

**SpectraLineHandy – универсальный
гамма-спектрометрический
программный комплекс для контроля
ядерных и радиоактивных материалов
с использованием HPGe, CZT, LaBr(Cl)
– детекторов.**

**Даниленко В.Н., Ковальский Е.А.,
Кузнецов В.П., Скубо Ю.В., Соловьева С.Л.,
Федоровский С.Ю., Юферов А.Ю.**



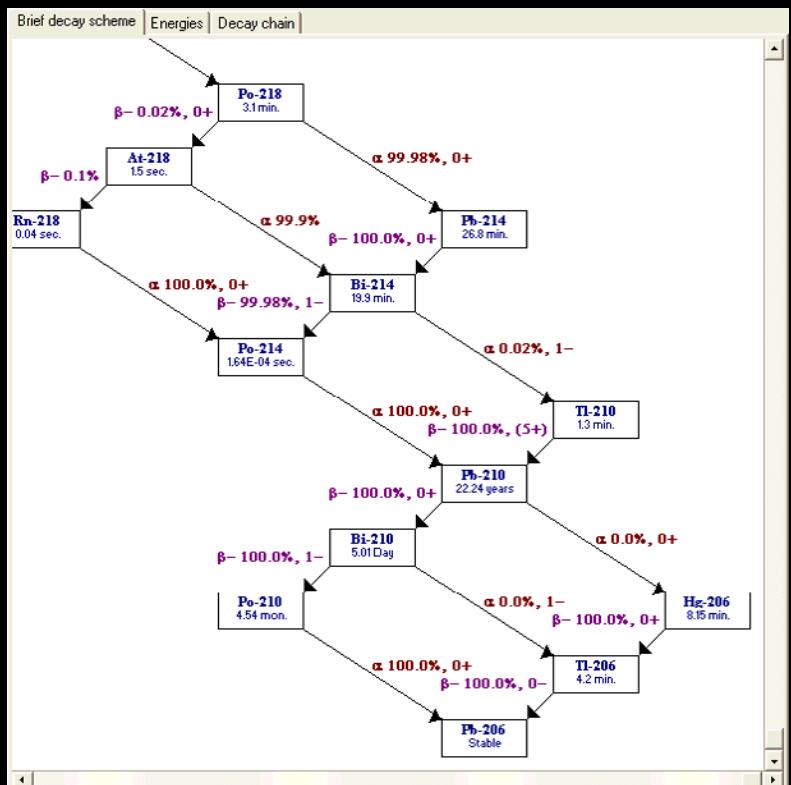
**LABORATORY
of spectrometry
and radiometry**

<http://www.lsrm.ru>
mail: lsrm@lsrm.ru
Phone: +7 495 660-16-14

- Основным направлением деятельности компании "ЛСРМ" является разработка программного, методического и метрологического обеспечения измерений ионизирующих излучений:
- Программные комплексы для полупроводниковых и сцинтиляционных спектрометров α -, β - и γ -излучения:
 - сертификационные измерения
 - обнаружение и идентификация делящихся и радиоактивных материалов
 - радиационный мониторинг
- Оригинальные методики выполнения измерений
- Базы данных по параметрам радиоактивного распада
- Оригинальные алгоритмы и методы расчёта характеристик ионизирующих излучений

Nuclide Master-база данных по параметрам радиоактивного распада

Просмотр цепочек распада



Динамика
распада нуклидов
по цепочке

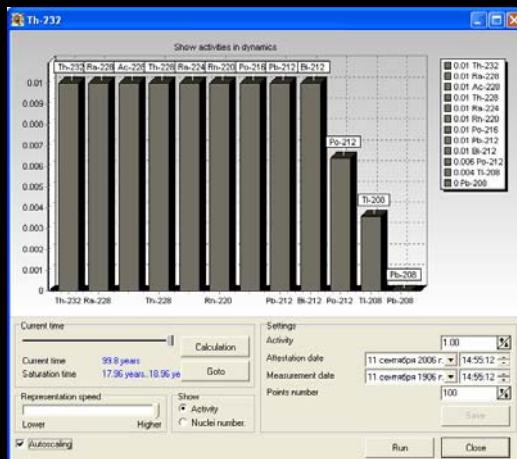
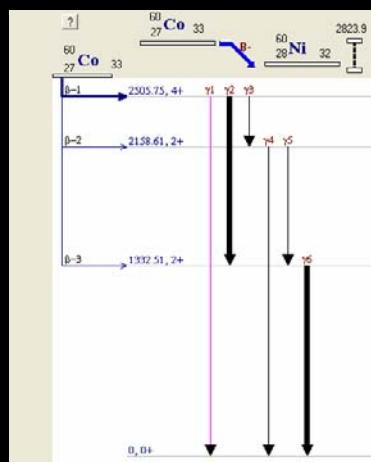
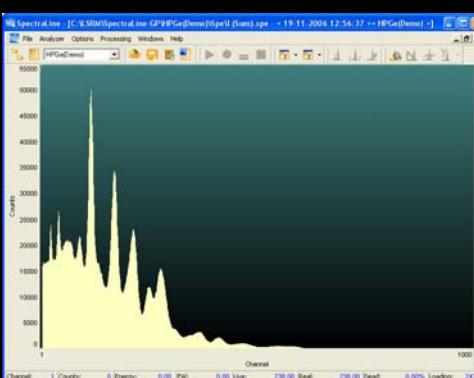


Схема
переходов



Генерация гамма-спектров
заданного
радионуклидного
состава



GammaLab – интегрированная среда ядерно-физических данных, расчетных модулей и программ обработки спектра для моделирования гамма-спектрометрического эксперимента

Комплекс позволяет моделировать процесс измерения на полупроводниковых и сцинтилляционных гамма-спектрометрах.

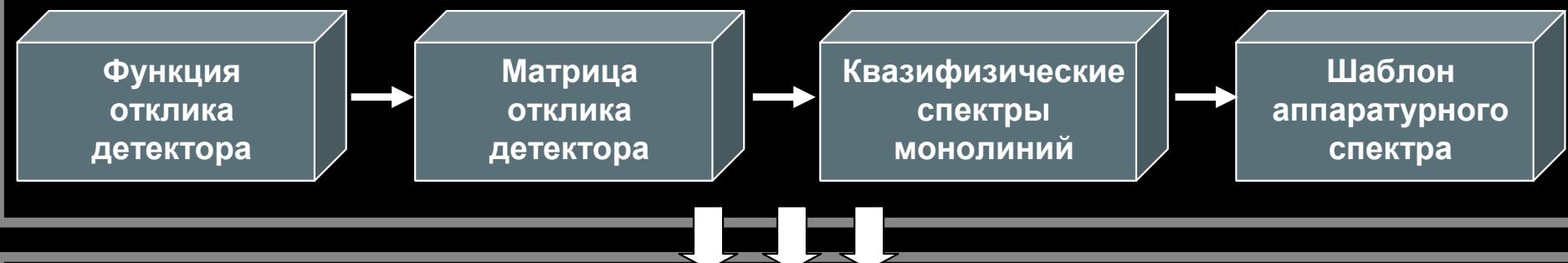
Расчет базируется на методе **Монте-Карло** с привлечением оцененных данных по структуре атомных ядер **ENSDF** и данных по сечениям взаимодействия. При этом учитываются:

- радионуклидный состав и активность источника
- наличие защитного контейнера
- взаимное расположение детектора и источника
- окружающий радиационный фон
- аппаратурные эффекты: уширение, сдвиг линий и просчеты в зависимости от загрузки и т.д.

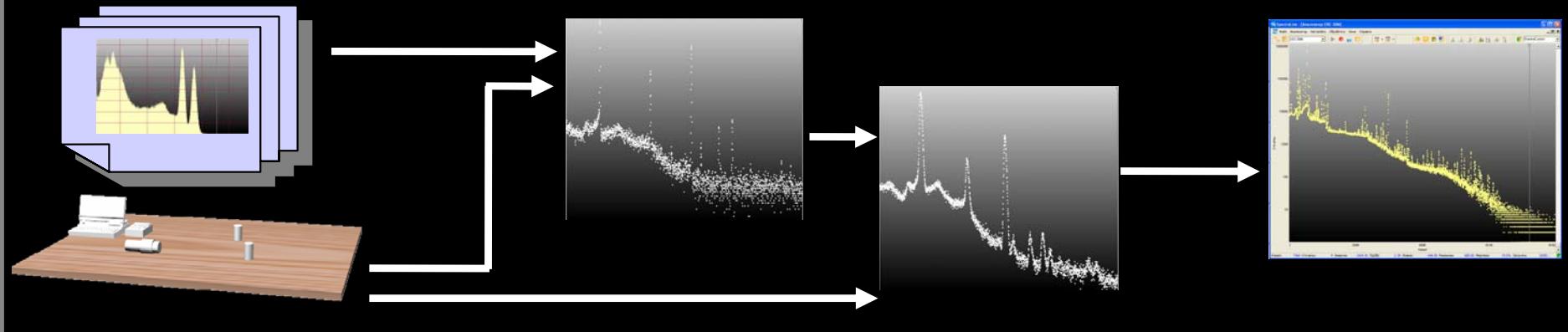
Моделирование источников излучения и аппаратуры



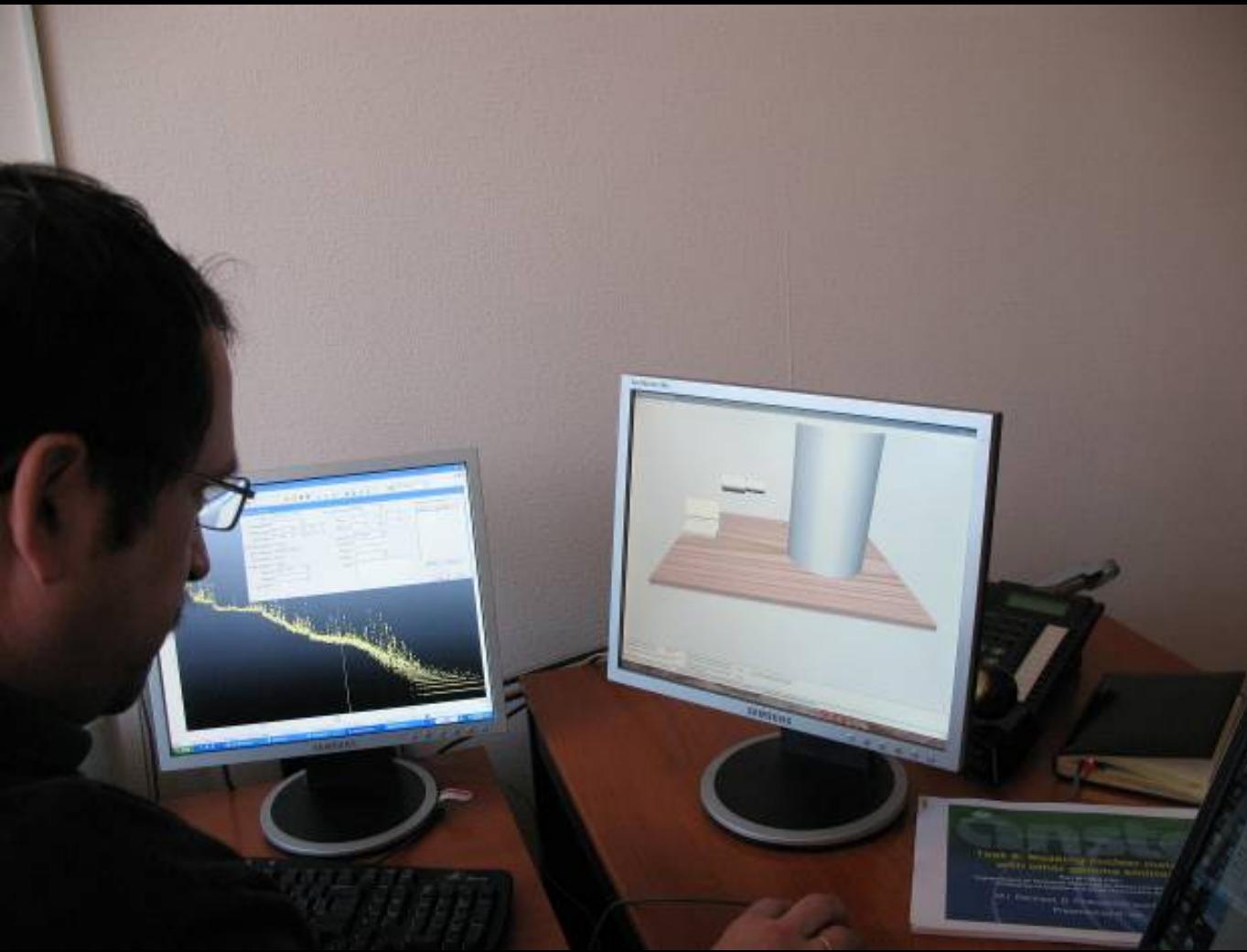
Получение шаблонов аппаратурных спектров для источников с произвольным радионуклидным составом



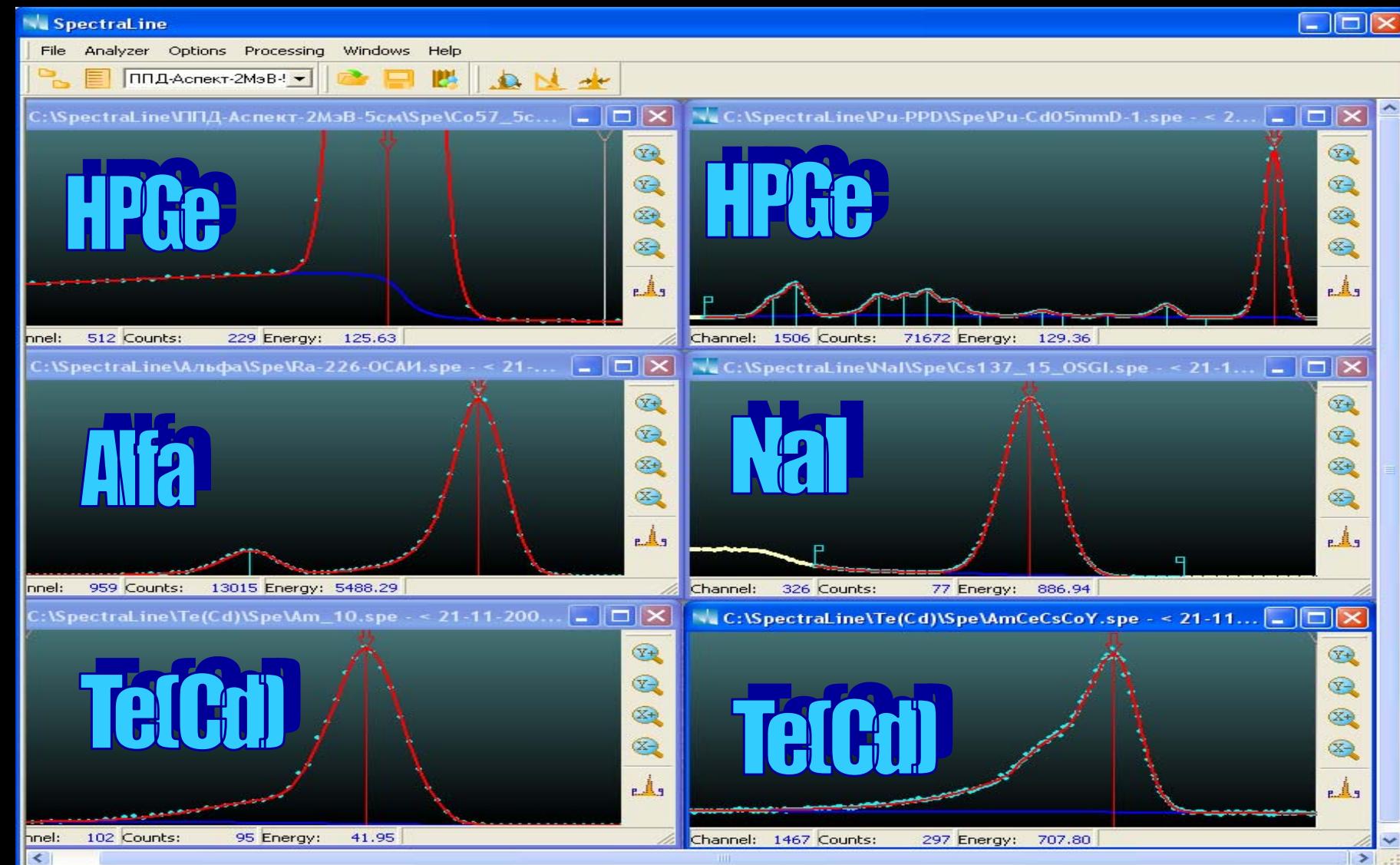
Эмуляция и отображение спектров в реальном времени, подключение внешних программ обработки



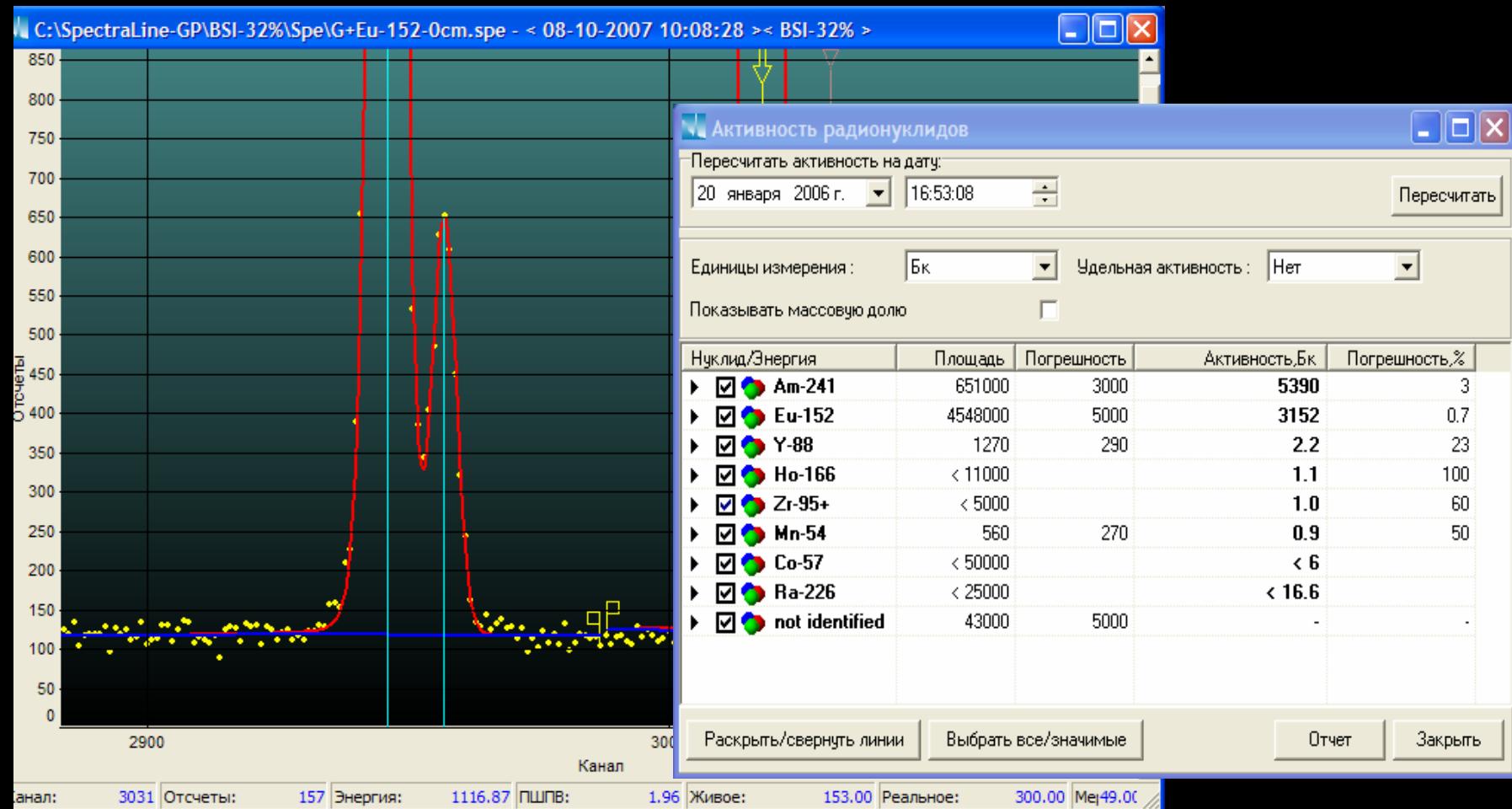
«Trainer»- обучающий комплекс для выработки практических навыков при таможенном контроле делящихся и радиоактивных материалов.



