



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра № 11:

«Экспериментальные методы ядерной физики»

**Отчёт об аспирантской работе:**

**Аппаратно-программный комплекс для автоматизации гамма-  
спектрометрии на установке Регата реактора ИБР-2**

Исполнитель: Галустов В. А., аспирант группы А23-101

Научный руководитель: Наумов П. Ю., к.ф.-м.н., доцент ИЯФит

Консультант: Гроздов Д. С., к.ф.-м.н., начальник группы СНААПИ ОЯФ ЛНФ ОИЯИ

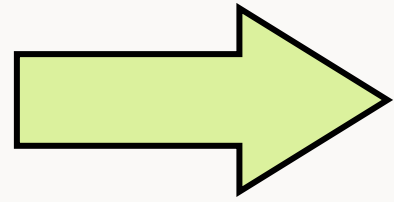

Москва, 2026

# Введение

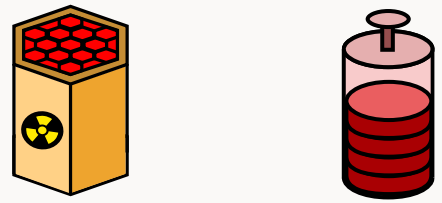
В Секторе нейтронного активационного анализа и прикладных исследований (СНААПИ) ЛНФ ОИЯИ на установке Регата для определения элементного состава образцов применяют инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА).

## Основные этапы:

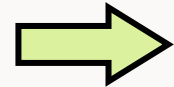
### 1. Пробоподготовка



### 2. Облучение образцов



### 3. Набор $\gamma$ -спектров



### 4. Обработка спектров и расчёт концентраций



Na				Si			
Конц., ppm	Абс. погр.	МДК	МДК	Конц., ppm	Абс. погр.	МДК	МДК
155	4	1.21	89000	9000	8400	8400	
147	4	1.12	82000	8000	8400	8400	
138	4	1.26	88000	9000	8200	8200	
Mg				Cl			
Конц., ppm	Абс. погр.	МДК	МДК	Конц., ppm	Абс. погр.	МДК	МДК
840	40	39	5100	300	25.7	25.7	
810	40	38.1	5100	300	24.7	24.7	
810	40	38.1	5100	300	30	30	
Al				K			
Конц., ppm	Абс. погр.	МДК	МДК	Конц., ppm	Абс. погр.	МДК	МДК
637	12	5.94	22600	700	219	219	
670	13	4.91	21800	700	207	207	
632	12	5.2	21700	700	193	193	

# Гамма-спектрометрия: трудности

Разнообразие решаемых научных и прикладных задач сопряжено с анализом большого количества проб, число которых достигает **3000 единиц в год**.

## Набор гамма-спектров

- Круглосуточное присутствие персонала на установке;
- Повышенная радиационная нагрузка на персонал;
- Вероятность появления ошибок, связанных с человеческим фактором.

## Каскадное суммирование

- Изменению площади пиков полного поглощения;
- Смещённое значение величины удельной активности радионуклидов.

## Проверка результатов

- Корректность результатов зависит от множества факторов;
- Высокая трудоёмкость;
- Вероятность появления ошибок, связанных с человеческим фактором.

# Цель

**Целью диссертационной работы** является разработка аппаратно-программного комплекса для автоматизации набора гамма-спектров и повышения точности и прецизионности результатов гамма-спектрометрии на установке Регата реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ при проведении ИНАА.

**Задачи диссертационной работы:**

1. Разработка аппаратной конфигурации и программных средств для автоматизации процесса набора гамма-спектров.
2. Создание алгоритма для расчёта и применения поправочных коэффициентов на каскадное суммирование гамма-квантов при проведении гамма-спектрометрии образцов с наведенной активностью.
3. Разработка алгоритма для проверки и корректировки результатов идентификации и расчёта удельной активности радионуклидов.

# Спектрометрический комплекс

## Регистрация $\gamma$ -излучения:

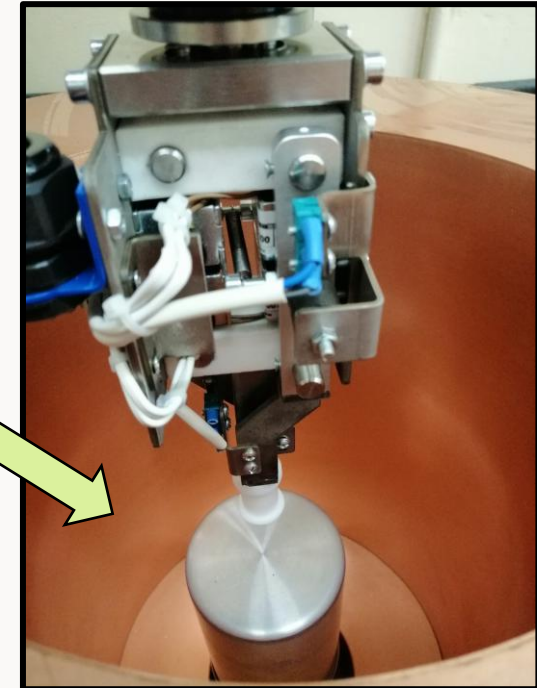
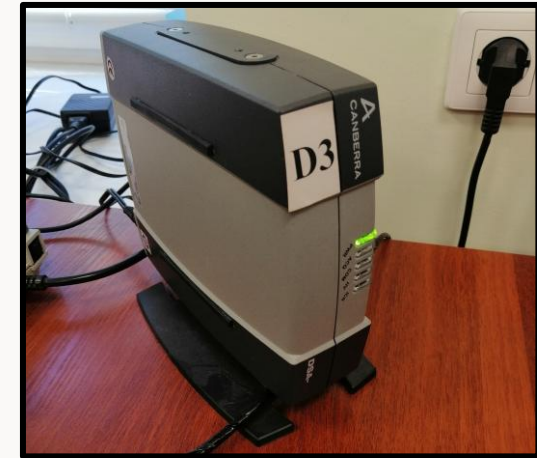
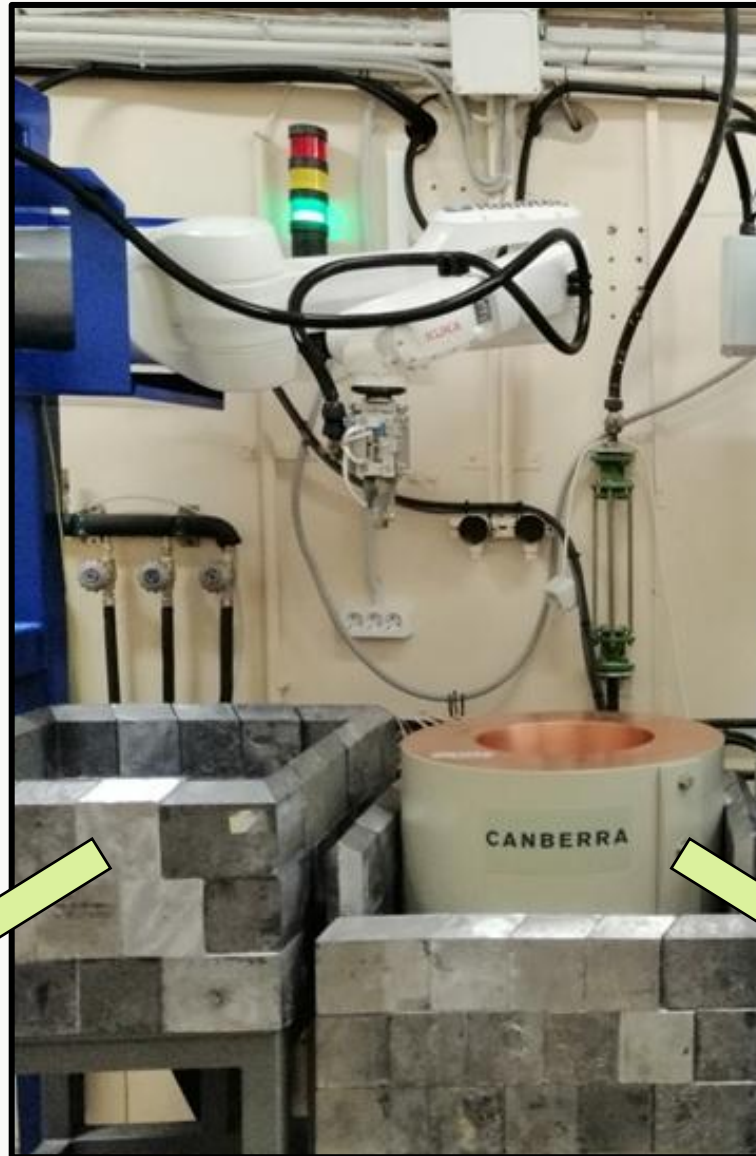
4 ОЧГ-детектора и цифровых многоканальных анализатора DSA-LX (Canberra, США).

