



XV Юбилейное Международное совещание  
«Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии»  
Казань, 7 - 11 октября 2019 г.

# CdZnTe детекторы и устройства на их основе для различных применений: современное состояние

*В. И. Иванов, А. Е. Лучанский  
ZRF RITEC SIA, Рига, Латвия*



NUCLEAR RADIATION  
SEMICONDUCTOR DETECTORS  
AND ASSOCIATED ELECTRONICS





# План доклада

- CdZnTe – материал для изготовления детекторов ядерных излучений
- CdZnTe детекторы, их особенности и типы
- Блоки детектирования с CdZnTe детекторами, примеры их применение и возможности совершенствования
- Спектрометры на основе CdZnTe детекторов, примеры их применения и направление дальнейшего развития



# CdZnTe (CZT)

## Физические характеристики:

■ Типичный состав	$\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$
■ Атомный номер	48, 30, 52
■ Плотность	$5.8 \text{ g/cm}^3$
■ Ширина запрещенной зоны	1.57 eV
■ Диэлектрическая постоянная	10.9
■ Энергия образования пары	4.64 eV
■ Удельное сопротивление $>10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$	
■ Подвижность электронов, $\mu_e$	$600\text{-}1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
■ Подвижность дырок, $\mu_p$	$50\text{-}80 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
■ $(\mu\tau)_e$	$>10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
■ $(\mu\tau)_p$	$>10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

## Преимущества материала:

Большой атомный номер, высокая плотность, широкая запрещенная зона, высокое удельное сопротивление, хорошие транспортные характеристики электронов ( $(\mu\tau)_e$ ) и временная стабильность параметров.

## Недостатки материала:

Неудовлетворительные транспортные характеристики дырок  $(\mu\tau)_p$ , обуславливающие необходимость применения специальных конструкций детекторов и/или специальных методов обработки сигналов, наличие неоднородностей в кристаллах.



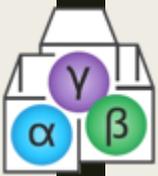
# Основные производители детекторного CZT

- REDLEN Technologies, Canada
- Kromek Group plc (ранее eV products), Great Britain, USA
- Imdetek Corporation Ltd (Imdetek), Китайская Народная Республика
- Eurorad S.A., Франция
- Acrorad Co., Ltd., Япония (производитель детекторного CdTe)



# Основные преимущества CZT детекторов

- Возможность работы при комнатной температуре
- Сравнительно высокие спектрометрические характеристики
- Сравнительно высокая эффективность регистрации
- Небольшие габариты и вес
- Стабильность во времени
- Возможность работы в сильных радиационных полях
- Широкий диапазон регистрируемых энергий



# Области применения CZT детекторов

- Различные системы визуализации рентгеновского и гамма излучений, в том числе:
  - *медицинские системы компьютерной томографии*
  - *современные системы однофотонной эмиссионной компьютерной томографии и позиционно эмиссионной томографии*
  - *промышленные томографы*
- Спектрометрия гамма и рентгеновского излучения
- Рентгеновских и гамма телескопы
- Контроля радиоактивных отходов
- Контроль территорий с радиоактивным загрязнением с использованием беспилотных транспортных средств
- Приборах для контроля нераспространения ядерного оружия (гарантии МАГАТЭ)
- Приборах пограничного контроля для выявления случаев несанкционированного оборота радиоактивных материалов

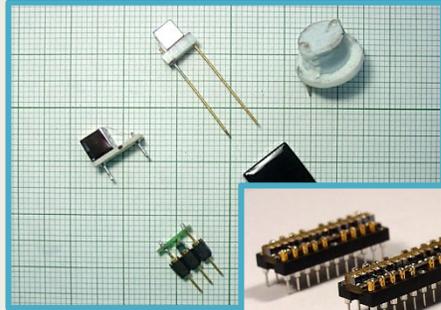


# Основные типы CZT детекторов для регистрации гамма и рентгеновского излучения

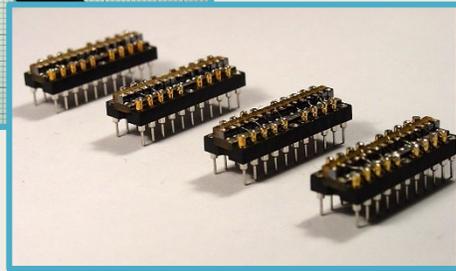
- Планарные счетные и спектрометрические детекторы
- Планарные детекторы с p-n переходом, с p-i-n структурой или с барьером Шотки
- Позиционно чувствительные пиксельные и стриповые детекторы
- Детекторы с «однозарядовым» сбором:
  - *Полусферические или квазиполусферические, цилиндрические*
  - *Детекторы с ко-планарной структурой анода*
  - *Различные детекторы с пиксельной структурой анода*
  - *3D позиционно чувствительные детекторы*
  - *Различные модификации детекторов с решеткой Фриша*
  - *Дрифтовые детекторы*



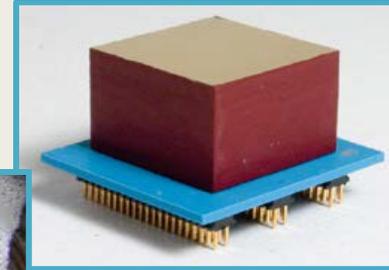
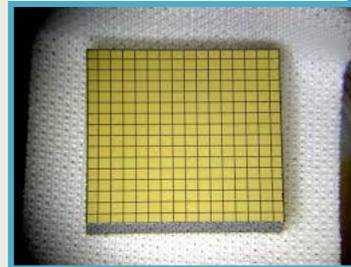
# Примеры основных типов CZT детекторов



Планарные CZT детекторы

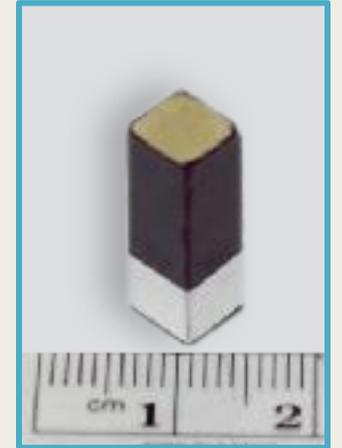


Пиксельные детекторы

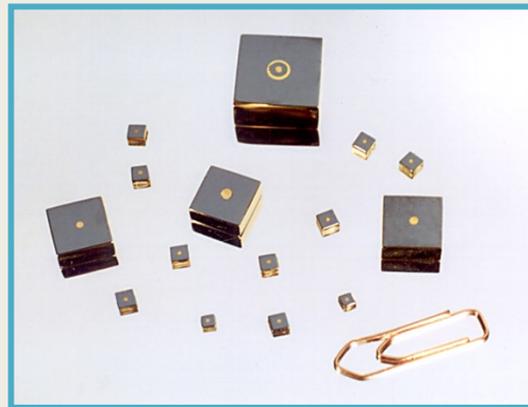


Детектор с виртуальной решеткой Фриша

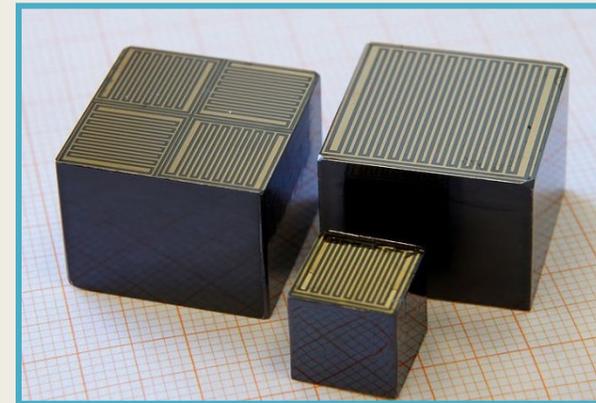
Детекторный модуль

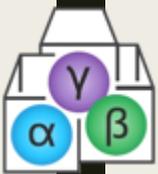


Квази-полусферические CZT детекторы

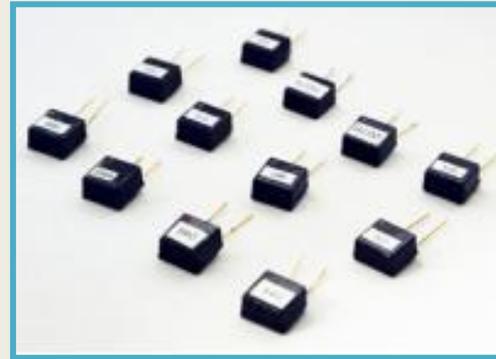


Ко-планарные CZT детекторы





# Капсулированные CZT детекторы



Капсулированные детекторы, производимые ZRF RITEC SIA



Капсулированный детектор с зарядочувствительным предусилителем

Капсулированные детекторы производимые компании EURORAD S.A.



