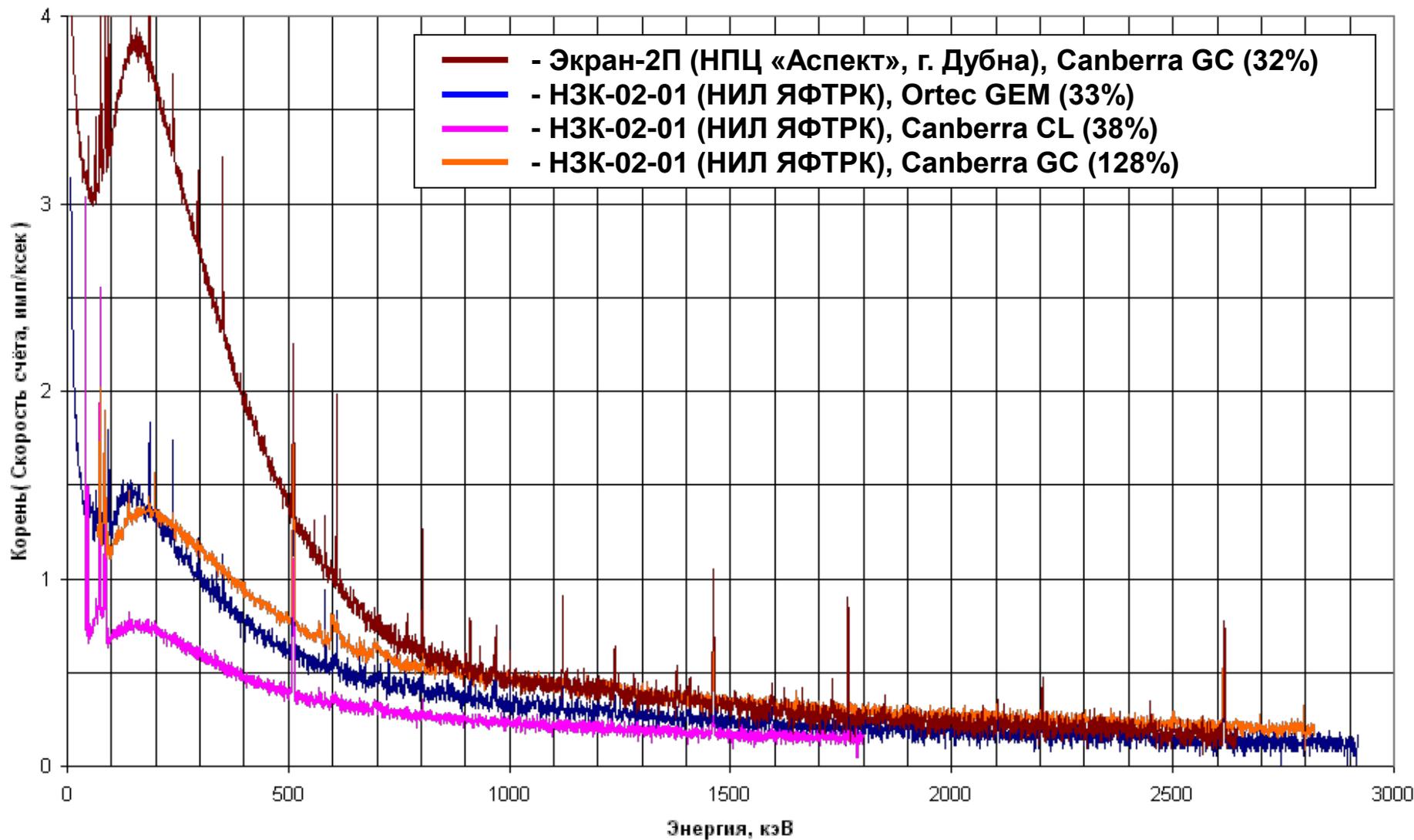
# Спектры фона низкофоновых гамма-спектрометров с HPGe детекторами



# Спектры фона низкофоновых гамма-спектрометров с HPGe детекторами



# Спектры фона низкофоновых гамма-спектрометров с HPGe детекторами



- 
- ✦ Экспериментальные и теоретические исследования радиационных характеристик нефракционированных смесей продуктов деления.  
Справочник «Радиационные характеристики продуктов деления».  
Авторы: Н.Г. Гусев, В.В. Коваленко, В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов.  
Справочник «Бета-излучение продуктов деления».  
Авторы: В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов, В.Г. Алексанкин, П.М. Ружанский.
  - ✦ Разработка аппаратных и методических средств для исследования содержания радиоактивных благородных газов – радионуклидов криптона и ксенона, а также трития, в приземном слое атмосферы. Экспериментальные и теоретические исследования содержания радиоактивных благородных газов – радионуклидов криптона и ксенона, а также трития, в приземном слое атмосферы. 1962 - 1992 г.г.  
Государственная премия СССР 1982 года в области науки и техники.
  - ✦ Разработка методов и средств низкофоновой HPGe гамма-спектрометрии для лабораторного радионуклидного анализа проб объектов окружающей среды регионов действующих и проектируемых АЭС РФ. 1990 -1995 г.г.  
Экспериментальные и теоретические исследования 1990 - 2000 г.г.
  - ✦ Разработка методов и средств низкофонового HPGe гамма-спектрометрического радионуклидного анализа аэрозольных проб в Международной системе мониторинга Договора о всеобъемлющем запрещении испытаний ядерного оружия. 2001 - 2008 г.г.



