

# Идентификация ядерных и радиоактивных материалов при их нелегальном перемещении. Проблемы и решения.

Даниленко В.Н., Ковальский Е.А., Скубо Ю.В., Юферов А.Ю., Федоровский С.Ю.  
ООО «ЛСРМ», п. Менделеево, Россия



**LABORATORY  
of spectrometry  
and radiometry**

<http://www.lsrn.ru>  
mail: [lsrn@lsrn.ru](mailto:lsrn@lsrn.ru)  
Phone: +7 495 660-16-14  
Located in Moscow, Russia

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

IAEA Research Contract No: 14900

**Full report** <http://www.lsrn.ru/help/articles/>

Гамма-спектрометрический анализ с использованием  
HPGe, NaI, LaBr (Cl), CdTe - детекторов

- Идентификация образцов произвольного радионуклидного состава
- Определение степени обогащения урановых образцов
- Изотопный анализ плутониевых образцов

## Введение

Проблемы идентификации ядерных и радиоактивных материалов при их нелегальном перемещении связаны в основном с двумя обстоятельствами:

- недостаточная квалификация персонала (офицеры пограничных, таможенных служб и т.д.), непосредственно проводящего измерения в полевых условиях;
- не всегда корректное программное обеспечение, используемое в портативных спектрометрах - идентификаторах.

## Общие принципы

В основе идентификации лежит сравнение энергетического распределения измеренного спектра  $S(N)$  с энергетическим распределением отдельных радионуклидов  $g_i(E)$ .

- Сравнение энергетических распределений

$$S(N) \Rightarrow G(E) \quad G(E) = \sum a_i \cdot g_i(E)$$

- Сравнение измеренных спектров (Метод эталонных спектров, *Templates method*)

$$g_i(E) \Rightarrow s_i(N) \quad S(n) = \sum b_i \cdot s_i(n)$$

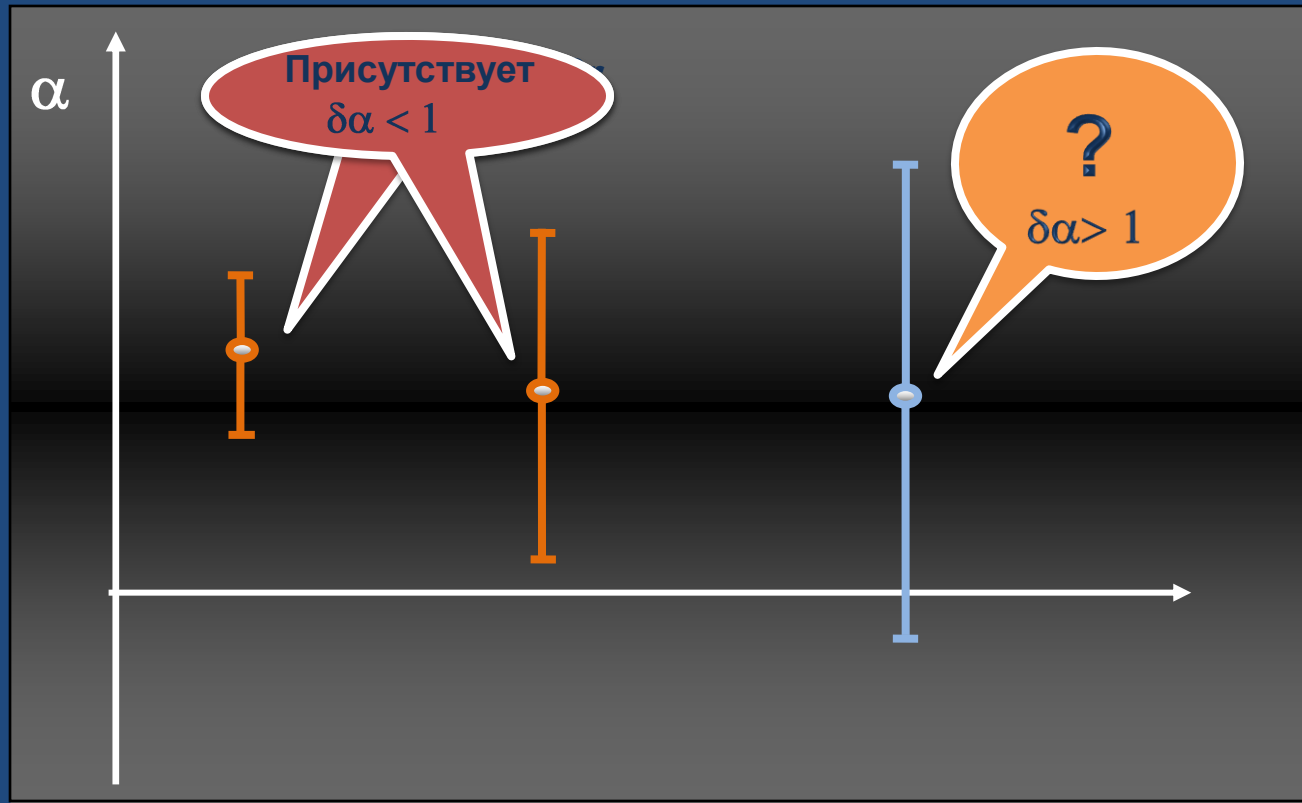
Если  $\left\{ \begin{array}{l} a_i > \Delta a_i \\ b_i > \Delta b_i \end{array} \right.$  Нуклид присутствует в пробе