SpectraLine -семейство программ по обработке линейчатых спектров

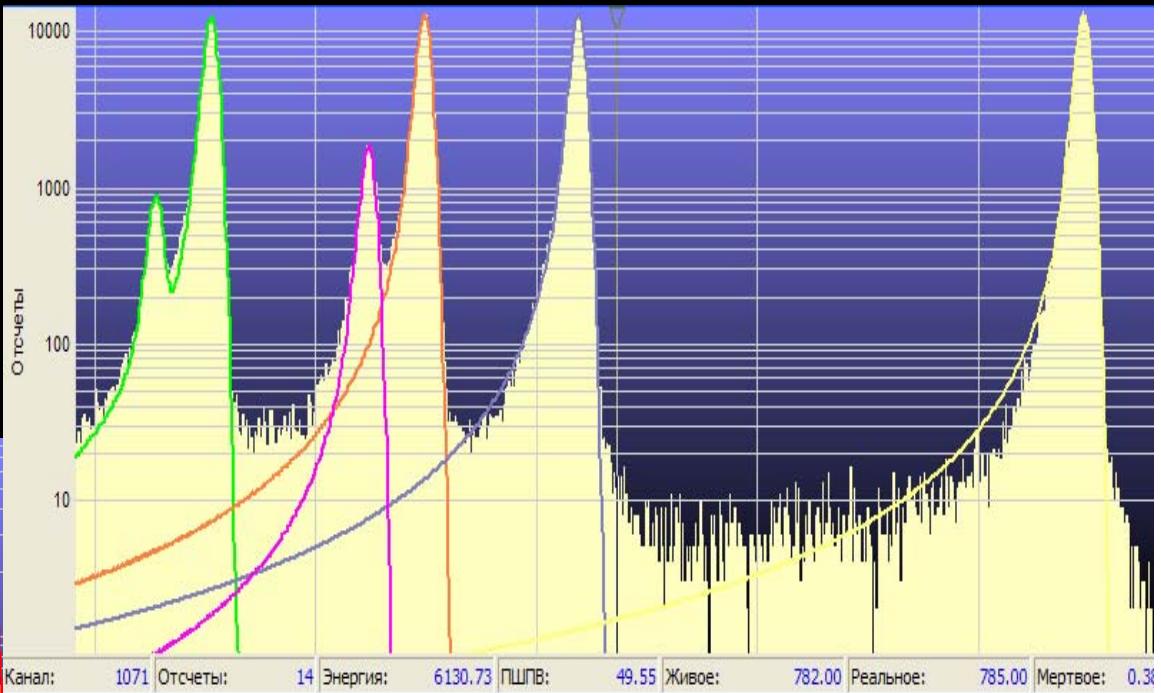
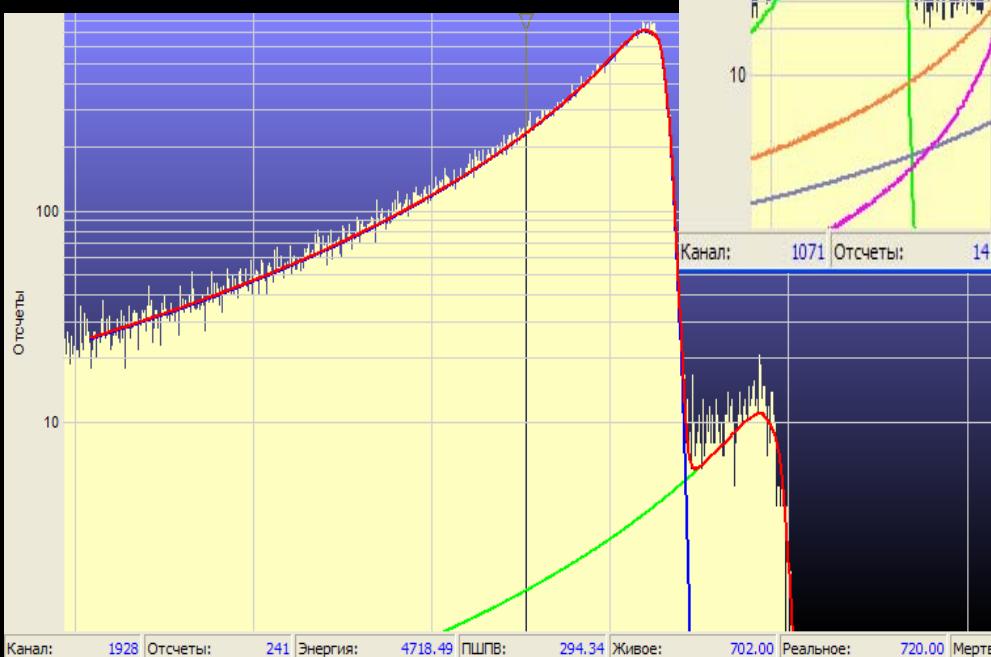


SpectraLineGP - Прецизионная обработка гамма-спектров ОЧГ-детекторов. Идентификация и расчет активности

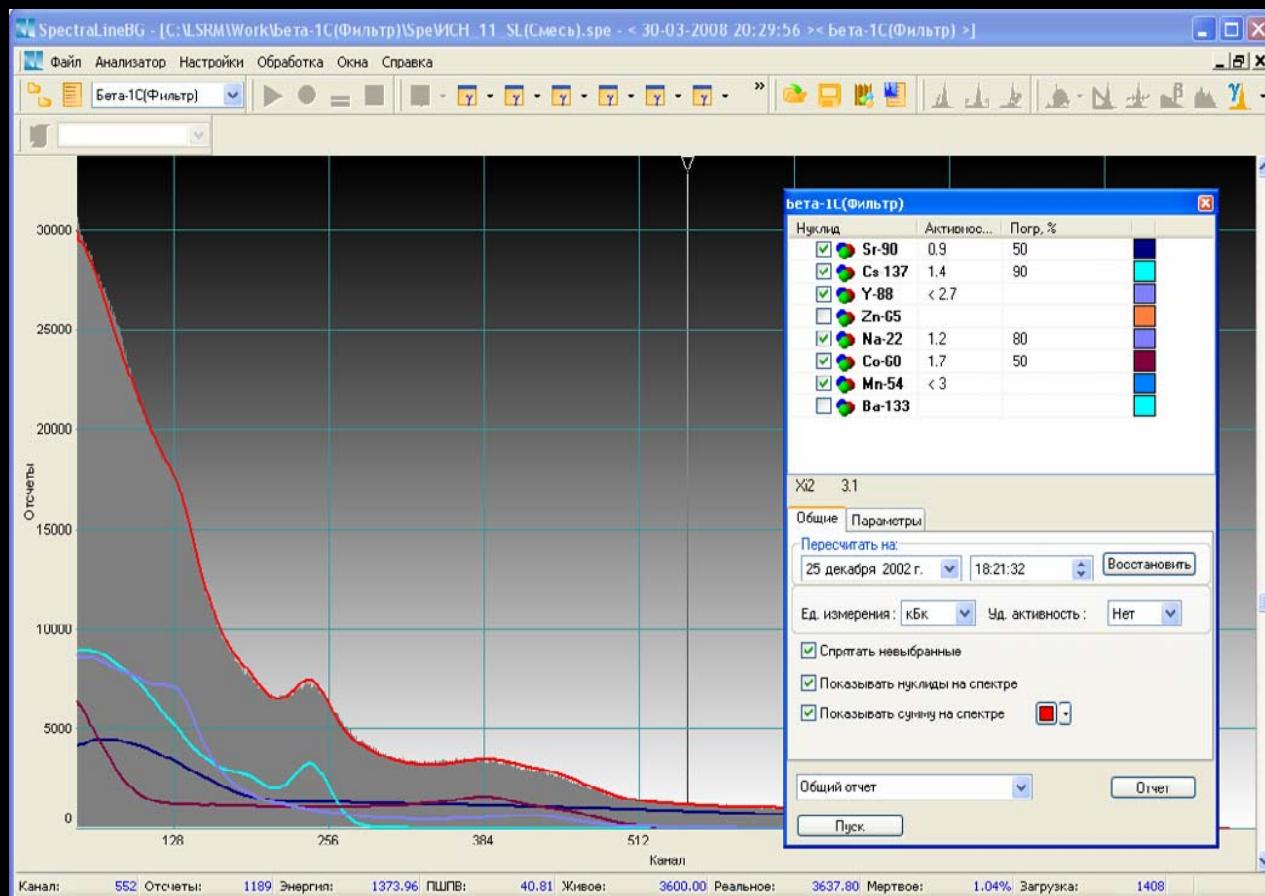


SpectraLineADA-обработка альфа-спектров.

Функция, описывающая форму линии, позволяет работать как с «тонкими», так и с «толстыми» источниками и альфа-излучения



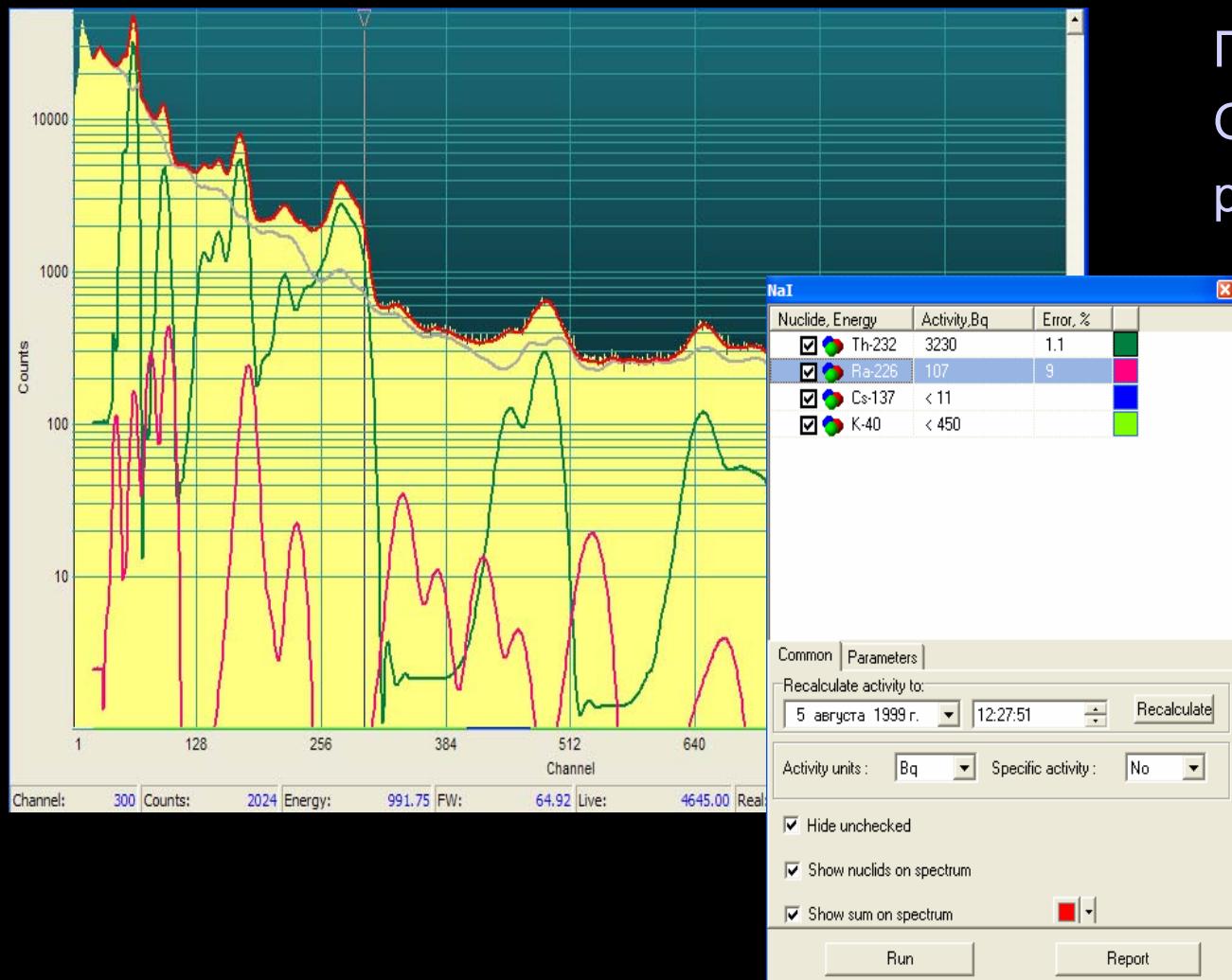
SpectraLineBG - бета- и сцинтиляционная гамма-спектрометрия



Бета-спектрометрия

Расчет активности
методом
эталонных
спектров

SpectraLineBG - бета- и гамма-сцинтиляционная спектрометрия



Гамма-спектрометрия
Оригинальный метод
расчета активности-

метод
квази-эталонных
спектров

SpectraLineHandy

Спектрометрический анализ с использованием

HPGe, NaI, LaBr (Cl), CdTe - спектрометров гамма-излучения.

- Идентификация и расчет активности источников в контейнерах
- Определение степени обогащения урана
- Изотопный анализ плутониевых образцов

14900 - Development and Test of Field Useable Software for the Analysis of Gamma Spectra of Seized Sources

Field and remote use expert system for reachback support to law enforcement officers performing radiation monitoring at borders or in a country

Что мы вкладываем в понятие универсальности?

- Работа с различными типами детекторов, как низкого, так и высокого разрешения, и анализаторами различных производителей
- Решение большого числа задач, использующих спектрометрические методы анализа
- Возможность адаптации комплекса для реализации новых МВИ

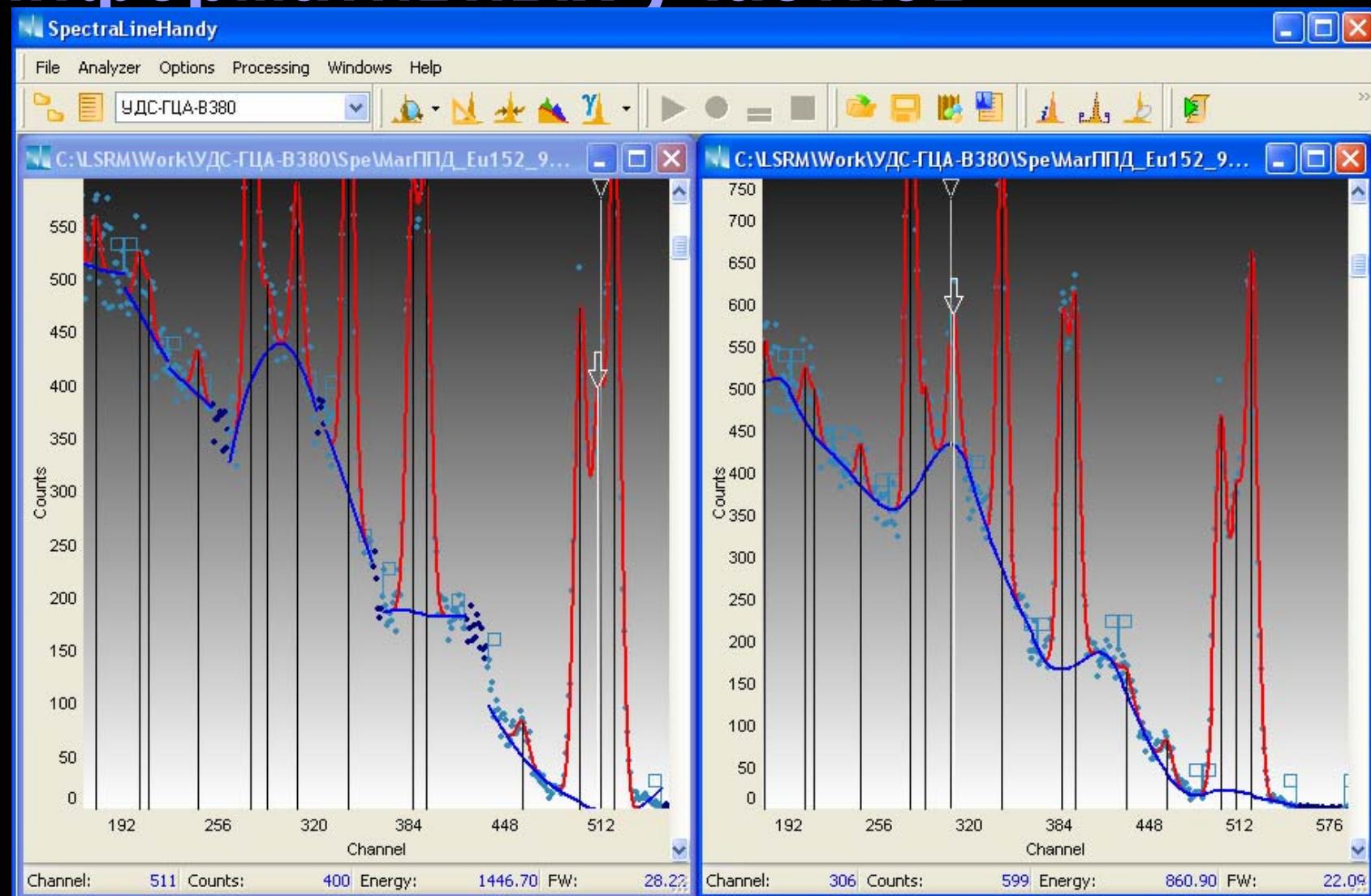
Чем обеспечивается?

