



**РОСАТОМ**



**РОСАТОМ**

**«Институт физико-технических проблем»**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»**

# **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОПЛАНАРНЫХ CdZnTe ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Газизов И.М., Силаев Е.А., Смирнов А.А.**

**ППСР-2019, г.Казань**



## Сравнение детекторов гамма-излучения (Современное состояние)

Вид детектора	CdZnTe	Ge	LaBr <sub>3</sub> (Ce)	SrI <sub>2</sub>
Эффективный атомный номер Z	50	32	46	49
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,78	5,33	5,08	4,6
Энергетическое разрешение, 662 кэВ, %	0,8	0,2	2,3	3,0
Относит. эффективность, %	0,1-10	5-200	5-100	5-100
Максимальный объем, см <sup>3</sup>	10	500	300	300
Особенность	RT	LN <sub>2</sub>	Фон ~0,2 Бк/см <sup>3</sup>	Фон ~0,05 Бк/см <sup>3</sup>

# Электрофизические параметры полупроводниковых материалов

## для детекторов ионизирующего излучения



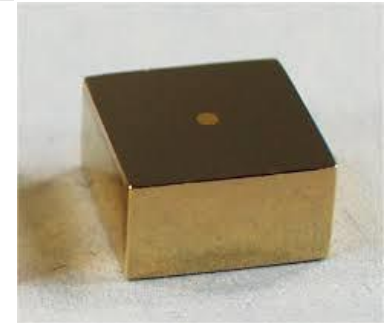
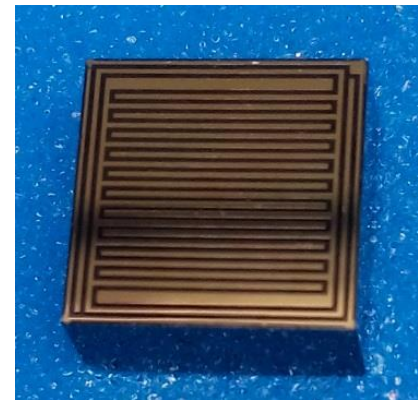
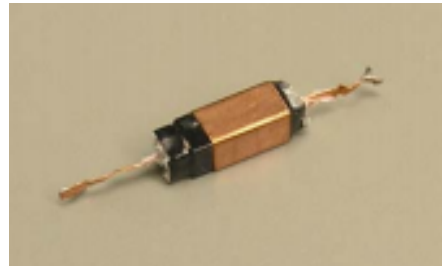
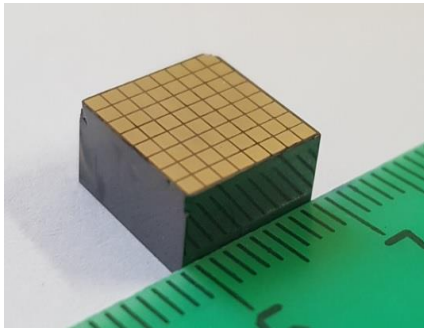
Материал	CdZnTe	CdTe	GaAs	Si	HgI	a-Se
Средний атомный номер	49,1	50	32	14	80,5	34
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,78	5,85	5,32	2,33	6,6	4,3
Ширина запрещенной зоны, eV	1,57	1,5	1,43	1,12	2,13	2,2
Энергия образования пары, eV	4,64	4,43	4,2	3,62	4,2	47
Удельное сопротивление, Омсм	$5 \cdot 10^{10}$	$10^9$	$10^7$	$10^4$	$10^{13}$	$10^{12}$
Транспортные характеристики, см <sup>2</sup> /В	$10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-5}$	>1	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-9}$
электроны ( $\mu\tau$ ) <sub>e</sub>	$10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-6}$	>1	$4 \cdot 10^{-5}$	$10^{-7}$
дырки ( $\mu\tau$ ) <sub>h</sub>						

## Недостаток:

- Плохой сбор дырок  $(\mu\tau)_h \sim 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В}$

**Решение проблемы:** использование различных конструкций детектора с преимущественно электронным сбором заряда на основе:

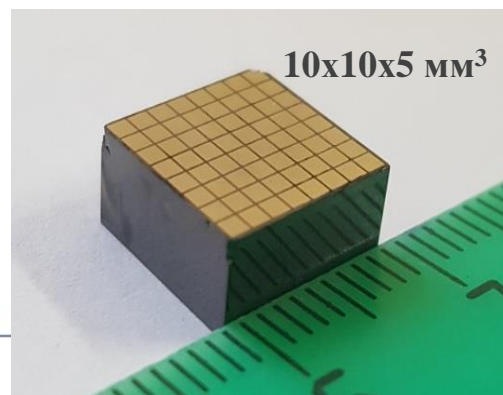
- а) Квазиполусферического детектора
- б) Копланарного детектора
- в) Детектора с сеткой Фриша
- г) Пиксельного детектора



# Состояние в АО «ИФТП» приборной тематики, связанной с CdZnTe и CdTe детекторами

## Проведенные разработки:

- Малогабаритный спектрометр гамма-излучения СЕГ-ТК-1К
- Зондовые БД гамма-излучения
- Охлаждаемый БД с термоэлектрическим охлаждением для спектрометрии рентгеновского излучения
- Лабораторный макет БД гамма-излучения на основе копланарных детекторов
- 16- и 64-пиксельные детекторы  $6 \times 6 \times 5 \text{ мм}^3$  и  $10 \times 10 \times 5 \text{ мм}^3$   
Многоканальный спектрометрический стенд



# СПЕКТРОМЕТР ЭНЕРГИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ СЕГ-ТК-1К

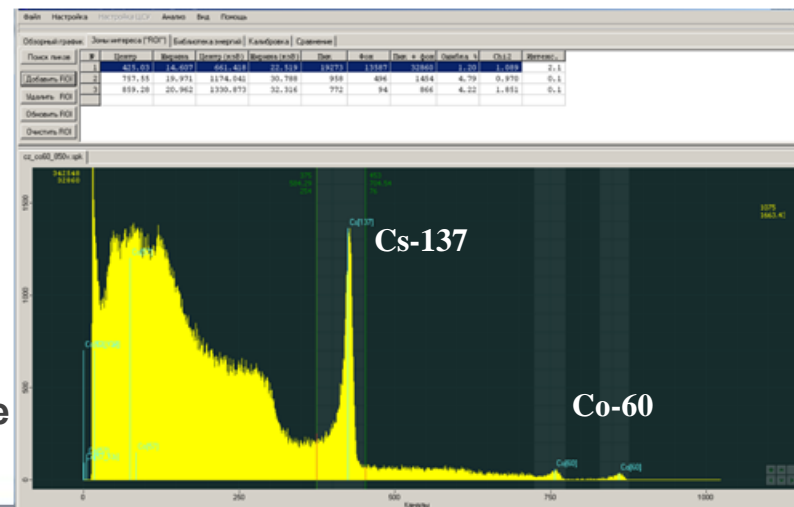


## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Диапазон энергий - от 40 до 2000 кэВ.
- Энергетическое разрешение (ПШПВ):
  - по линии 662 кэВ (Cs-137) - 17-20 кэВ
  - по линии 59,5 кэВ (Am-241) - 6 кэВ
  - по линии 356 кэВ (Ba-133) - 14кэВ
- Квазиполусферический CdZnTe детектор 10x10x5 мм<sup>3</sup>.
- Питание +6 В. Ток потребления не более 100 мА.
- Время установления рабочего режима не более 30 сек.
- Рабочий диапазон температур от минус 40 до +50 °С.
- Габаритный размер 135×45×45, мм
- Масса 0,32 кг



Спектр радионуклидов Cs-137 и Co-60 при температуре +50°C



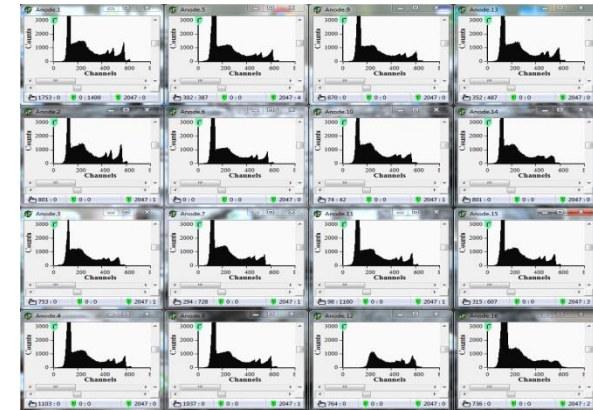
# ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ CdZnTe ПИКсельНЫХ ДЕТЕКТОРОВ



РОСАТОМ

- Разработаны CdZnTe пиксельные детекторы (2016г.)
- Прказана возможность создания радиодиагностической аппаратуры на основе CdZnTe детекторов (2018г.)