## Критерии идентификации

Что такое успешная  
идентификация ?  
Каковы ее критерии?

## Критерии идентификации

Статистическая достоверность  $a_i > \Delta a_i \iff \delta a_i < 1$



# Критерии идентификации

## Полнота

DC (Dose Contribution)

$$DC = \frac{D_{unident}}{D_{total}} \cdot 100$$

$$D = \sum_i \frac{S_i \cdot E_i}{\varepsilon(E_i)}$$

$S_i \cdot E_i$  - энергии и площади пиков

$\varepsilon(E_i)$  - эффективность регистрации

## Критерии идентификации

### Однозначность

CI- Confidence index

$$CI = \log \left( \frac{1}{\delta E_1 \cdot \delta E_2 \cdot \delta E_3 \dots \cdot \delta I_2 \cdot \delta I_3 \dots} \right)$$

$\delta E_i, \delta I_i$  - Относительные погрешности энергии и интенсивности

[1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical and functional specifications for border monitoring equipment, Revision 1, IAEA Nuclear Security Series No1, IAEA, Vienna (2008).



## Критерии идентификации

### Индекс доверия для различных детекторов

|        | HPGe | NaI  | LaBr3 |
|--------|------|------|-------|
| Cs-137 | 2.8  | 1.8  | 2.0   |
| K-40   | 3.2  | 2.2  | 2.4   |
| Na-22  | 6.7  | 3.8  | 4.1   |
| Co-60  | 7.3  | 5.9  | 4.8   |
| Cs-134 | 6.8  | 4.4  | -     |
| Ba-133 | 25.4 | 8.5  | 12.7  |
| Eu-152 | 67.4 | 18.3 | 27.2  |
| Th-232 | 97.9 | 16.6 | 17.9  |

## Специфика работы эксперта

- Квалификация эксперта, безусловно, выше квалификации оператора.
- Анализируются спектры от большого количества приборов с различными техническими характеристикам
- Спектры могут быть предоставлены в различных форматах
- Может быть произвольный набор радионуклидов, не соответствующий установленному в используемом приборе.
- Эксперт имеет большее время для анализа спектра.
- Эксперт может подключать для анализа другое программное обеспечение, и использовать разнообразную информацию, включая интернет
- Эксперт, как правило, не может провести дополнительных, повторных измерений, допустим с целью уточнения энергетической калибровки.

## Требования к экспертному программному обеспечению по идентификации радионуклидов

- Конвертор - программа обеспечивающая чтение любых форматов спектров и конвертацию их в один(или несколько) общепринятых форматов. - **"Cambio"**
- Программа получения ядерных данных по параметрам радиоактивного распада произвольных радионуклидов и соответствующая база ядерных данных

**NuclideMaster** [http://www.lsrn.ru/products/nuclide\\_master](http://www.lsrn.ru/products/nuclide_master)

- Программа генерации спектров

**GammaLab** [http://www.lsrn.ru/products/virtual\\_lab/lsrn\\_gammalab](http://www.lsrn.ru/products/virtual_lab/lsrn_gammalab)

