



# **Разработка микро-ОФЭКТ системы на базе детектора Timerix для доклинических исследований на лабораторных животных**

**(по материалам кандидатской диссертации)**

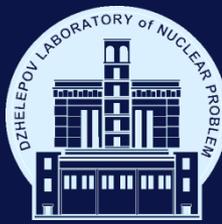
**Научный руководитель: Жемчугов А.С.**

Рожков Влад

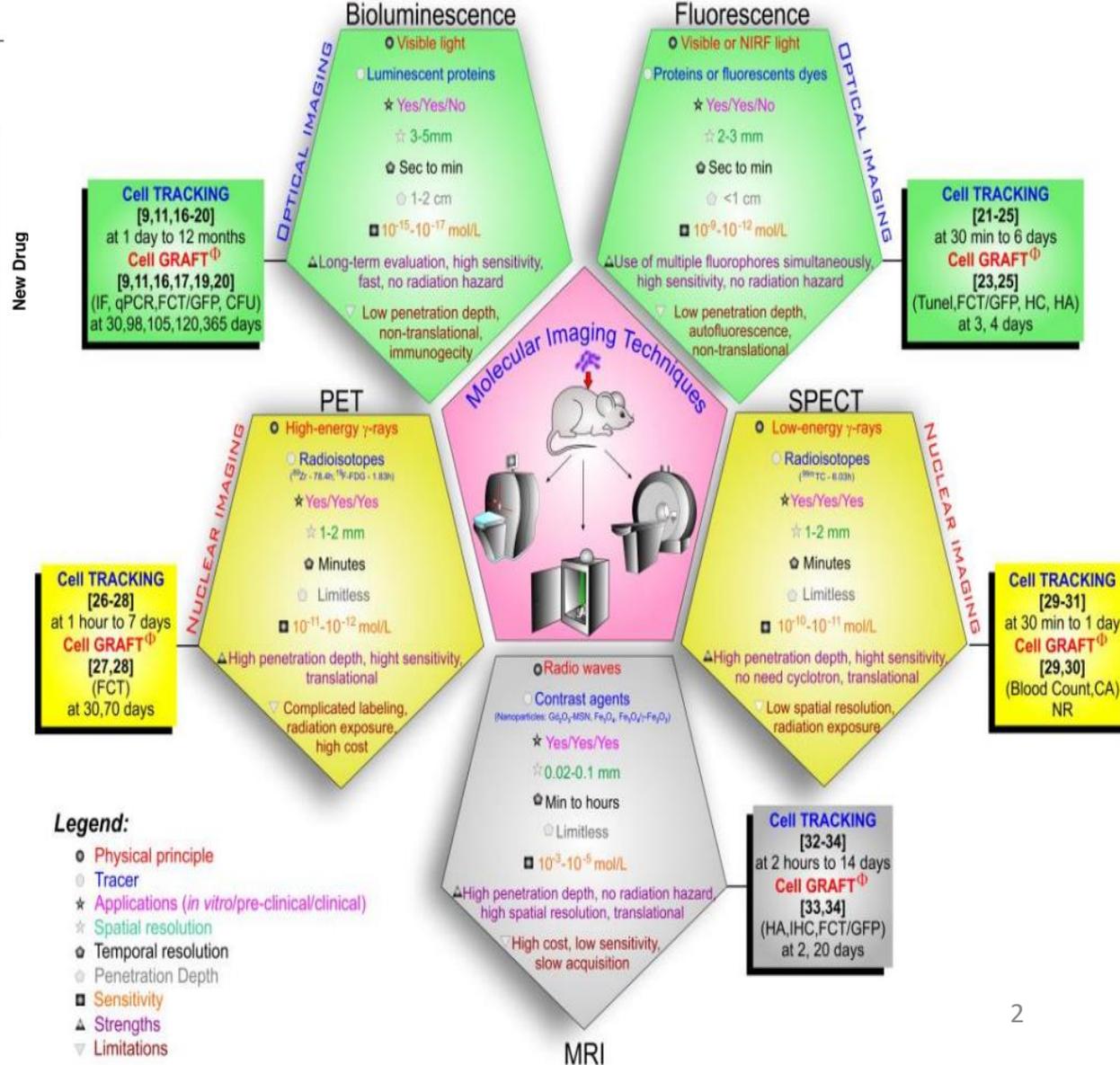
24.10.2024



# Molecular Imaging



Preclinical phase	Clinical phases		
Screening Hit identification Hit-to-lead optimization	Phase I	Phase 2	Phase 3
Biochemists Cell Biologists Bionformatics Pharmacologists	20 - 100 healthy subjects	100-300 patients	1000-10000 patients
Proof-of-principle Target specificity Pharmacokinetics Toxicity (ex-vivo and animal models)	Safety Formulation Dosage	Effectiveness Toxicity	Large-scale efficacy Long term side-effects Superiority to standards
1-5 years	1 year	1 year	1-2 years
€ 1 - 10 M	€ 5 - 10 M	€ 10 - 20 M	€ 50 - 100 M



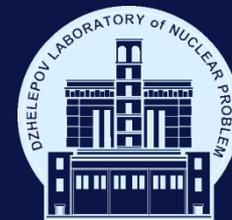
- Legend:**
- ⊙ Physical principle
  - ⊙ Tracer
  - ★ Applications (in vitro/pre-clinical/clinical)
  - ☆ Spatial resolution
  - ⌚ Temporal resolution
  - ⊙ Penetration Depth
  - Sensitivity
  - ▲ Strengths
  - ▼ Limitations

doi: 10.2174/138920101405131111105023  
 doi: 10.3390/cells9040939  
 doi: 10.1016/S0167-6296(02)00126-1





# Цели и задачи



Целью кандидатской диссертации является разработка и экспериментальная проверка микро-ОФЭКТ системы на основе гибридного пиксельного детектора Timerix с CdTe-сенсором для применения в доклинических исследованиях на лабораторных животных.

Задачи исследования:

- Разработать прототип микро-ОФЭКТ системы с использованием гибридного пиксельного детектора Timerix и кодирующей апертуры MURA, с высоким пространственным разрешением.
- Измерить критические характеристики системы, такие как: пространственное разрешение, контрастность, линейность, эффективность.
- Оценить эффективность системы при работе с фантомами, измерив такие параметры, как линейность, однородность, пространственное разрешение и контрастность.
- Разработать методику улучшения отношения сигнал/шум в реконструкции изображений с использованием методов машинного обучения.
- Провести сравнение с существующими системами микро-ОФЭКТ и доказать преимущество предлагаемого подхода для доклинических исследований.

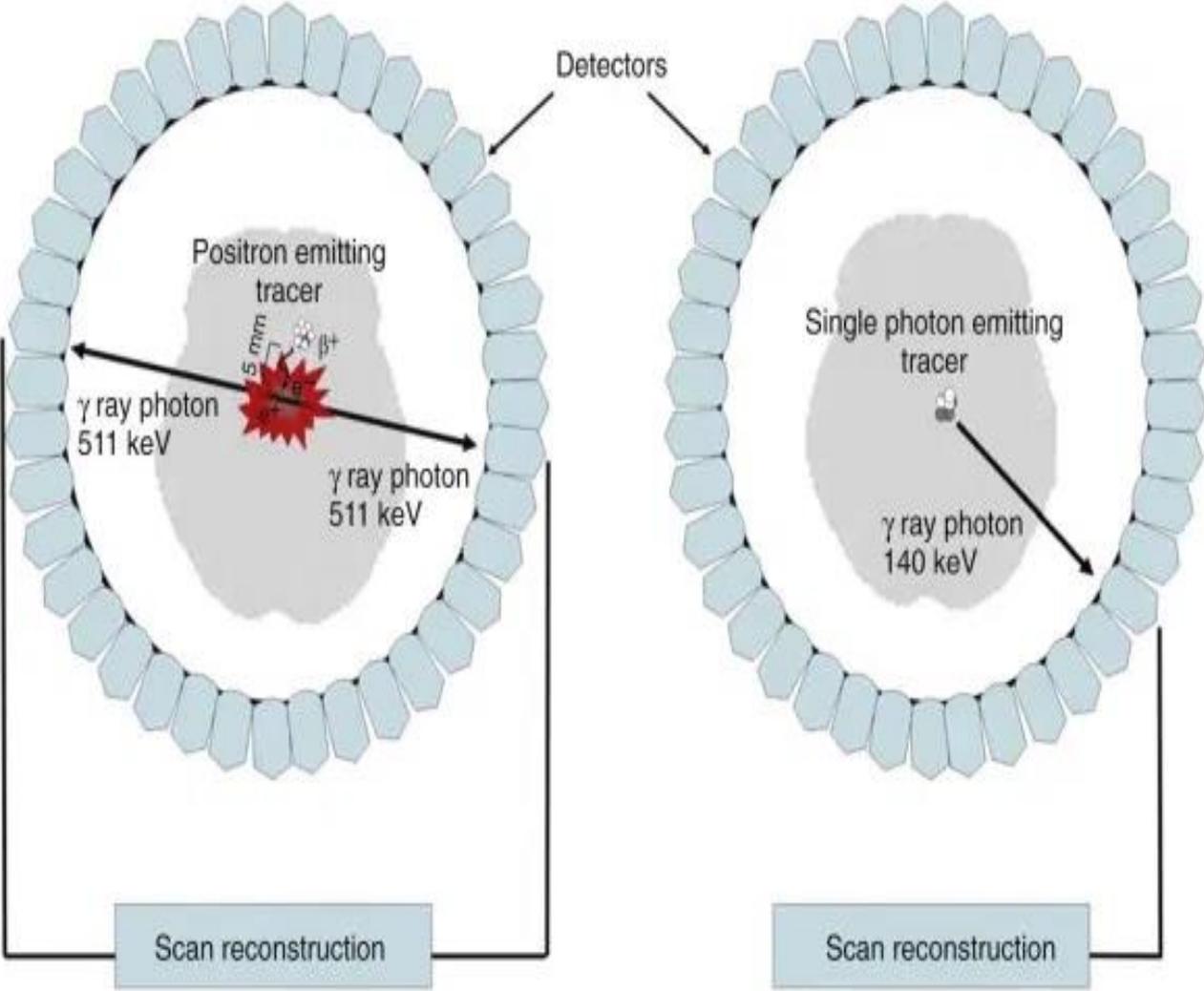


# Эмиссионная томография



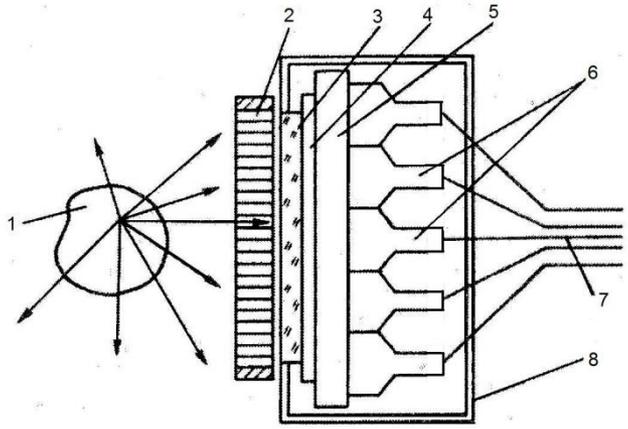
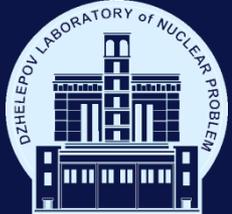
POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY (PET)

SINGLE PHOTON EMISSION COMPUTED TOMOGRAPHY (SPECT)



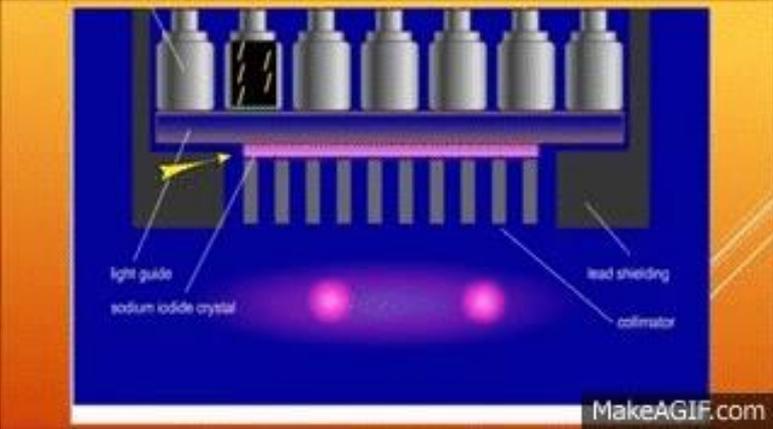
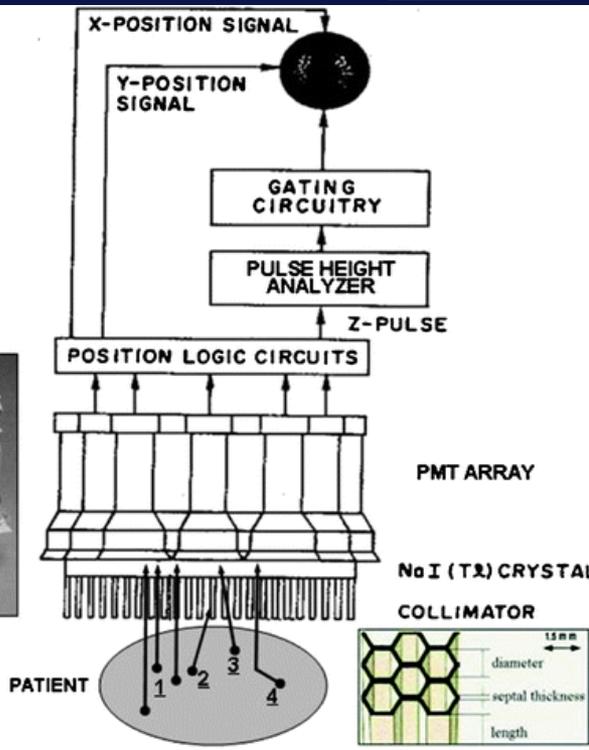
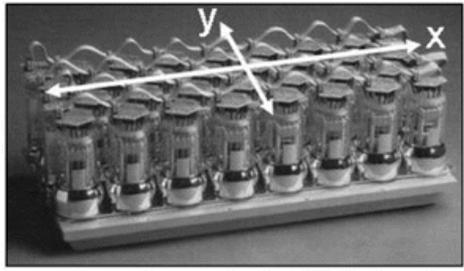


# Камера Ангера



Поперечный разрез блока детектирования гамма-камеры Ангера:

1 – исследуемый объект; 2 – коллиматор; 3 – сцинтиллятор; 4 – выходное окно сцинтиллятора; 5 – световод; 6 – фотоэлектронные умножители; 7 – цепи передачи импульсов; 8 – светозащитный кожух

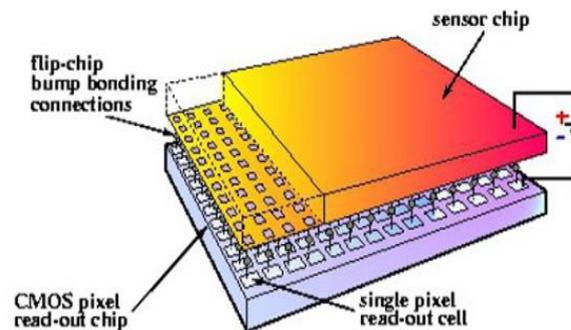




# Timepix detector



Sensor material	CdTe
Sensor size	14.1x14.1 mm
Sensor thickness	2 mm
Matrix size	256x256
Pixel size	55x55 $\mu\text{m}$
Energy resolution 140 KeV	10%
Efficiency 140 KeV	60%



## 1. Medipix – counting mode

2. Time-over-Threshold (TOT) each pixel records the energy deposite of particles interaction with corresponding sensor segment

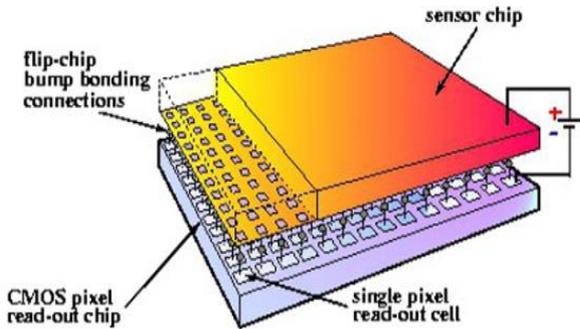
3. Time-of-arrival (TOA) - each pixel records the arrival time of particles interaction with corresponding sensor segment



# Timepix detector



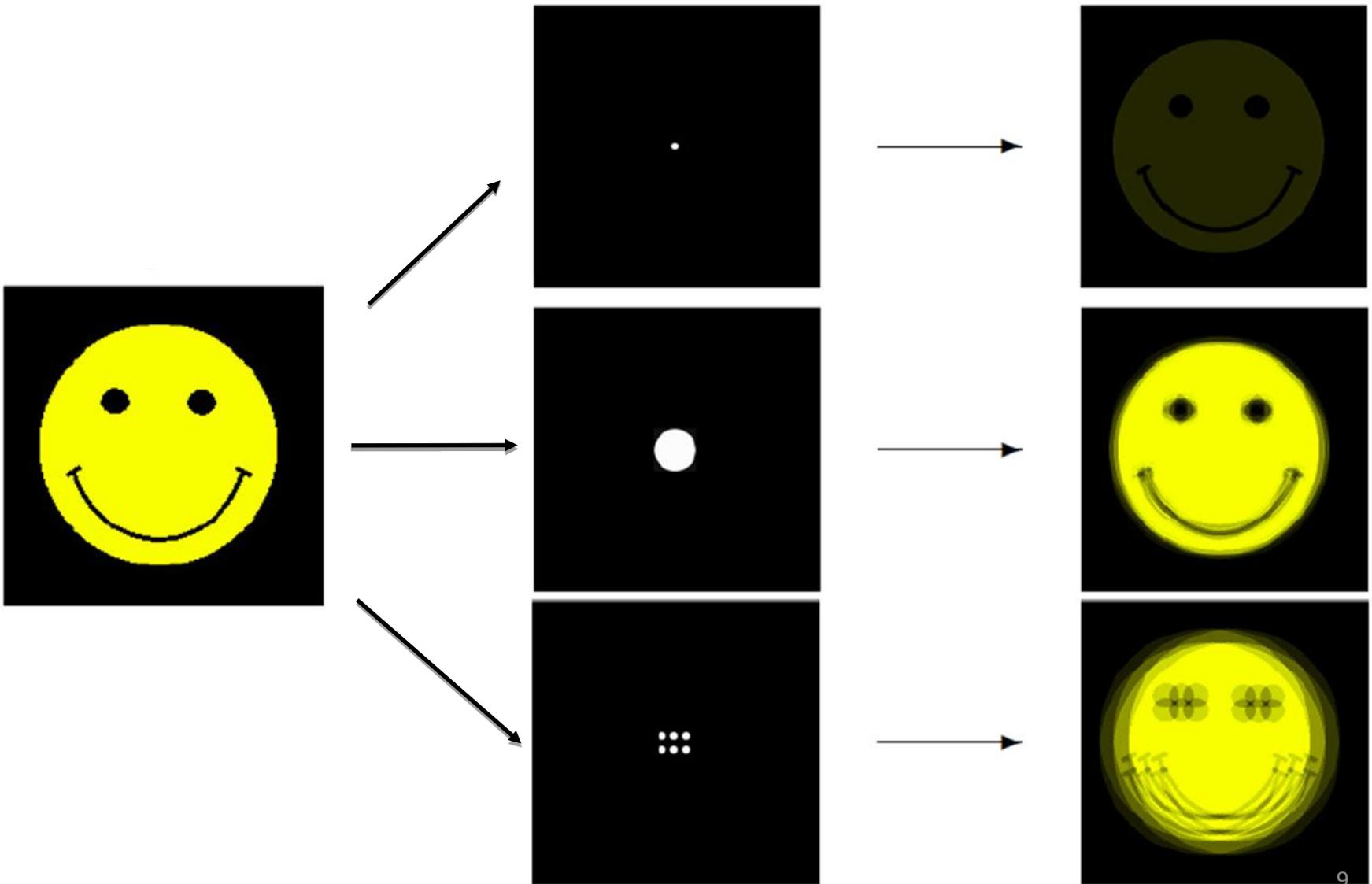
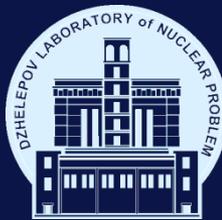
Sensor material	CdTe
Sensor size	14.1x14.1 mm
Sensor thickness	2 mm
Matrix size	256x256
Pixel size	55x55 $\mu\text{m}$
Energy resolution 140 KeV	10%
Efficiency 140 KeV	60%



- 1. Medipix – counting mode
- 2. Time-over-Threshold (TOT) each pixel records the energy deposite of particles interaction with corresponding sensor segment
- 3. Time-of-arrival (TOA) - each pixel records the arrival time of particles interaction with corresponding sensor segment

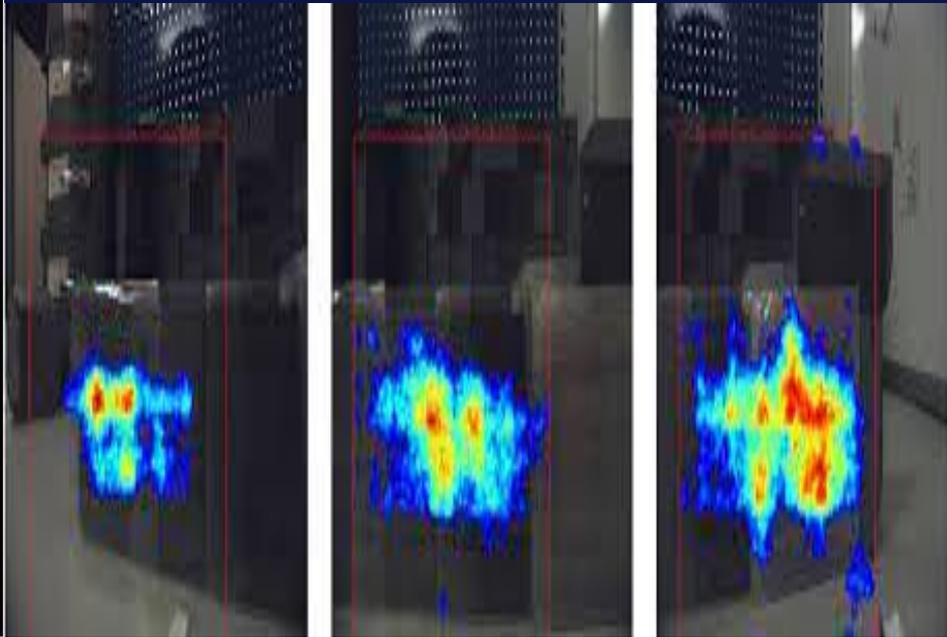
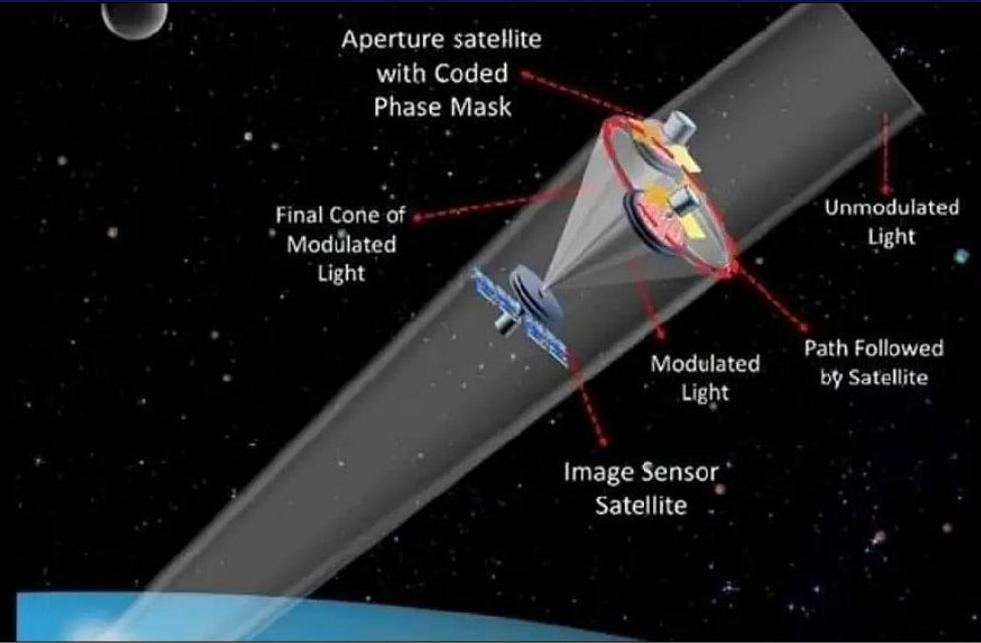