спектры Ba-133



16-пиксельный CdZnTe детектор 6х6х5мм

## Основные применения:

- Радионуклидная диагностика в ядерной медицине ОФЭКТ, сцинтиграфия.
- Промышленная цифровая радиография.
- Приборы визуализации источников гамма-излучения

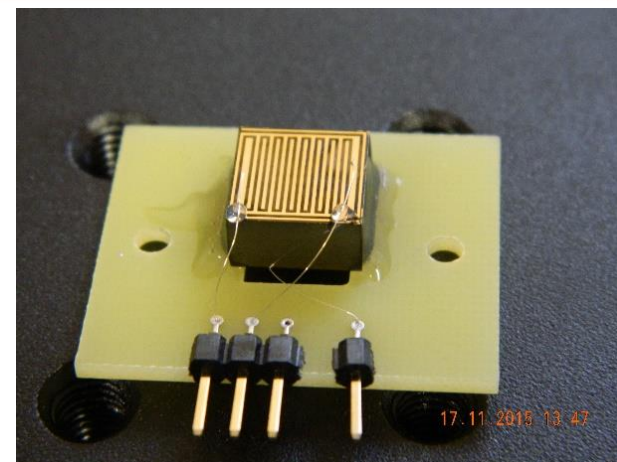
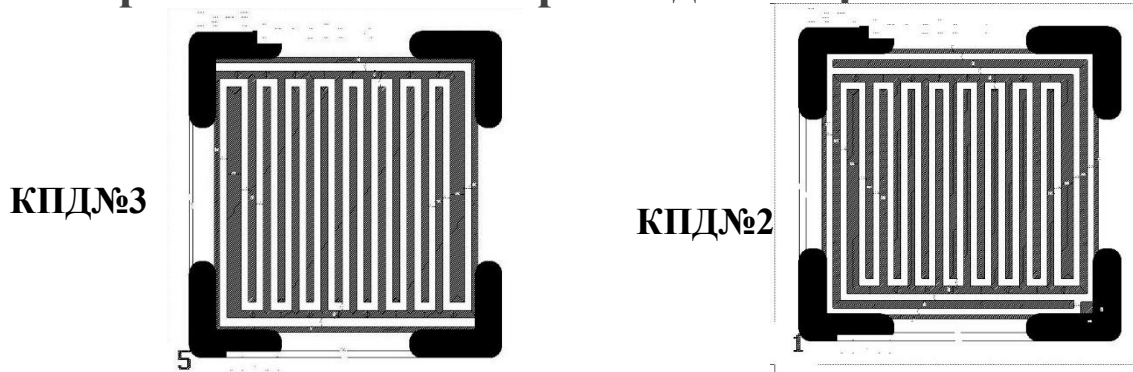


# ОБЩИЙ ВИД КОПЛАНАРНОГО CdZnTe ДЕТЕКТОРА

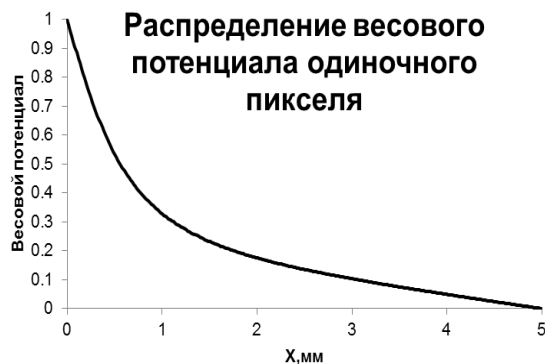


РОСАТОМ

- Прототипы копланарного детектора 10x10x5 мм<sup>3</sup>



- Расчет электростатического потенциала (программа FEMM 4.2 )



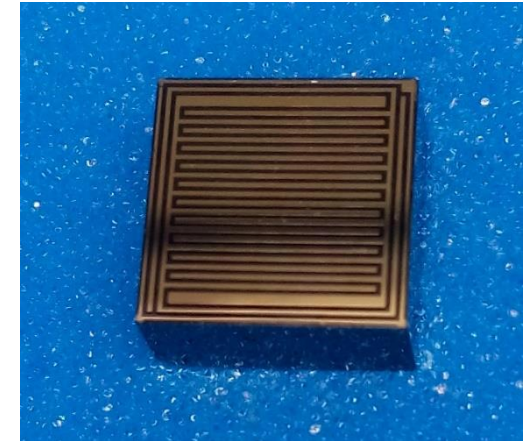
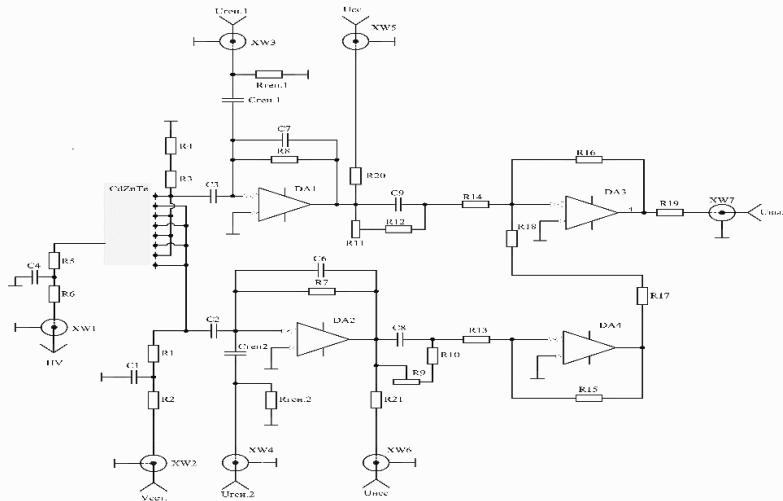
- $\Delta Q_{ind} = Q * \Delta V_w$  индуцированный заряд на электроде в результате перемещения заряда
- Влияние дырок практически нивелируется при сборе заряда



# ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА КОПЛАНАРНОГО CdZnTe ДЕТЕКТОРА



РОСАТОМ



- **Функциональная схема копланарного CdZnTe детектора**

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СС}} - G \cdot U_{\text{НСС}}$$

СС-собирающая сетка ; НСС – несобирающая сетка

G- коэффициент усиления

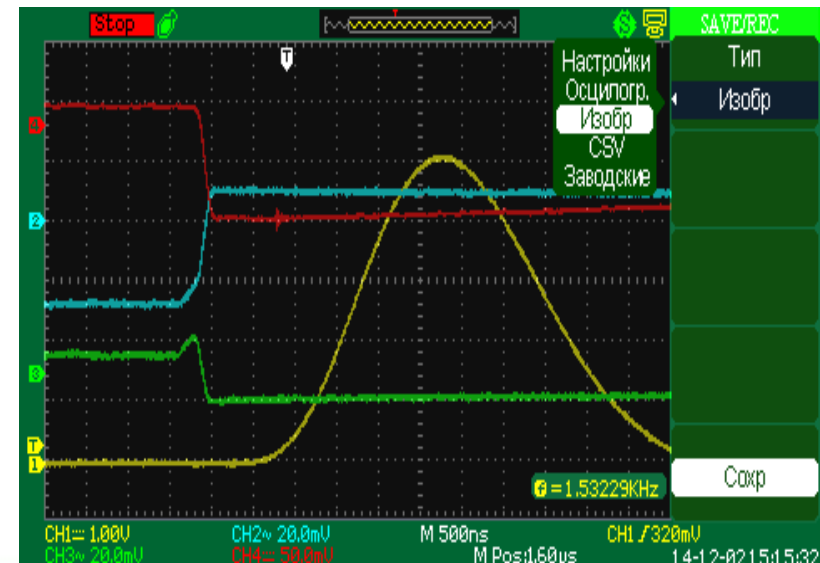
- **Форма выходных сигналов:**

1 с выхода УФ “Ortec” 570

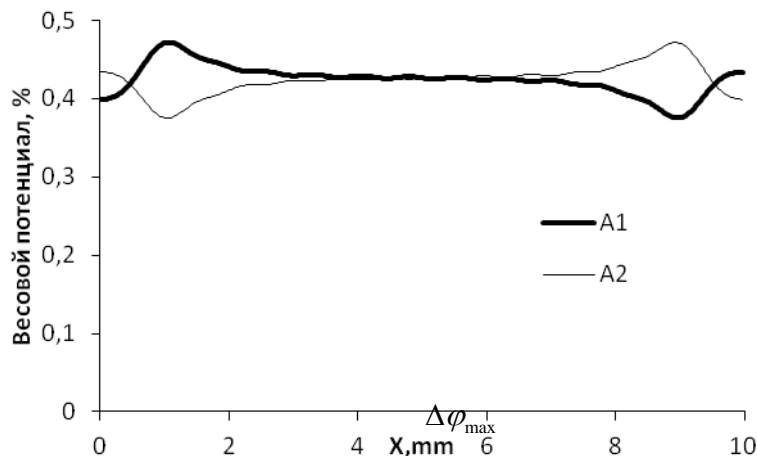
2 с выхода ПУ (несобирающая сетка);

3- с выхода ПУ (собирающая сетка);

4- с выхода БД гамма-излучения.