**Gamma-Spectrum Generator** <http://www.nucleonica.net>

- Программа идентификации - **SpectraLineID**

## Основные требования к программе идентификации

- Возможность обработки спектров от детекторов различных типов и размеров (HPGe, NaI, LaBr).
- Возможность считывания спектров в наиболее распространенных форматах.
- Желательно наличие нескольких альтернативных алгоритмов идентификации.
- Расчет и вывод одного или нескольких критериев, характеризующих достоверность идентификации.
- При задании корректных параметров измерения - расстоянии, поглощающих слоев, возможность оценки значений активности идентифицированных радионуклидов.
- Учет внешнего и собственного (в случае LaBr -детекторов) фона спектрометра.
- Учет поглощения гамма-излучения в защитных слоях. Возможности оценки толщины слоя в случае неизвестных объектов.
- Возможность коррекции энергетической калибровки в интерактивном режиме, например, по фоновым линиям спектра. Перенос энергетической калибровки из одного спектра в другой.
- Изменение библиотеки радионуклидов. Подключение полной базы радионуклидов. Анализ цепочек распада.
- Интерактивный режим с программой, позволяющий проводить визуальное сравнение спектров для анализа присутствия какого-либо радионуклида.

## SpectraLineID -форматы спектров

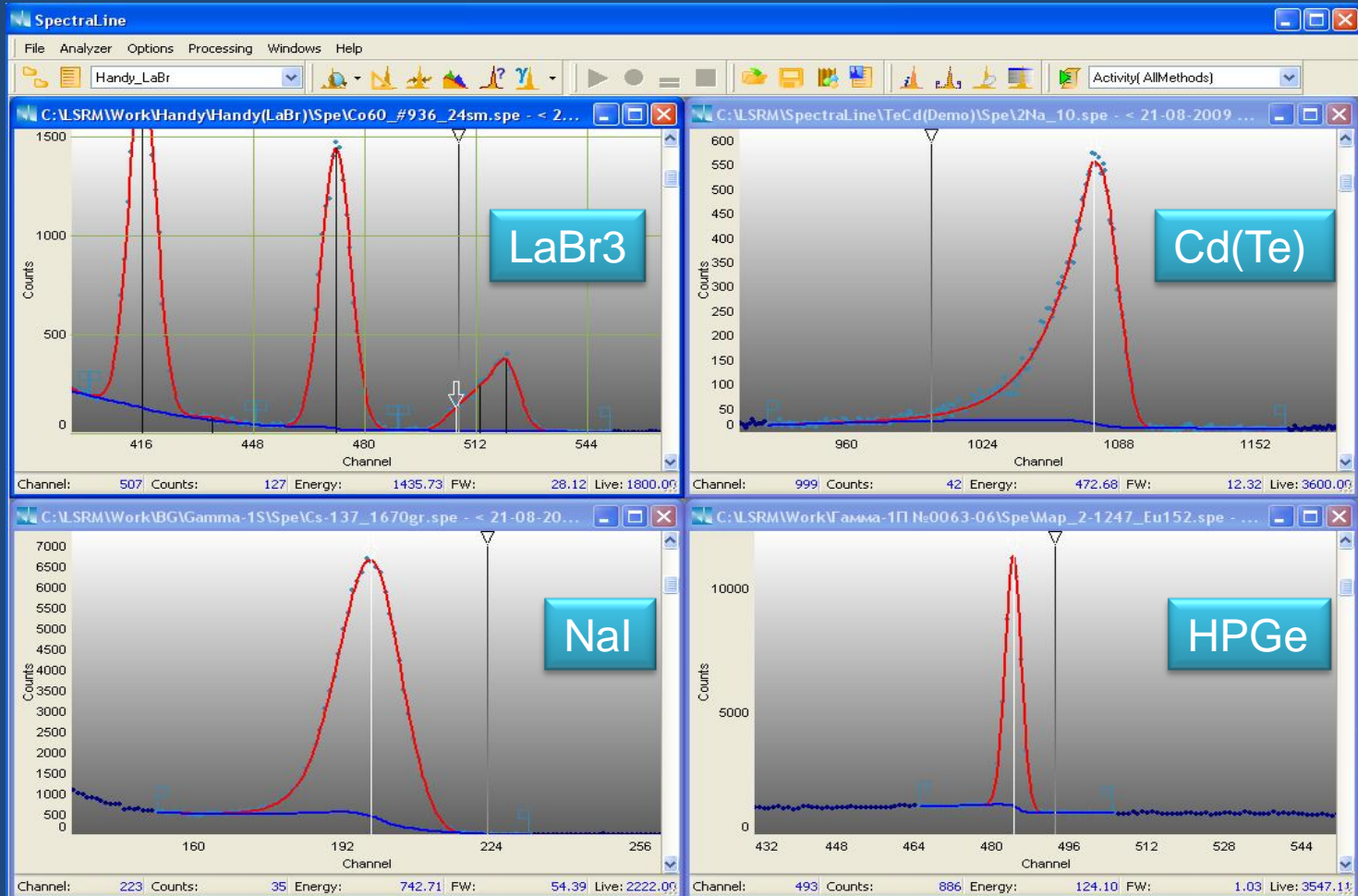
SpectraLineID поддерживает самостоятельно чтение несколько распространенных форматов спектров:

