



## Радионуклидный экспресс-анализ при контроле ядерных материалов и ИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Н.В. Ивашкин e-mail: [n.v.ivashkin@vniitf.ru](mailto:n.v.ivashkin@vniitf.ru)

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,  
Снежинск, Россия

### Содержание

1. Вводная часть: проблематика контроля и радионуклидный экспресс-анализ
2. Радиационные характеристики ЯМ и высокоактивных изотопных источников
3. Методы и аппаратура экспресс-анализа
4. Примеры практического применения
5. Заключение

# 1 Вводная часть: проблематика контроля и радионуклидный экспресс-анализ

## 1.1. Цель и сферы контроля.

**Цель контроля в обобщённом виде** - обеспечение экологической (ядерной, радиационной) безопасности персонала, населения и среды обитания при использовании ядерной энергии.

### Сферы контроля:

- ❖ ядерный топливный цикл (ЯТЦ) и ядерно-оружейный комплекс (ЯОК);
- ❖ легальный и нелегальный оборот, экспорт/импорт ЯМ и изотопных источников;
- ❖ испытания ядерных взрывных устройств;
- ❖ контроль зон, свободных от ядерного оружия.

## 1.2. Актуальность совершенствования технологий контроля производства, применения и обращения ядерных материалов и изотопных источников:

- ❖ наличие предпосылок ядерного распространения (появлением де-факто новых ядерных государств);
- ❖ усиление угрозы радиологического терроризма в условиях развития ядерных технологий и в особенности, электроэнергетики, в развивающихся странах;
- ❖ потенциальная опасность возникновения радиационных аварий на расширяющемся числе ядерных объектов ЯТЦ и ЯОК;
- ❖ расширение рынка медицинского применения радиоизотопов и развитие ядерной медицины.

### 1.3 Особенности радионуклидного экспресс-анализ как элемента технического сегмента системы контроля:

- получение **прямой информации о наличии, изотопном составе и характеристиках** излучений объектов контроля;
- возможность **обеспечения инспекций на месте** путём проведения измерительных операций с применением **неинтрузивных методов** и технических средств (включая переносные) на мобильных носителях;
- более **низкая, стоимость и высокая производительность** проведения измерений;
- неразрушающий **анализ образцов на месте и съёмка объектов** методами дистанционной гамма-спектрометрии;
- использование **инструментальных (без применения радиохимии) методов** альфа-, гамма-спектрометрии и бета-радиометрии проб.

### 1.4 Контролируемые материалы, радионуклиды и высокоактивные изотопные источники

#### 1. Ядерные материалы (Исходные и специальные расщепляющиеся материалы как определено в статье XX Устава МАГАТЭ):

1.1. Исходный материал: **U уран природный (0,72 %  $^{235}\text{U}$ ), DU уран обеднённый (0,2-0,3%  $^{235}\text{U}$ ), Th;**

1.2. Специальный расщепляющийся материал:  **$^{239}\text{Pu}$  ( $\leq 80\% \text{ } ^{238}\text{Pu}$ ),  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ( $\text{BOU} \geq 20\% \text{ } ^{235}\text{U}$ )**

#### 2. Нуклиды (Исходный экспорт-контрольный список РФ): $^{237}\text{Np}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{252}\text{Cf}$ .

#### 3. Изотопные источники:

- Облучатели промышленные ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ );
- Радиоизотопные электрические генераторы (РИТЭГ:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ );
- Лучевая терапия (гамма-нож:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ );
- Скважинная геофизика ( $^{241}\text{AmBe}$ ,  $^{239}\text{PuBe}$ ,  $^{226}\text{RaBe}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ );
- Рентгено-флюоресцентные анализаторы. Источники для ядерной медицины (терапия, томография).

## 2. Радиационные характеристики ядерных материалов и радионуклидов

Таблица 1 – Характеристики альфа, -квантовых излучений изотопов исходных, специальных ЯМ и нуклидов\*\*\*

Нуклид	Альфа излучение		Гамма-излучение		Рентгеновское $X_K$ ( $X_L$ ) излучение	
	Энергия, кэВ	Выход ( $\alpha$ /расп.), %	Энергия, кэВ	Выход (кв./расп.), %	Энергия, кэВ	Выход (кв./расп.), %
$^{233}\text{U}$	4823/4779	83/15	42,4/164,5	$8,6 \cdot 10^{-2}/6,6 \cdot 10^{-3}$	93,3; (15,7*)	$1,2 \cdot 10^{-2}$ ; (5,3**)
$^{234}\text{U}$	4768/4717	72/28	53,2/120,9	$1,2 \cdot 10^{-1}/3,4 \cdot 10^{-2}$	93,3; (15,3*)	$4,4 \cdot 10^{-3}$ ; (10,2**)
$^{235}\text{U}$	4370/4354	25/35	143,8/185,7	10,96/57,2	89,9/93,3; (15,3*)	3,56/5,76; (22**)
$^{238}\text{U}$	4195/4145	77/23	63 ( $^{234}\text{Th}$ )/1002 ( $^{234\text{m}}\text{Pa}$ )	$4,8/8,4 \cdot 10^{-1}$	93,3; (15,3*)	$1,8 \cdot 10^{-3}$ ; (7,94**)
$^{237}\text{Np}$	4788/4771	46/20	86,5/143,2	$12,4/4,3 \cdot 10^{-1}$	95,9; (13,29)	2,9; (18,7)
$^{238}\text{Pu}$	5499/5456	71/29	43,5/99,8	$4,0 \cdot 10^{-2}/7,0 \cdot 10^{-3}$	94,6/98,4; (13,56)	$1,0 \cdot 10^{-4}/1,7 \cdot 10^{-4}$ ;
$^{239}\text{Pu}$	5157/5144	73/15	375,0/646,0	$1,56 \cdot 10^{-3}/1,5 \cdot 10^{-5}$	94,6/98,4; (13,58)	$6,9 \cdot 10^{-3}$ ; (1,5)
$^{240}\text{Pu}$	5168/5124	73/27	104,2/642,3	$7,1 \cdot 10^{-3}/1,4 \cdot 10^{-5}$	98,4; (13,58)	$1,0 \cdot 10^{-4}$ ; (3,6)
$^{241}\text{Pu}$	4896	$2,0 \cdot 10^{-3}$	103,7/148,6	$1,0 \cdot 10^{-4}/1,9 \cdot 10^{-5}$	100,5; (16,0)	$*1,0 \cdot 10^{-3}$ ; $** (7 \cdot 10^{-4})$
$^{241}\text{Am}$	5486/5443	85/13	59,5/662,0	$35,9/3,6 \cdot 10^{-4}$	101,1; (17,8)	$1,9 \cdot 10^{-3}$ ; (20,0)
$^{252}\text{Cf}$	6118/6075	81,7/15,1	43,4/100,2	$1,5 \cdot 10^{-2}/1,2 \cdot 10^{-2}$	109,3; (18*)	$4,0 \cdot 10^{-5}$ ; (6,1**)
* средняя энергия $\langle E_{XL} \rangle$ ; ** суммарный выход $\sum I_{XL}$						

\*\*\*Чечев В.П., Кузьменко Н.К., Сергеев В.О., Артамонова К.П. Оцененные значения ядерно-физических характеристик трансурановых радионуклидов.– Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Таблица 2 - Удельные активности изотопов; выходы нейтронов спонтанного деления и ( $\alpha$ , n)-реакций \*