## Устройства смены образцов (УСО):

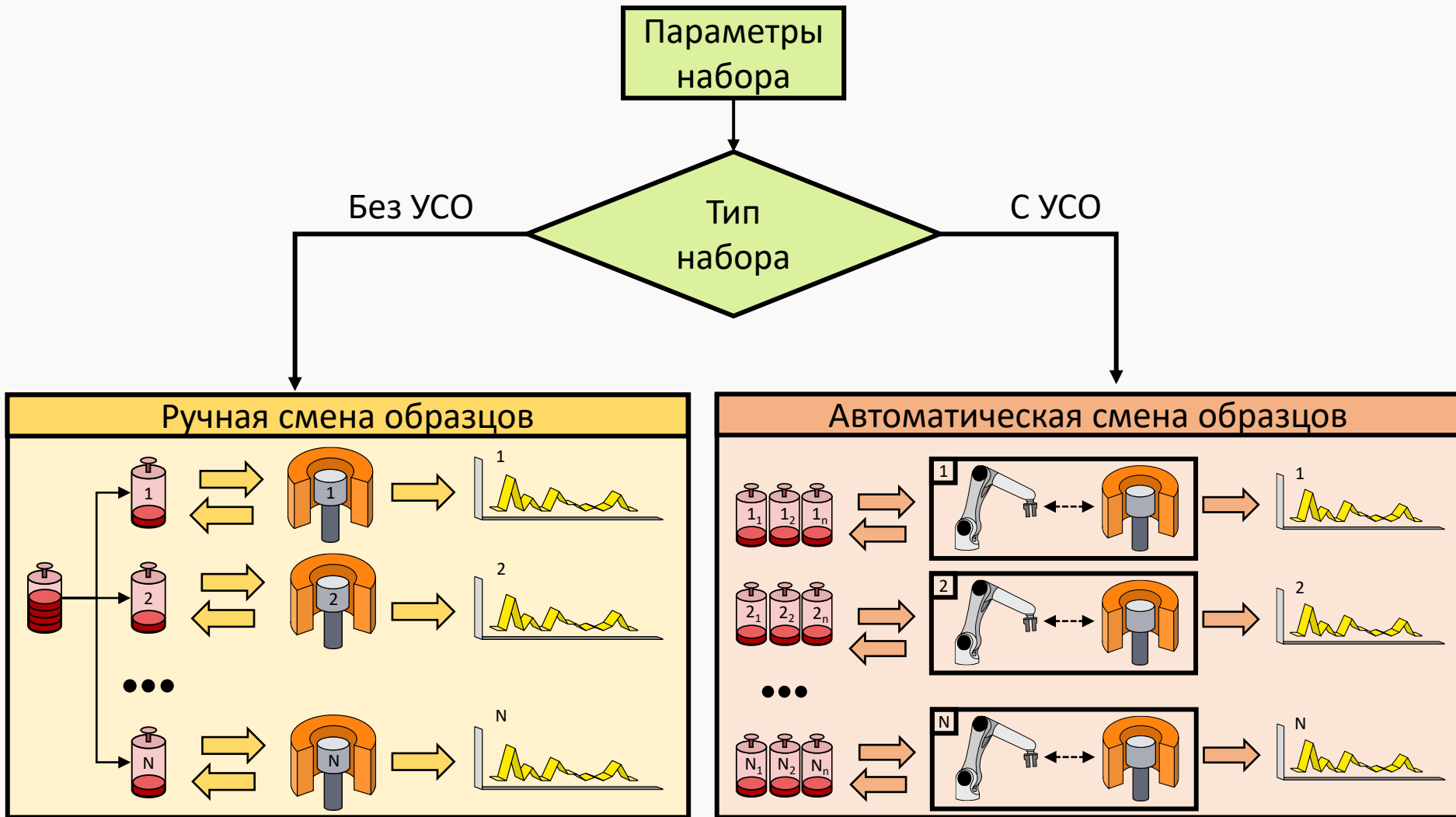
4 промышленных 6-осевых роботизированных манипуляторов (KUKA KR 10 R1100, Германия).

