

**Новый метод определения активности  
источников гамма-излучения,  
находящихся за слоем поглотителя  
с априорно неизвестными свойствами – метод G-фактора.**

**Оценки возможности  
практического применения метода G-фактора.**

В.В. Дровников, Н.Ю. Егоров, А.В. Кадушкин, В.М. Живун, В.В. Коваленко  
НИЛ «Ядерно-физические технологии радиационного контроля»

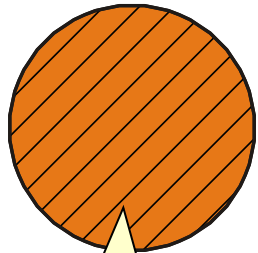


Лаборатория «Ядерно-физические технологии радиационного контроля»

телефон: (499) 323-91-04

e-mail: [egorov@radiation.ru](mailto:egorov@radiation.ru)

web-адрес: [www.radiation.ru](http://www.radiation.ru)

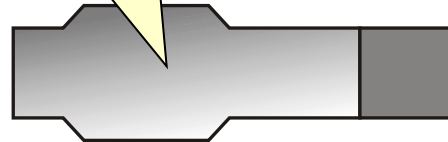


**Источник  
гамма-излучения с  
самопоглощением**



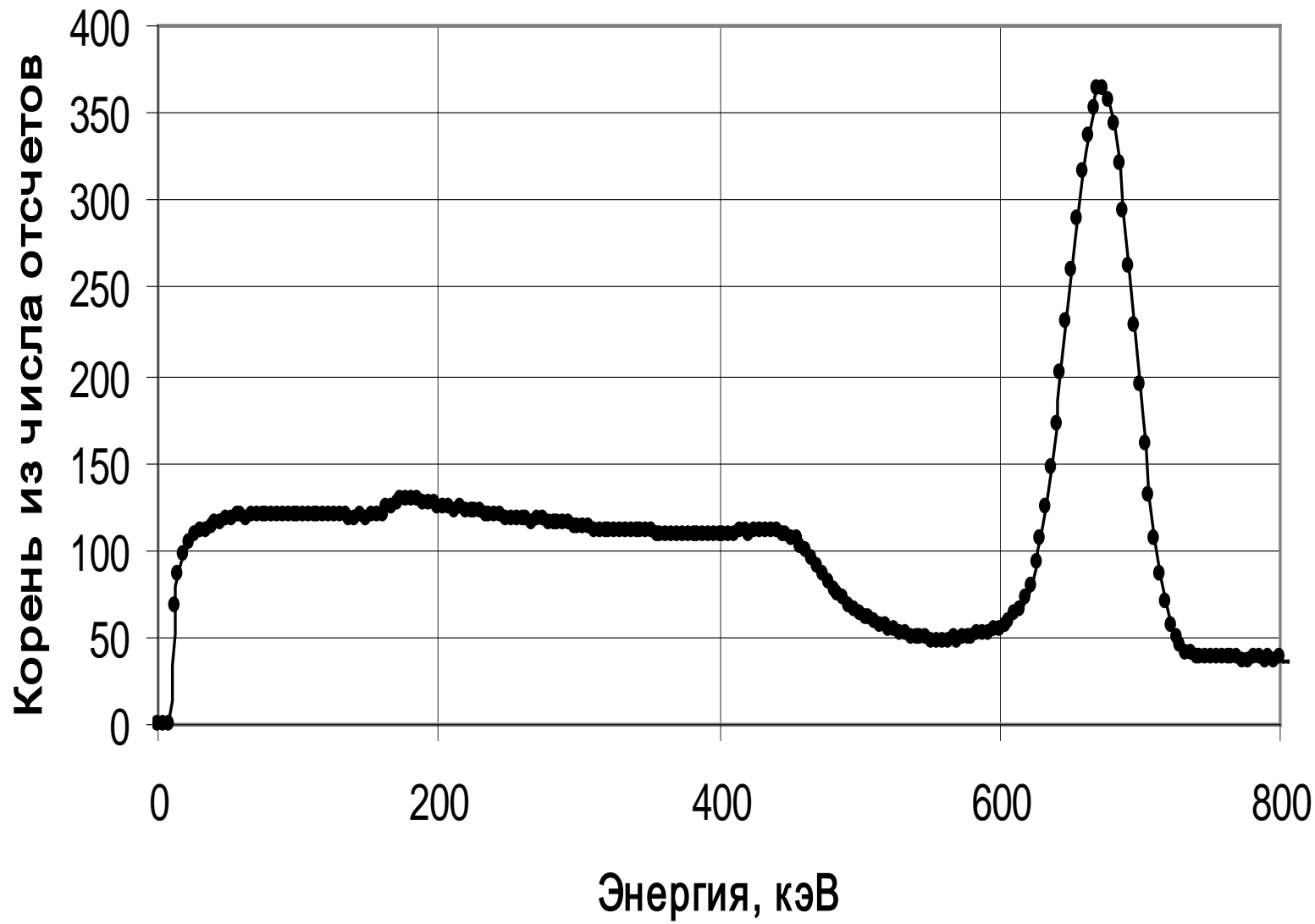
**Поглощающий  
слой**

**HPGe или NaI  
гамма-спектрометр**

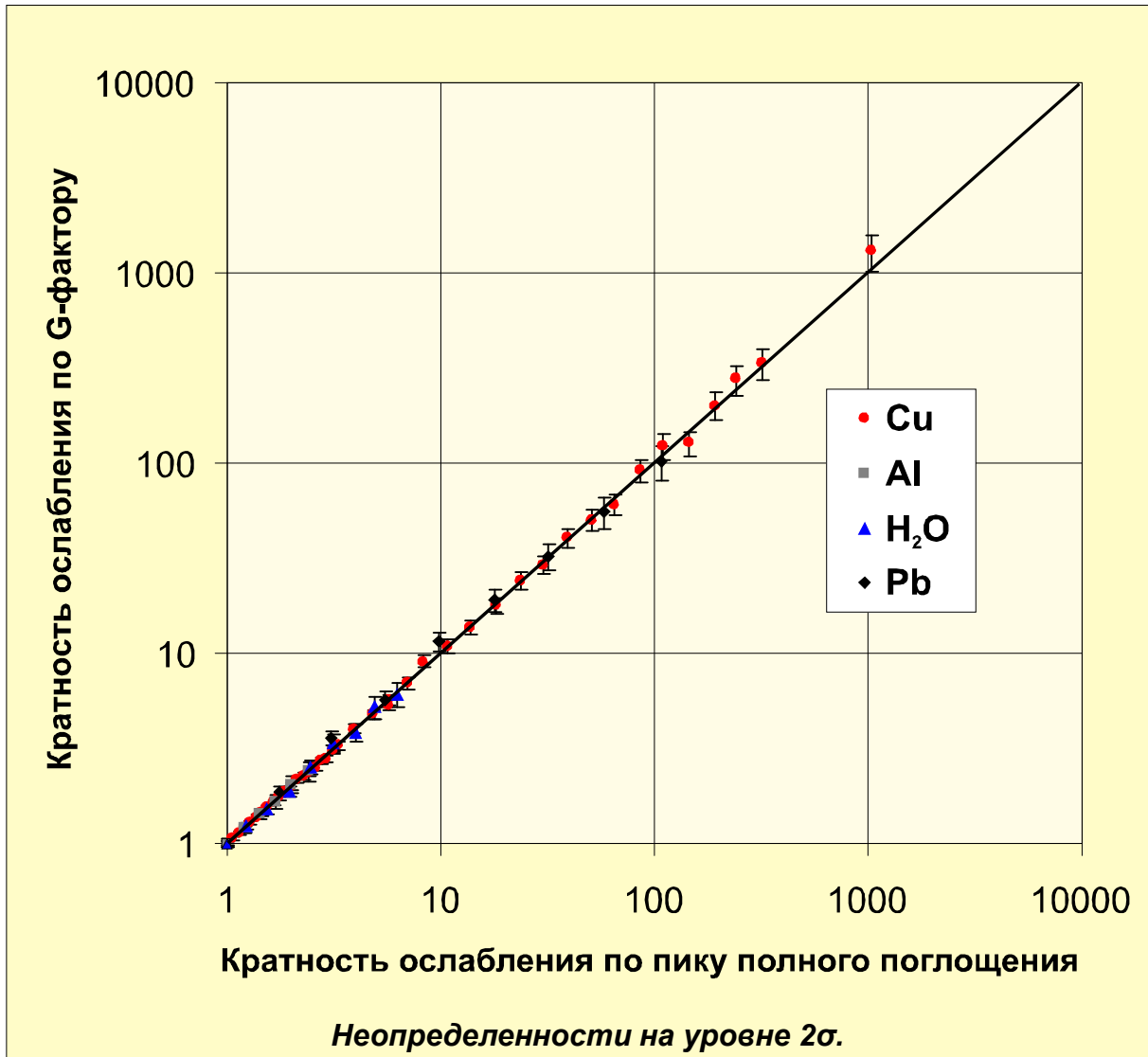
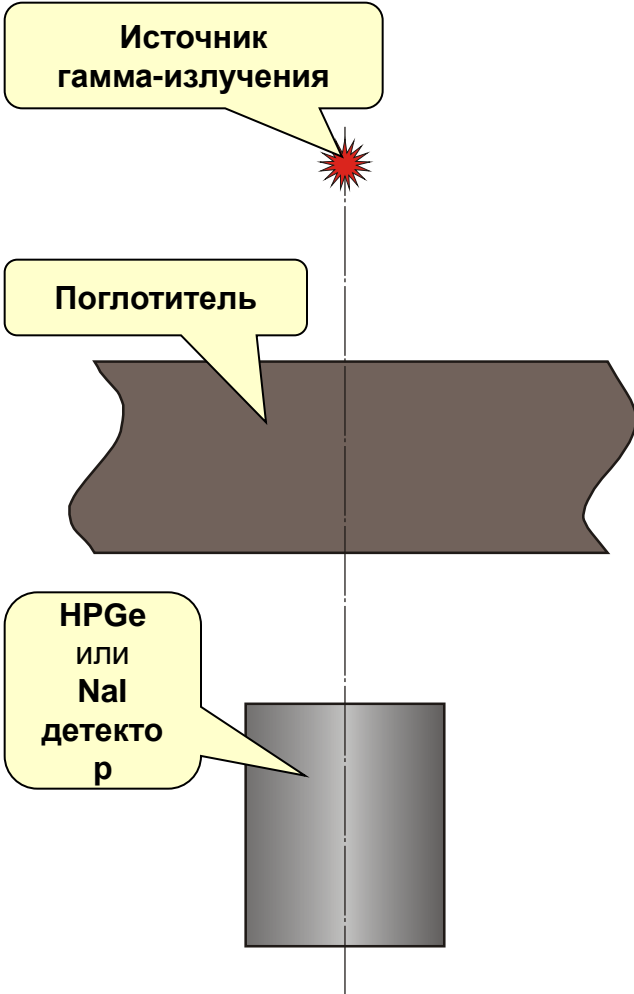


$$Q = \frac{C_p}{\varepsilon \cdot Y} \cdot K$$

- $C_p$  – скорость счета в пике полного поглощения;
- $\varepsilon$  – эффективность регистрации гамма-излучения в пике полного поглощения;
- $Y$  – квантовый выход;
- $K$  – кратность ослабления гамма-излучения в поглощающем слое и самом источнике.