- 
- ✚ Исследование содержания гамма-излучающих радионуклидов и трития в различных компонентах экосистем регионов Калининской АЭС, Кольской АЭС, Курской АЭС, Смоленской АЭС, Билибинской АЭС и Нововоронежской АЭС (≈ 2500 образцов). 1992-1998 г.г.
  - ✚ Исследование радиационного состояния окружающей среды района Москворечье, обусловленного длительной эксплуатацией реактора ИРТ-2000 МИФИ. (≈ 320 образцов). 1998 г.
  - ✚ Пробы воды и донных отложений морей Северного ледовитого океана, Японского, Черного и Балтийского морей. (≈ 800 образцов). 2002-2007 г.г.
  - ✚ Пробы объектов окружающей среды промышленных подземных ядерных взрывов «Горизонт-4», «Кратон-3» и «Кристалл», проведенных на территории Якутии. (≈ 200 образцов). 2002-2004 г.г.
  - ✚ Специальные работы. Прецизионная HPGe гамма-спектрометрия, в т.ч. низкофоновая, образцов, облученных тепловыми нейтронами. (≈ 2500 образцов). 2000-2007 г.г.
  - ✚ Внедрение HPGe и NaI гамма-спектрометрических технологий на Нововоронежской АЭС (≈ 1300 образцов). 2008-2011 г.г.



# Общий вид низкофонового многодетекторного HPGe гамма-спектрометра НИЛ ЯФТРК



# The 2002 IAEA intercomparison of software for low-level $\gamma$ -ray spectrometry

Dirk Arnold, Menno Blaauw, Stjepko Fazinic, Vladimir P. Kolotov

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research  
[Volume 536, Issues 1-2](#), 1 January 2005, Pages 196-210.

✚ ... All programs tested in this intercomparison were efficiency-curve-based, and ***all failed in some respect*** to accomplish their task, as shown in [Table 8](#).

Table 8.

Partial or complete failure of the participating programs at various stages of the process

	Gamma-W	Genie 2000	Gamma-Vision	Inter-Winner	Hyper-lab	Uni-Sampo	Anges
Peak area determination							
Background correction			X		X		
Interference correction	X	X	X	X	X	X	X
Coincidence summing effects when calibrating	X	X		X	X	X	X
Efficiency correction for sample self-attenuation	X		X	X	X	X	X
Coincidence summing effects when analyzing	X	X <sup>a</sup>		X	X	X	X
Identification of radionuclides		X <sup>b</sup>	X	X		X <sup>b</sup>	

<sup>a</sup> Partial failure due to absence of natural radionuclides in database that come with the program

<sup>b</sup> Failure with respect to false hits due to inability to recognize sum peaks

## Форматы спектров, с которыми работает ПМК GeSAS

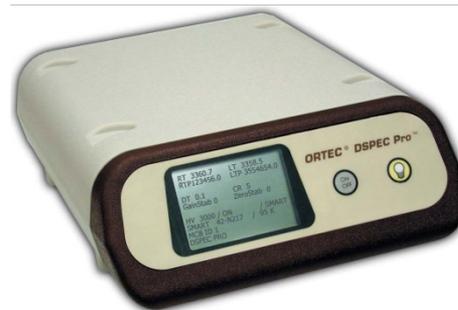
- собственный формат  
SasGeSample (\*.spa, \*.spz)
- Ortec (\*.chn, \*.spe)
- Ortec GammaVision(\*.spc)
- Canberra S100 (\*.mca)
- Canberra Genie 2000 (\*.cnf)
- AnGamma v3.3 (\*.spc)
- LSRM (\*.spe )
- Гринстар (\*.sps)
- SBS v4.0 (\*.spr)
- Прогресс-2000 (\*.spc)
- Спектр (\*.ani, \*.clb)
- ASCII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

# Цифровые спектрометры, с которыми работает ПМК GeSAS

● ЦСУ-ПН-02



● Ortec *DSPECPro*



● Canberra DSA 1000



# Что нас не устраивает...

- Отсутствие единой идеологии при разработке и модернизации программ (создание дополнительных программных модулей и т.д.)
- Высокий уровень произвола при выборе параметров, используемых для обработки спектров
- Отсутствие объективных критериев качества выбора параметров и результатов обработки спектра
- Применение несовершенных и неоптимальных алгоритмов (одинаковые алгоритмы для обработки ППД и сцинтилляционных спектров и т.д.)
- Переход от площадей пиков к активностям через кривую эффективности
- Отсутствие возможности непосредственного использования экспериментальных данных в процессе обработки спектров
- Использование чисто расчетных методов для создания константного обеспечения спектрометра (учет каскадного суммирования и т.д.)
- Сложность практической реализации некоторых требований программ к подготовке входных данных (использование методики учета поглощения в образце и т.д.)

