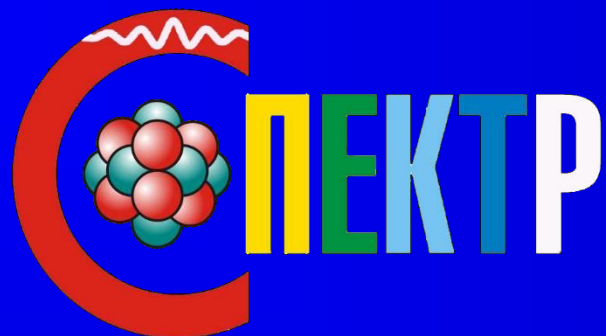
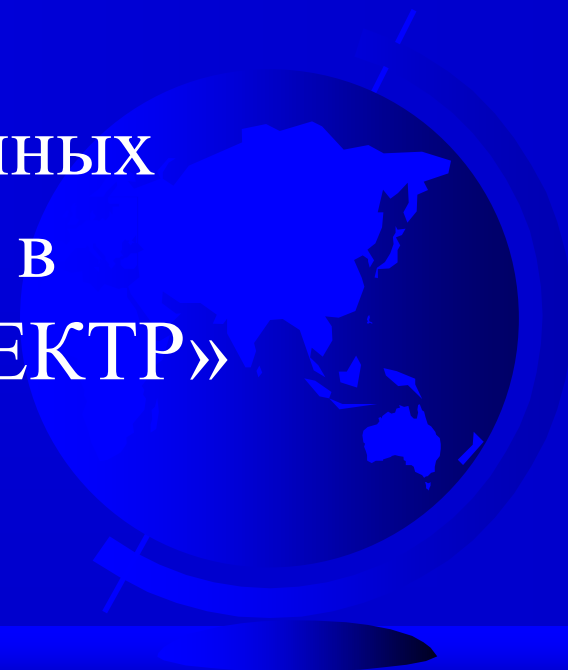
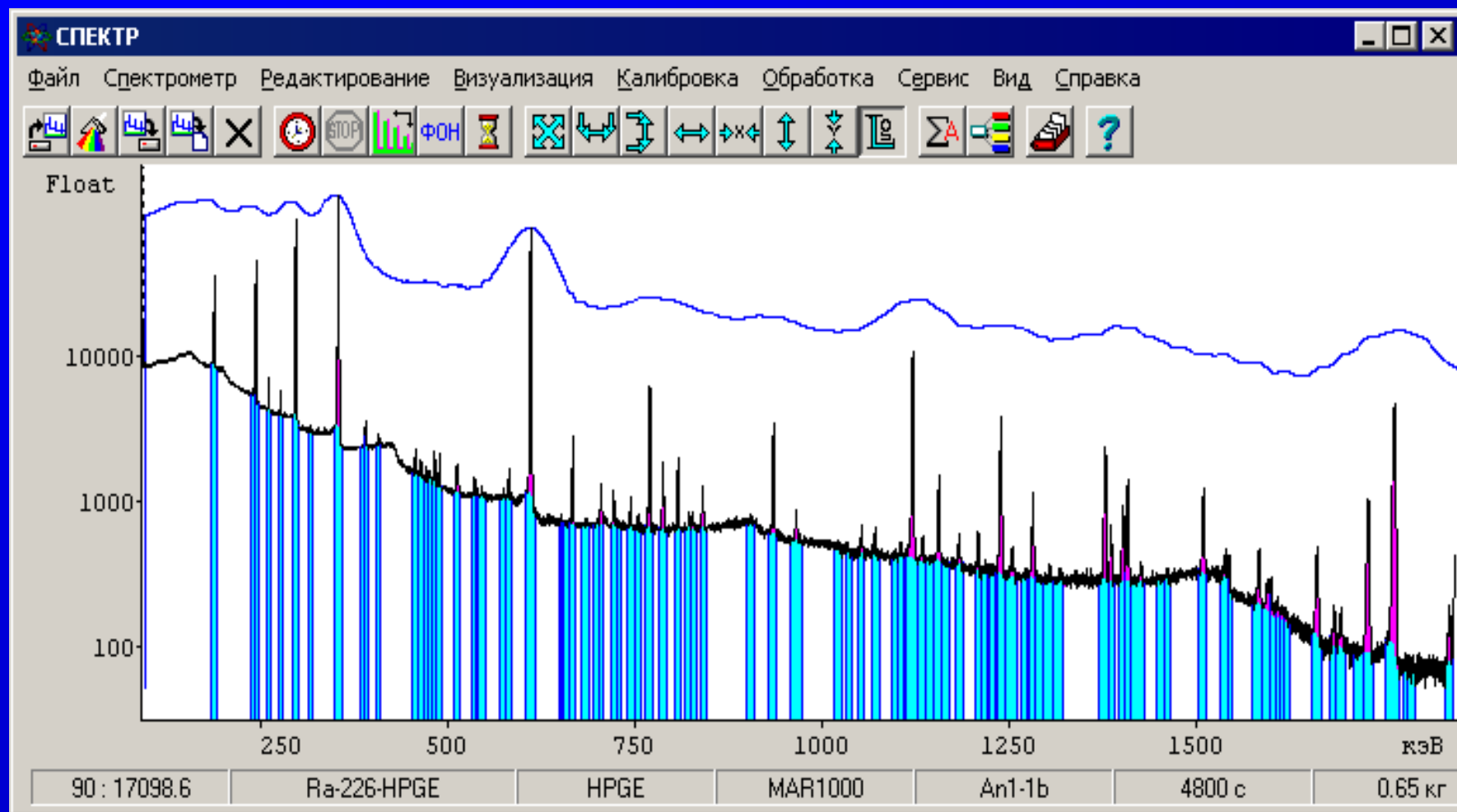




Декомпозиция разрешённых
линейчатых спектров в
программном пакете «СПЕКТР»