Нуклид	Удельная активность, Бк/г	Удельный выход, (н/с·г)	Химическое соединение	Удельный выход, (н/с·г)
$^{233}\text{U}$	$3,6 \cdot 10^8$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$^{234}\text{UF}_6$	$3,9 \cdot 10^2$
$^{234}\text{U}$	$2,3 \cdot 10^8$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$\text{UF}_6$ (90% $^{235}\text{U}$ )	3,4
$^{235}\text{U}$	$8,0 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$\text{UO}_2$ (90% $^{235}\text{U}$ )	2,3 (расчет)
$^{238}\text{U}$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$^{238}\text{UF}_6$	10,1
$^{237}\text{Np}$	$2,6 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$\text{UO}_2$ (4,4 % $^{235}\text{U}$ )	$1,2 \cdot 10^{-2}$ (расчет)
$^{238}\text{Pu}$	$6,3 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^3$	$^{238}\text{PuO}_2$	$1,3 \cdot 10^4$
$^{239}\text{Pu}$	$2,3 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$^{239}\text{PuO}_2$	40 (расчет)
$^{240}\text{Pu}$	$8,4 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^3$	$^{239}\text{PuF}_4$	$4,6 \cdot 10^3$
$^{241}\text{Am}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	1,2	$^{241}\text{AmO}_2$	$2,5 \cdot 10^3$
$^{252}\text{Cf}$	$2,0 \cdot 10^{13}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	$^{239}\text{PuBe}_{13}$	$5,7 \cdot 10^4$

\* Ф.Ф. Фролов. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. М.: Энергоатомиздат, 1989, с.177.

Таблица 3 – Контролируемые количества ядерных материалов, высокоактивных изотопных источников и радиологические последствия крупнейших аварий

Материалы / нуклиды	Процесс образования	Оценочные количественные характеристики
Pu оружейного качества	Облучение урана в реакторах	➤ $\sim 10^{18}$ Бк; ~ 250 т; тысячи единиц
Pu, накопленный в ОЯТ	Наработка в топливе АЭС	➤ <u><math>\sim 6 \cdot 10^{18}</math></u> Бк; ~ 2000т; сотни мест; накопление ~100 т/год
Pu, выделенный из облученного топлива АЭС	Радиохимическое (РХ) выделение (экстракция)	➤ <u><math>\sim 6 \cdot 10^{17}</math></u> Бк; ~ 200 т; десятки мест хранения
ВОУ оружейного качества	Изотопное обогащение	➤ $\sim 3 \cdot 10^{15}$ Бк; ~ 2000 т; тысячи единиц
Обедненный уран	Отходы обогащения урана	➤ $\sim 10^{16}$ Бк; $10^5$ т; сотни мест хранения
Тритий	Реакторное облучение	➤ ~100 кг (удельная активность – $3,6 \cdot 10^{17}$ Бк/кг)
Радиоизотопные источники ( $^{60}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{192}\text{Ir}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{238}\text{Pu}$ )	Реакторное облучение, РХ-выделение из ОЯТ	➤ <u><math>\sim 10^{19}</math></u> Бк; ед. образец – до $\sim 4 \cdot 10^{17}$ Бк ( $^{90}\text{Sr}$ в РИТЭГ); тысячи единиц
$\gamma$ -источники для ядерной медицины ( $^{60}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{125}\text{I}$ , $^{131}\text{I}$ ...)	Реакторное и циклотронное облучение, РХ-выделение	➤ max на единичный образец до $\sim 10^{14}$ Бк ( $^{131}\text{I}$ ); тысячи единиц
Отработанное ядерное топливо	Реакторное облучение	➤ <u><math>2 \cdot 10^{19}</math></u> Бк; $\sim 2 \cdot 10^{13}$ Бк/кг (3-х летняя выдержка)
Химкомбинат «Маяк» (СССР), 1957 г.	Взрыв емкости ВАО	❖ <u><math>7,4 \cdot 10^{16}</math></u> ( $\Sigma$ ); $2,0 \cdot 10^{15}$ ( $^{90}\text{Sr}$ )
Уиндскейл (Англия), 1957 г.	Расплавление твэл (ЯР наработчик Pu)	❖ $7,4 \cdot 10^{14}$ ( $^{131}\text{I}$ ); $2,2 \cdot 10^{13}$ ( $^{137}\text{Cs}$ )
АЭС Три Майл Айленд» (США), 1979 г.	Пожар, расплавление АЗ реактора	❖ $5 \cdot 10^{11}$ ( $^{131}\text{I}$ ); $1,5 \cdot 10^{10}$ ( $^{137}\text{Cs}$ )
Чернобыльская АЭС, (СССР), 1986 г.	Расплавление АЗ, взрыв энергоблока	❖ <u><math>\sim 2 \cdot 10^{18}</math></u> ( $\Sigma$ ); $6,4 \cdot 10^{16}$ ( $^{137}\text{Cs}$ )
АЭС«Фукусима-1» (Япония), 2011 г.	Расплавление взрыв энергоблока	❖ <u><math>\sim 1,5 \cdot 10^{17}</math></u> ( $^{131}\text{I}$ ); $1,2 \cdot 10^{16}$ ( $^{137}\text{Cs}$ )
➤ Оценка суммарных (общемировых) количеств; $\Sigma$ – Суммарная активность аварийного выброса (Бк)		

### 3. Методы и аппаратура экспресс-анализа

#### 3.1 Характеристика методов

Основные методы:

- Дистанционная  $\gamma$ -спектрометрия излучения объектов на месте с борта носителей различного типа;
- Отбор проб контролируемых объектов и  $\gamma$ ,  $\alpha$  - спектрометрия на месте в передвижной полевой лаборатории;
- Неразрушающий  $\gamma$ -спектрометрический анализ и нейтронные измерения ядерных материалов.

МДА - минимально детектируемая активность;

$$\text{МДА} = [2.71 + 4.66 (S_{\text{фп}})^{1/2}] / (\tau \cdot m \cdot n_{\gamma} \cdot \varepsilon_{\text{ф}}), \quad (3)$$

$S_{\text{фп}}$  - площадь "пьедестала" под фотопиком;  $\tau$  - время экспозиции (с);  $m$  - масса образца (кг);

$n_{\gamma}$  - квантовый выход гамма линии, квант/распад;

Таблица 4 – Относительная (по отношению к аналитическим методам) чувствительность методов гамма-мониторинга объектов окружающей среды

Нуклид	Почва		Поверхностные выпадения		Прямая $\gamma$ -спектрометрия проб	
	Аэрогамма-съемка	Наземная $\gamma$ -спектрометрия	Аэрогамма-съемка	Наземная $\gamma$ -спектрометрия	Почва, отложения	Вода, раствор
$^{137}\text{Cs}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0,3	$\sim 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,4	$5 \cdot 10^{-2}$
$^{235}\text{U}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$\sim 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$ (BOY)	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-5}$
$^{238}\text{U}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$\sim 10^{-7}$ (DU)	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	
Pu, $^{241}\text{Am}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$	

### 3.2 Радионуклидная аномалия (РНА) как признак и объект контроля:

- ❖ Особенность применения экспресс-анализа - исследовании характеристик радионуклидных аномалий (РНА), обусловленных наличием следовых (околофоновых) и весовых количеств радионуклидов непосредственно на месте за ограниченное время.
- ❖ Контрольное исследование включает решение задач обнаружения (поиска и локализации) РНА в заданном районе и её идентификации путем установления изотопного состава и активности источников.
- ❖ В качестве обобщенной оценки эффективности обнаружения ( $k_{обн.}$ ) может быть использовано отношение концентраций характерного уровня фона радионуклида-индикатора в соответствующем объекте окружающей среды к уровню порога его детектирования.

$$k_{обн.} = C_{фон.} / МДК,$$

где  $C_{фон.}$  – фоновая концентрация в пункте контроля;

$МДК$  - минимально детектируемая концентрация радионуклидов, образующих РНА.

- ❖ Значение  $k_{обн.} \geq 1$  свидетельствует о том, что чувствительность системы детектирования достаточна для регистрации околофоновых концентраций радионуклидов.