# Блоки детектирования на основе CZT детекторов

## Блоки детектирования, производимые ZRF RITEC SIA



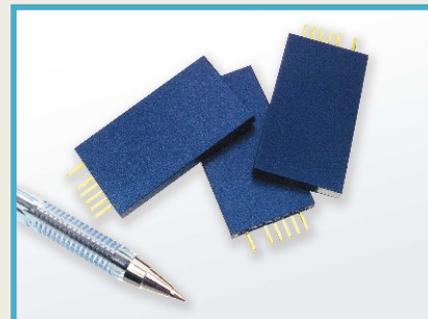
SDP310

Объем детекторов  
0.5 ... 62 мм<sup>3</sup>



SDP500/1500/4000

Объем детекторов  
0.5 ... 4.0 см<sup>3</sup>



SDP311

Толщина корпуса 4 мм



SGDP Медицинский зонд с  
планарным детектором  
объемом 0.25 см<sup>3</sup>



KROMEK/MIRION  
с ко-планарным  
детектором,  
объемом 1.0 см<sup>3</sup>



AMETEK, Inc  
XR-100-CZT  
с детектором  
объемом 18 мм<sup>3</sup>



Euro rad S.A.  
с детекторами объемом  
1 ... 100 мм<sup>3</sup>

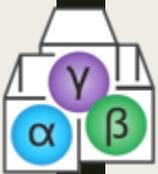


Imdetek  
с детекторами  
объемом до 1.0 см<sup>3</sup>



## Энергетическое разрешения по линии 662 кэВ, полученное с квази-полусферическими детекторами разных размеров

Размеры детектора, мм	Объем, мм <sup>3</sup>	Энергетическое разрешение, (ПШПВ), кэВ (%)	Отношение Пик/Комптон
1.0x1.0x0.5	0.5	7.1 (1.1)	2.0
1.3x1.3x0.65	1.1	5.1 (0.8)	3.6
2.2x2.2x1.1	5.3	5.5 (0.8)	4.4
3.5x3.5x1.75	21.4	5.8 (0.9)	7.0
5.0x5.0x2.5	62	6.6 (1.0)	8.3
10.0x10.0x5.0	500	6.6 (1.0)	11.0
15.0x15.0x7.5	1687	8.8 (1.3)	12.0
20.0x20.0x10.00	4000	12.0 (1.8)	12.0



# Пример использования сборки из четырех блоков детектирования SDP500S



## Результаты сравнительных измерений обогащения $^{235}\text{U}$ в таблетках $\text{UO}_2$

S.-W. Kwak, J. Choi, S.S. Park, S.H. Ahn, J.S. Park and H. Chung, Comparison of experimental results of a Quad-CZT array detector, a NaI(Tl), a LaBr<sub>3</sub>(Ce), and a HPGe for safeguards applications, Journal of Instrumentation, Volume 12, November 2017

Table 2. Measurement results of uranium enrichment of  $\text{UO}_2$  Pellets.

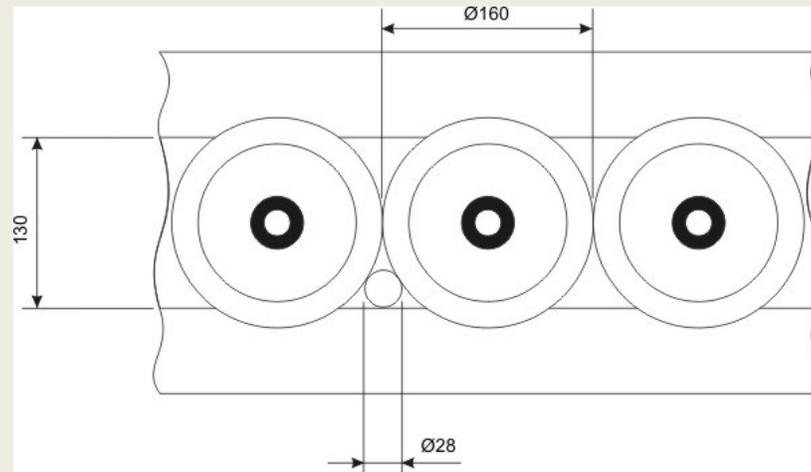
Declared Enrichment(wt%)	NaI(Tl)		LaBr <sub>3</sub> (Ce)		Quad-CZT array	
	Measurement (wt%)	Rel. Error(%)	Measurement (wt%)	Rel. Error(%)	Measurement (wt%)	Rel. Error(%)
0.71	0.75	5.6	0.68	-4.2	0.75	5.6
1.28	1.25	-2.3	1.27	-0.8	1.24	-3.1
2.34	2.33	-0.4	2.35	0.4	2.38	1.7
3.80	3.72	-2.1	3.81	0.3	3.82	0.5
4.10	4.02	-2.0	4.09	-0.2	4.09	-0.2

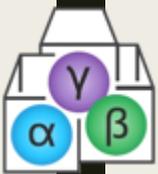


# Пример использования миниатюрных блоков детектирования SDP310



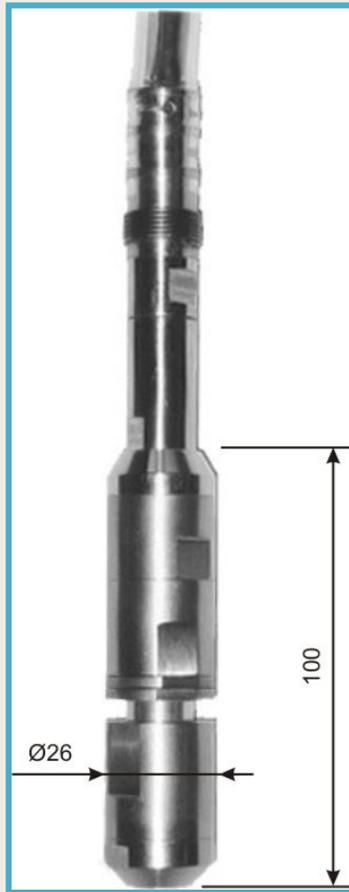
Контроль отработавших тепловыделяющих сборок без их перемещения к месту измерения.



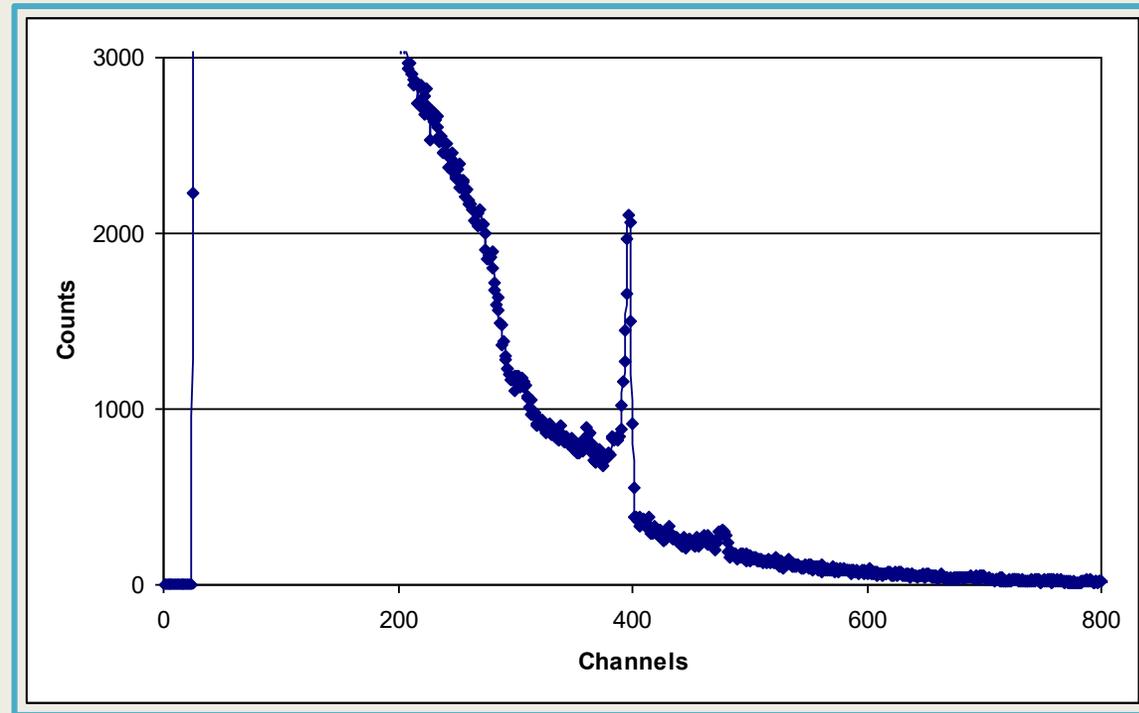


# Спектр облученного топлива

Выгорание 180 MWd/FA. Время выдержки 21 месяц.