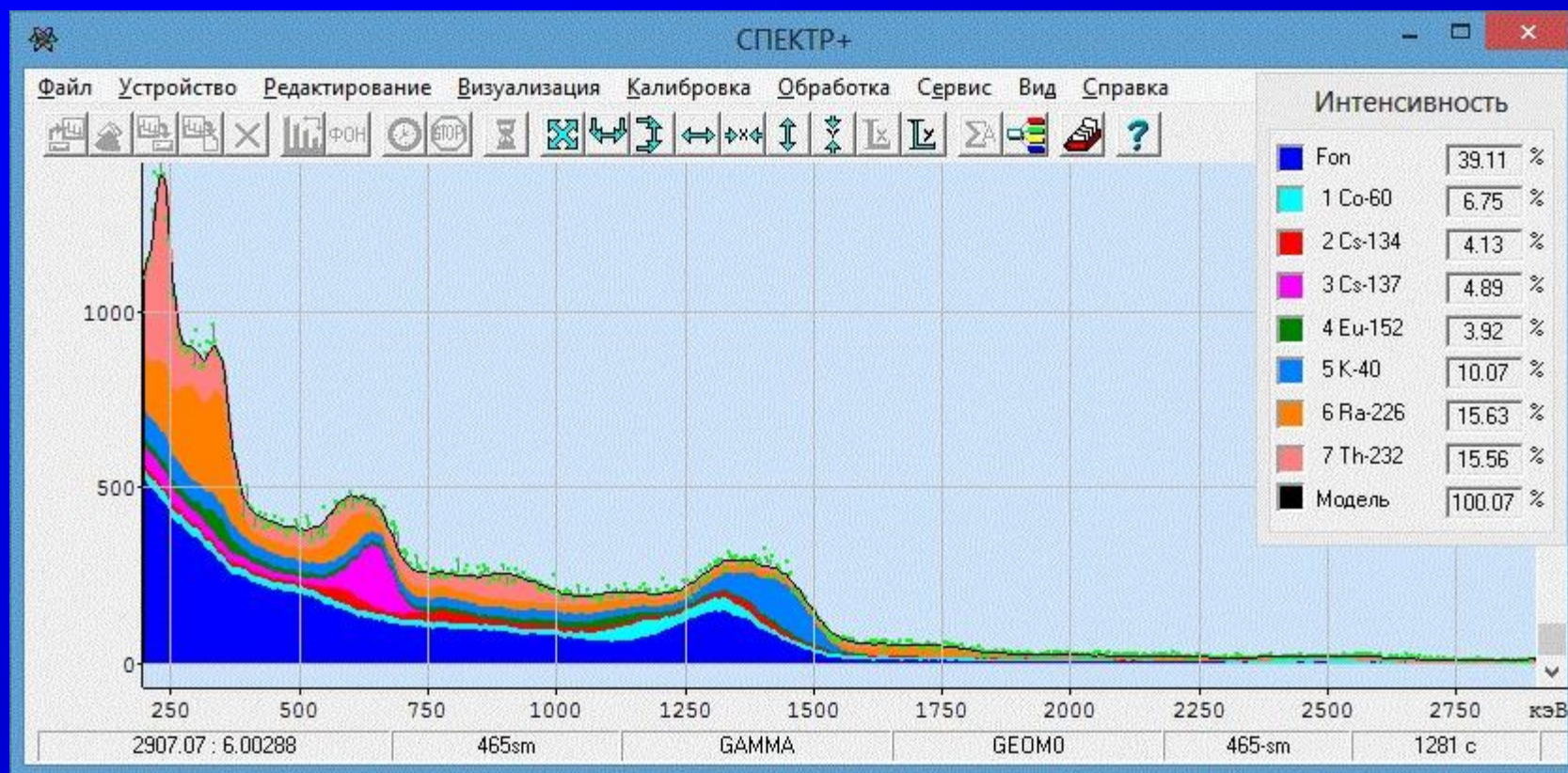


Энергетическое разрешение



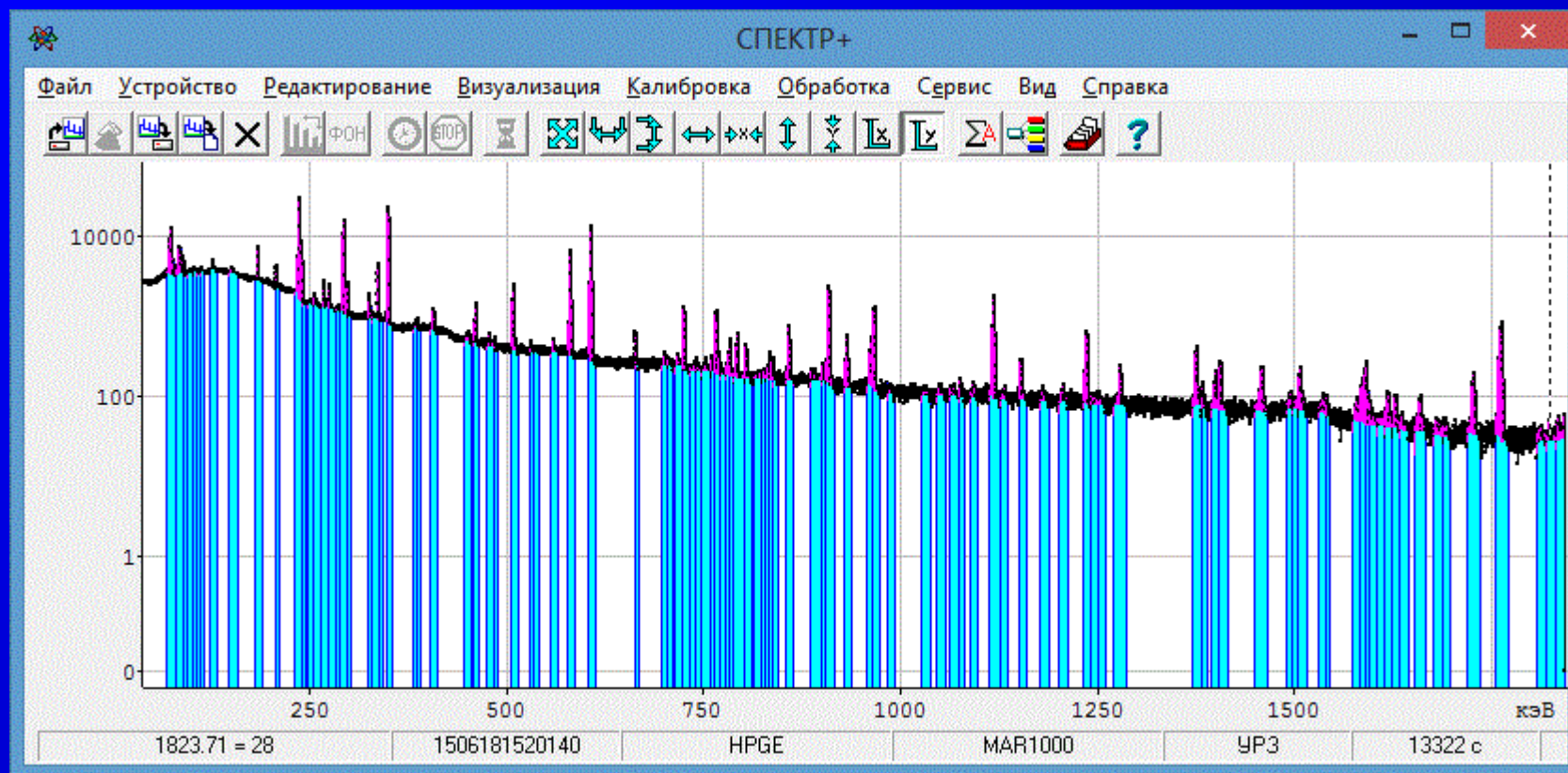
Спектр Ra-226

Декомпозиция сцинтилляционного гамма спектра



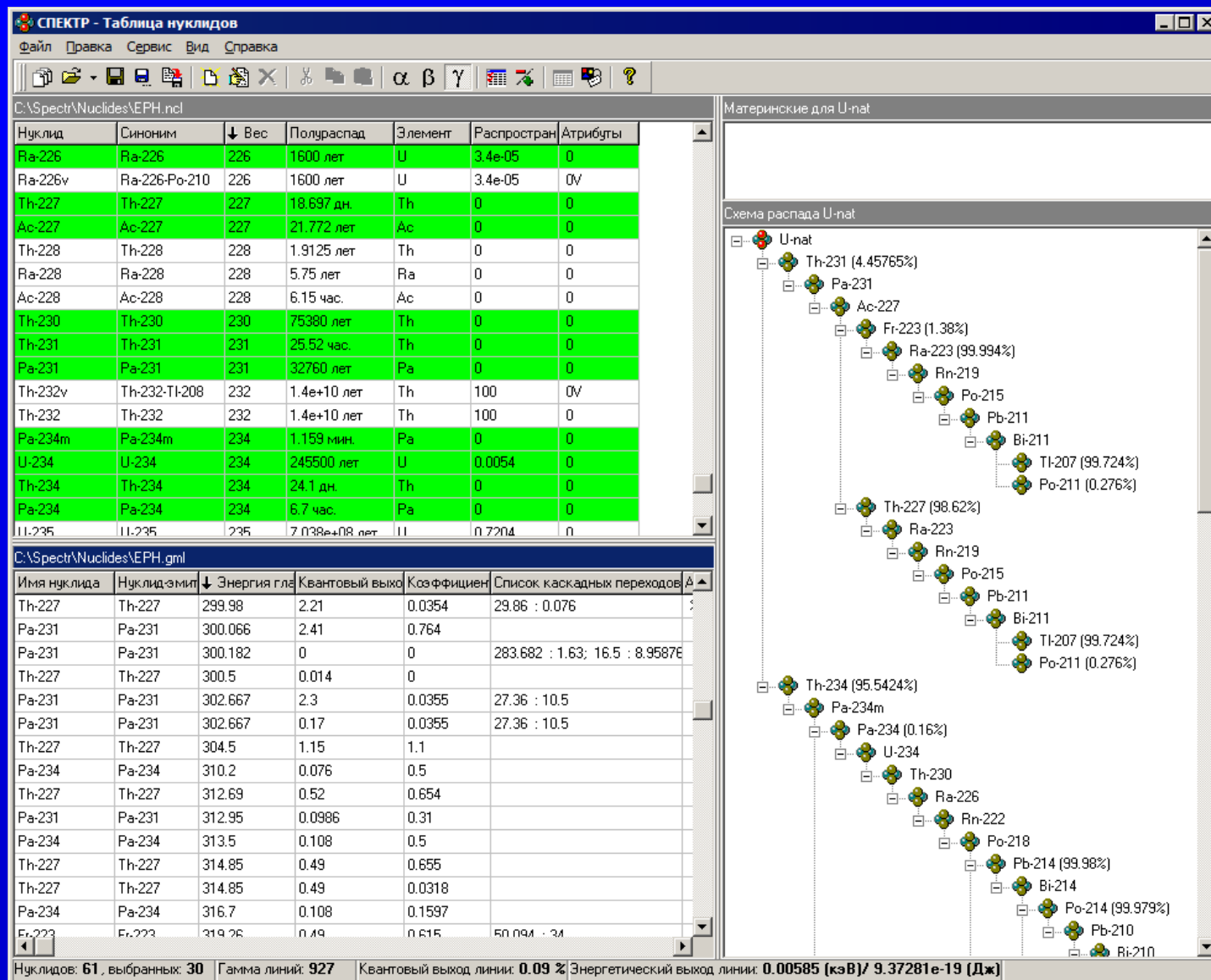
Обработка стандартным методом с коррекцией линейного дрейфа

Гамма спектр грунта



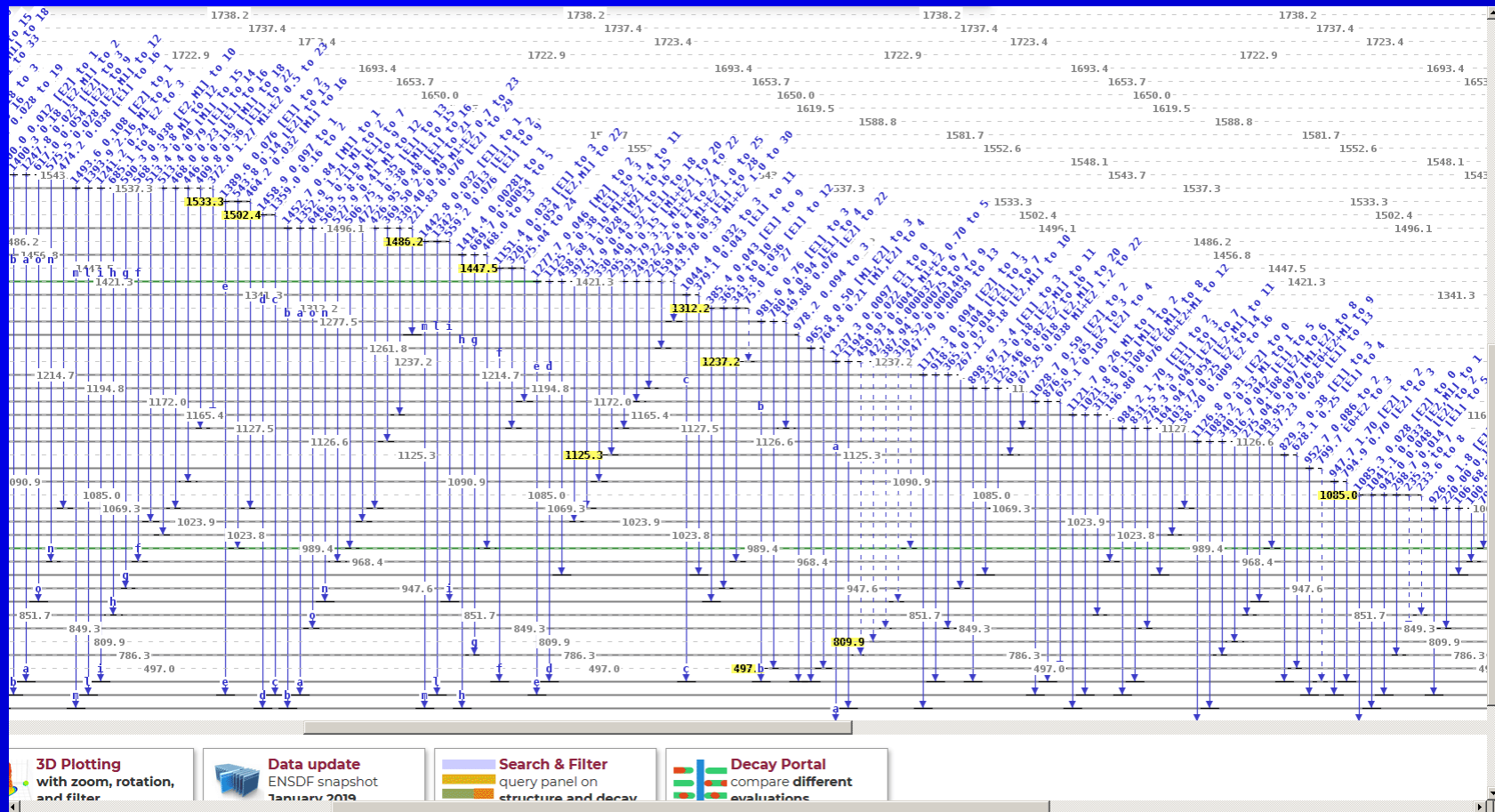
Проба грунта отобранного в Измайловском парке