- ORTEC CHN
- IAEA SPE
- ASCII ASC
- CANBERRA CNF

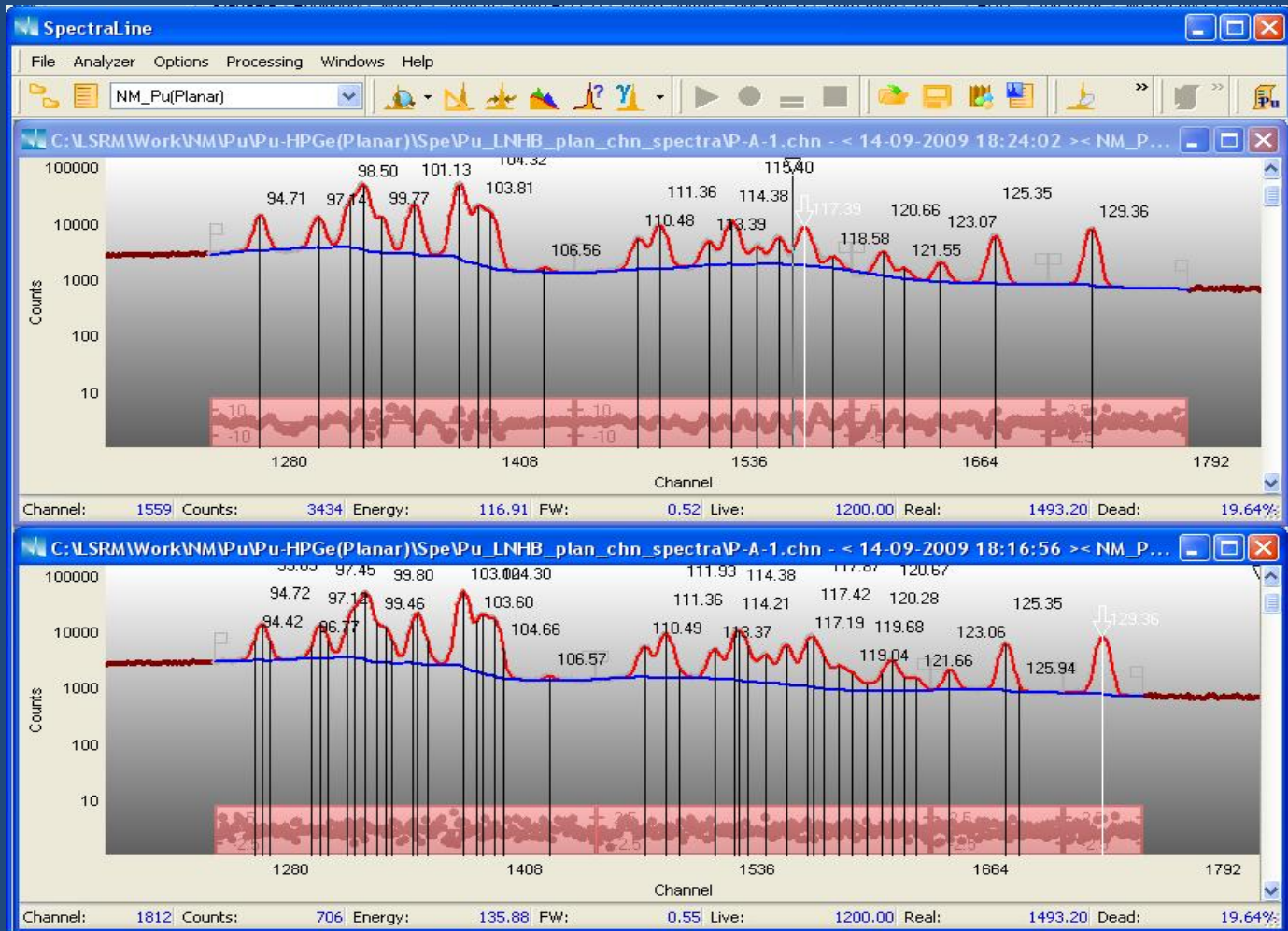
Форматы СНГ-производителей