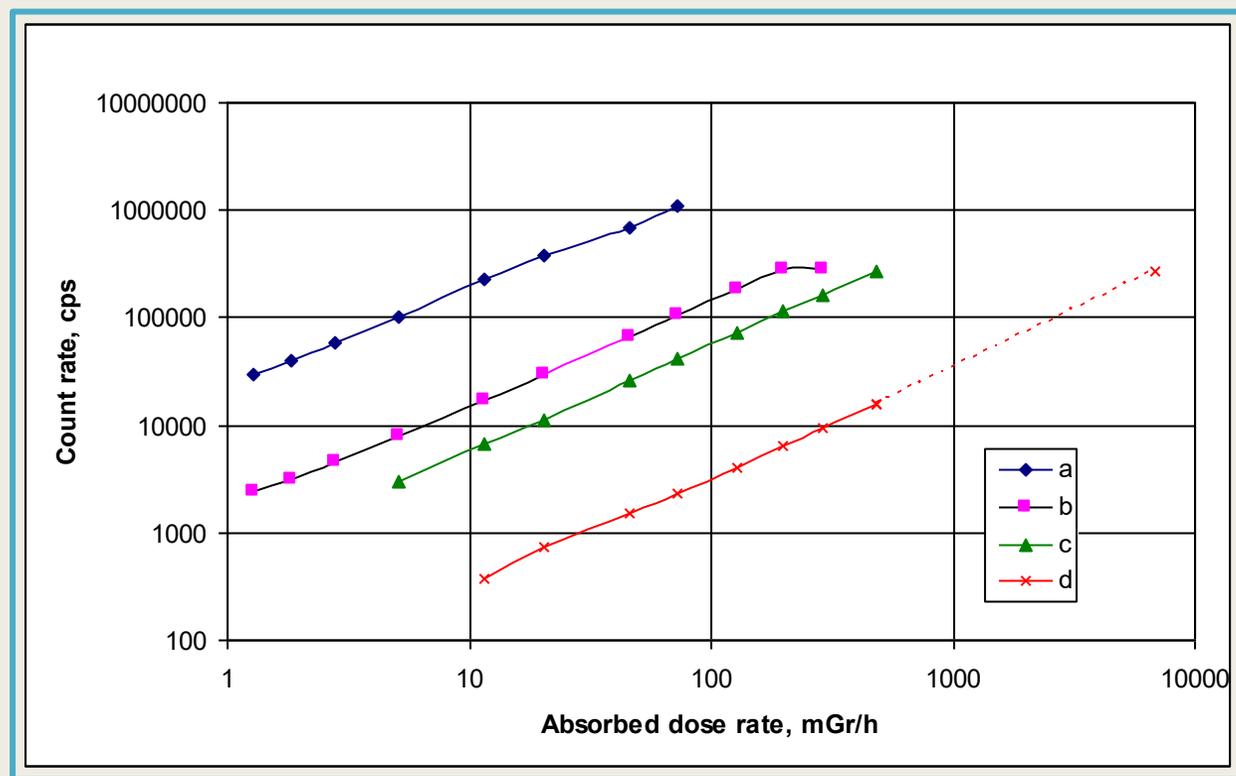
Измерительный зонд.





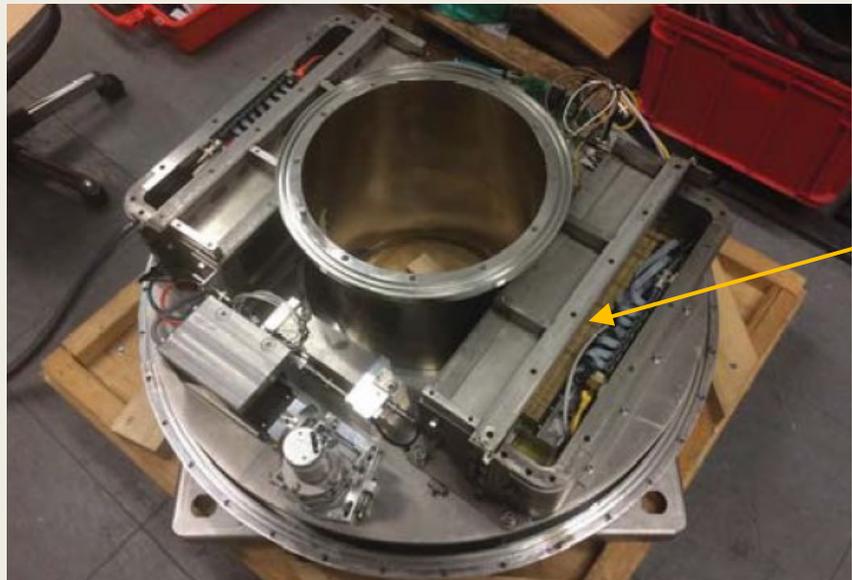
# Зависимости скорости счета от мощности поглощенной дозы полученные детекторами различного объема

500 мм<sup>3</sup> (a), 40 мм<sup>3</sup> (b), 14 мм<sup>3</sup> (c), 0.5 мм<sup>3</sup> (d)

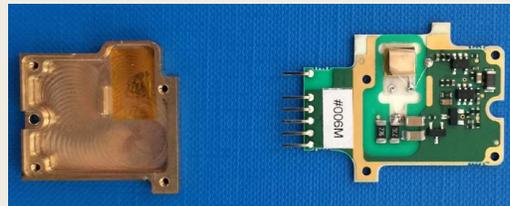




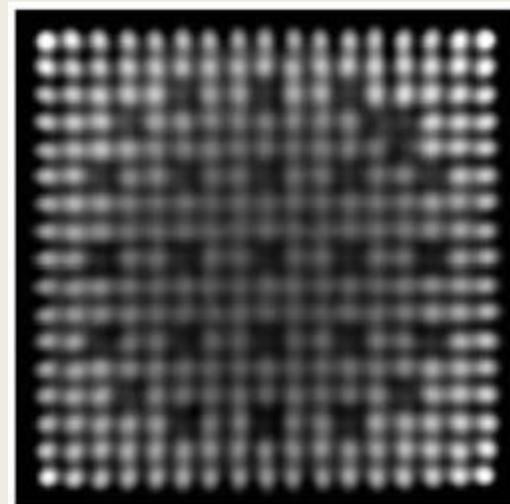
# Система гамма-эмиссионной томографии для инспекции облученного топлива в бассейне выдержки АЭС



Вид внутреннего устройства подводной части томографической системы



Детекторный модуль  
Размер CZT детектора  
 $3.5 \times 3.5 \times 1.75 \text{ мм}^3$



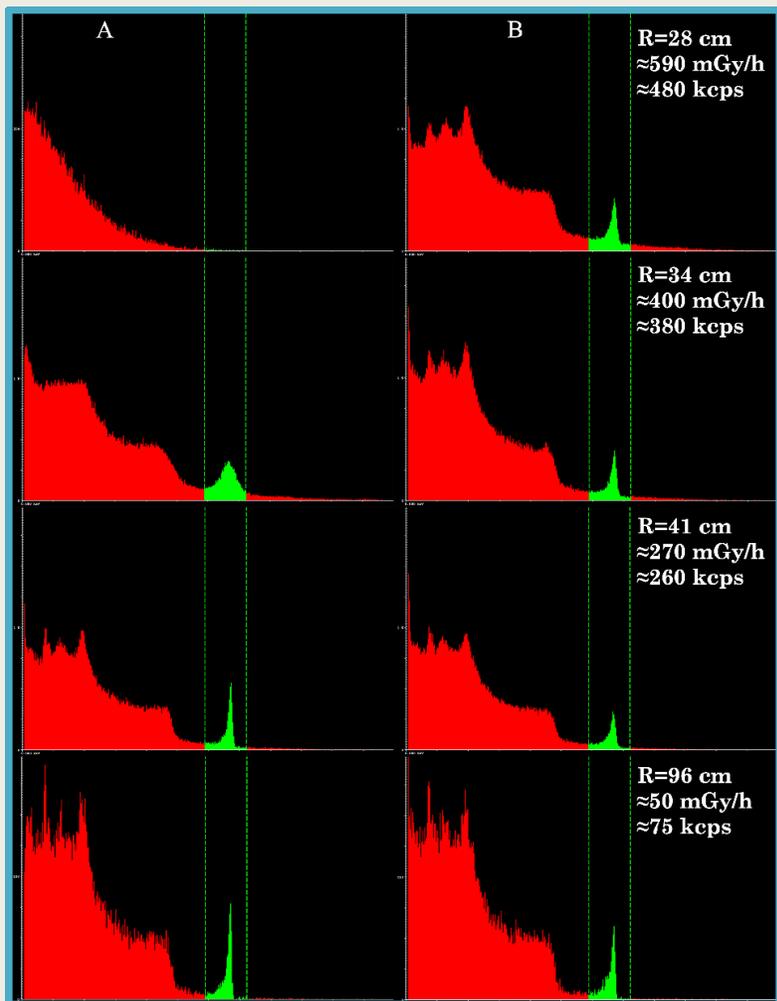
Изображение тепловыделяющей сборки полученное с помощью томографической системы (выгорание 59.5 GWd/tU время охлаждения 3.4 года).