Схема распада природного урана



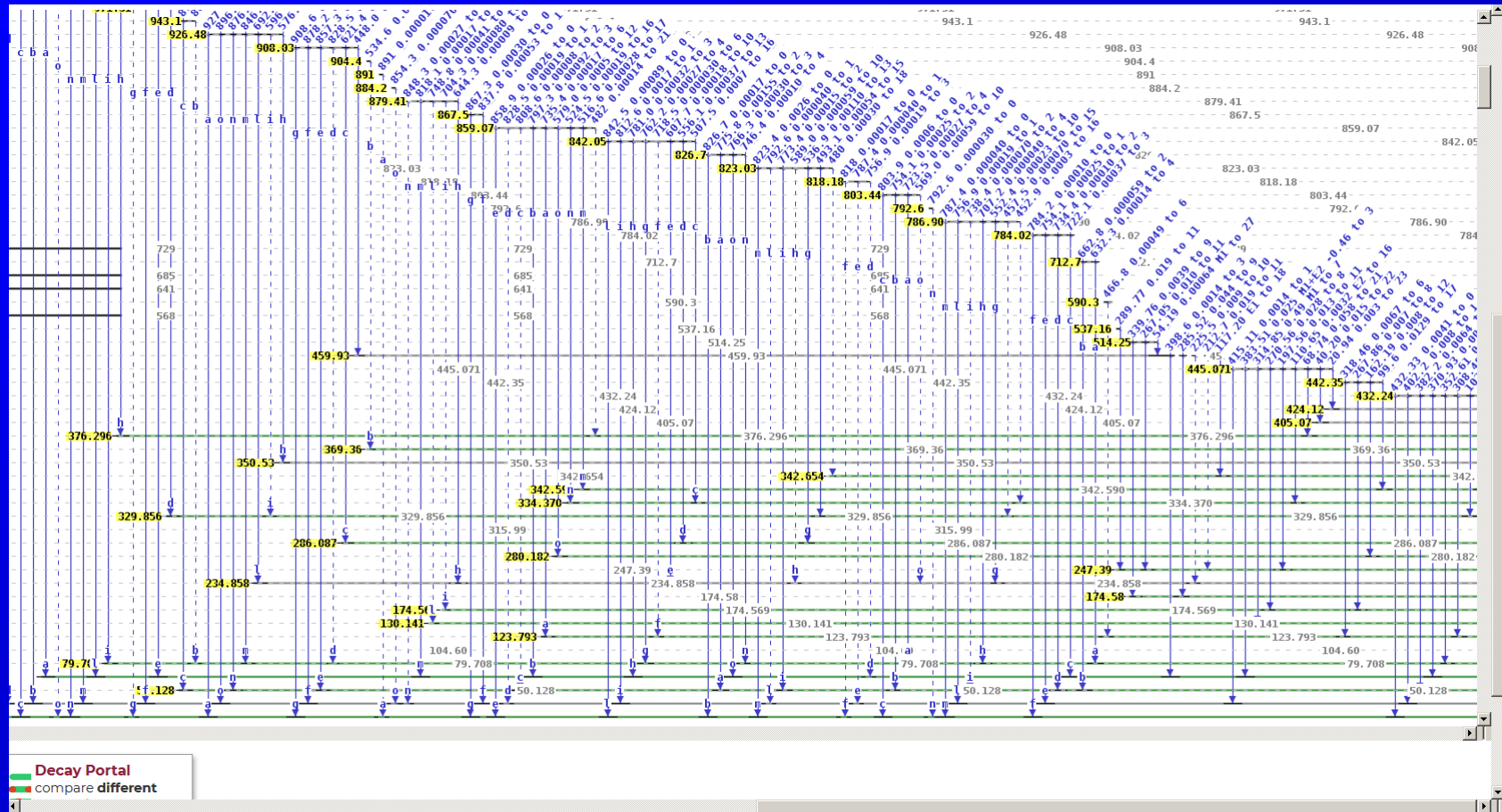
2 ветви U-235 и 10 ветвей U-238, 30 нуклидов, несколько тысяч линий

Схема гамма линий Ra-234 (дочка U-238)



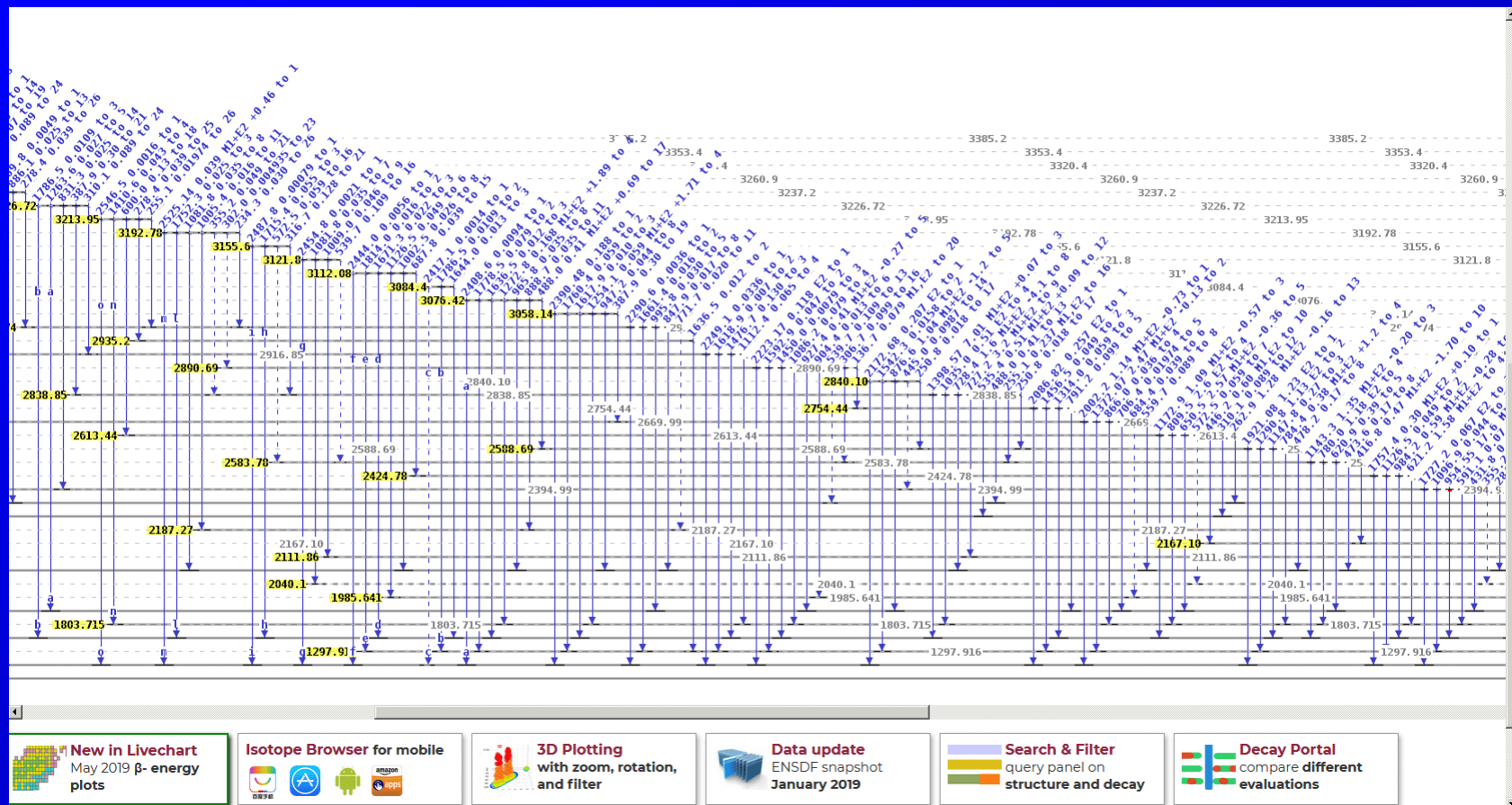
Данные ENSDF опубликованные на [сайте МАГАТЭ](http://www.nndc.bnl.gov)

Схема гамма линий Th-227 (дочка U-235)



Данные ENSDF опубликованные на [сайте МАГАТЭ](http://www.nndc.gov/)

Схема гамма линий I-132 (список ДВЗЯИ)



Данные ENSDF опубликованные на [сайте МАГАТЭ](http://www.nndc.gov/)

Формирование компонент

СПЕКТР - Таблица нуклидов

Файл Правка Сервис Вид Справка

Активность нуклида...
 Равновесная цепочка
 Смесь нуклидов...
 Линии утечки
 Линии сложения каскадных
 Аттестат эталона...
 Текстовая таблица...
 Настройки...

Сформировать...
 Расформировать...
 Расформировать все цепочки

Нуклид	Синоним	Масса	Период полураспада	Элемент	0	0	0
Ra-226v	Ra-226				0	0	0
Ac-227	Ac-227				0	0	0
Th-227	Th-227				0	0	0
Th-228	Th-228				0	0	0
Ra-228	Ra-228				0	0	0
Ac-228	Ac-228	228	6.15 час.	Ac	0	0	0
Th-230	Th-230	230	75380 лет	Th	0	0	0
Th-231	Th-231	231	25.52 час.	Th	0	0	0

C:\Spectr\Nuclides\EPH.gml

Имя нуклида	Нуклид-эмит	Энергия	Погрешность	Квантовый	Погрешность	Коеффициент	Список к.
U-nat	U-nat	13	0	6.97459	0	0	
U-nat	U-nat	19.55	0	2.80832	0	0	
U-nat	U-nat	41.96	0	0.00267459	0	450	
U-nat	U-nat	49.55	0	0.0611471	0	326.4	
U-nat	U-nat	51.21	0	0.0015156	0	274	
U-nat	U-nat	72.7	0	0.00534918	0	50.8	
U-nat	U-nat	89.957	0	0.15468	0	0	
U-nat	U-nat	93.35	0	0.249628	0	0	
U-nat	U-nat	96.09	0	0.00405646	0	13.58	
U-nat	U-nat	104.819	0	0.0308469	0	0	
U-nat	U-nat	105.604	0	0.058841	0	0	

Нуклидов: 56 | Гамма линий: 28 | Квантовый выход линии: 6.97459 % | Энергетический выход линии: 0.906697 (кэВ)/ 1.4527e-16 (Дж)

Материнские для U-nat

Схема распада U-nat

```

    graph TD
      U-nat --> Th-231["Th-231 (4.45765%)"]
      U-nat --> Th-234["Th-234 (95.5424%)"]
      Th-234 --> Pa-234m["Pa-234m"]
      Pa-234m --> Pa-234["Pa-234 (0.16%)"]
      Pa-234 --> U-234["U-234"]
      U-234 --> Th-230["Th-230"]
      U-234 --> U-234_99["U-234 (99.84%)"]
      U-234_99 --> Th-230
  