## Вместимость кассетницы:

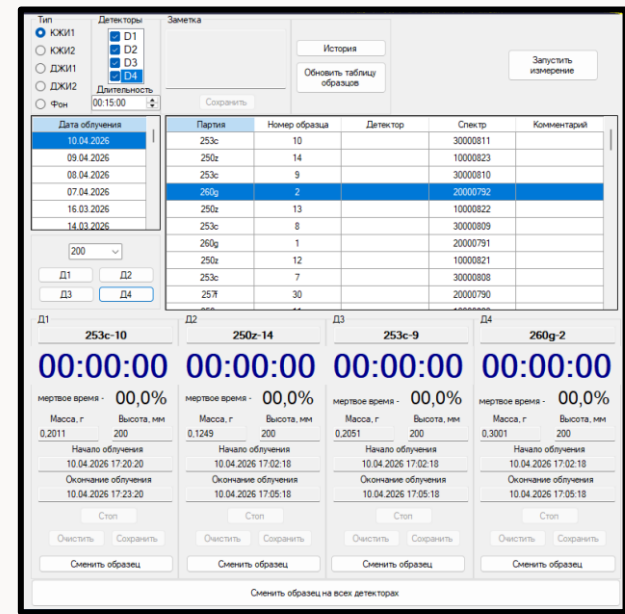
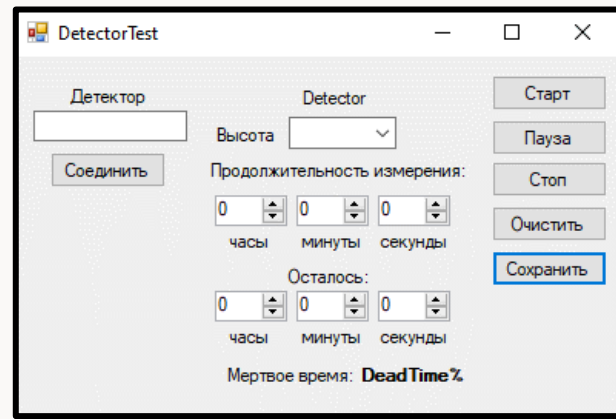
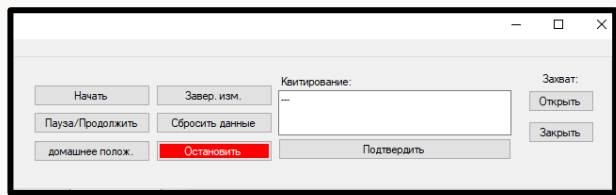
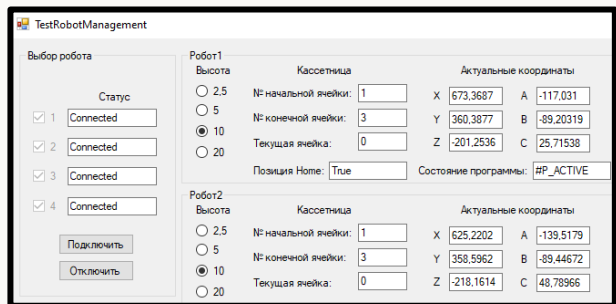
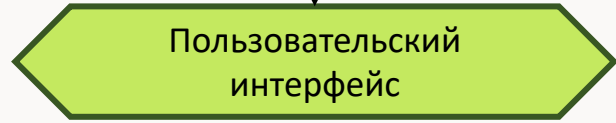
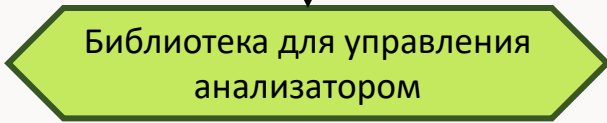
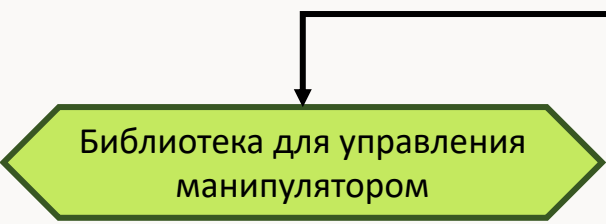
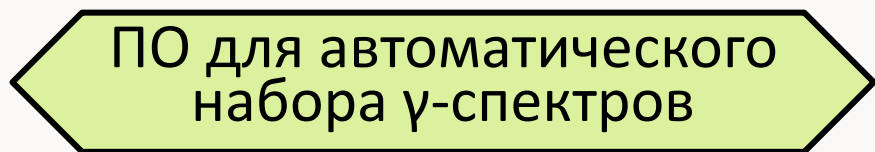
81 контейнер.