# Сравнение результатов определения кратности ослабления гамма-излучения радионуклида $^{137}\text{Cs}$ .

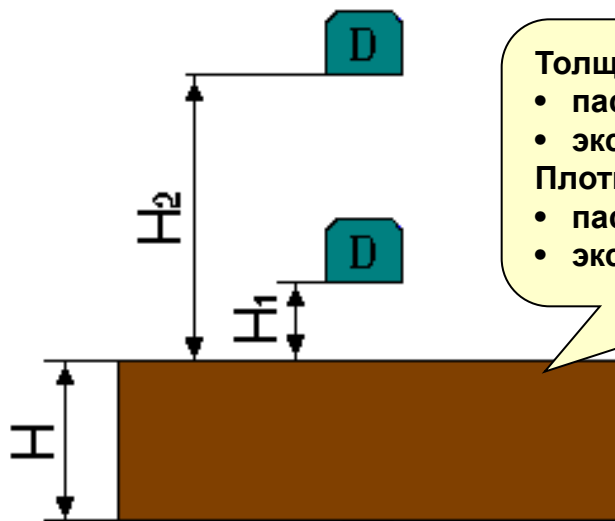


# Метод G-фактора

---

- ✦ Гамма-спектрометрический метод определения кратности ослабления гамма-излучения в слое материала, расположенного между источником и детектором непосредственно по спектру гамма-излучения источника, измеренному за этим слоем.
- ✦ Никакая априорная информация о характеристиках слоя или вспомогательные измерения не требуются.
- ✦ Для определения коэффициента поглощения методом G-фактора проводить предварительные измерение спектра без поглощающего слоя не требуется.
- ✦ В определяемую методом G-фактора величину кратности ослабления уже входит составляющая, обусловленная поглощением в материале источника (самопоглощение). Это весьма ценное свойство метода, т.к. учет самопоглощения может оказаться весьма нетривиальной задачей.

# Использование метода G-фактора для определения активности источника, находящегося под слоем неактивного материала с неизвестными характеристиками



Толщина поглотителя  $H$ , см

- паспорт  $30.0 \pm 0.5$
- эксперимент  $29.7 \pm 1.2$

Плотность поглотителя  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>

- паспорт  $1.48 \pm 0.04$
- эксперимент  $1.44 \pm 0.06$

Активность источника  $Q$ , кБк

<sup>152</sup> Eu	паспорт	$22.5 \pm 0.3$
	эксперимент	$21.5 \pm 2.4$
<sup>60</sup> Co	паспорт	$4.29 \pm 0.3$
	эксперимент	$3.9 \pm 0.4$
<sup>137</sup> Cs	паспорт	$16.4 \pm 0.3$
	эксперимент	$16.9 \pm 2.0$
<sup>94</sup> Nb	паспорт	$7.70 \pm 0.35$
	эксперимент	$8.1 \pm 1.1$

$$Q = \frac{(H_2 - H_1)^2}{\sigma \cdot Y} \cdot \frac{C_{p1} \cdot C_{p2}}{(\sqrt{C_{p1}} - \sqrt{C_{p2}})^2} \cdot K$$

где

$C_{p1}$  и  $C_{p2}$  – скорости счета в пиках полного поглощения, полученные при обработке спектров, измеренных на расстояниях  $H_1$  и  $H_2$ ,

$\sigma$  – чувствительность спектрометра в пике полного поглощения для гамма-квантов данной энергии,

$Y$  – квантовый выход гамма-квантов данной энергии,

$K$  – поправка на поглощение гамма-квантов в слое толщиной  $H$ , определяемая по методу G-фактора



## *In situ* гамма-спектрометрический контроль территории



## ЗА

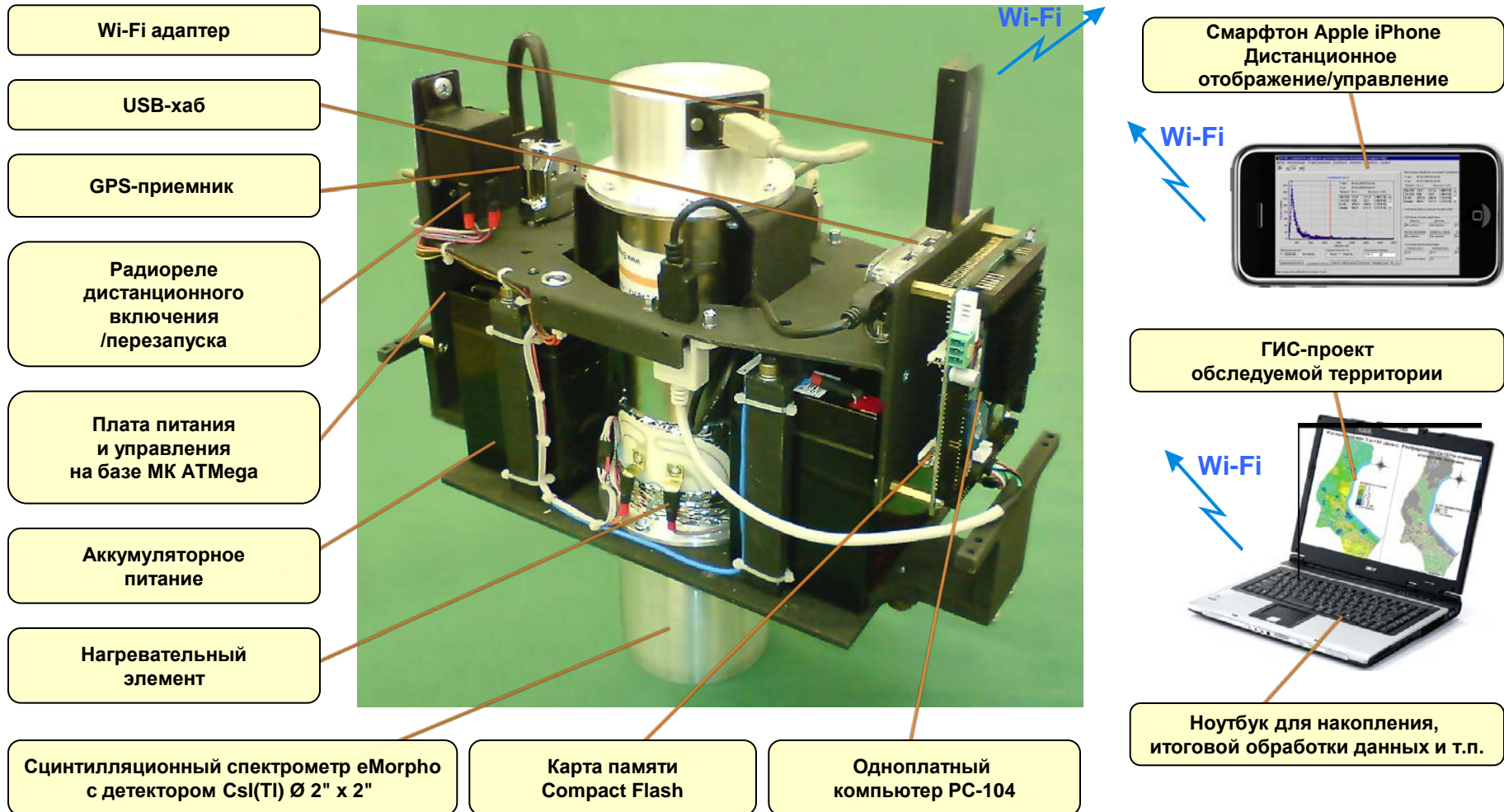
- ✚ Экспрессность метода
- ✚ Возможность корректировок исследований непосредственно в процессе их проведения
- ✚ Отсутствие отбора проб, их транспортировки, лабораторных исследований и последующей утилизации
- ✚ Возможность получения информации, недоступной иными методами

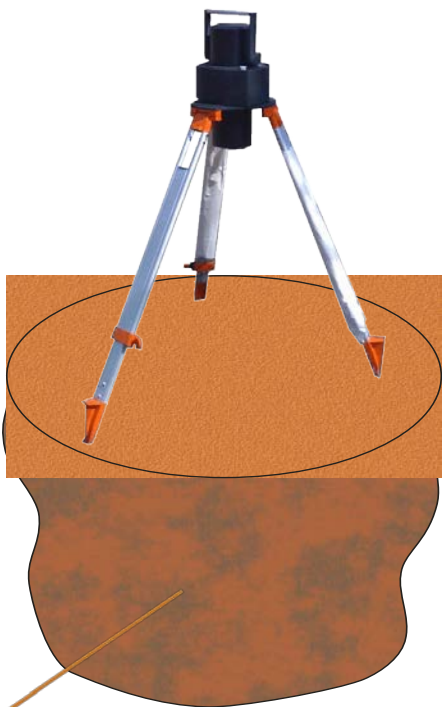
## ПРОТИВ

- ✚ **Необходимость использования априорной информации об объекте**
- ✚ Отбор, транспортировка, лабораторные исследования и утилизация проб исследуемого объекта
- ✚ Дополнительные измерения на исследуемом объекте
- ✚ Определенные сложности в эксплуатации HPGe спектрометров в полевых условиях
- ✚ Достаточно высокая стоимость полевых HPGe спектрометров
- ✚ Отсутствие работоспособных алгоритмов обработки NaI сцинтилляционных *In situ* гамма-спектров

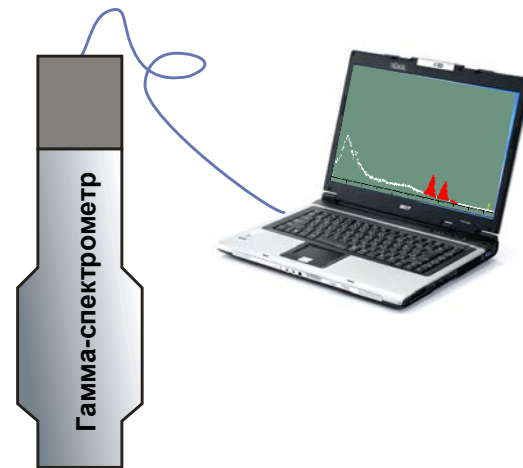


# Nal(Tl) сцинтилляционный *In situ* гамма-спектрометр





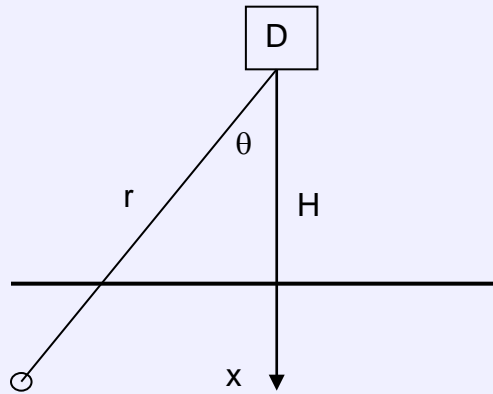
**Грунт**  
 $Q(x,y,z)$  – Распределение активности – **Неизвестно**  
 $\rho(x,y,z)$  – Плотность грунта – **Неизвестна**  
 $K$  – Эффективная кратность ослабления – **Неизвестна**