```

Формирование равновесной цепочки из части нуклидов природного урана 9

Формирование компонент

Расчёт активности

☐ Пересчёт средних за время измерения активностей на дату начала измерений

Материнский нуклид

Начальная дата

Конечная дата

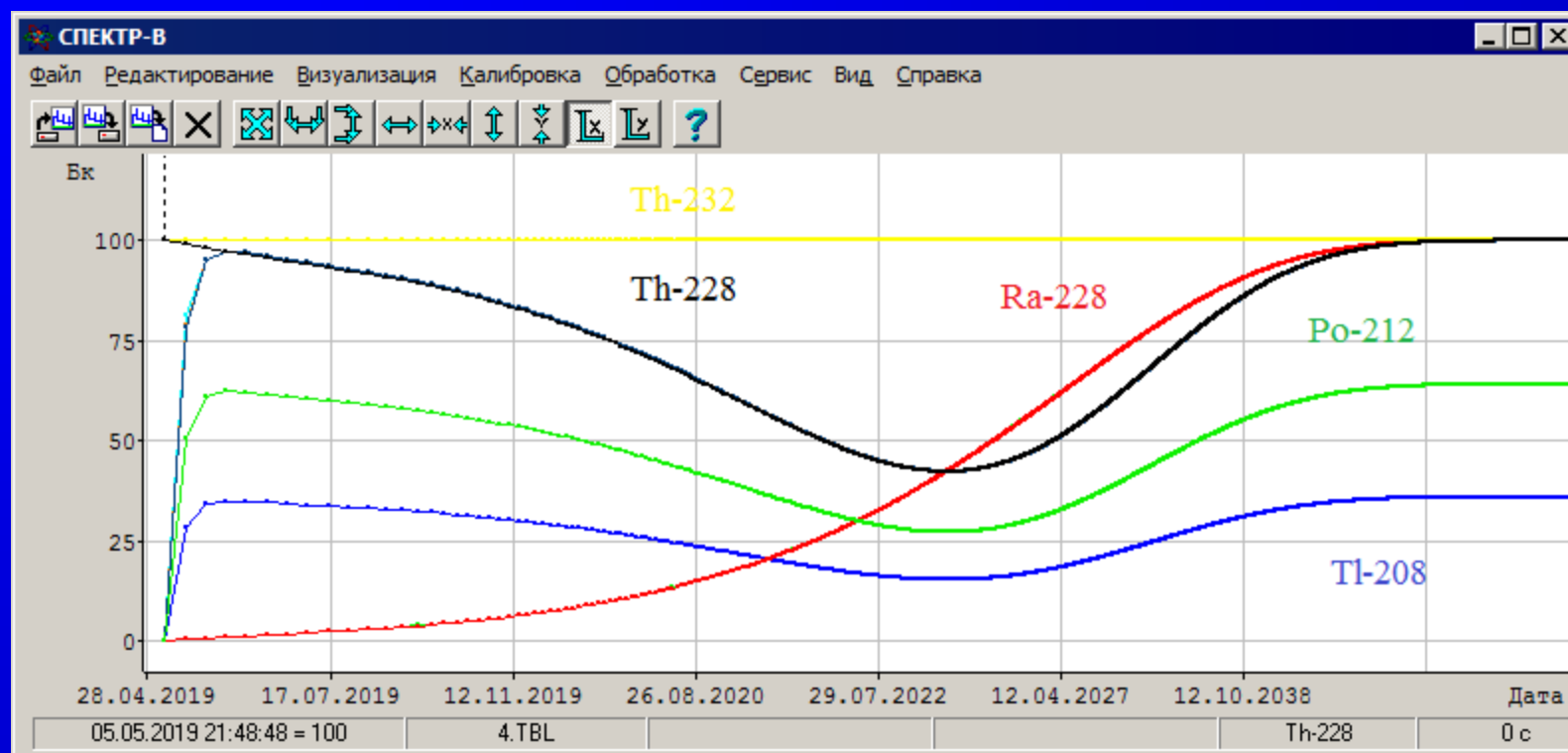
Продолжительность распада: 97484 дн. 21 час. 12 мин. 24 сс

Активность нуклидов схемы распада

Нуклид	Период полурасп	Доля в распаде	Активность	Доля в активнос
U-nat	4.468e+09 лет	100	100	100
Th-234	24.1 дн.	95,542	95,542	95,542
Pa-234m	1.159 мин.	95,542	95,542	95,542
Pa-234	6.7 час.	0,15287	0,15287	0,15287
U-234	245500 лет	95,542	95,548	95,548
Th-230	75380 лет	95,542	95,549	95,549

Расчёт активностей нуклидов в цепочке решением системы неоднородных₁₀ дифференциальных уравнений

Формирование компонент



Распад 100 Бк Th-232 и 100 Бк Th-228 после выделения.

Формирование компонент

СПЕКТР - Таблица нуклидов

Файл Правка Сервис Вид Справка

C:\Spectr\Nuclides\EPH.ncl

Нуклид	Синоним	↓ Вес	Полураспад	Элемент	Распространен	Гамма-экв. R	Атм
Pa-231	Pa-231	231	32760 лет	Pa	0	0	0f
Th-232v	Th-232-Tl-20	232	1.4e+10 лет	Th	100	1.3	0v
Th-232	Th-232	232	1.4e+10 лет	Th	100	1.3	0
Pa-234m	Pa-234m	234	1.159 мин.	Pa	0	0	0r
Th-234	Th-234	234	24.1 дн.	Th	0	0	0r
Pa-234	Pa-234	234	6.7 час.	Pa	0	0	0r
U-235	U-235	235	7.038e+08 л	U	0.7204	0	0
U-nat	U-nat	237.978	4.468e+09 л	U	100	0	0f
U-238	U-238	238	4.468e+09 л	U	99.2742	0	0

C:\Spectr\Nuclides\EPH.gml

Имя нуклид	Нуклид-эми	↓ Энергия	Погрешност	Квантовый	Погрешност	Коеффицие	Список к
U-nat	Th-230	12.3	0	7.35727	0	0	
U-nat	U-nat	13	0	6.97459	0	0	
U-nat	U-234	13	0	9.5548	0	0	
U-nat	Pa-234m	13.3	0	0.0515929	0	0	
U-nat	Th-231	13.3	0	2.63001	0	0	
U-nat	Th-234	13.3	0	6.78351	0	0	
U-nat	Pa-234m	13.6	0	0.0129938	0	0	
U-nat	Pa-234	16.7	0	0.132995	0	0	
U-nat	Th-231	17.2	0	0.0102526	0	193	
U-nat	Th-231	19.1	0	0.0102526	0	0	

Материнские для U-nat

Схема распада U-nat

- U-nat
 - Pa-231 (4.45765%)
 - Pa-226 (95.5423%)
 - Rn-222
 - Pb-210 (99.959%)
 - Pb-210 (0.0209958%)
 - Pb-210 (0.0199758%)
 - Pb-210 (4.1958e-06%)
 - Pb-210 (2e-05%)

Нуклидов: 36 Гамма линий: 448 Квантовый выход линии: 7.35727 % Энергетический выход линии: 0.904945 (кэВ)/ 1.44989e-16 (Дж)

Сформированные таблицы линий для расчёта компонент из нуклидов 12 природного урана

Формирование компонент

СПЕКТР - Таблица нуклидов

Файл Правка Сервис Вид Справка

C:\Spectr\Nuclides\LongLive.ncl

Нуклид	Синоним	↑ Вес	Полураспад	Элемент	Распростран	Атрибуты
Am-243	Am-243	243	7364 лет	Am	0	0
Am-241	Am-241	241	432.6 лет	Am	0	0
Pu-241	Pu-241	241	14.4 лет	Pu	0	0
Pu-240	Pu-240	240	6561 лет	Pu	0	0
Pu-239	Pu-239	239	24110 лет	Pu	0	0
Np-239	Np-239	239	2.356 дн.	Np	0	0
U-238	U-238	238	4.468e+09 лет	U	99.2742	1P
Pu-238	Pu-238	238	87.7 лет	Pu	0	0
U-nat	U-nat	237.978	4.468e+09 лет	U	100	0P

C:\Spectr\Nuclides\LongLive.gml

Имя нуклида	Нуклид-эмит	↓ Энергия глэ	Квантовый выход	Коефициен	Список каскадных пе
I-126	I-126	3.77	4.01	0	
I-126	I-126	4.11	0.059	0	
Tl-202	Tl-202	9.99	29.4	0	
Bi-206	Bi-206	10.6	45.7	0	
U-238	Th-234	20.02	0.005	240	63.3 : 3.7; 92.8 : 2.1
U-nat	Th-234	20.02	0.00477712	240	63.3 : 3.7; 92.8 : 2.1
Ru-103	Rh-103m	20.074	2.16651	0	
Ru-103	Ru-103	20.074	0.25	0	
Rh-102m	Rh-102m	20.216	0.136	0	
Ru-103	Ru-103	20.216	0.477	0	
Ru-103	Rh-103m	20.216	4.0934	0	
U-nat	Th-227	20.25	0.0105508	7.73	

Нуклидов: 164, выбранных: 164 Гамма линий: 7535 Квантовый выход линии: 4.01 % Энергетический выход линии: 0.151177 (кэВ)/ 2.42214e-17 (Дж)

Материнские для Am-241

- Pu-241 (100%)

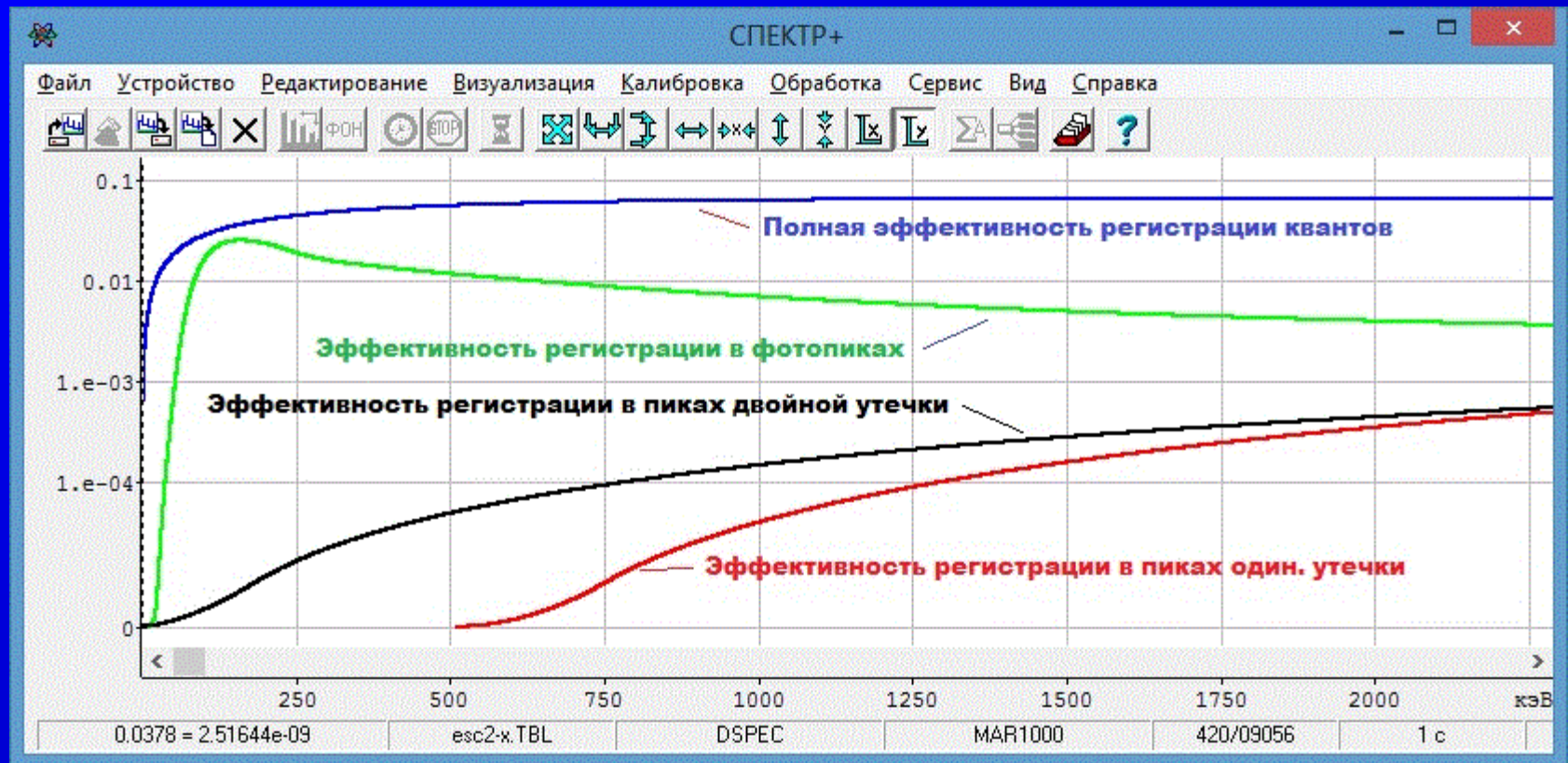
Схема распада Am-241

```

graph TD
    Am241[Am-241] --> Np237[Np-237]
    Np237 --> Pa233[Pa-233]
    Pa233 --> U233[U-233]
    U233 --> Th229[Th-229]
    Th229 --> Ra225[Ra-225]
    Ra225 --> Ac225[Ac-225]
    Ac225 --> Fr221[Fr-221]
    Fr221 --> At217[At-217]
    At217 --> Bi213[Bi-213 (99.9)]
    Bi213 --> Tl209[Tl-209 (99.9)]
    Tl209 --> Pb213[Pb-213]
    Pb213 --> Po213[Po-213]
    Po213 --> Pb214[Pb-214]
    
```

Рабочая таблица на 164 компоненты основных ЕРН и долгоживущих продуктов распада и активации сформирована из 7535 линий

Формирование компонент



Функции эффективностей регистрации необходимые для расчёта компонент

Задача оценивания

Найти такие параметры p_x модели $M(p)$ (p – вектор оцениваемых параметров модели), которые имели бы минимальные дисперсии $D_{px} = \min(D_p)$ и удовлетворяли условию $\|M(p_x) - S\| < E$.