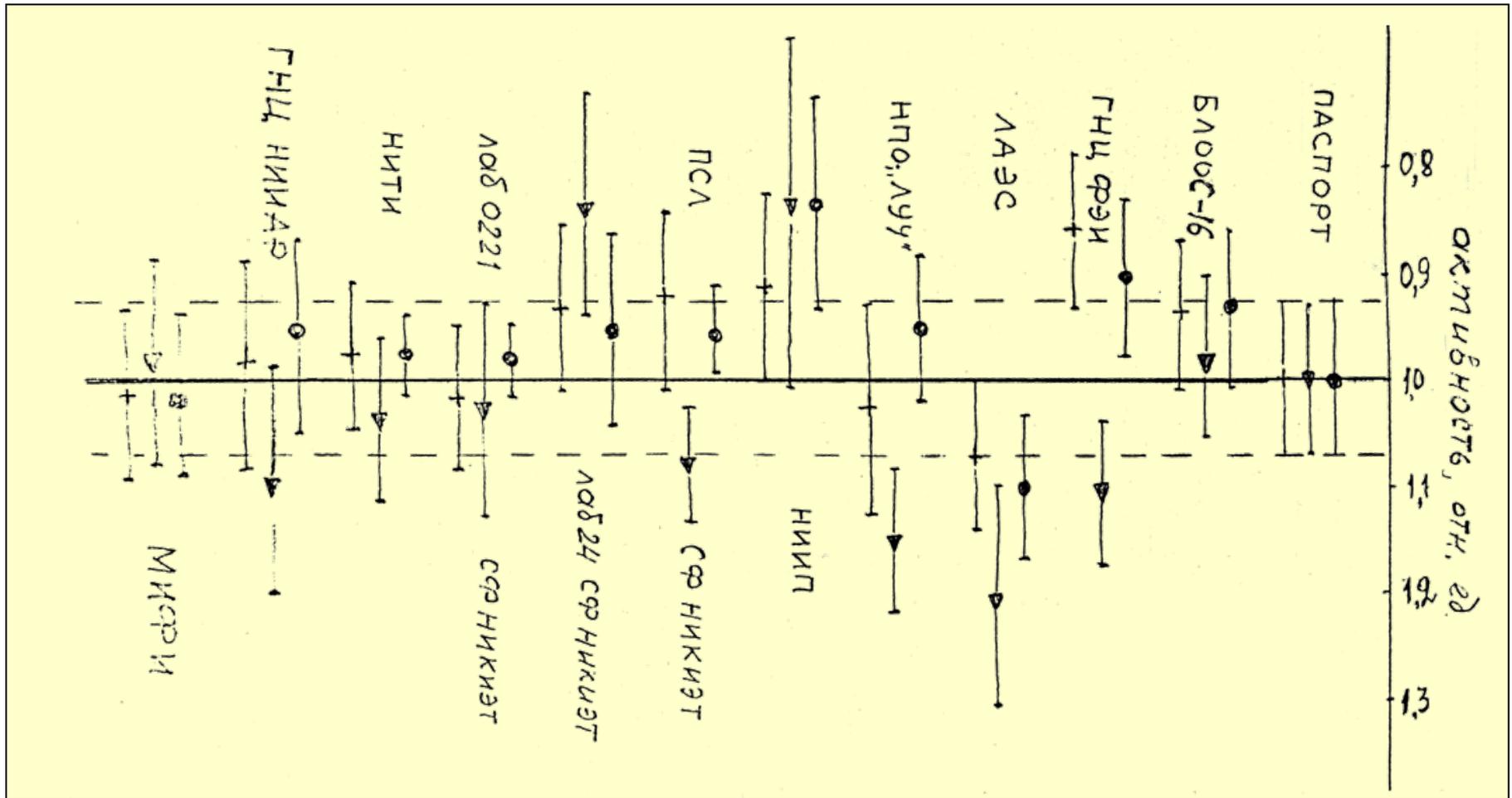
# Международные учения

радионуклидных лабораторий МСМ ДВЗЯИ, 2002 г.

Нуклид	Паспортная активность		Активность, полученная при помощи программы GeSAS	
	А, Бк	$\pm 2\sigma$ , %	А, Бк	$\pm 2\sigma$ , %
<sup>210</sup> Pb	335.01	4.80	357	6.0
<sup>137</sup> Cs	6.78	2.30	6.70	4.4
<sup>124</sup> Sb	105.71	3.26	99.9	6.5
<sup>125</sup> Sb	7.05	2.22	7.31	7.1
<sup>154</sup> Eu	6.88	2.62	7.00	8.0
<sup>155</sup> Eu	6.81	3.94	6.55	9.5
<sup>207</sup> Bi	12.80	2.50	11.7	6.8
<sup>134</sup> Cs	6.80	2.24	6.88	10
<sup>22</sup> Na	6.92	1.13	7.52	8.9