- Большим набором алгоритмов обработки спектров
- Архитектурой ПО и гибким интерфейсом
- Использованием современных обновляемых ядерно-физических данных

Алгоритмы

- Калибровочные процедуры, которые включают калибровки по
 - энергии
 - разрешению
 - форме линии (в том числе рентгеновской и аннигиляционной)
 - эффективности регистрации (с учетом разрыва на краю поглощения)
- Различные процедуры подгонки. Наиболее мощная процедура подгонки осуществляется по всем линиям спектра одновременно с использованием соотношений интенсивностей линий одного радионуклида и их неопределенностей, которые включают
 - Неопределенность площадей пиков
 - Неопределенность эффективности регистрации
 - Неопределенность табличных выходов линий
 - Неопределенность поглощения в материале источника
- При подгонке информативных участков учитывается вклад пиков из соседних участков и непрерывность фоновой подложки на границах участков, если они соприкасаются. Такой подход позволяет описать фоновую подложку полиномом невысокой степени.
- Различные процедуры идентификации и расчета активности

Алгоритмы- «сшивка» информационных участков



Архитектура ПО и интерфейс

- Модульный принцип – динамически встраиваемые DLL –модули
 - Сопряжение с аппаратурой
 - Методы расчета активности
 - Реализация МВИ
 - Подключение баз данных
- Конфигурации параметров
- Сценарии обработки
 - Команды калибровки
 - Загрузка зон интереса
 - Расчеты параметров – поиск, подгонка, активность...
 - Анализ условий

Ядерно-физические данные

- Данные по параметрам радиоактивного распада на основе **ENSDF**-файла
- Сечения взаимодействия гамма-излучения с веществом на основе **XCOM**.

Адаптация SpectraLineHandy для задач определения изотопного состава урана и плутония

- Калибровка по энергии и разрешению
- Калибровка по форме линии – учет отличия в форме рентгеновских линий
- Калибровка по относительной эффективности регистрации (по измеряемому образцу)
- Аппроксимация информативных участков спектра
- Расчет относительных активностей изотопов и массовых долей

Верификация кода

International Workshop on Gamma Evaluation Codes for Plutonium and Uranium Isotope Abundance Measurements by High-Resolution Gamma Spectrometry: Current Status and Future Challenges

*Institute for Transuranium Elements, Karlsruhe
November 14 – 16, 2005*

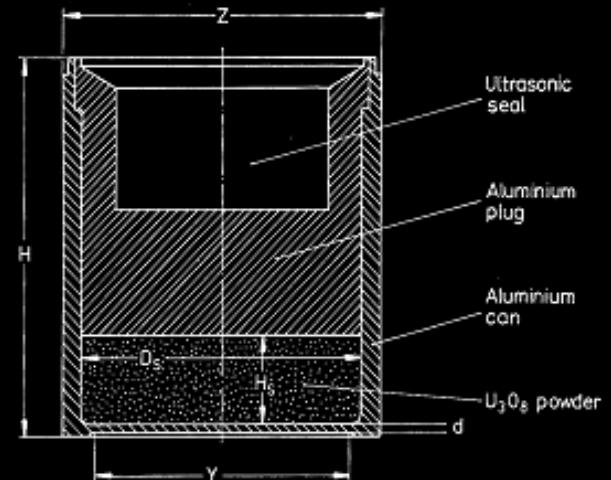
STUDY OF THE MGAU APPLICABILITY TO
ACCURATE ISOTOPIC CHARACTERIZATION OF
URANIUM SAMPLES

Andrey Berlizov and Volodymyr Tryshyn

Institute for Nuclear Research
National Academy of Sciences of Ukraine

Standard Reference Material SRM 969

Material: U_3O_8 powder, $m = 200 \text{ g}$, $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$;
 Externals: $Z = 80 \text{ mm}$, $H = 90 \text{ mm}$;
 Sample volume: $D_s = 70 \text{ mm}$, $H_s = 20.8 \text{ mm}$;
 Al window thickness: $d = 2 \text{ mm}$.



Isotope	Reference sample, mass %				
	031	071	194	295	446
²³⁴ U	0.0020(2)	0.0052(2)	0.0171(2)	0.0279(4)	0.0359(3)
²³⁵ U	0.3166(2)	0.7119(5)	1.9420(14)	2.9492(21)	4.4623(32)
²³⁶ U	0.0146(3)	<0.00002	0.0003(1)	0.0033(2)	0.0068(2)
²³⁸ U	99.6668(4)	99.2828(4)	98.0406(18)	97.0196(29)	95.4950(32)



Certified Reference Material CRM 146

Material: U_3O_8 powder, $m = 230 \text{ g}$, $\rho = 3.78 \text{ g/cm}^3$;

Externals: $Z = 80 \text{ mm}$, $H = 90 \text{ mm}$;

Sample volume: $D_s = 70 \text{ mm}$, $H_s = 15.8 \text{ mm}$;

Al window thickness: $d = 2 \text{ mm}$.

Isotope	Reference sample, mass %		
	20	52	93
²³⁴ U	0.1486(2)	0.3718(5)	0.9800(15)
²³⁵ U	20.107(10)	52.488(21)	93.1703(3)
²³⁶ U	0.1973(6)	0.2645(3)	0.2937(12)
²³⁸ U	79.547(10)	46.876(21)	5.5559(26)



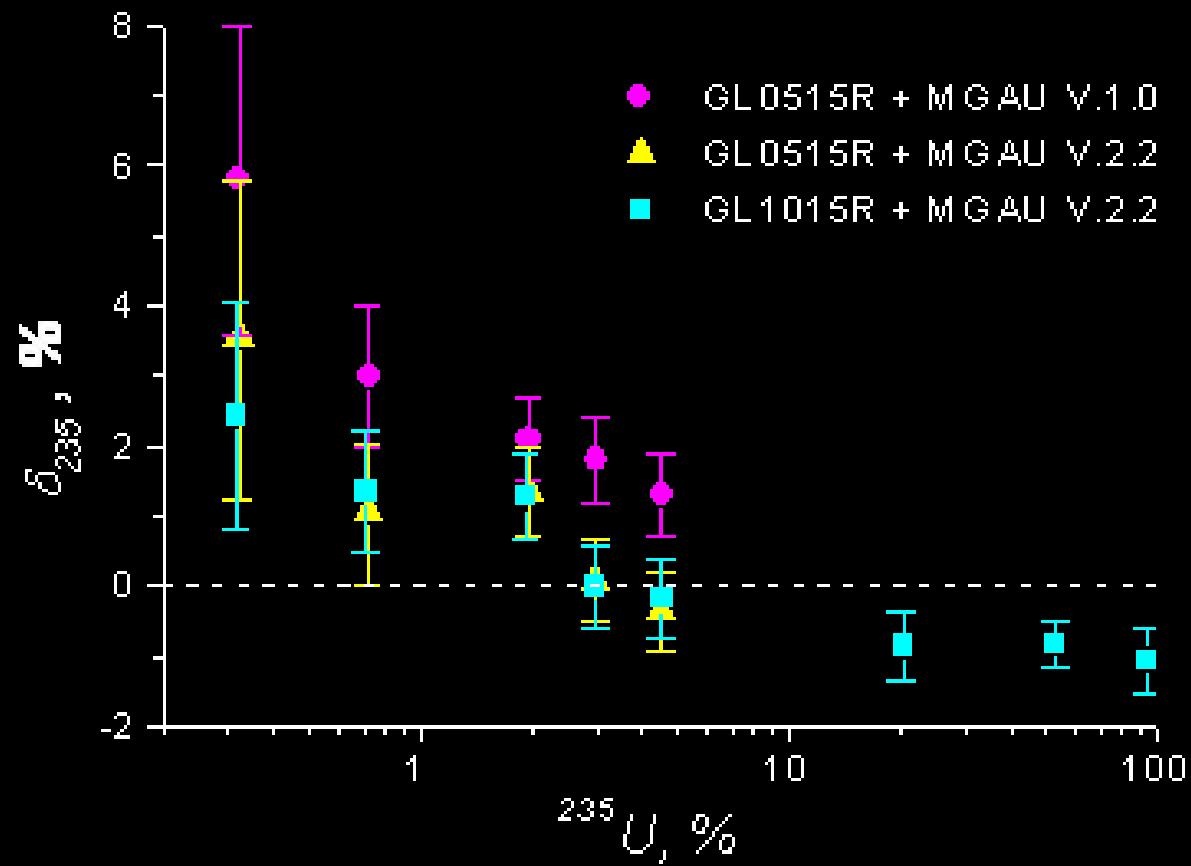
Аппаратура

- Detector - LEGe GL0515R, S=500 mm² d=15 mm, input window – 0.5 mm Al.
- InSpector Portable Spectroscopy Workstation, Model 1200UPU.
- MGAU V.1.0 V2.2 uranium isotopic software.

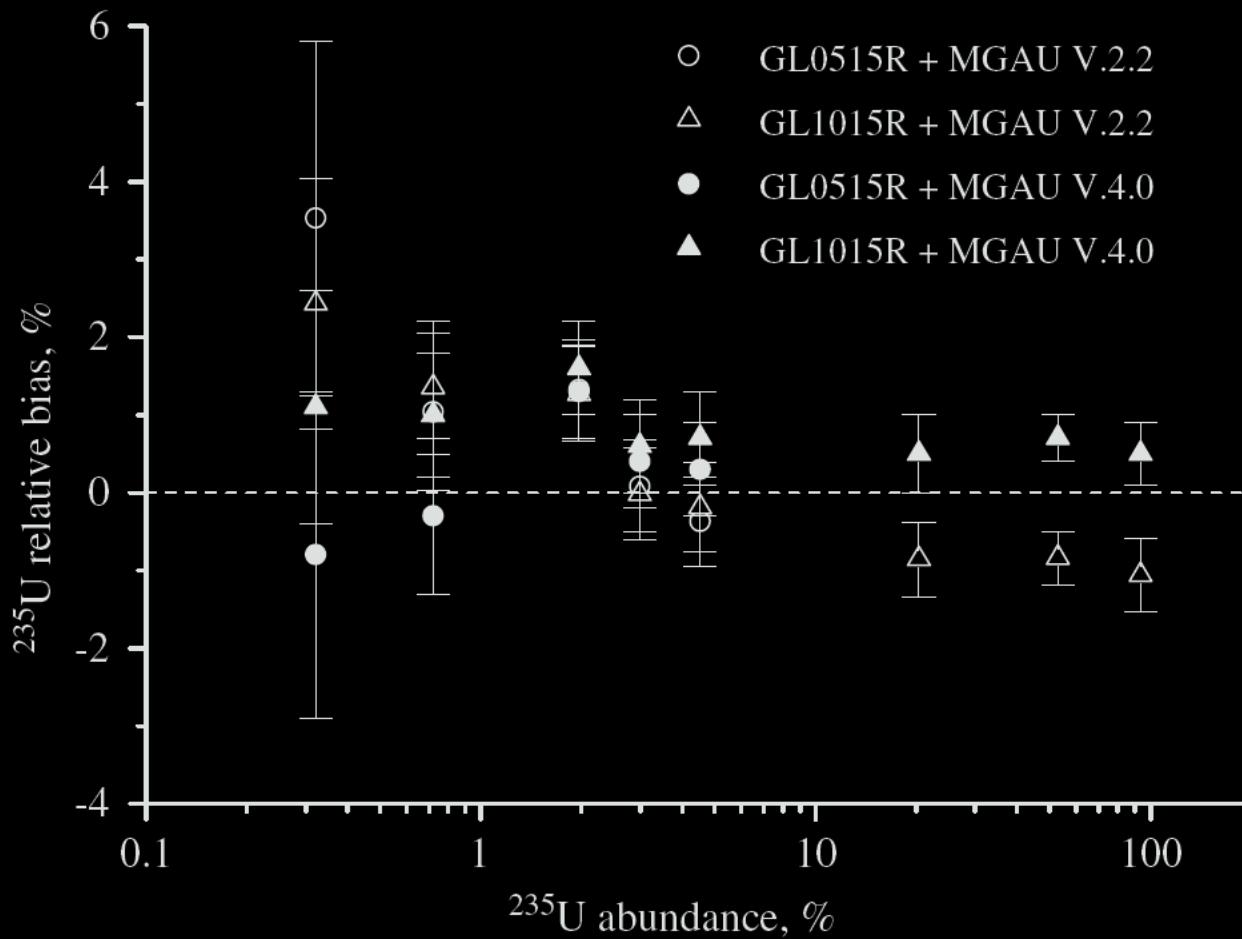


Certified Reference Material

CRM 146 & SRM 969

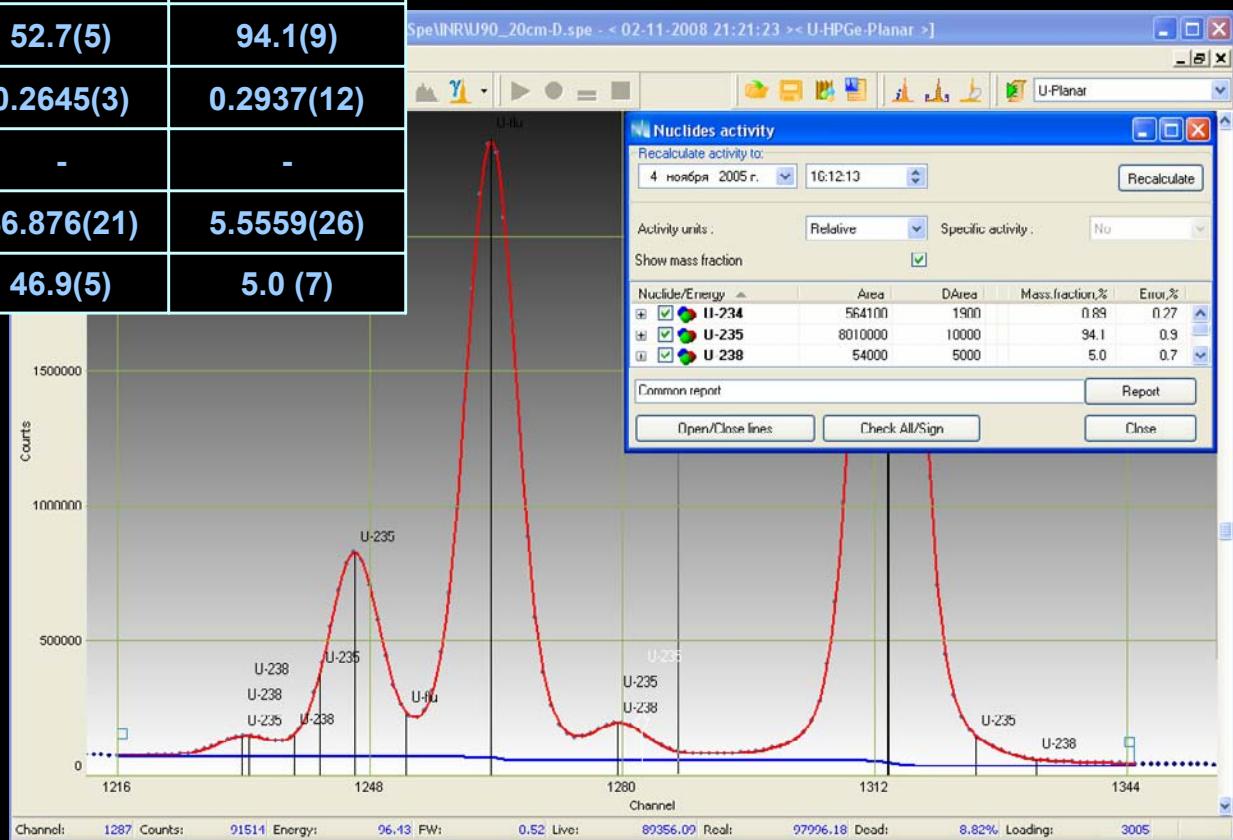


Certified Reference Material CRM 146 & SRM 969



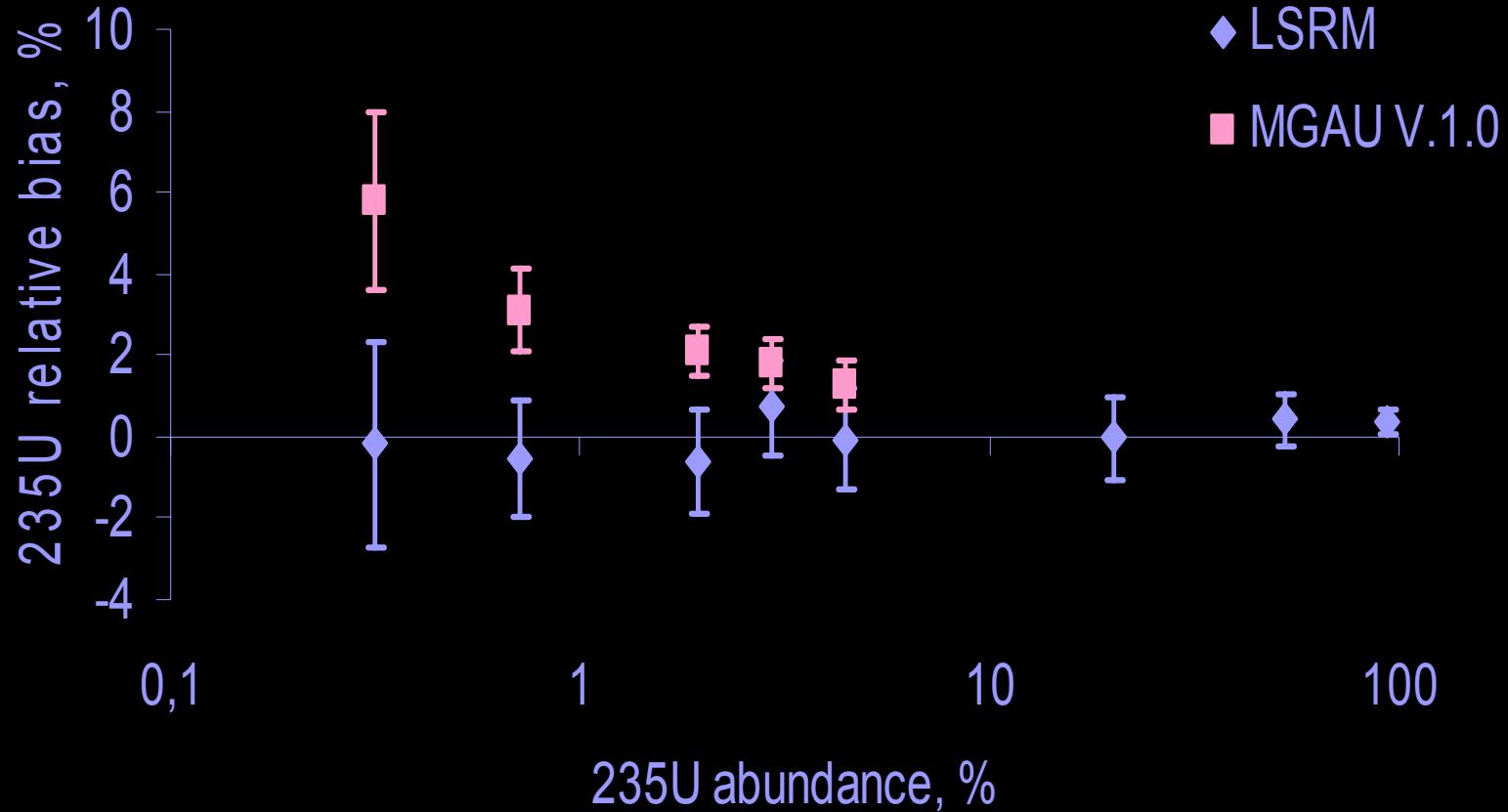
Certified Reference Material CRM 146

Isotope		Reference sample, mass %		
		20	52	93
²³⁴ U	Reference	0.1486 (2)	0.3718(5)	0.9800(15)
	Lsrm	0.138(21)	0.35(5)	0.89 (27)
²³⁵ U	Reference	20.107 (10)	52.488(21)	93.1703(3)
	Lsrm	20.18 (22)	52.7(5)	94.1(9)
²³⁶ U	Reference	0.1973(6)	0.2645(3)	0.2937(12)
	Lsrm	-	-	-
²³⁸ U	Reference	79.547(10)	46.876(21)	5.5559(26)
	Lsrm	79.68(22)	46.9(5)	5.0 (7)