Таблица 5 - Оценка относительных коэффициентов обнаружения  $k_{обн.}$  радионуклидов в объектах окружающей среды

Радионуклиды	Атмосферный воздух	Водный бассейн	Почва, отложения
$^3H$	1...10	$10^3...3 \cdot 10^3$	-
$^{90}Sr$	0,01...30	$5 \cdot 10^3...10^6$	50
$^{137}Cs$	$3 \cdot 10^{-3} ... 0,1$ (0,3*)	$10... 2 \cdot 10^3$	300
$^{235}U$	0,01...1,0	$10^2...5 \cdot 10^3$	1,3...2
$^{234}, ^{238}U$	$\approx 30$	$\approx 2 \cdot 10^5$	30...50
$Pu,$	$5 \cdot 10^{-3} ... 0,1$	$\approx 3 \cdot 10^3$	5
$^{241}Am$	$10^{-4}...0,03$	$\approx 10^2$	1,5

### 3.3 Системы детектирования

Нуклиды в составе радиоактивных материалов являются источниками корпускулярного ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n$ , осколки деления) и квантового ( $\gamma$ ,  $X$ , тормозного) излучений. Все эти виды излучений (строго говоря, кроме рентгеновского ( $X$ ) и, особенно, тормозного) относятся к ядерным излучениям, т.к. их происхождение связано с превращениями в ядрах атомов вещества.

Средства детектирования излучений при обнаружении/идентификации РНА включают малогабаритные (в т.ч., носимые) приборы, модули бортового базирования на воздушных наземных, водных носителях, а также автономные приборные средства и строятся по схожей схеме (рис. 1).

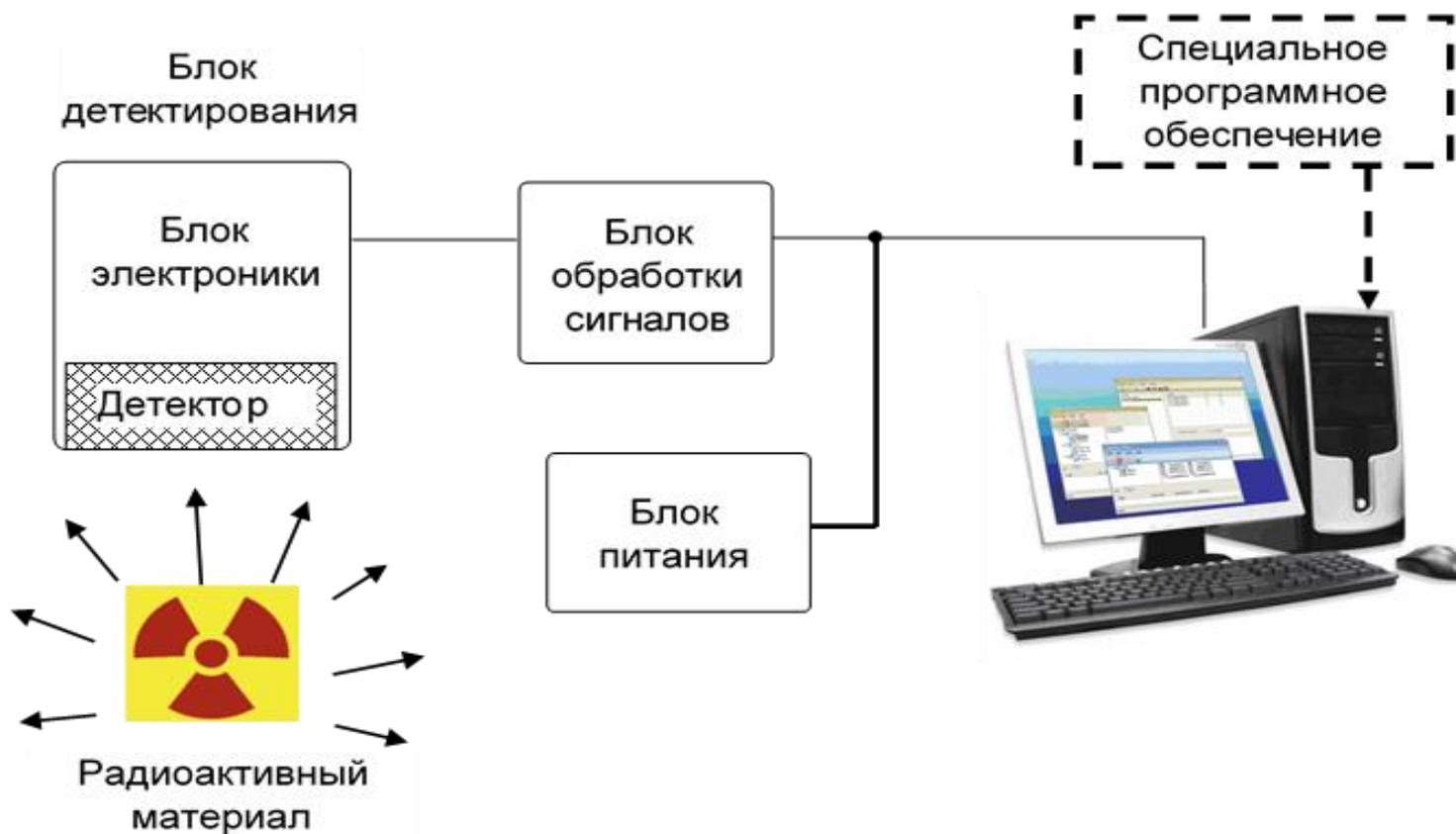


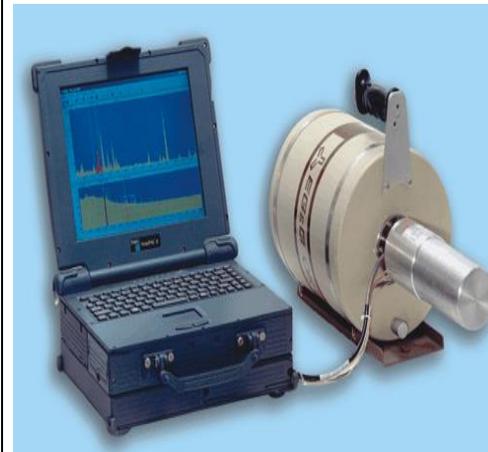
Рис. 1 - Блок-схема системы регистрации ядерных излучений контролируемых объектов



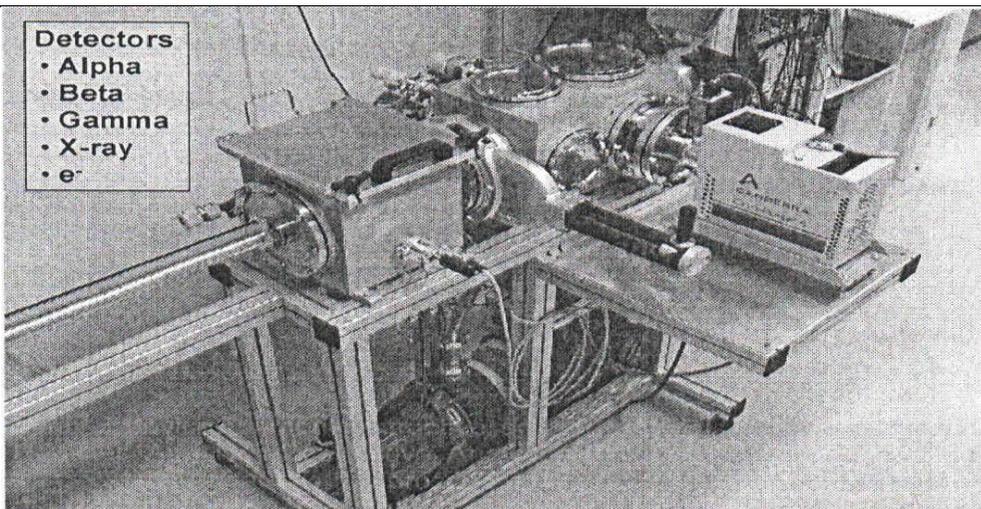
Спектрометр сцинтилляционный (NaI(Tl)) «Гамма-1С/НВ»