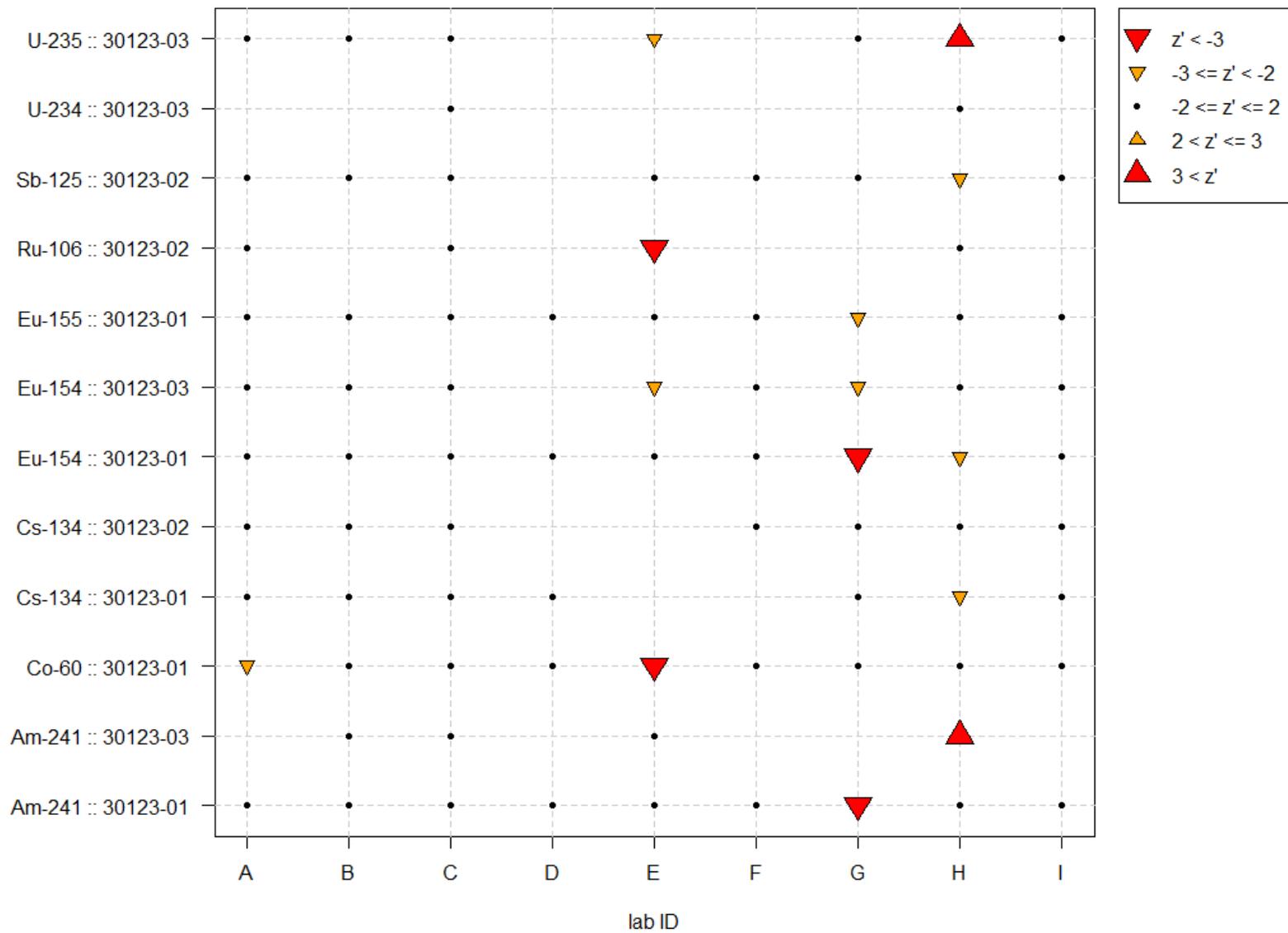
# Результаты метрологической экспертизы гамма-спектрометров на предприятиях 16 ГНТУ методом «темной» пробы, 1996 г.