# Пинхольный коллиматор



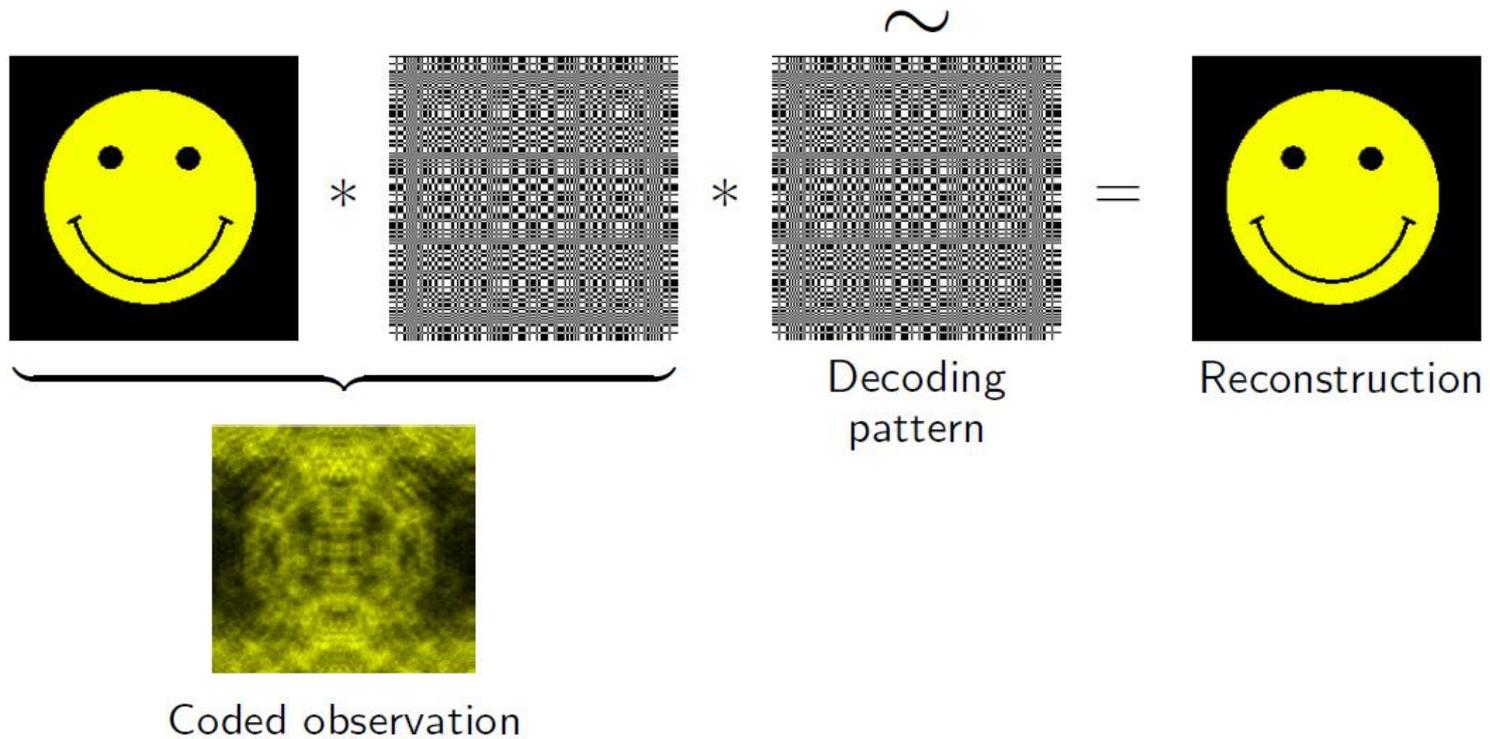
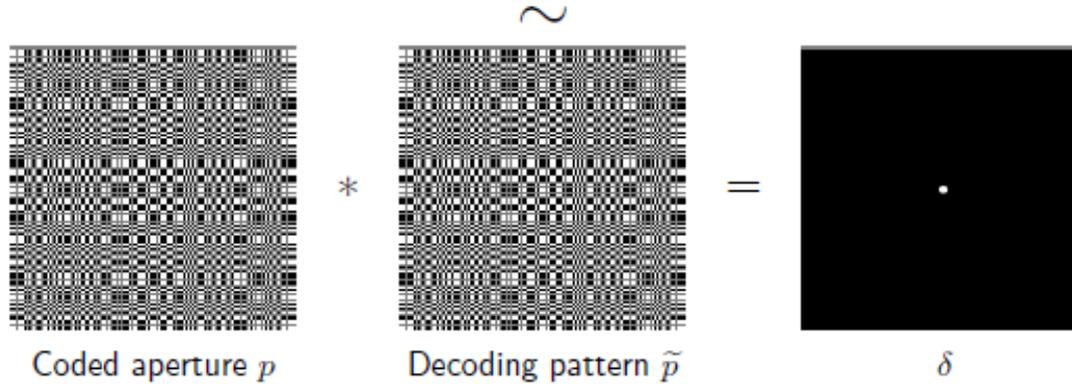
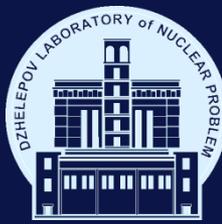


# Кодирующая апертура



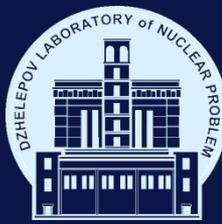


# Кодирующая апертура





# Кодирующая апертура

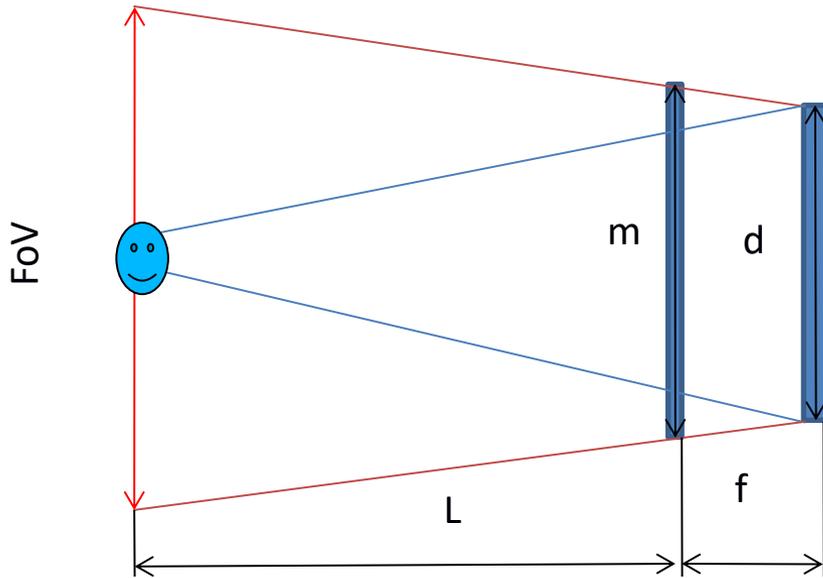
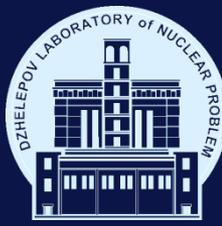


<b>Thickness</b>	<b>0.5 mm</b>
<b>Material</b>	<b>Tungsten</b>
<b>Mask type</b>	<b>MURA</b>
<b>Mask rank</b>	<b>31</b>
<b>Hole radius</b>	<b>160-180 um</b>
<b>Work area</b>	<b>22.01 x 22.01 mm</b>

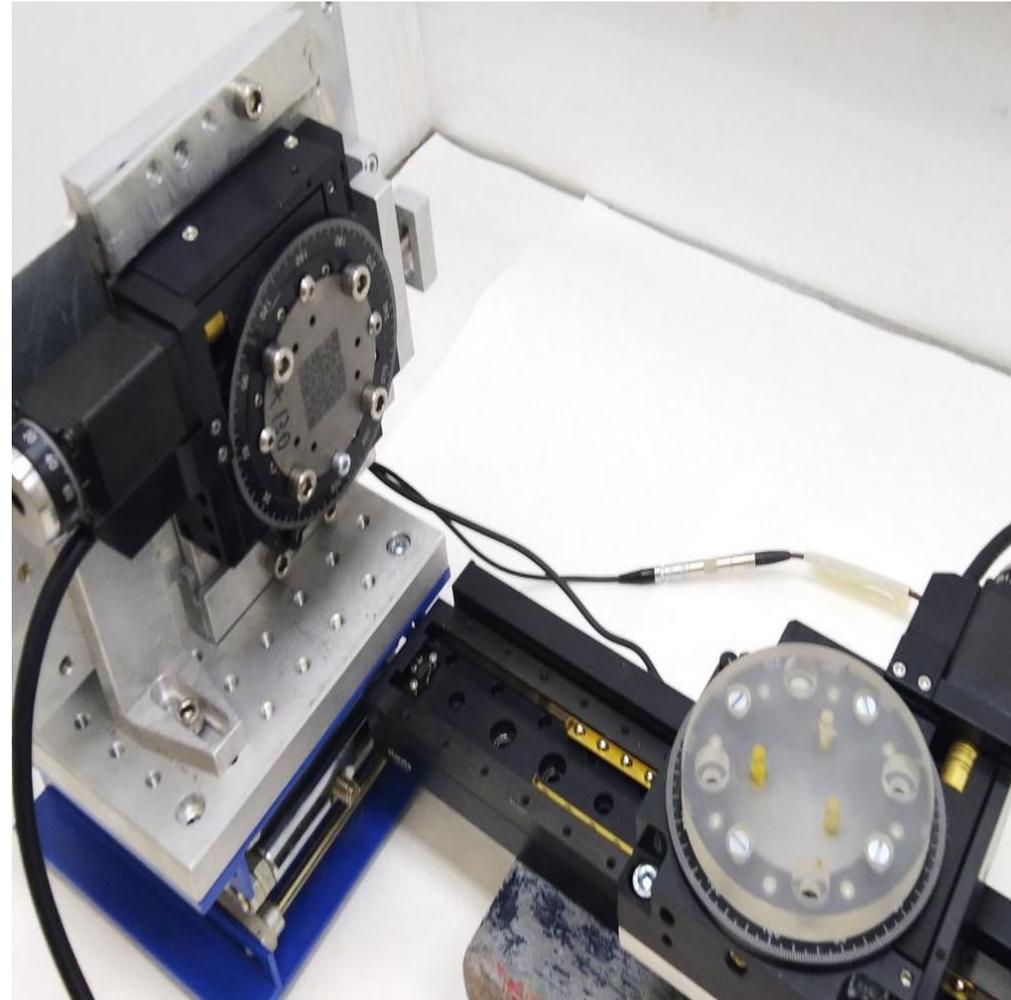




# Установка

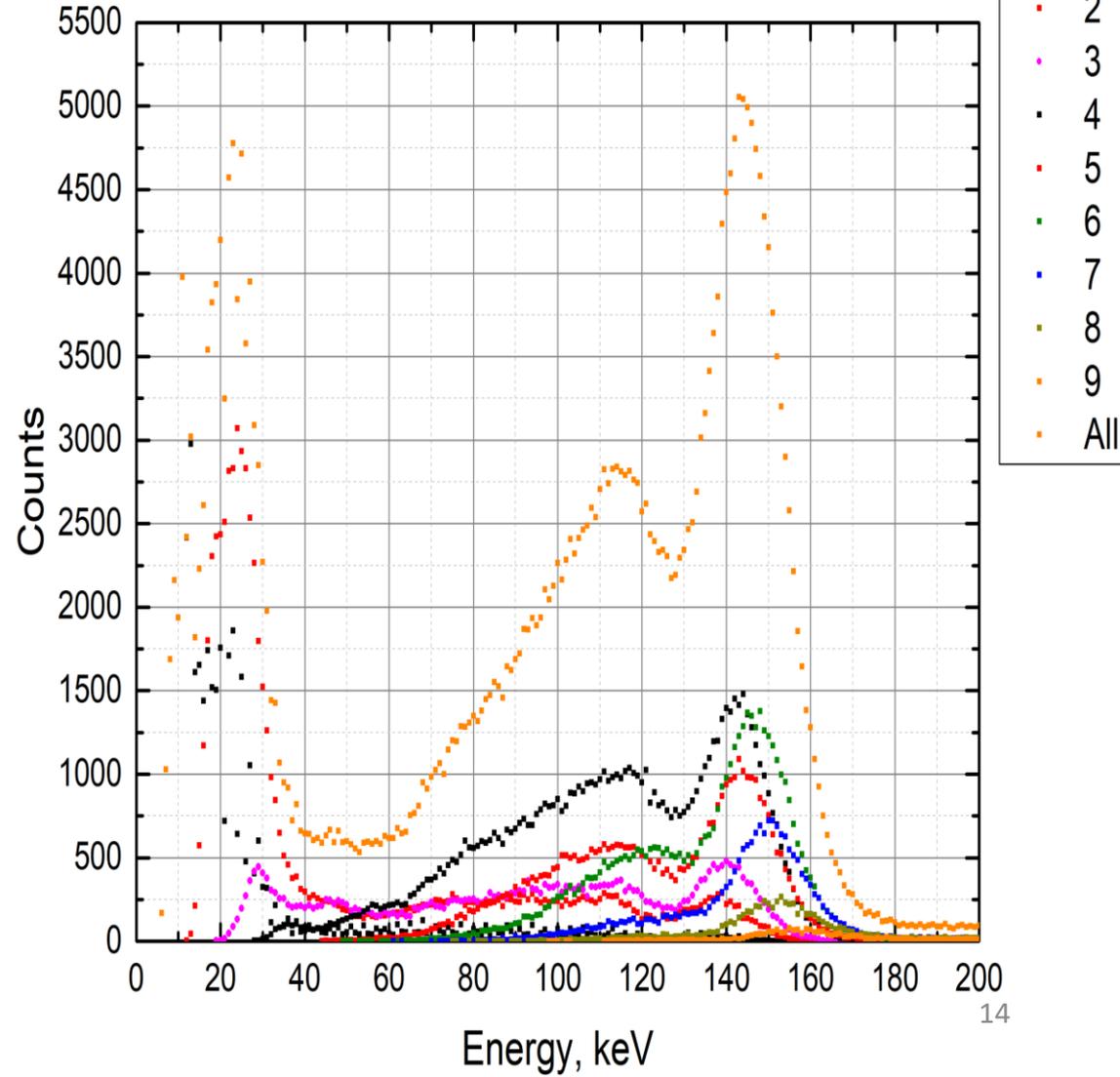
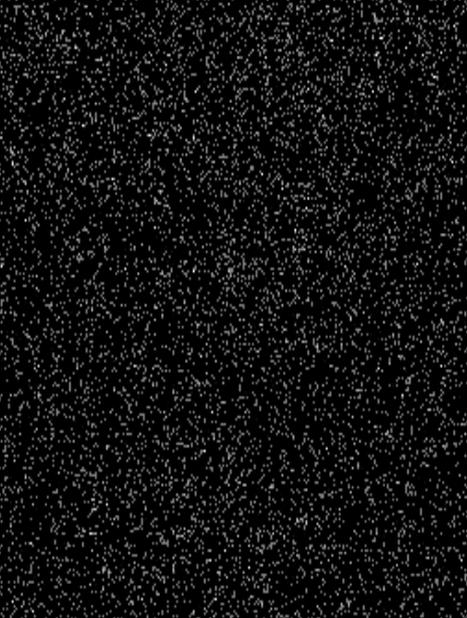
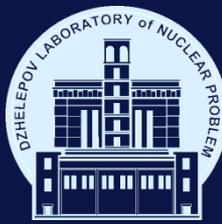


$$FoV = \frac{(m - d)(L - f)}{f}$$



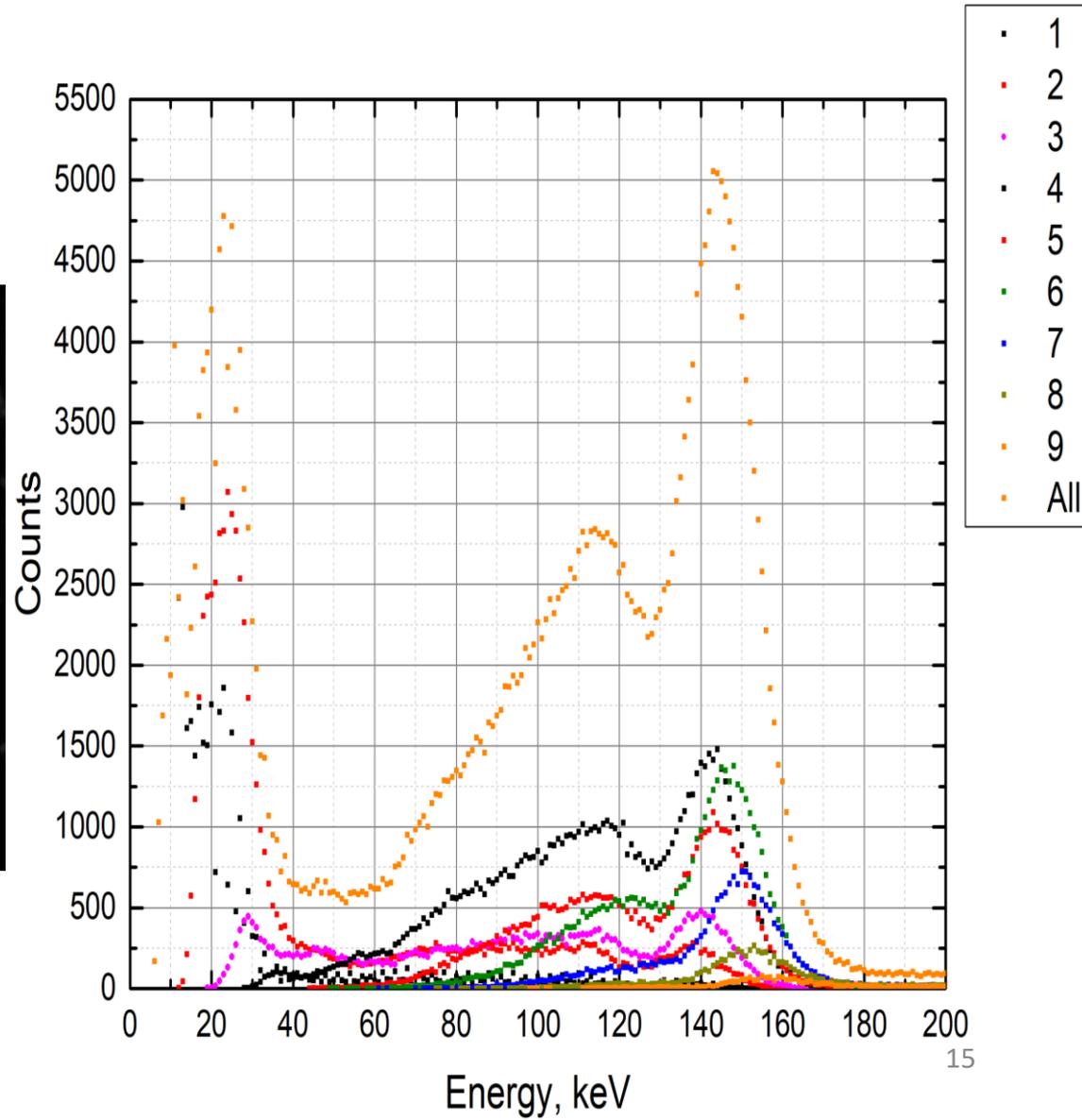
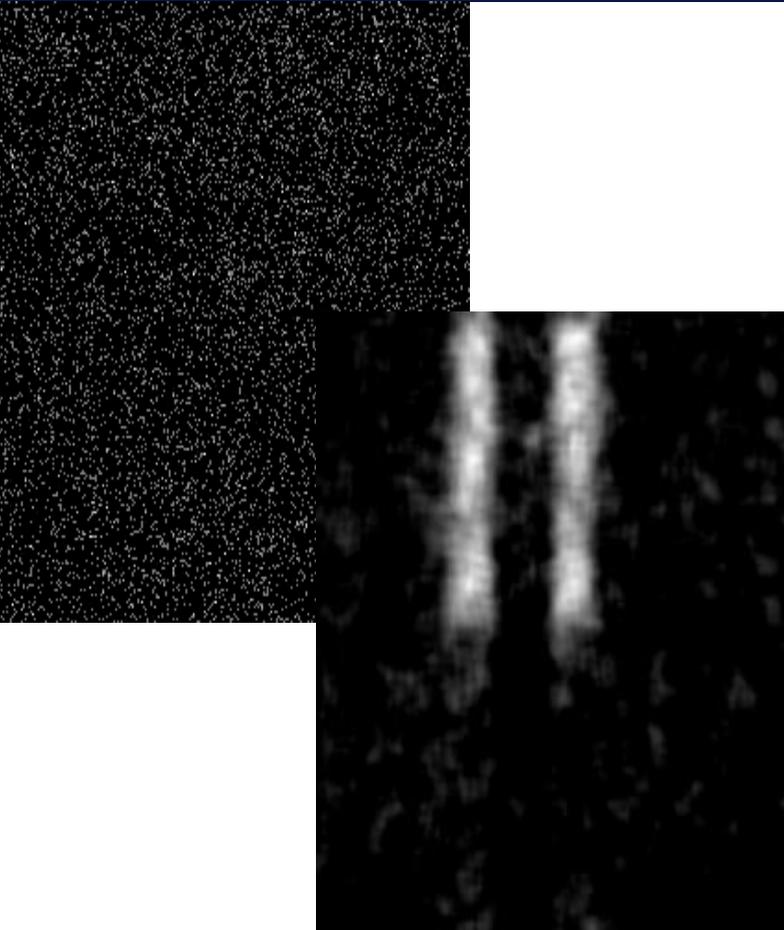
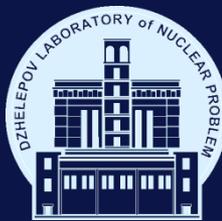


# Pre-processing



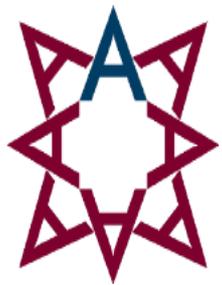
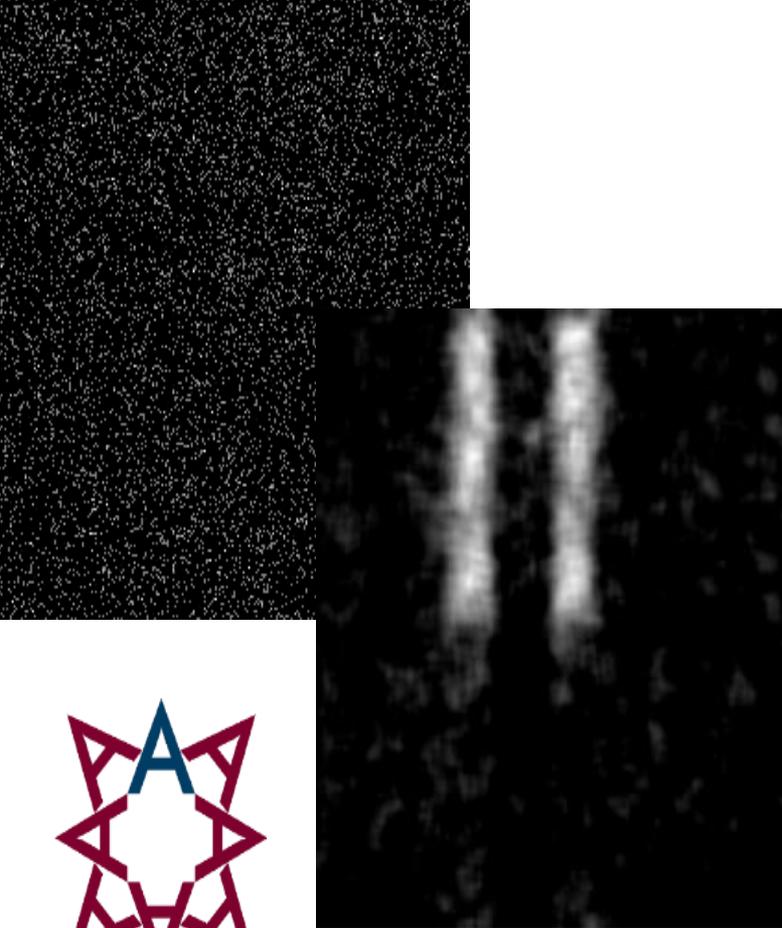