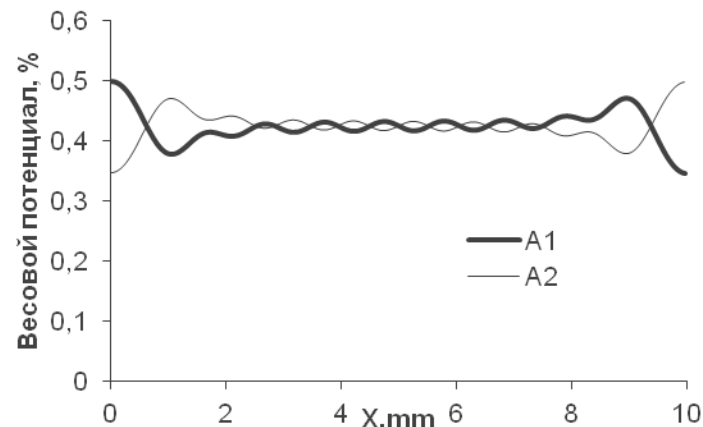


## Копланарный детектор КПД№2



Весовые потенциалы анодов A1 и A2 на глубине 0,7 мм от поверхности анодов. Охрана плавающая.

## Копланарный детектор КПД№3



Распределение весового потенциала анодов A1 и A2 на глубине 0,7 мм от поверхности анодов

Показатели различия весовых потенциалов анодов A1 и A2:

$$\Delta\varphi_{\max} = |\varphi_{A1} - \varphi_{A2}|$$

$$\Delta\Phi = \sum_i \Delta\varphi_i$$

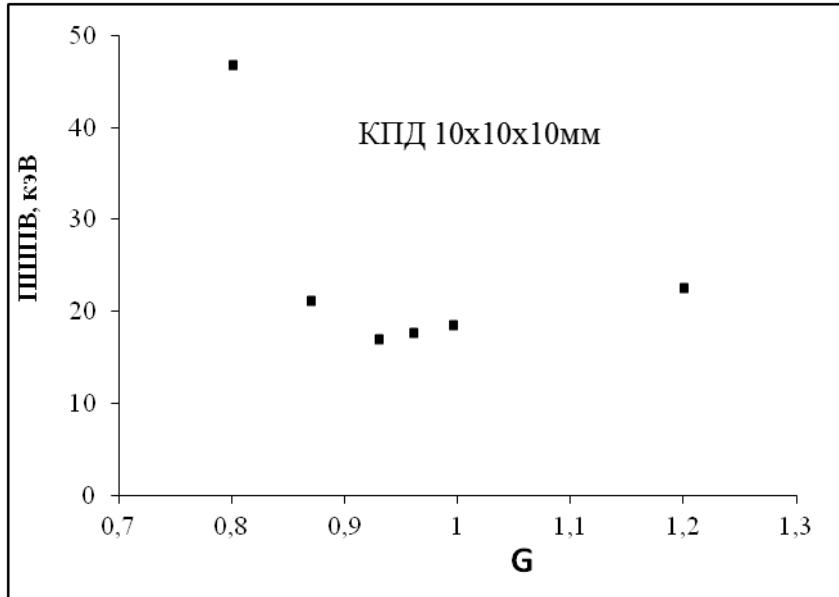
## Сравнение показателей КПД №2 и КПД №3

Тип детектора	$\Delta\varphi_{\max}$	$\Delta\Phi$
КПД№2	0,097	12,65
КПД№3	0,153	9,91

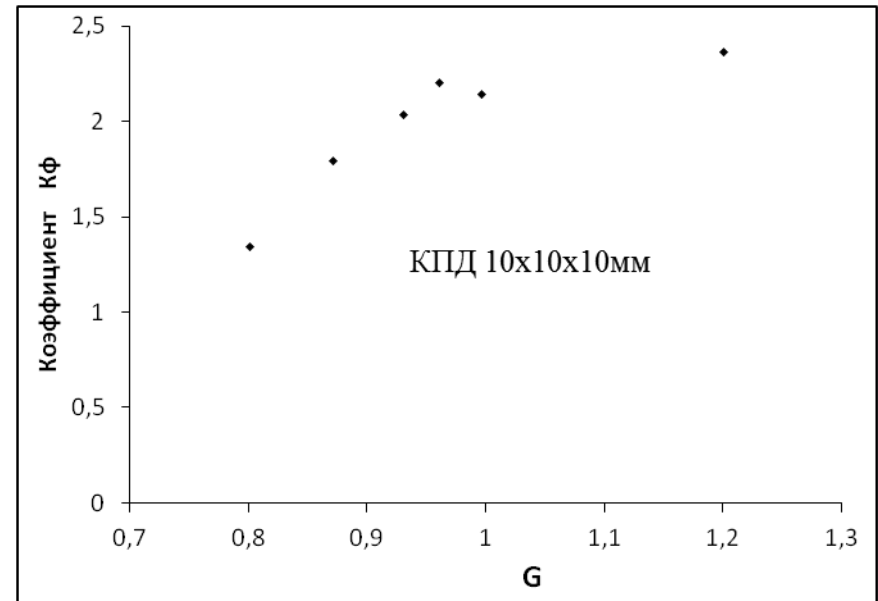
# Функциональные зависимости копланарных CdZnTe детекторов



РОСАТОМ



Зависимость энергетического разрешения  
линии 662 кэВ от коэффициента усиления G

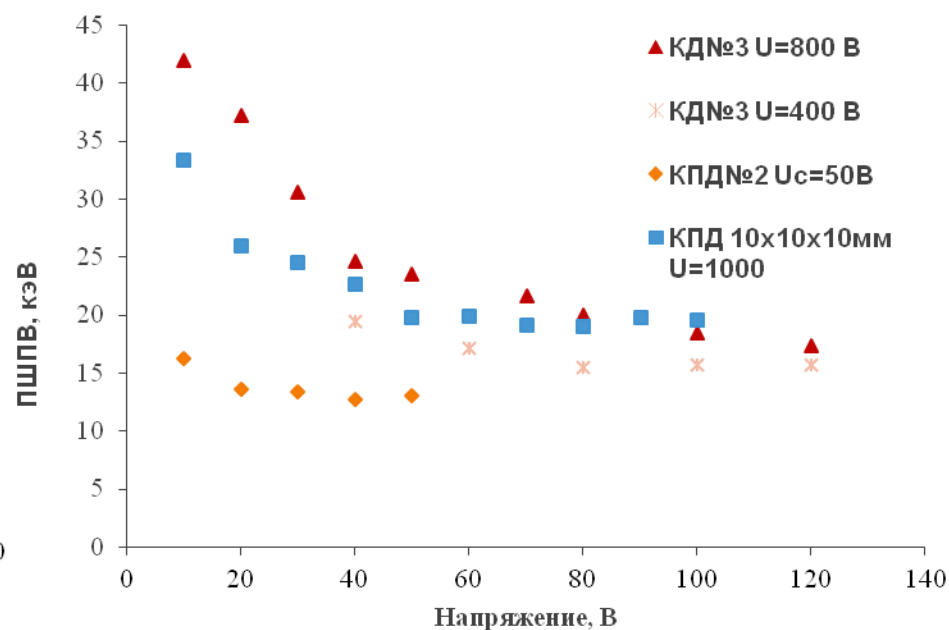
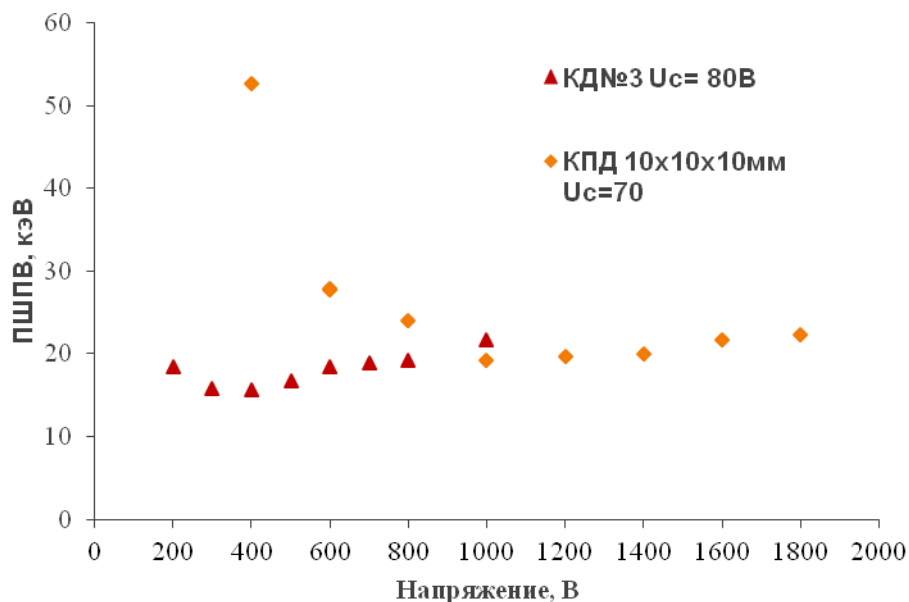


Зависимость коэффициента формы  $K_{\phi}$   
линии 662 кэВ от коэффициента усиления G