Standard Reference Material SRM 969

Isotope		Reference sample, mass %				
		031	071	194	295	446
²³⁴ U	Reference	0.0020(2)	0.0052(2)	0.0171(2)	0.0279(4)	0.0359(3)
	Lsrm	0.0016(4)	0.0049(8)	0.0160(24)	0.026(4)	0.033(5)
²³⁵ U	Reference	0.3166(2)	0.7119(5)	1.9420(14)	2.9492(21)	4.4623(32)
	Lsrm	0.308(9)	0.702(14)	1.941(29)	2.95(4)	4.49(6)
²³⁶ U	Reference	0.0146(3)	<0.00002	0.0003(1)	0.0033(2)	0.0068(2)
	Lsrm	-	-	-	-	-
²³⁸ U	Reference	99.6668(4)	99.2828(4)	98.0406(18)	97.0196(29)	95.4950(32)
	Lsrm	99.690(9)	99.293(14)	98.043(29)	97.03(4)	95.48(6)

Certified Reference Material CRM 146 & SRM 969

U reference spectra from LNHB and LLNL

<http://www.nucleide.org/spectres.htm>



LNHB spectra						
LLNL spectra (all files ASCII format)	Coaxial detector (all files ASCII format) (all files CHN format)	CZT detector (all files ASCII format) (all files CHN format)	Planar detector (all files ASCII format) (all files CHN format)			
125v003.asc	G-125VC.ASC	G-125vc.chn	C-125.asc	C-125.chn	X-125VC.ASC	X-125vc.chn
15411001.asc	G-125VD.ASC	G-125vd.chn	C-1541.ASC	C-1541.chn	X-125VD.ASC	X-125vd.chn
15411002.asc	G-125VE.ASC	G-125ve.chn	C-1542.ASC	C-1542.chn	X-125VE.ASC	X-125ve.chn
15411003.asc	G-1541C.ASC	G-1541c.chn	C-1613.ASC	C-1613.chn	X-1541C.ASC	X-1541c.chn
15411004.asc	G-1541D.ASC	G-1541d.chn	C-1614.ASC	C-1614.chn	X-1541D.ASC	X-1541d.chn
1542-001.asc	G-1541E.ASC	G-1541e.chn	C-R1.ASC	C-r1.chn	X-1541E.ASC	X-1541e.chn
1542-002.asc	G-1542C.ASC	G-1542c.chn	C-R2.ASC	C-r2.chn	X-1542C.ASC	X-1542c.chn
1542-003.asc	G-1542D.ASC	G-1542d.chn	C-R3.ASC	C-r3.chn	X-1542D.ASC	X-1542d.chn
1542-004.asc	G-1542E.ASC	G-1542e.chn	C-R4.ASC	C-r4.chn	X-1542E.ASC	X-1542e.chn
1542-005.asc	G-1613C.ASC	G-1613c.chn	C-R5.ASC	C-r5.chn	X-1613C.ASC	X-1613c.chn
1542-006.asc	G-1613D.ASC	G-1613d.chn	C-X2.ASC	C-x2.chn	X-1613D.ASC	X-1613d.chn
1542-007.asc	G-1613E.ASC	G-1613e.chn	C-Y2.ASC	C-y2.chn	X-1613E.ASC	X-1613e.chn
1542-008.asc	G-1614C.ASC	G-1614c.chn			X-1614C.ASC	X-1614c.chn
1542-009.asc	G-1614D.ASC	G-1614d.chn			X-1614D.ASC	X-1614d.chn
1542-010.asc	G-1614E.ASC	G-1614e.chn			X-1614E.ASC	X-1614e.chn
16131001.asc	G-R1C.ASC	G-r1c.chn			X-R1C.ASC	X-r1c.chn
16131002.asc	G-R2C.ASC	G-r2ccn			X-R2C.ASC	X-r2c.chn
16131003.asc	G-R3C.ASC	G-r3c.chn			X-R3C.ASC	X-r3c.chn
16141001.asc	G-R4C.ASC	G-r4c.chn			X-R4C.ASC	X-r4c.chn
16141002.asc	G-R5C.ASC	G-r5c.chn			X-R5C.ASC	X-r5c.chn
16141003.asc	G-X2C.ASC	G-x2c.chn			X-X3C.ASC	X-x3c.chn
U0_017.ASC	G-X2CC.ASC	G-x2cc.chn			X-X3CC.ASC	X-x3cc.chn
U0_483.ASC	G-X2D.ASC	G-x2d.chn			X-X3D.ASC	X-x3d.chn
U0_991.ASC	G-X2DD.ASC	G-x2dd.chn			X-X3DD.ASC	X-x3dd.chn
U10_075.ASC	G-X2E.ASC	G-x2e.chn			X-X3E.ASC	X-x3e.chn
U2_013.asc	G-X2EE.ASC	G-x2ee.chn			X-X3EE.ASC	X-x3ee.chn
U3_009.ASC	G-Y2C.ASC	G-y2c.chn			X-Y2C.ASC	X-y2c.chn
U49_38.ASC	G-Y2CC.ASC	G-y2cc.chn			X-Y2CC.ASC	X-y2cc.chn
U4_949.ASC	G-Y2D.ASC	G-y2d.chn			X-Y2D.ASC	X-y2d.chn
U75_13.ASC	G-Y2DD.ASC	G-y2dd.chn			X-Y2DD.ASC	X-y2dd.chn
U93_076.ASC	G-Y2E.ASC	G-y2e.chn			X-Y2E.ASC	X-y2e.chn
g295001.asc	G-Y2EE.ASC	G-y2ee.chn			X-Y2EE.ASC	X-y2ee.chn
g295002.asc						
g295003.asc						

U reference spectra from LNHB and LLNL

<http://www.nucleide.org/spectres.htm>

HPGe-Planar

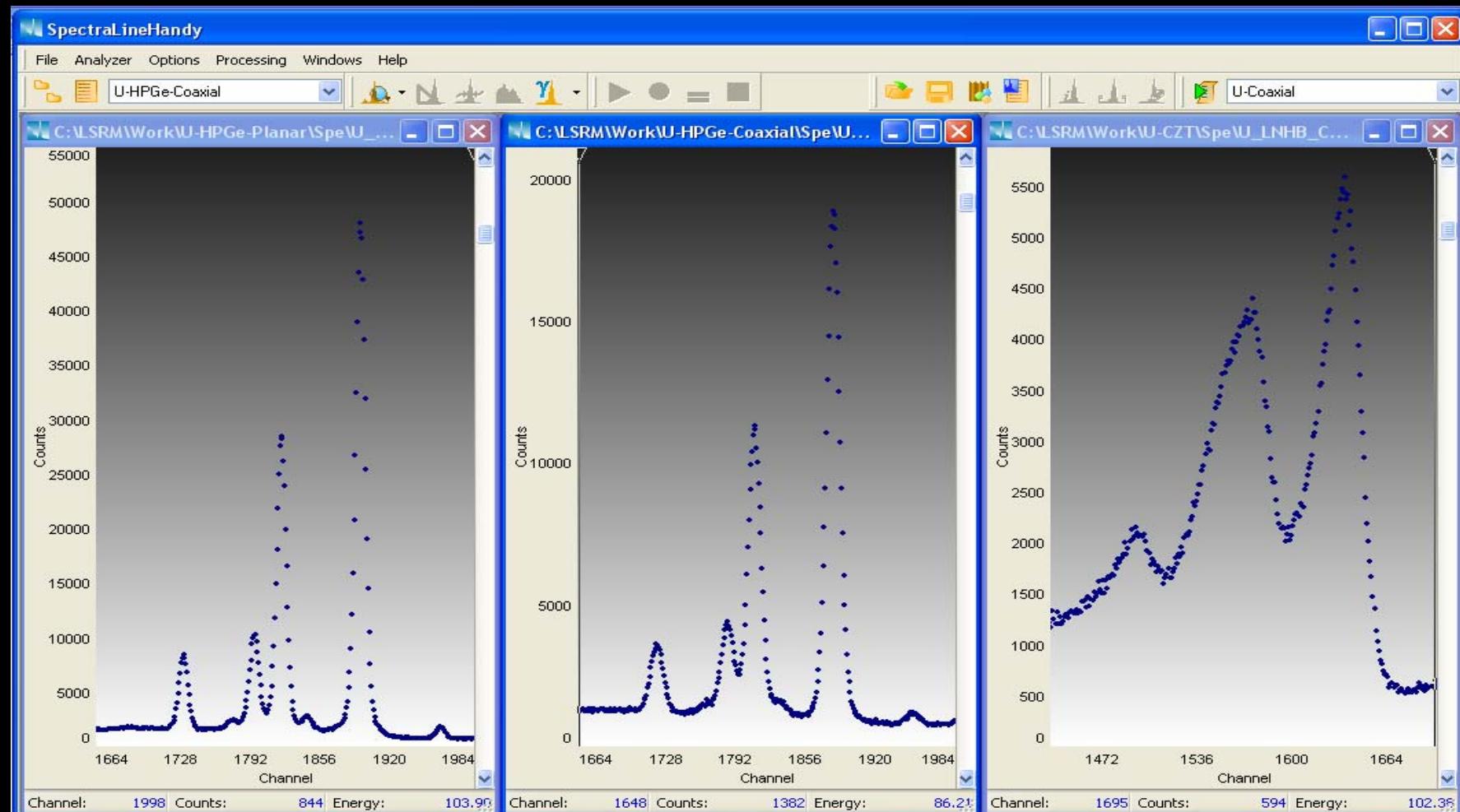
FWHM at 122 keV: 0.52 keV

HPGe-Coaxial

0.71 keV

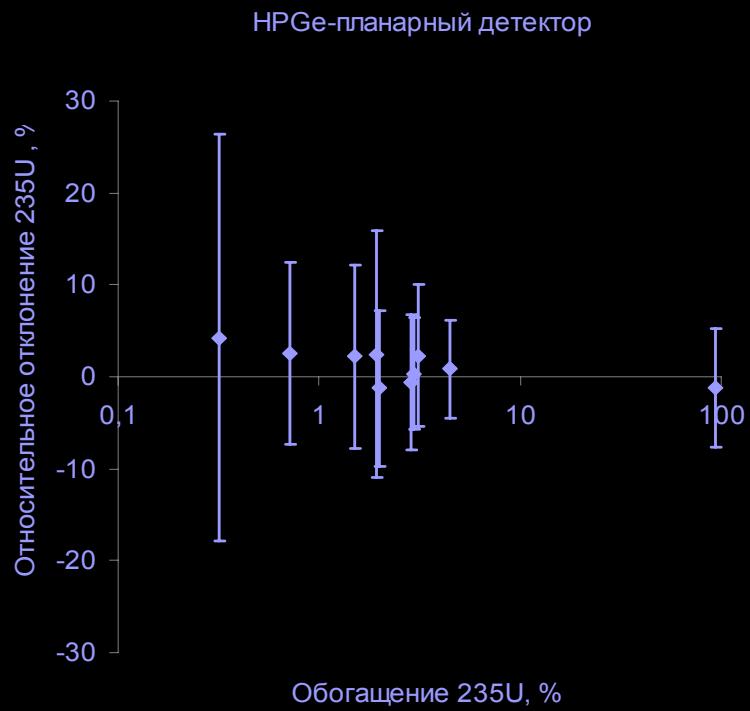
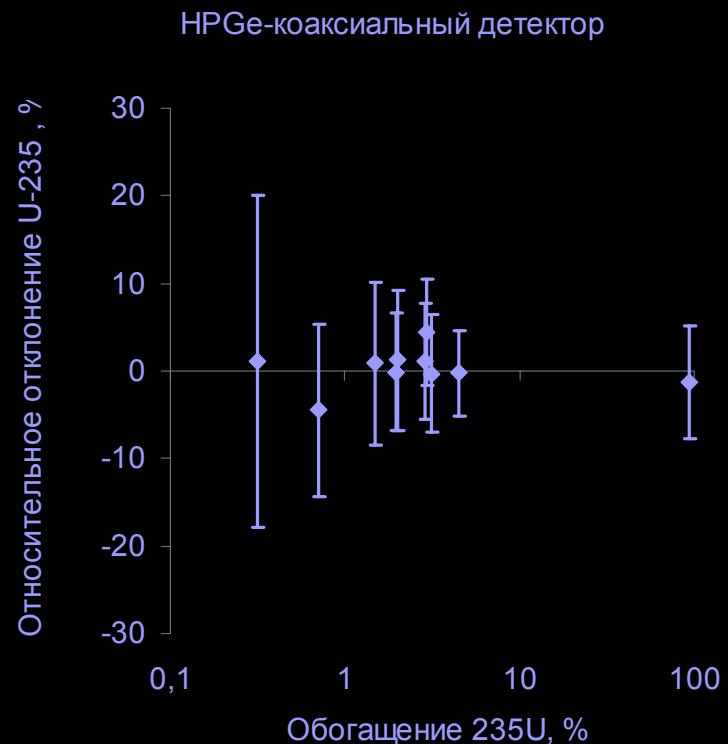
CZT

1.95 keV

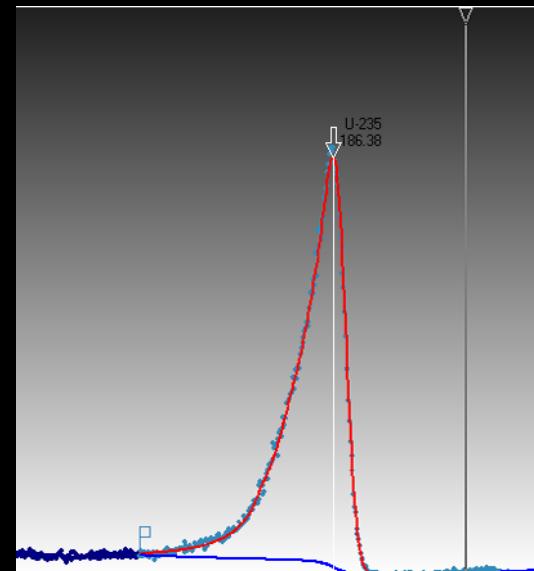
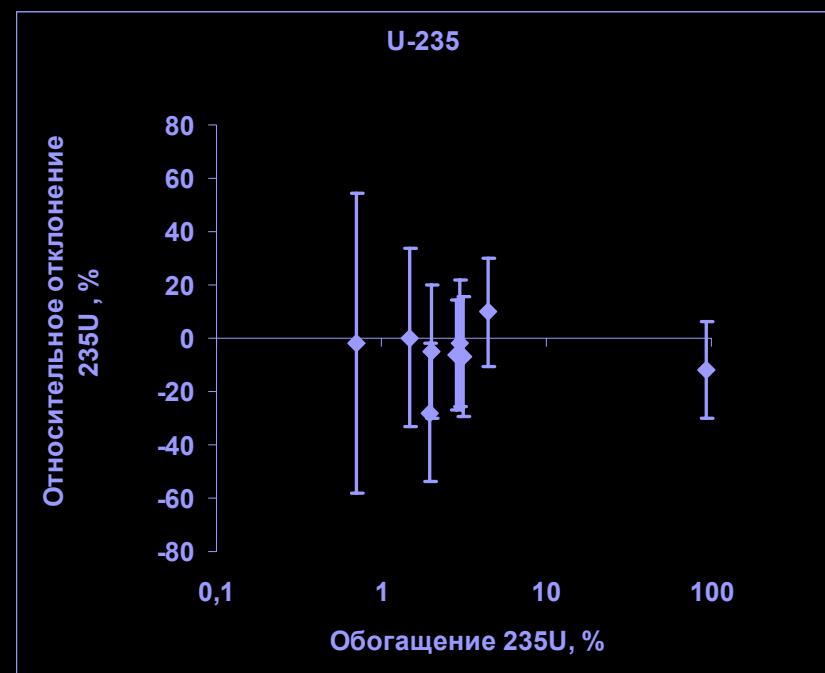