# Pre-processing

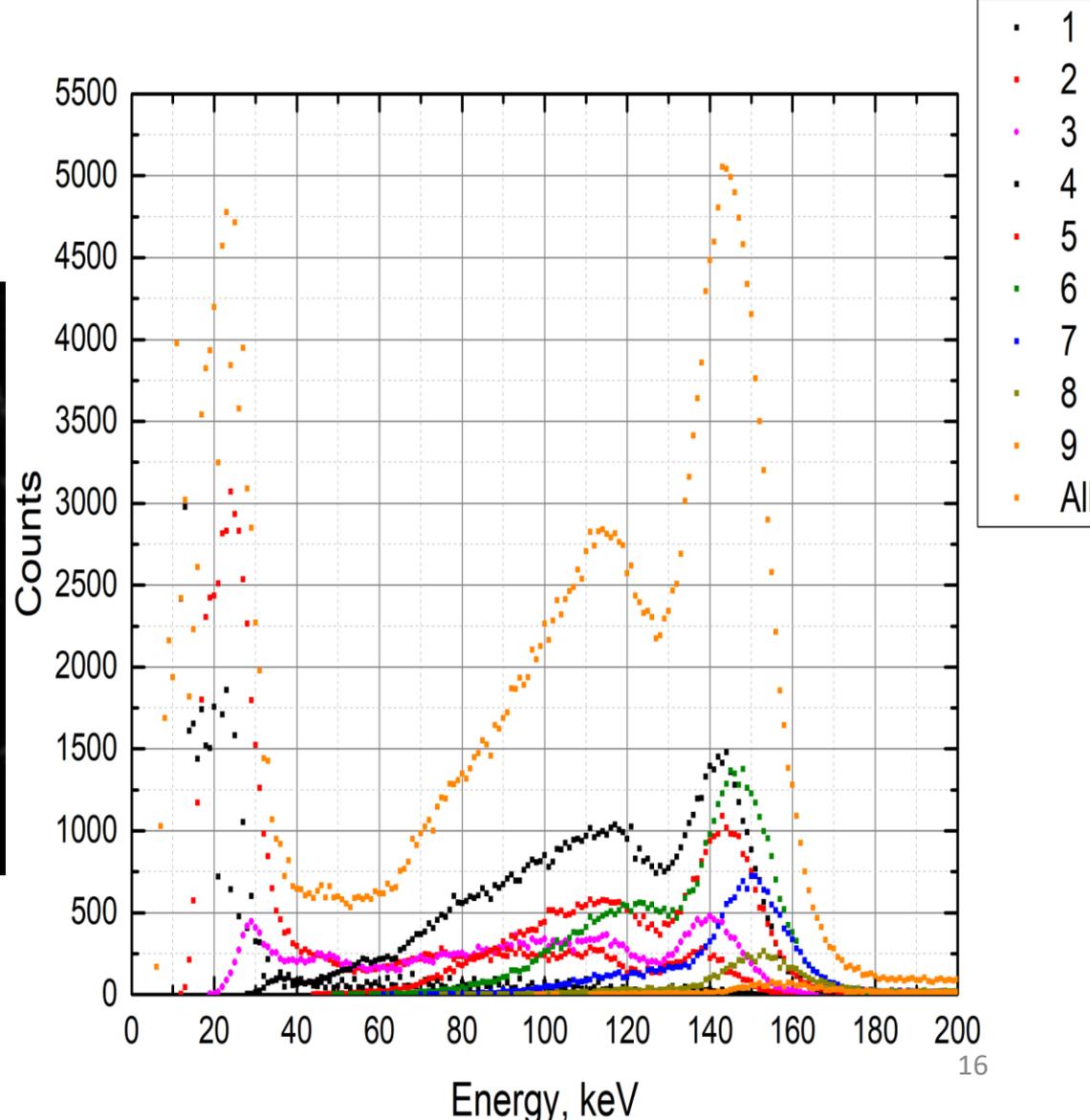




# Pre-processing

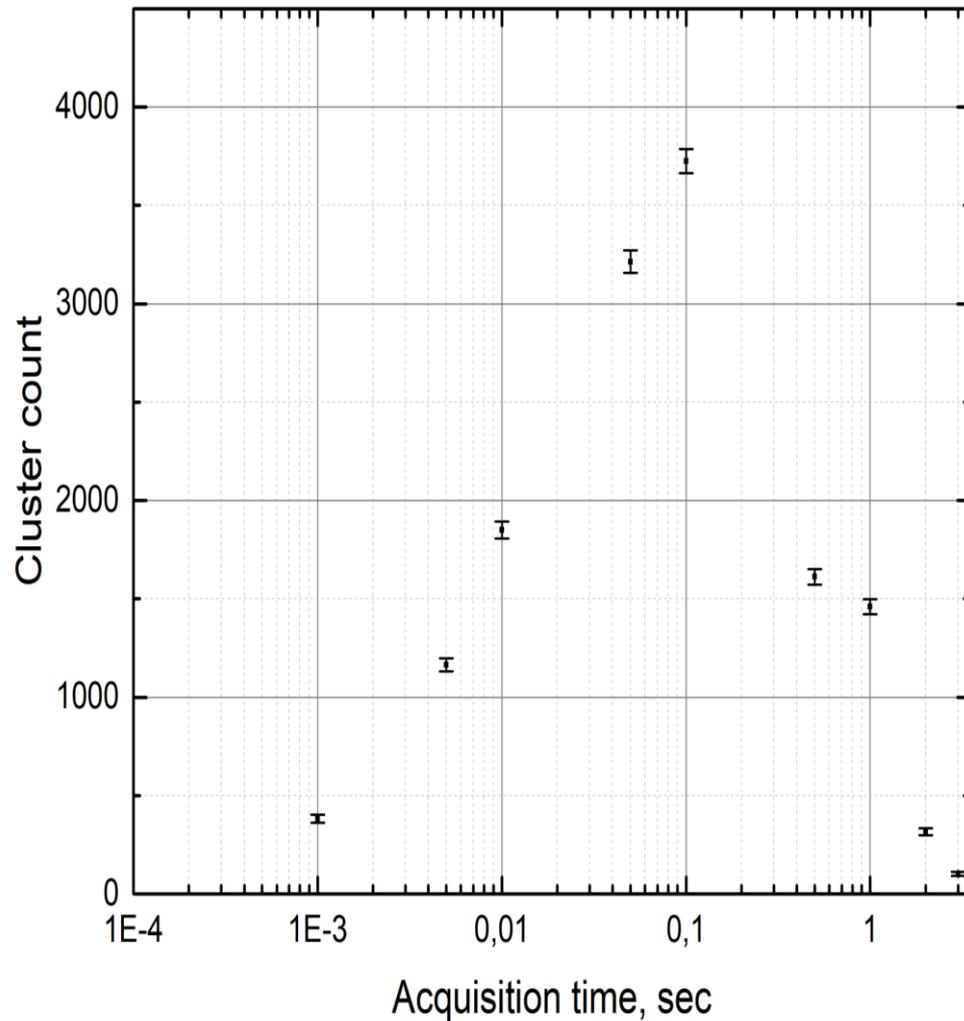


Astra Toolbox



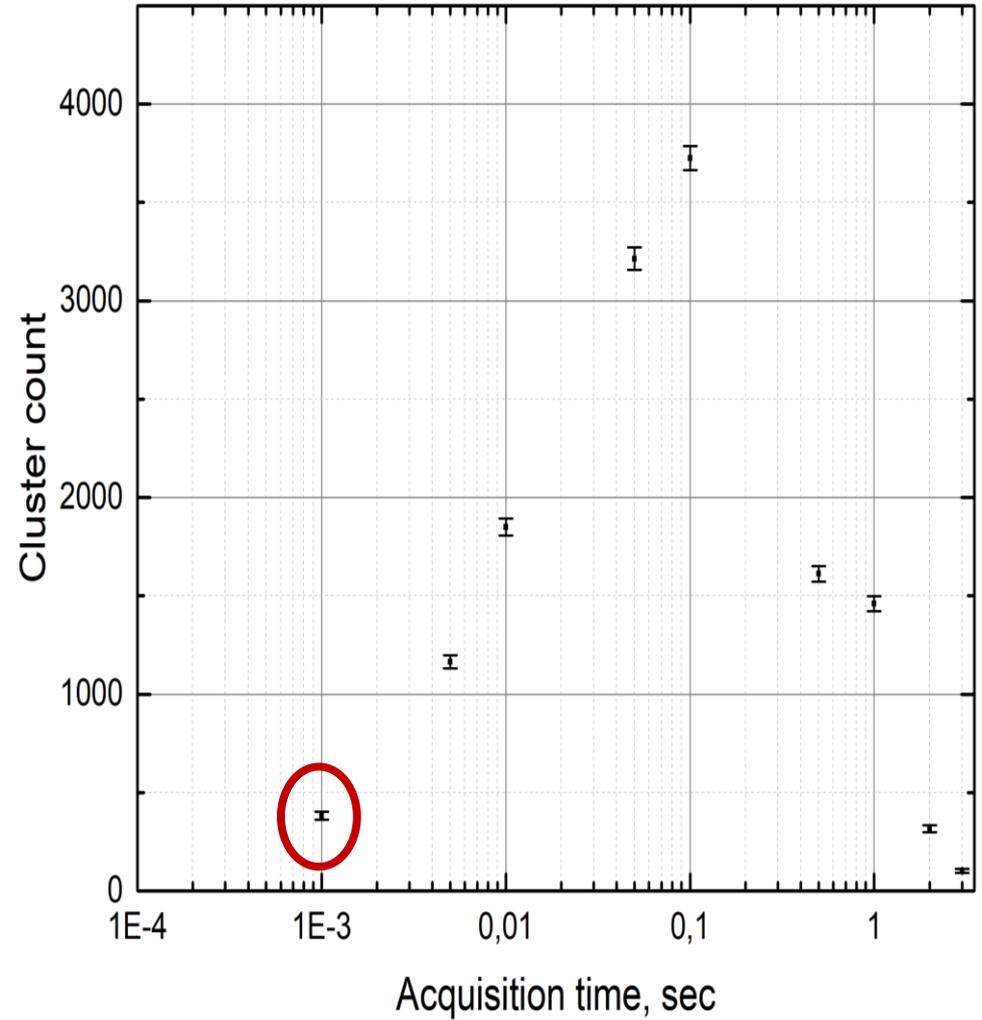
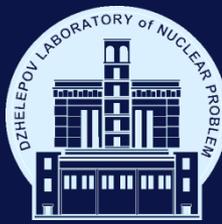


# Pile-up



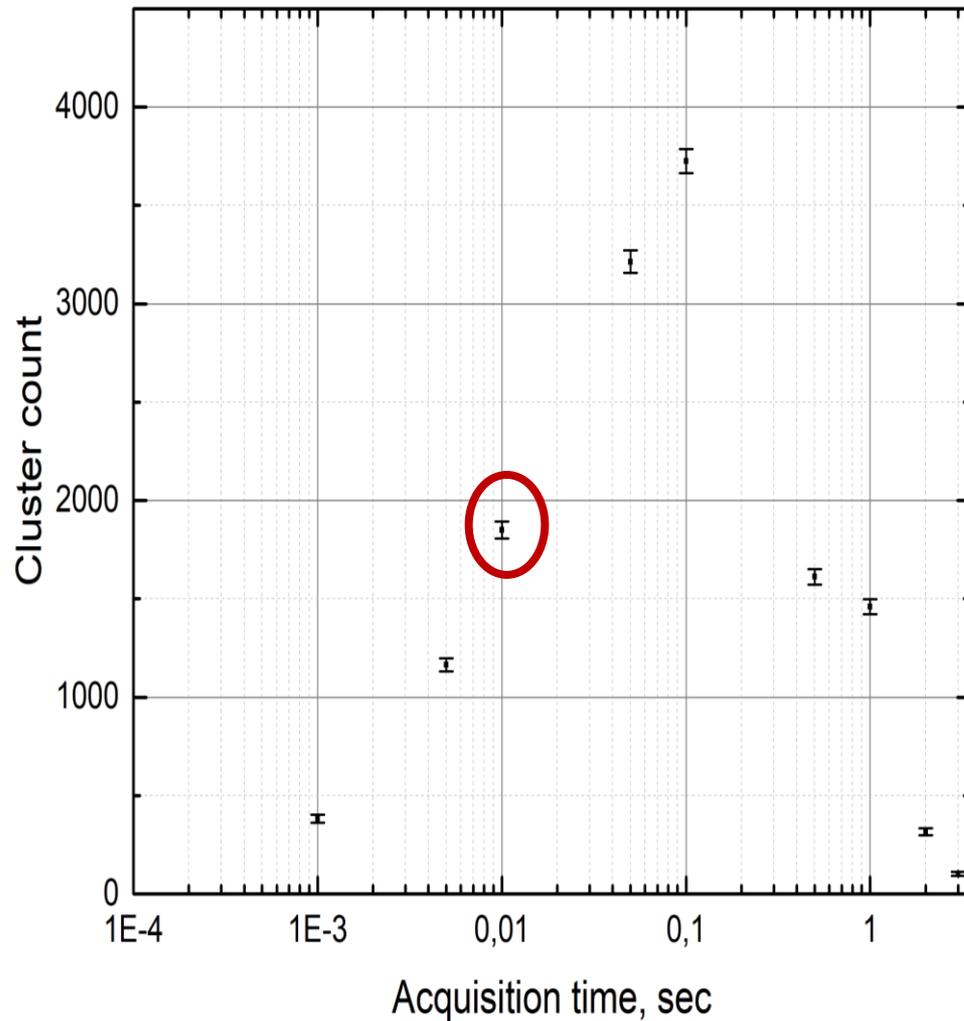


# Pile-up



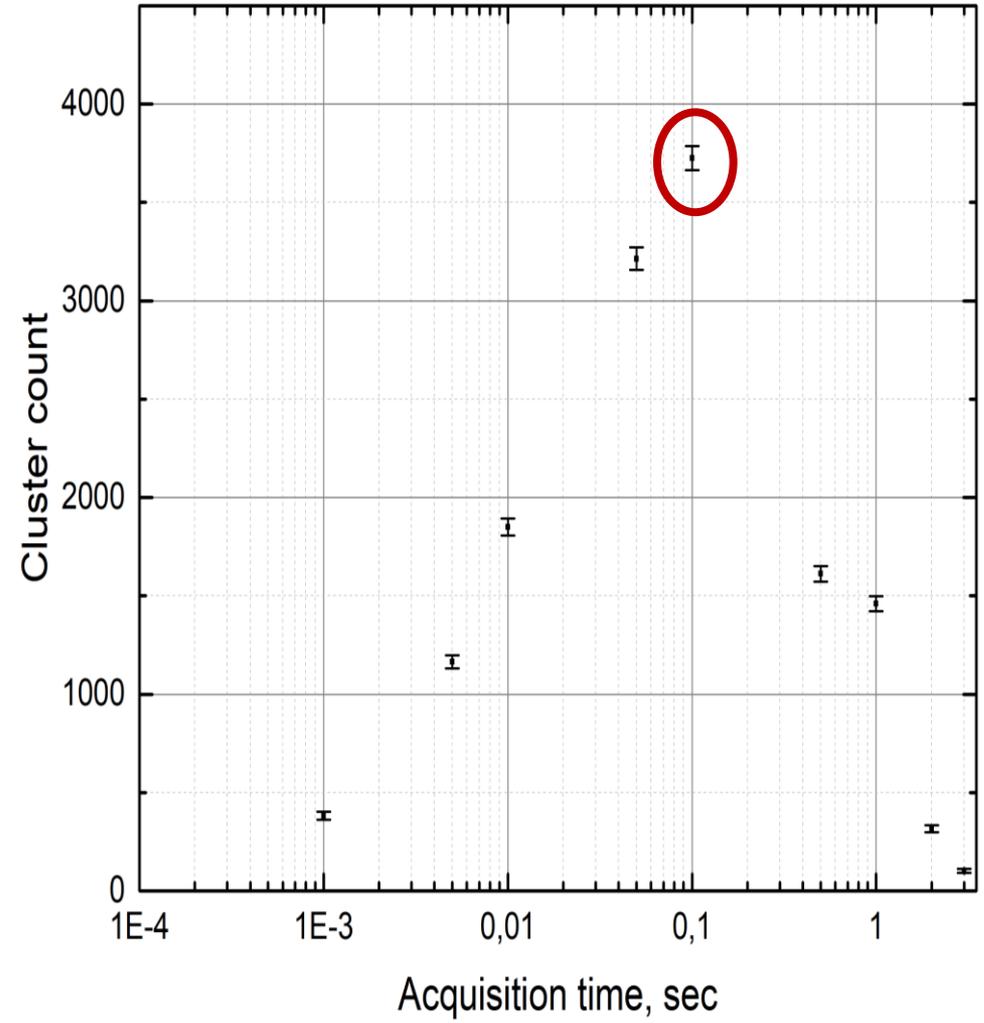
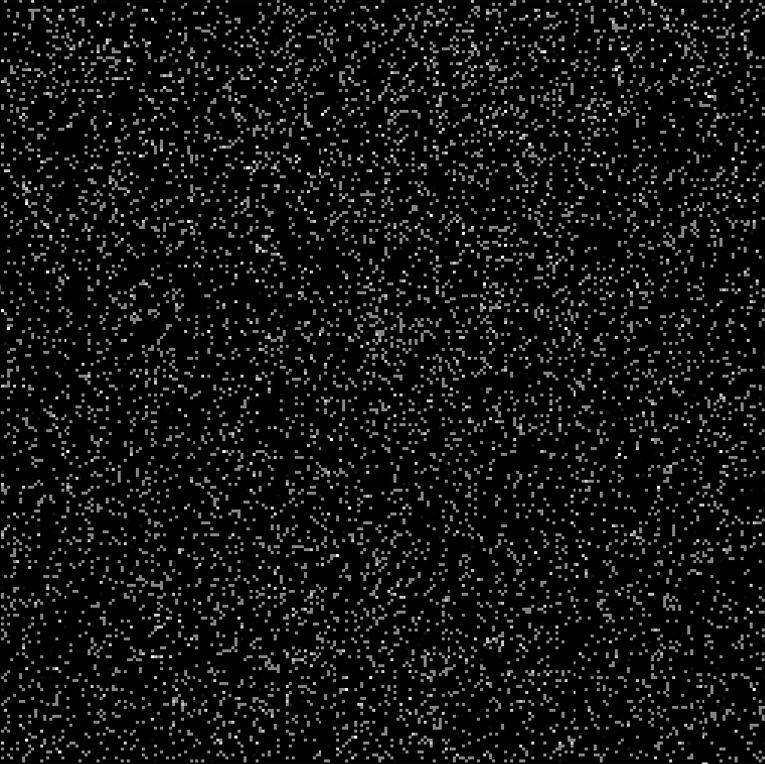
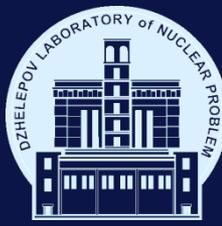


# Pile-up



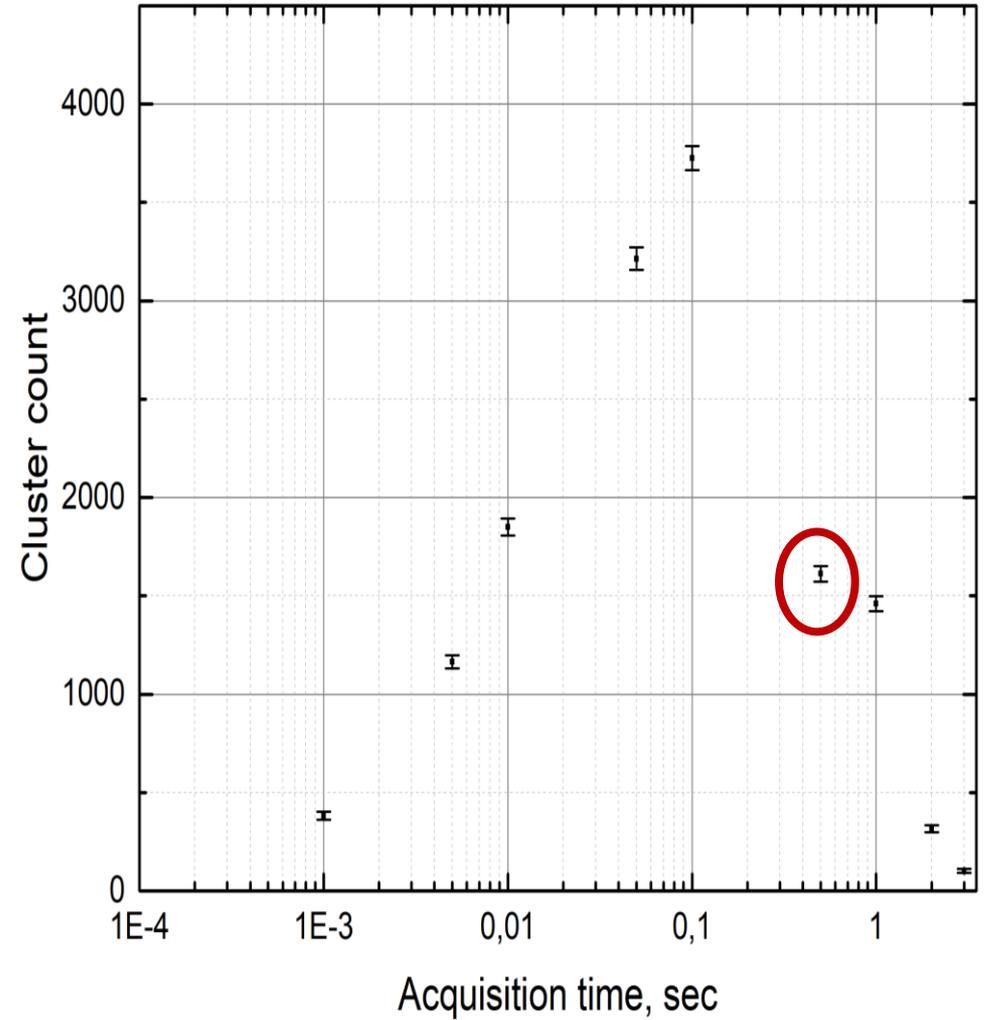
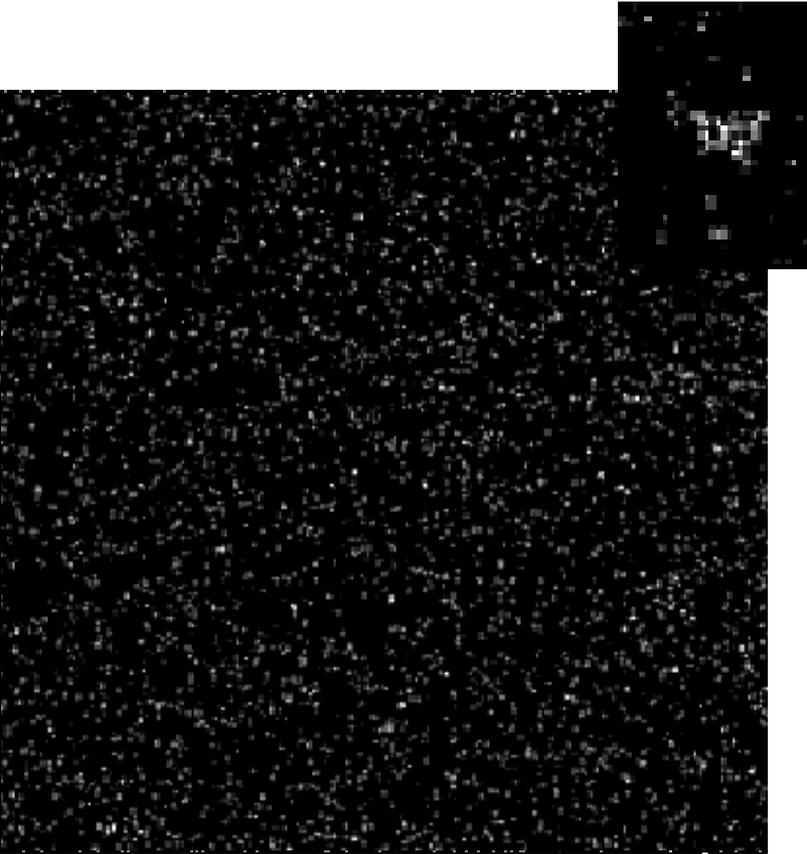
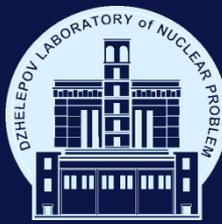


# Pile-up



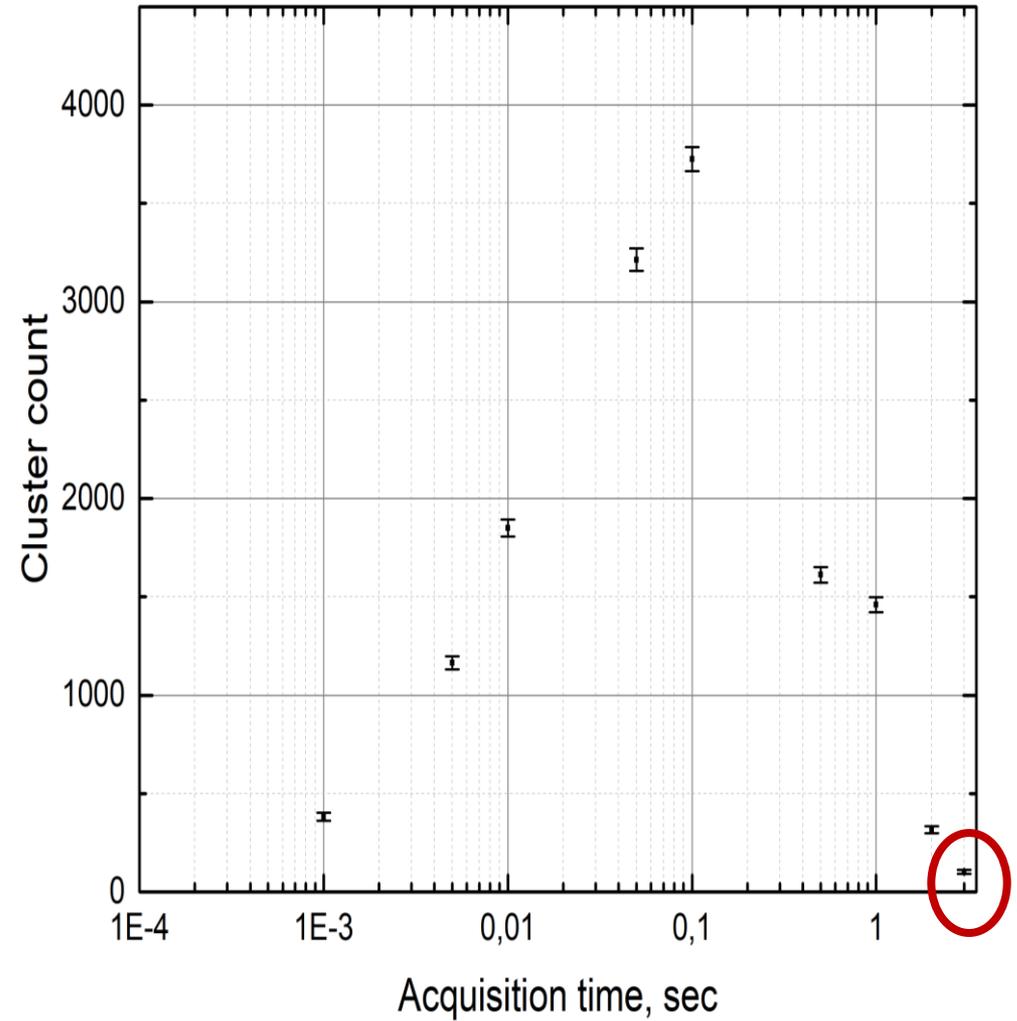
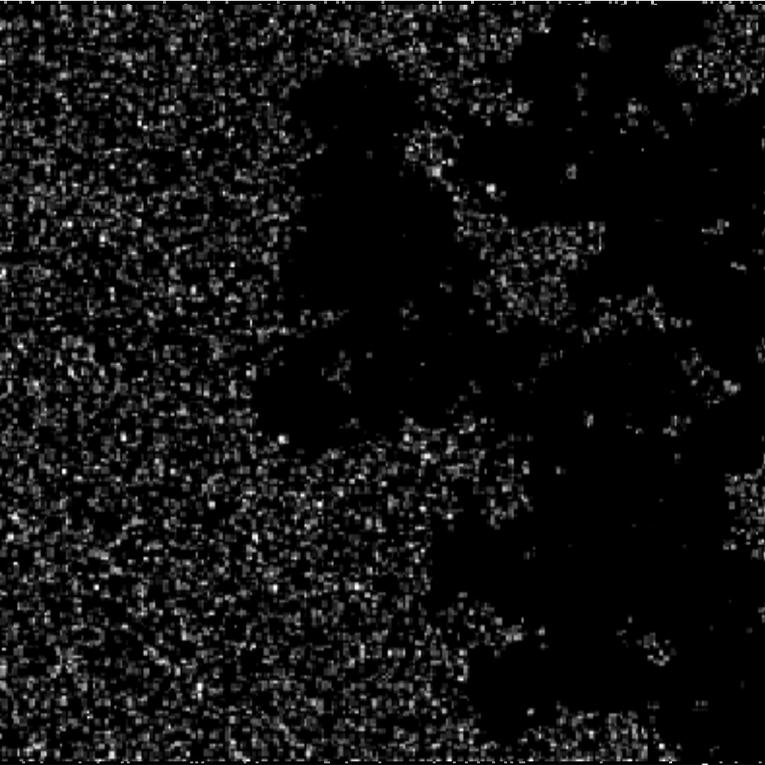
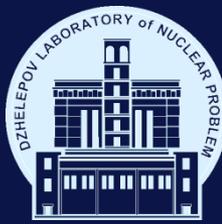