- **Вывод:** Для данного КПД оптимальный коэффициент усиления  $G=0,93$

- Коэффициент формы правой части пика  
 $K_{\phi}^{пр} = ПШДВ^{пр} / ПШПВ^{пр}$

# Зависимости ПШПВ копланарных CdZnTe детекторов от напряжения



**Зависимость ПШПВ линии 662 кэВ от высоковольтного напряжения**

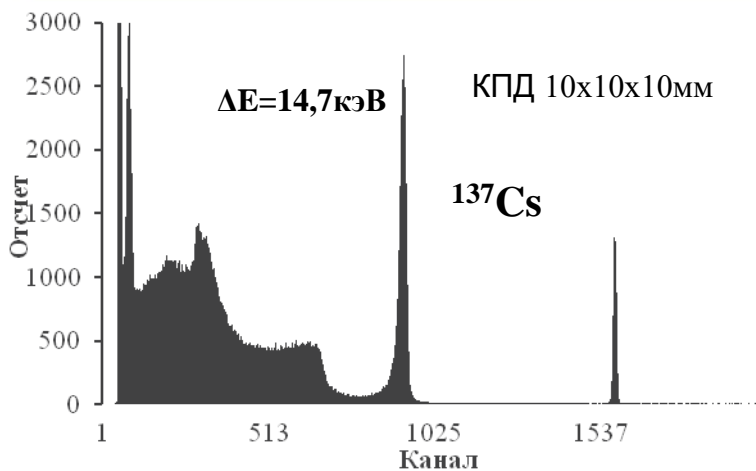
**Зависимость ПШПВ линии 662 кэВ от межсеточного напряжения**

- Вывод: Существует оптимальные величины высоковольтного напряжения на катоде и межсеточного напряжения**

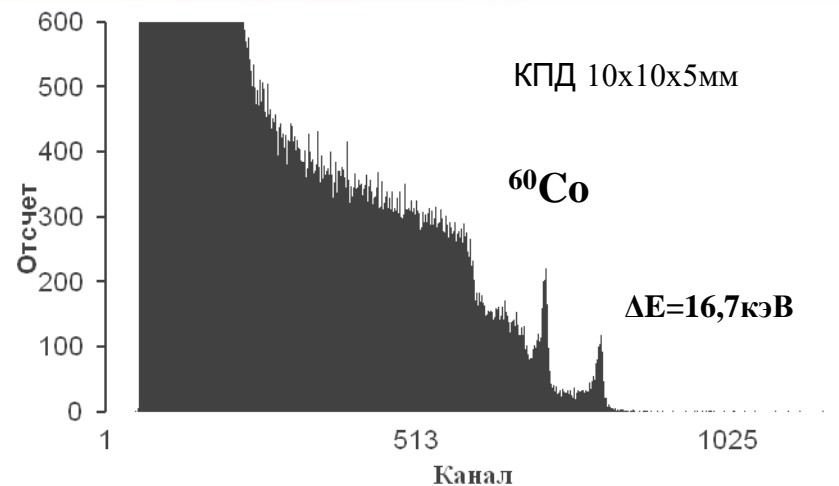
# Амплитудные спектры копланарных CdZnTe детекторов



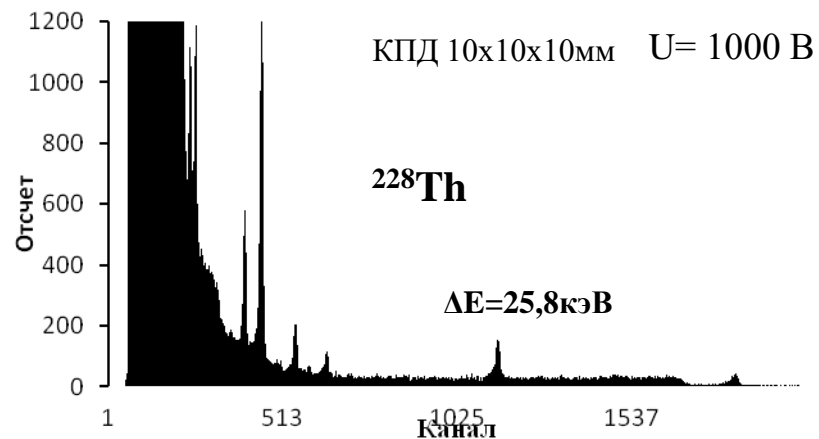
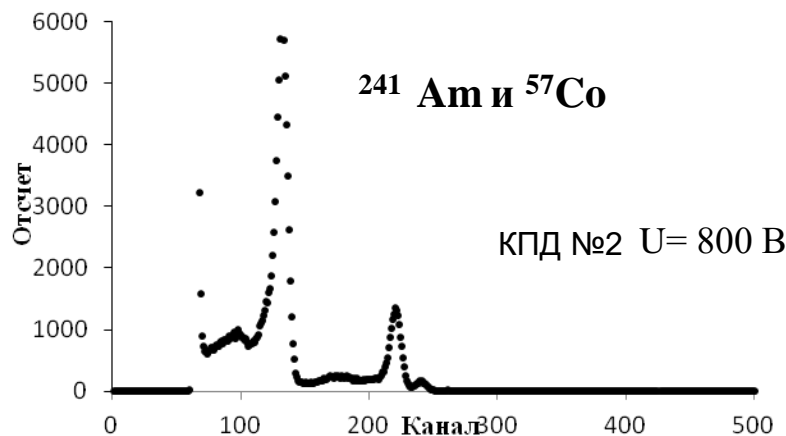
РОСАТОМ



Спектр амплитудного распределения импульсов гамма-излучения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ . КПД 10x10x10мм. Напряжение  $U = 1000 \text{ В}$



Спектр источника гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$ , измеренный на КПД №2, напряжение  $U = 800 \text{ В}$



# Сравнение спектров копланарных CdZnTe детекторов КД№2 и КД№3

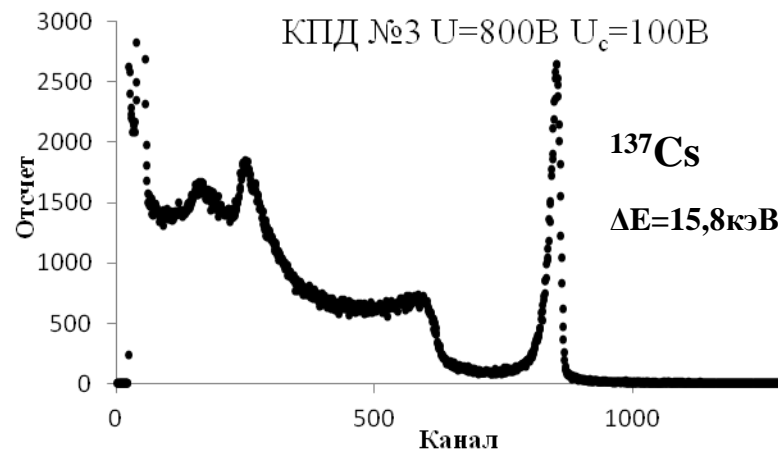
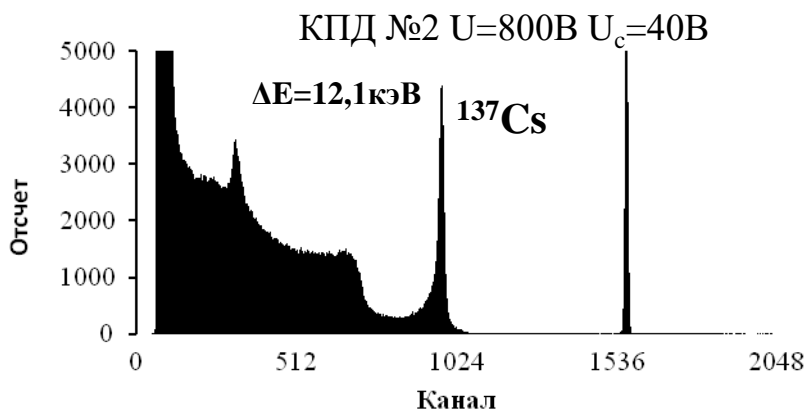
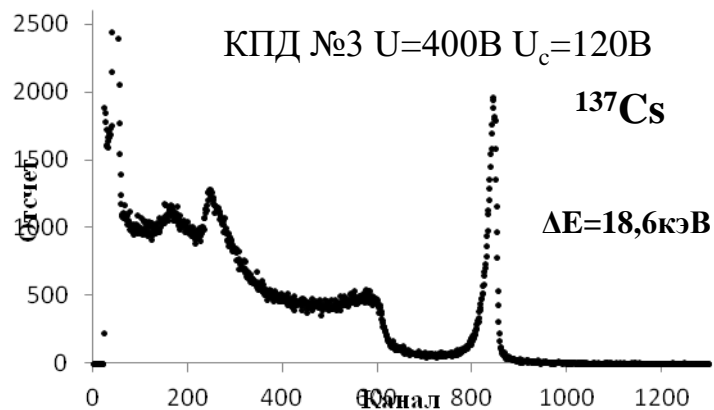


Рис. Спектр амплитудного распределения импульсов гамма-излучения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . КПД №2, Напряжение  $U=800\text{В}$