# Автоматизация набора $\gamma$ -спектров

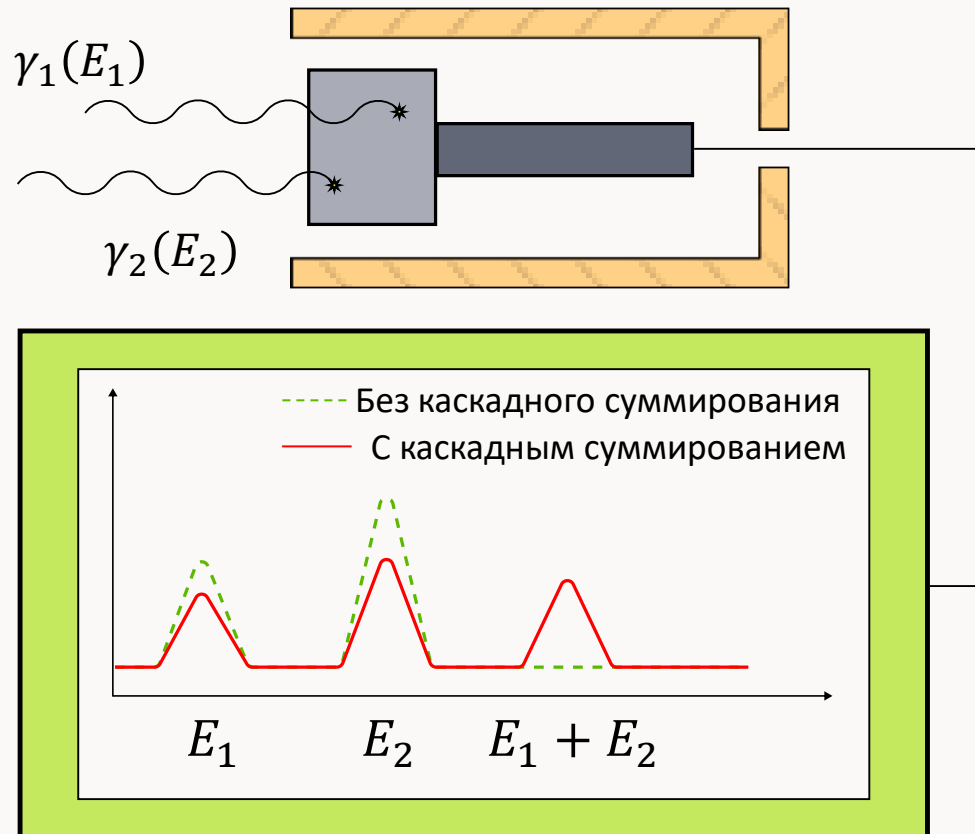


# Реализация автоматического набора $\gamma$ -спектров

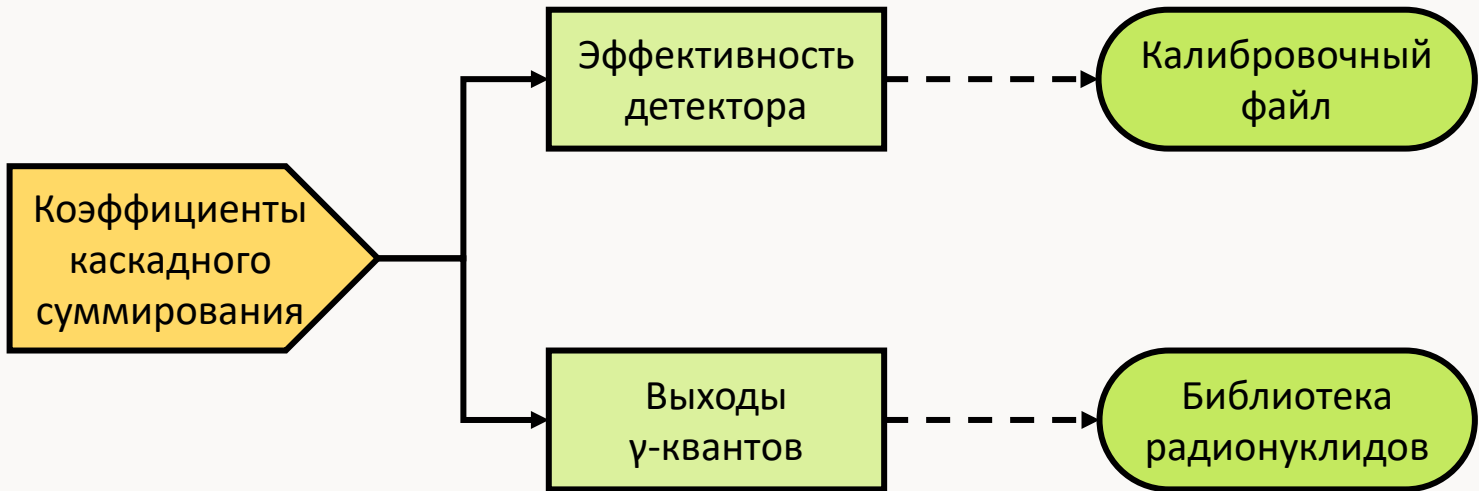
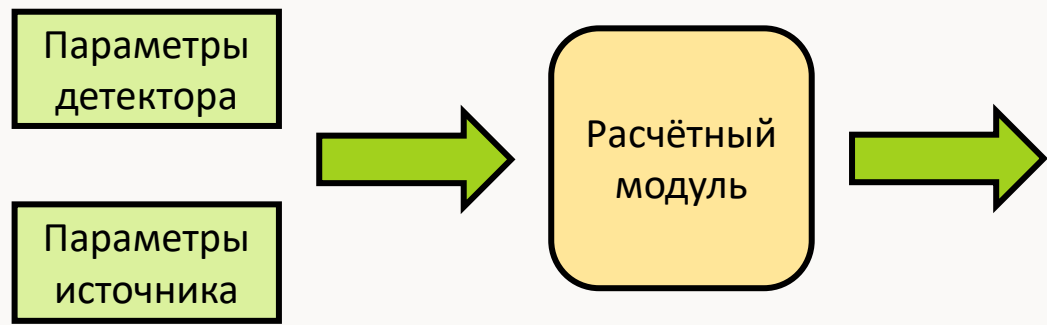


# Эффект каскадного суммирования

Эффект каскадного суммирования возникает при одновременной регистрации нескольких гамма-квантов, испущенных в одном акте распада ядра. В гамма-спектре данный эффект проявляется в изменении площадей пиков полного поглощения и появлении суммарных пиков. Величина эффекта не зависит от активности образца и обусловлена схемой распада радионуклида, геометриями источника и детектора гамма-квантов и их взаимным расположением.