# Pile-up



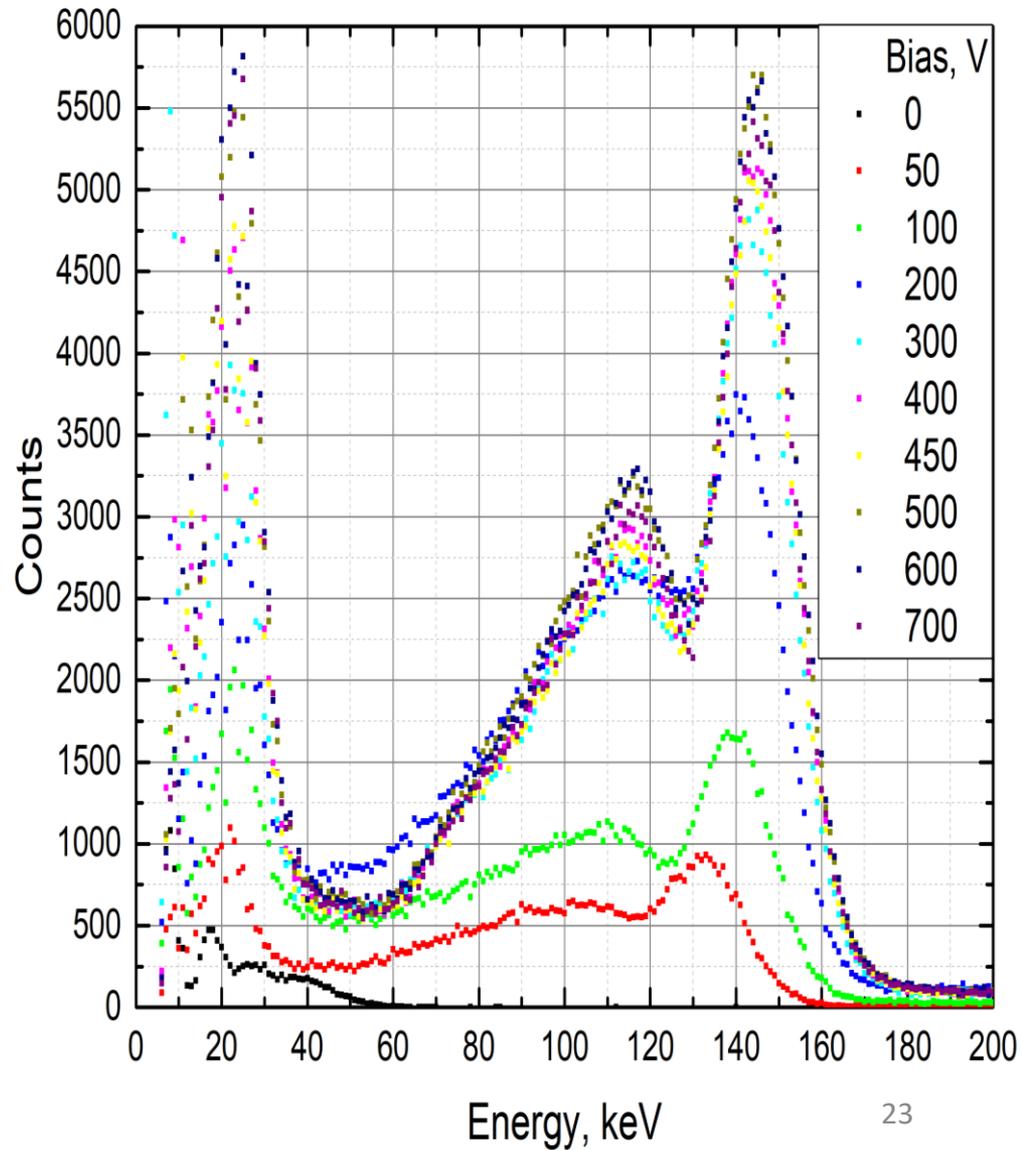
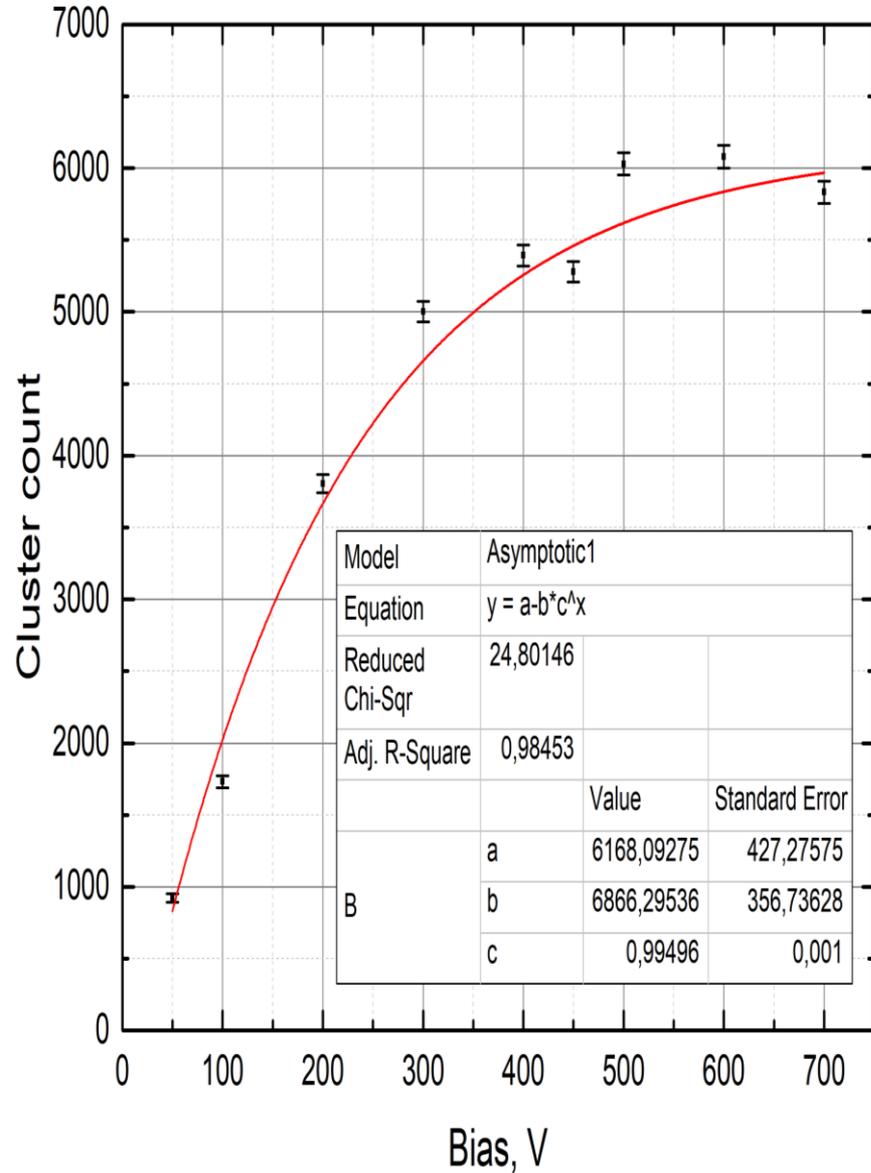
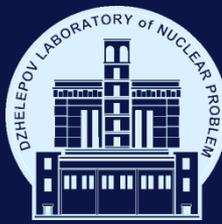


# Pile-up



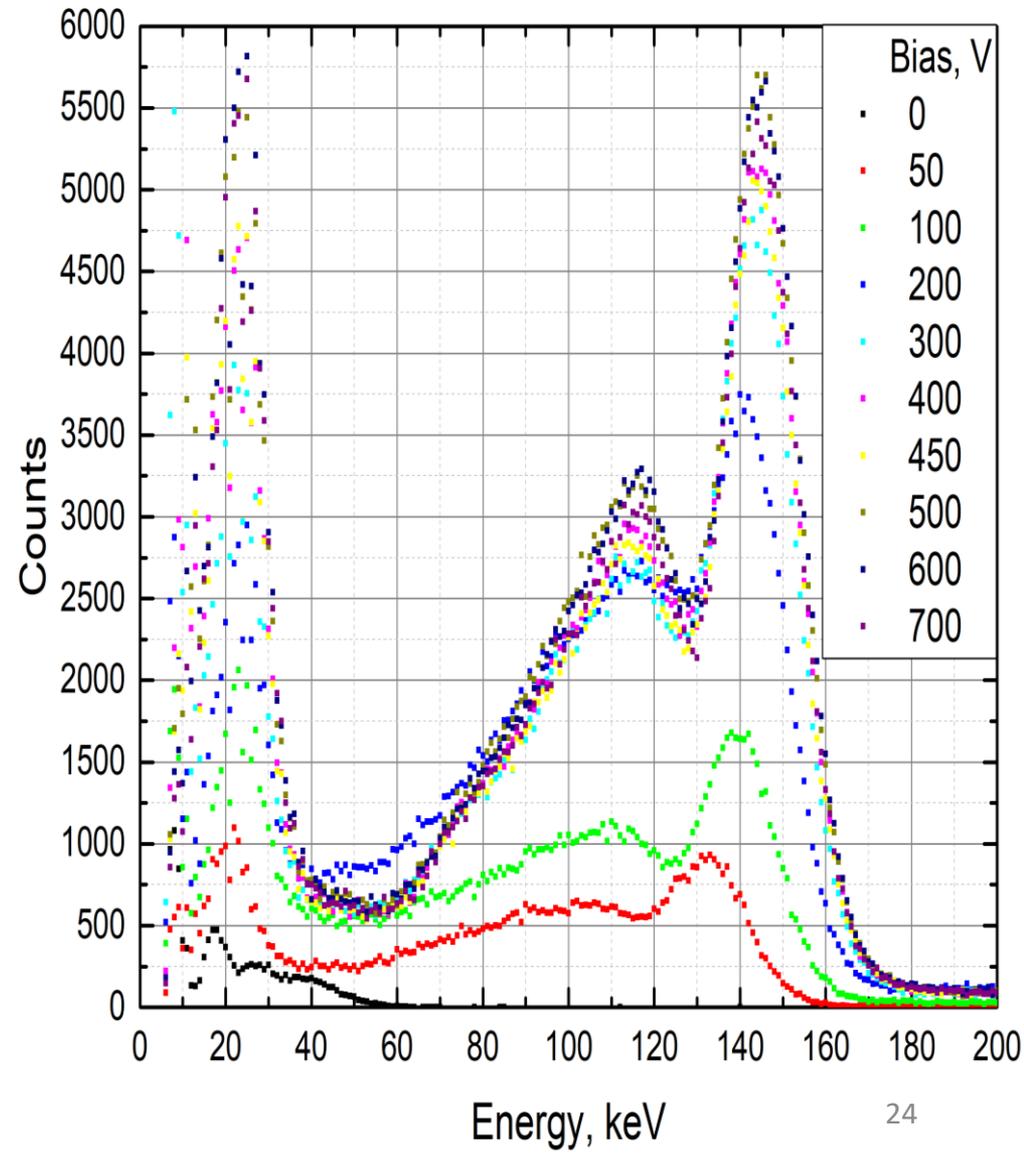
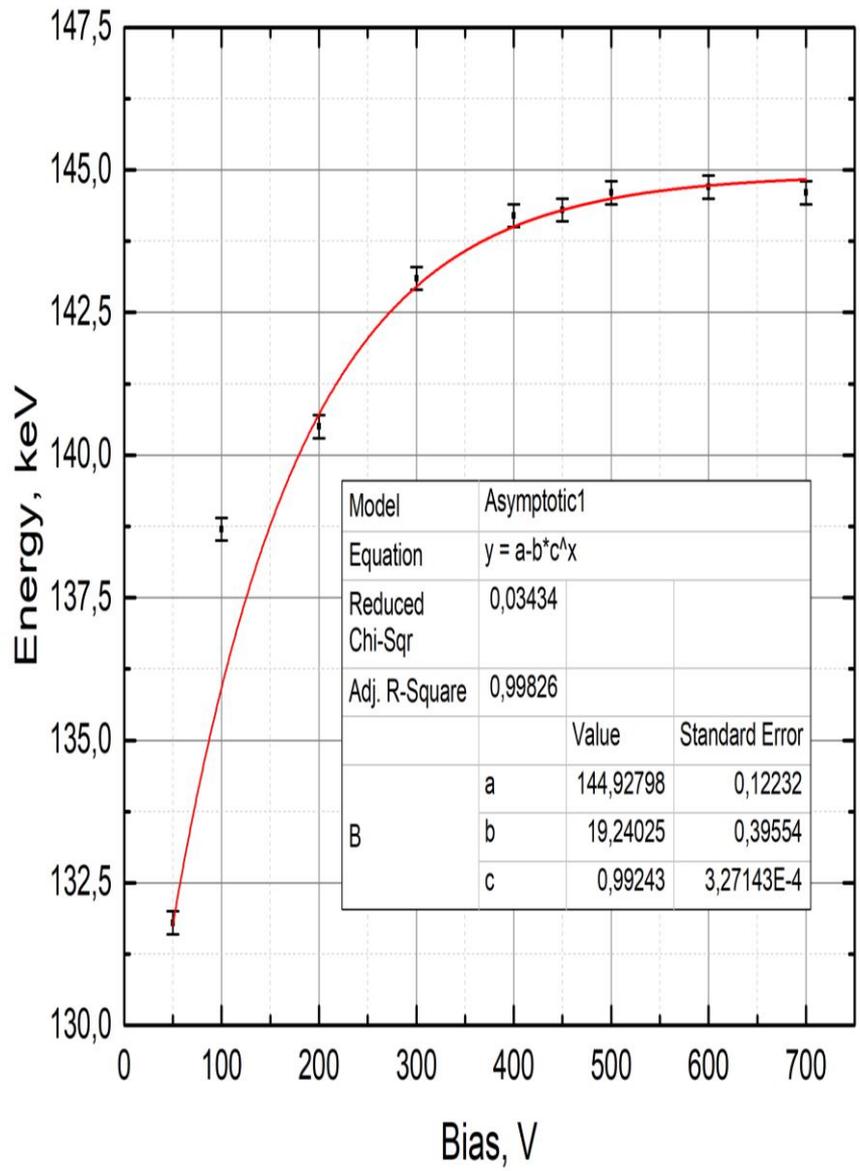


# Bias



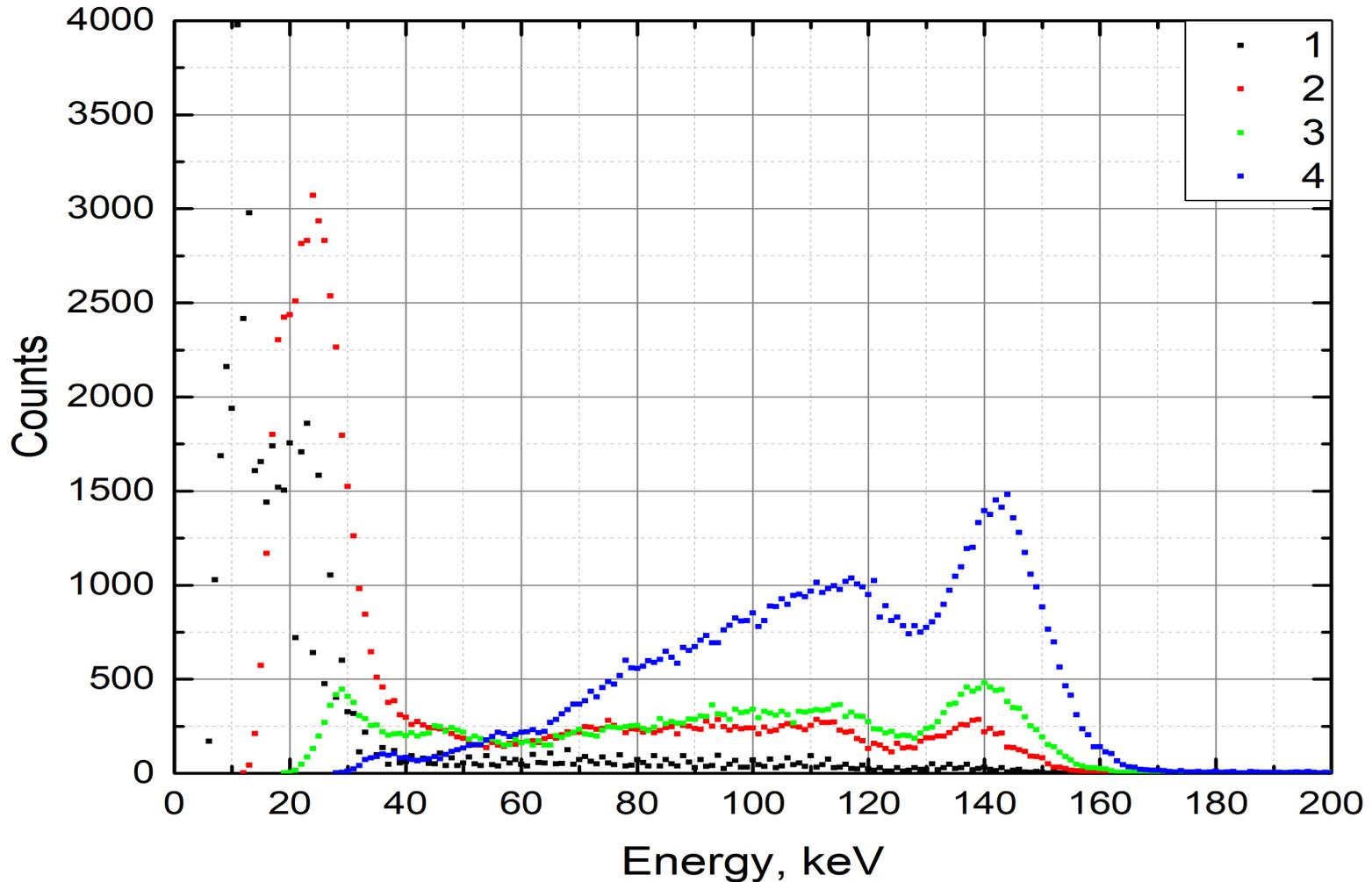
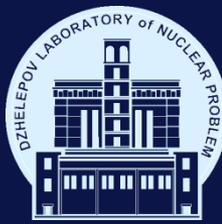


# Bias



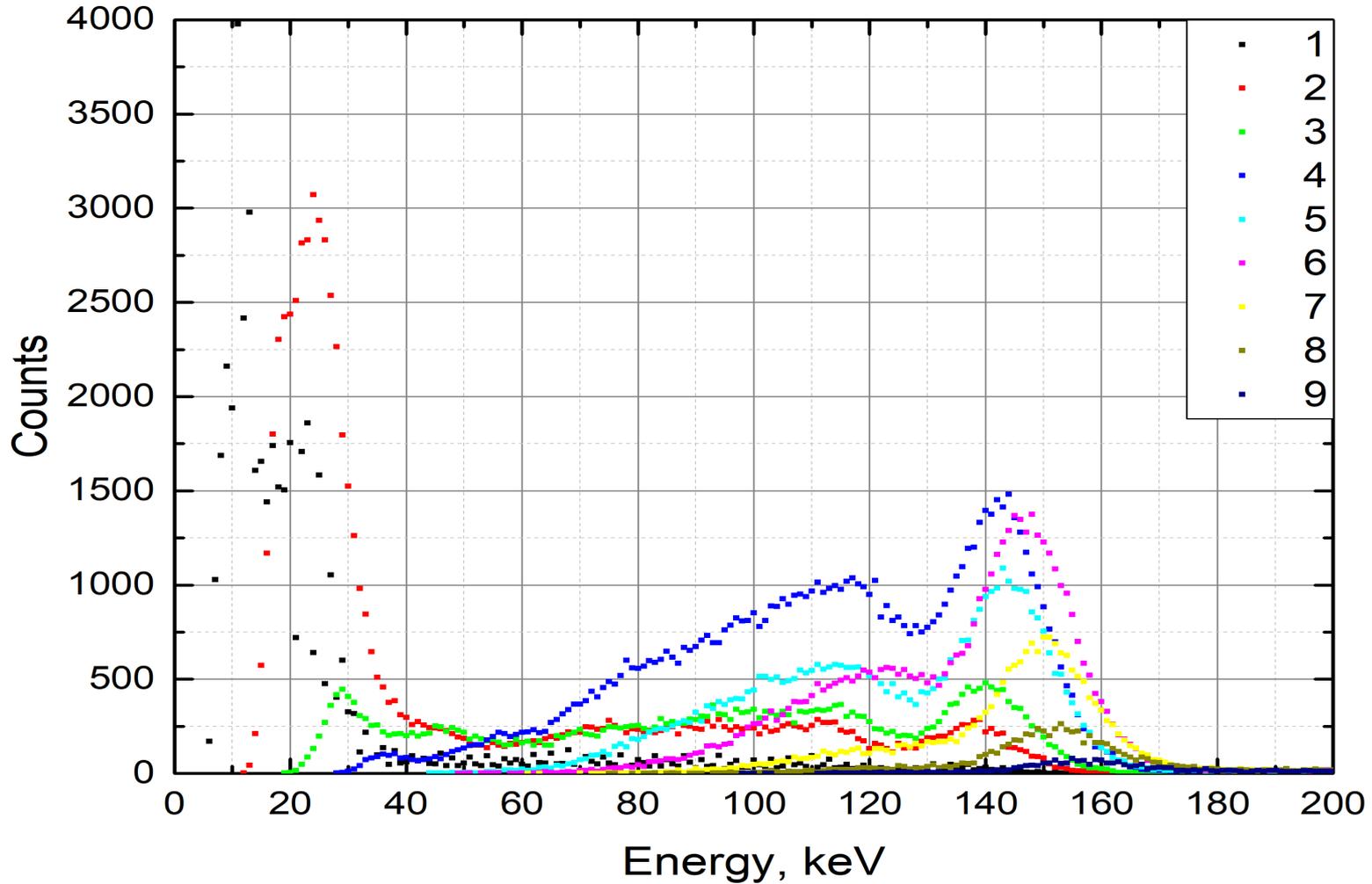
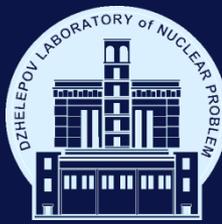


# Pre-processing



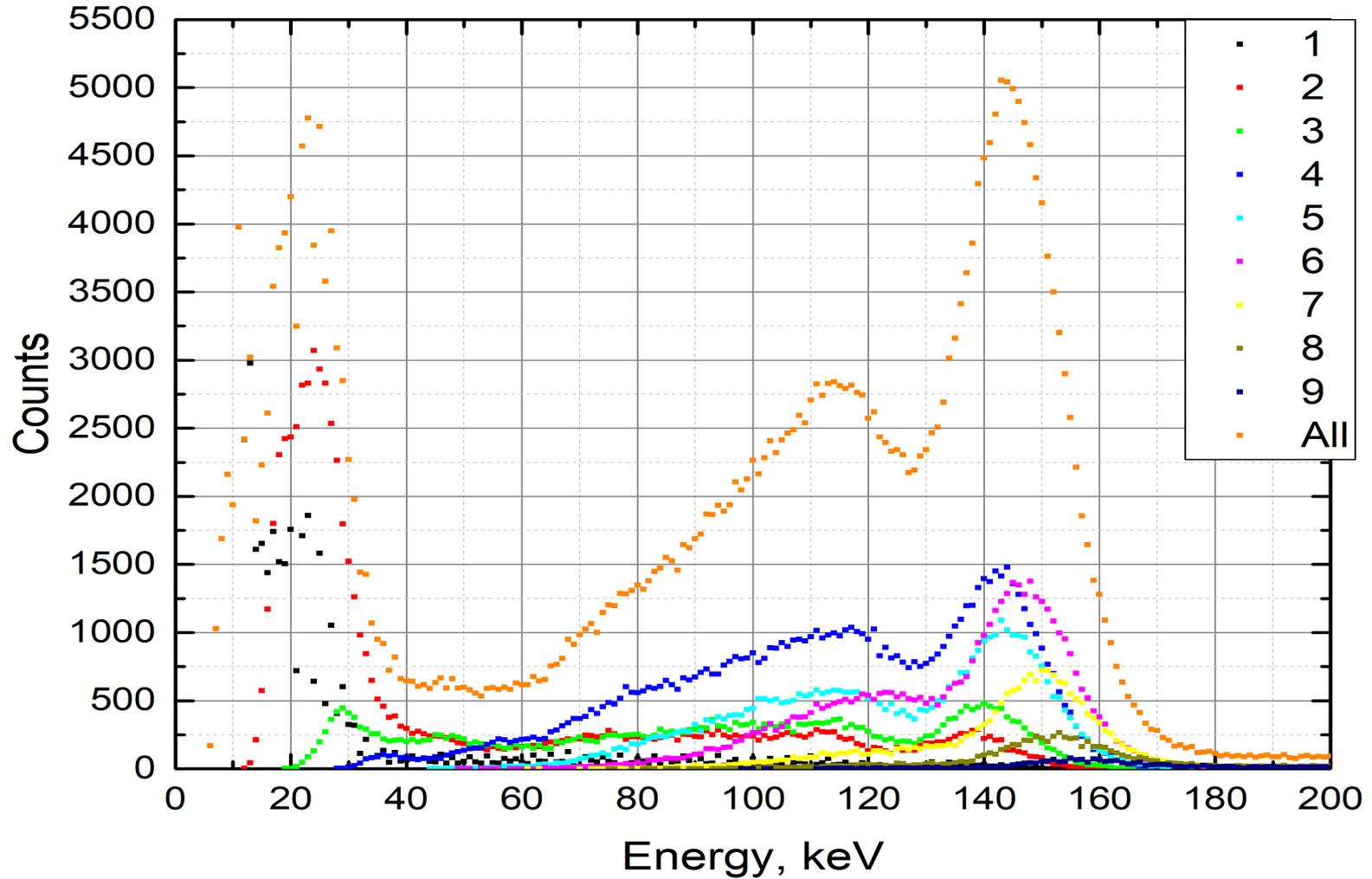
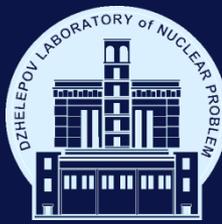