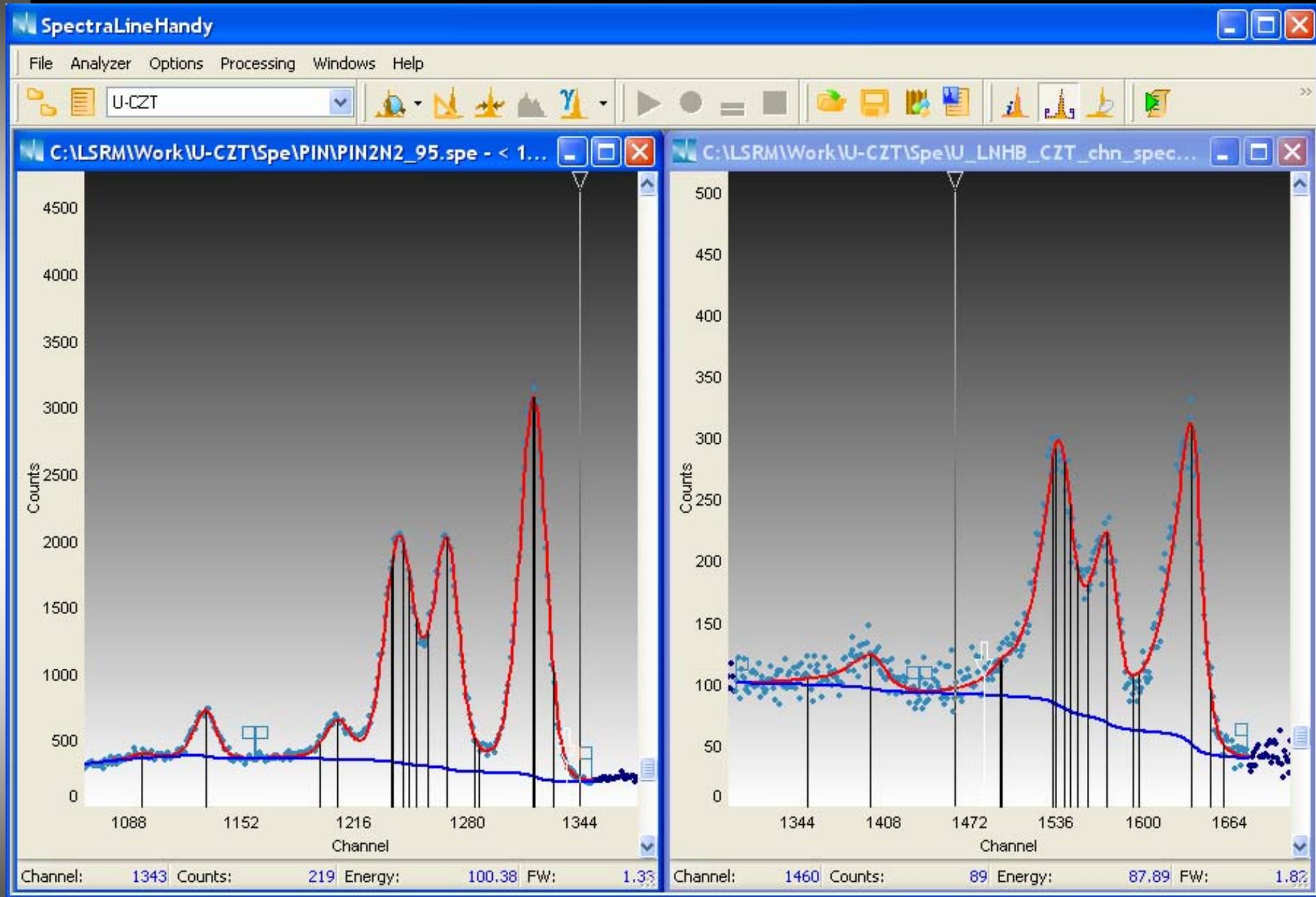
U reference spectra from LNHB and LLNL

<http://www.nucleide.org/spectres.htm>



U reference spectra from LNHB CZT-detector



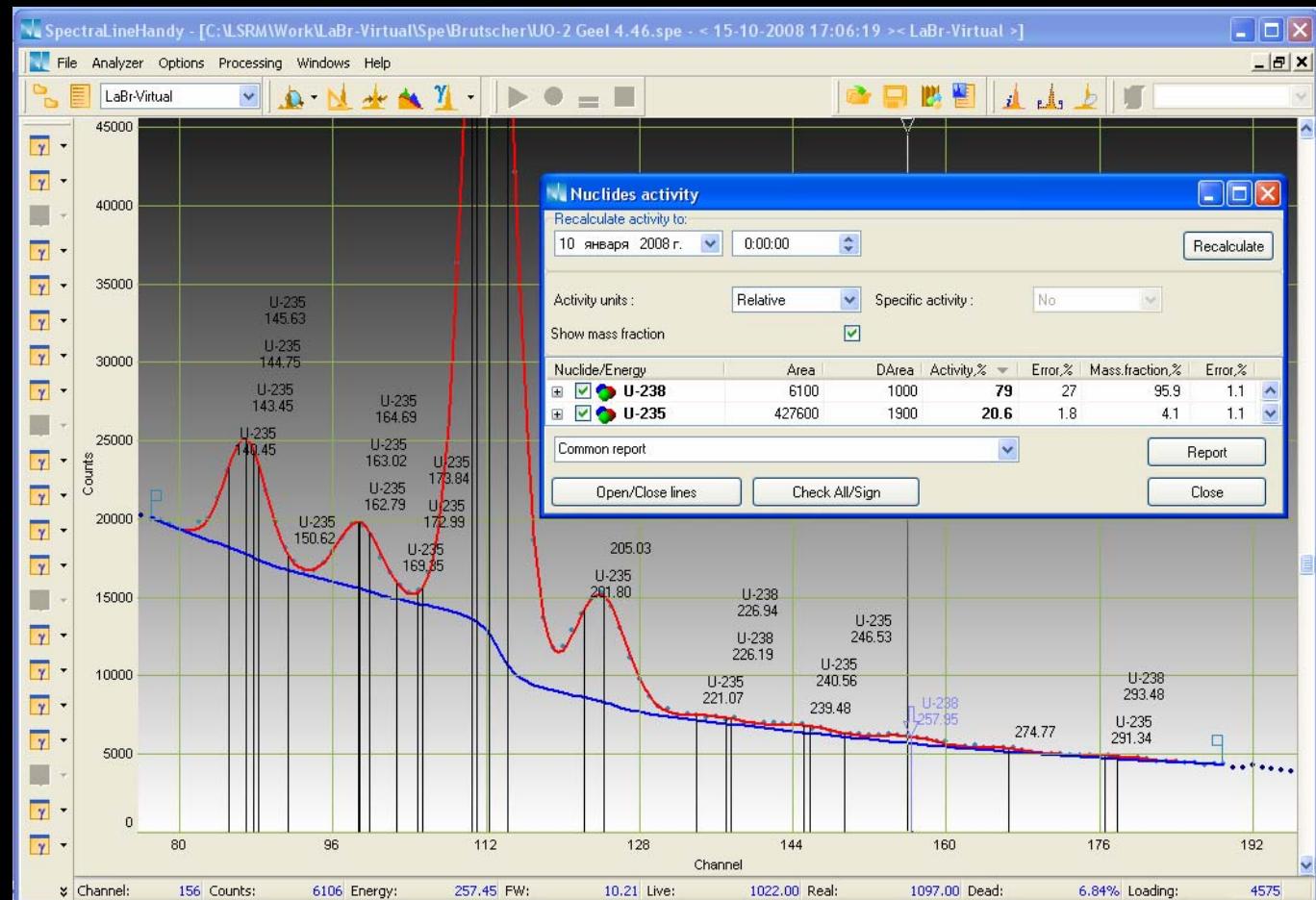


LaBr₃ -2x2"

122 кэВ FWHM: 6.1%
661 кэВ FWHM: 2.7%

235U

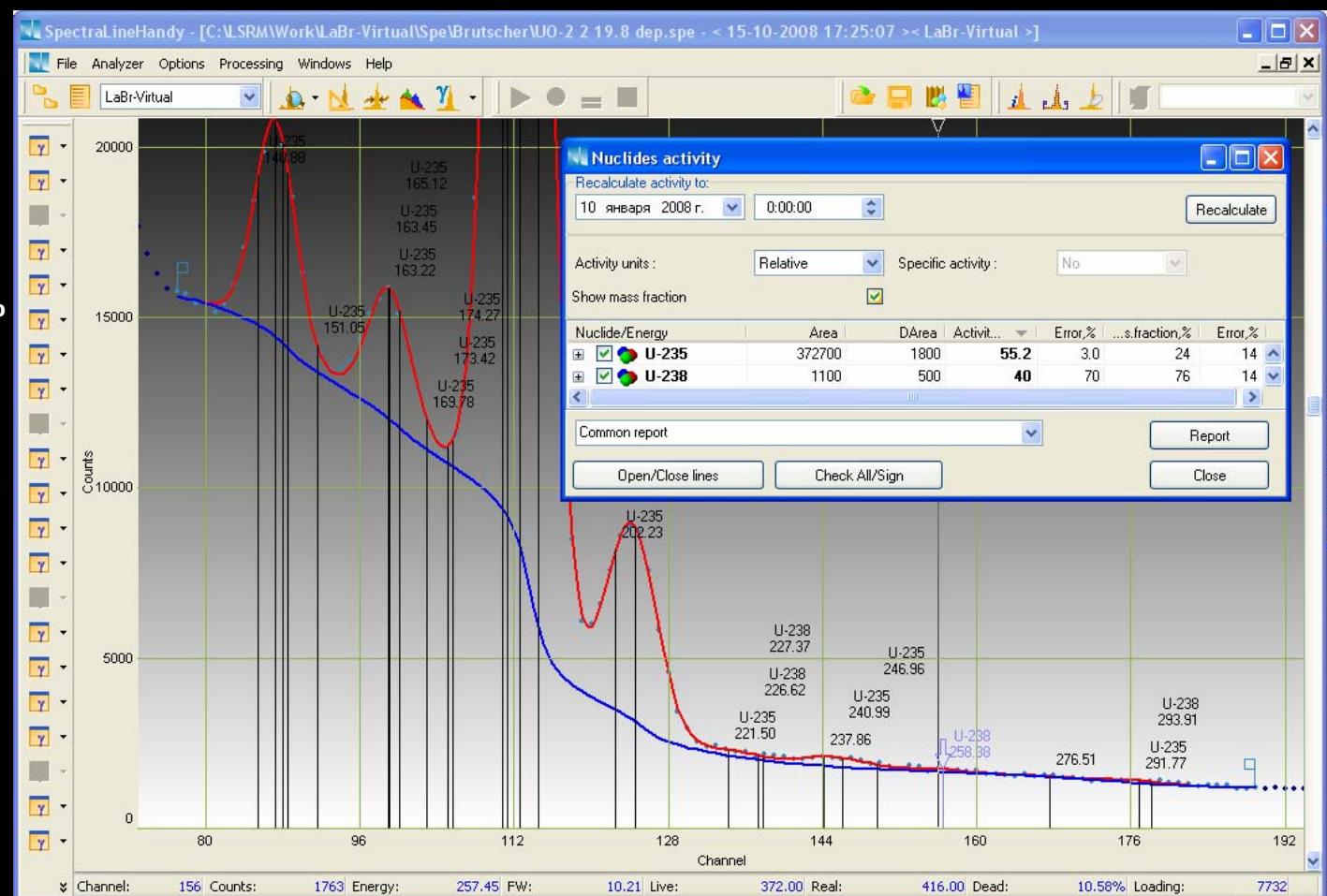
Декларированное- 4.46%
Измеренное 4.1+/-1.1 %



LaBr₃ -2x2"

235U

Декларированное- 19.8%
Измеренное 24+/-14 %



Pu reference spectra from LNHB

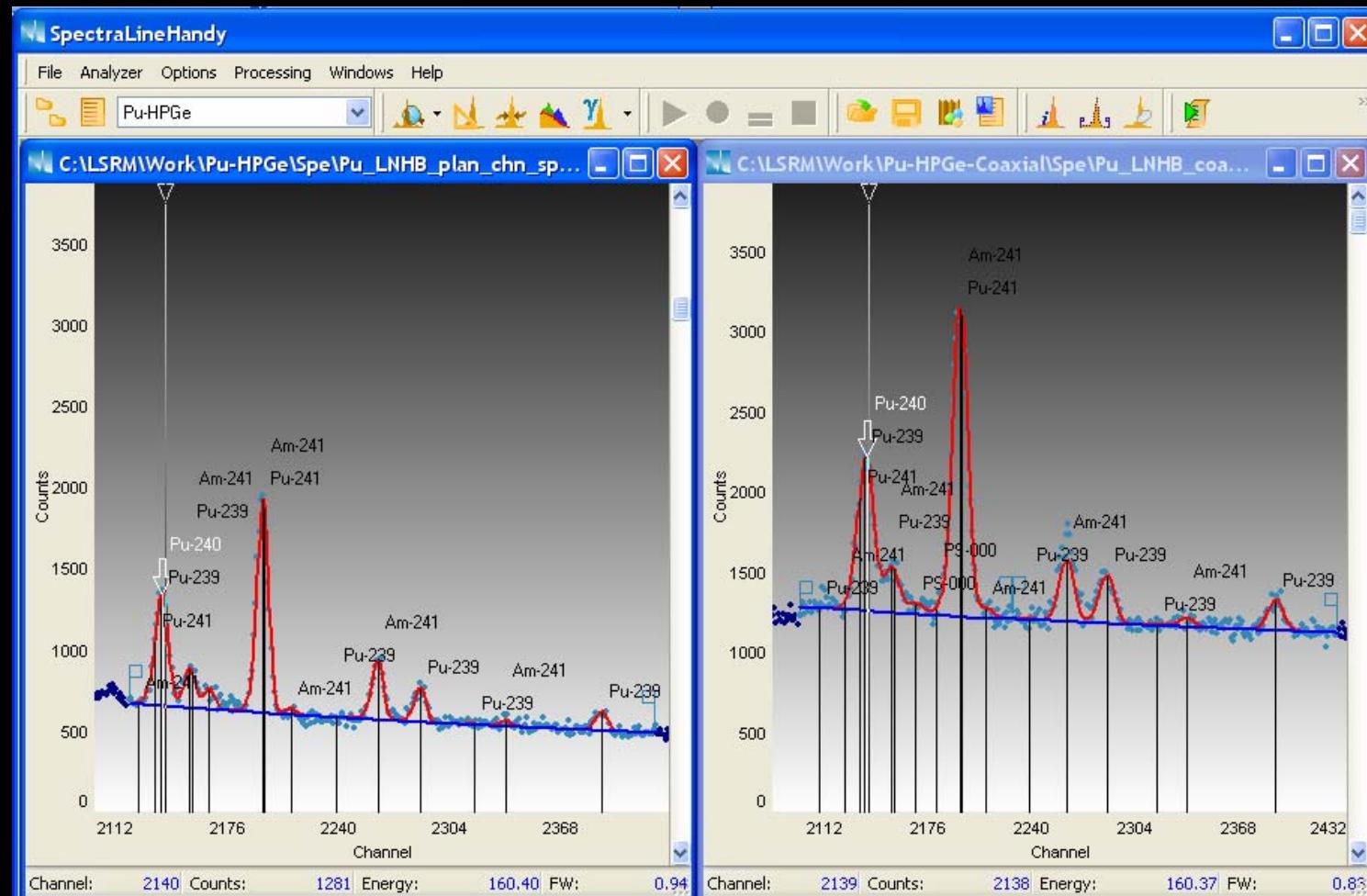
<http://www.nucleide.org/spectres.htm>

HPGe-Planar

FWHM at 122 keV: 0.52 keV

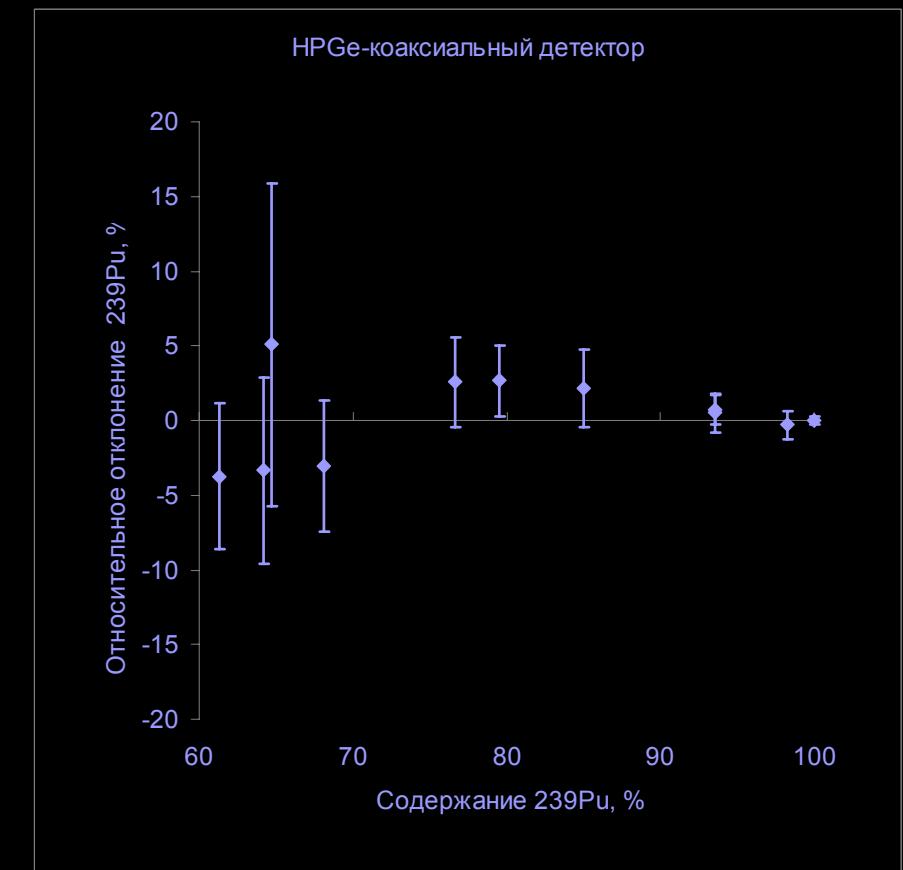
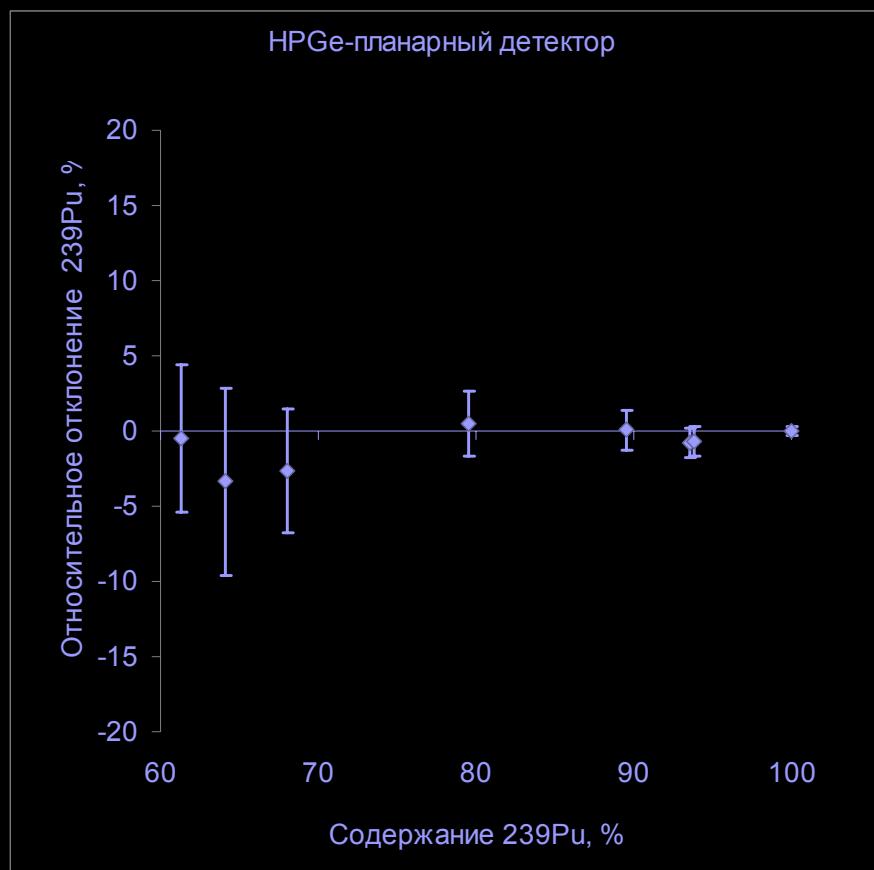
HPGe-Coaxial