Видно, что два тепловыделяющих стержня удалены.

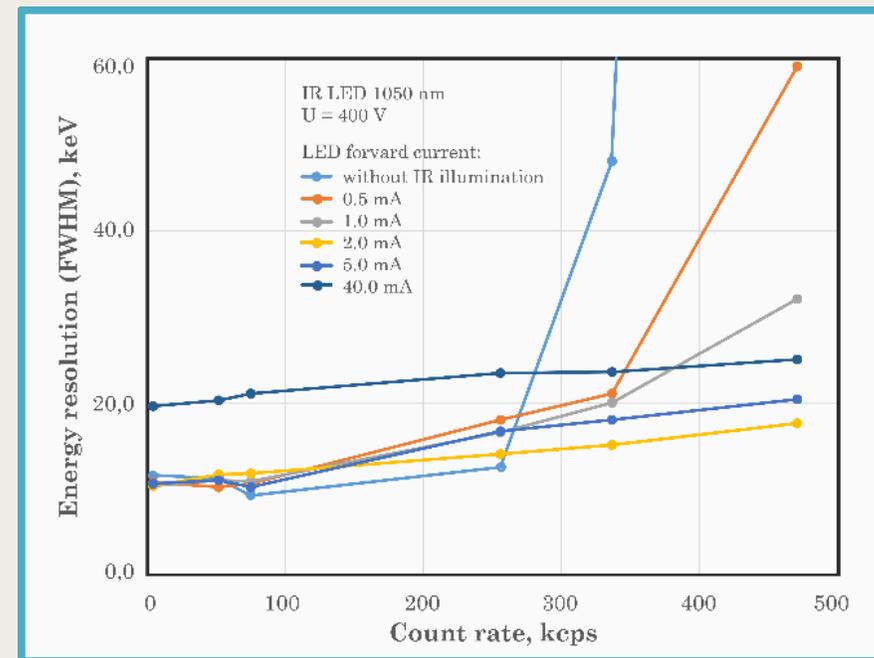
M. Mayorov, T. White, A. Lebrun, et al., Gamma Emission Tomography for the Inspection of Spent Nuclear Fuel, 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 21-28 Oct. 2017, Conference paper.



# Влияние ИК подсветки на характеристики детектора объемом 20 мм<sup>3</sup> работающего в условиях больших нагрузок



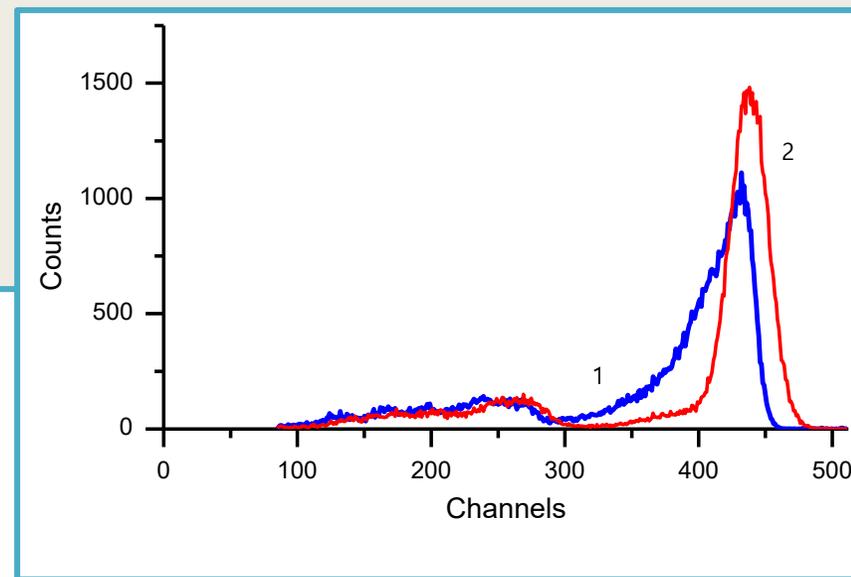
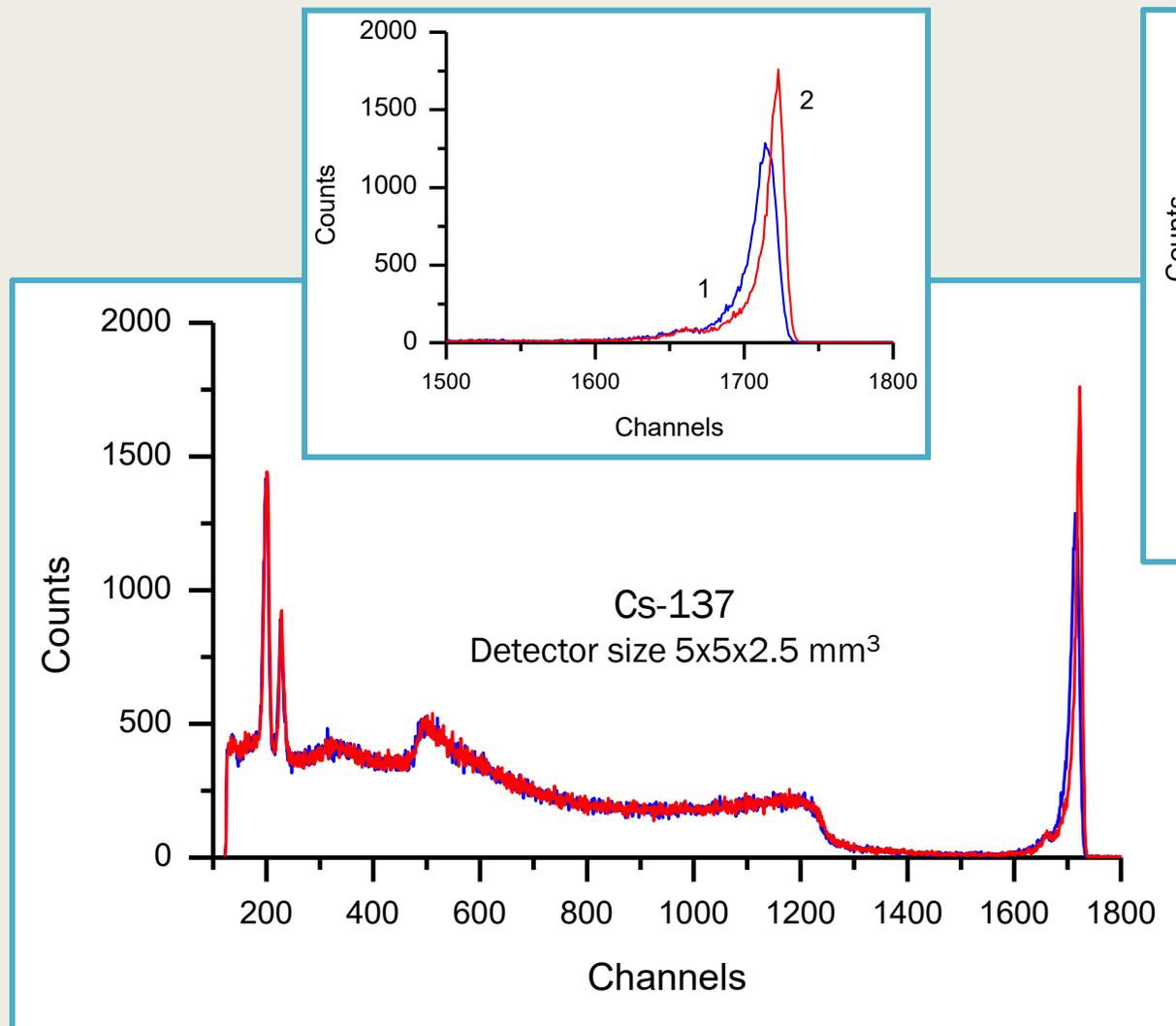
Спектры <sup>137</sup>Cs, измеренные CZT детектором без (А) и с (В) ИК подсветкой на разных расстояниях между источником излучения и детектором.