# Pre-processing



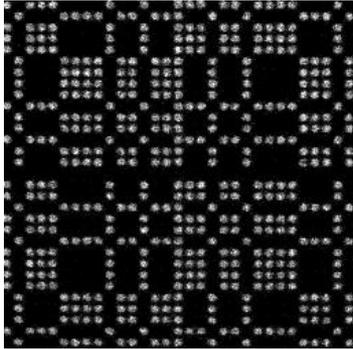
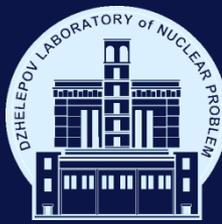


# Pre-processing

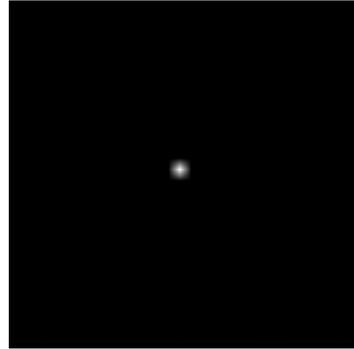




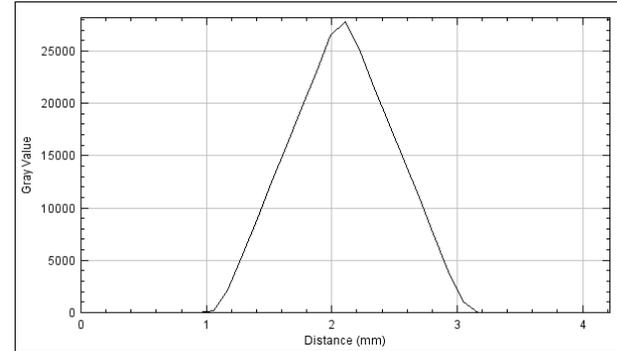
# Визуализация точечного источника



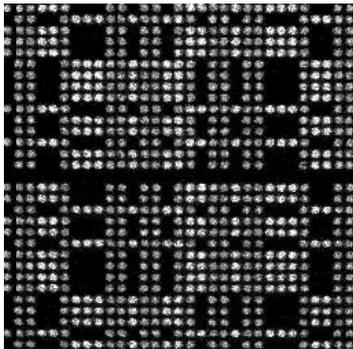
Тенеграмма



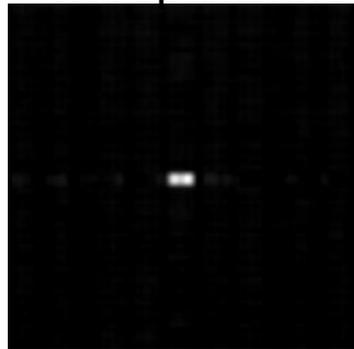
Восстановленное изображение



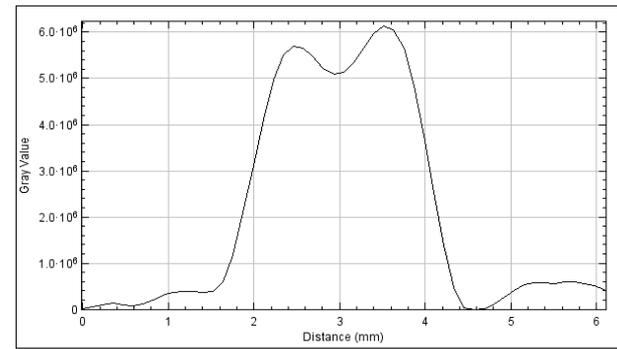
FWHM = 0,95 mm



Поле зрения = 30мм x 30мм



Пространственное разрешение ~ 0,95 mm

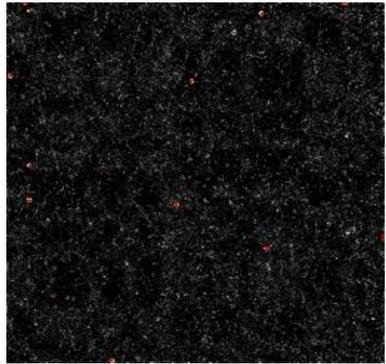




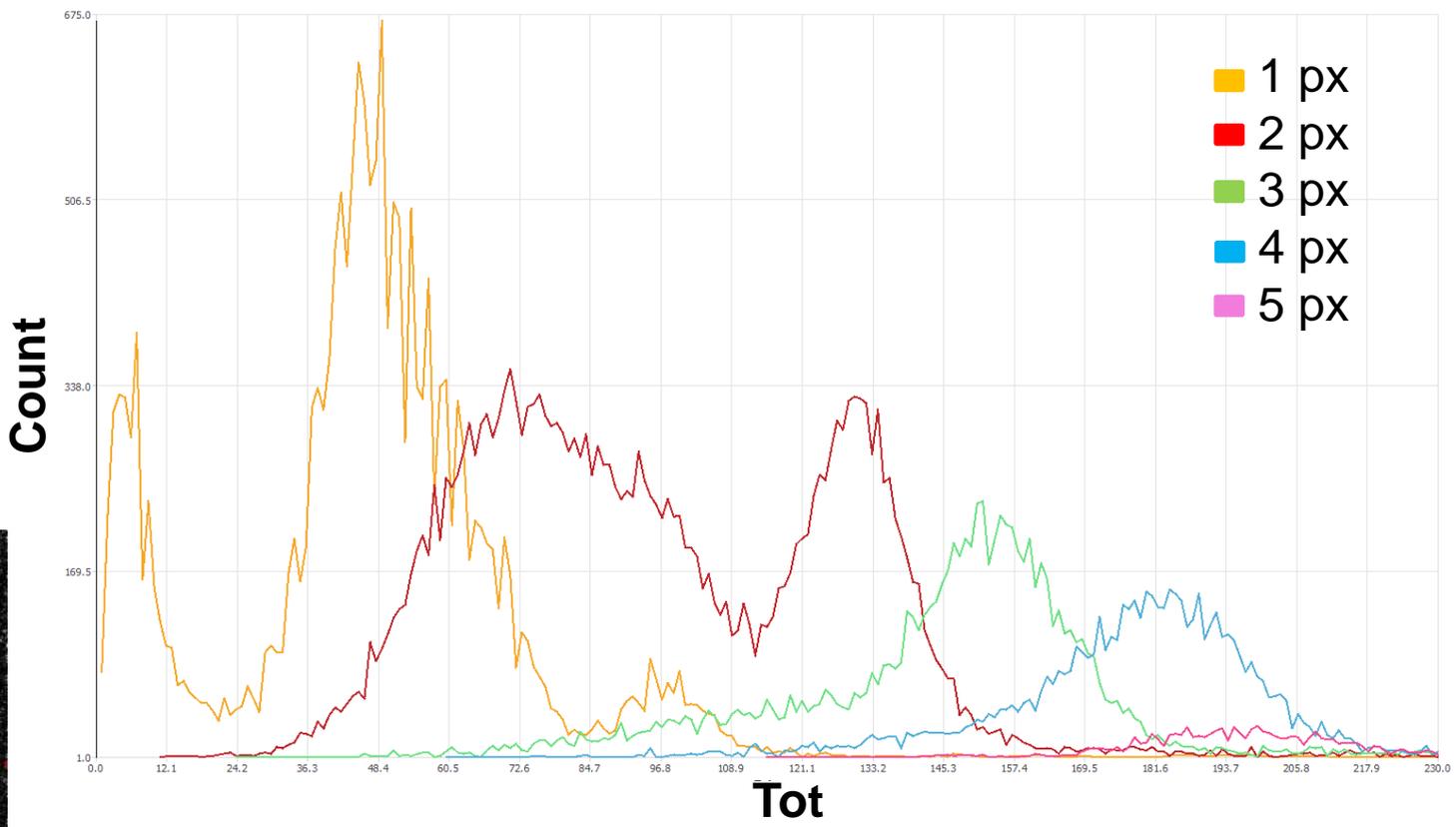
# $^{241}\text{Am}$



Диаметр ~ 2 мм



## $^{241}\text{Am}$ spectrum

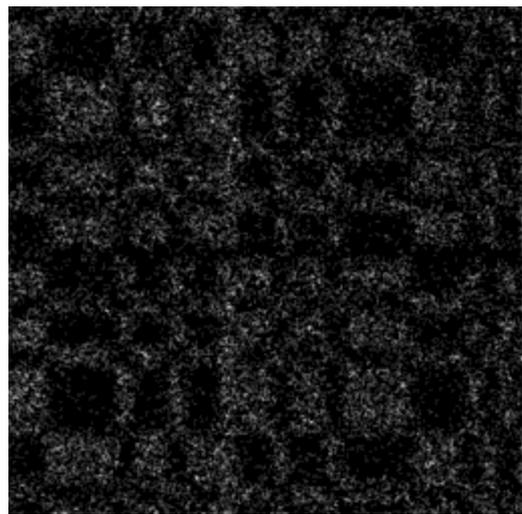




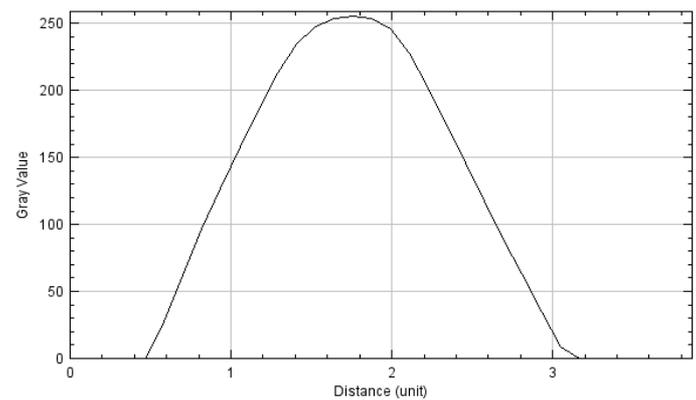
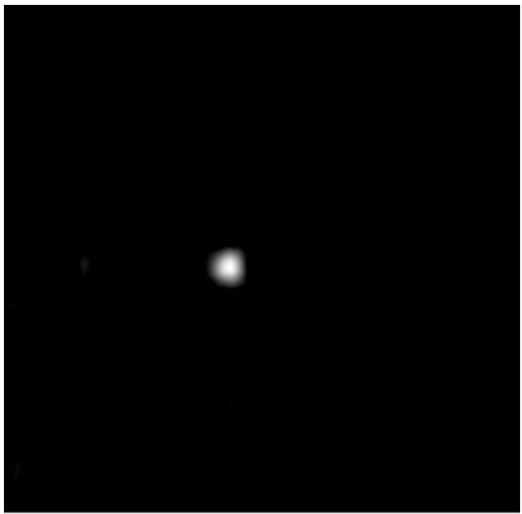
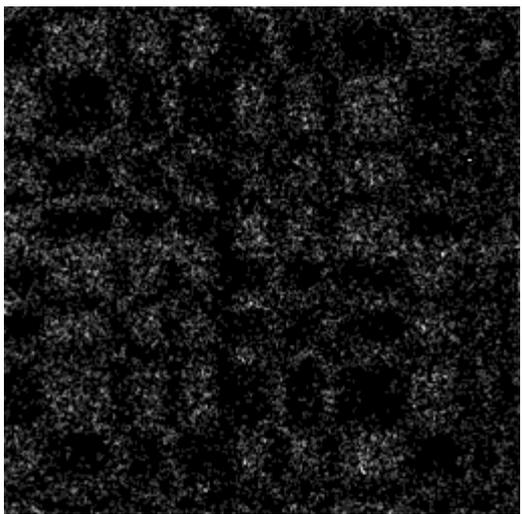
# $^{241}\text{Am}$



0°



90°

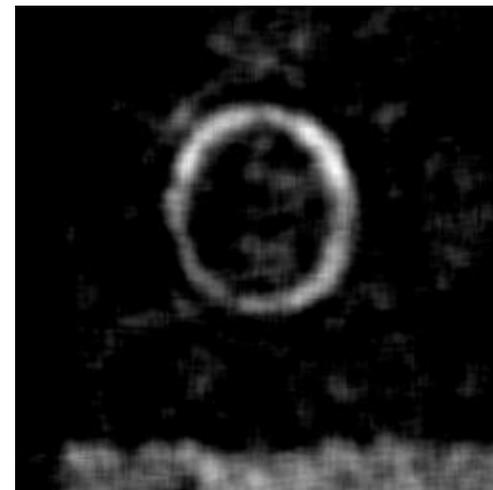
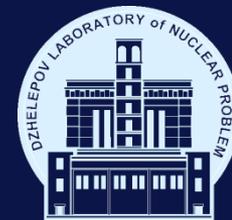


Диаметр источника ~ 2 mm

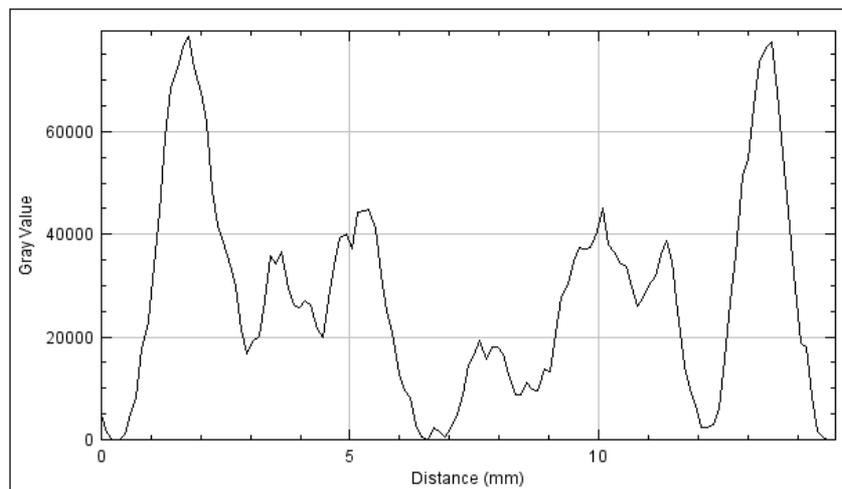
FWHM = 1,6 mm  
FoV = 30mm x 30mm



# Медное кольцо



Внешний диаметр = 11,9 мм  
внутренний диаметр = 10,2 мм

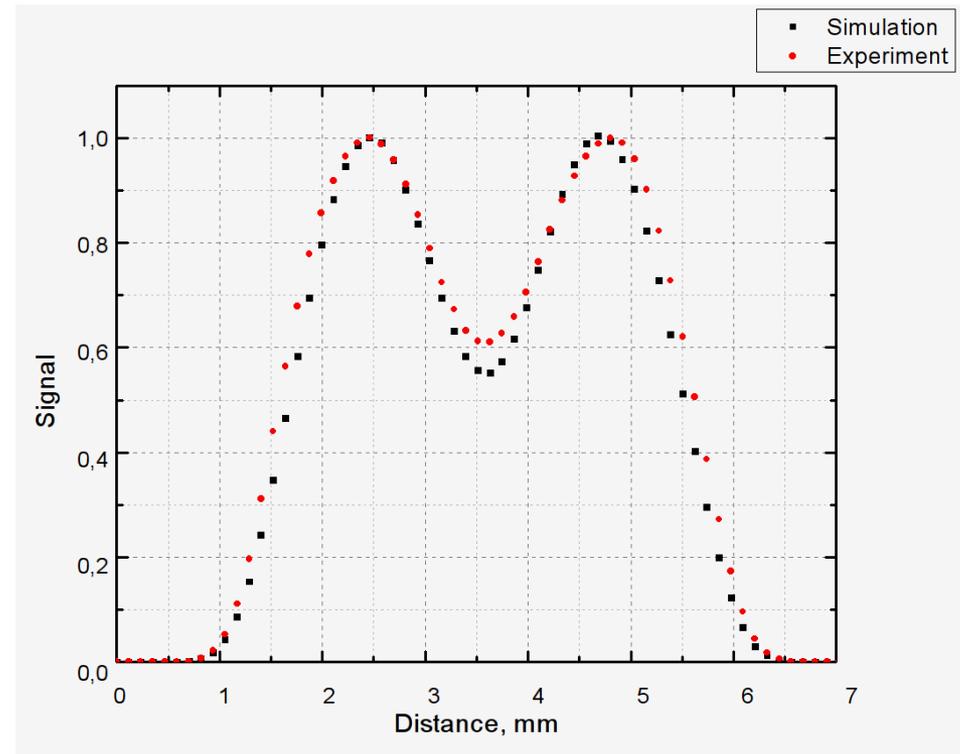
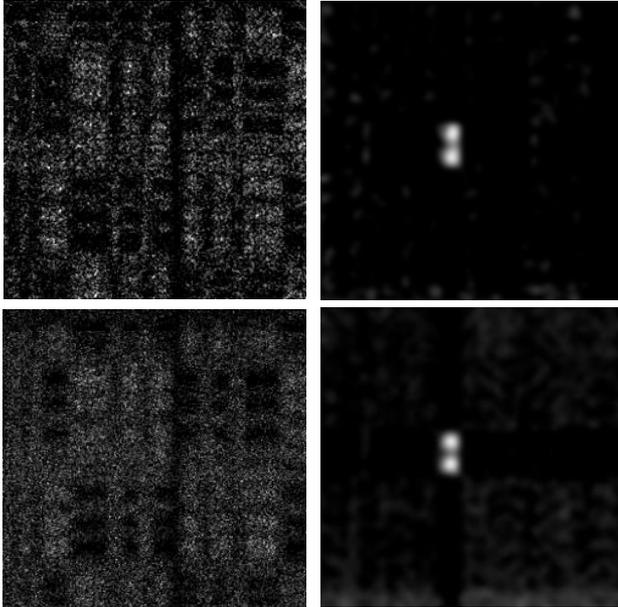
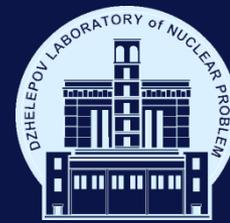


Размер кольца = 11,6 мм



$^{241}\text{Am}$

# Эксперимент / моделирование

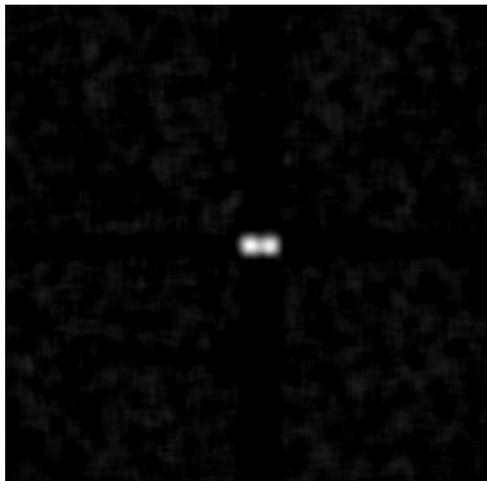
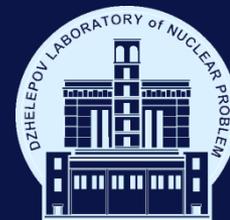


Расстояние между источниками = 2.5 мм  
(диаметр источника)

Моделирование хорошо воспроизводит экспериментальные данные, поэтому далее, для оценки характеристик ОФЭКТ-системы с другими изотопами, мы используем моделирование.



# Моделирование



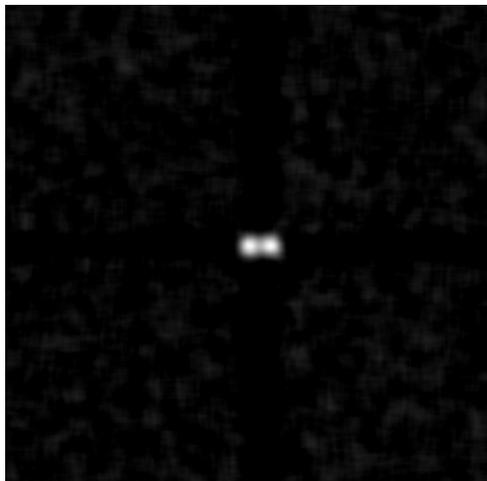
$^{125}\text{I}$  (30 кэВ)

Расстояние между источниками = 1.1 мм  
(Диаметр источника = 1 мм)

Эффективность регистрации (1 мм CdTe) = 40%

Эффективность регистрации (2 мм CdTe) = 40%

Активность ~ 20 МБк



$^{99\text{m}}\text{Tc}$  (140.5 кэВ)

Расстояние между источниками = 1.1 мм  
(Диаметр источника = 1 мм)

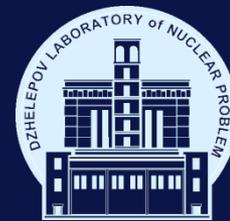
Эффективность регистрации (1 мм CdTe) = 15%

Эффективность регистрации (2 мм CdTe) = 23%

Активность ~ 20 МБк



# Изотопы используемые в ОФЭКТ моделирование



Isotope	Energy [keV]	Spatial resolution [mm]	Registration efficiency, % (with the collimator)		SNR
			CdTe 1 mm	CdTe 2 mm	
$^{125}I$	30	0.88	40	40	96
$^{67}Ga$	93.3	0.89	28	36	90
$^{177}Lu$	113	0.89	23	31	88
$^{201}Tl$	135	0.89	16	27	87
$^{99m}Tc$	140.5	0.89	15	23	87
$^{117m}Sn$	158.6	0.90	11	20	86
$^{123}I$	159	0.90	11	20	85
$^{201}Tl$	167	0.90	10	18	85
$^{111}In$	171.3	0.90	10	17	84
$^{67}Ga$	184.6	0.91	8	16	83
$^{177}Lu$	210	0.91	7	12	81
$^{111}In$	245.4	0.91	5	10	78
$^{67}Ga$	300	0.92	4	7	74
$^{133}Xe$	350	0.92	3	6	69

$^{125}I$  (30 кэВ)

Расстояние между источниками = 1.1 мм  
(Диаметр источника = 1 мм)

Эффективность регистрации (1 мм CdTe) = 40%

Эффективность регистрации (2 мм CdTe) = 40%

Активность ~ 20 МБк

$^{99m}Tc$  (140.5 кэВ)

Расстояние между источниками = 1.1 мм  
(Диаметр источника = 1 мм)

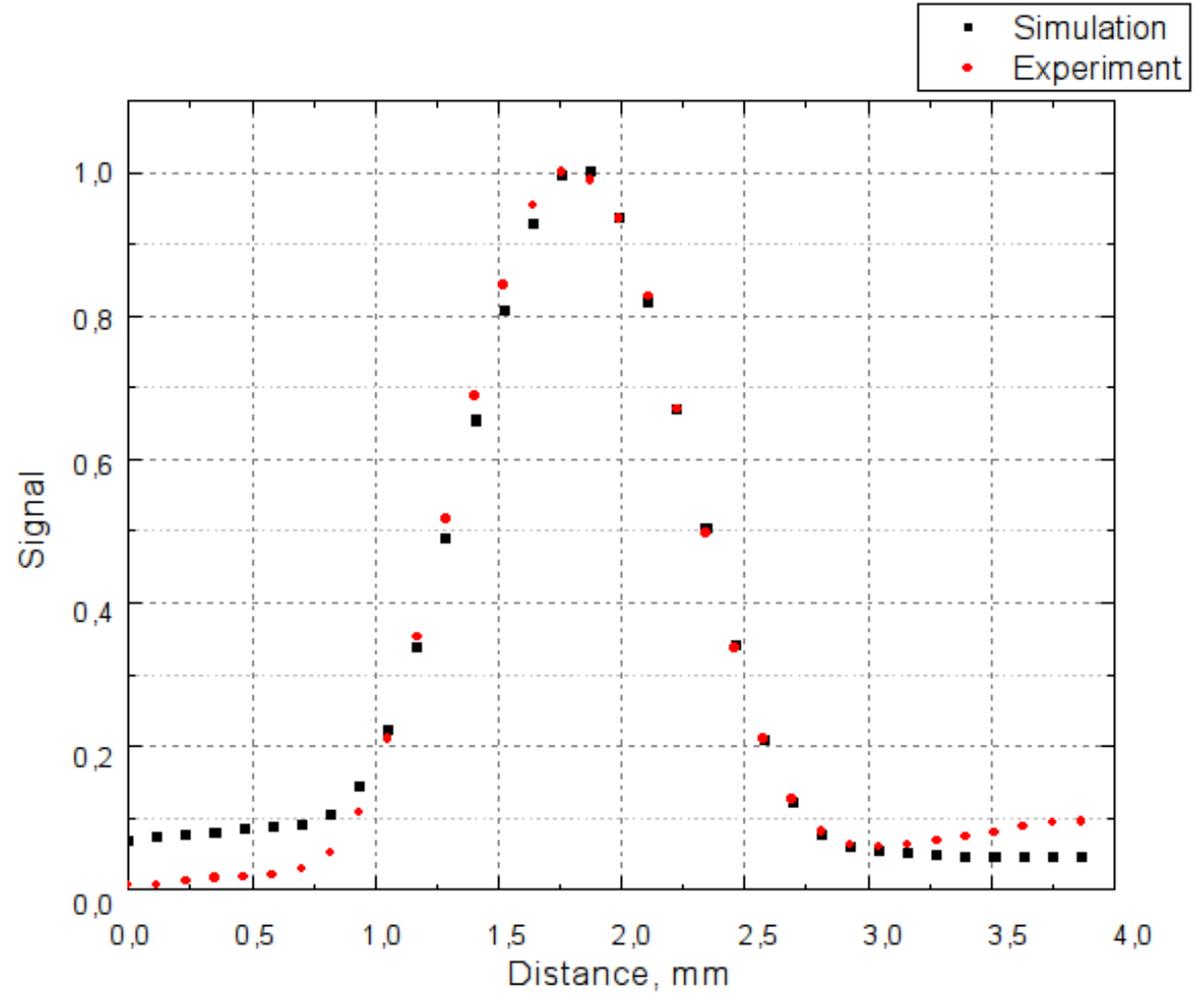
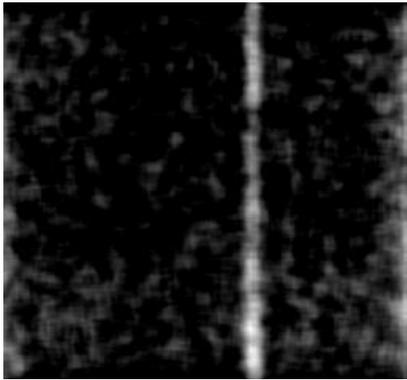
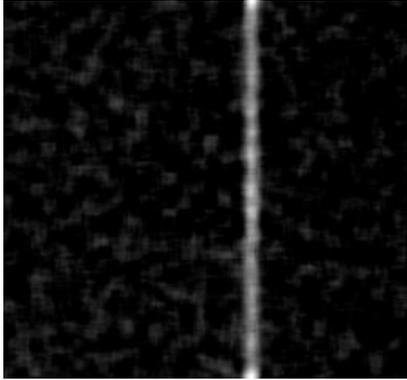
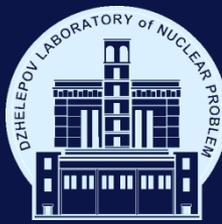
Эффективность регистрации (1 мм CdTe) = 15%