0.71 keV



Pu reference spectra from LNHB

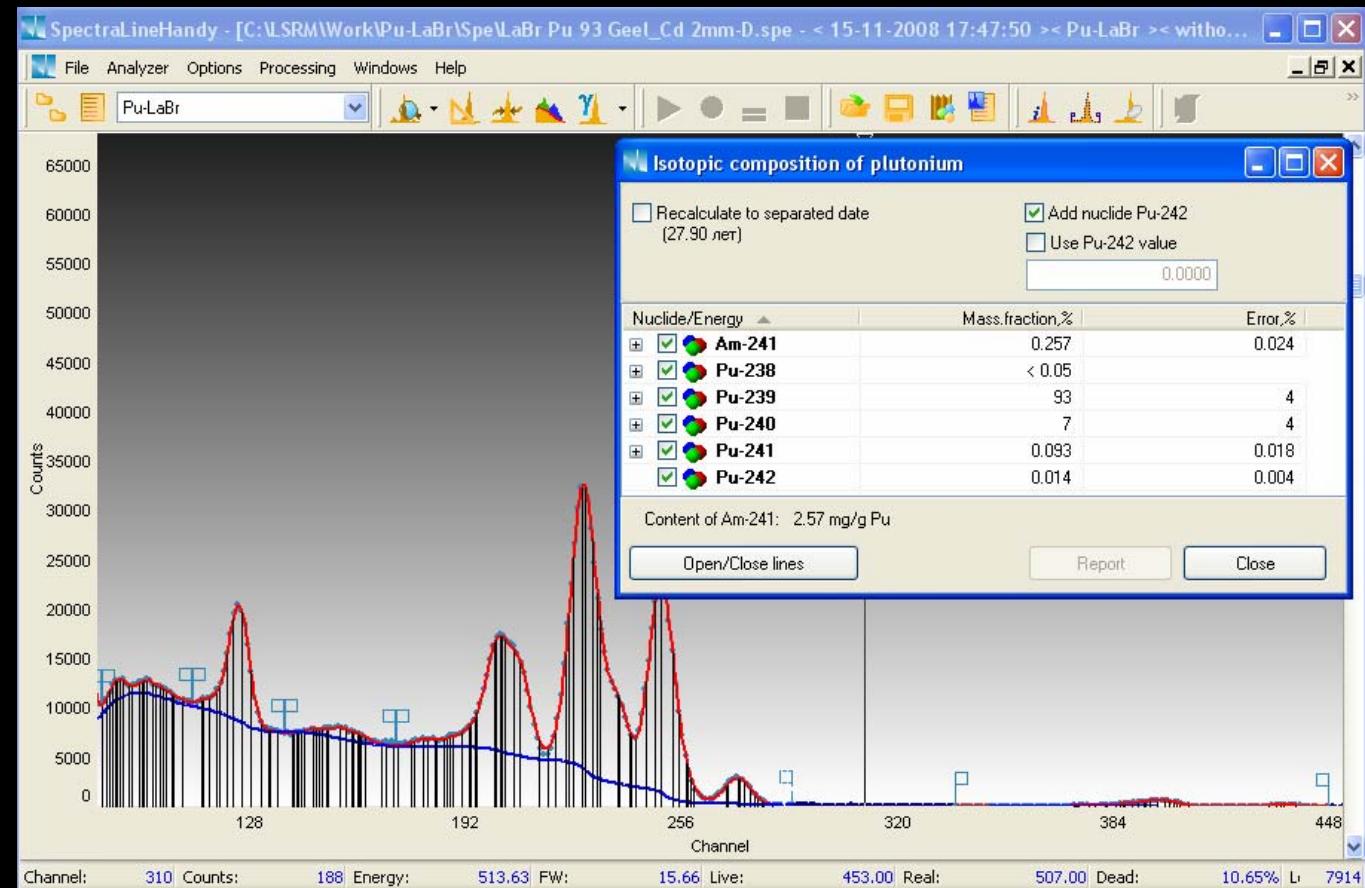
<http://www.nucleide.org/spectres.htm>



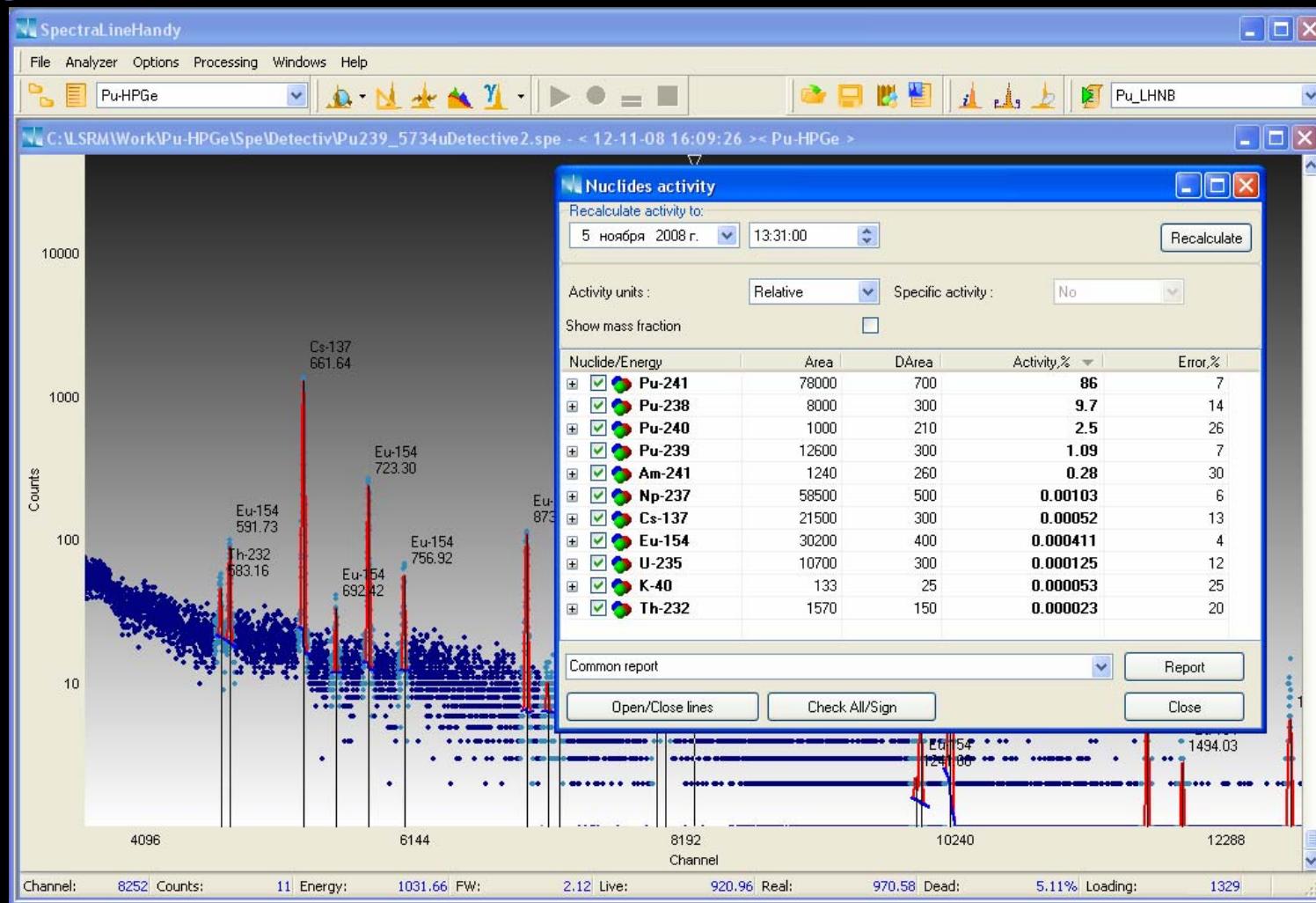
LaBr₃ -2x2"

²³⁹Pu

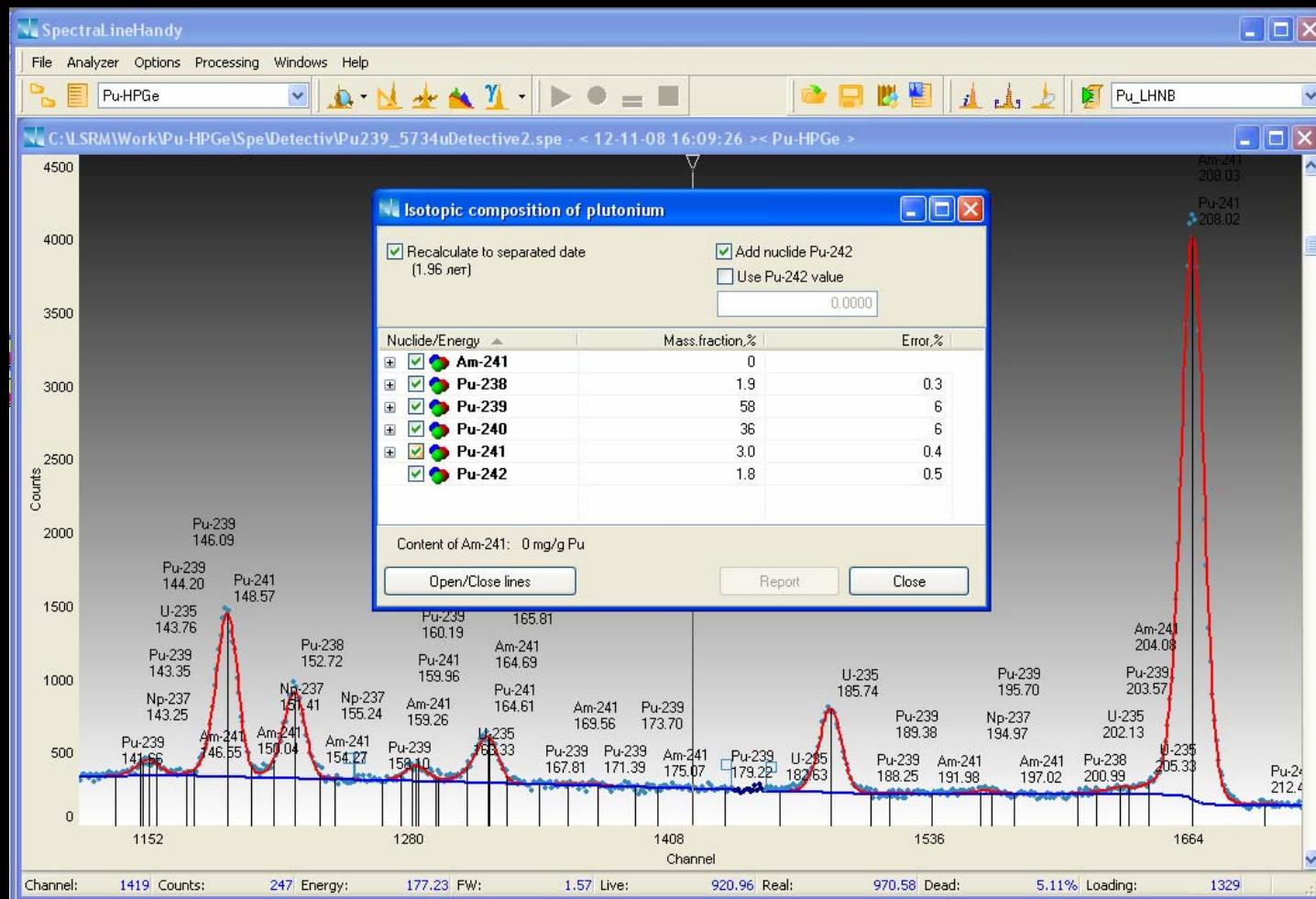
Декларированное- 93%
Измеренное 93+/-4 %



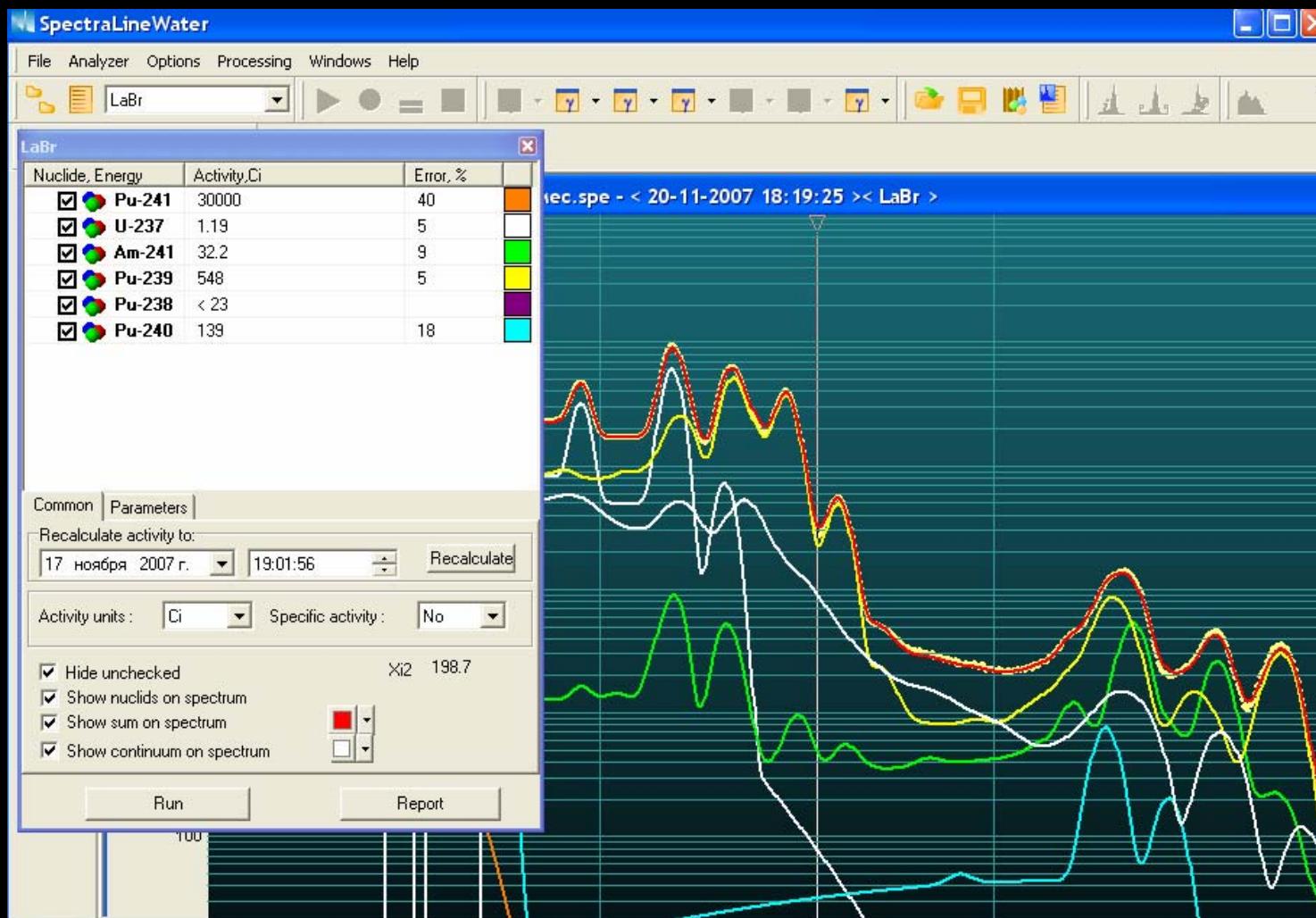
MicroDetective: FWHM at 122keV =1.5 keV



MicroDetective : Низкоэнергетический участок спектра



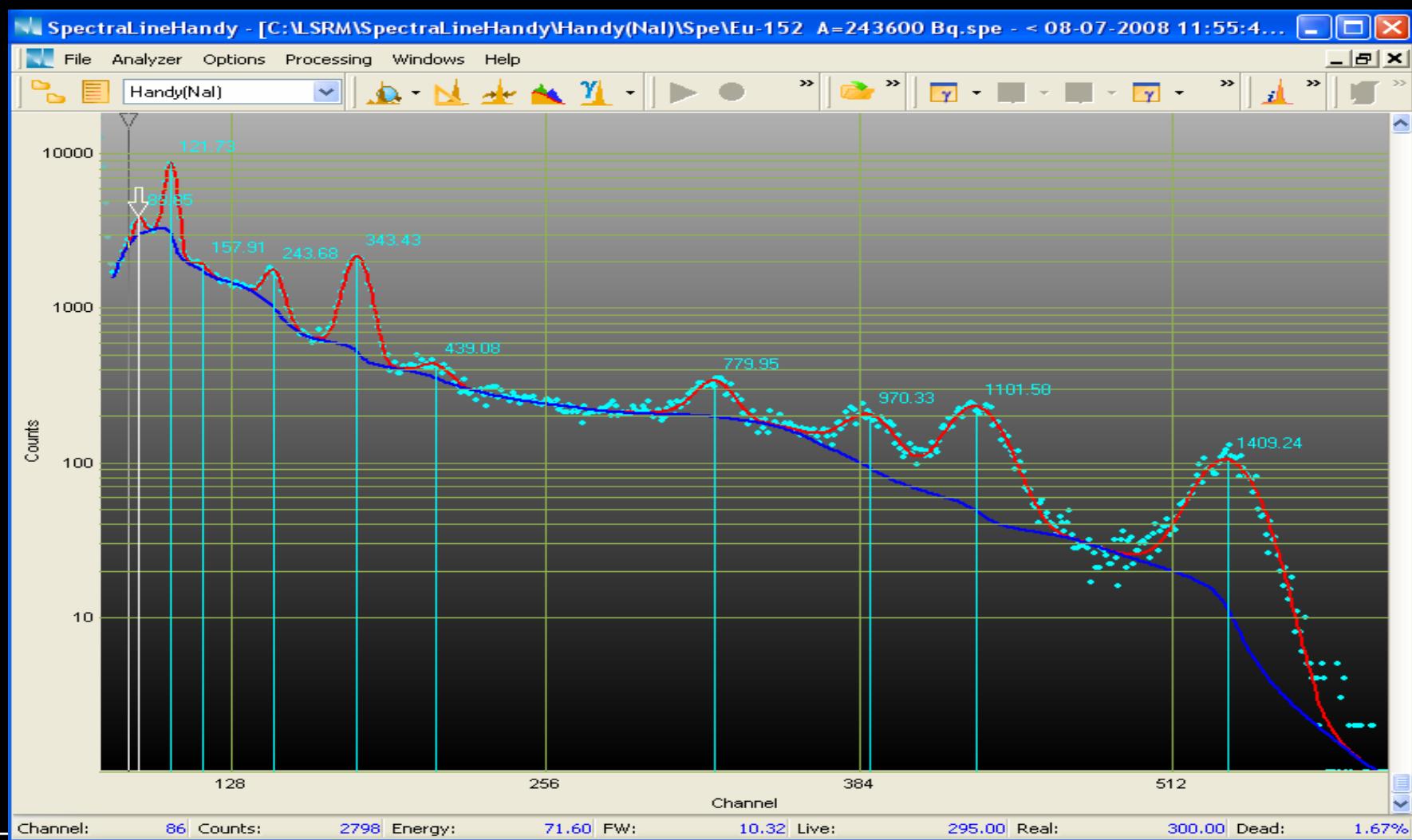
SpectraLineHandy - определения изотопного состава плутония с помощью детектора на основе LaCl₃.