$\|M(p_x) - S\|$ - невязка оценивания,

S - измеренный спектр,

E - заданный порог приемлемости модели.

Для класса линейных оценок, в случае если невязка оценивания больше порога приемлемости, оценивание не может считаться состоятельным.



Теорема Гаусса-Маркова

Для линейной модели $M(p) = Ax \rightarrow Ax = S + \varepsilon$ есть единственное линейное преобразование позволяющее получить наиболее эффективную оценку (BLUE оценку - Best Linear Unbiased Estimators)

$$x = (A^T K_S^{-1} A)^{-1} \cdot A^T K_S^{-1} S, \quad \sigma_{xi} = \sqrt{(A^T K_S^{-1} A)^{-1}_i}$$

A - матрица спектров компонент.

x - оцениваемые вклады компонент.

ε - вектор невязки.

K_S - ковариационная матрица вектора (спектра) S .



Модель спектра

$$M(p, i) = \left\{ \int (\Phi(x, w) \cdot f_0(a_0 \cdot (i - x)^2 + b_0 \cdot (i - x) + c_0) + \right. \\ \left. k(Z, i) \cdot \sum A_j \cdot f_j(a_j \cdot (i - x)^2 + b_j \cdot (i - x) + c_j)) \cdot dx \right\} + S_{compt}(i) + Pn(i) \\ p = (Z, w, a_0, b_0, c_0, A_1, a_1, b_1, c_1, \dots, A_n, a_n, b_n, c_n, Pn_0, \dots, Pn_k).$$

Здесь:

$f_0 = B - B_{compt}$ – спектр фона с вычтенным спектром комптоновского рассеяния

$f_1, \dots, f_n$ – спектры компонент $A_1, \dots, A_n$ – амплитуды соответствующих компонент.

$a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_n$ и $c_0, \dots, c_n$ – параметры энергетического дрейфа спектрометра.

Множитель $k(Z, i) = (1 - \exp(-\mu \cdot \rho \cdot Z^4 \cdot \Delta / f(E(i)))) / (\mu \cdot \rho \cdot Z^4 \cdot \Delta / f(E(i)))$ используется только в режиме обработки гамма спектров.

$S_{compt}(i)$ – спектр комптоновского рассеяния для спектра пробы.

$Pn(i)$ - полином

i - канал спектра.

Свёртка с функцией рассеяния $\Phi(x, w)$ моделирует ухудшение разрешения спектрометра.

Решение

$$p^{k+1} = p^k + R \left\{ \lambda_k \cdot (M_{jl} + \beta_k \cdot D_{jl} + G_0^{-1})^{-1} \cdot F \right\}$$

Здесь:

p^k – вектор параметров на k -ой итерации;

p^{k+1} – вектор параметров на $k+1$ -ой итерации.

R – оператор проектирования получаемых значений параметров на ограничения.

λ_k – шаг на k -ой итерации ($0 < \lambda_k < 1$).

$M_{jl} = (W \cdot \frac{dM}{dp})^T \cdot (W \cdot \frac{dM}{dp})$ – матрица Гаусса - Ньютона;

$W = K^{-1/2}$ – матрица весов. K – ковариационная матрица вектора $M(p) - S$

$\beta_k \cdot D_{jl}$ – коэффициент (задается в параметрах декомпозиции) и демпфирующая матрица k -ого шага.

G_0 – ковариационная матрица априорных данных.

$F = (W \cdot \frac{dM}{dP})^T \cdot (M(p) - S) + G_0^{-1} \cdot (A^k - X_0 \cdot b^k)$ для $0 > C_a < (M(p) - S) < C_b > 0$.

$F = (W \cdot \frac{dM}{dP})^T \cdot C_a + G_0^{-1} \cdot (A^k - X_0 \cdot b^k)$ для $(M(p) - S) < C_a < 0$.

$F = (W \cdot \frac{dM}{dP})^T \cdot C_b + G_0^{-1} \cdot (A^k - X_0 \cdot b^k)$ для $(M(p) - S) > C_b > 0$.

X_0 – априорные данные об активностях компонент.

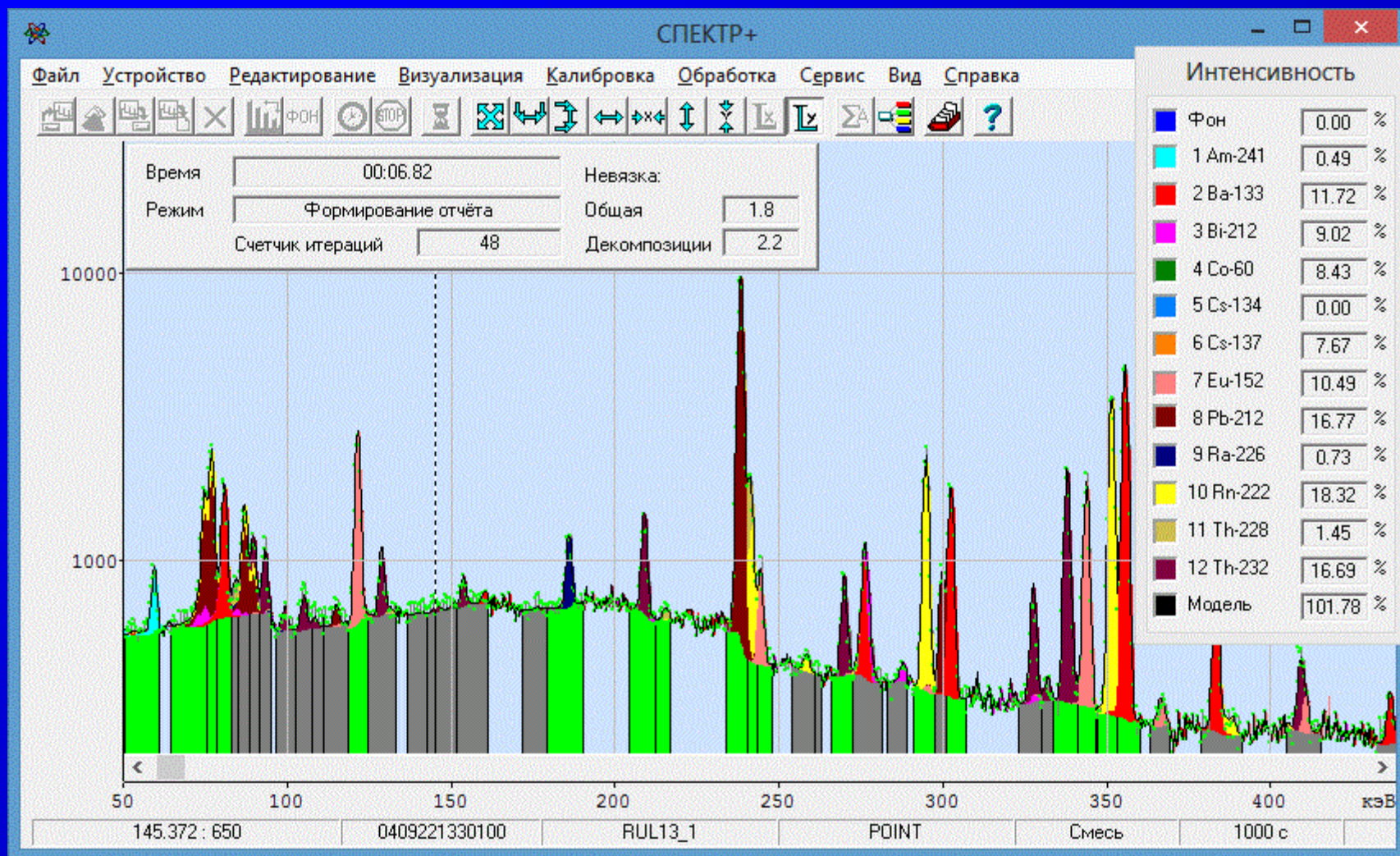
A^k – оценка вклада компонент на k -ом шаге,

b^k – оценка коэффициента усиления тракта.

C_a, C_b – границы МНК оценивания.