Эффективность регистрации (2 мм CdTe) = 23%

Активность ~ 20 МБк



# $^{99m}\text{Tc}$

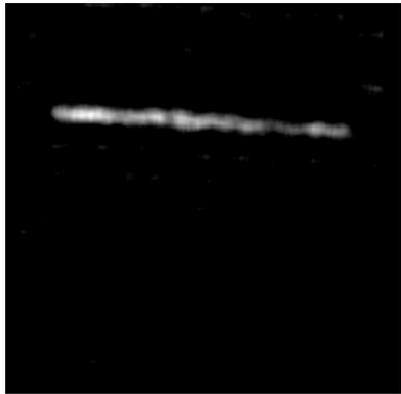
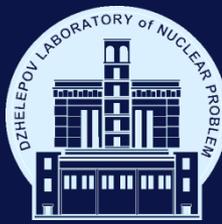


FWHM (exp) = 0,98 mm  
FWHM (sim) = 0,97 mm

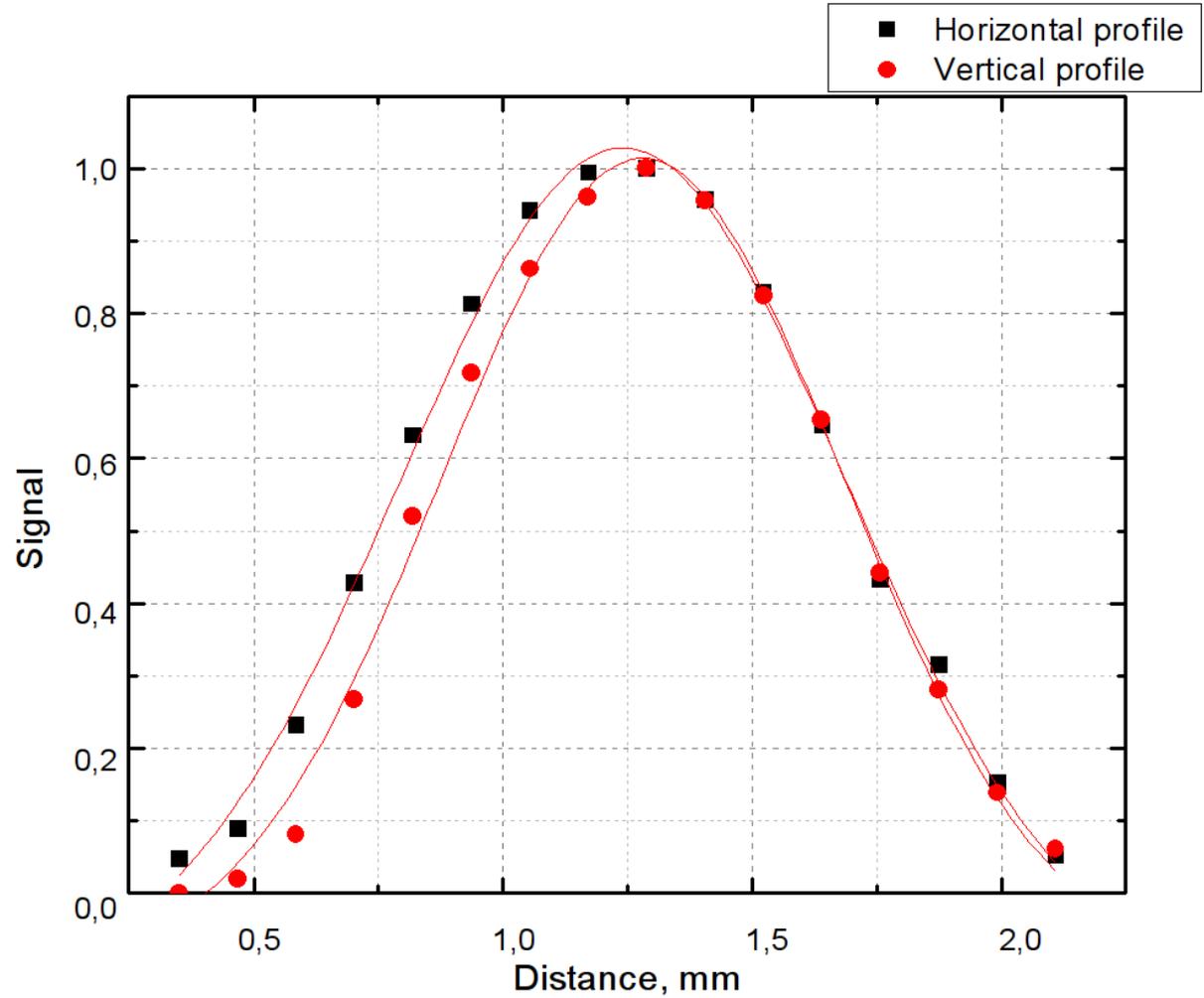
Activity — 156 MBq  
Time — 2 min



125I



Activity — 100,7 MBq  
Time — 5 min

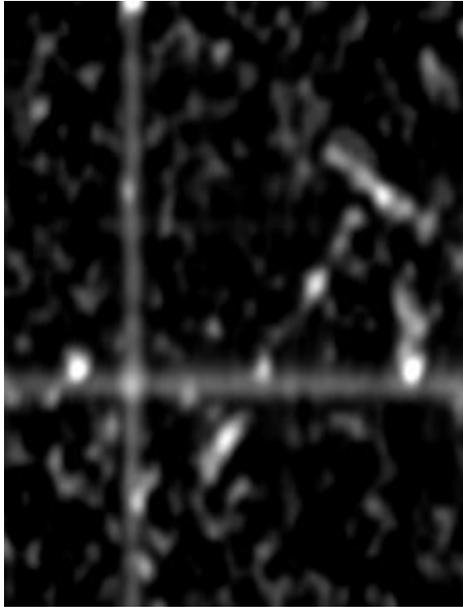


FWHM (horizontal) = 1 mm

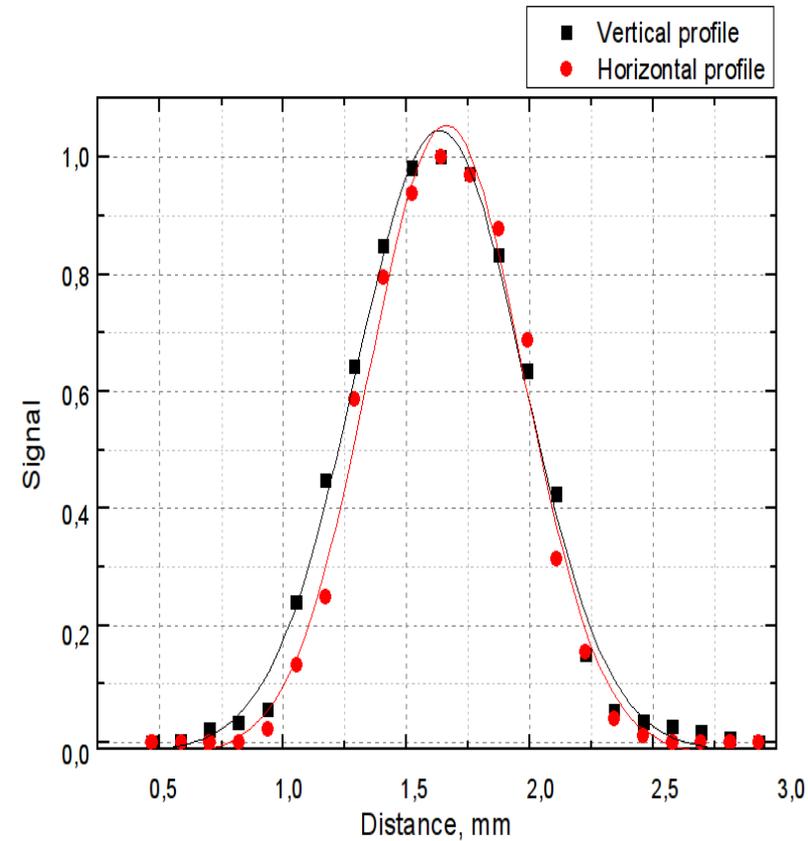
FWHM (vertical) = 0,95 mm



# Пространственное разрешение



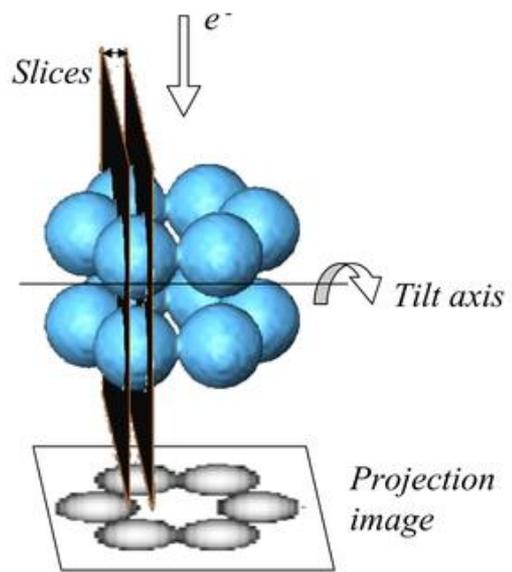
Толщина нити — 150 мкм  
Активность — 30 МБк  
Время — 3 мин



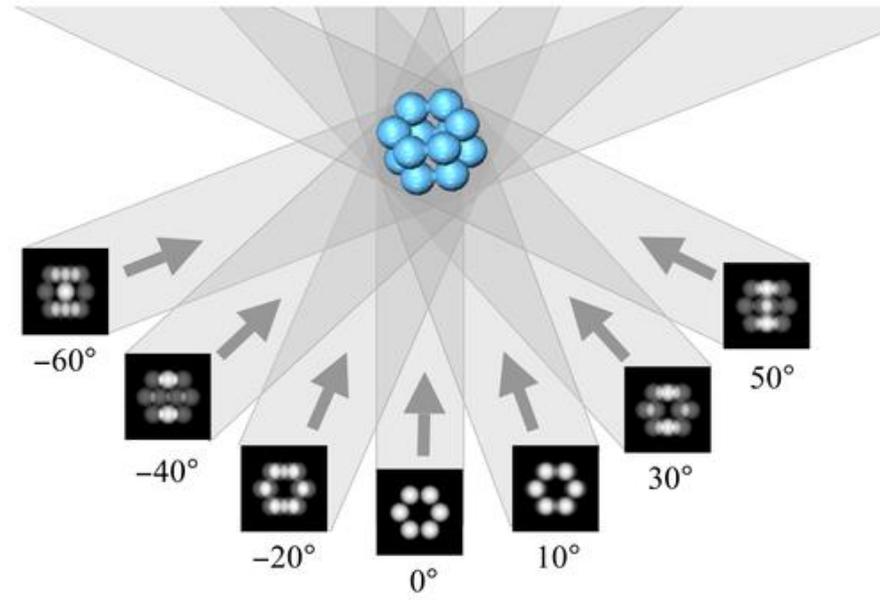
FWHM (vertical) = 0.79 mm  
FWHM (horizontal) = 0.74 mm



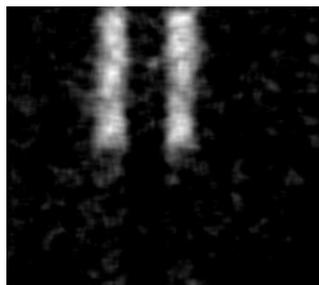
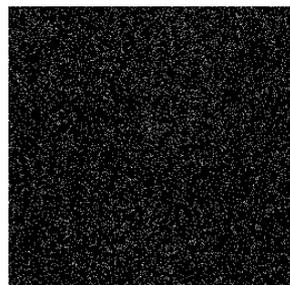
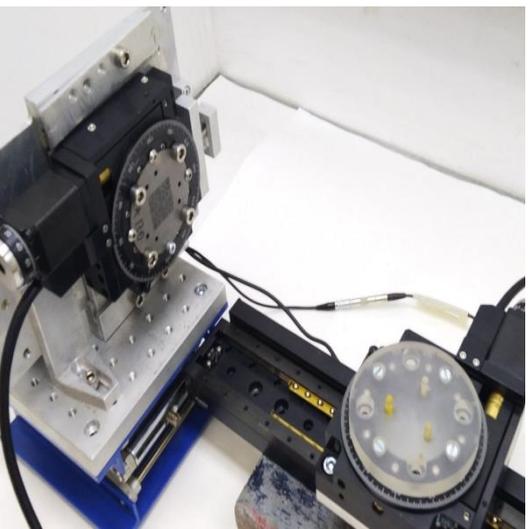
# Гамма-визор -> ОФЭКТ



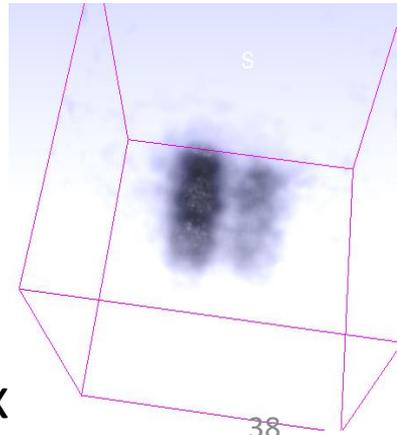
(a)



(b)



Astra Toolbox





# Фантом Ящака

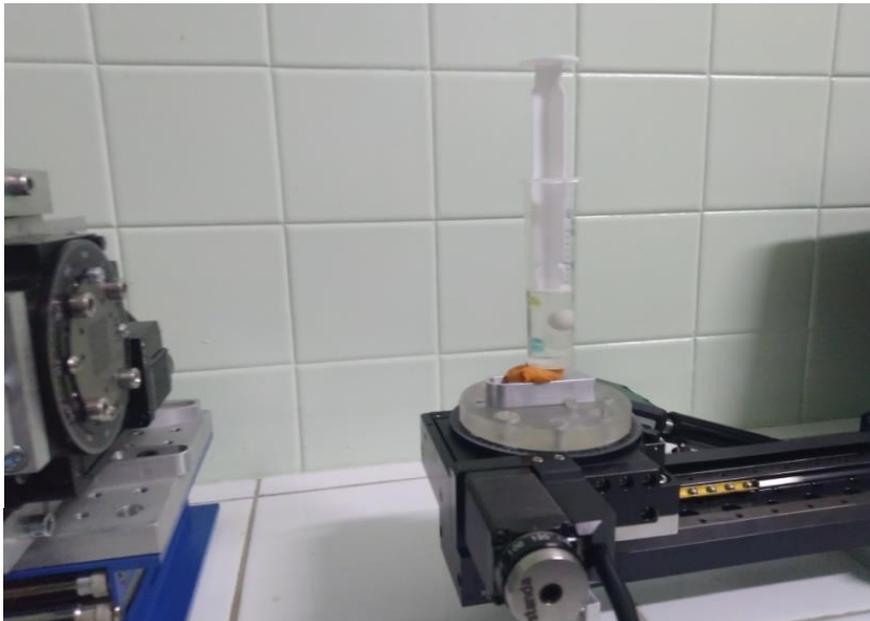




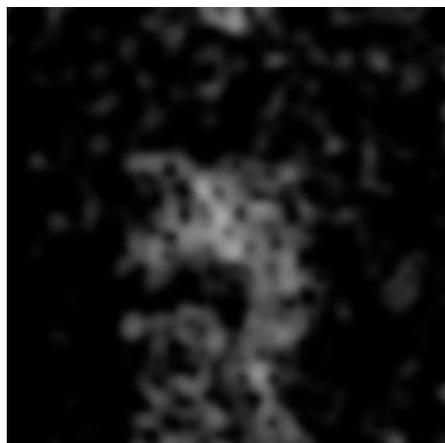
# Фантом Ящака



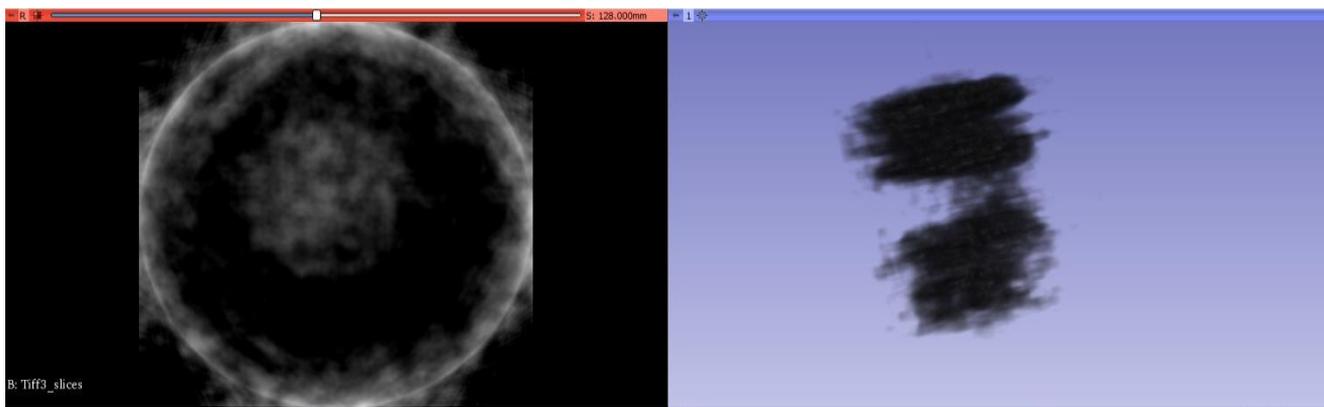
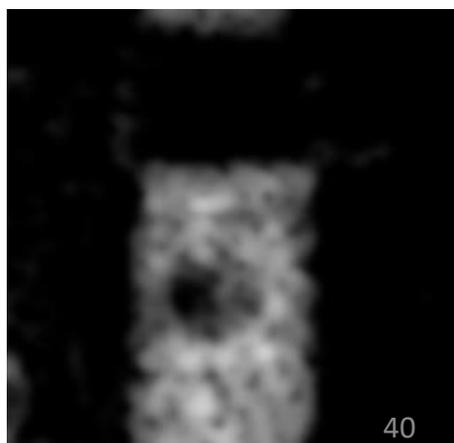
Активность 84.8 МБк



1 МИН

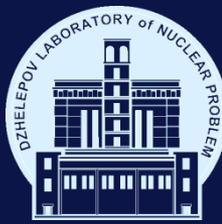


10 МИН





# Измерения с фантомами

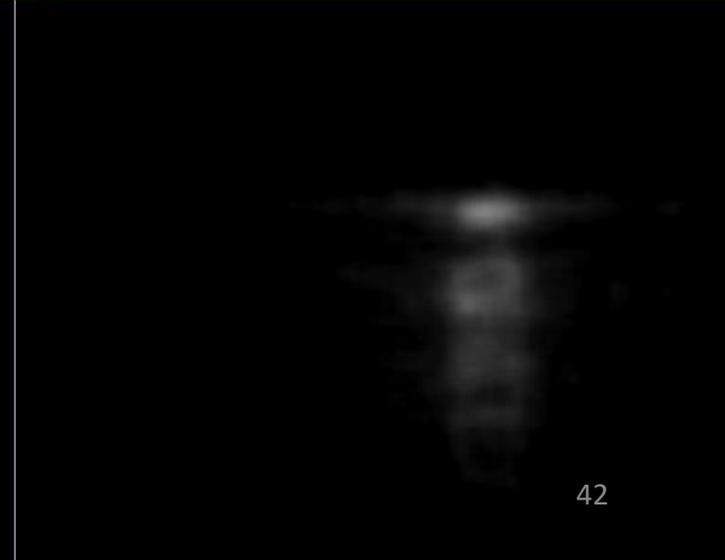
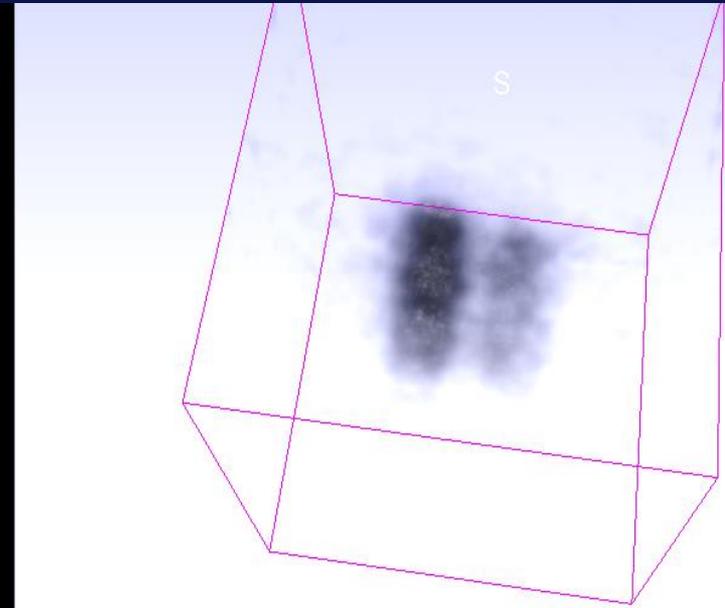
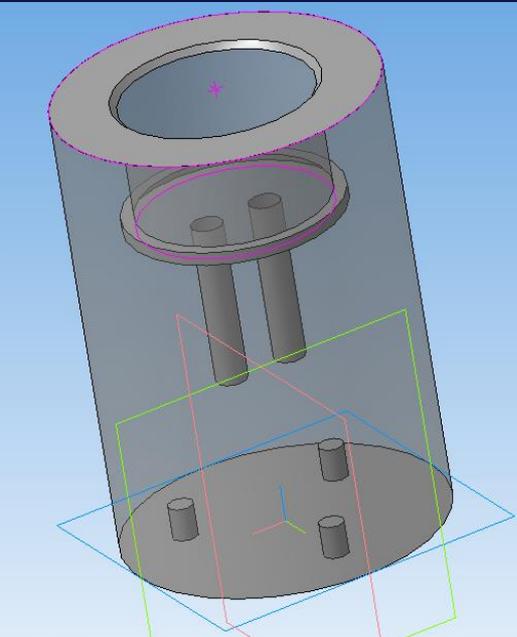


- Пространственное разрешение
  - Линейность
  - Контрастность
- Эффективность регистрации
  - Чувствительность
  - Отношение сигнал/шум





# Contrast Phantom

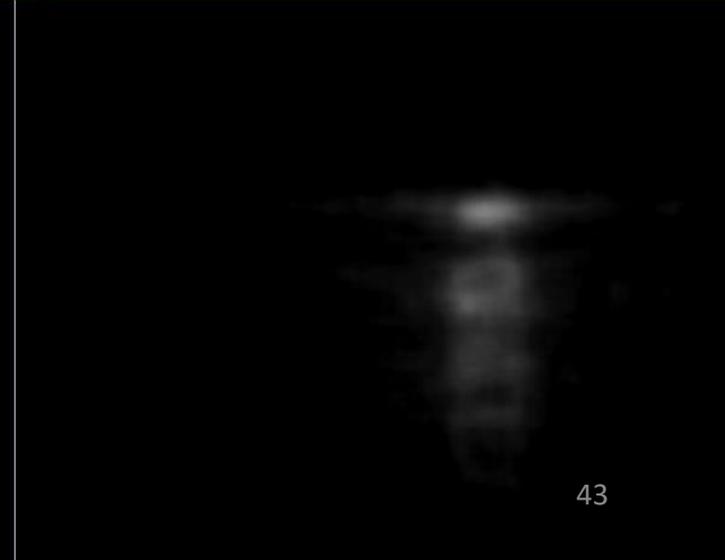
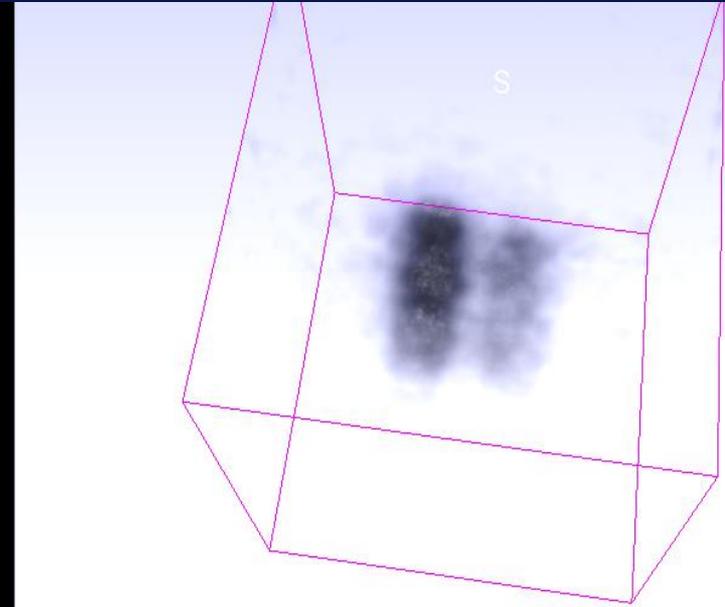
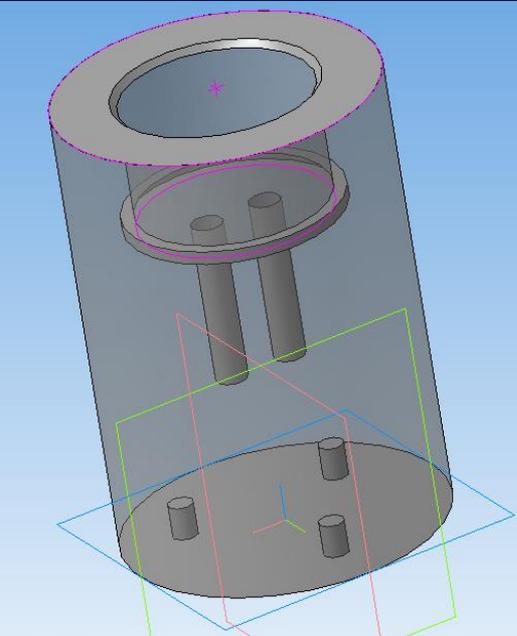
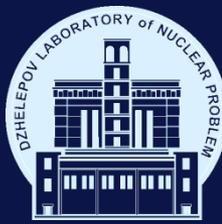