Зависимость энергетического разрешения (FWHM) по линии 662 кэВ от скорости счета, измеренная с CZT детектором без ИК подсветки и с ИК подсветкой различной интенсивности.



# Спектры $^{241}\text{Am}$ и $^{137}\text{Cs}$ зарегистрированные CZT детектором без и с ИК подсветкой

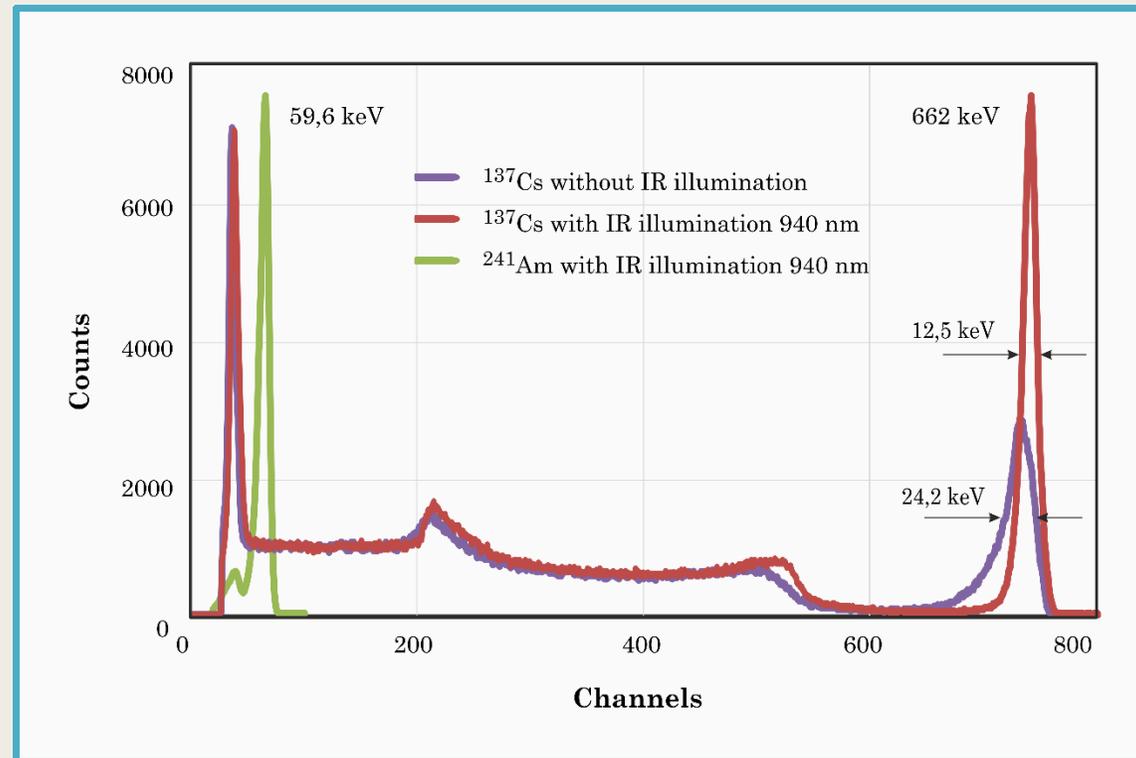


1 – без ИК подсветки

2 – с ИК подсветкой 940 nm

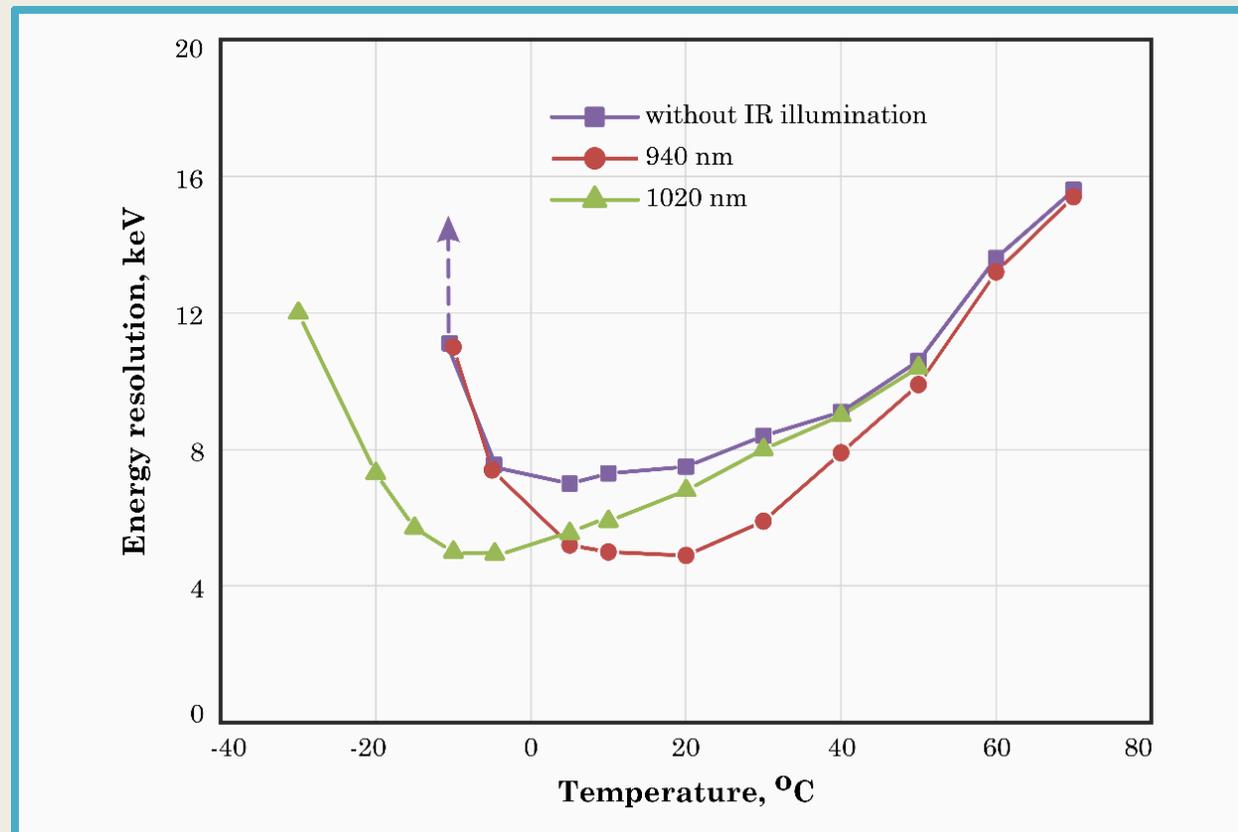


# Спектры $^{137}\text{Cs}$ зарегистрированные детектором объемом 4.0 см<sup>3</sup> без и с ИК подсветкой





# Влияние ИК подсветки на температурную зависимость энергетического разрешения детектора объемом 60 мм<sup>3</sup>





# Портативные спектрометры разных производителей с использованием CZT детекторов



identiFINDER R300  
FLIR Systems, Inc.  
Объем детекторов  $\approx 3.0 \text{ см}^3$



XRF ICS 4000  
XRF Corporation  
Объем детектора  $0.2 \text{ см}^3$



RayMon10  
KROMEK  
Объем детектора  $1.0 \text{ см}^3$



Носимый идентификатор  
гамма-изотопов от компании  
H3D Inc. суммарный объем  
детектора около  $4.5 \text{ см}^3$   
(модель A100) или около  
 $19.0 \text{ см}^3$  (модель A400)



Персональный спектрометр  
идентификатор от компании  
GalxRay. Объем детектора  
 $0.5 \text{ см}^3$  или  $1.6 \text{ см}^3$