# Автоматизация корректировки данных

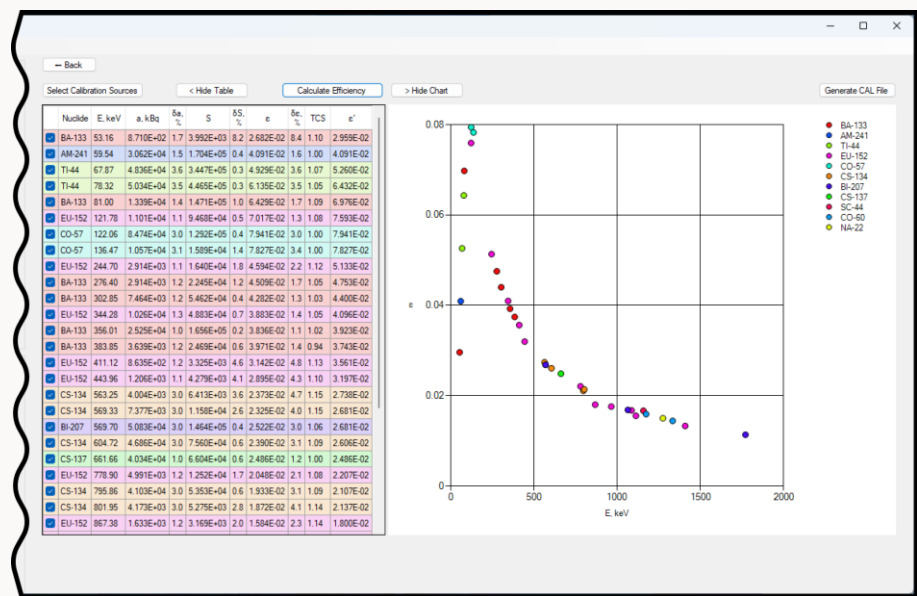
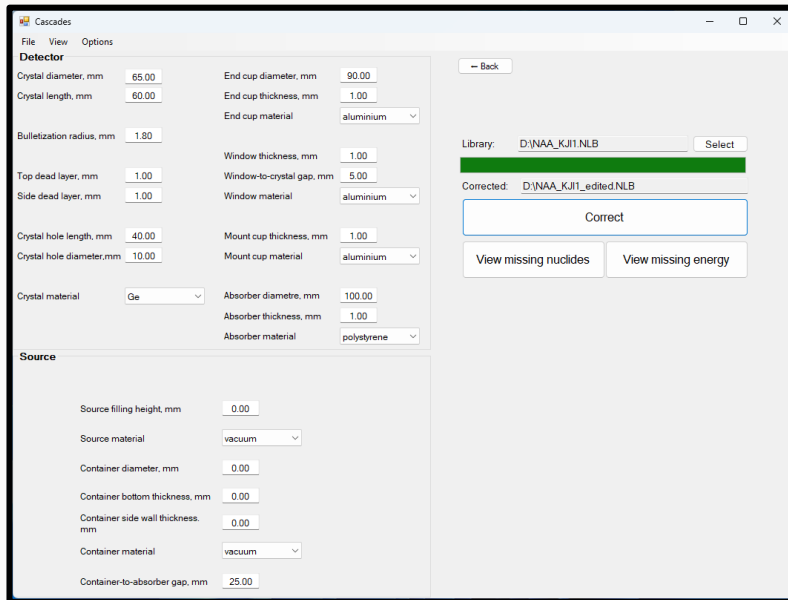
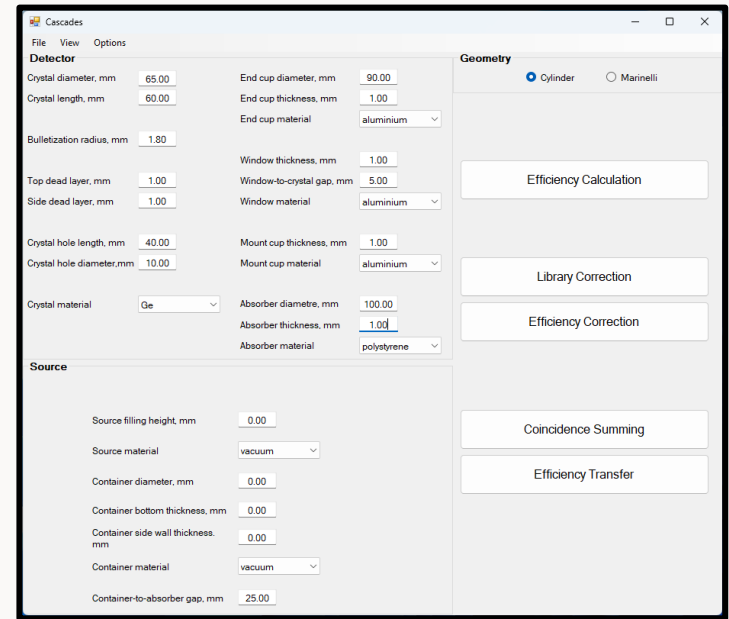


# Реализация автоматической корректировки данных

Для вычисления поправочных коэффициентов на эффект каскадного суммирования разработана специализированная программа.

Рассчитанные поправочные коэффициенты программа применяет для автоматической корректировки интенсивностей гамма-линий в библиотеке радионуклидов.

Программа автоматизирует процедуру построения калибровочной кривой эффективности детектора с учётом каскадных поправок.



# Идентификация радионуклидов

Стандартные алгоритмы идентификации радионуклидов в гамма-спектрах основаны на сопоставлении центроид пиков полного поглощения с энергиями гамма-линий из библиотеки радионуклидов.

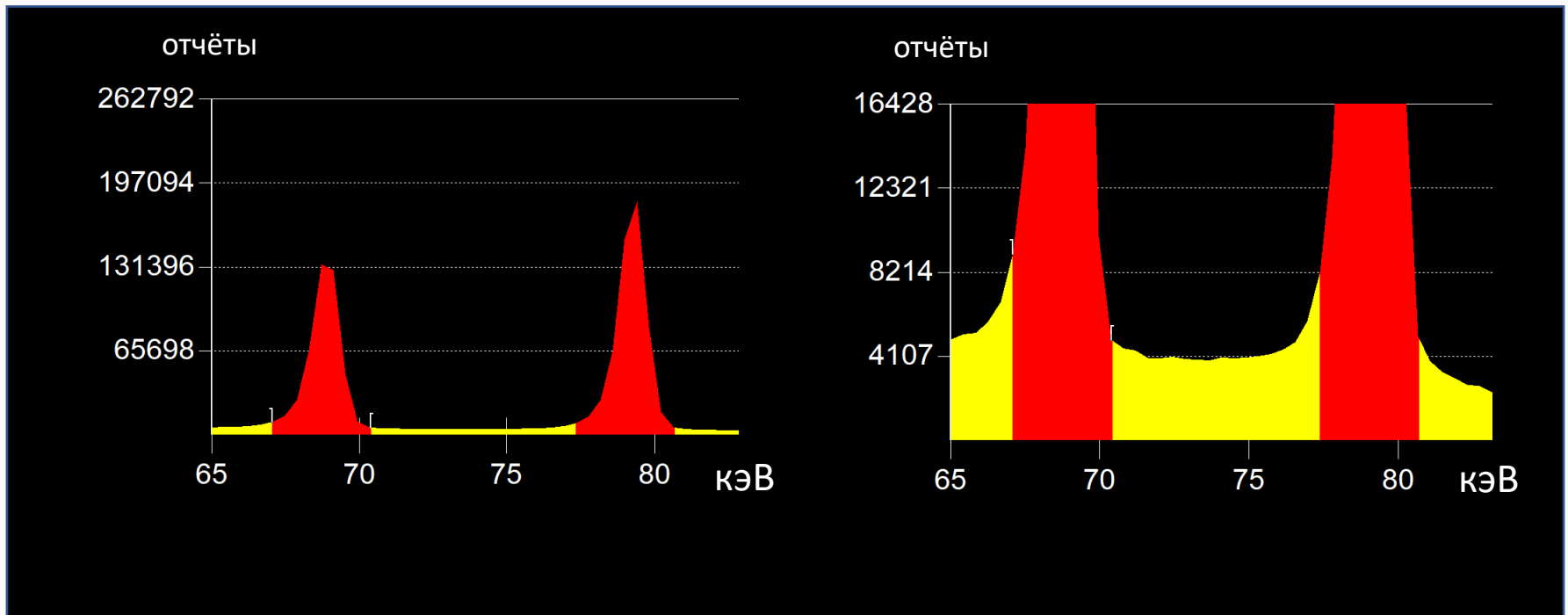
**Основная сложность – наличие интерферирующих гамма-линий**

Sn-117		Au-199	
Энергия, кэВ	Выход, %	Энергия, кэВ	Выход, %
158,56	86,40	158,38	40,00
156,02	2,11	208,38	8,72

Sm-153		Gd-153	
Энергия, кэВ	Выход, %	Энергия, кэВ	Выход, %
103,18	29,19	103,18	21,10
97,43	0,77	97,43	29,00
69,67	4,69	69,67	2,42

# Расчёт активности радионуклидов

Недостаточная статистика пиков полного поглощения, корректность обработки пиков полного поглощения, способ аппроксимации фона приводят к смещённым значениям величины удельной активности радионуклидов.