R: -127,000mm

G



# Contrast Phantom

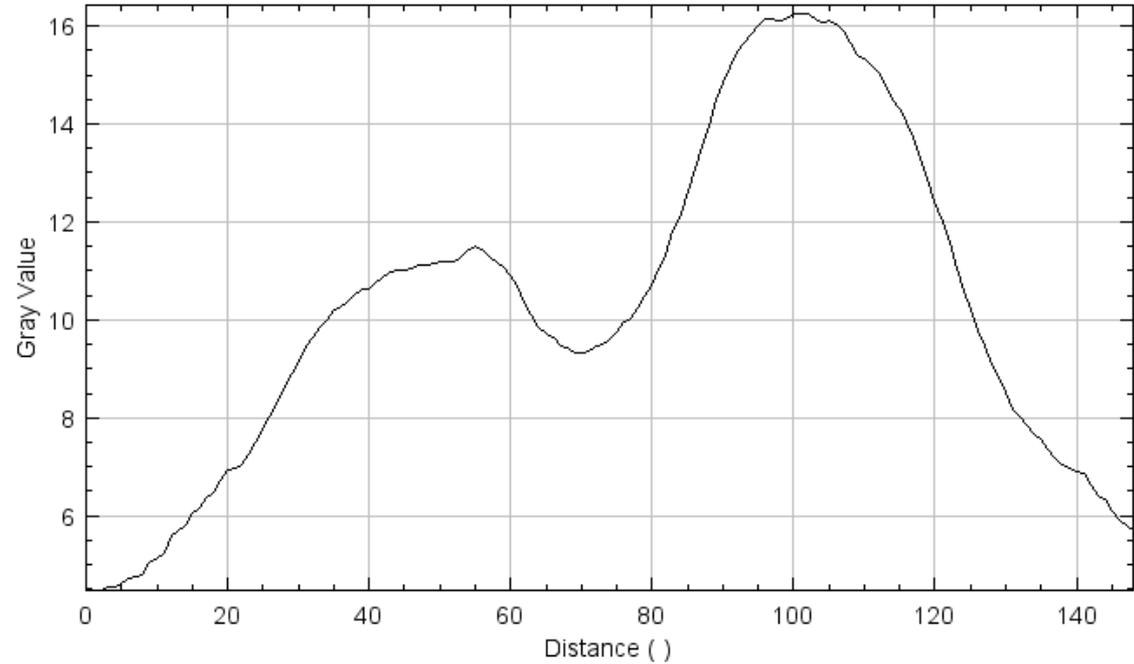
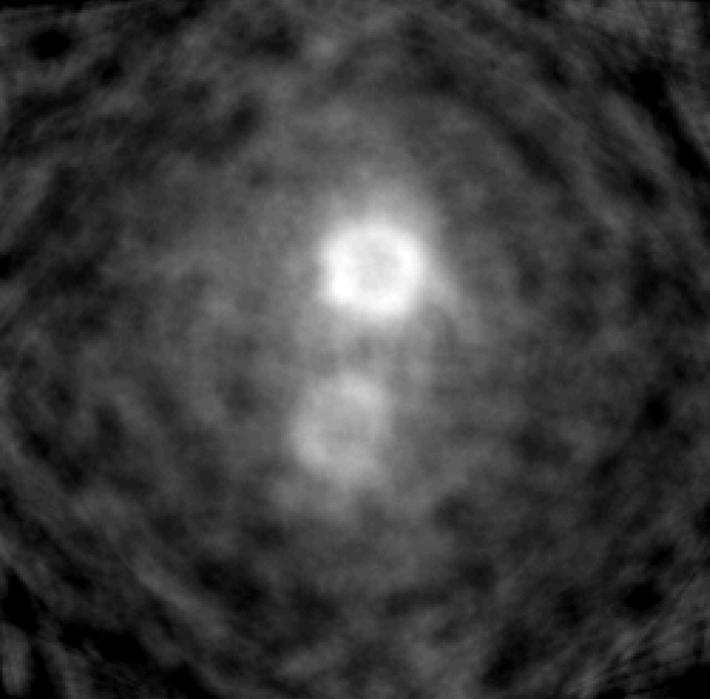
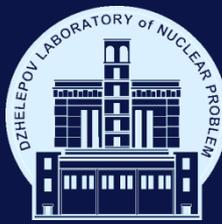


R: -127,000mm

G



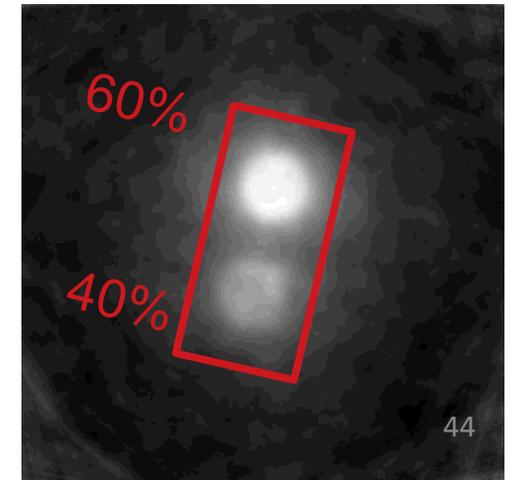
# Contrast Phantom



Активность = 75 МБк

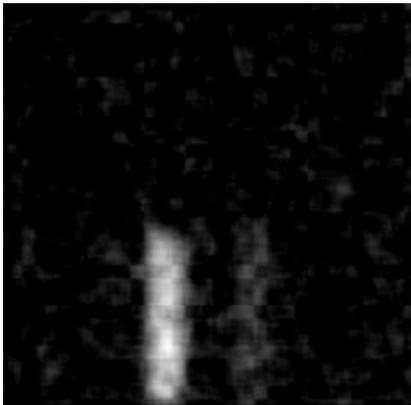
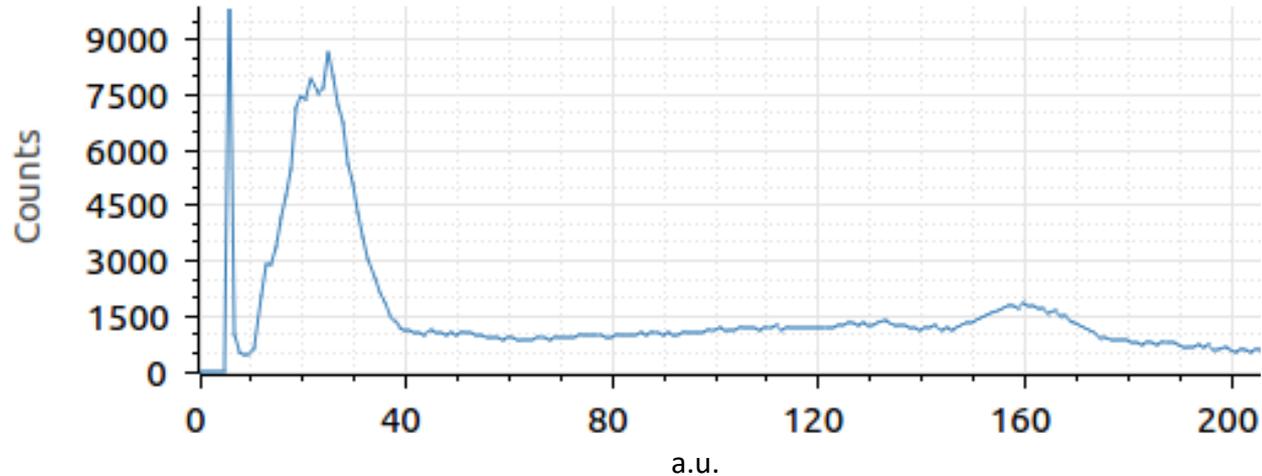
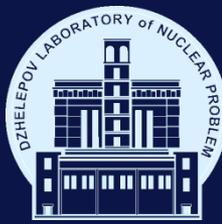
Отношение активностей 40/60 = 0,67

Измеренное отношение активностей =  $0,68 \pm 0,01$

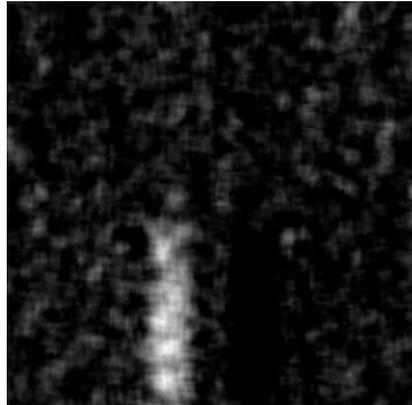




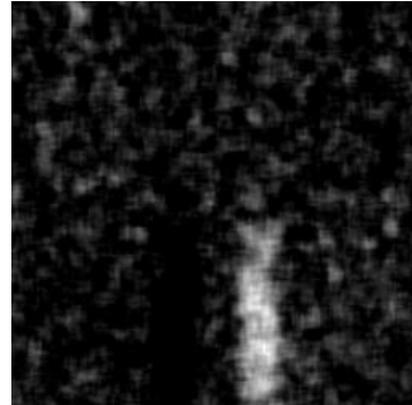
# Contrast Phantom



Tc+I



I (84 МБк)

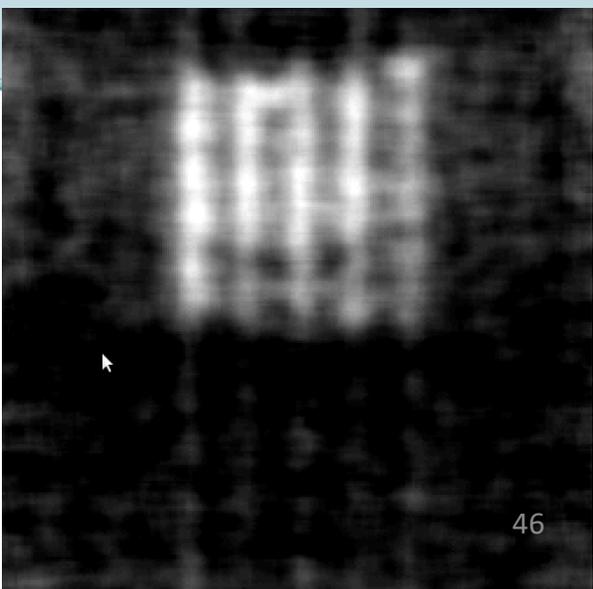
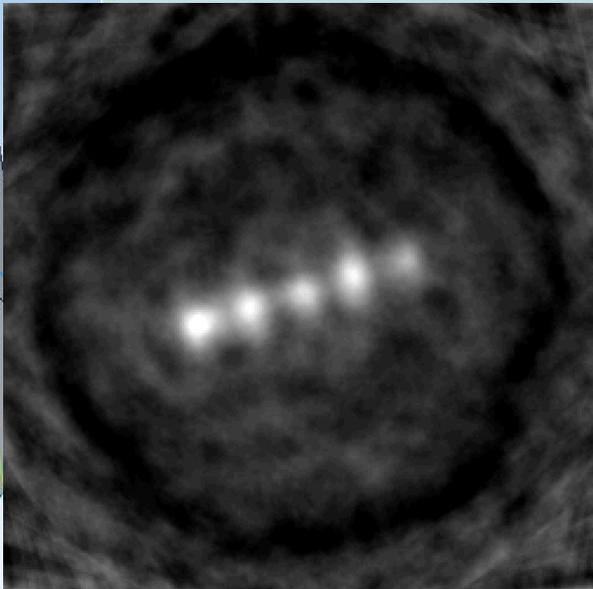
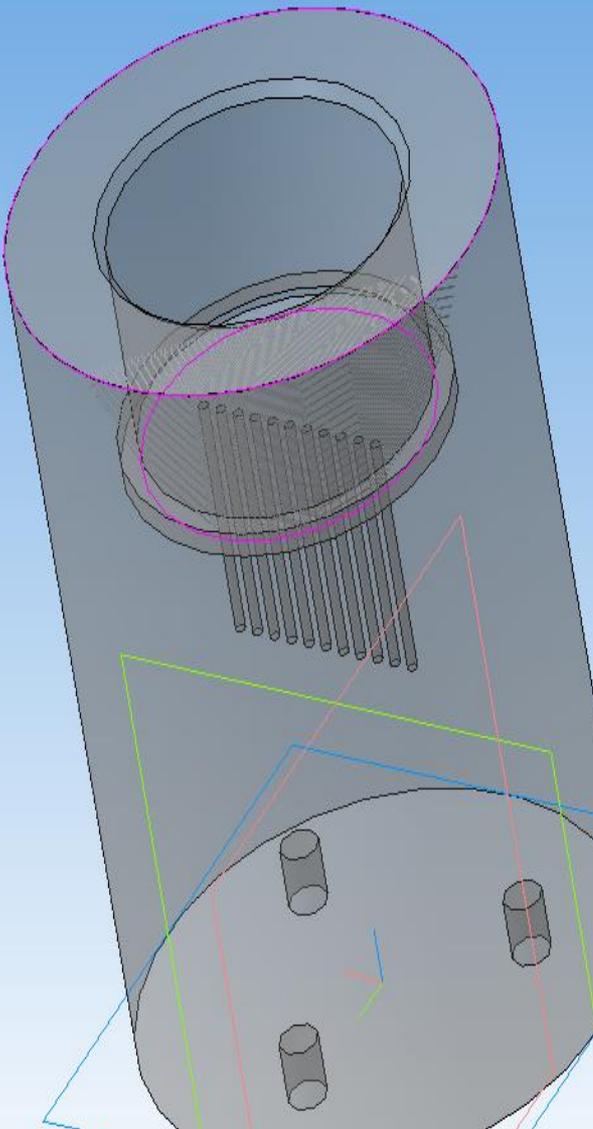


Tc (47 МБк)

Активность(Tc) — 47 МБк  
Активность(I) — 84.8 МБк  
Время — 5 минут

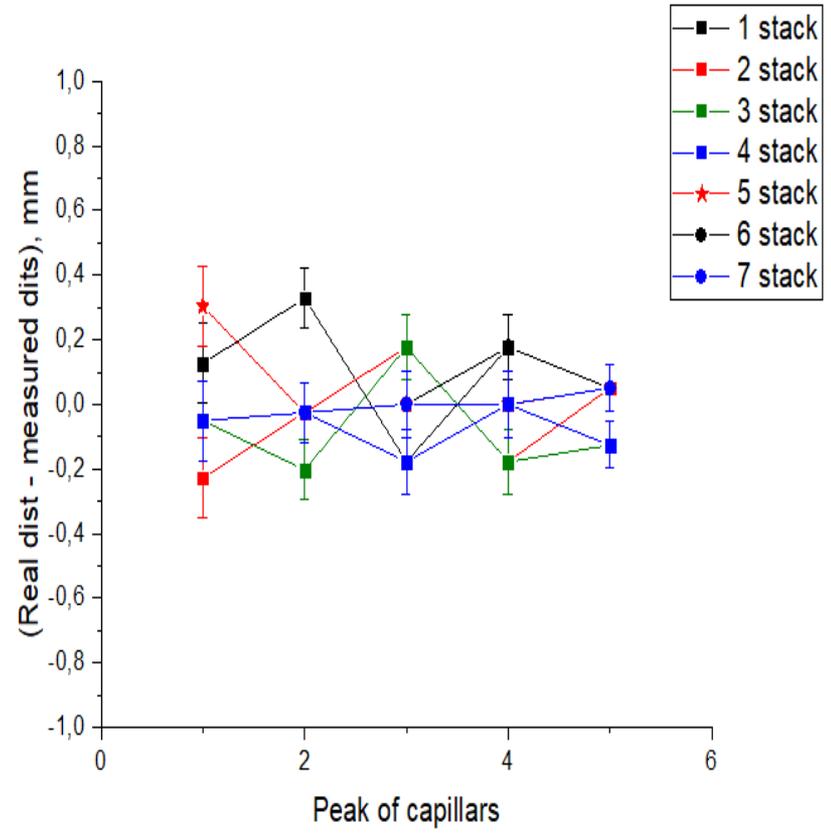
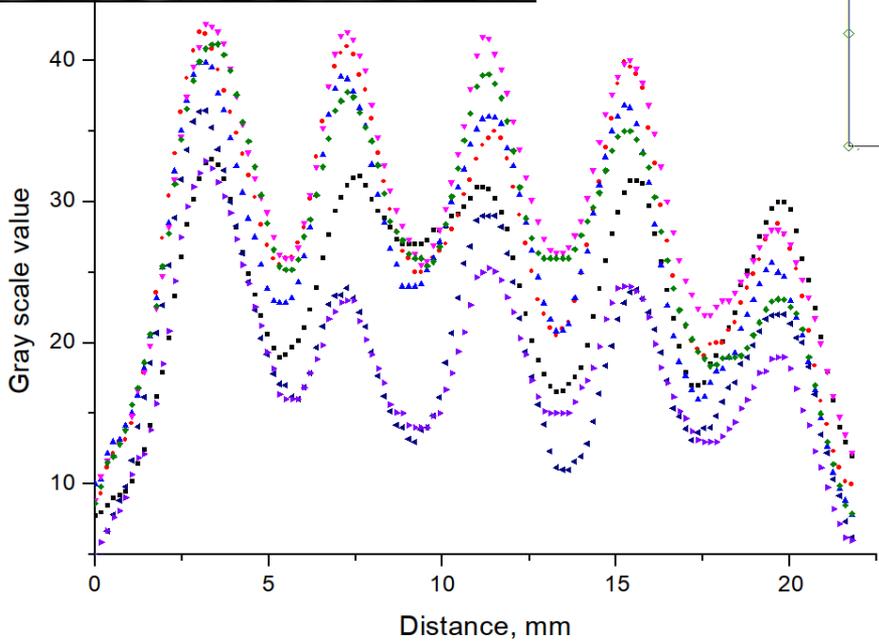
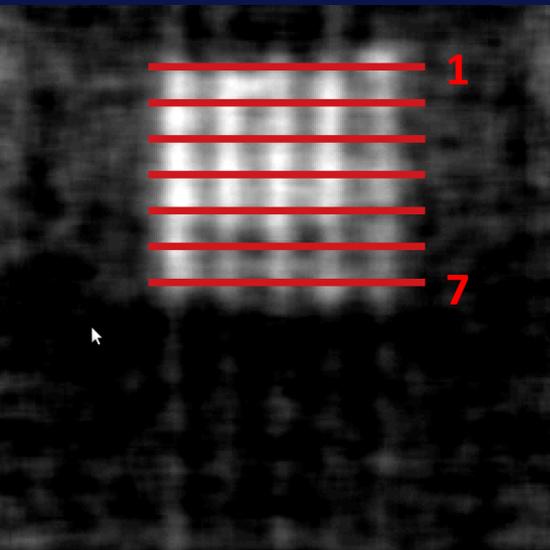


# Linear Phantom





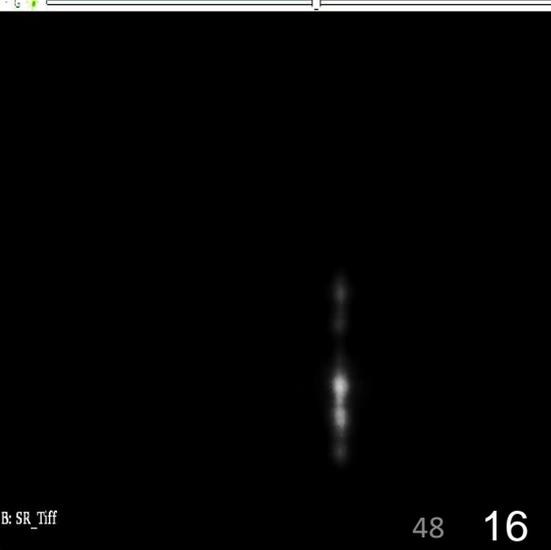
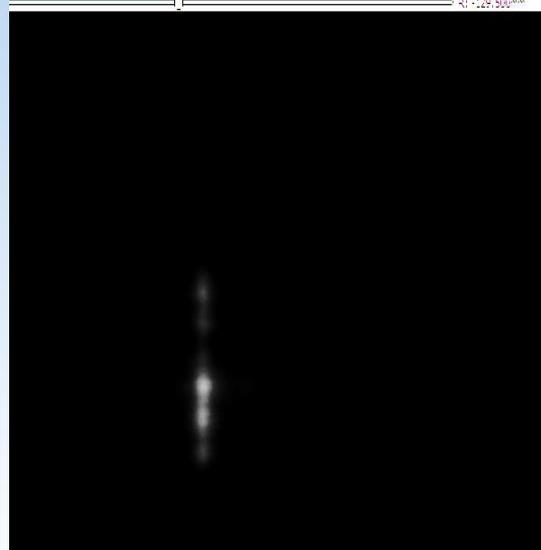
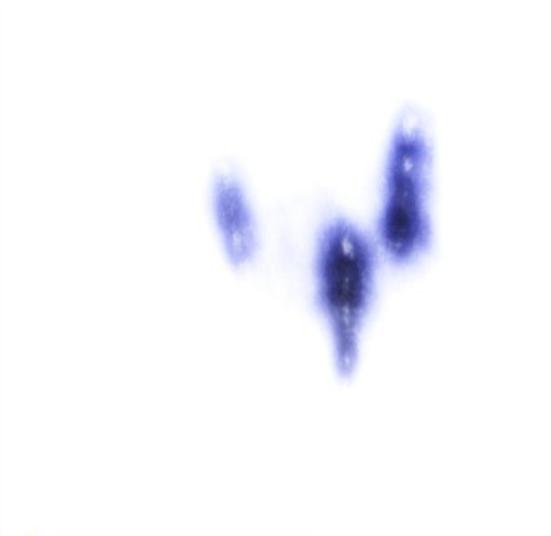
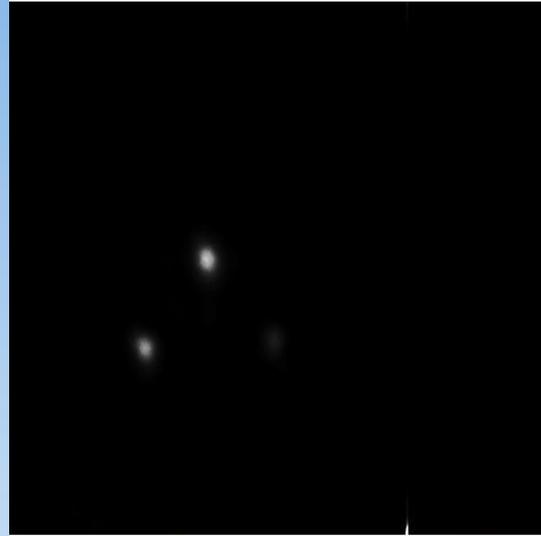
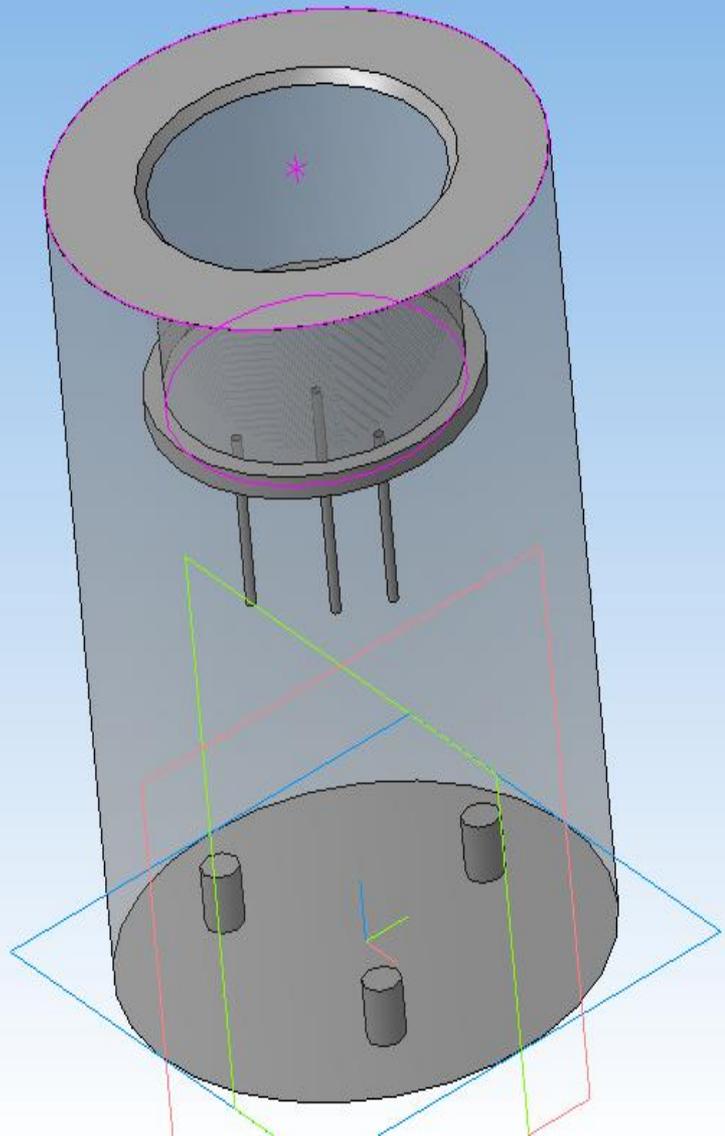
# Linear Phantom