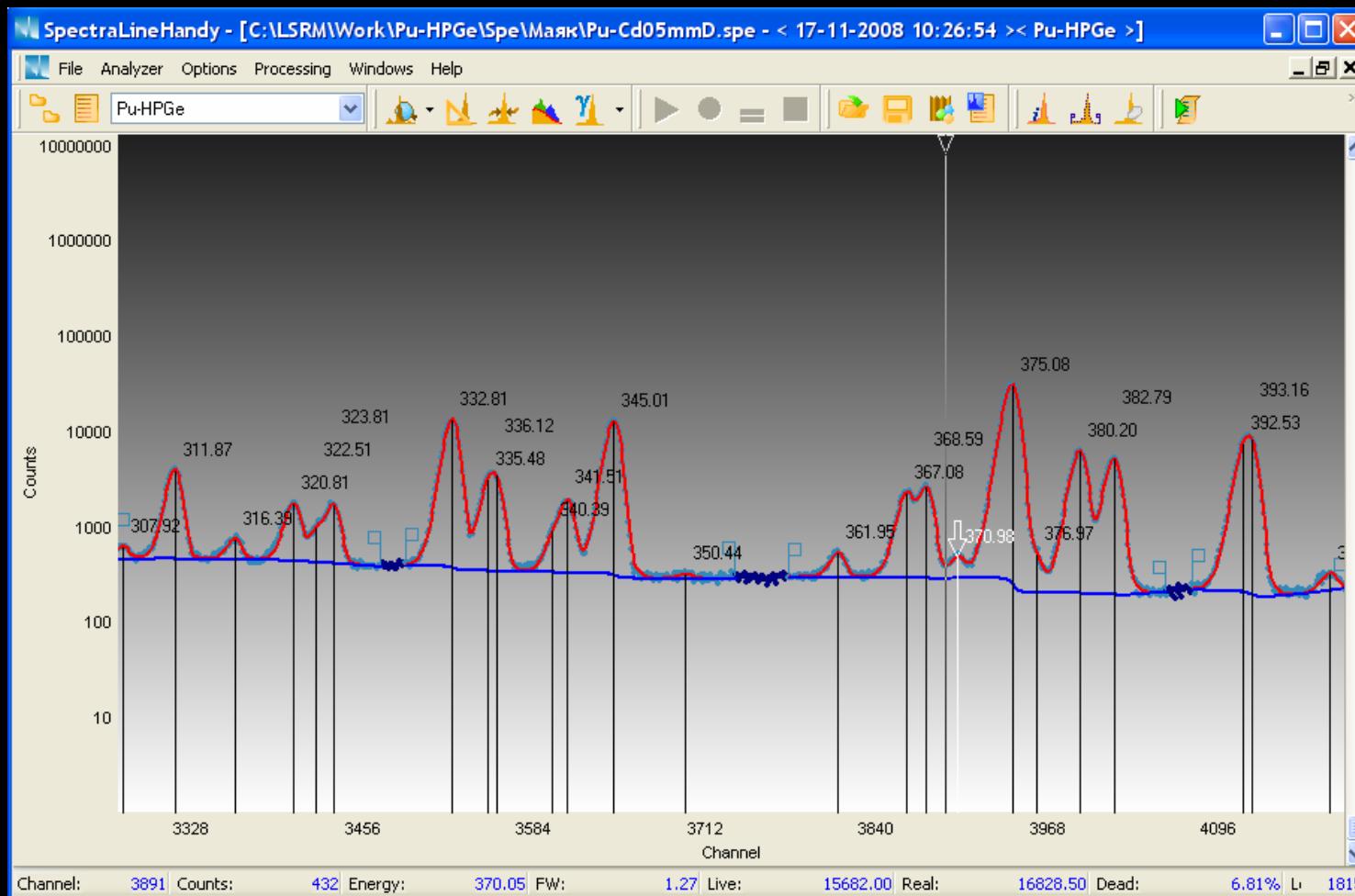
Этапы идентификации

- Поиск пиков в спектре и подгонка информативных участков спектра
- Сравнение энергий найденных пиков с наиболее значимыми линиями радионуклидов из пользовательской библиотеки радионуклидов и установление списка возможных радионуклидов
- Выставление значимых для данного спектра линий всех возможных радионуклидов.
- Переразметка информативных участков и новая подгонка спектра. Расчет активности всех возможных радионуклидов и анализ их на значимость для данного спектра.

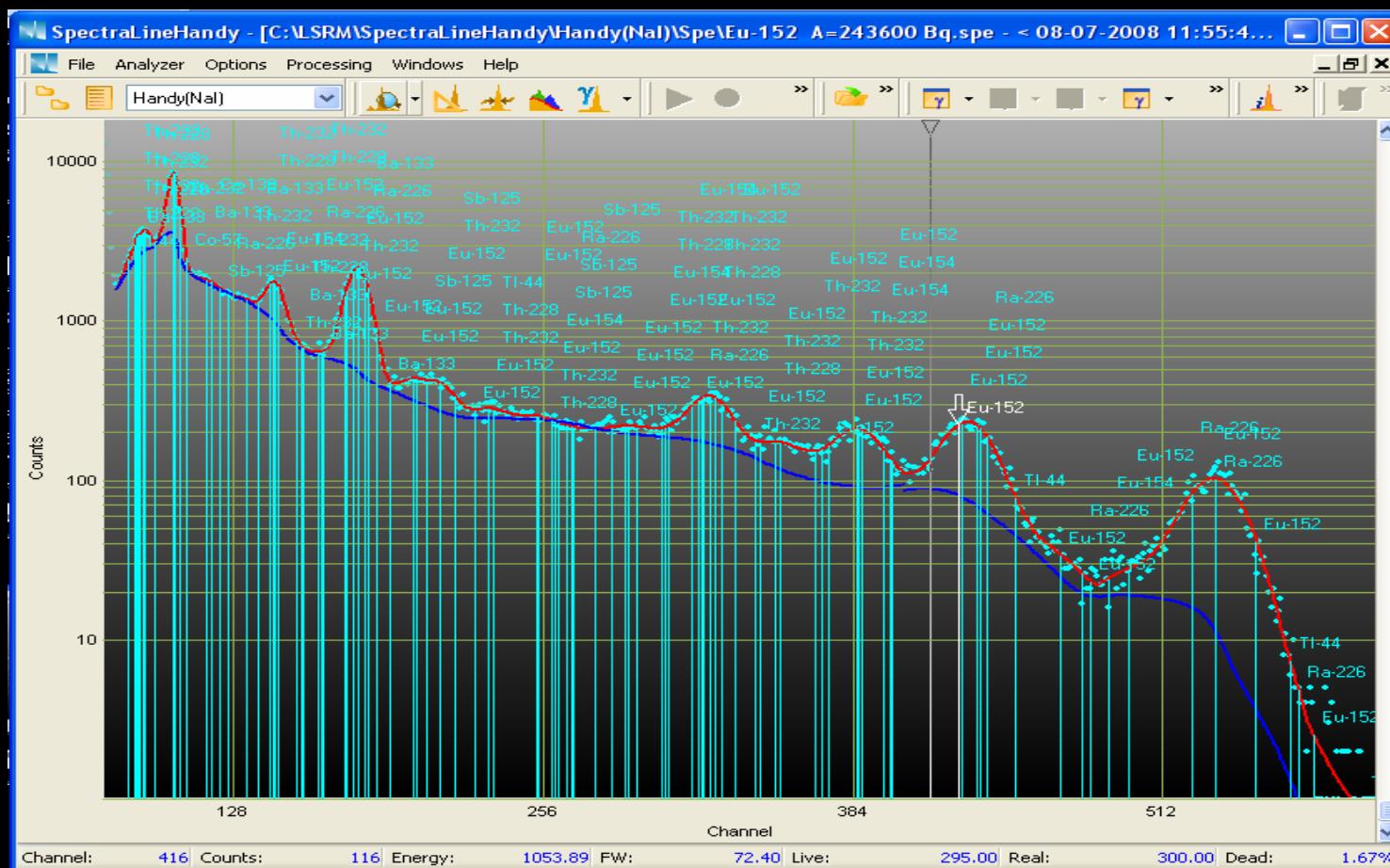
Поиск пиков



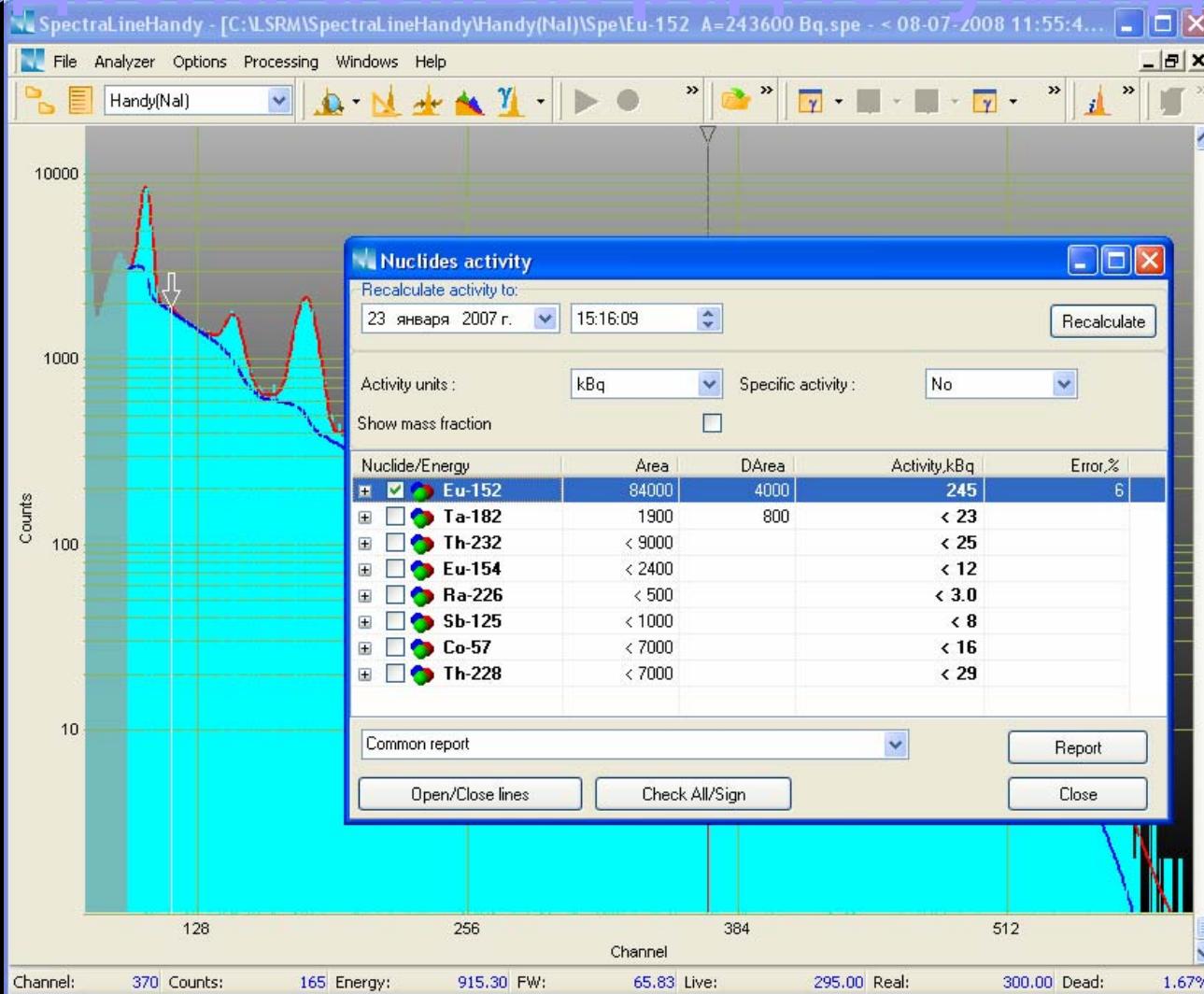
Процедура поиска пиков-разрешение мультиплетов



Оценка активности всех предполагаемых радионуклидов



Оценка активности всех предполагаемых радионуклидов



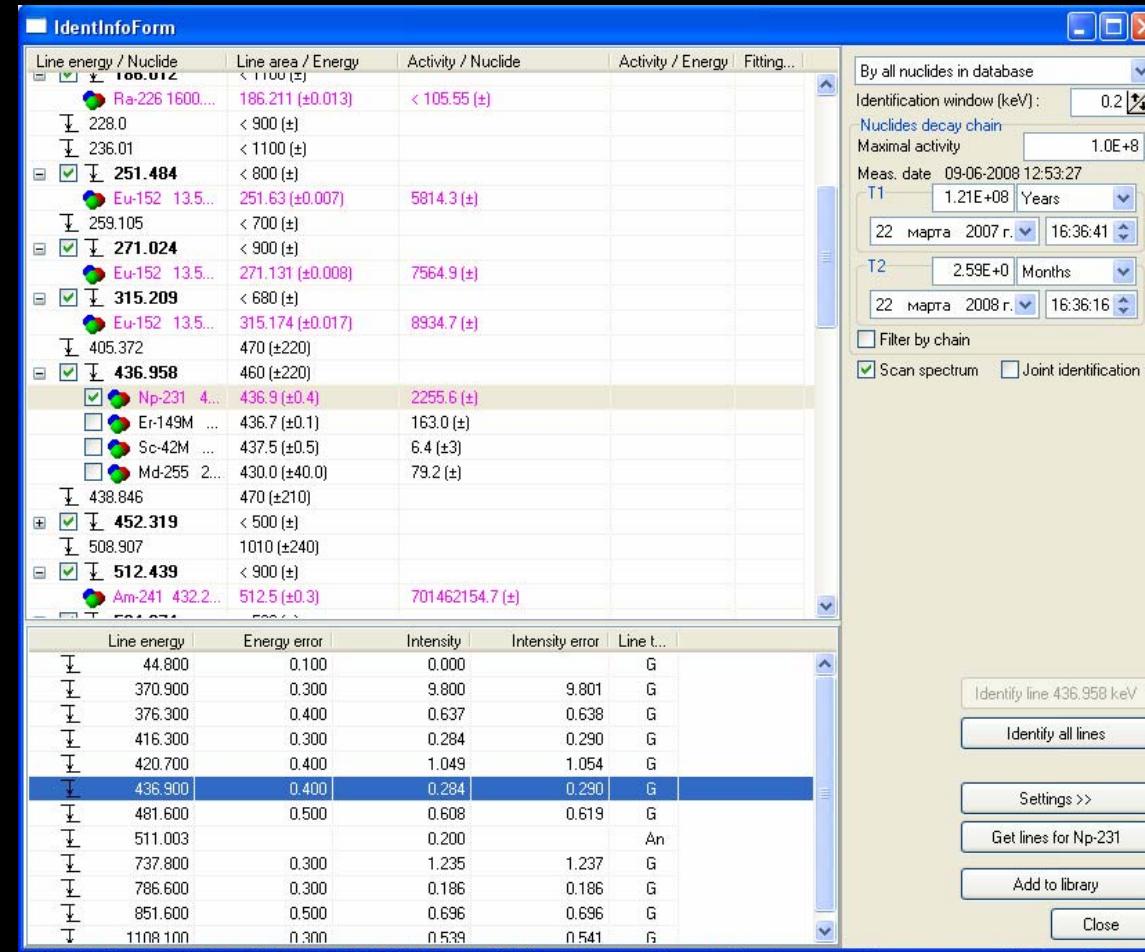
Необходимые условия для успешной идентификации

- Наличие в библиотеке всех радионуклидов присутствующих в образце
- Правильная энергетическая калибровка
- Соответствие выбранного при расчете контейнера реальному

Расширение библиотеки радионуклидов

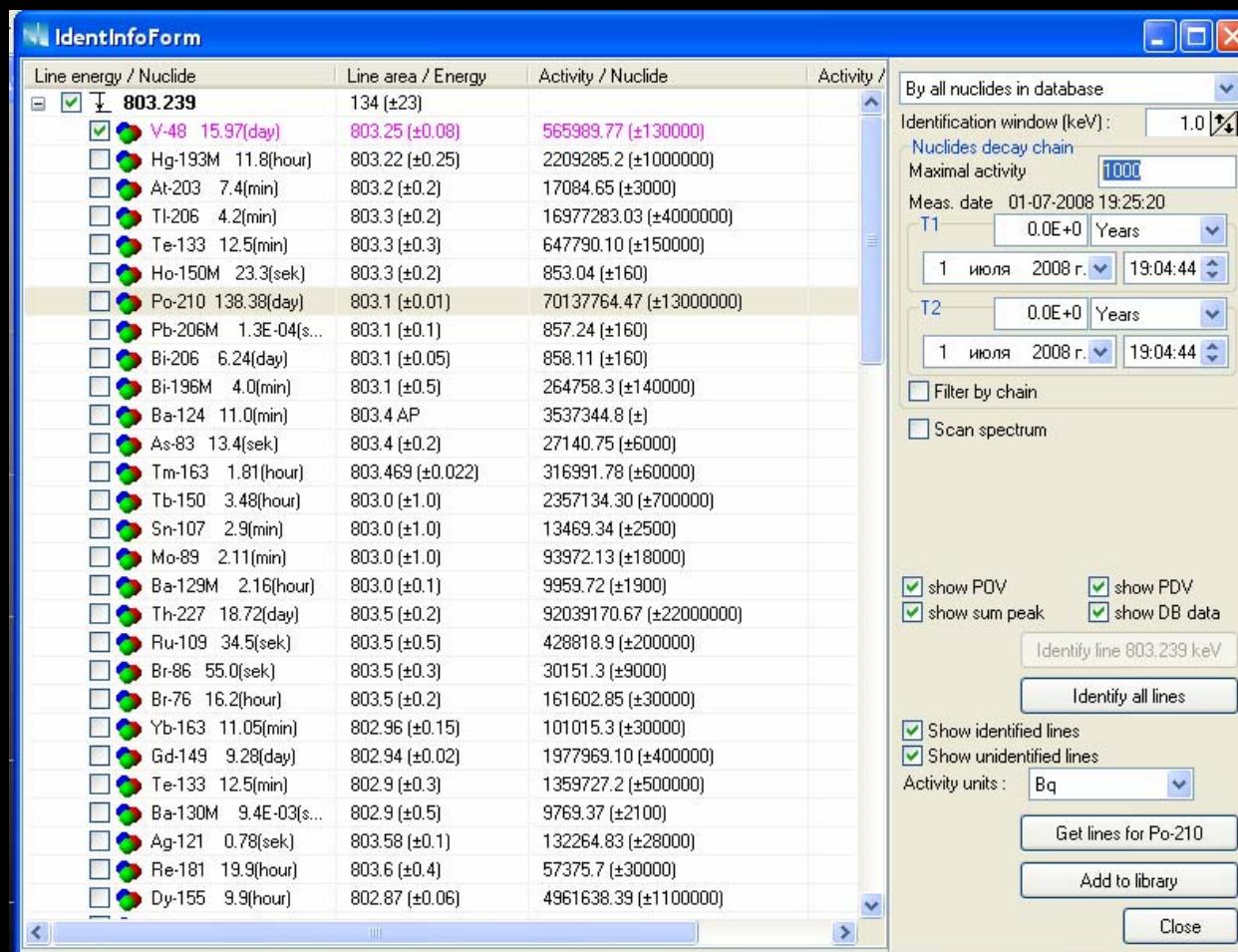
- По списку идентифицированных радионуклидов
- По какому-то выбранному списку радионуклидов
- По всей базе данных