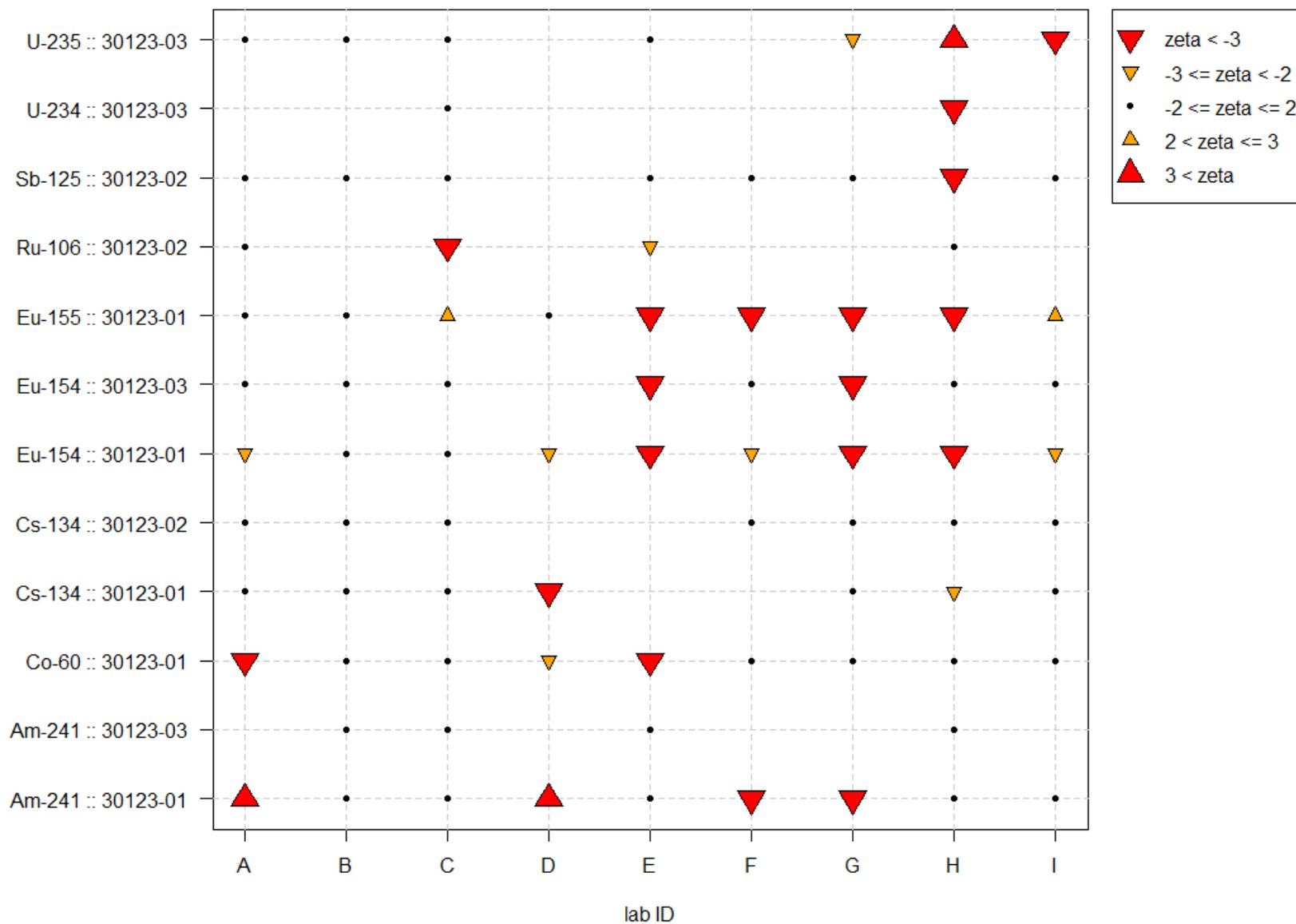
Все результаты нормированы на 1.0

Условные обозначения: ○ – европий-152; ▼ – торий-232; + – цезий-137.

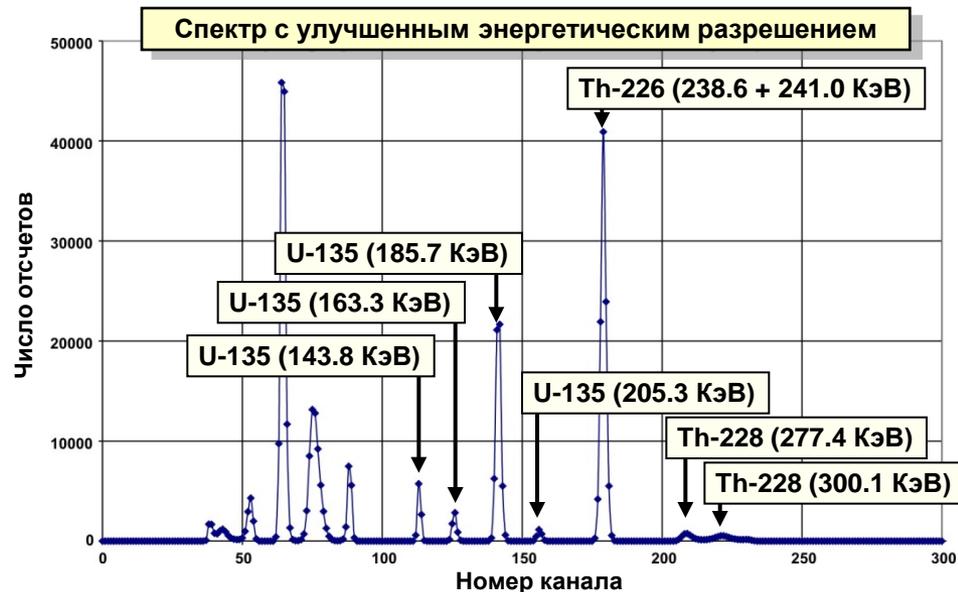
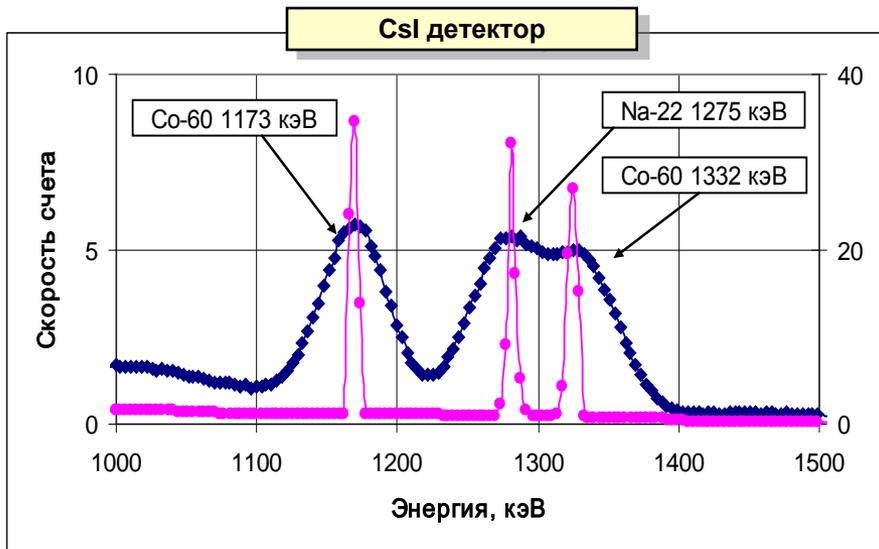
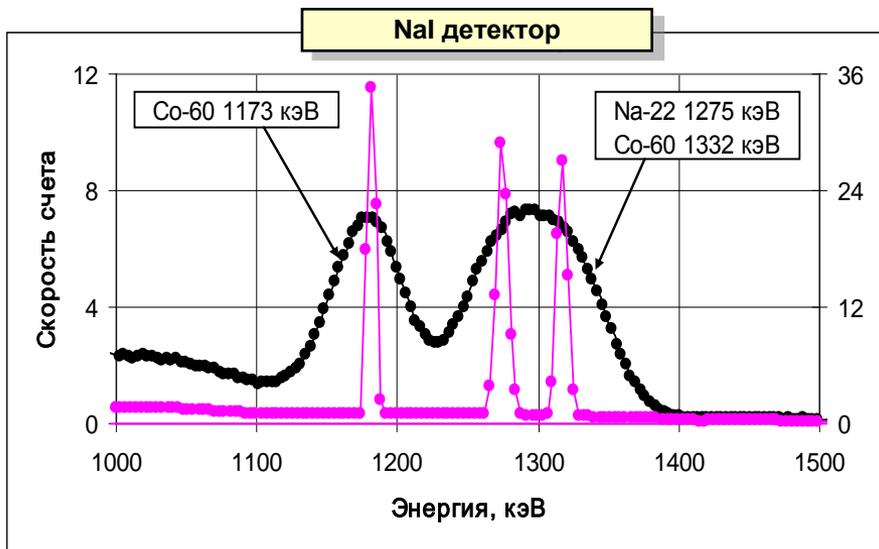
### Overall Test Summary: z'-scores