**Поглотитель**  
Плотность – **Неизвестна**  
Толщина – **Неизвестна**  
Материал – **Неизвестен**

**Источник**  
Активность – **Неизвестна**  
Радионуклидный состав – **Неизвестен**

# K *In situ* определению запаса активности радионуклидов в грунте



## Равномерное распределение активности

$$q(x) = \begin{cases} q_0 & \text{при } x < a \\ 0 & \text{при } x > a \end{cases}$$

Запас активности:  $Q = q_0 \cdot a$

$$C_p = \frac{\eta \cdot \sigma}{2} \cdot Q \cdot F_p(z)$$

$$G = \alpha + \beta \cdot F_G(z)$$

$$z = \mu \cdot a$$

## Экспоненциальное распределение активности

$$q(x) = q_0 \cdot e^{-k \cdot x}$$

Запас активности:  $Q = \int_0^{\infty} q(x) dx = \frac{q_0}{k}$  (Бк / см<sup>2</sup>)

$$C_p(E) = \frac{\eta \cdot \sigma \cdot q_0}{2} \cdot \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{k + \mu}{\mu}\right)$$

$$C_p(E) = \frac{\eta \cdot \sigma}{2} \cdot Q \cdot \ln\left(\frac{k + \mu}{\mu}\right)$$

где

$\eta(E)$  – квантовый выход гамма-линии с энергией  $E$ ,  
 $\sigma(E)$  – эффективная площадь детектора по ППП с энергией  $E$  (см<sup>2</sup>),

$\mu(E)$  – коэффициент поглощения гамма-квантов с энергией  $E$  в грунте.

$$C_p = \frac{\eta \cdot \sigma}{2} \cdot Q \cdot F_p(z)$$

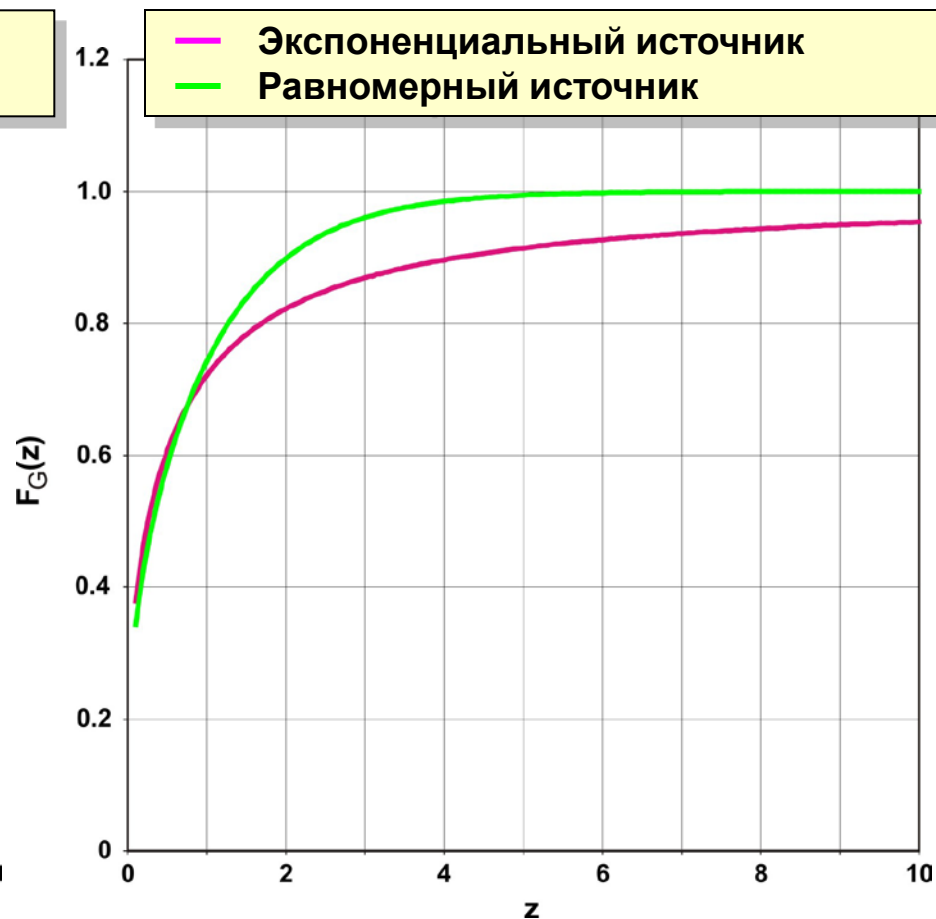
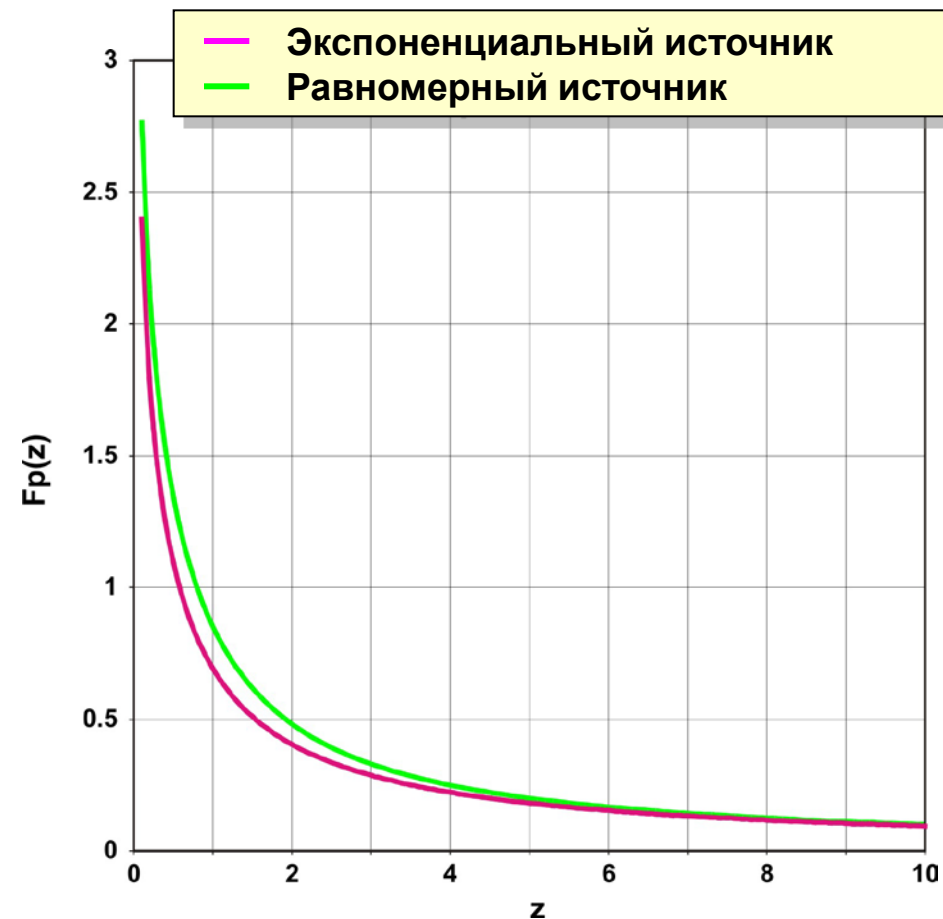
$$G = \alpha + \beta \cdot F_G(z)$$