- ASPECT SPC
- GREEN STAR SPS
- ATOMTEX SPE

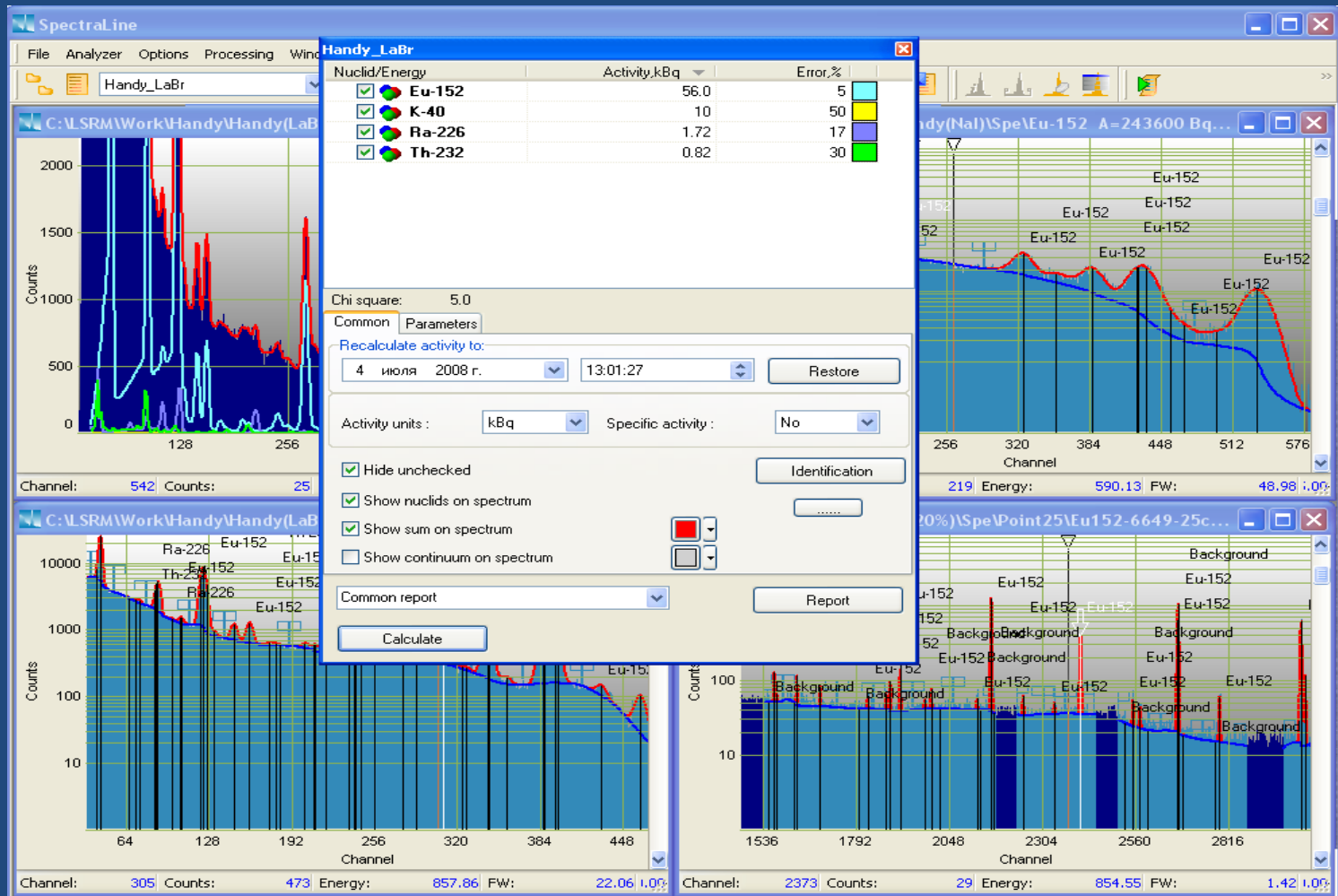
# SpectraLineID - Детекторы различных типов