Полупроводниковые (HP Ge) спектрометры (Canberra, ORTEC)



Модуль детекторов альфа, бета, гамма, рентгеновского - излучений PANDA



- Detectors
- Alpha
  - Beta
  - Gamma
  - X-ray
  - e<sup>-</sup>

Рис. 2 - Блоки и модули детектирования гамма-излучения

### 3.4 Дистанционная гамма-спектрометрия (неразрушающий анализ) ядерных материалов с использованием полупроводниковых детекторов на основе особо чистого (ОЧГ) германия (HP Ge)

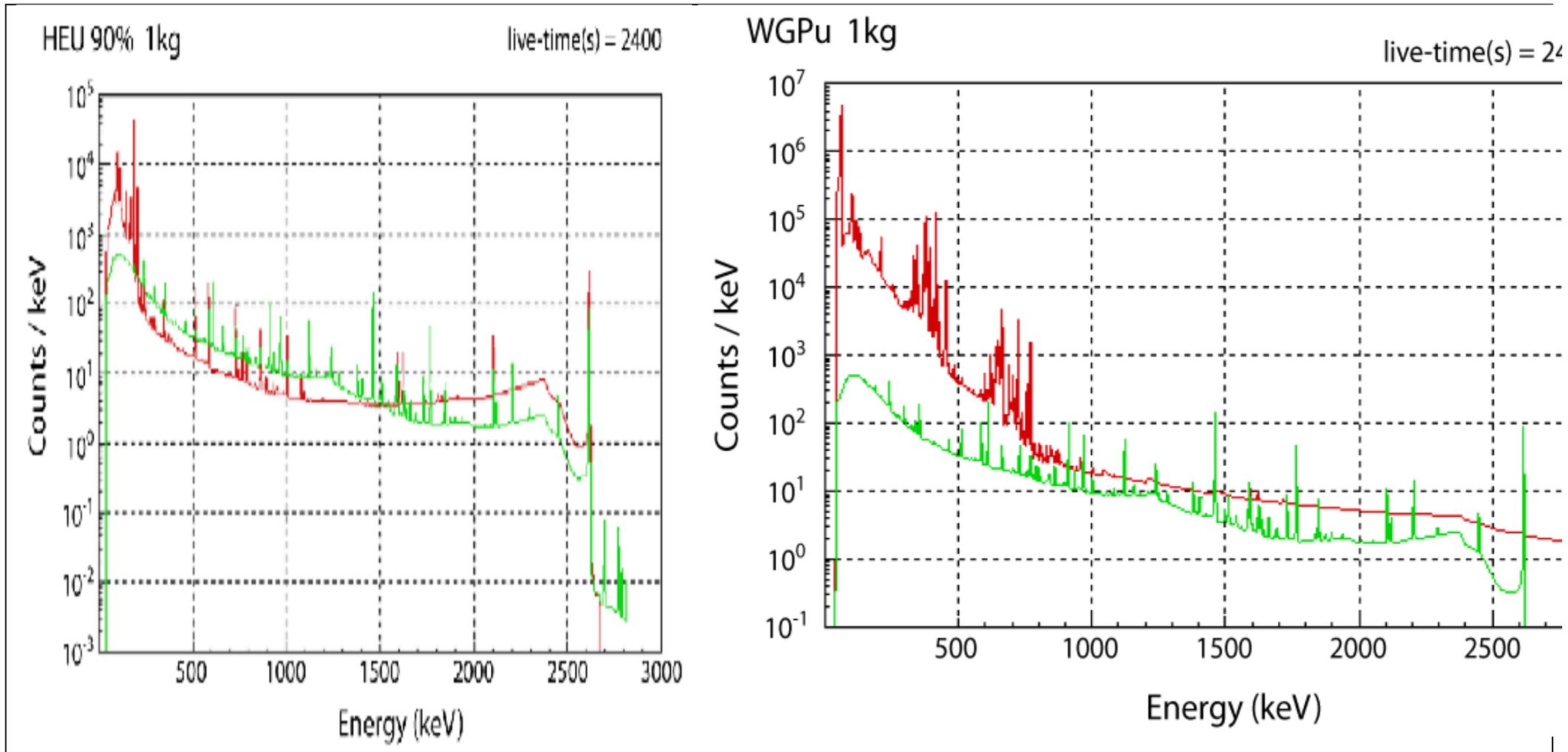


Рис. 3 – Гамма-спектры урана (слева) и плутония (справа) оружейной градации (удаление - 1м), и фона детектора\*

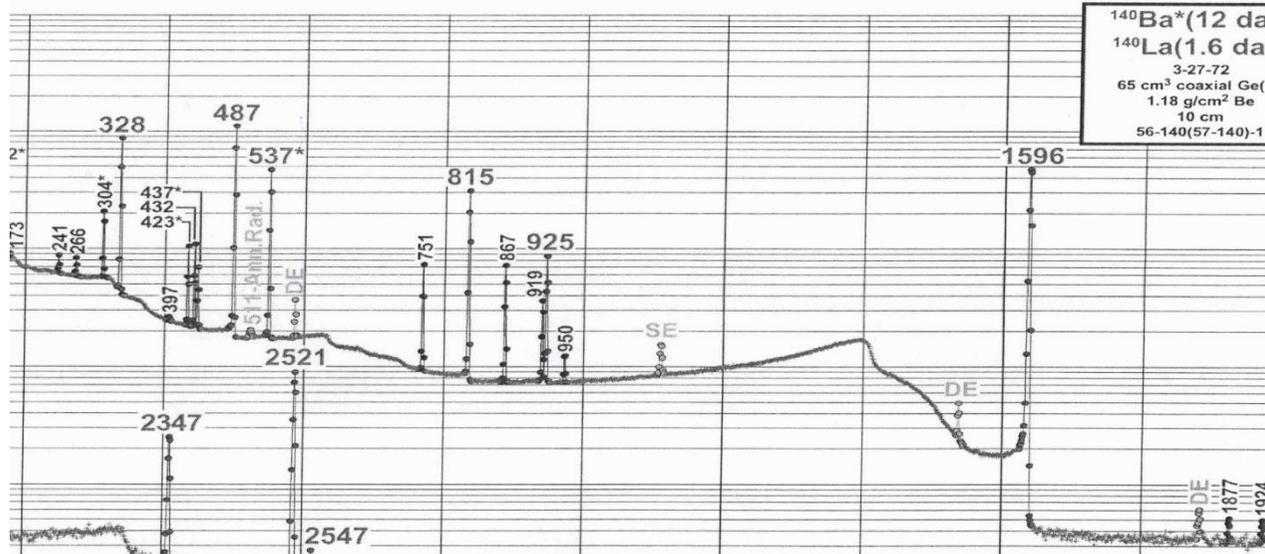
\*J. Medalia. *Detection of Nuclear Weapons and Materials: Science, Technologies, Observations. Congressional Research Service, Nov.2008, pp.4-5 /.*