# Ручная проверка результатов

Проверка результатов идентификации радионуклидов в  $\gamma$ -спекре осуществляются путем сравнения данных из нескольких таблиц, что приводит к временным затратам и увеличению вероятности пропуска ошибок.

\*\*\*\*\* ОТЧЁТ О ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ \*\*\*\*\*

Детектор : D1  
 Имя образца : 1  
 Дата/время анализа пиков: 27.11.2025 11:55:42  
 Первый канал при анализе: 1  
 Последний канал при анализе: 4096  
 Библиотека:  
 Допуск при идентификации: 1.000 keV

№ пика	Начало	Конец	Центроида, каналы	Энергия, кэВ	Чистая площадь	Погрешность	Подложка	Нуклид
1	219-	229	222.93	92.18	4.298E+03	130.83	1.893E+04	BA-131 CD-107
2	243-	256	249.52	103.18	2.907E+03	127.26	2.492E+04	SM-153 BA-131
3	295-	305	299.22	123.75	1.940E+03	110.42	1.801E+04	ER-171 BR-131
4	329-	345	331.94	137.29	7.098E+02	99.04	1.091E+04	BR-82 RE-186 YB-175 CO-57
5	329-	345	339.63	140.47	1.402E+04	163.93	1.227E+04	MO-99
6	434-	446	438.01	181.18	8.932E+02	121.16	2.360E+04	MO-99
7	516-	527	522.24	216.04	1.180E+03	111.89	1.909E+04	BA-131 RU-97 GE-77
8	541-	555	548.26	221.43	1.036E+04	125.37	1.919E+04	BR-82

\*\*\*\*\* ОТЧЁТ ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ НУКЛИДОВ \*\*\*\*\*

Имя образца : 1  
 Библиотека : C:\GENIE2\KAMFILES\STDLIB.NLB

..... ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫЕ НУКЛИДЫ .....

Нуклид	Достоверность идентификации	Энергия, кэВ	Выход, %	Активность, Bq /g	Погрешность
NA-24	0.847	1368.63*	99.99	1.928502E+05	2.355109E+03
K-42	0.827	312.60*	0.34	4.611650E+06	4.753782E+05
AS-76	0.959	559.10*	45.00	1.644694E+05	7.556053E+03
		563.23*	1.20	2.673332E+05	2.450650E+04
		571.50	0.14		
		575.30	0.07		
		657.05*	6.20	1.542915E+05	1.068646E+04
		665.34	0.36		
		740.10*	0.12	1.165875E+06	1.570579E+05
		771.74	0.12		
		867.64	0.13		
		1129.87	0.13		
		1212.92*	1.44	1.327246E+05	1.571734E+04
		1216.08*	3.42	1.471012E+05	1.222406E+04
		1228.52*	1.21	1.442244E+05	1.983898E+04
		1439.10	0.28		
		1787.66	0.29		
		2096.30	0.55		

\*\*\*\*\* ОТЧЁТ О ИДЕНТИФИКАЦИИ НУКЛИДОВ С КОРРЕКЦИЕЙ НА ИНТЕРФЕРЕНЦИЮ \*\*\*\*\*

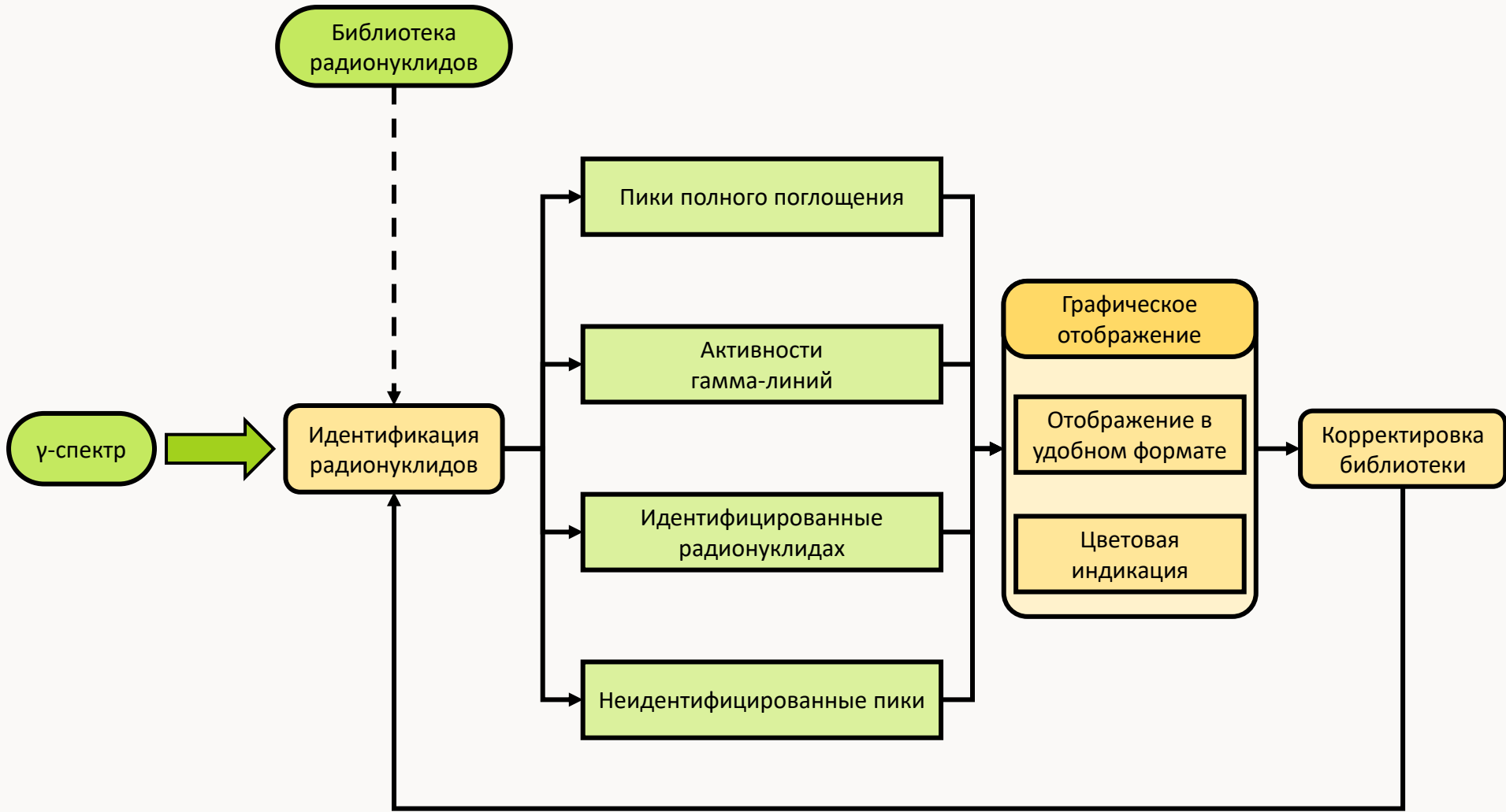
Нуклид	Достоверность идентификации	Средневзвешенная активность, Квq /g	Погрешность
NA-24	@ 0.817	1.2898617E+04	3.1779726E+02
K-42	@ 0.748	3.1435400E+03	2.0671441E+02
SC-46	@ 0.994	1.8581528E+02	3.4663776E+00
SC-47	@ 0.993	1.4460929E+01	7.6522999E-01
SC-48	@ 0.972	1.8649082E+00	2.1124478E-01
CR-51	@ 0.999	4.6901387E+01	7.1008524E+00
MN-54	@ 0.992	2.3370087E+02	4.5561571E+01
CO-57	@ 0.962		
FE-59	@ 0.995	1.4842705E+02	1.1551661E+01
CO-60	@ 0.988	2.3205425E+03	2.3758120E+02
ZN-65	@ 0.994	1.3132402E+02	1.8106843E+01
GA-72	@ 0.484	1.8681193E+02	1.6889474E+01
AS-76	@ 0.937	5.8332640E+02	7.0995673E+00
BR-82	@ 0.965	1.5828436E+03	1.8444589E+01
SR-95	@ 1.000	2.0868863E+01	1.9020581E+00
RB-86	@ 0.999	5.8820782E+02	8.7435478E+01
RU-97	@ 0.978	4.0306595E+00	5.7996139E-01
ZR-97	@ 0.633	2.6606945E+01	3.2168461E+00
MO-99	@ 0.990	7.9939285E-01	1.2465845E-01
RU-103	@ 0.934	3.0694672E+01	4.8616965E+00
CD-107	@ 0.319	5.2602741E+05	2.3380920E+04
SN-117	@ 0.908	1.9673456E+01	1.0387483E+00
SB-122	@ 0.987	3.8402281E+01	1.8602728E+00