### Overall Test Summary: zeta-scores



# «Улучшение» энергетического разрешения



## The 2002 IAEA intercomparison of software for low-level $\gamma$ -ray spectrometry

Table 8. Partial or complete failure of the participating programs at various stages of the process

	Gamma-W	Genie 2000	Gamma-Vision	Inter-Winner	Hyper-lab	Uni-Sampo	Anges
Peak area determination							
Background correction			X		X		
Interference correction	X	X	X	X	X	X	X
Coincidence summing effects when calibrating	X	X		X	X	X	X
Efficiency correction for sample self-attenuation	X		X	X	X	X	X
Coincidence summing effects when analyzing	X	X <sup>a</sup>		X	X	X	X
Identification of radionuclides		X <sup>b</sup>	X	X		X <sup>b</sup>	

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.  
 Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.  
 Volume 536, Issues 1-2, 1 January 2005, Pages 196-210

<sup>a</sup> Partial failure due to absence of natural radionuclides in the databases that come with the program.

<sup>b</sup> Failure with respect to false hits due to inability to recognize sum peaks.



- Φ



# Принципиально новый подход к анализу спектрометрической информации

---

- ✚ В процессе обработки спектр рассматривается как единый объект, состоящий из набора гамма-линий конечного числа радионуклидов.
- ✚ Такой подход, в отличие от традиционных, позволяет корректно учитывать интерференцию спектральных пиков различных радионуклидов со сложными схемами распада.
- ✚ В том числе многочисленных пиков, не связанных напрямую с гамма-переходами: пики сумм при совпадениях и пики вылета одного и двух аннигиляционных квантов.



# Объективный контроль качества обработки спектра

---

- ✚ Для каждого обработанного спектра рассчитывается параметр «коэффициент качества», значение которого при идеальной обработке спектра равняется единице.
- ✚ Отличие значения коэффициента качества от единицы однозначно указывает на определенные некорректности в обработке спектра.
- ✚ Обычно используемый для оценки правильности обработки визуальный просмотр спектра в целом ряде случаев не позволяет оценить корректность проведенной обработки.



# Формирование библиотеки радионуклидов

---

- ✚ Для каждого спектра определяется ранжированный по степени возможного присутствия в этом спектре список радионуклидов.
- ✚ Пользователь имеет возможность самостоятельно формировать итоговый список радионуклидов для текущего обрабатываемого спектра или серии однотипных спектров.
- ✚ Этой возможностью следует, в частности, воспользоваться в ситуации, когда значение «коэффициента качества» отличается от единицы.



# Обработка спектров с малой статистикой

---

- ✦ В ПМК GeSAS используются специальные алгоритмы, позволяющие корректно обрабатывать спектры с малой статистикой, поскольку традиционно применяемые алгоритмы обработки спектров дают в этом случае неверные результаты.
- ✦ При отсутствии в спектре выраженных пиков данного радионуклида предусмотрена возможность корректно оценивать верхний предел его активности в образце с учетом вкладов других радионуклидов и условий измерения.



# Раздельная оценка погрешностей

Все промежуточные результаты анализа сопровождается раздельной оценкой статистических и систематических погрешностей.

- ✚ корректный расчет погрешности итогового результата
- ✚ в традиционно применяемых алгоритмах вычисления погрешности раздельная оценка не проводится, что может привести к неверным результатам
- ✚ средства планирования измерений, позволяющие по данному измеренному спектру оценивать экспозицию, требующуюся для достижения заданной точности результатов, и, наоборот, оценивать точность, которая будет достигнута при заданной экспозиции
- ✚ «Методические указания МУ2.6.1.25-2000. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования»:

Форма представления результатов РК регламентируется соответствующей методикой. При этом **обязательным** является указание:

оценки (полной) абсолютной неопределенности контроля при  $P=0.95$ ;

оценки статистической (случайной) неопределенности измерений.



# Учет эффекта истинного совпадения каскадных гамма-квантов

---

- ✦ При определении активностей радионуклидов в измеряемых образцах
- ✦ При калибровке спектрометра по эффективности. Это особенно важно для измерения проб в «близкой геометрии» на детекторах большого объема, т.к. позволяет, не ограничиваясь при калибровках «некаскадными» радионуклидами, использовать большее количество источников, т.е. большее количество экспериментальных данных, и обеспечить тем самым высокую точность калибровки, а также расширить энергетический диапазон калибровки.



**Для учета эффектов каскадного суммирования - КС в состав ПМК GeSAS включены:**

- ✦ Метод учета эффектов КС и вычислительные алгоритмы для расчета величины эффектов КС.
- ✦ Средства учета КС в программах анализа спектров и калибровки спектрометров.
- ✦ Наборы ядерных данных для расчета КС.
- ✦ Методы и программы создания наборов ядерных данных, используемых в дальнейшем для расчета КС и развития соответствующих библиотек.
- ✦ Вспомогательные программы для расчета величины эффектов КС.



## Кроме того в состав ПМК GeSAS включены

---

- ✚ средства коррекции поглощения гамма-квантов в объемных образцах различной плотности и учета различия этого поглощения в измеряемых и калибровочных образцах.
- ✚ средства учета химического состава объемных образцов и учета различия химического состава измеряемых и калибровочных образцов.