## 4. Примеры практического применения

### 4.1 Исследование имплозии в $RaLa$ экспериментах Лос-Аламоса (1944-62 г.г.)

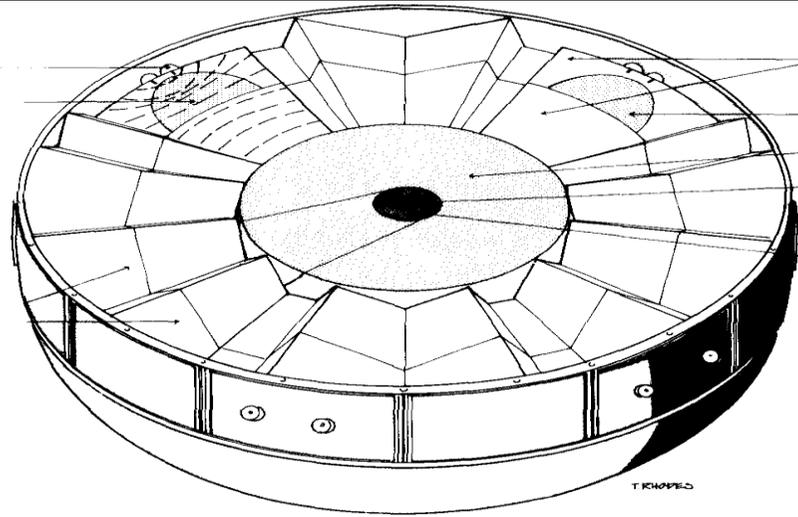
В 1944 году после окончания академии **Е.И. Забабахин** продолжил учёбу в адъюнктуре. Тема диссертации (защита в 1947 г.) - исследование процессов в сходящейся ударной волне. Евгений Иванович один из самых авторитетных специалистов по газодинамике взрыва и активных участников отработки, испытания советской атомной бомбы.

Первое применение радионуклидного анализа при исследовании имплозии\* :  $RaLa$  эксперименты (1944-62 г.г.) - измерение равномерности генерируемой взрывной волны (каньон Байо Лос-Аламосского комплекса) в период кризиса, связанного с  $^{240}Pu$ . Идея – Р. Сербер (1943), руководитель – Б. Росси. Участник - Т. Холл (агент СССР)\*\*. Регистрировалось гамма-излучение  $^{140}La$  образцов (1,8 мг; 1000 Ки / 7ТБк.), подвергая их имплозии. Применялись пропорциональные счётчики (8 шт.; диаметр-5 см, длина -76 см, 4,5 атм.  $Ag+CO_2$ ); позднее и жидкие сцинтилляторы.



**Детонатор**  
**Детонационная волна**

**Блоки бризантного**  
**ВВ**



**«Быстрый ВВ (ТАТБ)»**  
**«Медленный ВВ» (бартол)**  
**Толкатель (tamper), U-природный**  
**Инициатор (Po-Be)**  
**Ядро (6 кг  $^{239}\text{Pu}$ )**

Рис.6 - Схема первых образцов ядерных взрывных устройств имплозивного типа\*  
(Gadget/Trinity, Fat Man; РДС-1)

\*(D. Rhodes. The making of the Atomic Bomb. A TOUCHSTONE BOOK, 1986. p.575)



Рис.7 – Имплозивное устройство и блоки регистрации



Рис.8 – Перемещение блоков регистрации  $\gamma$ -излучения  $^{140}\text{La}$

## 4.2 Гамма-спектрометрия при анализе излучений ядерной боеголовки (1989 г.) и шлаковой пробы ПЯВ (1998 г.)

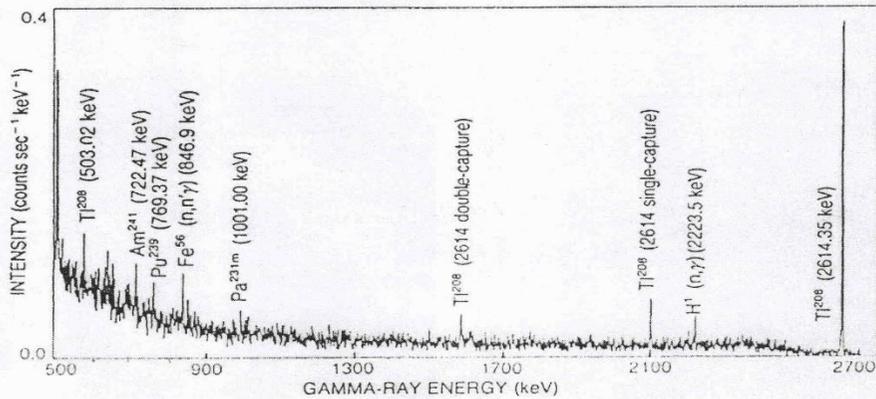
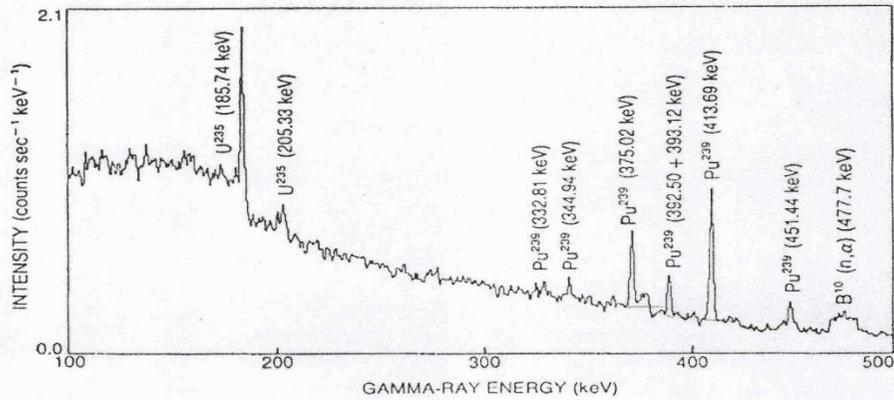


Рисунок 1

Спектр гамма-излучения, измеренный в течение 10 минут германиевым детектором, размещенным на контейнере крылатой ракеты в 3,4 метрах от крышки.