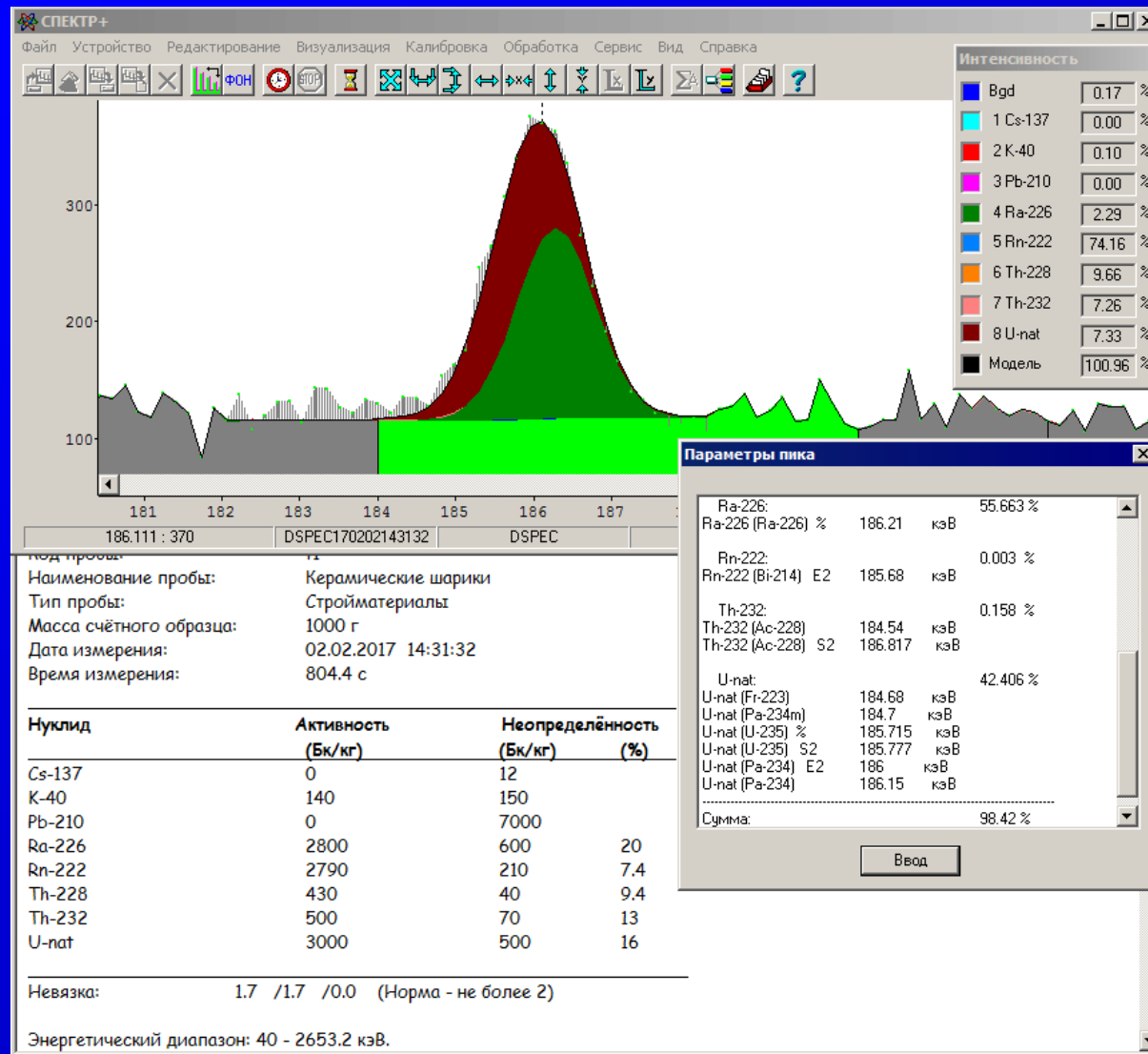


Декомпозиция разрешённого гамма спектра



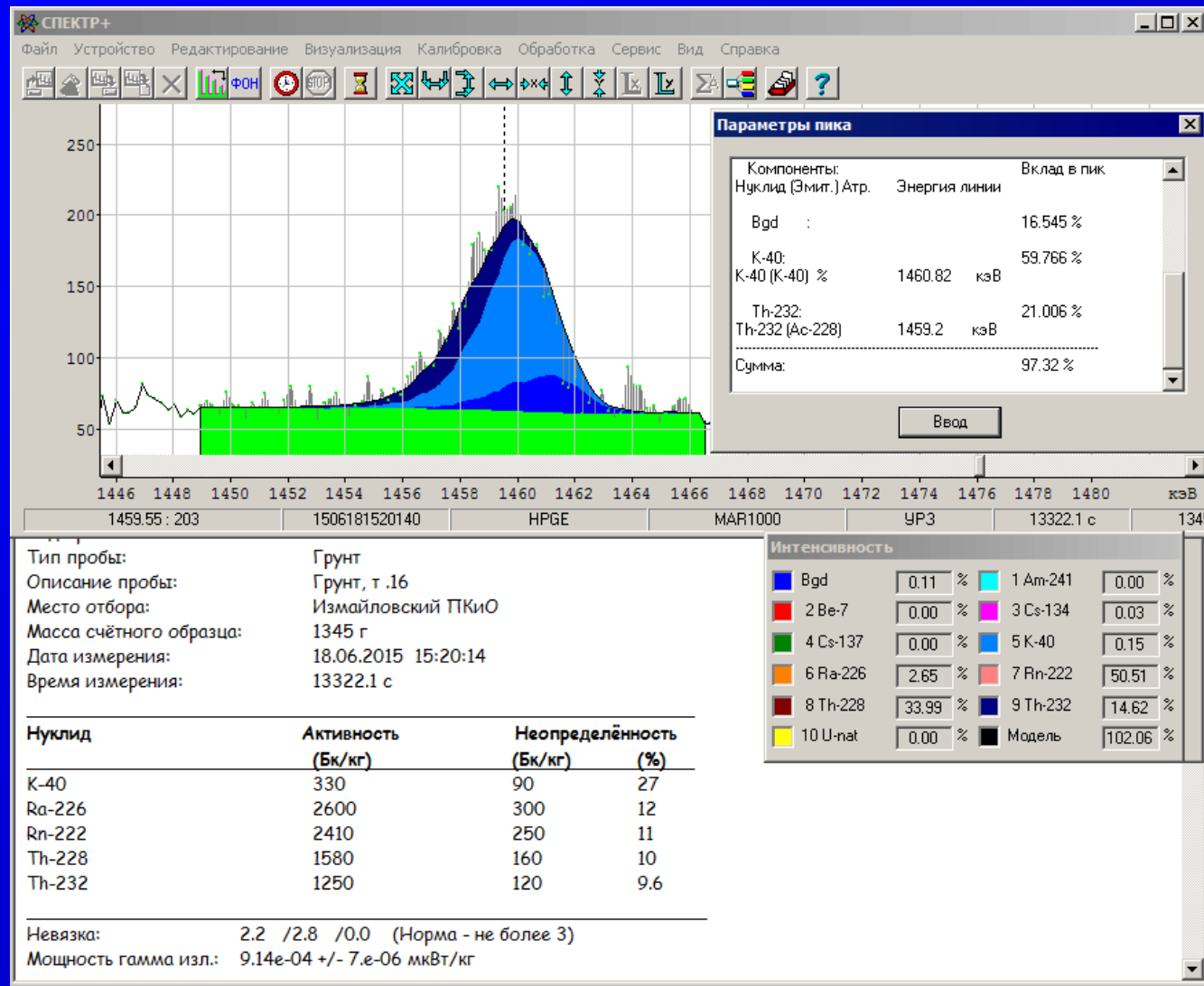
Спектр смеси эталонов.