$$z = \mu / k$$

# К *In situ* определению запаса активности радионуклидов в грунте

$$C_p = \frac{\eta \cdot \sigma}{2} \cdot Q \cdot F_p(z)$$

$$G = \alpha + \beta \cdot F_G(z)$$



## К *In situ* определению запаса активности радионуклидов в грунте

$$C_p = \frac{\eta \cdot \sigma}{2} \cdot Q \cdot F_p(z)$$

$$G = \alpha + \beta \cdot F_G(z)$$

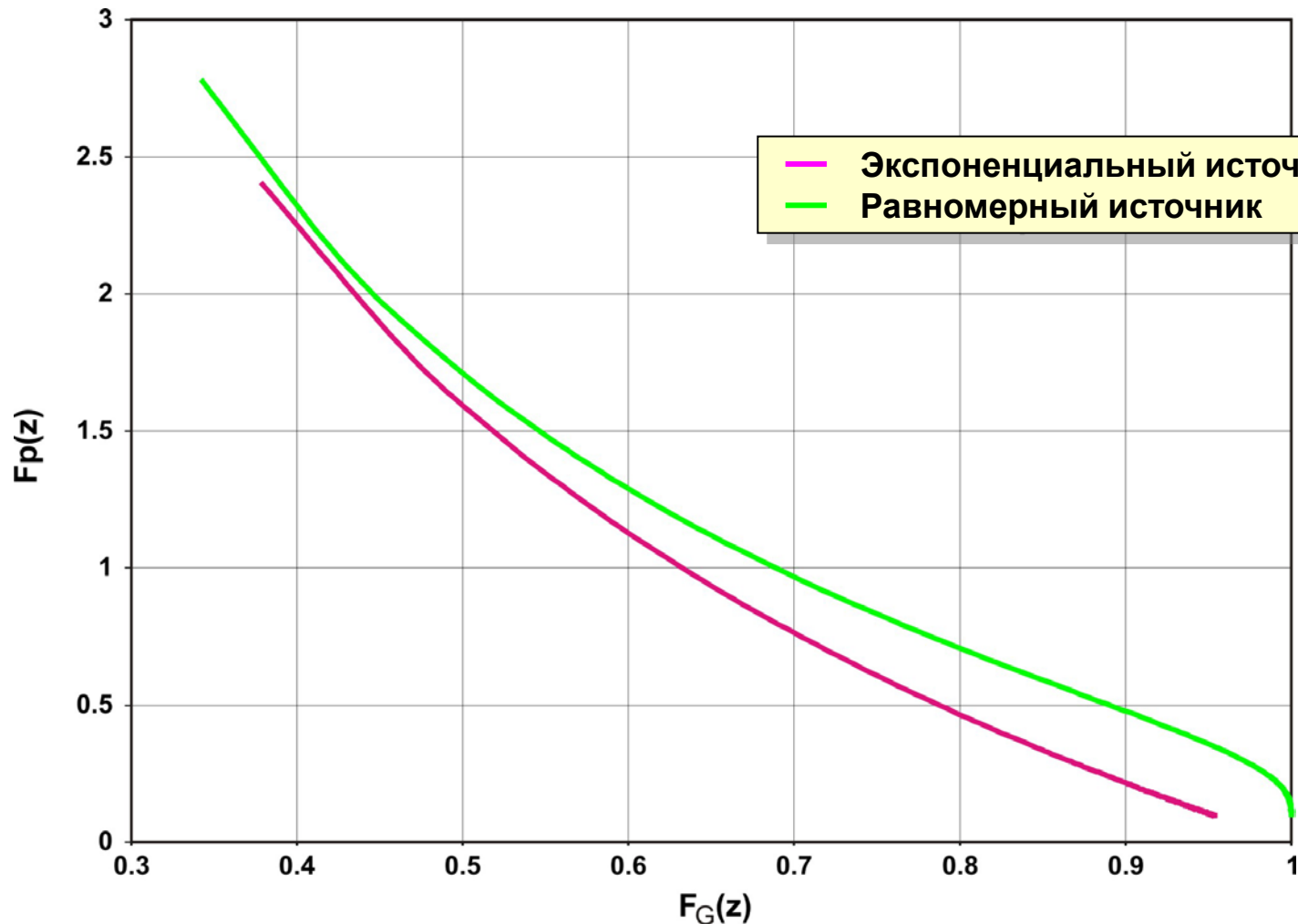
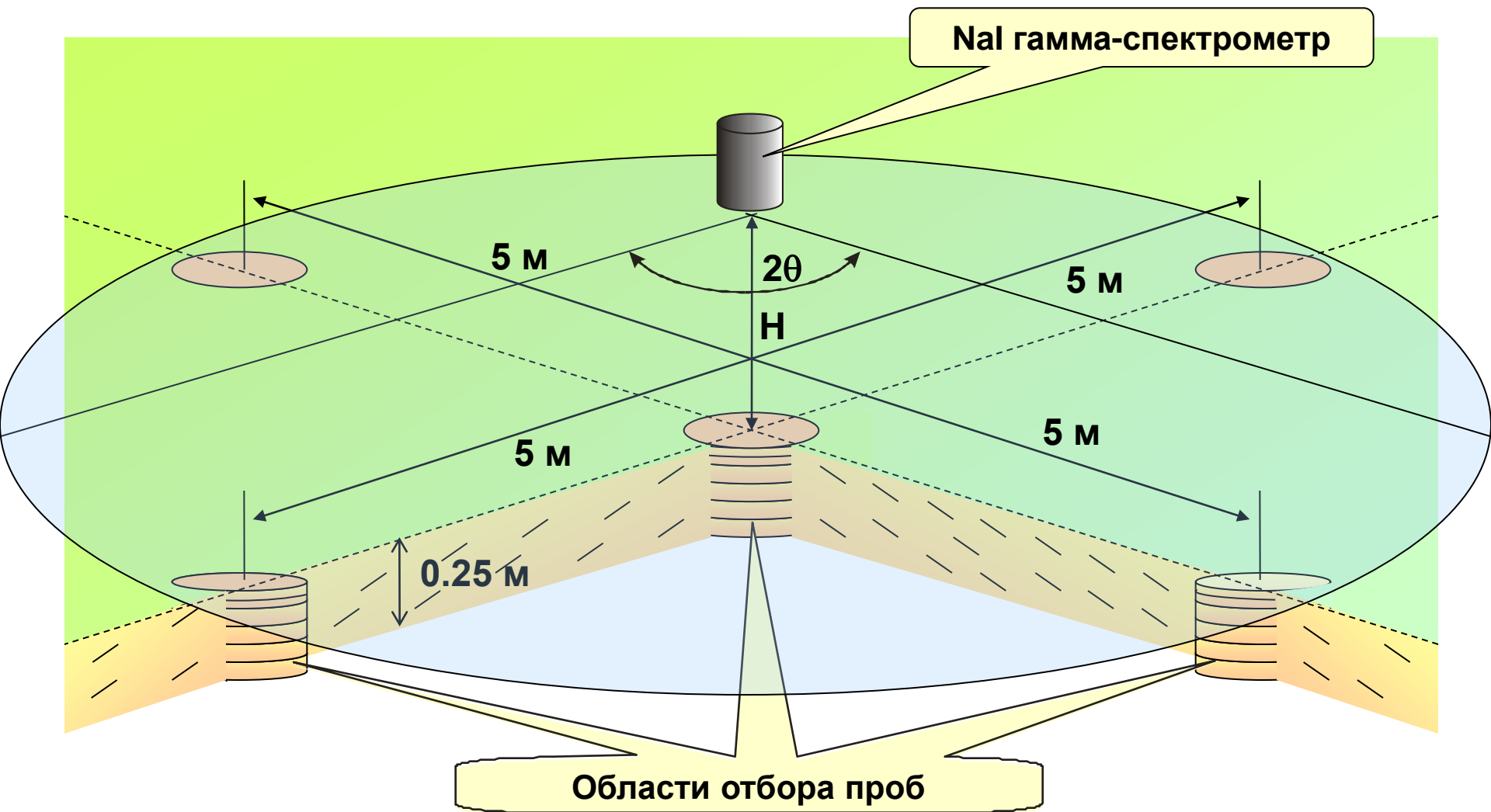


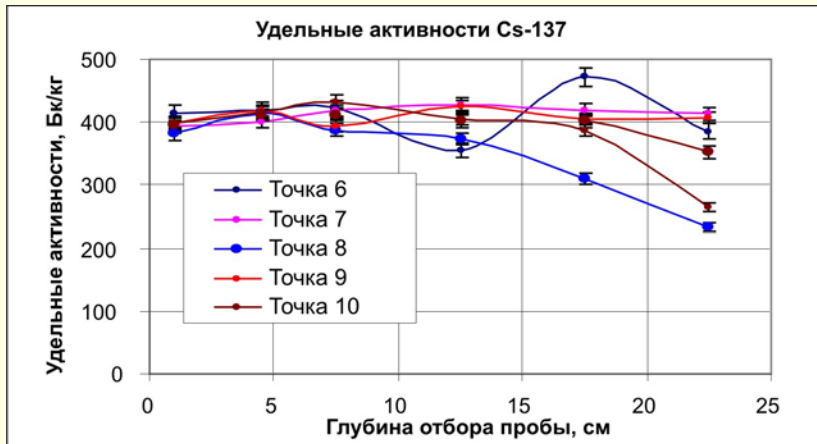
Схема *In situ* гамма-спектрометрических измерений для определения запаса активности радионуклидов в грунте





# In situ определение активности радионуклидов в грунте. 2008 г. Чернобыльское загрязнение в Калужской области.

## ПОЛЕ



Удельная активность, Бк/кг

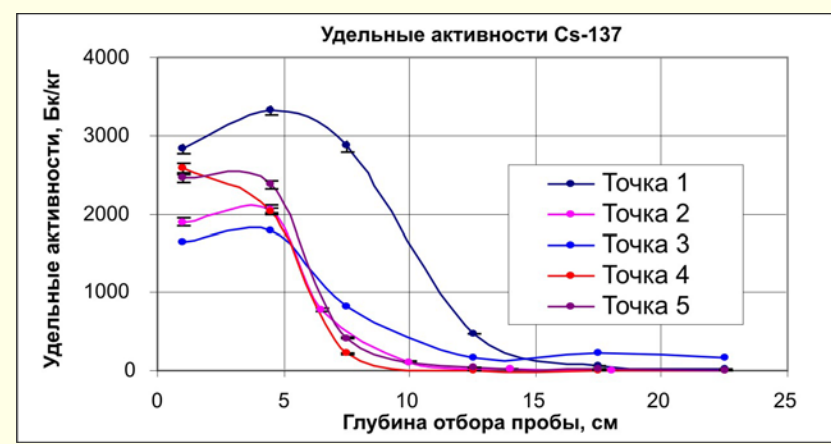
HPGe анализ проб

Ra-226	Th-232	K-40	Cs-137
$8.48 \pm 0.19$	$8.14 \pm 0.43$	$191.5 \pm 2.5$	$404 \pm 11$

*In situ* NaI

Ra-226	Th-232	K-40	Cs-137
$8.8 \pm 1.2$	$7.1 \pm 0.6$	$217 \pm 5$	$451 \pm 32$

## ЛЕС



Запас радионуклида Cs-137

Номер точки

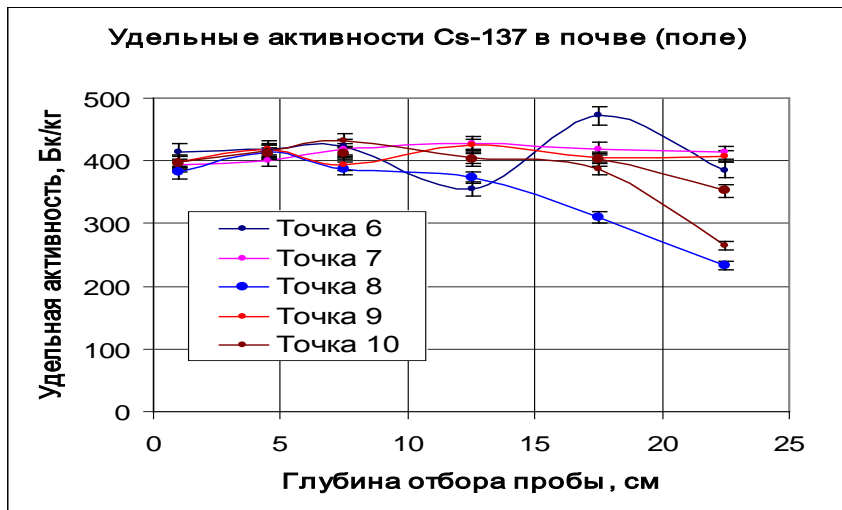
HPGe анализ проб

*In situ* NaI

Номер точки	HPGe анализ проб		<i>In situ</i> NaI
	Кюри/км <sup>2</sup>	Бк/м <sup>2</sup> ×10 <sup>4</sup>	
1	$9.8 \pm 0.3$	$36.1 \pm 1.1$	$16.5 \pm 0.5$
2	$3.8 \pm 0.1$	$14.2 \pm 0.5$	
3	$4.6 \pm 0.1$	$17.1 \pm 0.5$	
4	$3.7 \pm 0.1$	$13.7 \pm 0.5$	
5	$4.3 \pm 0.1$	$15.9 \pm 0.5$	
Среднее / разброс	$5.2 / 2.3$	$19 / 8$	



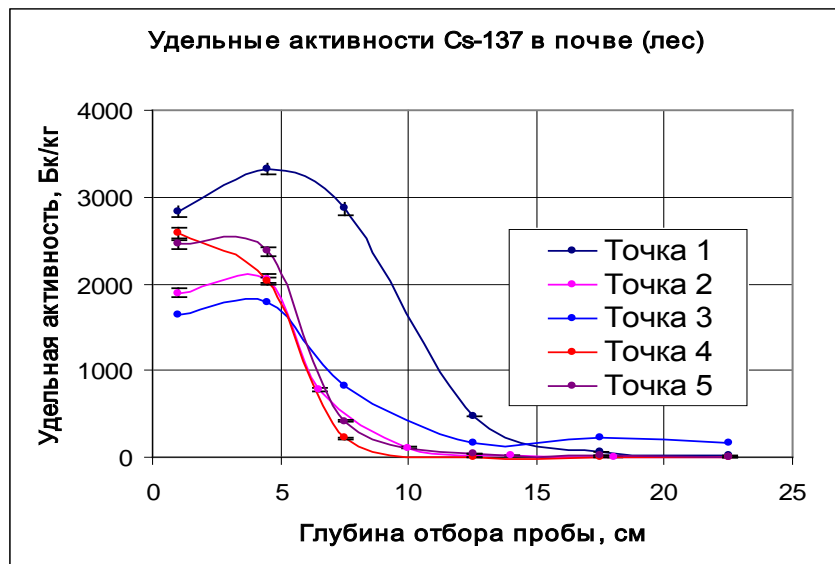
# In situ определение активности радионуклидов в грунте. Поле. 2008 г. Чернобыльское загрязнение в Калужской области.