# Микроспектрометры различных производителей



Микроспектрометры  $\mu$ SPEC, CUBE527 и CUBE527E от ZRF RITEC SIA и GBS-Elektronik GmbH  
Объем детектора до  $1.6 \text{ см}^3$



Спектрометр рентгеновского и низкоэнергетического гамма излучения с CdTe детектором от компании AMPTEC.  
Объем детектора  $25 \text{ мм}^3$



Микроспектрометр от IMS Innovation & Measurement Systems.  
Объем детектора до  $0.5 \text{ см}^3$



Микроспектрометр типа GR-1 от компании KROMEK/CANBERRA.  
Объем детектора до  $1.0 \text{ см}^3$

NUCLEAR RADIATION  
SEMICONDUCTOR DETECTORS  
AND ASSOCIATED ELECTRONICS





# Микрспектрометр $\mu$ SPEC с различными сменными модулями



Базовый модуль



Модуль DM60/500/1500  
Объем детекторов  
 $60 \text{ мм}^3$ ,  $0.5 \text{ см}^3$  и  $1.6 \text{ см}^3$



Модуль DM310/XX/A  
Объем детекторов  
 $1 \dots 60 \text{ мм}^3$



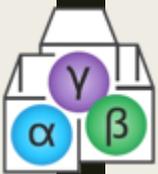
Модуль DM500/A, DM1500/A  
Объем детекторов  
 $0.5 \text{ см}^3$  и  $1.6 \text{ см}^3$



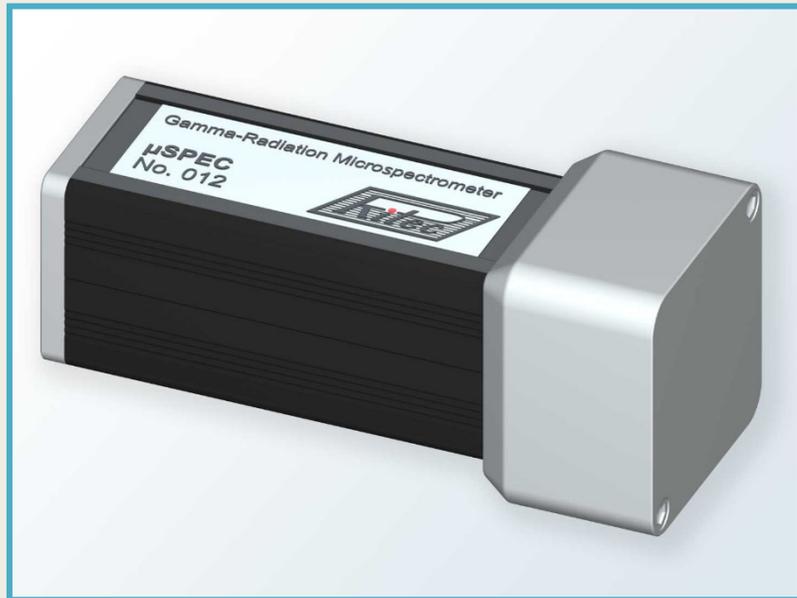
Модуль предусилителя  
PM120



Пыле- брызгозащищенный  
держатель микрспектрометра



# Микроспектрометр $\mu$ SPEC4000 с детектором объемом 4.0 см<sup>3</sup>



## Основные характеристики

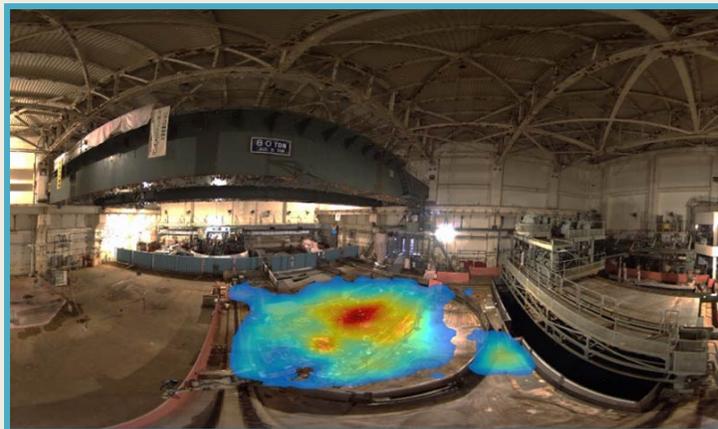
Тип детектора	CdZnTe квази-полусферический
Объем детектора	4.0 см <sup>3</sup>
Диапазон регистрируемых энергий	20 ... 3000 кеВ
Энергетическое разрешение @ 662 кеВ	< 4%
Внешние размеры	35 мм x 35 мм x 77 мм
Вес	100 гр.



# Пример использования микроспектрометров совместно с беспилотными летательными аппаратами



RISER – устройство для дистанционного обнаружения и исследования источников радиации от компании CREATEC Ltd.



Работа дрона RISER на АЭС Фукусима

P. Royo, E. Pastor, M. Macias, R. Cuadrado, C. Barrado, A. Vargas, An Unmanned Aircraft System to Detect a Radiological Point Source Using RIMA Software Architecture, Remote Sensing, vol. 10, issue 11, 2018.



J. Aleotti, G. Micconi, S. Caselli, G. Benassi, N. Zambelli, M. Bettelli, A. Zappettin, Detection of Nuclear Sources by UAV Teleoperation Using a Visuo-Haptic Augmented Reality Interface, Sensors, vol. 17, issue 10, 2017.



NUCLEAR RADIATION  
SEMICONDUCTOR DETECTORS  
AND ASSOCIATED ELECTRONICS





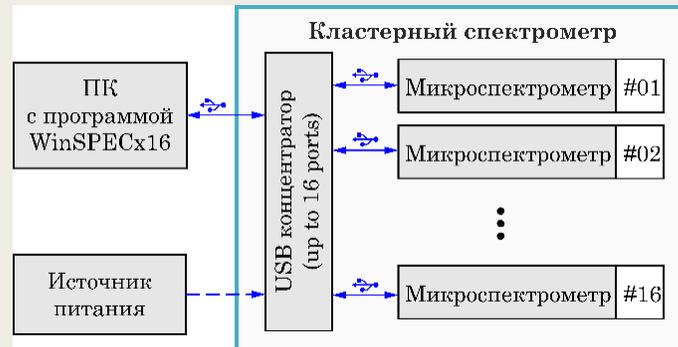
# Кластерные спектрометры на основе $\mu$ SPEC



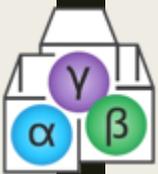
4-х элементный кластер с микроспектрометрами  $\mu$ SPEC500 или  $\mu$ SPEC1500. Суммарный объем детекторов  $2.0 \text{ см}^3$  или  $6.4 \text{ см}^3$



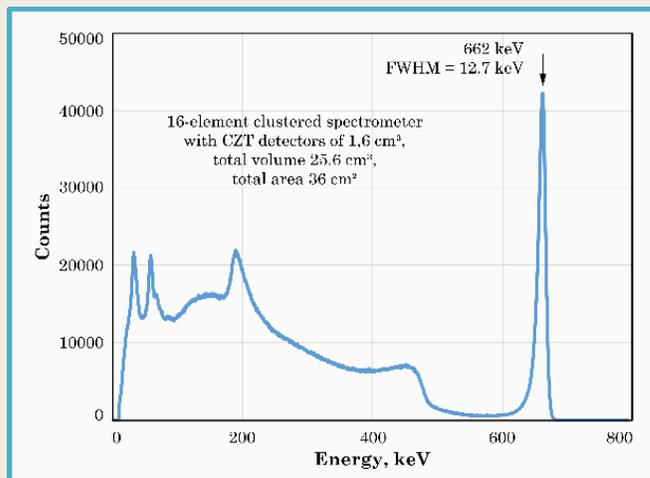
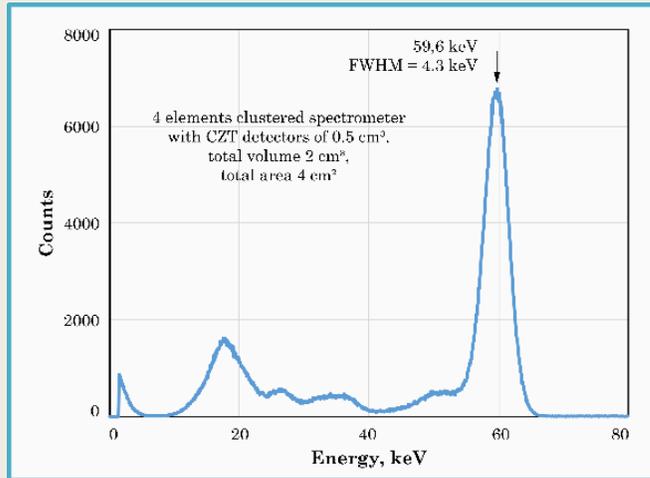
16-и элементный кластер с микроспектрометрами  $\mu$ SPEC1500. Суммарный объем детекторов  $25.6 \text{ см}^3$