## Коррекция влияния плотности объемного образца на эффективность регистрации гамма-квантов .

$$D(\rho, E) = \frac{\int_0^H \varepsilon(E, x) * \exp(-\mu(E) * \rho * x) dx}{\int_0^H \varepsilon(E, x) dx}$$

$$D(\rho, \rho_0, E) = D(\rho, E) / D(\rho_0, E)$$

1.  $\varepsilon(E/x) = \text{const}$   $H = H_{\text{eff}}$

$$DR(\rho, E) = \frac{1 - \exp(-\mu(E) * \rho * H_{\text{eff}})}{1 - \exp(-\mu(E) * \rho_0 * H_{\text{eff}})} * \frac{\rho_0}{\rho}$$

2.  $\varepsilon(x) = \varepsilon(0) * \exp(-\alpha * x)$ .

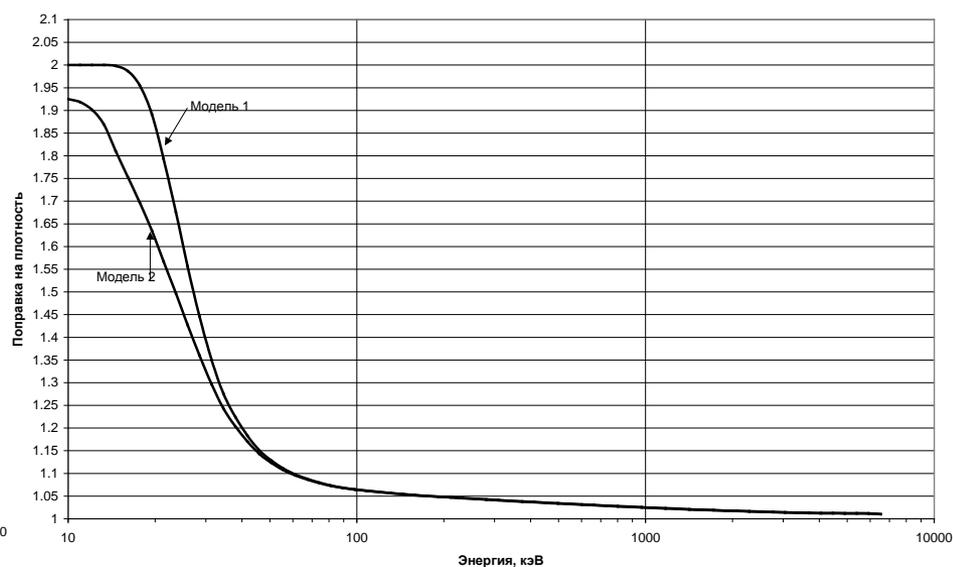
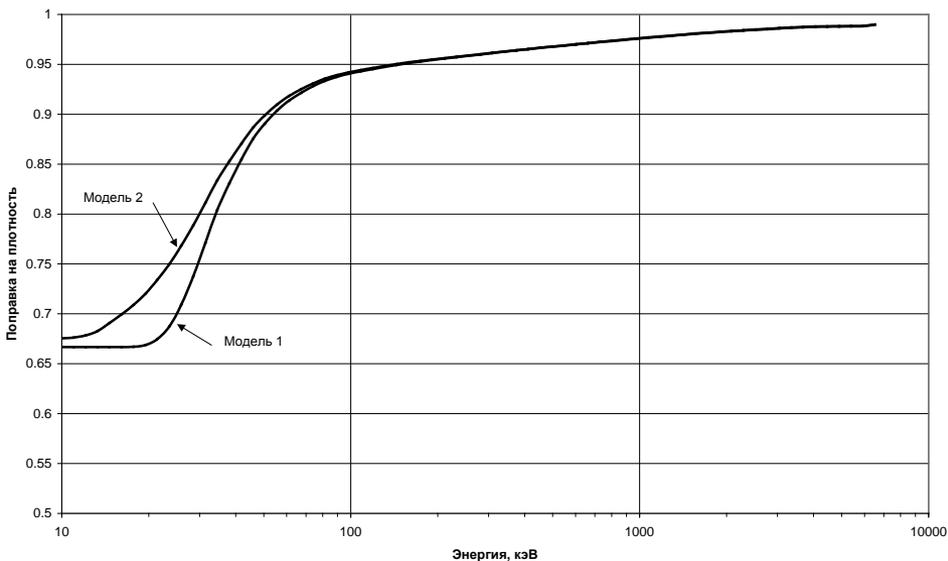
$$DR(\rho, E) = \frac{\mu * \rho_0 + \alpha}{\mu * \rho + \alpha} * \frac{1 - \exp(-(\mu * \rho + \alpha) * H)}{1 - \exp(-(\mu * \rho_0 + \alpha) * H)}$$

при  $E \rightarrow \infty, \mu \rightarrow 0, D(\rho, E) \rightarrow 1, DR(\rho, E) \rightarrow 1,$

при  $E \rightarrow 0, \mu \rightarrow \infty, D(\rho, E) \rightarrow 0, DR(\rho, E) \rightarrow \rho/\rho_0.$