# Интегральная нелинейность КПД 10x10x10мм



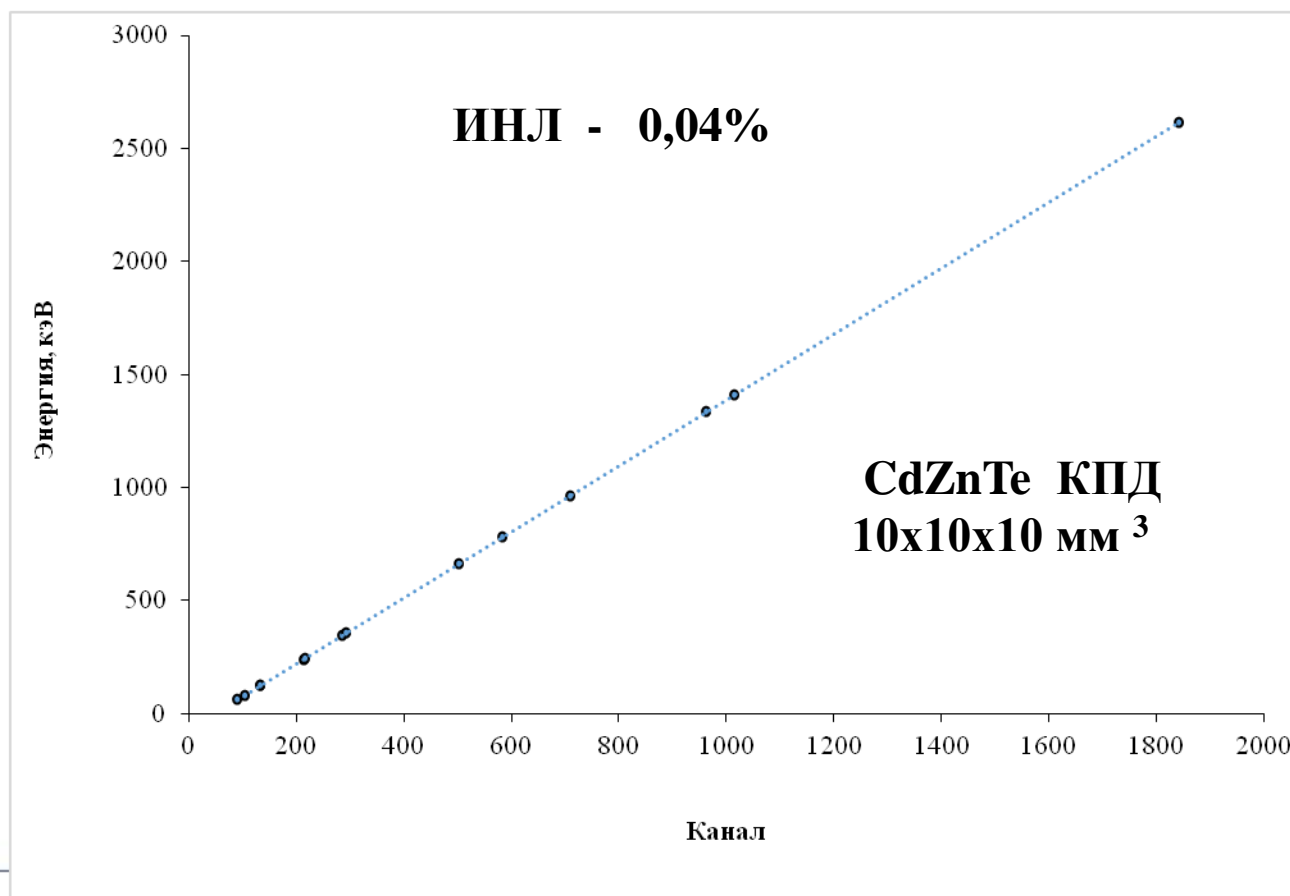
РОСАТОМ

- КПД 10x10x10 мм<sup>3</sup>      U=1000В   U<sub>c</sub> = 70В      τ=1мкс
- 14 гамма-линий в диапазоне 60-2600кэВ: Am-241, Ba-133, Eu-152, Co-57, Cs-137, Co-60, Th-228

• ИНЛ - 0,04%

$$E = -72.6 + 1.46n$$

$$R^2 = 1$$



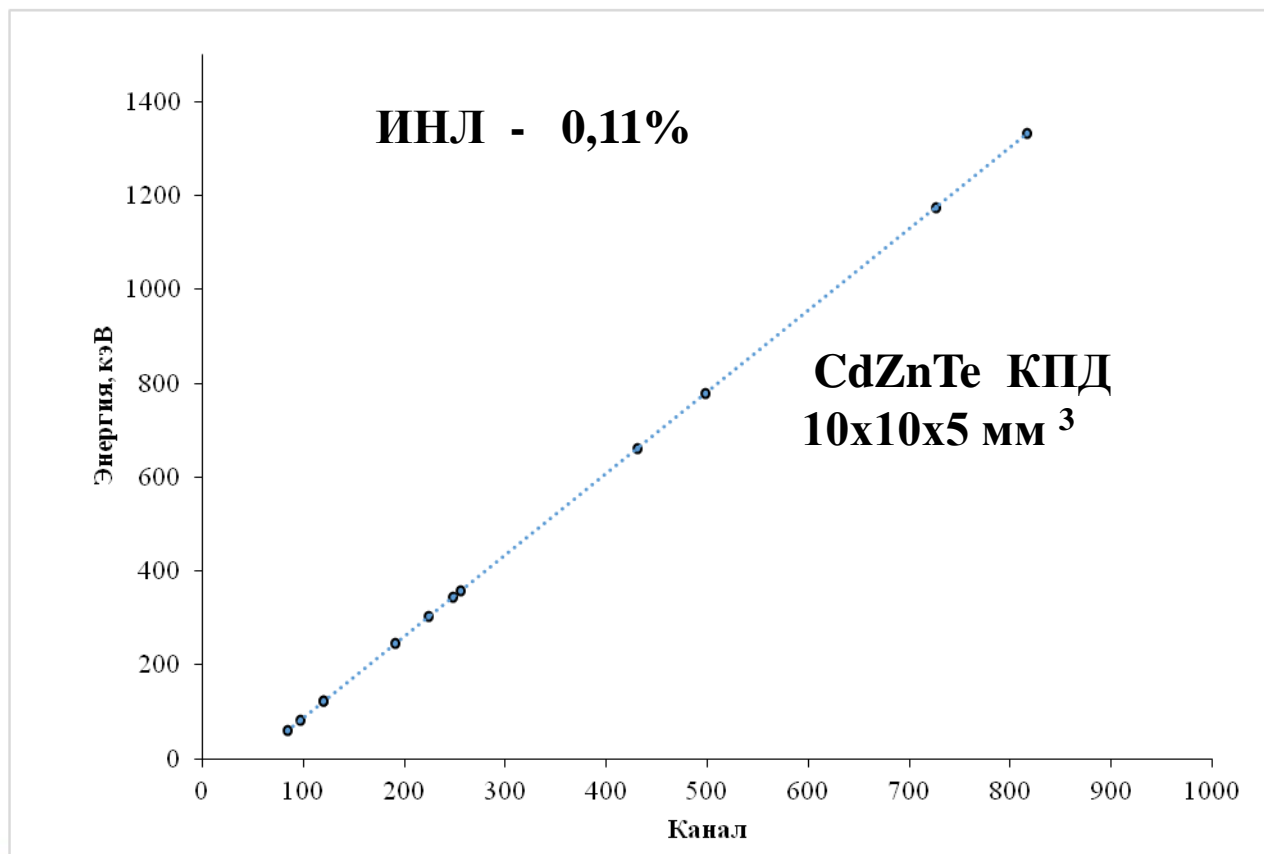
# Интегральная нелинейность КПД 10x10x5мм



- КПД 10x10x5 мм<sup>3</sup>       $U=800$  В       $U_c = 50$  В       $\tau=1$  мкс
- 12 гамма-линий в диапазоне 60-1330 кэВ: Am-241, Ba-133, Eu-152, Co-57, Cs-137, Co-60