Удельная активность, Бк/кг			
HPGe анализ проб			
Ra-226	Th-232	K-40	Cs-137
8.48±0.19	8.14±0.43	191.5±2.5	404±11
In situ NaI			
Ra-226	Th-232	K-40	Cs-137
8.8±1.2	7.1±0.6	217±5	451±32



# In Situ определение активности радионуклидов в грунте. Лес. 2008 г. Чернобыльское загрязнение в Калужской области.

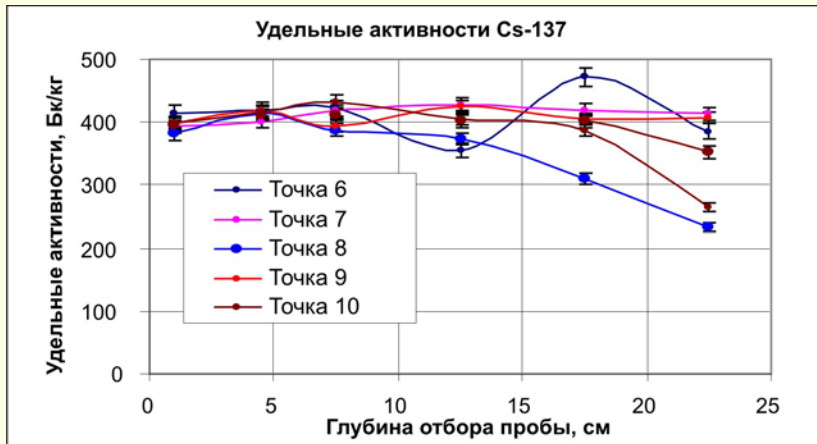


Номер точки	Запас радионуклида Cs-137		
	HPGe анализ проб		<i>In situ</i> NaI
	Кюри/км <sup>2</sup>	Бк/м <sup>2</sup> ×10 <sup>4</sup>	Бк/м <sup>2</sup> ×10 <sup>4</sup>
1	9.8±0.3	36.1±1.1	<b>16.5±0.5</b>
2	3.8±0.1	14.2±0.5	
3	4.6±0.1	17.1±0.5	
4	3.7±0.1	13.7±0.5	
5	4.3±0.1	15.9±0.5	
<b>Среднее / разброс</b>	<b>5.2 / 2.3</b>	<b>19 / 8</b>	



# In situ определение активности радионуклидов в грунте. 2008 г. Чернобыльское загрязнение в Калужской области.

## ПОЛЕ



### Удельная активность, Бк/кг

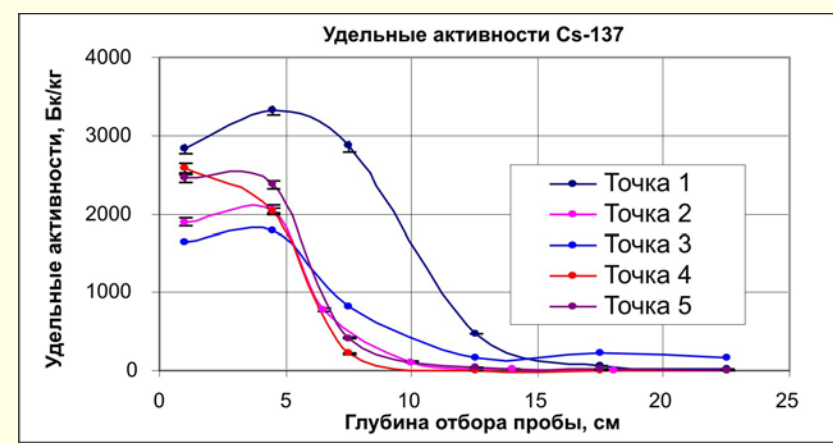
#### HPGe анализ проб

Ra-226	Th-232	K-40	Cs-137
$8.48 \pm 0.19$	$8.14 \pm 0.43$	$191.5 \pm 2.5$	$404 \pm 11$

#### In situ NaI

Ra-226	Th-232	K-40	Cs-137
$8.8 \pm 1.2$	$7.1 \pm 0.6$	$217 \pm 5$	$451 \pm 32$

## ЛЕС



### Номер точки

### Запас радионуклида Cs-137

Номер точки	HPGe анализ проб		In situ NaI
	Кюри/км <sup>2</sup>	Бк/м <sup>2</sup> ×10 <sup>4</sup>	Бк/м <sup>2</sup> ×10 <sup>4</sup>
1	$9.8 \pm 0.3$	$36.1 \pm 1.1$	$16.5 \pm 0.5$
2	$3.8 \pm 0.1$	$14.2 \pm 0.5$	
3	$4.6 \pm 0.1$	$17.1 \pm 0.5$	
4	$3.7 \pm 0.1$	$13.7 \pm 0.5$	
5	$4.3 \pm 0.1$	$15.9 \pm 0.5$	
Среднее / разброс	<b>5.2 / 2.3</b>	<b>19 / 8</b>	



## Определение типа источника методом G-фактора

Условия измерений	Значение G-фактора для $^{137}\text{Cs}$
Источник Cs-137 без поглотителя	$4.17 \pm 0.07$
Калужская область. Чернобыльское загрязнение. Лес.	$9.69 \pm 0.03$
Калужская область. Чернобыльское загрязнение. Поле.	$14.04 \pm 0.09$
Нововоронежская АЭС. Поля фильтрации.	$12.2 \pm 0.2 / 18.4 \pm 0.12$
Источник Cs-137 под слоем щебня толщиной 30 см.	$42.9 \pm 0.9$

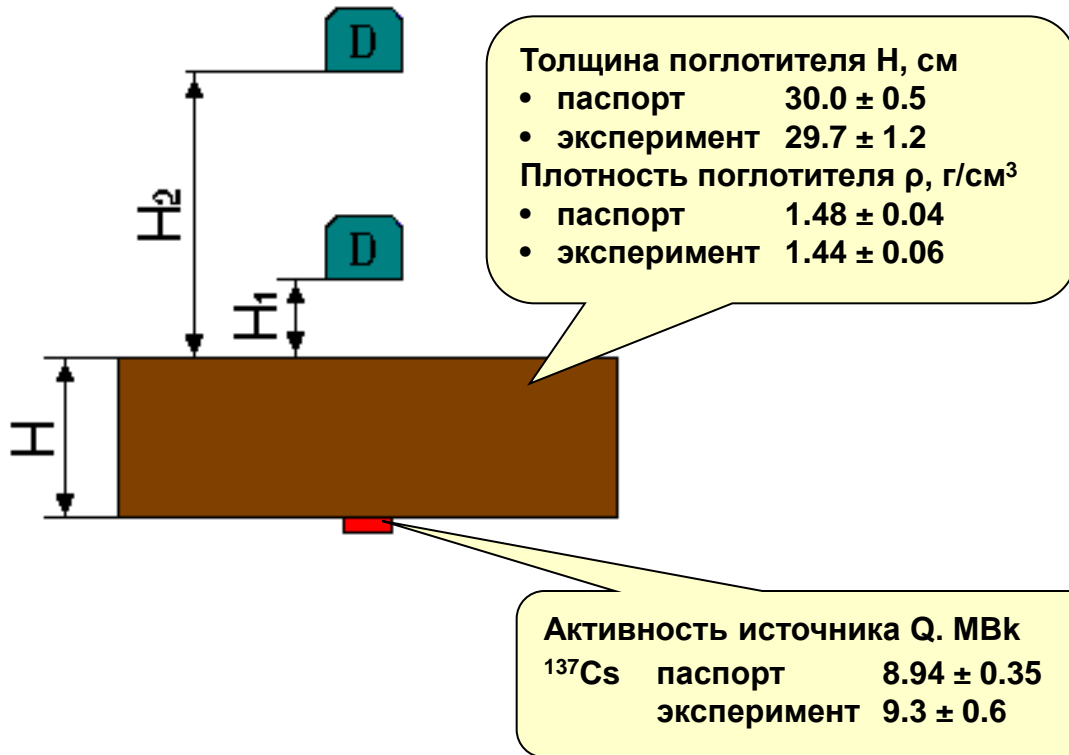
## Определение G-фактора для радионуклидов Cs-137 и Co-60 на полях фильтрации Нововоронежской АЭС.