\*\*\*\*\* НЕИДЕНТИФИЦИРОВАННЫЕ ПИКИ \*\*\*\*\*

Дата/время поиска пиков: 21.04.2025 15:21:50  
 Первый канал при поиске: 160  
 Последний канал при поиске: 8192

№ пика	Энергия, кэВ	Скорость счёта, имп./сек.	Погрешность	Тип пика	Возможный нуклид
m 6	83.37	1.30075E+00	7.63		
m 9	89.46	9.52293E-01	10.87	ToI.	HF-175
m 20	117.10	8.23094E+00	4.14	ToI.	ER-171
F 40	273.47	3.16151E+00	3.16	Sum	
m 54	374.96	2.08046E-01	40.14	Sum	
m 57	435.29	3.72482E-01	28.02	Sum	
m 60	482.46	5.56063E-01	80.14	Sum	
M 63	511.07	6.48208E+00	1.64	Sum	
F 89	857.66	3.82307E-01	64.62	S-Esc.	
F 96	951.99	7.09931E-01	8.03	Sum	
m104	1081.44	7.14190E-01	16.52	Sum	
F 116	1252.77	7.87396E-01	20.58	Sum	
M120	1331.01	1.37680E+00	4.46	Sum	
F 123	1395.77	5.73084E-01	5.76	Sum	
F 124	1461.15	1.30890E-01	44.88	Sum	
F 128	1604.55	5.44512E-01	16.25	Sum	
F 129	1650.55	7.44378E-01	4.24	Sum	
F 131	1732.30	4.86694E+00	1.23	D-Esc.	
F 132	1820.72	4.70700E-01	6.41	Sum	
F 133	1871.97	8.63358E-01	3.97	Sum	
F 135	2083.18	1.97407E-01	79.49	Sum	
F 136	2094.24	5.53931E-01	11.62	Sum	
F 138	2243.34	8.32091E+00	2.70	S-Esc.	

# Автоматизация проверки результатов



# Автоматизация проверки результатов

The screenshot shows the NukeCheck software interface. At the top, there is a menu bar with 'Файл', 'Информация', 'Неидентифицированные пики', and 'Настройки'. Below the menu, there are input fields for 'Спектр:' (20000100), 'Библиотека:' (NAA\_KJ1), 'Сред. активность, мкКи/г:' (9,772E+02), and 'МДА, мкКи/г:' (4,743E+02). A red box highlights the value '637.50 %' next to the average activity. A checkbox 'Показать ср. активности для всех линий' is also visible.