- ИНЛ - 0,11%

$$E = -86.7 + 1.74n$$
$$R^2 = 1$$





# Зависимость энергетического разрешения от энергии гамма-излучения

Компоненты энергетического разрешения:

$$\Delta E^2 = \Delta E_{Noise}^2 + \Delta E_{St}^2 + \Delta E_C^2$$

$$\Delta E_{St} = 2,355\sqrt{\varepsilon FE}$$

$\Delta E_C$  - Связана с флуктуациями сбора заряда

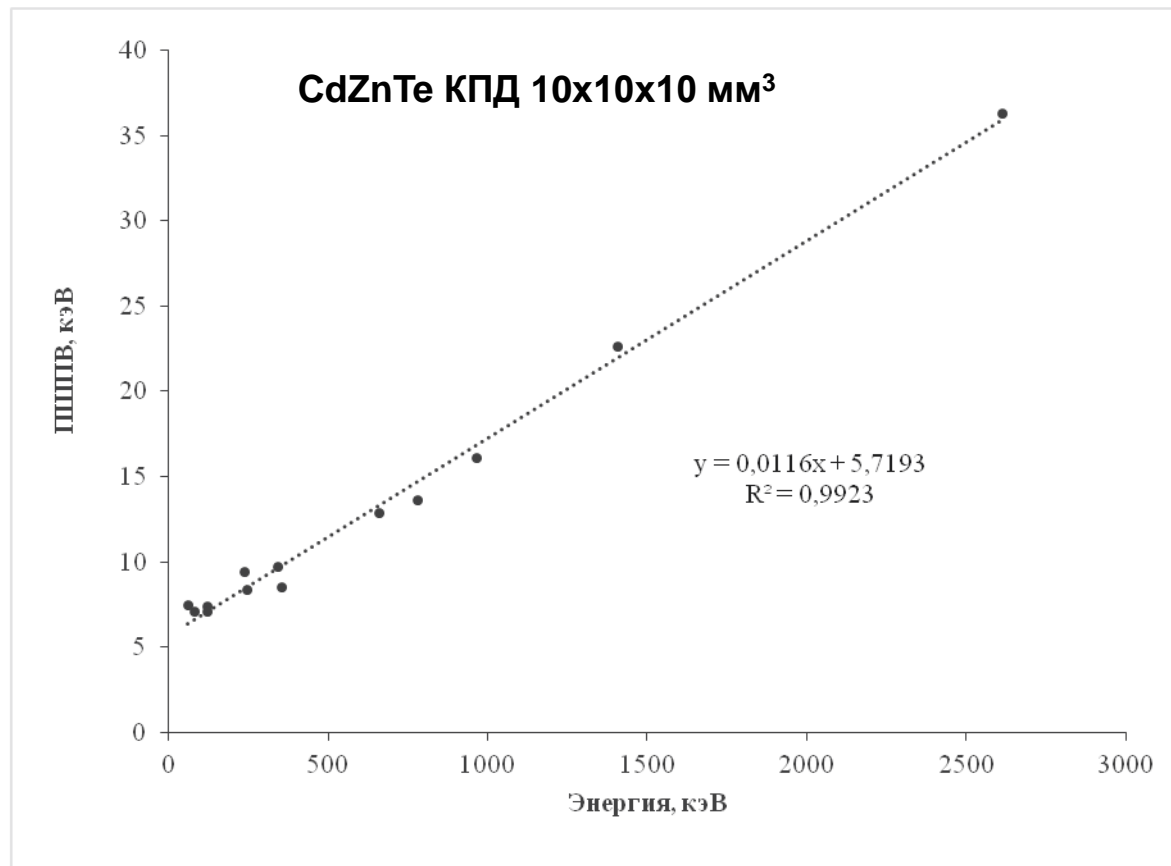
$$\Delta E_C = R_\lambda \bar{\lambda} E$$

$\bar{\lambda}$  - средние потери заряда

Аппроксимация зависимости энергетического разрешения

$$\Delta E = a + bE$$

$$\Delta E_C = R_\lambda \bar{\lambda} E$$



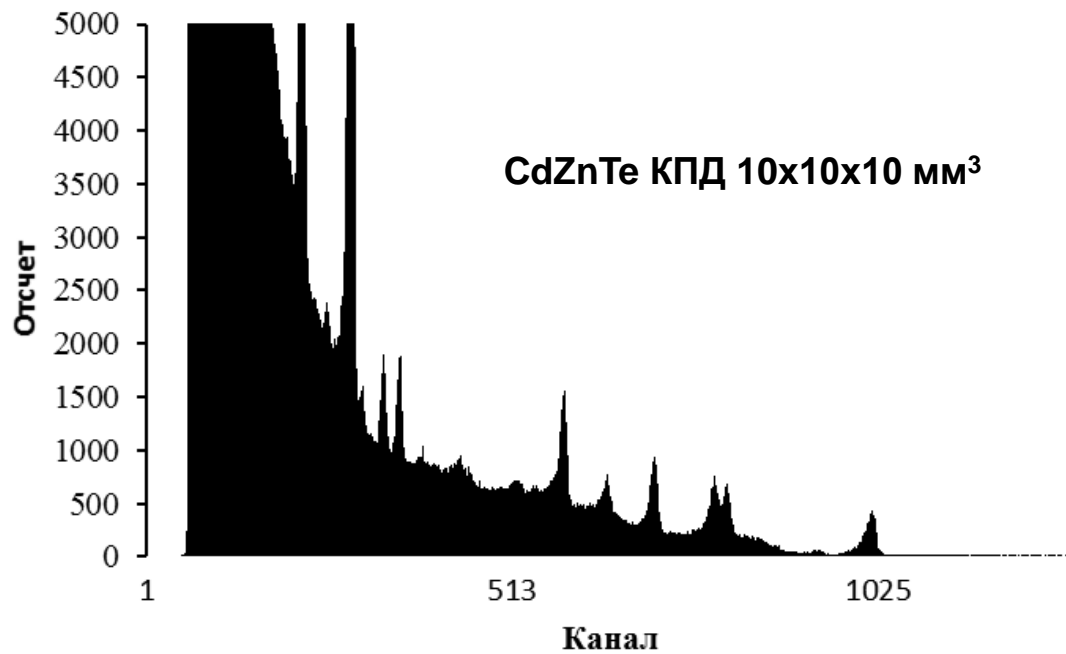
Зависимость энергетического разрешения (ПШПВ) от энергии гамма-излучения

# Эффективность регистрации копланарных CdZnTe детекторов

- Расчет эффективности регистрации ППП (относительной эффективности)

$$\varepsilon_{\text{вн}} = \frac{N 4\pi R^2}{A \gamma S}$$

где,  $S$ -площадь детектора,  $N$ -площадь фотопика [имп/с];  $A$  –активность источника;  $\gamma$  – квантовый выход ;  $R$ - 80мм (расстояние до источника)



Амплитудный спектр нуклида Eu-152

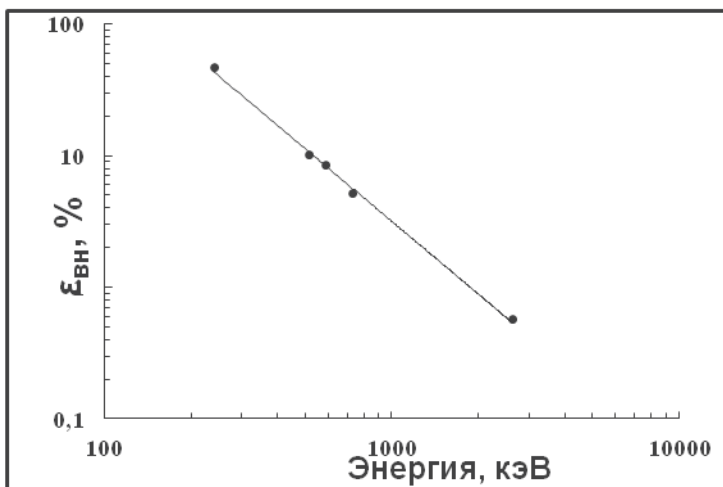
# Эффективность регистрации копланарного CdZnTe детектора 10x10x10 мм