Детектор Дата измерений	G-фактор по $^{60}\text{Co}$		G-фактор по $^{137}\text{Cs}$	
	Без поглотителя	На полях фильтрации	Без поглотителя	На полях фильтрации
<b>NaI Ø3"×3"</b> 31.03.2009 г.	$2.02 \pm 0.06$	$7.9 \pm 1.0$	$4.17 \pm 0.07$	$12.2 \pm 0.2$
<b>CsI Ø2"×2"</b> 29.09.2009 г.		$9.7 \pm 0.5$		$18.4 \pm 0.1$





# Использование метода G-фактора для определения активности источника, находящегося под слоем неактивного материала с неизвестными характеристиками



$$Q = \frac{(H_2 - H_1)^2}{\sigma \cdot Y} \cdot \frac{C_{p1} \cdot C_{p2}}{(\sqrt{C_{p1}} - \sqrt{C_{p2}})^2} \cdot K$$

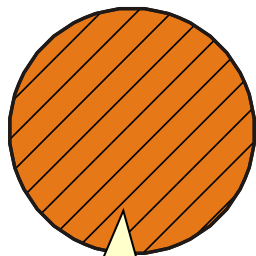
где

$C_{p1}$  и  $C_{p2}$  – скорости счета в пиках полного поглощения, полученные при обработке спектров, измеренных на расстояниях  $H_1$  и  $H_2$ ,

$\sigma$  – чувствительность спектрометра в пике полного поглощения для гамма-квантов данной энергии,

$Y$  – квантовый выход гамма-квантов данной энергии,

$K$  – поправка на поглощение гамма-квантов в слое толщиной  $H$ , определяемая по методу G-фактора

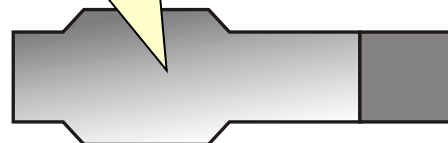


Источник  
гамма-излучения с  
самопоглощением



Поглощающий  
слой

HPGe или NaI  
гамма-спектрометр

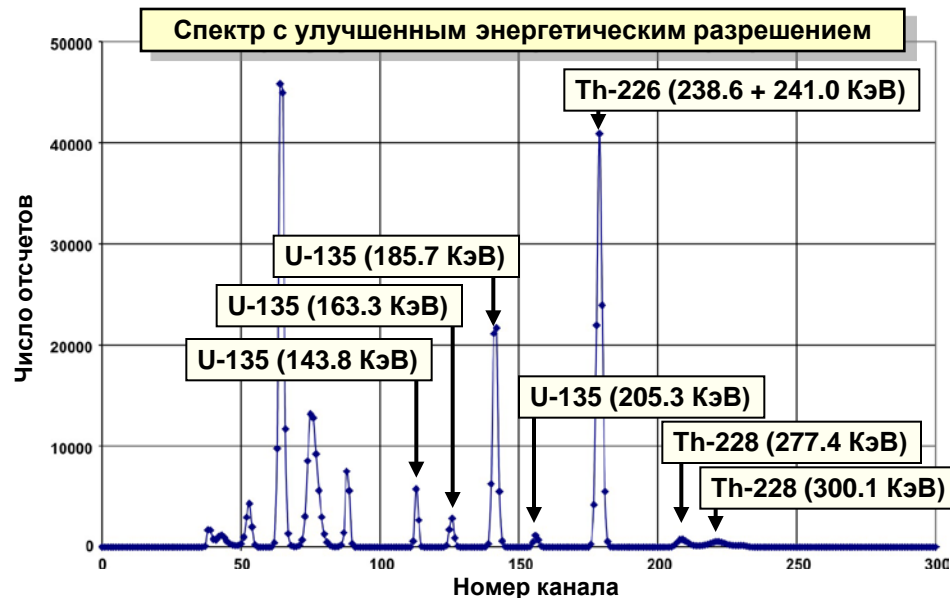
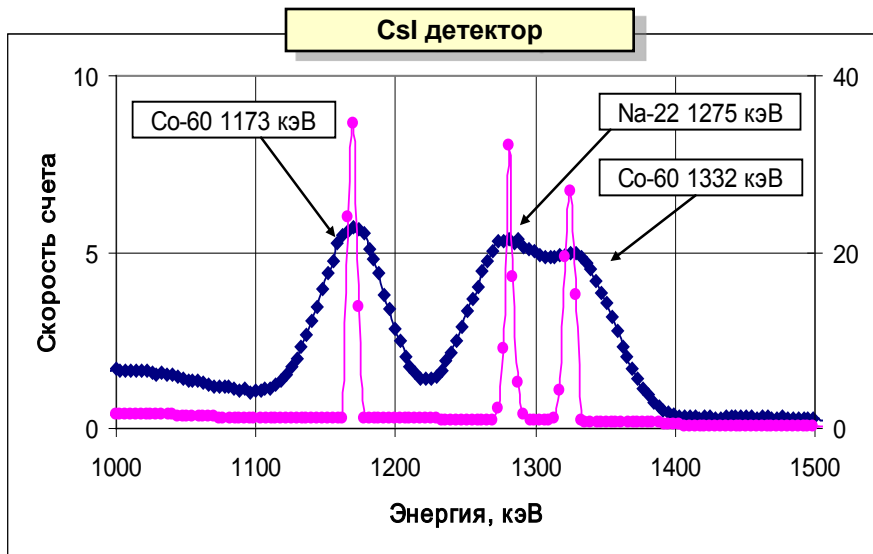
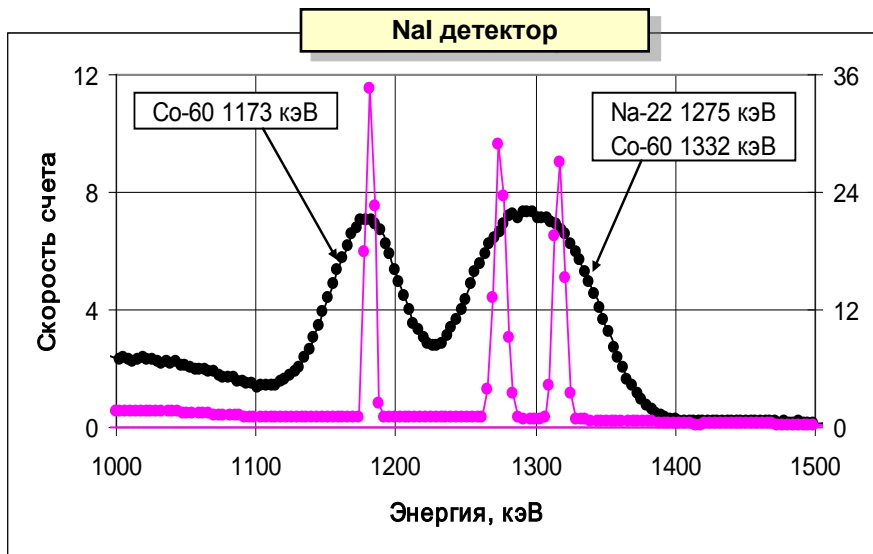


$$Q = \frac{C_p}{\varepsilon \cdot Y} \cdot K$$

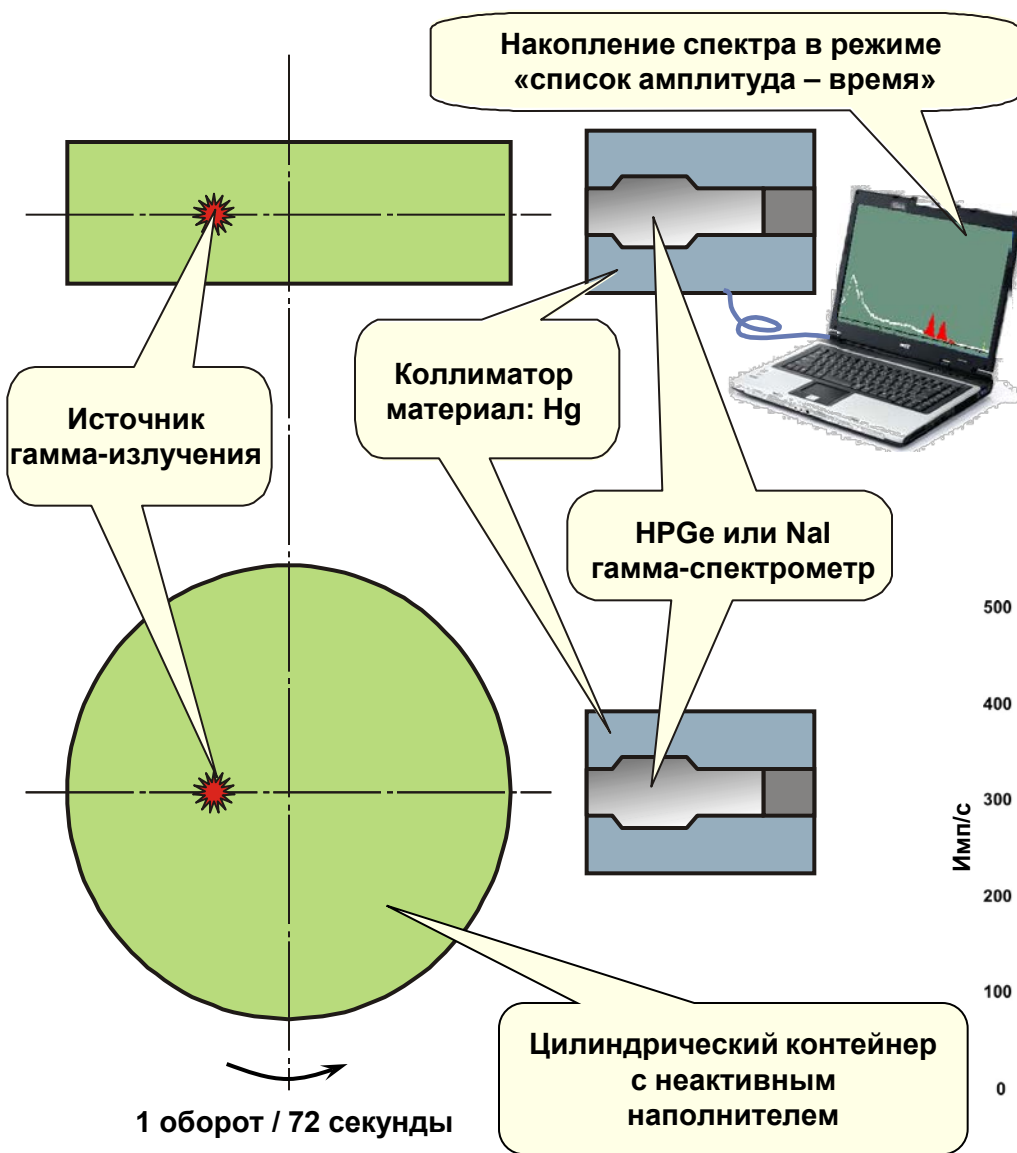
- $C_p$  – скорость счета в пике полного поглощения;
- $\varepsilon$  – эффективность регистрации гамма-излучения в пике полного поглощения;
- $Y$  – квантовый выход;
- $K$  – кратность ослабления гамма-излучения в поглощающем слое и самом источнике.