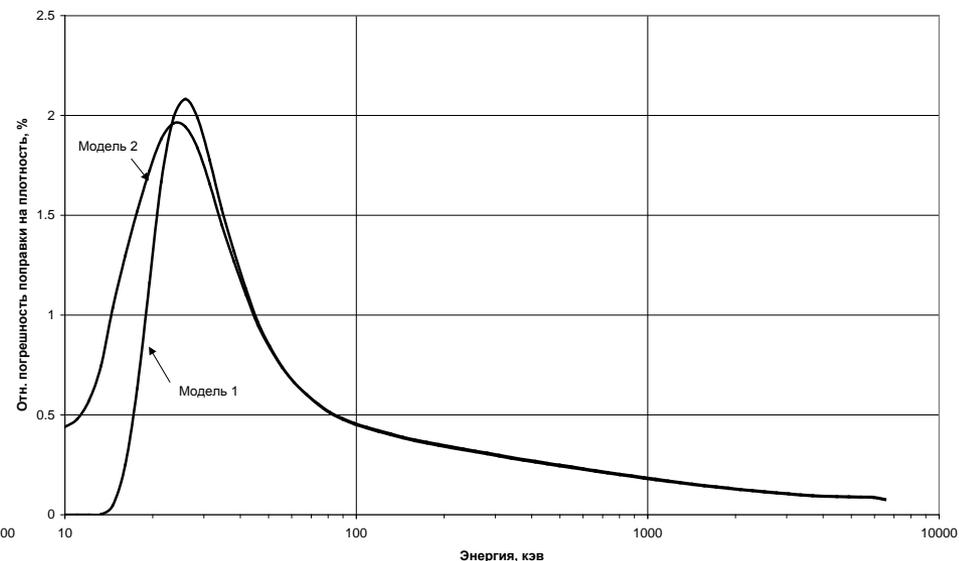
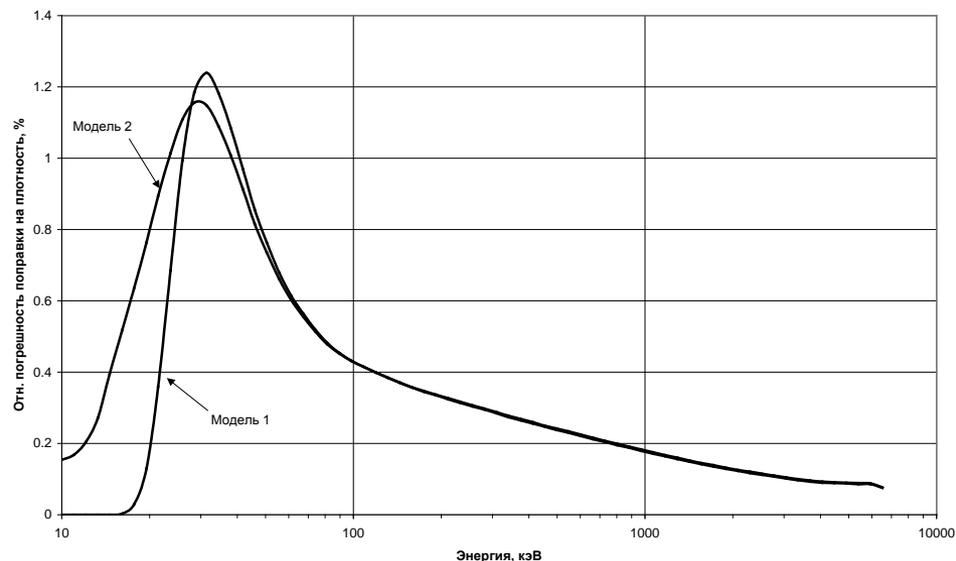
## Значения параметров моделей коррекции плотности источника.

контейнер	детектор	Модель 1		Модель 2	
		Heff, см	$\chi^2/F$	$\alpha, \text{см}^{-1}$	$\chi^2/F$
A1	D5	1.92 ± 0.14	0.93	1.06 ± 0.12	0.89
	D6	1.66 ± 0.20	1.22	0.95 ± 0.20	1.22
	D7	1.55 ± 0.12	0.87	0.71 ± 0.12	0.95
	среднее	1.70 ± 0.12		0.90 ± 0.22	
A3	D5	2.40 ± 0.18	0.69	0.71 ± 0.08	0.72
	D6	2.35 ± 0.16	0.90	0.73 ± 0.08	0.97
	D7	2.15 ± 0.14	1.16	0.81 ± 0.08	1.26
	среднее	2.28 ± 0.16		0.75 ± 0.06	



**Зависимость коэффициента поправки на плотность от энергии при плотности образца 1.5 г/см<sup>3</sup>**

**Зависимость коэффициента поправки на плотность от энергии при плотности образца 0.5 г/см<sup>3</sup>**



**Зависимость погрешности определения коэффициента поправки на плотность от энергии при плотности образца 1.5 г/см<sup>3</sup>**

**Зависимость погрешности определения коэффициента поправки на плотность от энергии при плотности образца 0.5 г/см<sup>3</sup>**

# Международные учения

радионуклидных лабораторий МСМ ДВЗЯИ, 2002 г.

Нуклид	Паспортная активность		Активность, полученная при помощи программы GeSAS	
	А, Бк	$\pm 2\sigma$ , %	А, Бк	$\pm 2\sigma$ , %
<sup>210</sup> Pb	335.01	4.80	357	6.0
<sup>137</sup> Cs	6.78	2.30	6.70	4.4
<sup>124</sup> Sb	105.71	3.26	99.9	6.5
<sup>125</sup> Sb	7.05	2.22	7.31	7.1
<sup>154</sup> Eu	6.88	2.62	7.00	8.0
<sup>155</sup> Eu	6.81	3.94	6.55	9.5
<sup>207</sup> Bi	12.80	2.50	11.7	6.8
<sup>134</sup> Cs	6.80	2.24	6.88	10
<sup>22</sup> Na	6.92	1.13	7.52	8.9