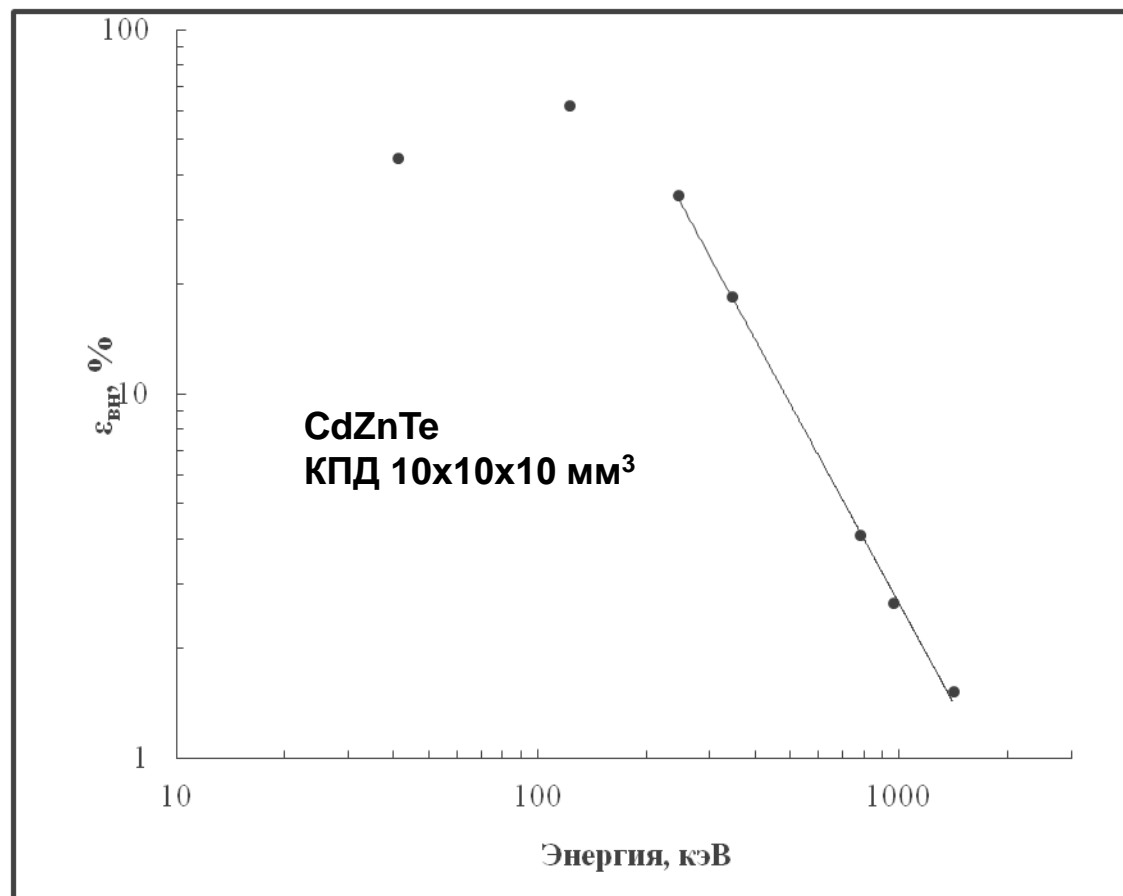
РОСАТОМ

Зависимость эффективности  
регистрации от энергии

$$\varepsilon_{\text{вн}} = 9,2 \cdot 10^5 E^{-1,825}$$



Эффективность регистрации  
для Th-228



Относительная эффективность регистрации  
ППП ( для Eu-152) в диапазоне 40- 1500 кэВ

# Относительная эффективность CdZnTe КПД ( относительно 3”x 3” NaI(Tl) )



РОСАТОМ

## CdZnTe КПД 10x10x10 мм

- Расчет абсолютной эффективности при R=25см  
(по измерениям при R=8 см)

Нуклид	Энергия, кэВ	Эффективность
Eu-152	121,8	$9,9 \cdot 10^{-5}$
Th-228	238	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Ba-133	356,01	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Cs-137	661,6	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Eu-152	1408	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Th-228	2614,61	$7,5 \cdot 10^{-7}$

- Расчет эффективности относительно сцинтилляционного детектора 3”x 3” NaI(Tl)

$$\varepsilon_{отн} = \frac{\varepsilon_{абс}(\text{CdZnTe})}{\varepsilon_{абс}(\text{NaI})}$$

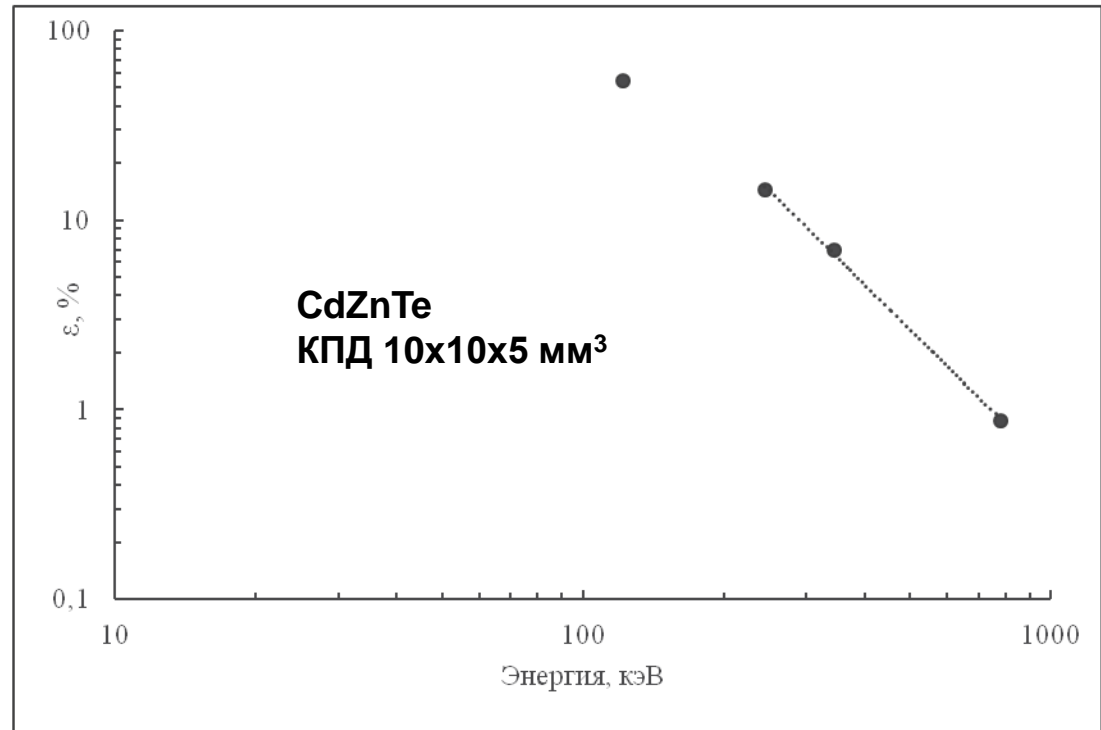
$$\varepsilon_{отн} = 0,2\%$$

# Эффективность регистрации копланарного CdZnTe детектора 10x10x5 мм



Зависимость эффективности  
регистрации от энергии

$$\varepsilon_{\text{вн}} = 3,2 \cdot 10^5 E^{-1,82}$$



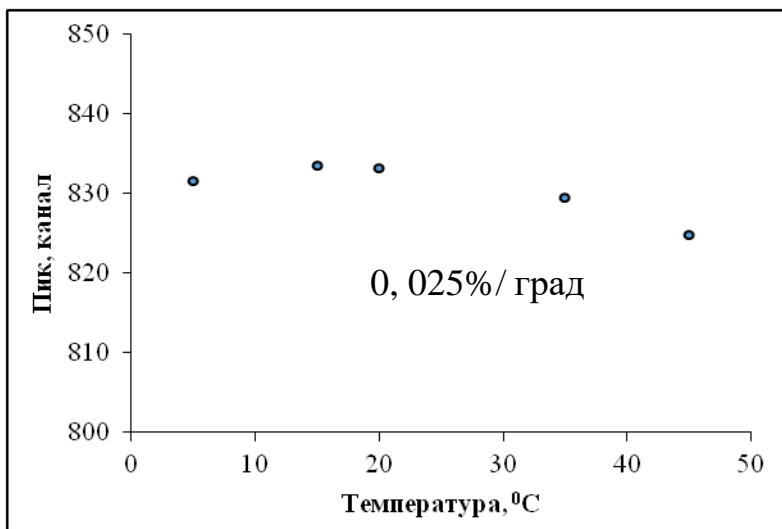
Относительная эффективность регистрации ППП  
(для Eu-152) в диапазоне 40- 800 кэВ