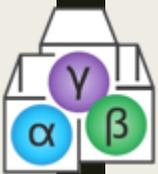
Для сбора и обработки полученных спектров от кластерного спектрометра используется специальное программное обеспечение WinSPECx16 на базе MS Windows, разработанное компанией GBS-Elektronik GmbH



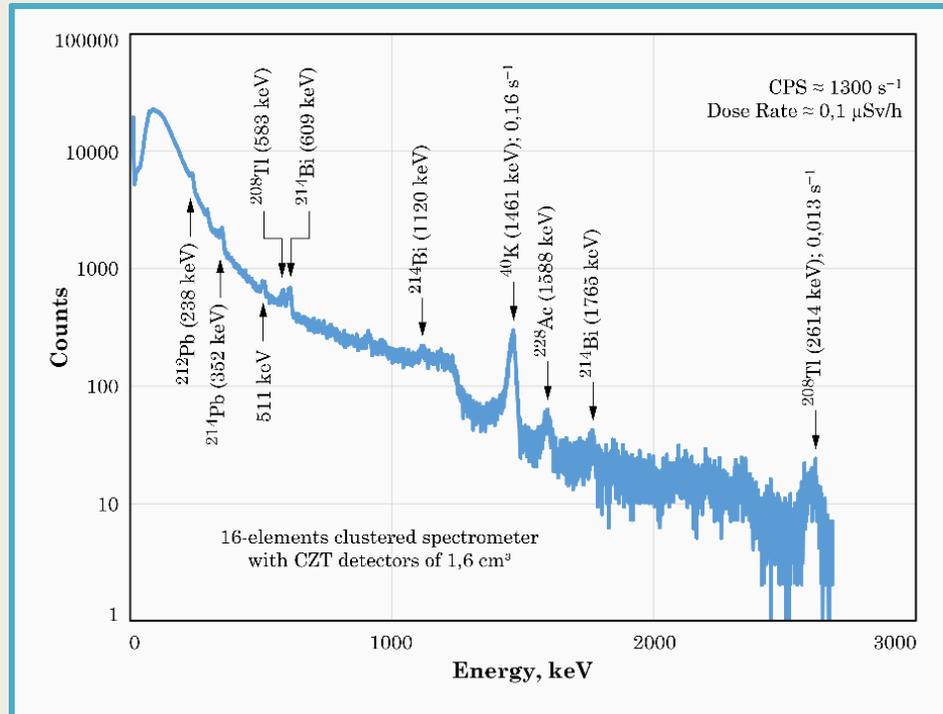
# Результаты измерений с использованием кластерного спектрометра I



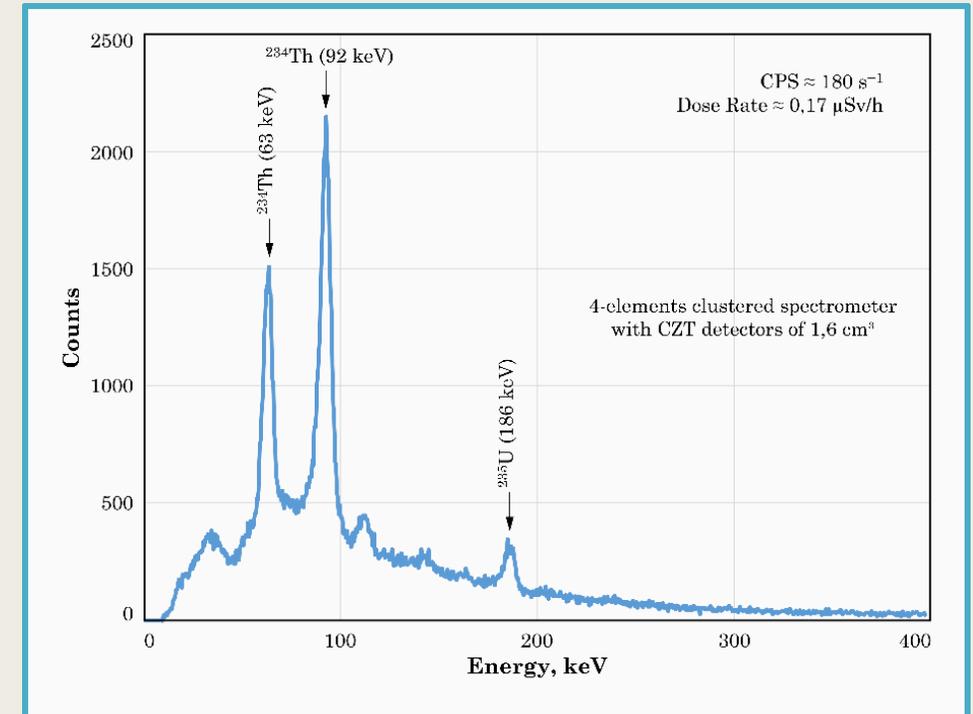
#	Количество элементов	Объем CZT единичного детектора, см <sup>3</sup>	Суммарный объем/площадь кластерного спектрометра, см <sup>3</sup> /см <sup>2</sup>	Энергетическое разрешение детекторов, составляющих кластер, @662 кэВ, %	Разброс положения пика до коррекции, %	Результирующее энергетическое разрешение кластерного спектрометра, %
1	4	0,5	2,0/4,0	1,0; 1,0; 0,9; 1,1	2,7	1,0
2	4	1,6	6,4/9,0	1,7; 1,8; 1,6; 1,9	3,9	1,8
3	16	1,6	25,6/36,0	2,8; 2,0; 1,8; 2,0; 2,8; 1,6; 1,8; 2,2; 2,8; 2,5; 3,0; 2,2; 2,5; 2,2; 2,8; 1,9	4,6	2,2



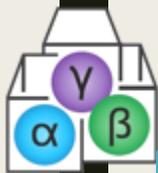
# Результаты измерений с использованием кластерного спектрометра II



Спектр фонового излучения в помещении с бетонным полом



Спектр бус из уранового богемского стекла



# Пример использования кластерного спектрометра



## Результаты сравнительных измерений обогащения $^{235}\text{U}$ в $\text{UF}_6$ хранящегося в транспортных цилиндрах с помощью различных детекторов

R. Berndt, P. Mortreau,  $^{235}\text{U}$  enrichment determination on  $\text{UF}_6$  cylinders with CZT detectors, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 886 (2018) 40–47.

Enrichment measured with CZT detectors and ORTEC Micro-trans SPEC HP Ge Portable.

Spectrometer	Four $\mu\text{SPEC1500-499}$			Four $\mu\text{SPEC500}$			One $\mu\text{SPEC1500}$			One Kromek GR1			ORTEC Micro-trans SPEC HPGe Portable		
	Counting time (s)	300		300			300			300			180		
Declared enrichment wt%	Measured enrichment wt%	Relative error %	Dev Sigma	Measured enrichment wt%	Relative error %	Dev Sigma	Measured enrichment wt%	Relative error %	Dev Sigma	Measured enrichment wt%	Relative error %	Dev Sigma	Measured enrichment wt%	Relative error %	Dev Sigma
0.131	$0.127 \pm 0.024$	19	-0.2	$0.142 \pm 0.057$	40	0.2	$0.177 \pm 0.073$	41	0.9	$0.124 \pm 0.110$	88	-0.1	$0.131 \pm 0.025$	19	0.0
0.225	$0.217 \pm 0.024$	11	-0.3	$0.237 \pm 0.049$	21	0.3	$0.189 \pm 0.059$	31	-0.5	$0.140 \pm 0.097$	69	-0.5	$0.225 \pm 0.022$	10	0.0
0.711	$0.730 \pm 0.042$	6	0.4	$0.741 \pm 0.073$	10	0.4	$0.665 \pm 0.098$	15	-0.4	$0.777 \pm 0.117$	15	0.6	$0.694 \pm 0.034$	5	-0.5
3.264	$3.318 \pm 0.066$	2	0.8	$3.085 \pm 0.062$	2	-2.7	$3.240 \pm 0.065$	2	-0.4	$3.188 \pm 0.068$	2	-1.2	$3.236 \pm 0.071$	2	-0.4
4.003	$3.888 \pm 0.078$	2	-1.4	$3.993 \pm 0.080$	2	-0.1	$4.048 \pm 0.102$	3	0.4	$3.853 \pm 0.104$	3	-1.2	$4.067 \pm 0.074$	2	0.8
4.636	$4.685 \pm 0.094$	2	0.5	$4.565 \pm 0.091$	2	-0.8	$4.714 \pm 0.094$	2	0.8	$4.726 \pm 0.097$	2	1.0	$4.543 \pm 0.096$	2	-1.0