# SpectraLineID - Поиск пиков



# SpectraLineID - Различные методы обработки





# SpectraLineID Учет поглощения гамма-излучения в защитных слоях



**New container - Create new container**

Container mark:  
 UKT-PM (container in package)  
 TK-DM (container without package)

УКТ 1В - Group  
 КИЗ-50М - Container mark  
 - Mark of set

Container parametres:  
 17.5 - container height [cm]  
 8.65 - height to cavity bottom [cm]  
 1.2 - cavity height [cm]

Container layers:

| Material | Width[cm] |
|----------|-----------|
| Air      | 0.6       |
| Lead     | 5.3       |
| Iron     | 0.3       |
|          | 1         |
| Steel10  | 1         |

R = 8.2 Container radius

New Edit Delete Save Clear Exit

# SpectraLineID

## Оценка толщины слоя



|      | KT1-5 ( t =5mm) | KT1-10 ( t =10 mm) | KT1-20 ( t =20 mm) |
|------|-----------------|--------------------|--------------------|
| HPGe | 5               | 9                  | 19                 |
| NaI  | 6               | 12                 | 24                 |

# SpectraLineID Фильтр по энергии

IdentInfoForm

| Line energy / Nuclide                               | Line area / Energy | Activity / Nuclide      | Activity / |
|---|--------------------|-------------------------|------------|
| 803.239   | 134 (±23)          |                         |            |
| <input checked="" type="checkbox"/> V-48 15.97(day) | 803.25 (±0.08)     | 565989.77 (±130000)     |            |
| <input type="checkbox"/> Hg-193M 11.8(hour)         | 803.22 (±0.25)     | 2209285.2 (±1000000)    |            |
| <input type="checkbox"/> At-203 7.4(min)            | 803.2 (±0.2)       | 17084.65 (±3000)        |            |
| <input type="checkbox"/> Tl-206 4.2(min)            | 803.3 (±0.2)       | 16977283.03 (±4000000)  |            |
| <input type="checkbox"/> Te-133 12.5(min)           | 803.3 (±0.3)       | 647790.10 (±150000)     |            |
| <input type="checkbox"/> Ho-150M 23.3(сек)          | 803.3 (±0.2)       | 853.04 (±160)           |            |
| <input type="checkbox"/> Po-210 138.38(day)         | 803.1 (±0.01)      | 70137764.47 (±13000000) |            |
| <input type="checkbox"/> Pb-206M 1.3E-04(s...       | 803.1 (±0.1)       | 857.24 (±160)           |            |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)           | 803.1 (±0.05)      | 858.11 (±160)           |            |
| <input type="checkbox"/> Bi-196M 4.0(min)           | 803.1 (±0.5)       | 264758.3 (±140000)      |            |
| <input type="checkbox"/> Ba-124 11.0(min)           | 803.4 AP           | 3537344.8 (±)           |            |
| <input type="checkbox"/> As-83 13.4(сек)            | 803.4 (±0.2)       | 27140.75 (±6000)        |            |
| <input type="checkbox"/> Tm-163 1.81(hour)          | 803.469 (±0.022)   | 316991.78 (±60000)      |            |
| <input type="checkbox"/> Tb-150 3.48(hour)          | 803.0 (±1.0)       | 2357134.30 (±700000)    |            |
| <input type="checkbox"/> Sn-107 2.9(min)            | 803.0 (±1.0)       | 13469.34 (±2500)        |            |
| <input type="checkbox"/> Mo-89 2.11(min)            | 803.0 (±1.0)       | 93972.13 (±18000)       |            |
| <input type="checkbox"/> Ba-129M 2.16(hour)         | 803.0 (±0.1)       | 9959.72 (±1900)         |            |
| <input type="checkbox"/> Th-227 18.72(day)          | 803.5 (±0.2)       | 92039170.67 (±22000000) |            |
| <input type="checkbox"/> Ru-109 34.5(сек)           | 803.5 (±0.5)       | 428818.9 (±200000)      |            |
| <input type="checkbox"/> Br-86 55.0(сек)            | 803.5 (±0.3)       | 30151.3 (±9000)         |            |
| <input type="checkbox"/> Br-76 16.2(hour)           | 803.5 (±0.2)       | 161602.85 (±30000)      |            |
| <input type="checkbox"/> Yb-163 11.05(min)          | 802.96 (±0.15)     | 101015.3 (±30000)       |            |
| <input type="checkbox"/> Gd-149 9.28(day)           | 802.94 (±0.02)     | 1977969.10 (±400000)    |            |
| <input type="checkbox"/> Te-133 12.5(min)           | 802.9 (±0.3)       | 1359727.2 (±500000)     |            |
| <input type="checkbox"/> Ba-130M 9.4E-03(s...       | 802.9 (±0.5)       | 9769.37 (±2100)         |            |
| <input type="checkbox"/> Ag-121 0.78(сек)           | 803.58 (±0.1)      | 132264.83 (±28000)      |            |
| <input type="checkbox"/> Re-181 19.9(hour)          | 803.6 (±0.4)       | 57375.7 (±30000)        |            |
| <input type="checkbox"/> Dy-155 9.9(hour)           | 802.87 (±0.06)     | 4961638.39 (±1100000)   |            |