# О применимости сцинтилляционного гамма-спектрометра

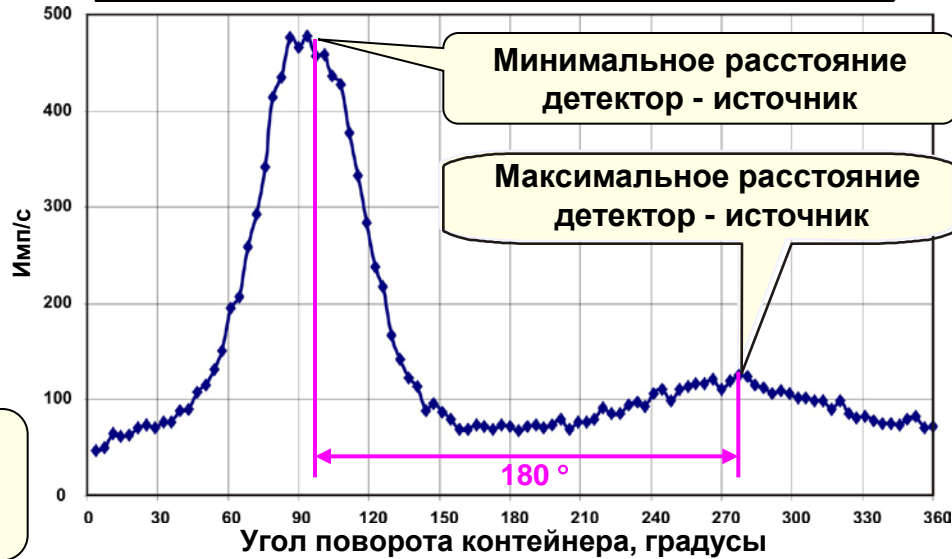


# К определению активности источников гамма-излучения в контейнере



$$\frac{S_{\max}(E_i)}{S_{\min}(E_i)} = \frac{(L_0 + \Delta_i)^2}{(L_0 - \Delta_i)^2} e^{2 \cdot \mu(E_i) \cdot \Delta_i}$$

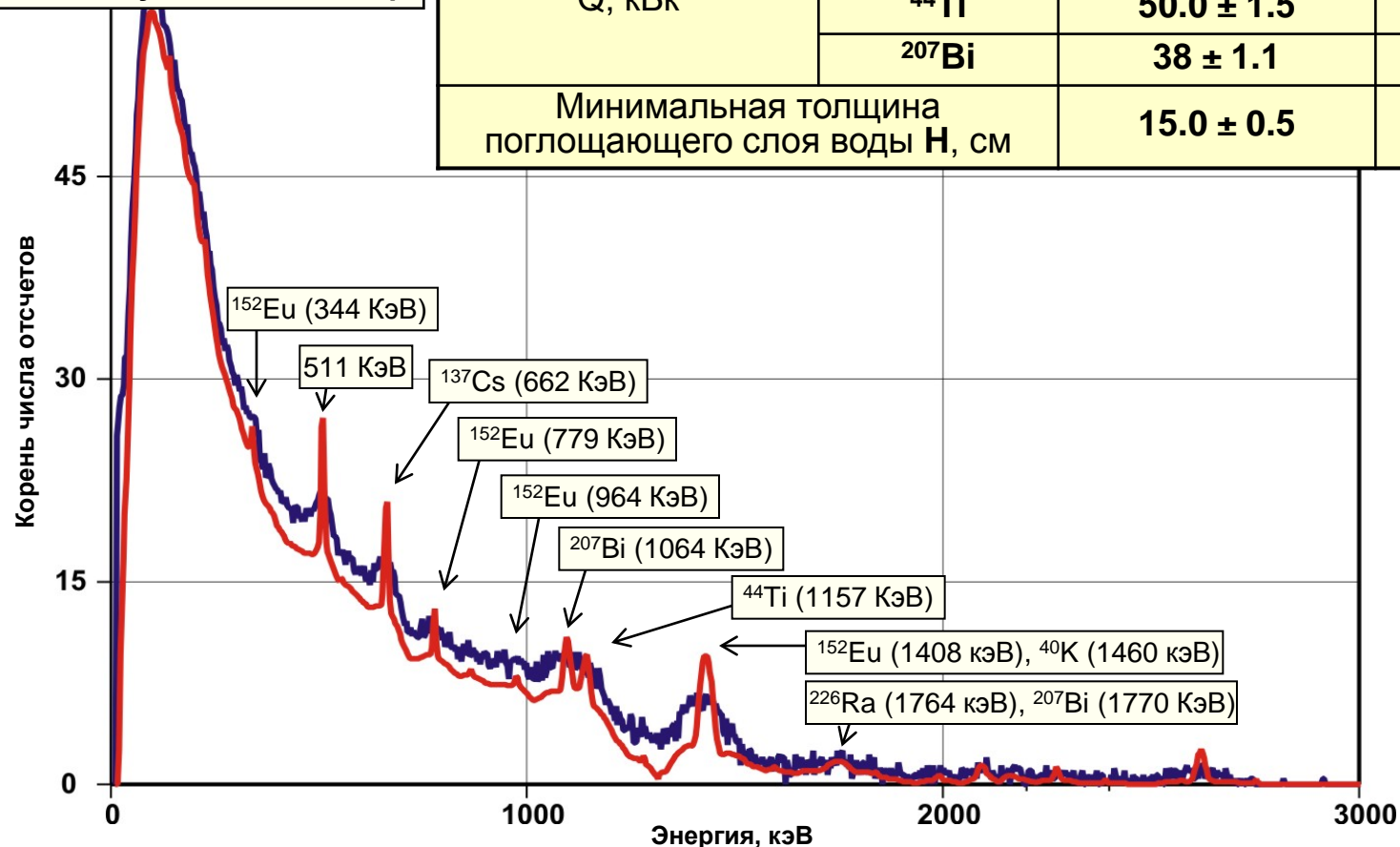
$S_{\max}(E_i)$  – скорость счета в пике полного поглощения, соответствующая максимальному расстоянию источник-детектор;  
 $S_{\min}(E_i)$  – скорость счета в пике полного поглощения, соответствующая минимальному расстоянию источник-детектор;  
 $L_0$  – расстояние от центра детектора до центра контейнера;  
 $\mu(E_i)$  – коэффициент ослабления, определяемый по методу G-фактора;  
 $\Delta_i$  – расстояние точечный источник - ось вращения контейнера.



# Смесь радионуклидов $^{152}\text{Eu}$ , $^{207}\text{Bi}$ , $^{44}\text{Tl}$ , $^{137}\text{Cs}$ . Поглотитель вода. Толщина поглощающего слоя воды от 15 см до 41 см.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	$^{137}\text{Cs}$	$120 \pm 3.6$	$114 \pm 17$
	$^{152}\text{Eu}$	$170 \pm 5.1$	$210 \pm 30$
	$^{44}\text{Tl}$	$50.0 \pm 1.5$	$63 \pm 9$
	$^{207}\text{Bi}$	$38 \pm 1.1$	$32 \pm 5$
Минимальная толщина поглощающего слоя воды H, см		$15.0 \pm 0.5$	$16.9 \pm 1.5$

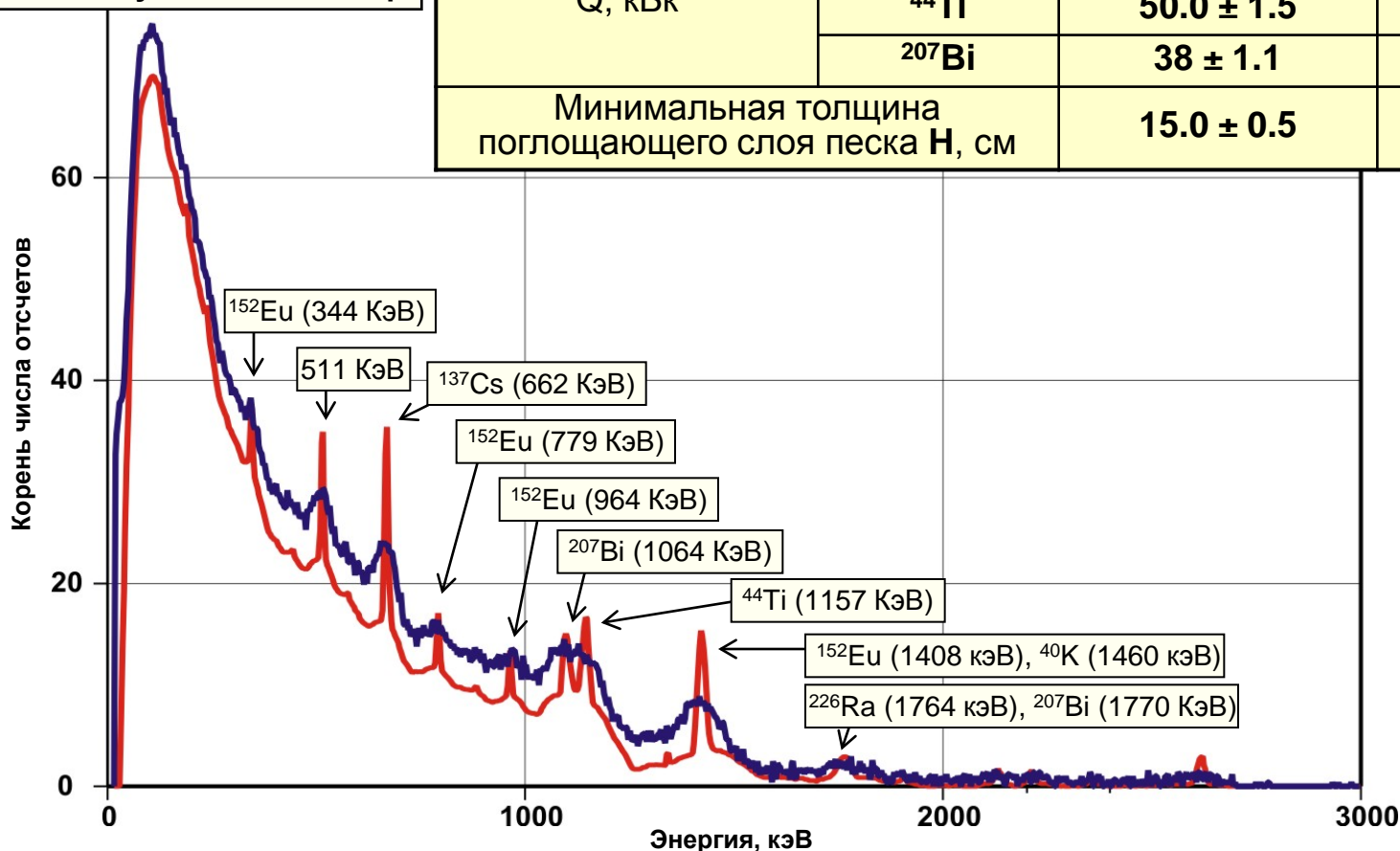
— - Исходный спектр  
— - Улучшенный спектр



# Смесь радионуклидов $^{152}\text{Eu}$ , $^{207}\text{Bi}$ , $^{44}\text{Tl}$ , $^{137}\text{Cs}$ . Поглотитель песок. Толщина поглощающего слоя песка от 15 см до 41 см.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	$^{137}\text{Cs}$	$120 \pm 3.6$	$108 \pm 15$
	$^{152}\text{Eu}$	$170 \pm 5.1$	$180 \pm 24$
	$^{44}\text{Tl}$	$50.0 \pm 1.5$	$68 \pm 13$
	$^{207}\text{Bi}$	$38 \pm 1.1$	$42 \pm 6$
Минимальная толщина поглощающего слоя песка H, см		$15.0 \pm 0.5$	$13.9 \pm 1.5$