Область пика Ra-226



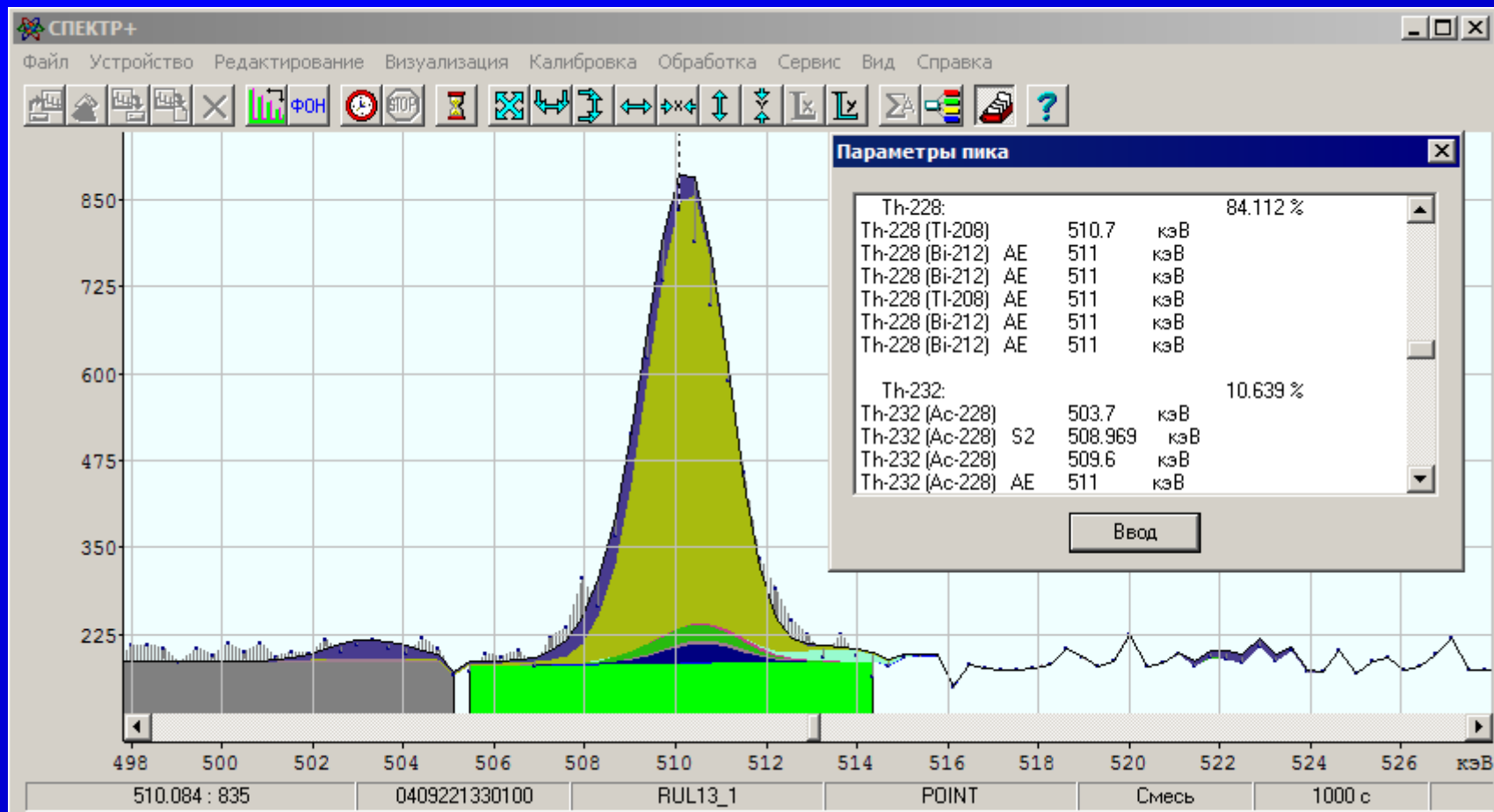
Пик формируют 4 компоненты декомпозиции

Область пика К-40



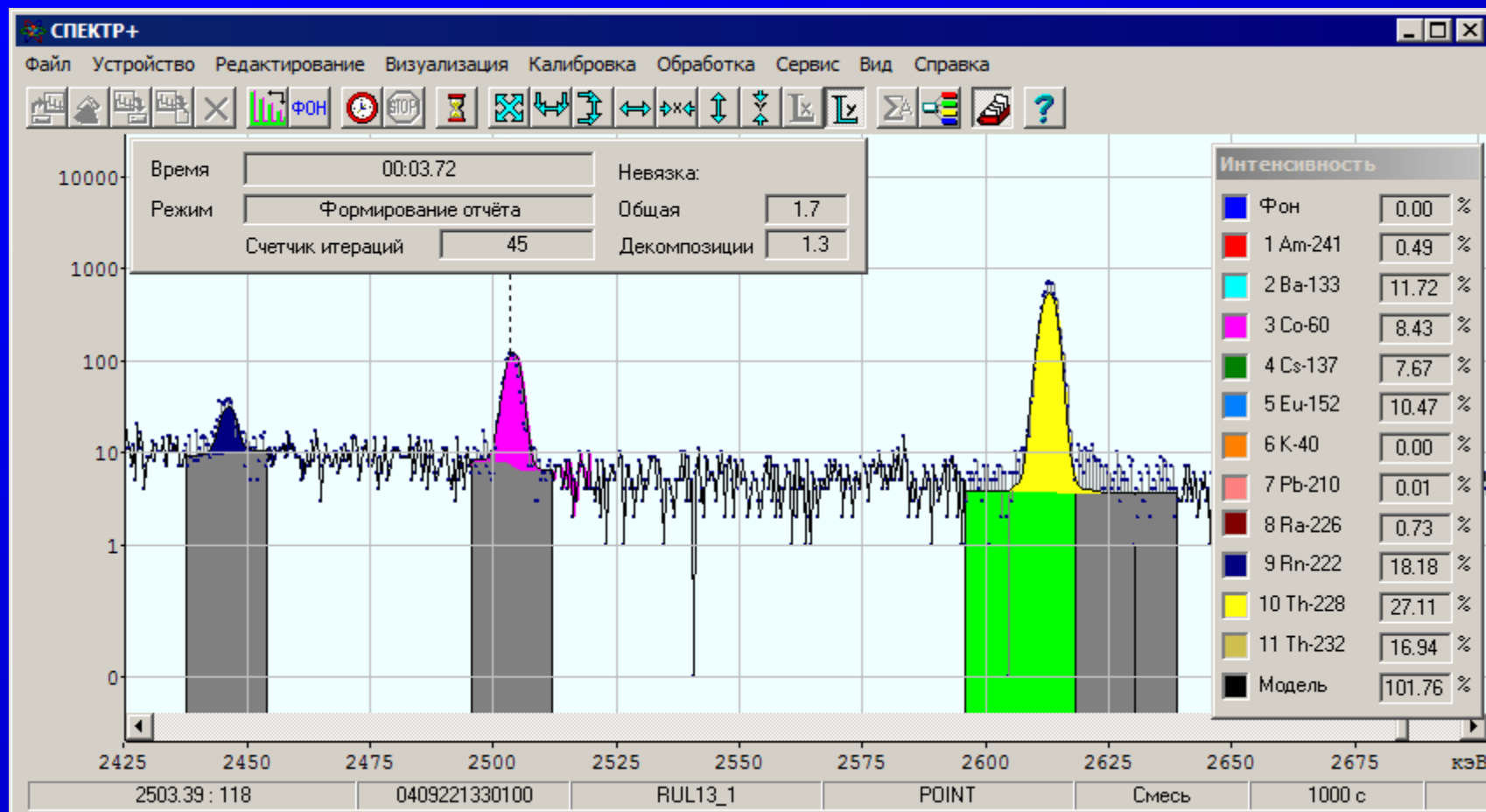
Пик формируют 3 компоненты декомпозиции

Аннигиляционный пик



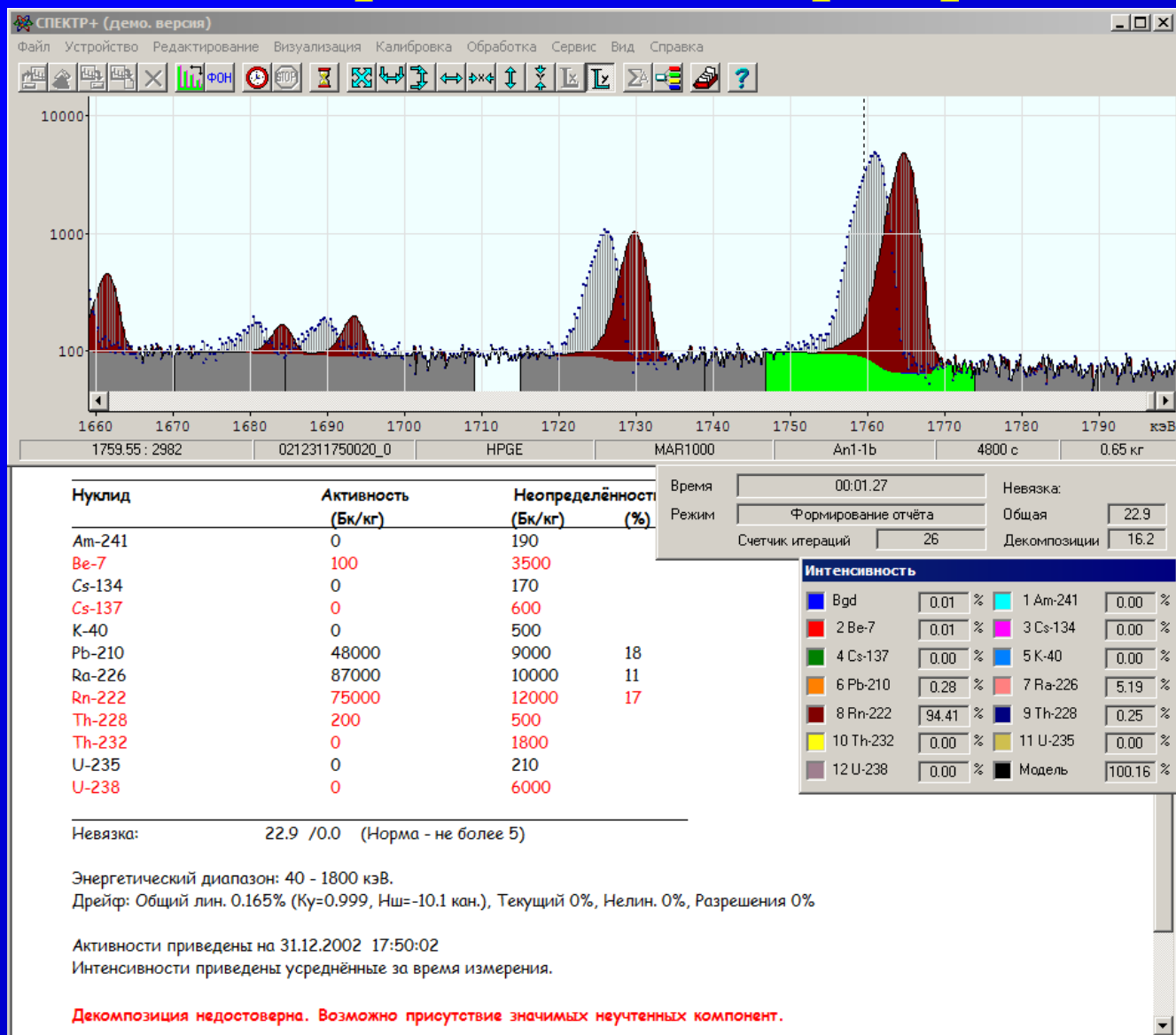
Пик формируют 127 линий от 6 компонент декомпозиции