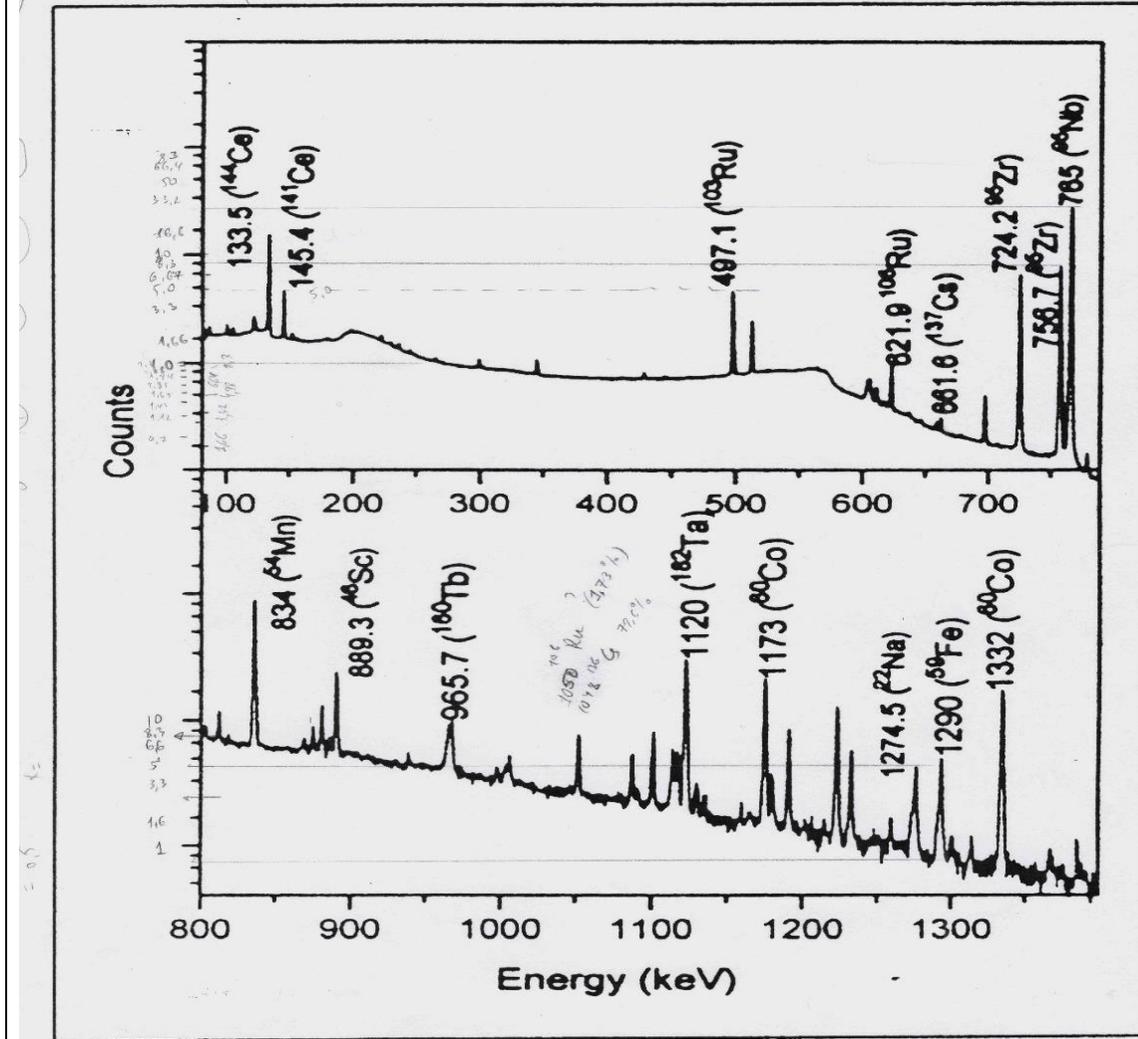


Рис.10. Гама-спектр шлаковой пробы ПЯВ Индии 1998 г.\*

Рис.9. - Гама-спектр излучения крылатой ракеты, размещенной на палубе крейсера «Слава»\*

\*Феттер С, Фон Хунпель Ф. Science and Global Security. 1990, Volume 1, No`s 3-4, p.p.323-333/.

\*S.B Manhar at al. BARC NEWSLETTER. No.186, July 1999.pp. 1-6/

### 4.3 Прямая гамма, - альфа-спектрометрия образцов тестовой пробы и «толстого» слоя урана

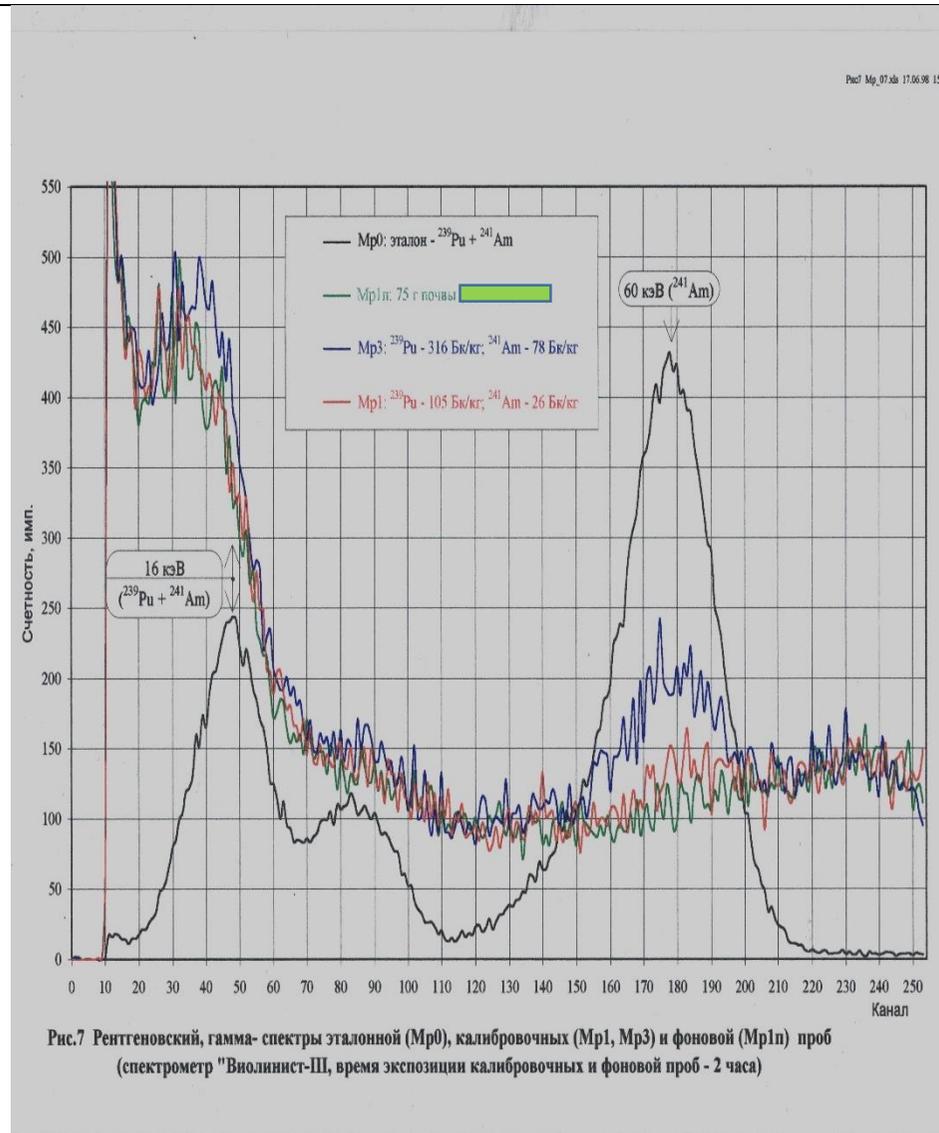


Рис. 11 – Спектры гамма,-рентгеновского излучения сыпучих проб (песок) содержащих смесь  $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Am}$