По списку идентифицированных радионуклидов



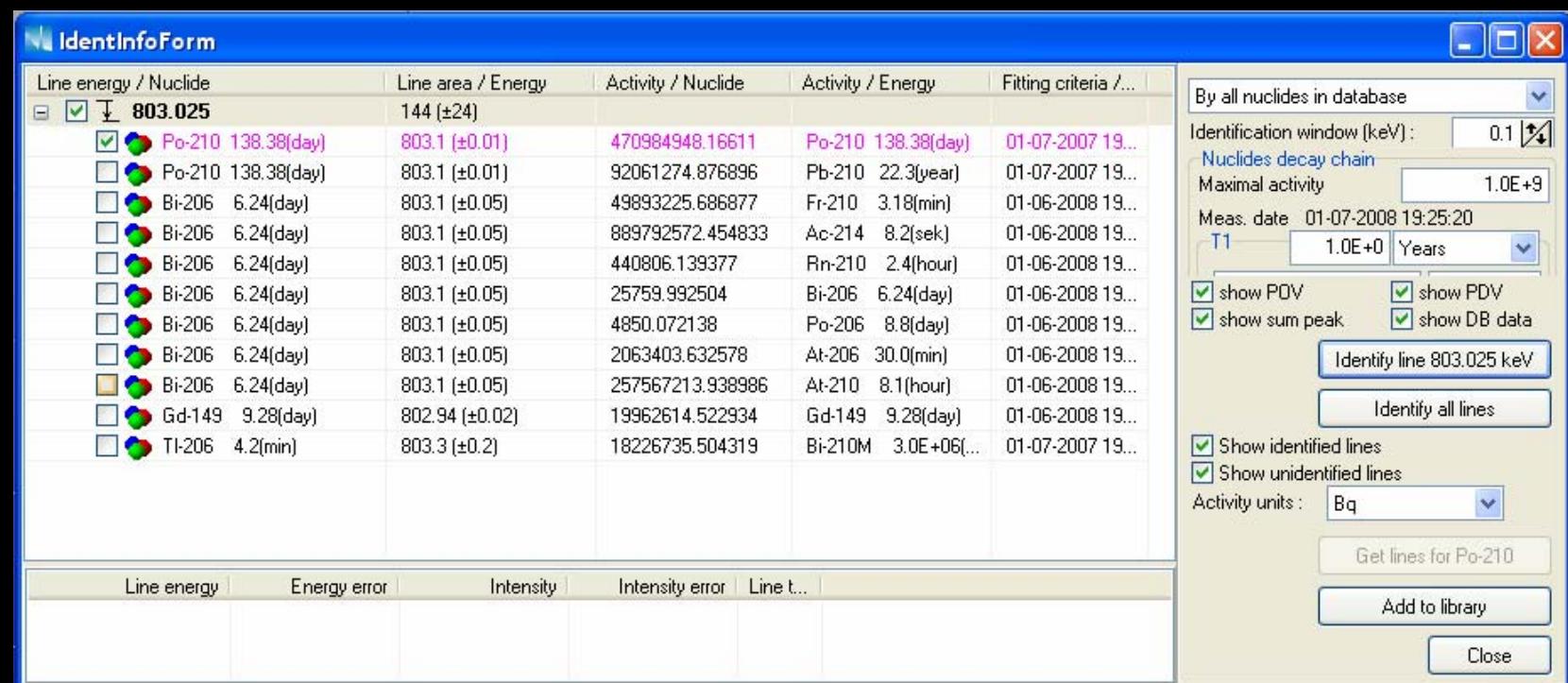
Расширение библиотеки радионуклидов

Фильтр по энергии



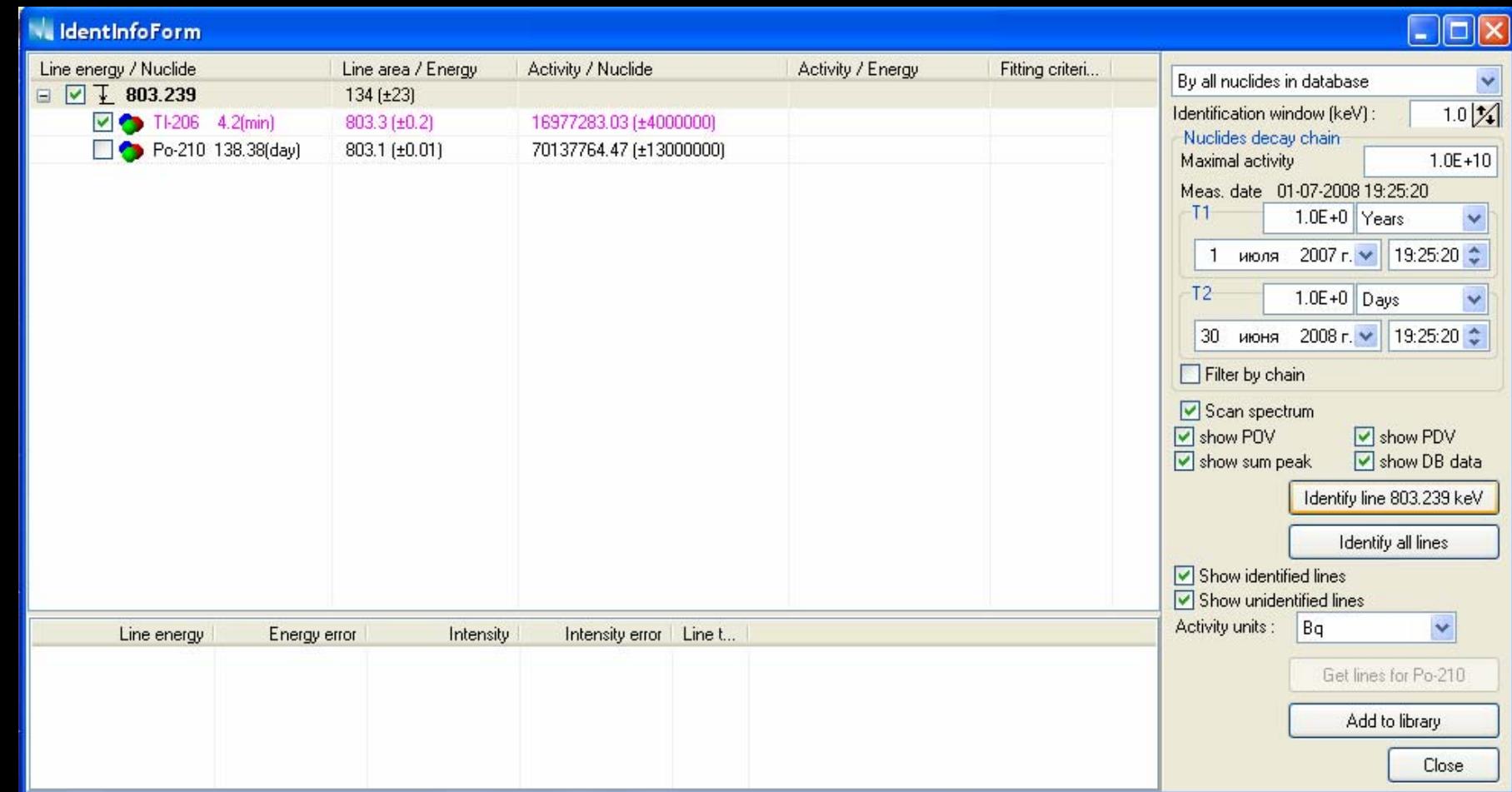
Расширение библиотеки радионуклидов

Фильтр по периоду полураспада



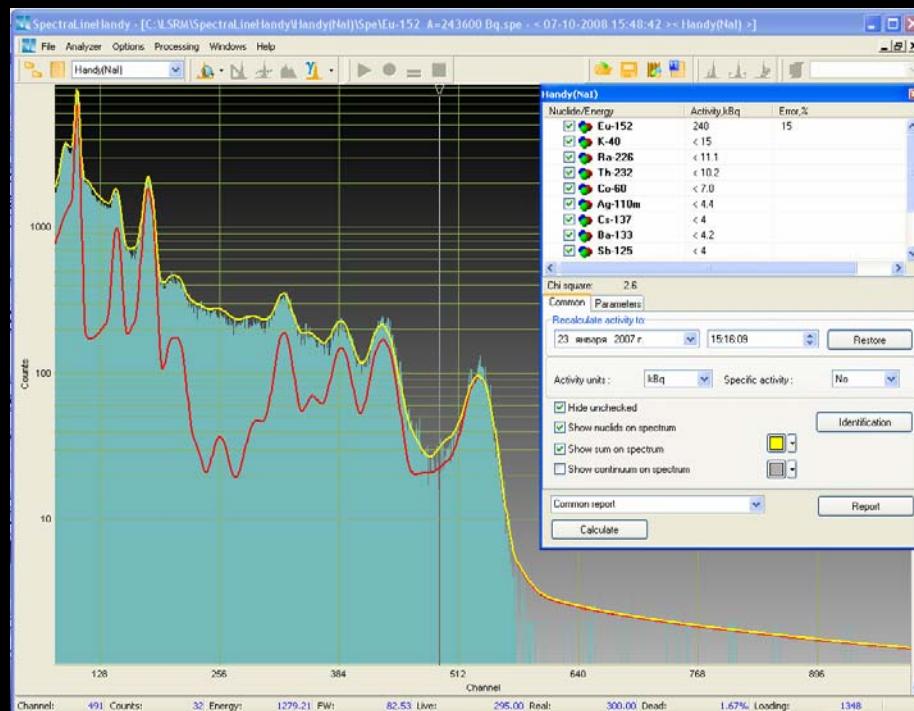
Расширение библиотеки радионуклидов

Фильтр по спектру

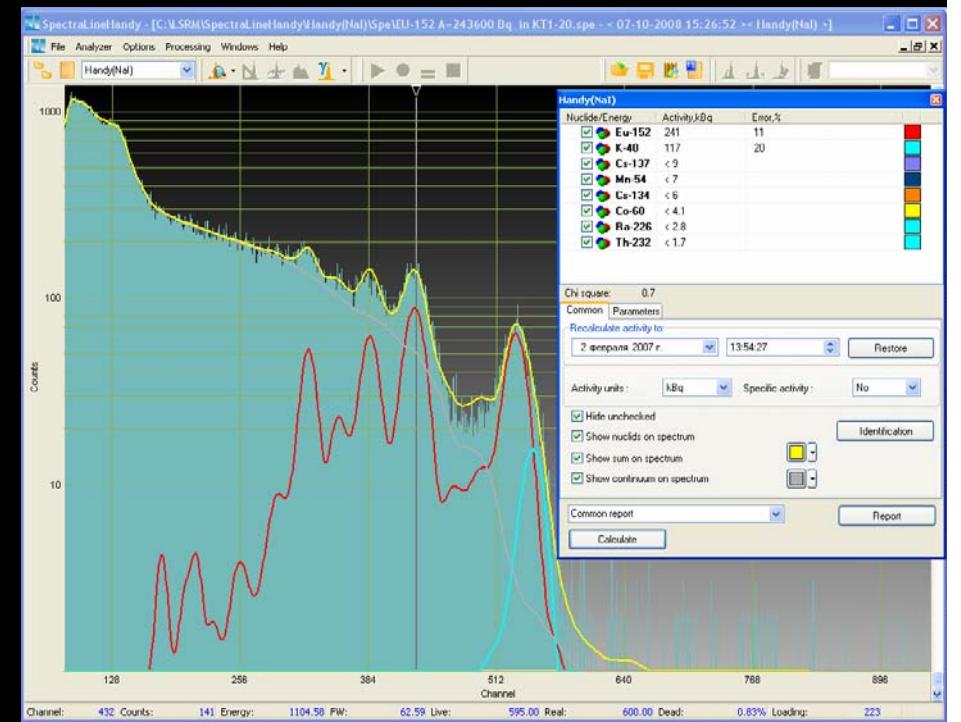


Метод «квазиэталонных» спектров для спектрометров низкого разрешения

Spectrum of Eu-152 point source measured with NaI-detector



Eu-152 in container KT1-20, measured with NaI-detector



Состояние ПО на настоящее время

- Мощные процедуры поиска пиков
- Процедуры идентификации и расчета активности с учетом соотношений интенсивности и учета поглощения в материале контейнера
- Информационная полнота ПО: база данных по радионуклидам с возможностью анализа цепочек распада, база сечений взаимодействия гамма-излучения с веществом

Развитие ПО

Методологические и алгоритмические задачи

- Ограничение библиотеки радионуклидов, классификация радионуклидов с учетом их совместного наличия
- Использование информации об имеющихся радионуклидах для восстановления калибровки, анализа поглощения и т.д.
- Развития процедур оценки поглощения излучения на основе приблизительной информации о свойствах матрицы или контейнера

Технические задачи

- Дублирование функций мыши «горячими» клавишами
- Поддержка основных форматов спектра

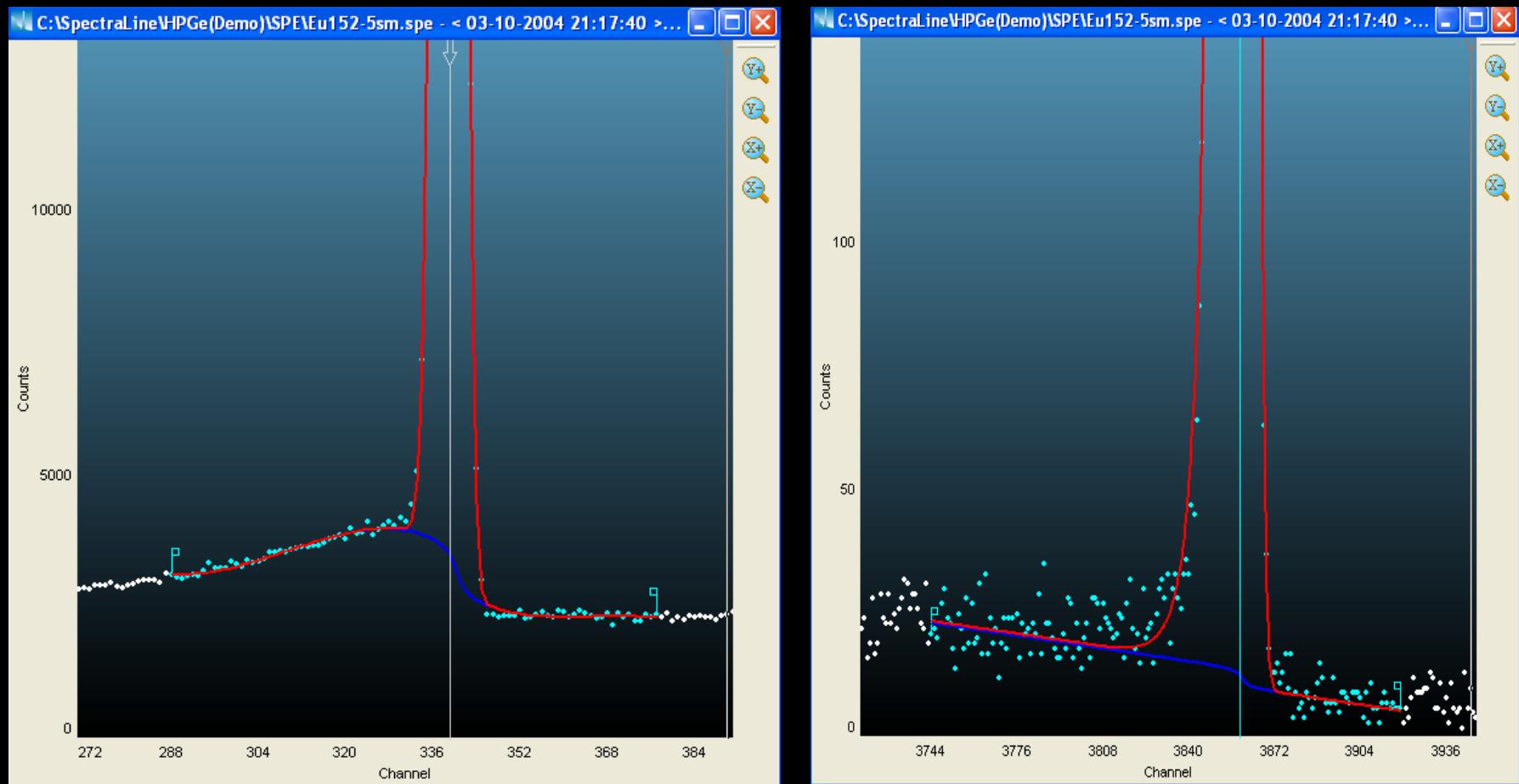


LABORATORY
of spectrometry
and radiometry

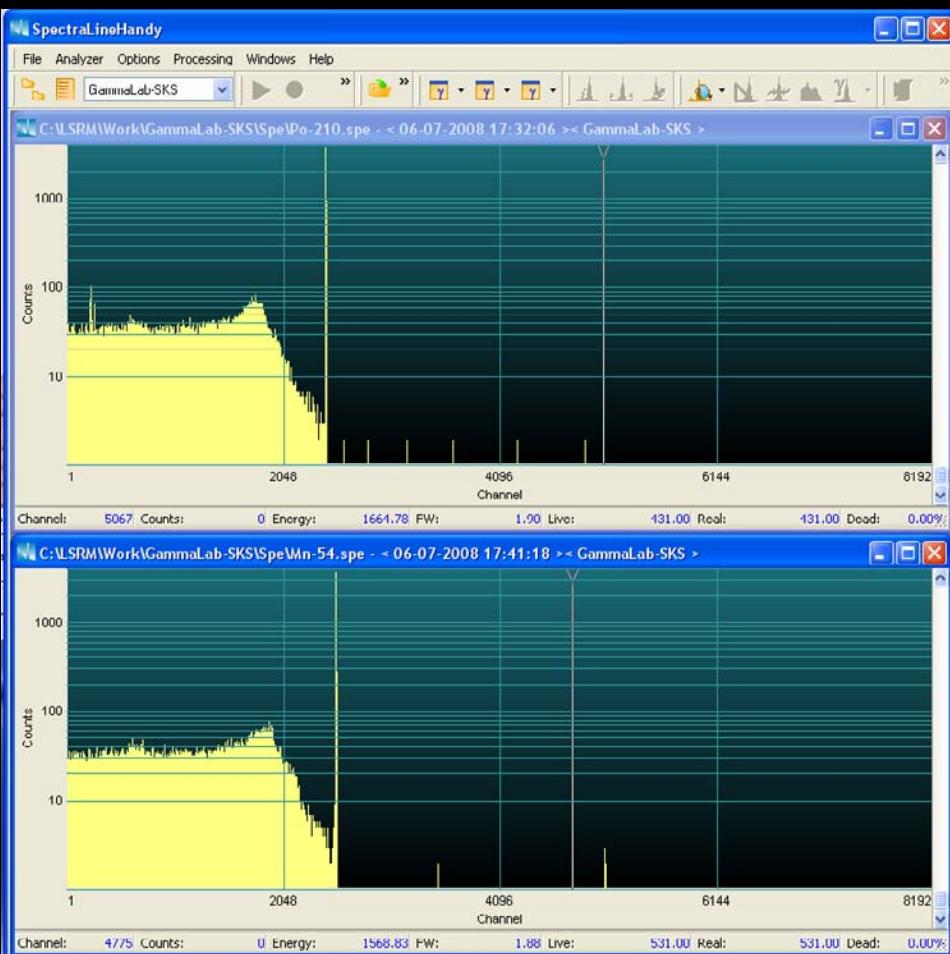
<http://www.lsrm.ru>
mail: lsrm@lsrm.ru
Phone: +7 495 660-16-14

Спасибо за внимание!

Зависимость формы пика от энергии



Неверная энергетическая калибровка



^{210}Po

^{54}Mn