Каскадные гамма кванты



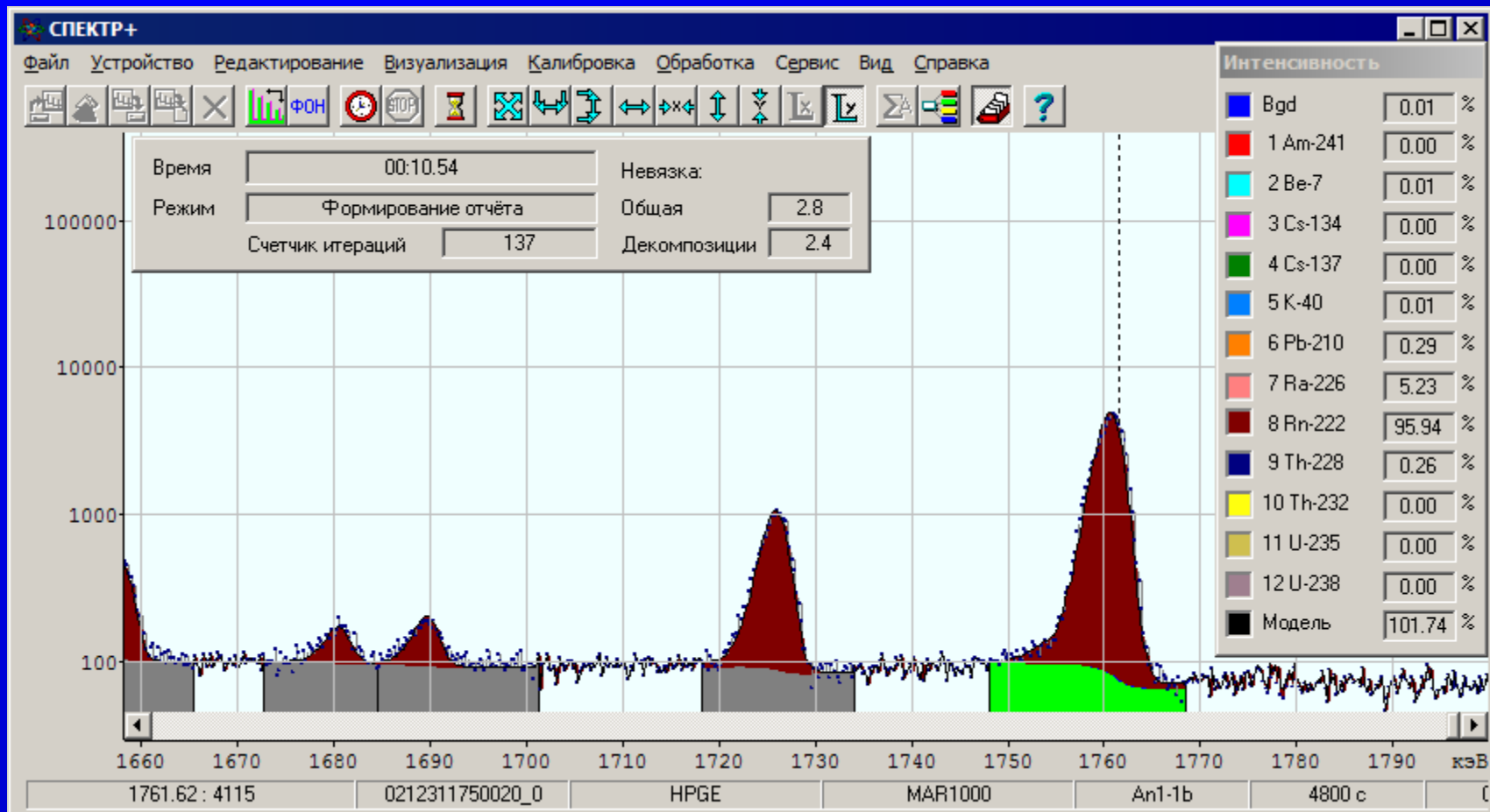
Пик сложения 2505.7 кэВ для Co-60

Энергетический дрейф



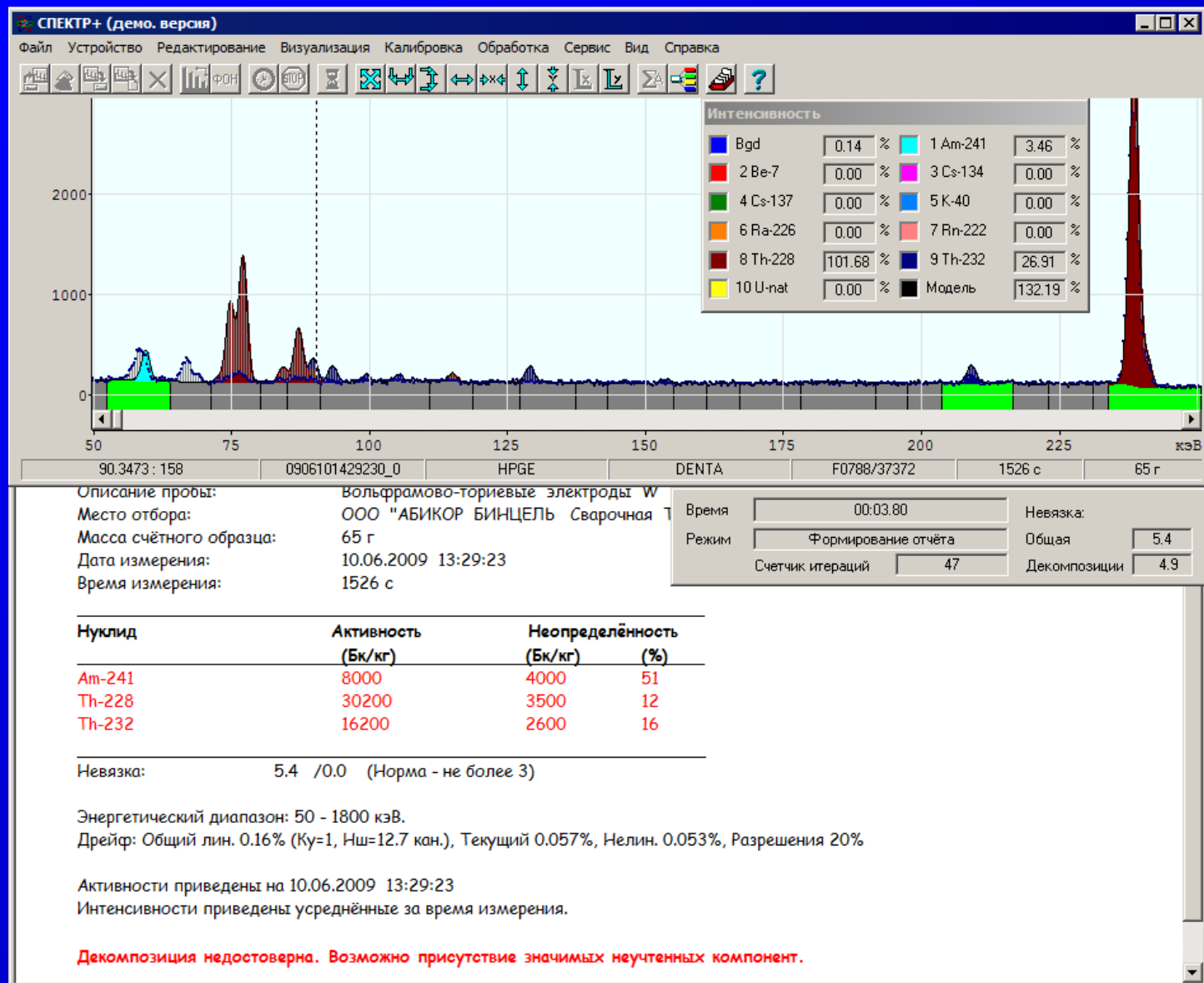
Обработка без коррекции дрейфа

Энергетический дрейф



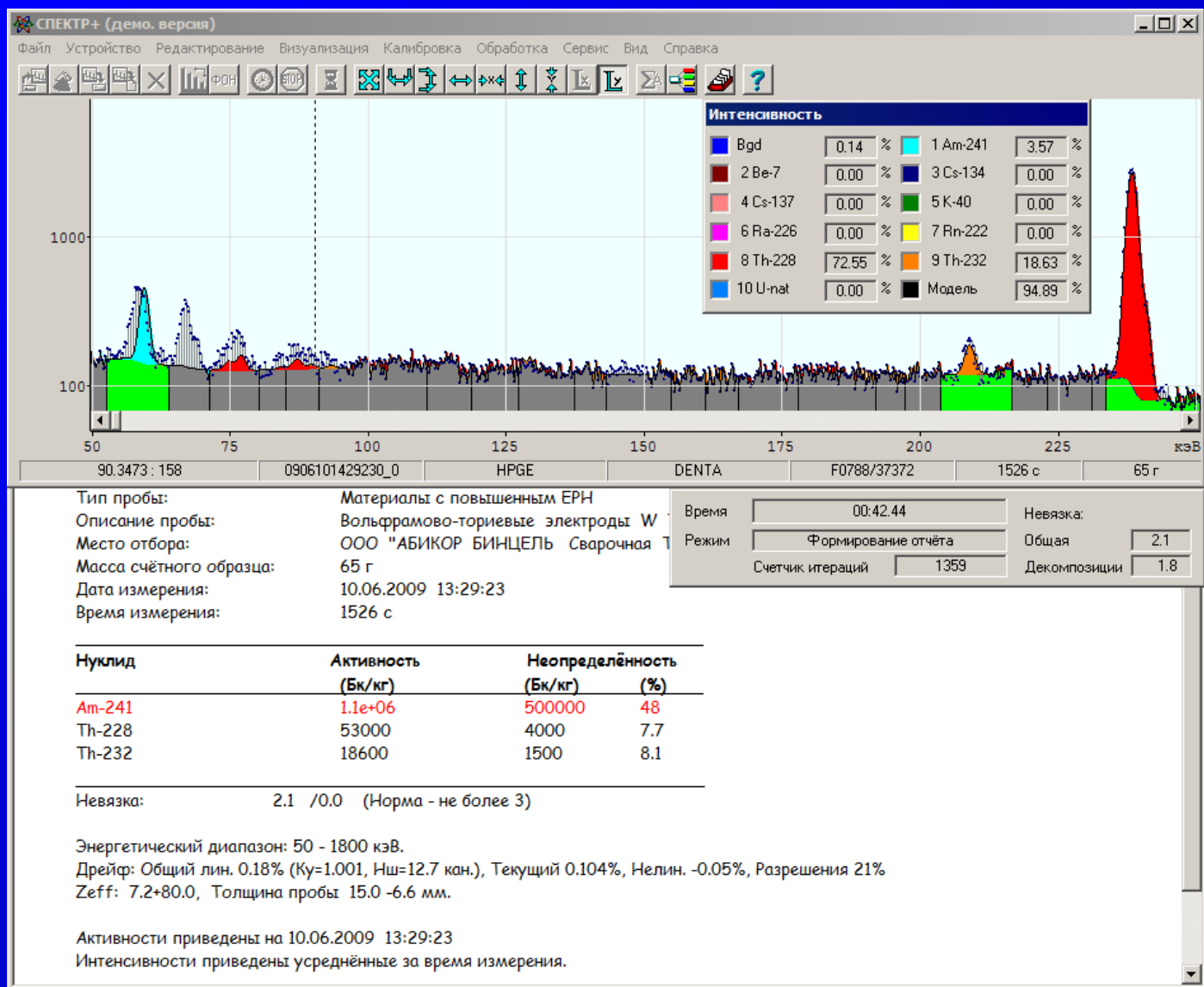
Обработка стандартным методом с коррекцией дрейфа

Поглощение излучения в веществе пробы



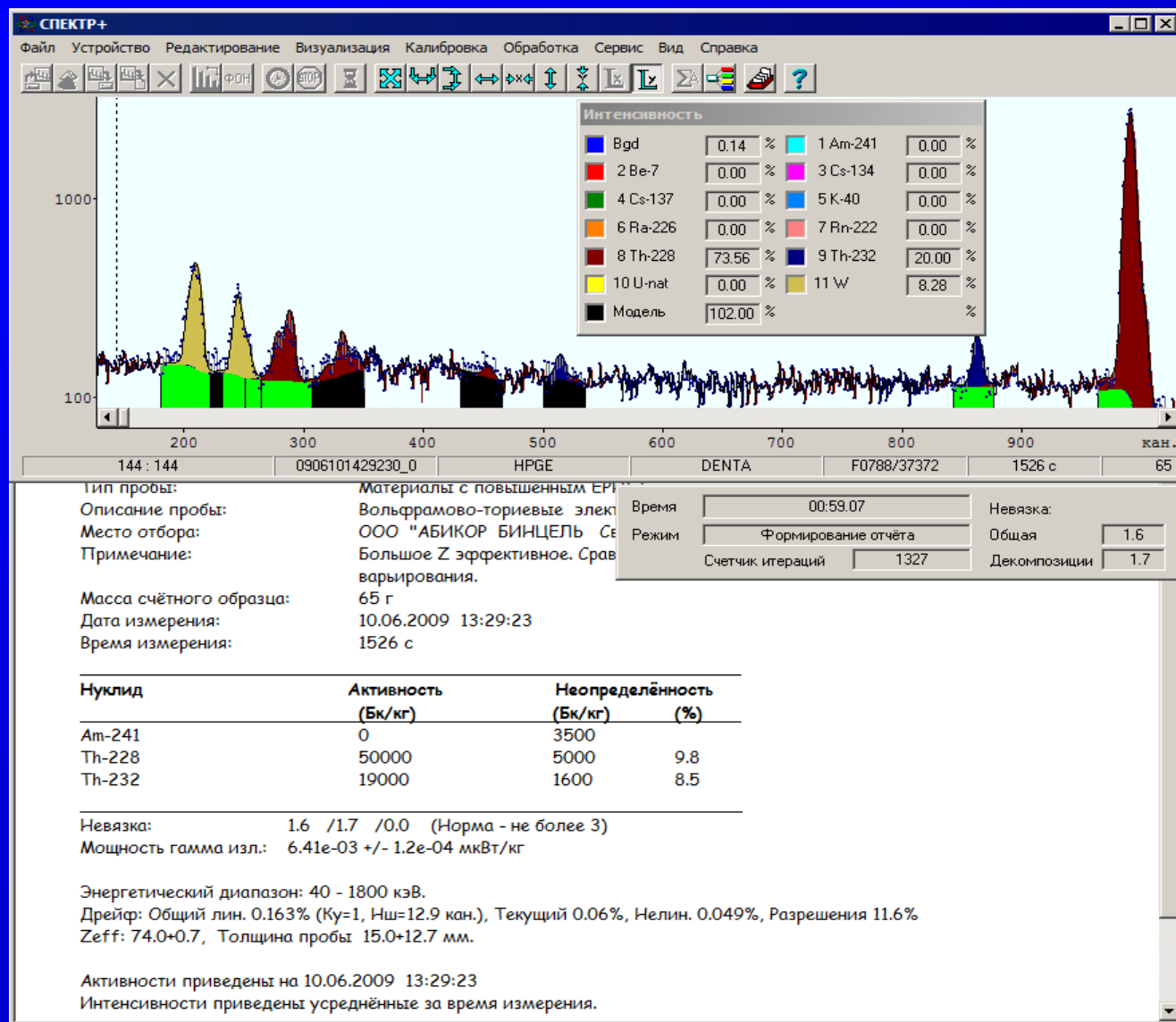
Результаты обработки спектра без варьирования Z.

Поглощение излучения в веществе пробы



Результаты обработки спектра с варьированием Z.

Учёт рентгеновской флуоресценции



Результаты обработки с учётом рентгеновской флуоресценции материала пробы.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ
И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
ФГУП ВНИИФТРИ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

об аттестации методики радиационного контроля
№ 40090.0Ж562

Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах с помощью гамма- и бета-спектрометров, работающих под управлением программного пакета «СПЕКТР» (далее ПП), разработанная Г.И. Дрёминым, Е.Н. Курниковым и специалистами ФГУЗ «ЦГиЭ в г. Москве» и изложенная в одноименном документе, аттестована в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.594.

Методика ориентирована на использование сцинтиляционных и ППД-спектрометров утвержденного типа с регламентированной в методике процедурой установки ПП с последующим подтверждением калибровкой и поверкой метрологических характеристик спектрометра, необходимых для измерения активности счетных образцов.

Методика обработки измерительной информации, реализуемая в ПП, основана на разложении аппаратного спектра излучения счетного образца на спектры компонент от фонового излучения и от предполагаемого набора радионуклидов с учетом параметров счетного образца методом наименьших квадратов, дополненным оцениванием Хуберовского типа и возможностью использования априорных данных в соответствии с принципом Байесовского оценивания. Погрешность результатов измерений оценивается в каждом конкретном измерении.

Методика регламентирует требования к счетным образцам и устанавливает процедуры подготовки и выполнения измерений. В Приложении дана методика поверки спектрометров с ПП.

Аттестация методики выполнена по результатам метрологической экспертизы материалов по разработке и тестированию методики.

Дата аттестации: 25 июня 2010

Руководитель НИО-4 (ЦМИИ)



В.П. Ярына

С N0000410

Индивидуальный предприниматель
Дрёмин Геннадий Иванович
Тел. +7-910-420-01-96
E-mail: gidremin@gmail.com
[http: spectrrad.ru](http://spectrrad.ru)