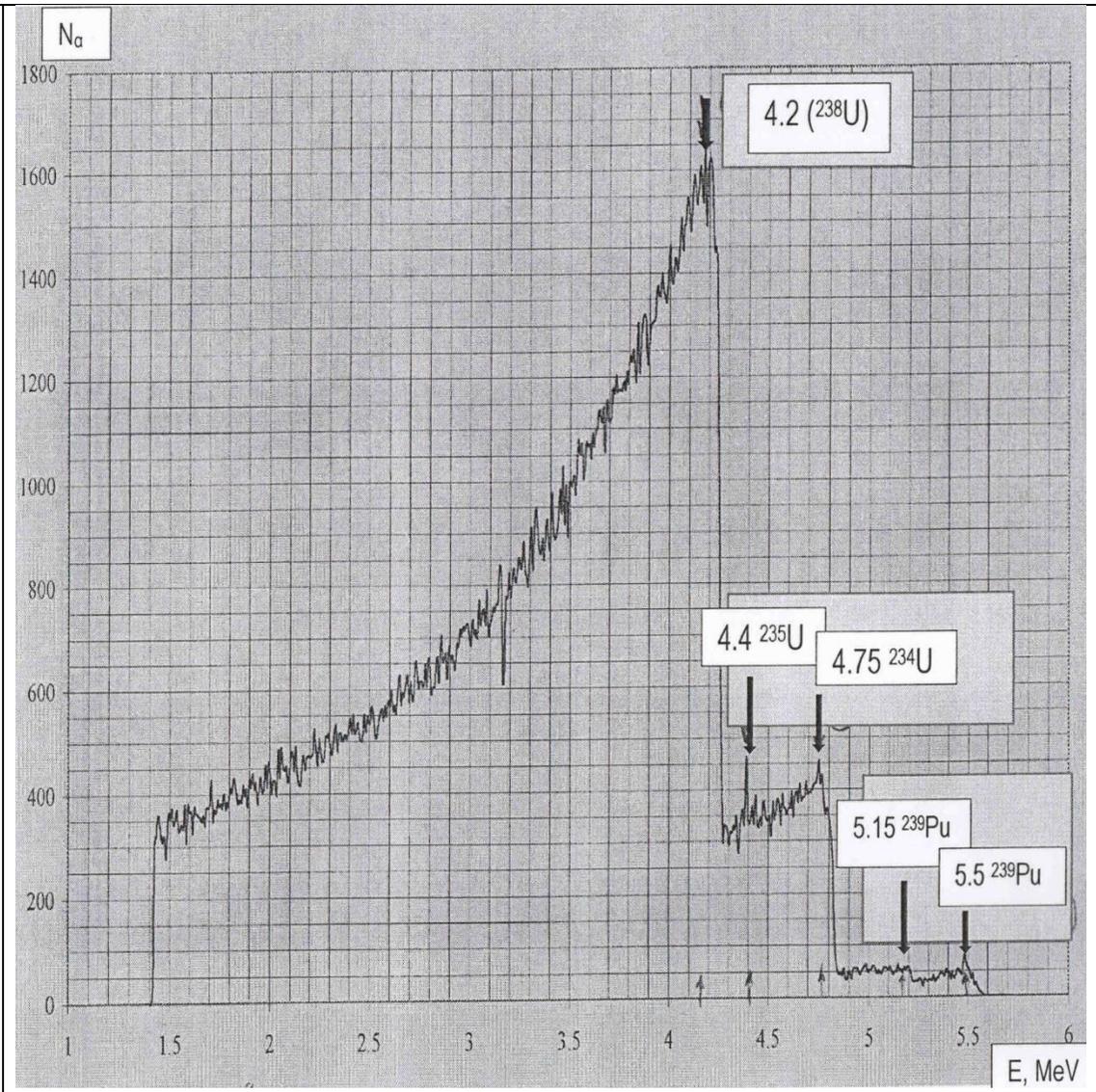


Рис.12. - Альфа-спектр «толстого» слоя обеднённого урана со следовыми количествами изотопов  $^{234,235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$

## 4.4 Гамма – спектры радионуклидов в почвах природной среды, зарегистрированные с использованием сцинтиляционного и полупроводникового детекторов

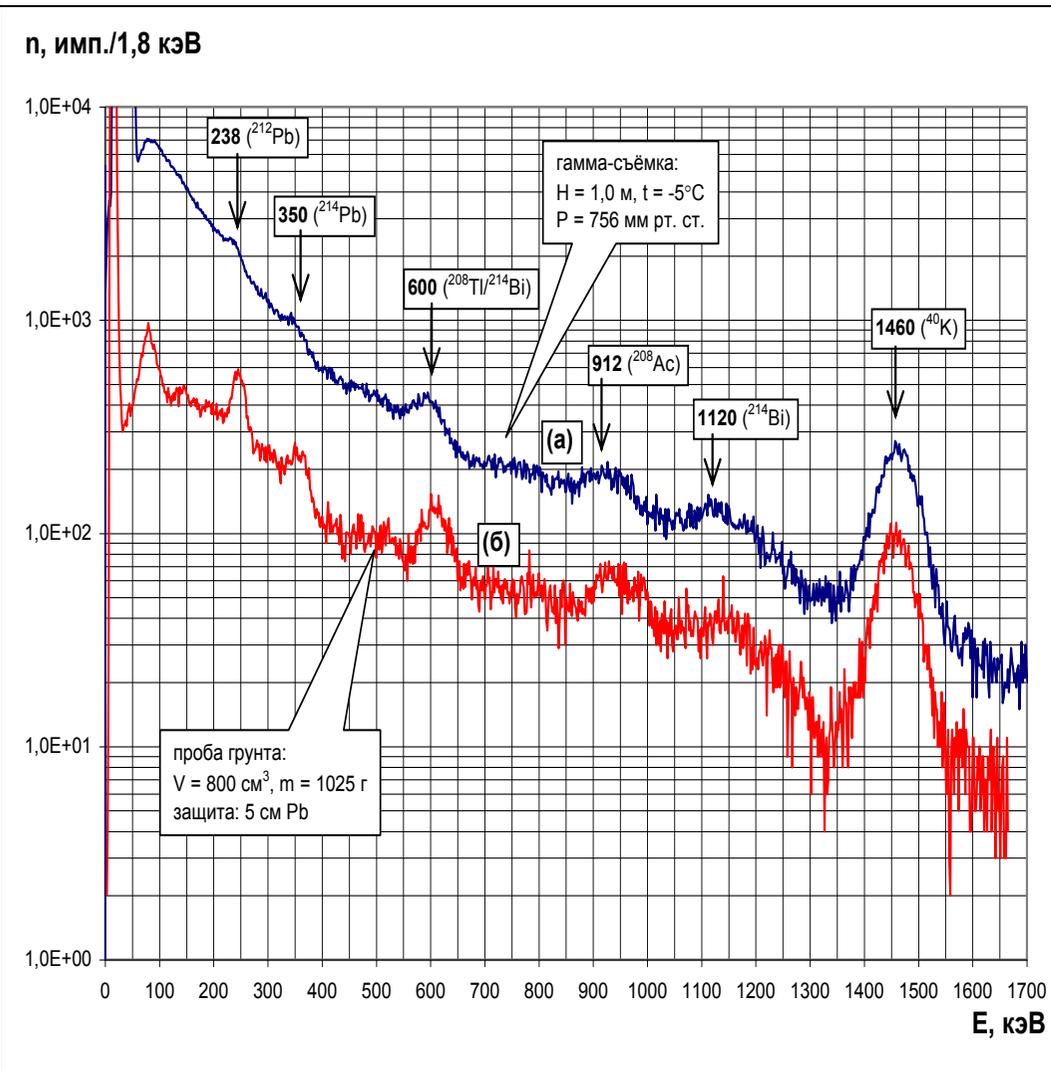


Рис.13 – Гамма-спектры съёмки участка местности (а) и пробы грунта (б). Детектор NaI(Tl) Ø63x63см (экспозиция - 1 час)