By all nuclides in database

Identification window (keV): 1.0

Nuclides decay chain

Maximal activity: 1000

Meas. date: 01-07-2008 19:25:20

T1: 0.0E+0 Years

1 июля 2008 г. 19:04:44

T2: 0.0E+0 Years

1 июля 2008 г. 19:04:44

Filter by chain

Scan spectrum

show PDV  show PDV

show sum peak  show DB data

Identify line 803.239 keV

Identify all lines

Show identified lines

Show unidentified lines

Activity units: Bq

Get lines for Po-210

Add to library

Close

# SpectraLineID - Фильтр по периоду полураспада

**IdentInfoForm**

| Line energy / Nuclide   | Line area / Energy   | Activity / Nuclide     | Activity / Energy         | Fitting criteria / ...  |
|---|----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> <b>803.025</b>            | 144 (±24)            |                        |                           |                         |
| <input checked="" type="checkbox"/> <b>Po-210 138.38(day)</b> | <b>803.1 (±0.01)</b> | <b>470984948.16611</b> | <b>Po-210 138.38(day)</b> | <b>01-07-2007 19...</b> |
| <input type="checkbox"/> Po-210 138.38(day)                   | 803.1 (±0.01)        | 92061274.876896        | Pb-210 22.3(year)         | 01-07-2007 19...        |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)                     | 803.1 (±0.05)        | 49893225.686877        | Fr-210 3.18(min)          | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)                     | 803.1 (±0.05)        | 889792572.454833       | Ac-214 8.2(sek)           | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)                     | 803.1 (±0.05)        | 440806.139377          | Rn-210 2.4(hour)          | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)                     | 803.1 (±0.05)        | 25759.992504           | Bi-206 6.24(day)          | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)                     | 803.1 (±0.05)        | 4850.072138            | Po-206 8.8(day)           | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)                     | 803.1 (±0.05)        | 2063403.632578         | At-206 30.0(min)          | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Bi-206 6.24(day)                     | 803.1 (±0.05)        | 257567213.938986       | At-210 8.1(hour)          | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Gd-149 9.28(day)                     | 802.94 (±0.02)       | 19962614.522934        | Gd-149 9.28(day)          | 01-06-2008 19...        |
| <input type="checkbox"/> Tl-206 4.2(min)                      | 803.3 (±0.2)         | 18226735.504319        | Bi-210M 3.0E+06(...)      | 01-07-2007 19...        |

| Line energy | Energy error | Intensity | Intensity error | Line t... |
|-------------|--------------|-----------|-----------------|-----------|
|             |              |           |                 |           |