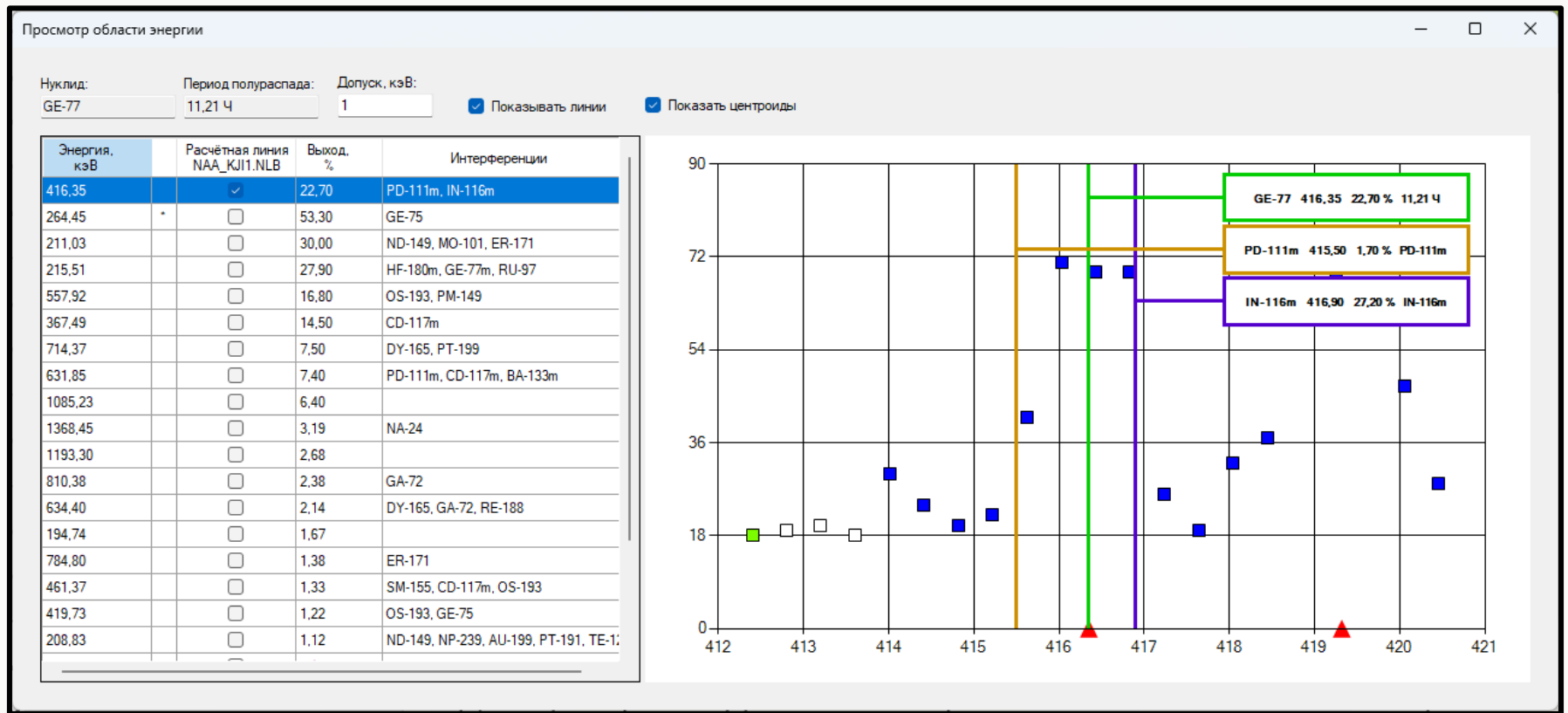
The main data table has the following columns: Нуклид, Период полураспада, Инф, Энергия, кэВ, Расчётная линия, @, Выход, %, Центроида, кэВ, Площадь, Активность, мкКи/г, Погрешность, %, and Разница в активности, %. The table contains 15 rows of data. The 'Разница в активности, %' column is color-coded: red for positive values (+59.37, +97.33, +37.62, +72.69, +44.59, +98.23) and blue for negative values (-98.23). The row for SE-81m is highlighted in yellow.

Нуклид	Период полураспада	Инф	Энергия, кэВ	Расчётная линия	@	Выход, %	Центроида, кэВ	Площадь	Активность, мкКи/г	Погрешность, %	Разница в активности, %
<input type="checkbox"/> NA-24	15,00 Ч		416,35	<input checked="" type="checkbox"/>	@	22,70	416,35	194,24	2,405E+03	10,25	+59,37
<input type="checkbox"/> MG-27	9,46 М	Mg	264,45	<input type="checkbox"/>	@	53,30	264,62	9658,20	3,660E+04	1,58	+97,33
<input type="checkbox"/> AL-28	2,25 М	Al	211,03	<input type="checkbox"/>	@	30,00	211,04	269,60	1,567E+03	10,74	+37,62
<input type="checkbox"/> CL-38	37,24 М	Cl	215,51	<input type="checkbox"/>	@	27,90	215,45	565,56	3,579E+03	6,78	+72,69
<input type="checkbox"/> CA-49	8,72 М	Ca	557,92	<input type="checkbox"/>	@	16,80	558,13	84,51	1,764E+03	17,23	+44,59
<input type="checkbox"/> MN-56	2,58 Ч	Mn	367,49	<input type="checkbox"/>	@	14,50					
<input type="checkbox"/> GE-75	1,38 Ч		714,37	<input type="checkbox"/>	@	7,50					
<input type="checkbox"/> GE-75m	47,70 C	GE-75	631,85	<input type="checkbox"/>	@	7,40					
<input checked="" type="checkbox"/> GE-77	11,21 Ч		1085,23	<input type="checkbox"/>	@	6,40					
<input type="checkbox"/> SE-79m	3,92 М	SE-83	1368,45	<input type="checkbox"/>	@	3,19	1368,90	255,27	5,533E+04	7,65	+98,23
<input type="checkbox"/> SE-81	18,45 М	SE-83	1193,30	<input type="checkbox"/>	@	2,68					
<input checked="" type="checkbox"/> SE-81m	57,28 М	SE-83	810,38	<input type="checkbox"/>	@	2,38					
<input type="checkbox"/> SE-83	22,50 М		634,40	<input type="checkbox"/>	@	2,14					
<input type="checkbox"/> RU-97	2,88 Д		194,74	<input type="checkbox"/>	@	1,67					

At the bottom left, there is a 'Пересчитать' button. On the right side, there is a smaller table with columns: Нуклид, Период полураспада, Энергия, and Выход, %. It contains three rows of data: IN-116m, PD-111m, and a greyed-out row.

В едином графическом интерфейсе программа объединяет функции проверки результатов идентификации, редактирования библиотеки радионуклидов и запуска повторной идентификации. Вся необходимая информация для проверки результатов сгруппирована для каждого идентифицированного радионуклида и доступна в одном окне. Для быстрого выявления потенциально ошибочных результатов в программе реализована цветовая индикация.

# Проверка обработки пиков



Для проверки корректности обработки пиков полного поглощения предусмотрена возможность визуального просмотра участков  $\gamma$ -спектра, соответствующих гамма-линиям выбранного радионуклида.

# Заключение

1. Разработан аппаратно-программный комплекс для автоматизации гамма-спектрометрических измерений в рамках инструментального нейтронно-активационного анализа на установке Регата реактора ИБР-2.
2. Внедрение роботизированных манипуляторов обеспечило высокую точность позиционирования образцов над детекторами ( $\pm 0,02$  мм) и возможность гибкой настройки параметров набора гамма-спектра для каждого образца.
3. Автоматизация учёта эффекта каскадного суммирования и процедуры проверки результатов идентификации радионуклидов в гамма-спектрах повысили точность определения качественного и количественного состава образцов.

# Список достижений за текущий семестр

## Статьи:

**Galustov, V.A.**, Grozdov, D.S. Software for Dataset Creation of Full Energy Peak Boundaries in  $\gamma$  Spectra. Phys. Part. Nuclei Lett. 23, 43–48 (2026).  
<https://doi.org/10.1134/S1547477125701924>

## Результаты интеллектуальной деятельности:

**Галустов В.А.**, Чалигава О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026660679 «Программа верификации обработанных гамма-спектров и корректировки библиотек радионуклидов». Дата регистрации: 14.04.2026

## Конференции:

**Galustov, D.** Grozdov. «Application of true coincidence summing coefficients in gamma-ray spectrometry for correcting radionuclide activity values and for constructing detector efficiency calibration curve». 32nd International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics (ISINN-32). Dubna, Russia. 24-30.05.2026

Спасибо за внимание