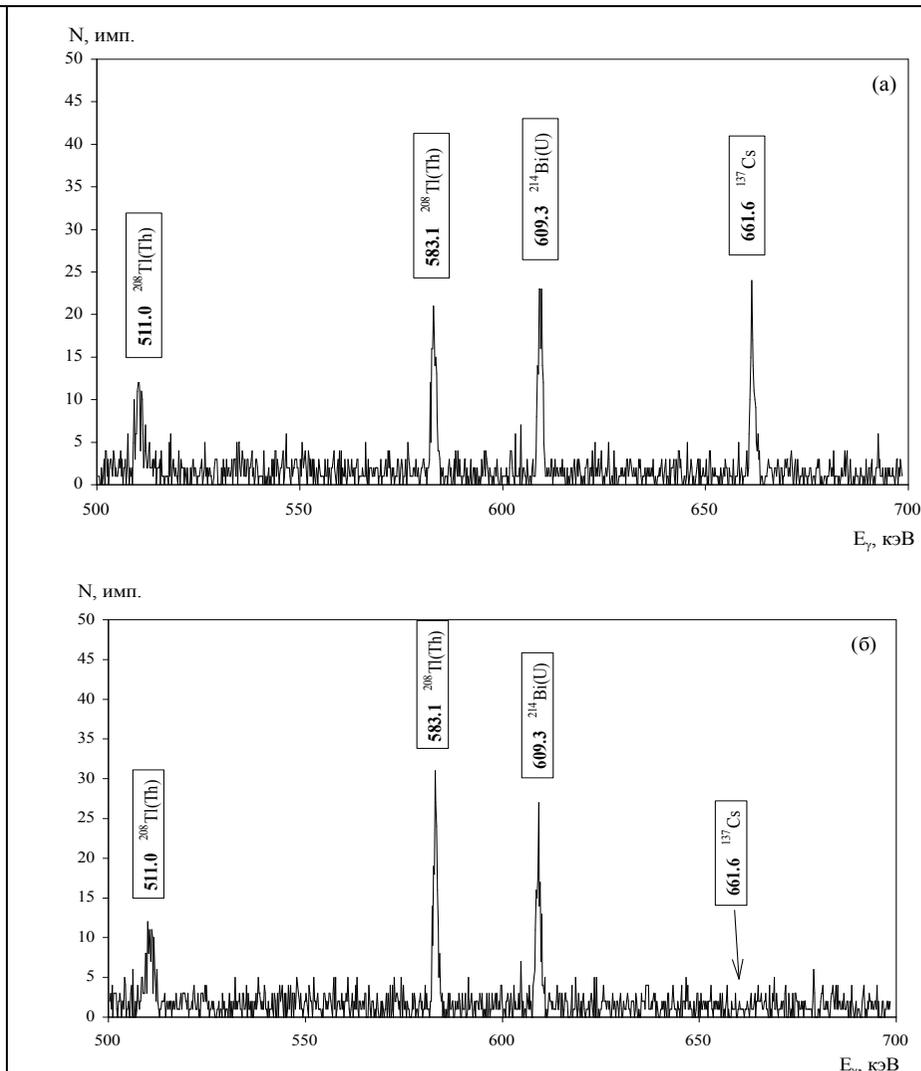


Рис.14 – «Окна» гамма-спектров проб почвы с поверхности (вверху) и с глубины 5м (внизу). Детектор HPGe

#### 4.5 Определения удельного содержания $^{90}\text{Sr}$ в пробах почвы прямым инструментальным методом (ПИМ).

ПИМ основан на измерениях суммарной  $\beta$ -активности препаратов проб и  $\gamma$ -спектрометрическом определении удельного содержания  $^{137}\text{Cs}$  и природных радионуклидов в пробах.

Предельная чувствительность ПИМ составляет величину  $a_{\beta, \min}(^{90}\text{Sr}) \approx 50 \text{ Бк/кг}$ , соответствующая плотность загрязнения почвы -  $A_s(^{90}\text{Sr}) \approx 0,3 \text{ Ки/км}^2$  ( $10 \text{ кБк/м}^2$ ).

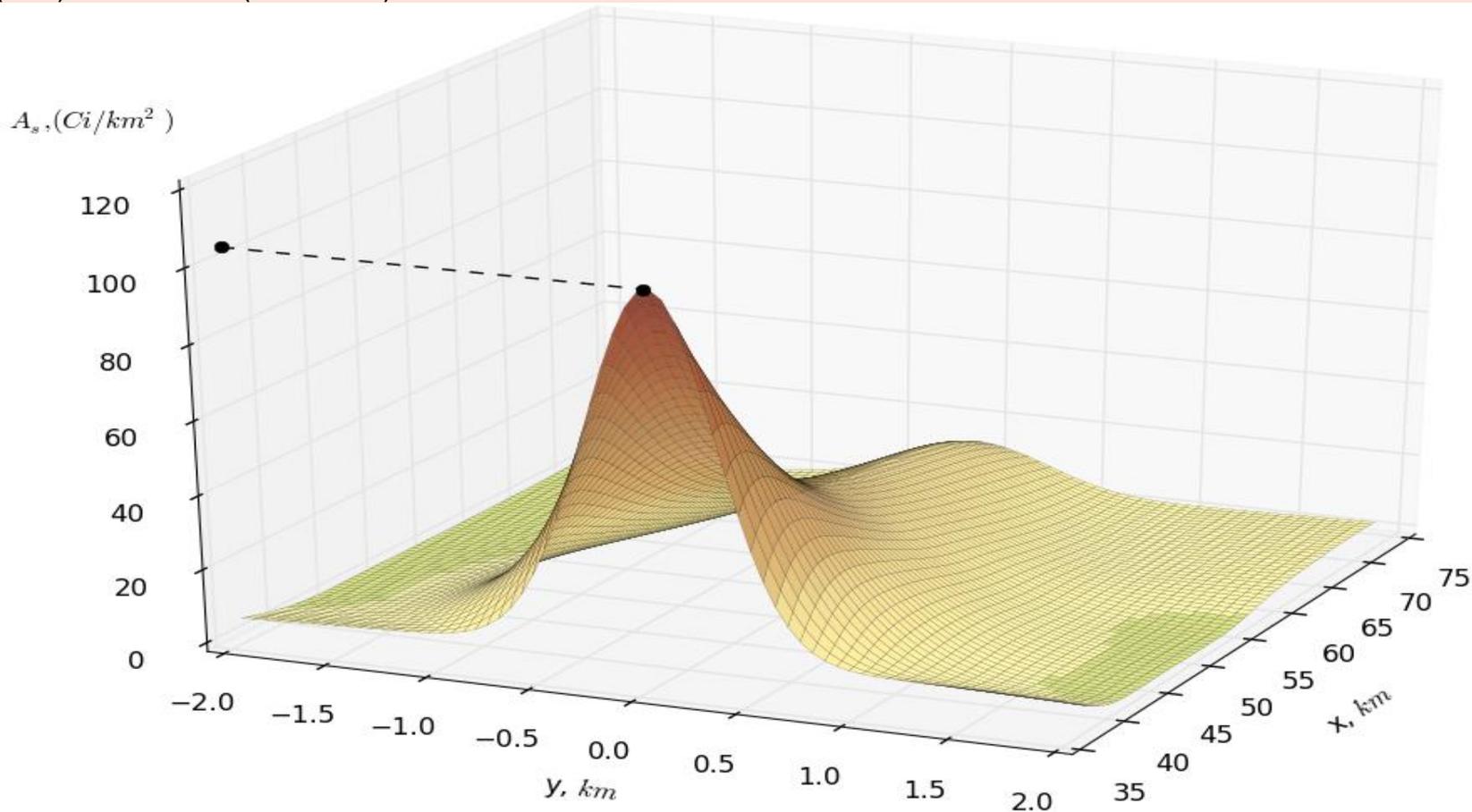


Рис. 15 - Модельный рельеф плотности выпадений  $^{90}\text{Sr}$  в средней части ВУРСа на момент взрыва\*

\*В.В. Власов, Н.В. Ивашкин, А.Л. Карманов. Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ №254, 2016 г./

## 5. Заключение

Радионуклидный экспресс-анализ является одним из ключевых компонентов технической системы контроля ядерных материалов и высокоактивных источников в гражданском и оружейном циклах в целях обеспечения локальной и всеобщей безопасности.

Использование данного вида анализа предпочтительно при проведении контроля многочисленных объектов в режиме инспекций на месте.

Уступая в ряде случаев по чувствительности детектирования методам и техническим средствам стационарных аналитических лабораторий, экспресс-анализ на месте с использованием автономных модулей обладают достаточной избирательностью и преимуществами по времени и стоимости при массовых измерениях.

Наиболее информативный метод - дистанционная гамма-спектрометрия и неразрушающий анализ при исследовании объектов и проб на месте, может трансформироваться в зависимости от требований обеспечения неинтрузивности в системах контроля за соблюдением двусторонних, многосторонних и международных соглашений.