By all nuclides in database

Identification window (keV): 0.1

Nuclides decay chain

Maximal activity: 1.0E+9

Meas. date: 01-07-2008 19:25:20

T1: 1.0E+0 Years

show POV  show PDV

show sum peak  show DB data

Identify line 803.025 keV

Identify all lines

Show identified lines

Show unidentified lines

Activity units: Bq

Get lines for Po-210

Add to library

Close

# SpectraLineID Контроль энергетического спектра

**IdentInfoForm**

| Line energy / Nuclide                                      | Line area / Energy | Activity / Nuclide      | Activity / Energy | Fitting criteri... |
|--|--------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> <b>803.239</b>         | 134 (±23)          |                         |                   |                    |
| <input checked="" type="checkbox"/> <b>TI-206</b> 4.2(min) | 803.3 (±0.2)       | 16977283.03 (±4000000)  |                   |                    |
| <input type="checkbox"/> <b>Po-210</b> 138.38(day)         | 803.1 (±0.01)      | 70137764.47 (±13000000) |                   |                    |

| Line energy | Energy error | Intensity | Intensity error | Line t... |
|-------------|--------------|-----------|-----------------|-----------|
|             |              |           |                 |           |

By all nuclides in database

Identification window (keV): 1.0

Nuclides decay chain

Maximal activity: 1.0E+10

Meas. date: 01-07-2008 19:25:20

T1: 1.0E+0 Years  
1 июля 2007 г. 19:25:20

T2: 1.0E+0 Days  
30 июня 2008 г. 19:25:20

Filter by chain

Scan spectrum

show POV  show PDV

show sum peak  show DB data

Identify line 803.239 keV

Identify all lines

Show identified lines

Show unidentified lines

Activity units: Bq

Get lines for Po-210

Add to library

Close

# SpectraLineID Визуальное сравнение спектров



## Conclusion

The results of the project execution:

- The software for expert support of field measurements for nuclear and radioactive materials identification **SpectraLineID** was developed.
- It includes analytical identification methods and heuristic approaches, based on the visual comparison of spectra under investigation.
- The software allows to deal with detectors of different types with both high and low resolution.
- Quantitative criteria for successful identification are formulated.

The program **SpectraLineID** combined with existing program products :

- for spectrum format conversion (**Cambio**),
- for radioactive decay parameters (**NuclideMaster**),
- for spectrum generation (**GammaLab, Gamma-Spectrum Generator**)

may be included into the program complex for expert software.

Further development of the work :

- The program complex should be supplemented with methods of determining of the isotopic ratio for Uranium and Plutonium. The most urgent developing of these methods should be for new types of identifiers on the base of HPGe-detectors with electrical cooling and LaBr, LaCl detectors.
- Determining of the upper level activity of identified nuclides estimation in case if sources matrix and protection layers are unknown.

## Заключение

Результаты выполнения проекта:

В рамках настоящей работы было разработано программное обеспечение для экспертной поддержки полевых измерений по идентификации ядерных и радиоактивных материалов **SpectraLineID**. Оно включает, как аналитические методы идентификации, так и эвристические приемы, основанные на визуальном сравнении спектров. Оно позволяет работать с детекторами различного типа как высокого, так и низкого разрешения.

Дополненное существующими продуктами

- по конвертации спектров из разных форматов (**Cambio**),
- по параметрам радиоактивного распада (**NuclideMaster**),
- по генерации спектров (**GammaLab**, **Gamma-Spectrum Generator**)

оно может быть включено в состав комплекса по экспертному программному обеспечению.

Дальнейшее развитие работы связано с решением следующих задач:

- Дополнение методами определения изотопного состава урана и плутония. Наиболее актуально развитие этих методов для новых типов идентификаторов на основе HPGe- детекторов с электрическим охлаждением и LaBr, LaCl-детекторов;



Спасибо за внимание!

**Full report**

<http://www.lsrn.ru/help/articles/>



**LABORATORY  
of spectrometry  
and radiometry**

<http://www.lsrn.ru>  
mail: [lsrn@lsrn.ru](mailto:lsrn@lsrn.ru)  
Phone: +7 495 660-16-14  
Located in Moscow, Russia

## Definitions

Identification means the determination of set of nuclides, which explains (decrypts) measured spectrum.

## Identification criteria

Statistical reliability

$$a_i > \Delta a_i \quad \longleftrightarrow \quad \delta a_i < 1$$