# Температурные зависимости КПД 10x10x10мм<sup>3</sup>

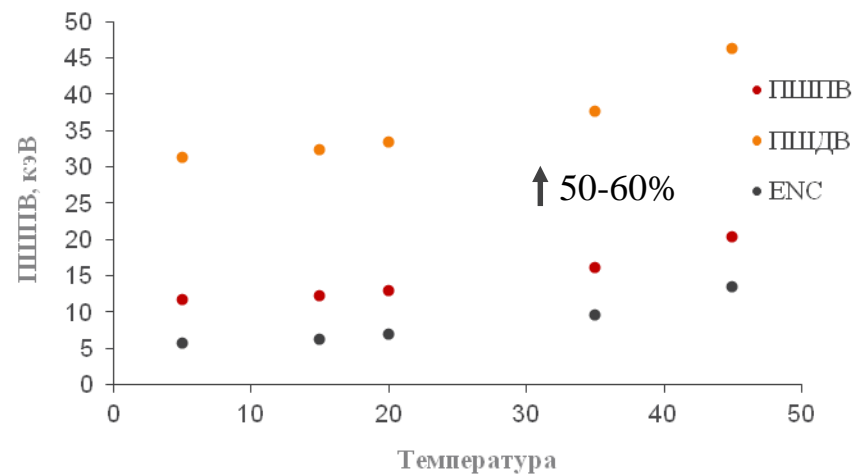


РОСАТОМ

$U=1000V$   $U_c = 70V$   $\tau=1\mu s$

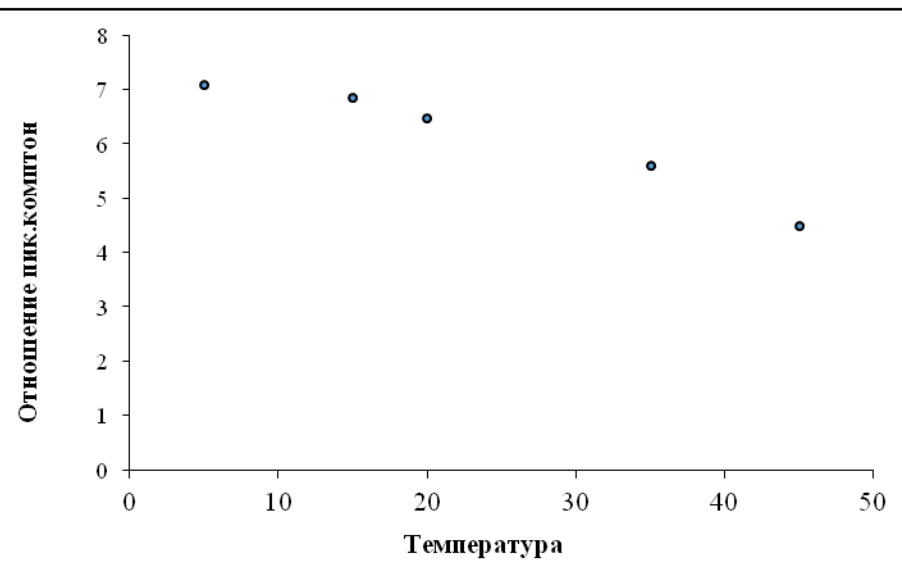


Положение пика с температурой



ПШПВ пика 662 кэВ с температурой

Отношение пик-комpton с температурой

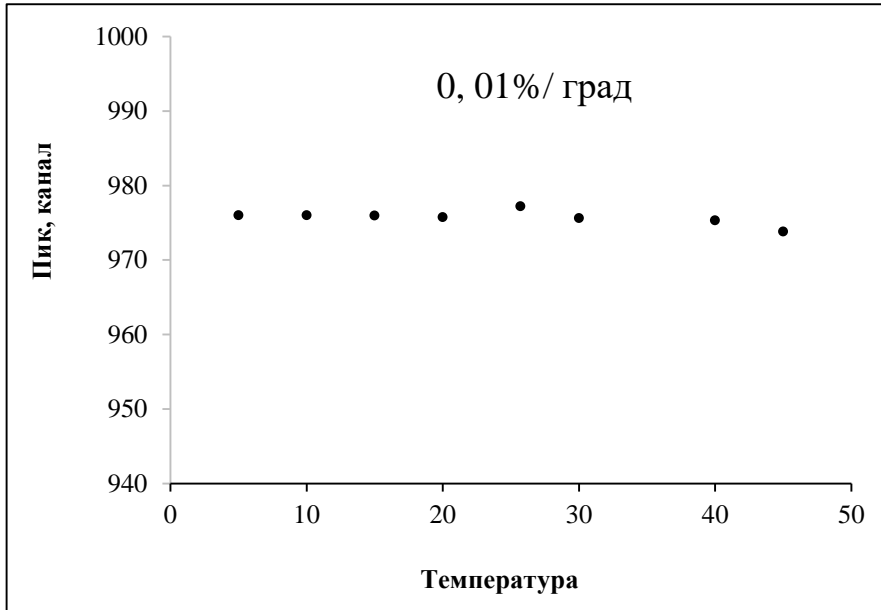


# Температурные зависимости КПД 10x10x5мм<sup>3</sup>

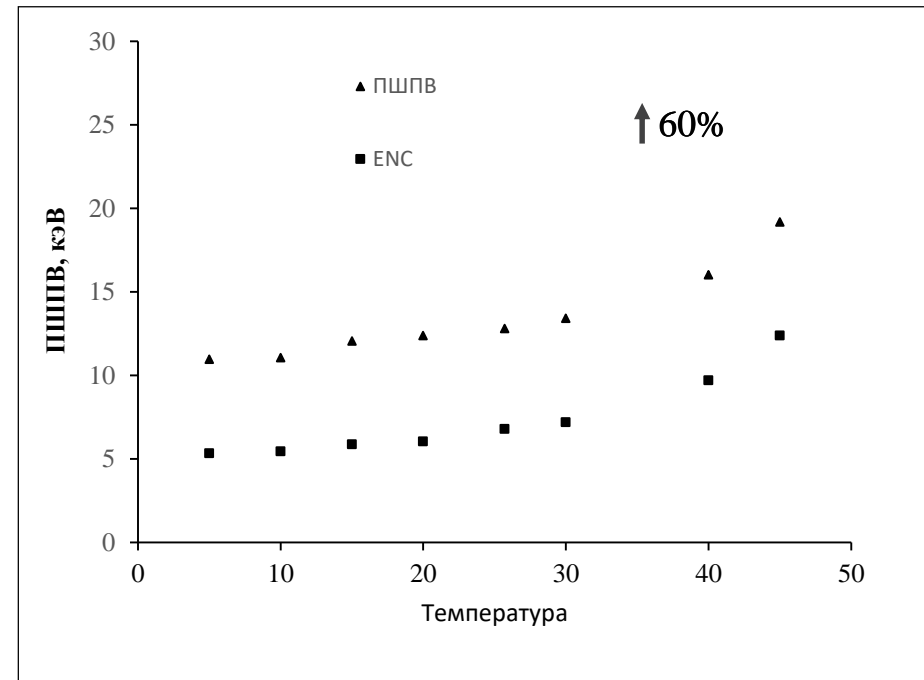


РОСАТОМ

$U=800V$   $U_c = 50V$   $\tau=1\mu s$



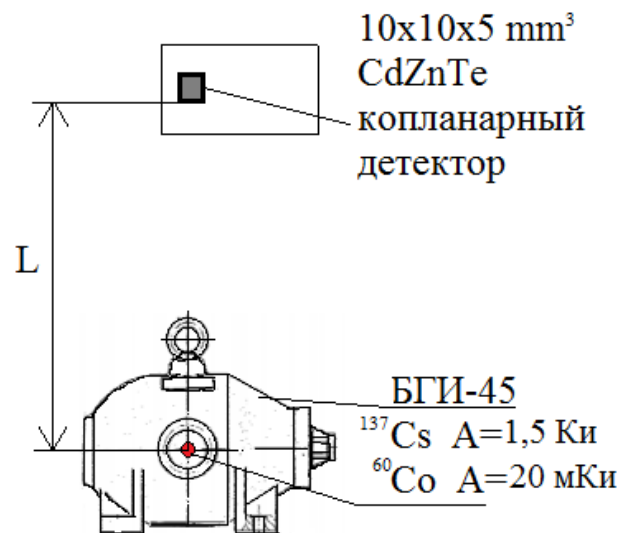
Положение пика 662 кэВ с температурой



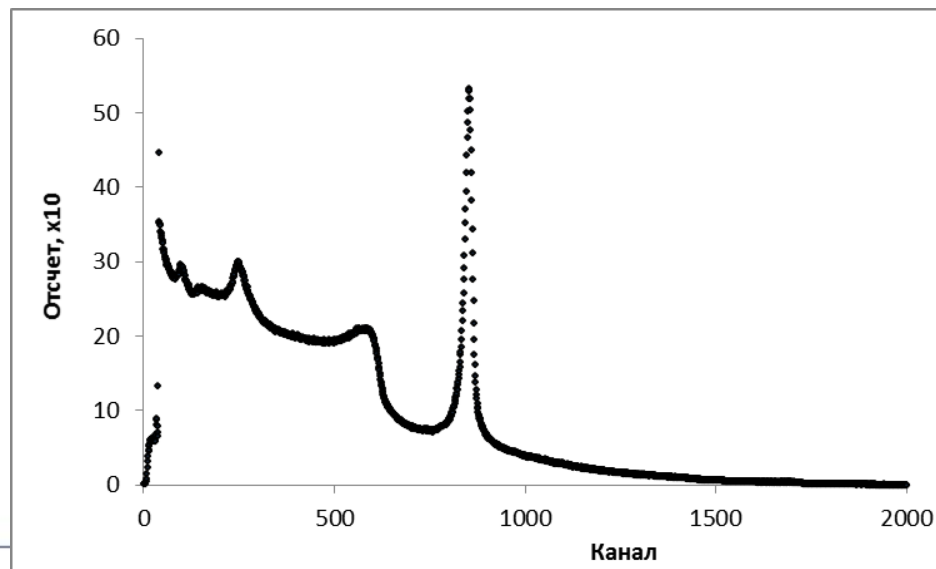
ПШПВ пика 662 кэВ с температурой

# Загрузочная способность копланарных CdZnTe детекторов

L см	Скорость счета $S_{60}$ , $\times 10^4, \text{с}^{-1}$	ПШПВ (662 кэВ), кэВ
ОСГИ 2929	0,0095	12
ОСГИ 2930	0,11	12,79
123	2,35	13,5
89	4,10	14,2
74	5,41	14,7
65	6,78	15
55	8,84	15,7
45	11,58	18
35	15,72	20,9
25	23,79	33,1
20	22,40	32,4



Амплитудный спектр радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>60</sup>Co на расстоянии L=40см (см схему измерений)







РОСАТОМ

---

# Благодарю за внимание!

141980 г. Дубна Московской обл. ул. Курчатова 4, АО «ИФТП»

тел.: /49621/ 70645

E-mail: [iftp@dubna.ru](mailto:iftp@dubna.ru) [www.iftp.ru](http://www.iftp.ru)