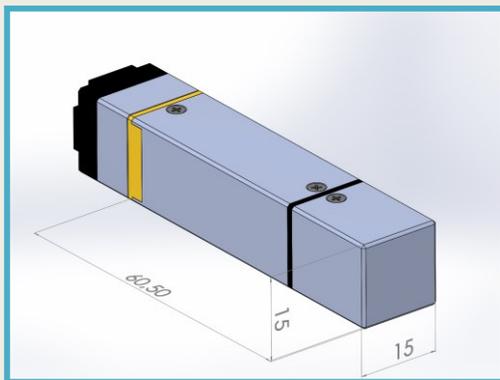
# Лучшие результаты, полученные промышленно выпускаемыми устройствами на основе CZT детекторов

№	Тип устройства	Тип детектора	Объем детектора, мм <sup>3</sup>	Энергетическое разрешение по линии 662 кэВ, %	Внешние габариты, мм	Компания производитель
1	Портативный носимый спектрометр идентификатор A400	сборка пиксельных детекторов	19500	<1	140 x 280 x 100	H3D Inc.
2	Кластерный спектрометр MultiSPEC6000	Сборка квази-полусферических детекторов	6400	<3	66 x 75 x 88	ZRF RITEC SIA
3	Блок детектирования SDP4000, микроспектрометр μSPEC4000	Монолитный квази-полусферический	4000	<3	Блок детектирования: ∅ 40 x 58 Микроспектрометр: 35 x 35 x 77	ZRF RITEC SIA
4	Микроспектрометр GR-1	Монолитный ко-планарный	1000	2.0 ... 2.5	25 x 25 x 63	Kromek
5	Микроспектрометр μSPEC1500/CUBE527	Монолитный квази-полусферический	1600	1.3 ... 2.2	25 x 25 x 71/ 25 x 25 x 64	ZRF RITEC SIA/ GBS-elektronik GmbH
6	Блоки детектирования SDP310	Миниатюрный квази-полусферический	0.5 ... 60	<1.5	∅ 8 x 82	ZRF RITEC SIA



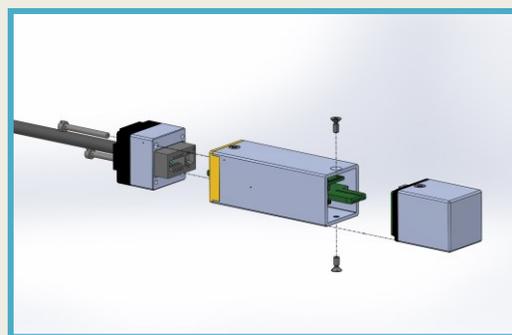
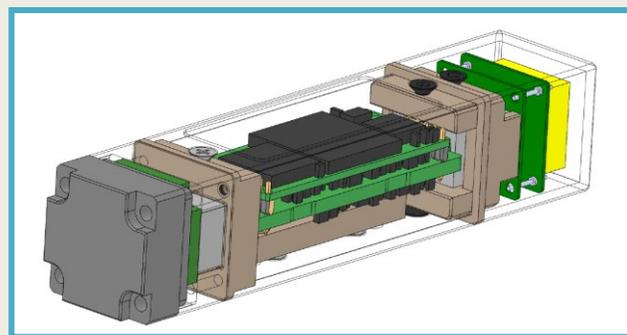
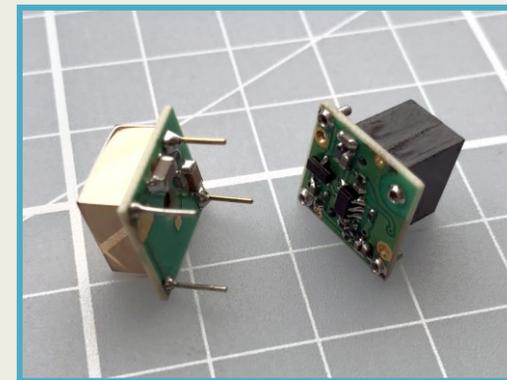
# Микроспектрометр nanoSPEC для построения многоэлементных систем измерения гамма-излучения

Совместная разработка ZRF RITEC SIA и GBS-Elektronik GmbH



Внешний вид и размеры наноспектрометра

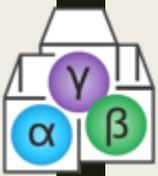
Детекторный модуль – CZT детектор и предусилитель.  
Размер детектора 10x10x5 мм<sup>3</sup>



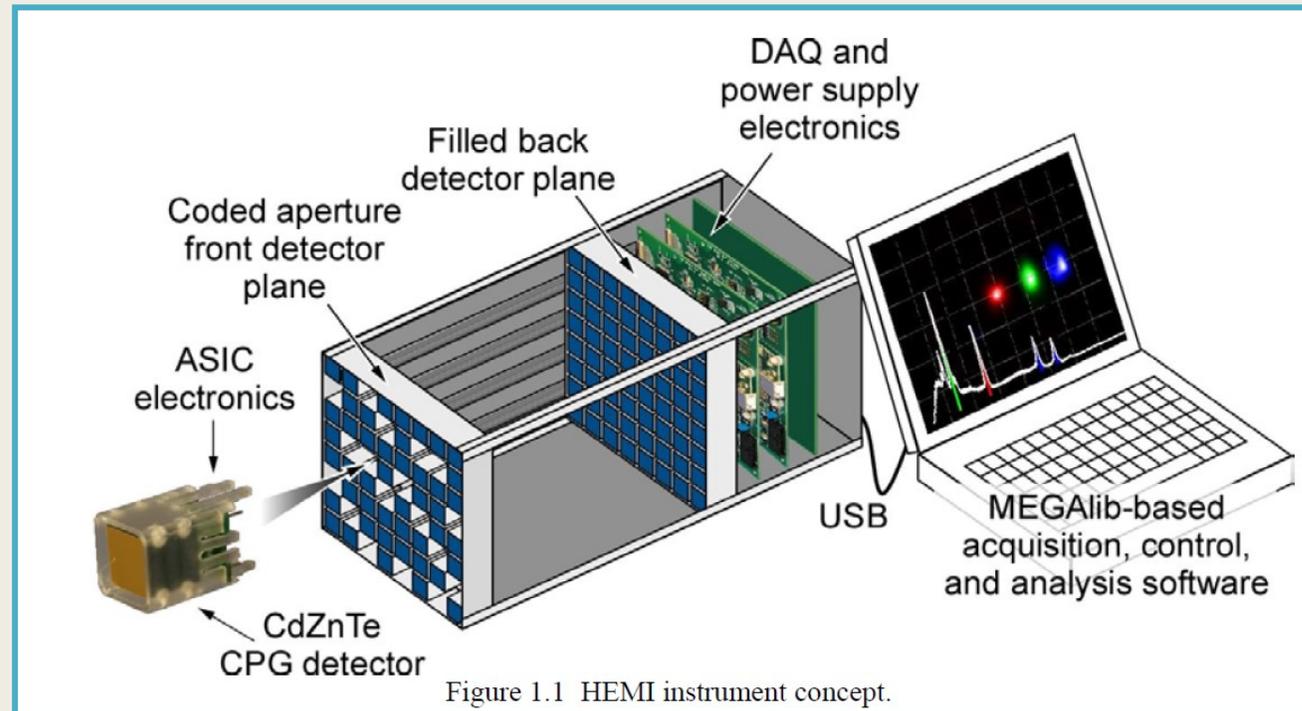
Конструкция спектрометра



Модуль многоканального анализатора  
Размер платы 30 мм x 12.8 мм



# Пример возможного использования спектрометра nanoSPEC



## Концепция высокоэффективного мульти модального визуализатора

/M. L. Galloway, M. Amman, S. Awadalla, et al., Status of the High Efficiency Multimode Imager, 2011 IEEE Nuclear Science Symposium, Conference Record/



# Спасибо за Ваше внимание!

<http://www.ritec.lv>

e-mail:ritec@ritec.lv