— Исходный спектр  
— Улучшенный спектр

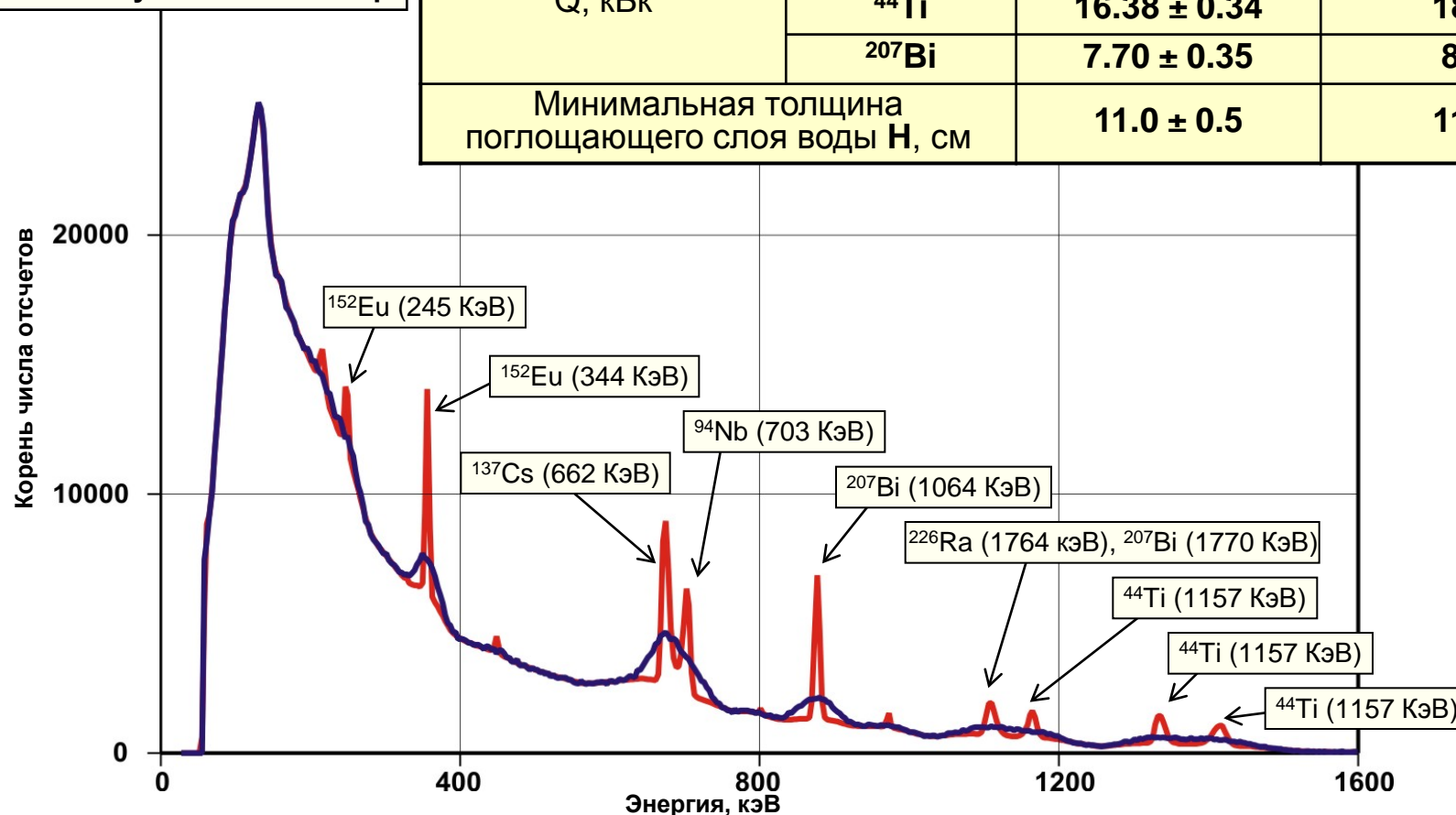




# Смесь радионуклидов $^{152}\text{Eu}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{94}\text{Nb}$ , $^{137}\text{Cs}$ . Поглотитель вода. Толщина поглощающего слоя воды от 11 см до 45 см.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	$^{137}\text{Cs}$	$22.46 \pm 0.23$	$21.2 \pm 3.2$
	$^{152}\text{Eu}$	$4.29 \pm 0.24$	$4.1 \pm 0.6$
	$^{44}\text{Ti}$	$16.38 \pm 0.34$	$18.0 \pm 2.7$
	$^{207}\text{Bi}$	$7.70 \pm 0.35$	$8.4 \pm 1.4$
Минимальная толщина поглощающего слоя воды H, см		$11.0 \pm 0.5$	$11.7 \pm 1.1$

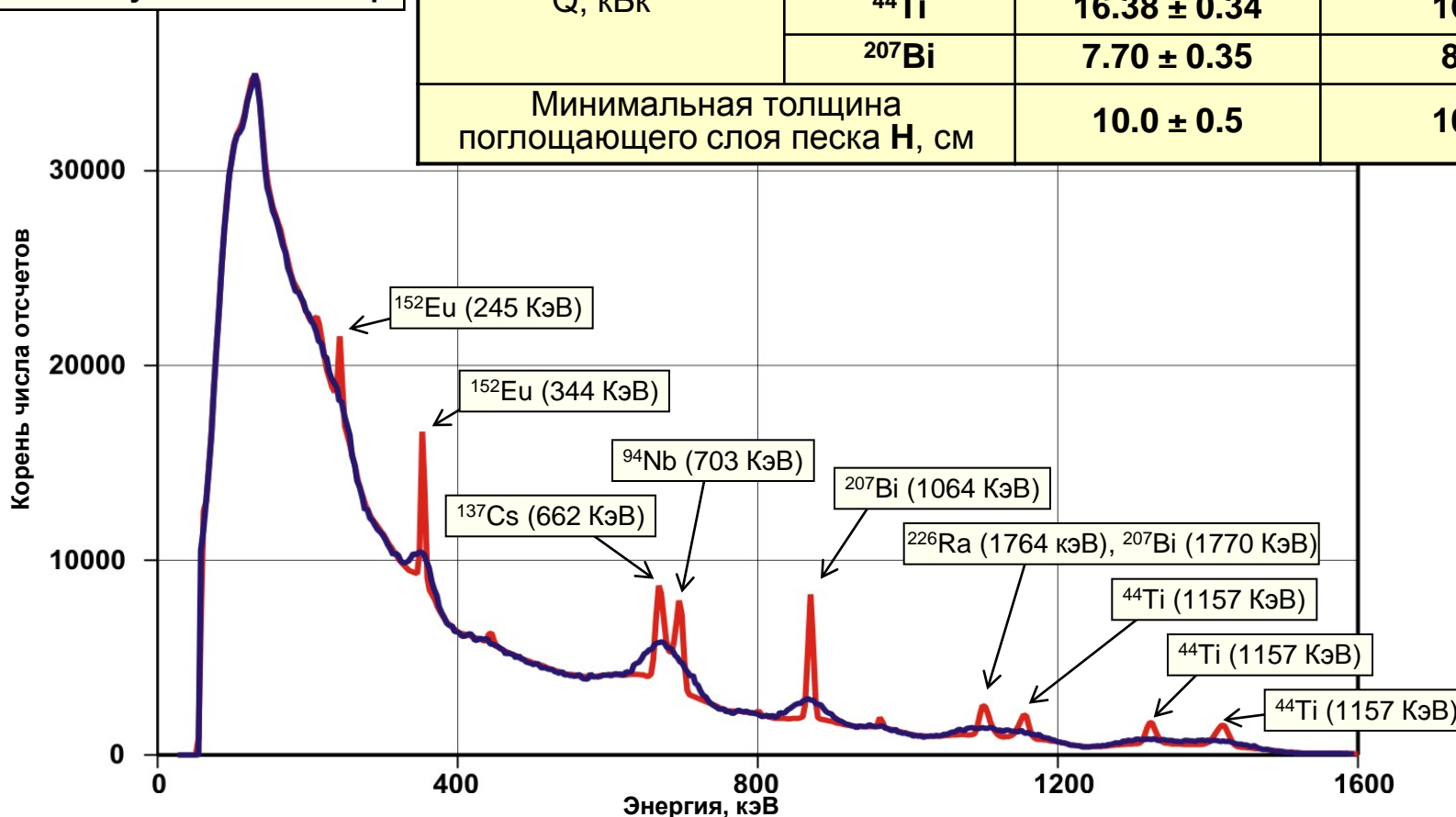
— Исходный спектр  
— Улучшенный спектр



# Смесь радионуклидов $^{152}\text{Eu}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{94}\text{Nb}$ , $^{137}\text{Cs}$ . Поглотитель песок. Толщина поглощающего слоя песка от 10 см до 46 см.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	$^{137}\text{Cs}$	$22.46 \pm 0.23$	$21.9 \pm 3.6$
	$^{152}\text{Eu}$	$4.29 \pm 0.24$	$3.2 \pm 0.5$
	$^{44}\text{Ti}$	$16.38 \pm 0.34$	$16.4 \pm 2.7$
	$^{207}\text{Bi}$	$7.70 \pm 0.35$	$8.2 \pm 1.6$
Минимальная толщина поглощающего слоя песка H, см		$10.0 \pm 0.5$	$10.4 \pm 1.3$

— Исходный спектр  
— Улучшенный спектр



**Усредненные по всем измерениям контейнера  
значения активности источника  $^{137}\text{Cs} + ^{152}\text{Eu} + ^{44}\text{Tl} + ^{207}\text{Bi}$ .**

<b>Нуклиды</b>	<b>Паспортные значения активности Q, кБк</b>	<b>Экспериментальные значения активности Q, кБк</b>
$^{137}\text{Cs}$	$120 \pm 3.6$	$115 \pm 9$
$^{152}\text{Eu}$	$170 \pm 5.1$	$176 \pm 15$
$^{44}\text{Tl}$	$50 \pm 1.5$	$55 \pm 7$
$^{207}\text{Bi}$	$38 \pm 1.1$	$35 \pm 4$

**Усредненные по всем измерениям контейнера  
значения активности источника  $^{152}\text{Eu} + ^{60}\text{Co} + ^{137}\text{Cs} + ^{94}\text{Nb}$ .**

<b>Нуклиды</b>	<b>Паспортные значения активности Q, кБк</b>	<b>Экспериментальные значения активности Q, кБк</b>
$^{152}\text{Eu}$	$22.46 \pm 0.23$	$21.5 \pm 2.4$
$^{60}\text{Co}$	$4.29 \pm 0.24$	$3.6 \pm 0.4$
$^{137}\text{Cs}$	$16.38 \pm 0.34$	$17.2 \pm 2.0$
$^{94}\text{Nb}$	$7.70 \pm 0.35$	$8.3 \pm 1.1$