Активность = 64 МБк



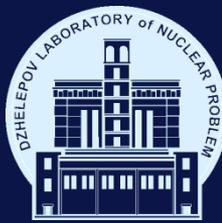
# SR Phantom



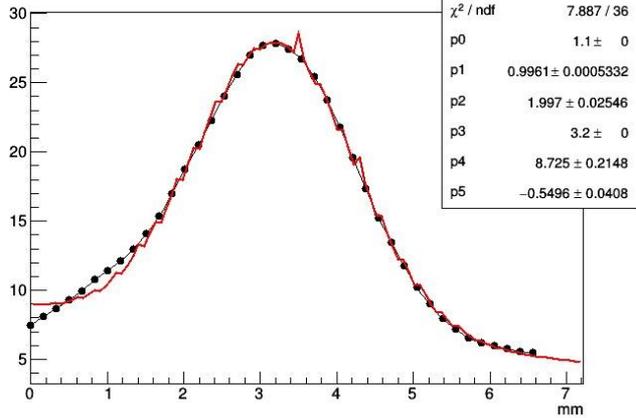
B: SR\_Tiff



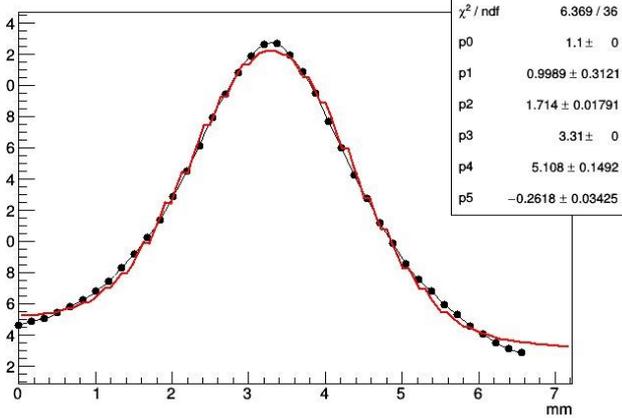
# SR Phantom



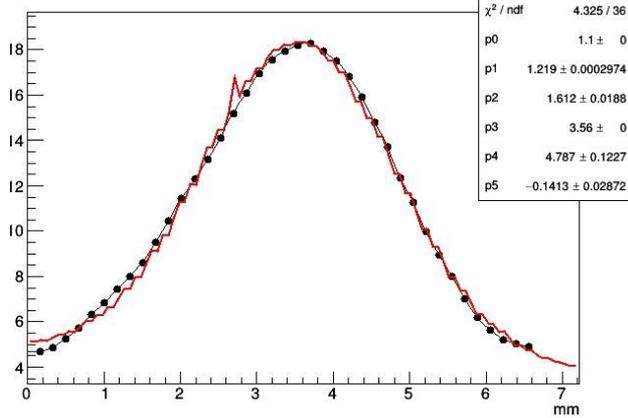
Capillar 1



Capillar 2

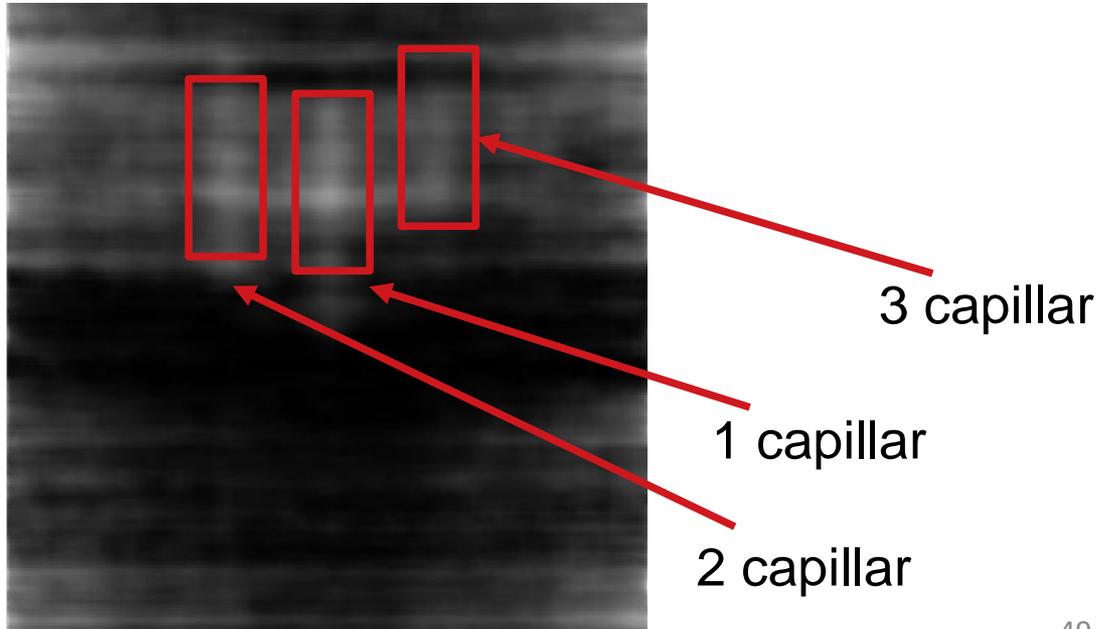


Capillar 3



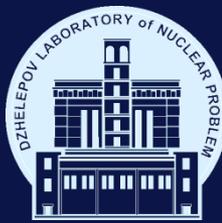
Активность = 84 МБк  
FoV = 57mm x 57mm

Cap #	TSR, mm
1	2,35
2	2,35
3	2,87

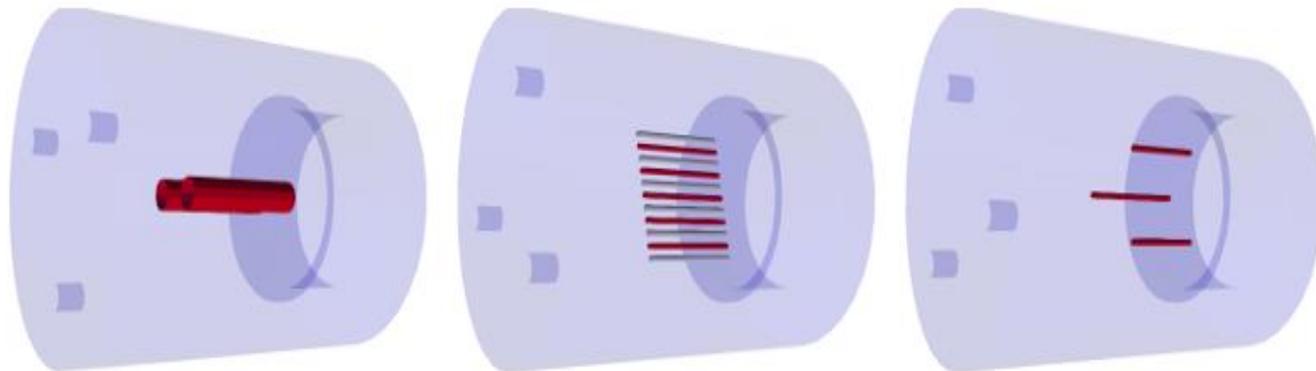




# Реконструкция с применением фильтров

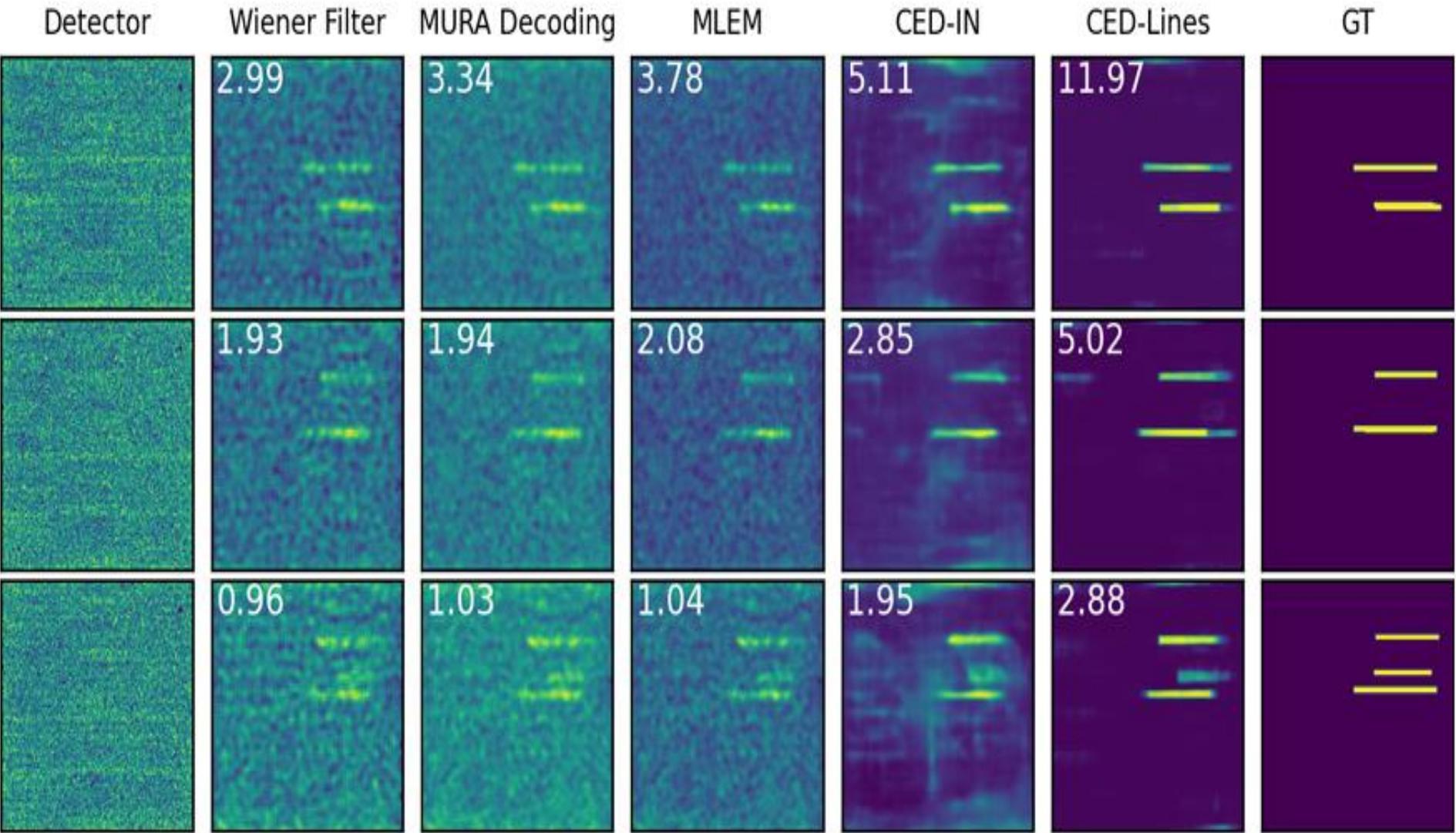
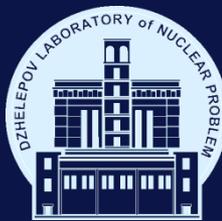


- **Wiener filter** - Kroschel, K. (2004). Wiener-Filter. In: Statistische Informationstechnik. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-10041-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-10041-7_8)
- **Modified uniformly redundant array (MURA)** - Stephen R. Gottesman and E. E. Fenimore, "New family of binary arrays for coded aperture imaging," Appl. Opt. **28**, 4344-4352 (1989) <https://doi.org/10.1364/AO.28.004344>
- **Maximum likelihood expectation maximization (MLEM)** - Boudjelal A, Elmoataz A, Attallah B, Messali Z. «A Novel Iterative MLEM Image Reconstruction Algorithm Based on Beltrami Filter: Application to ECT Images.» Tomography. 2021 Jul 28;7(3):286-300. doi: 10.3390/tomography7030026. PMID: 34449726; PMCID: PMC8396201.
- **Convolutional Encoder-Decoder Network (CED)** - Y. Zhang and H. Yu, «Convolutional neural network based metal artifact reduction in X-ray computed Tomography», IEEE Trans. Med. Imag. 37 (2018) 1370.



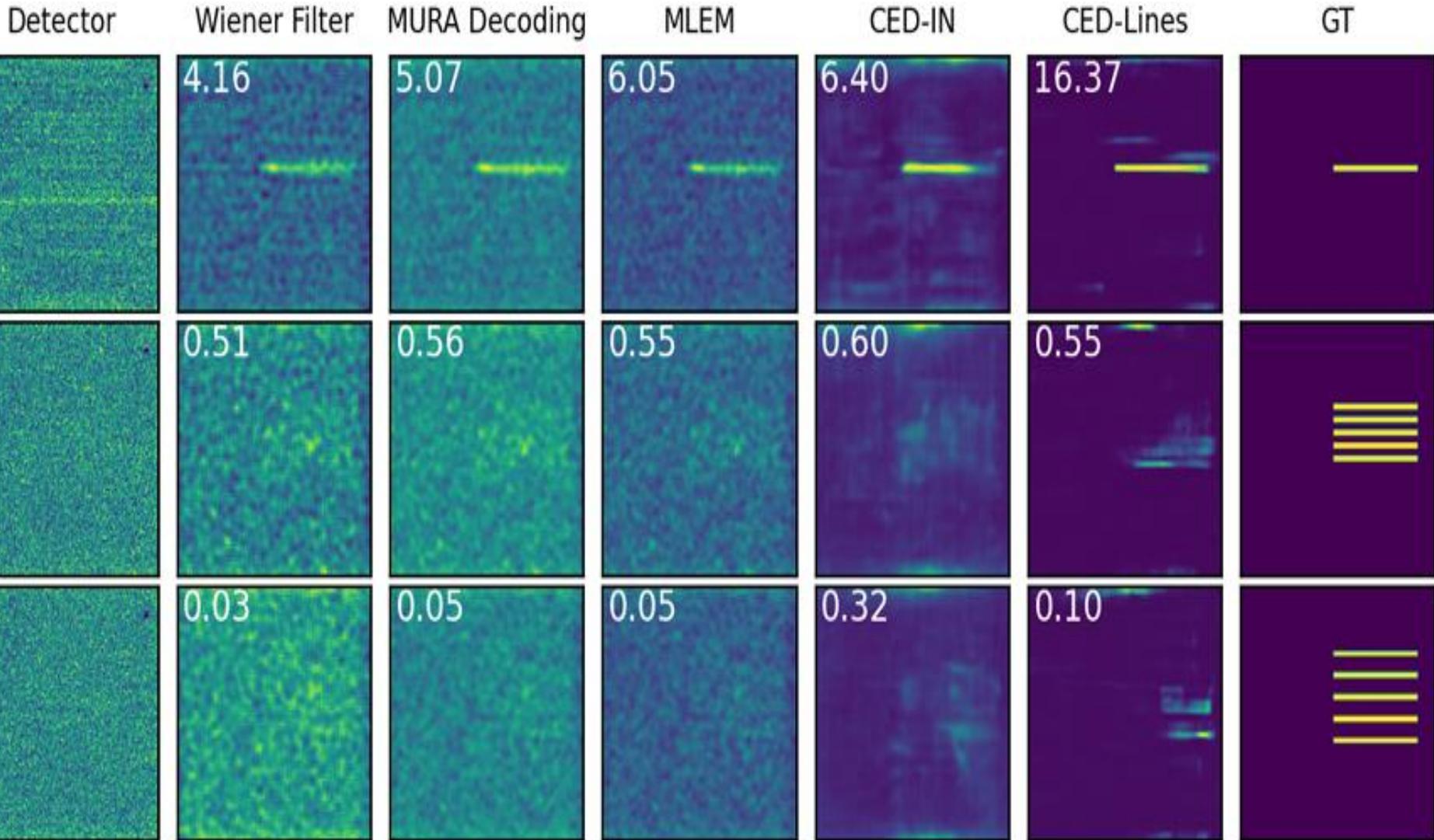
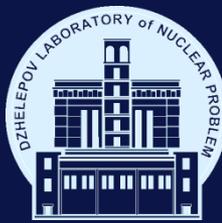


# Реконструкция с применением фильтров



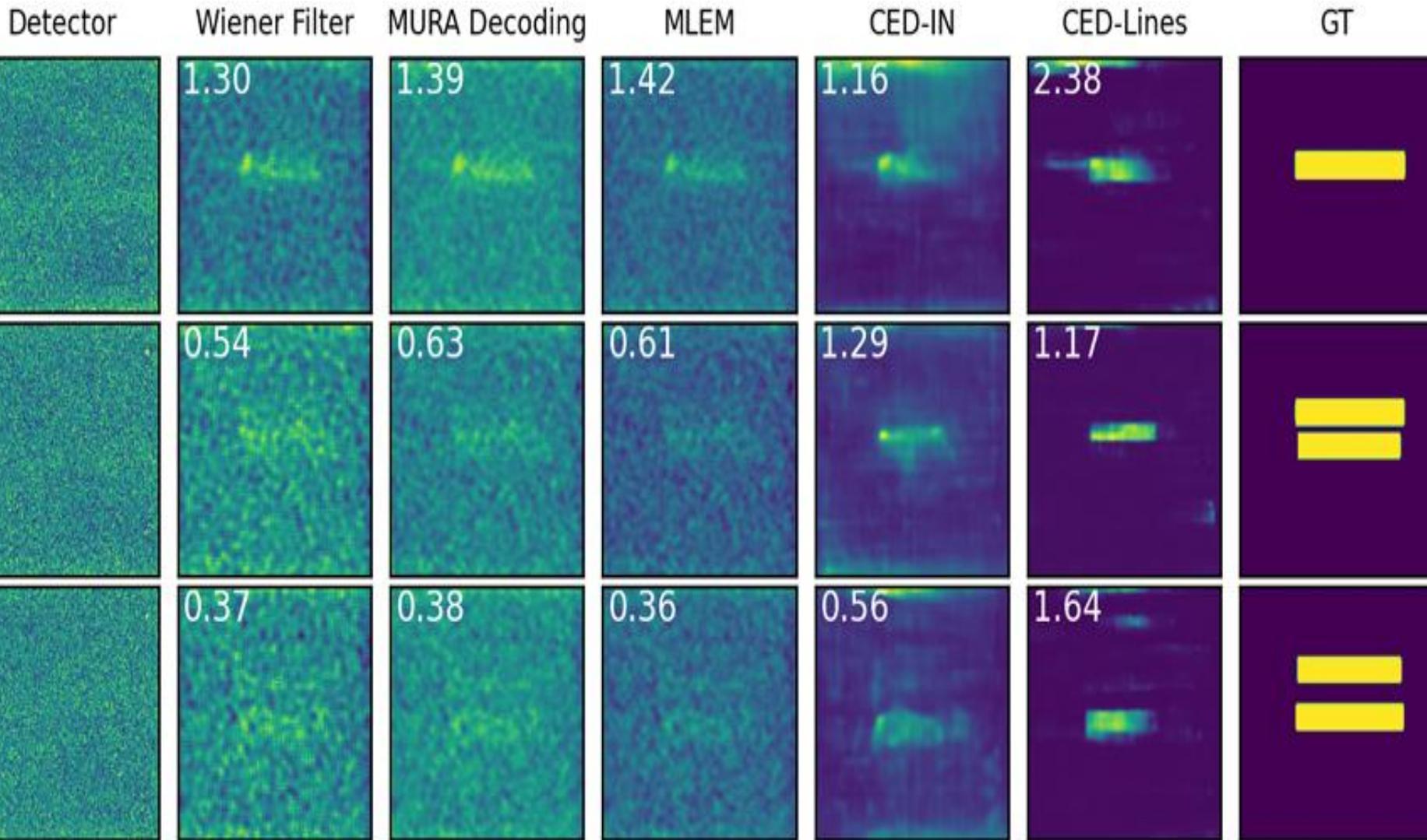


# Реконструкция с применением фильтров



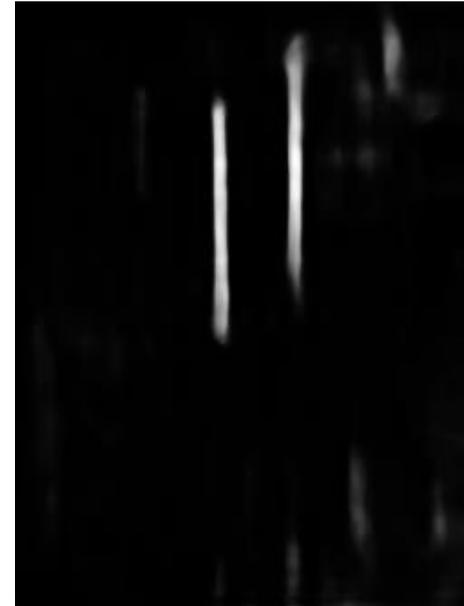
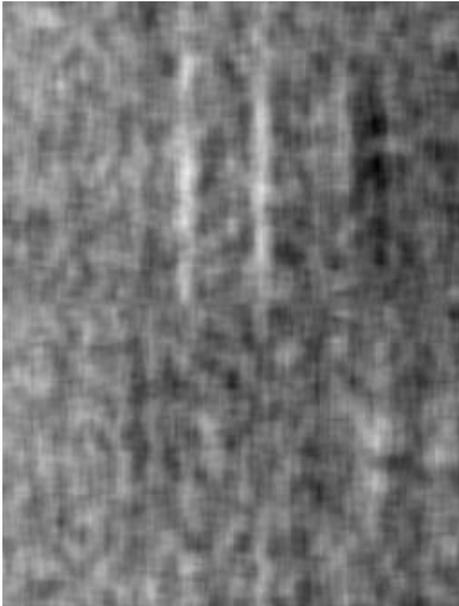
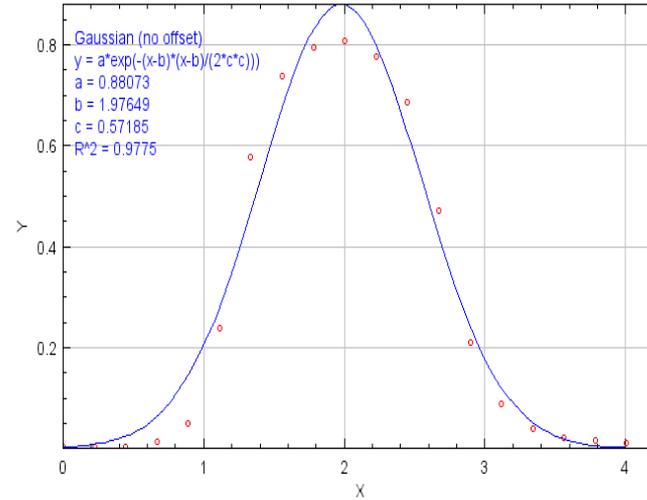
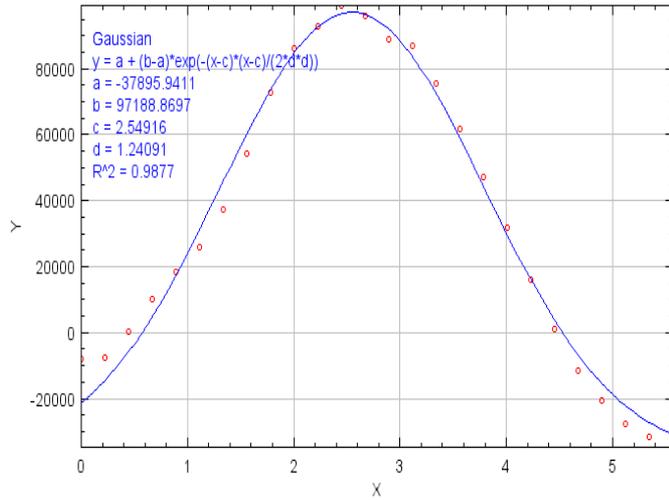
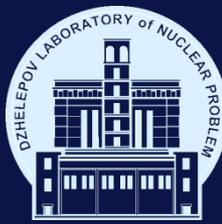


# Реконструкция с применением фильтров



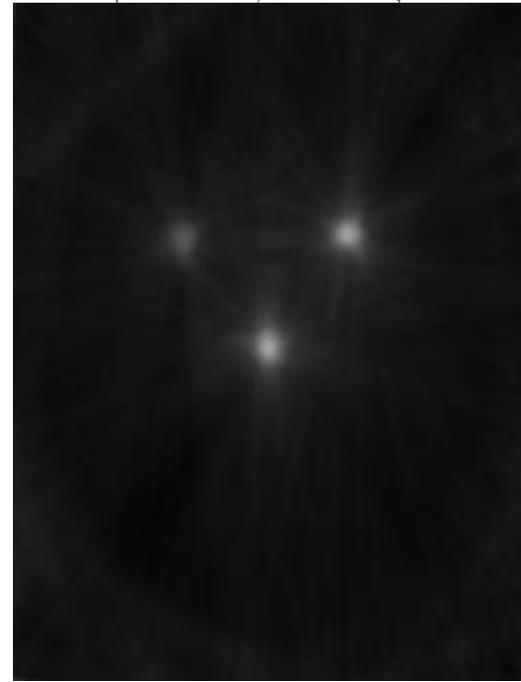
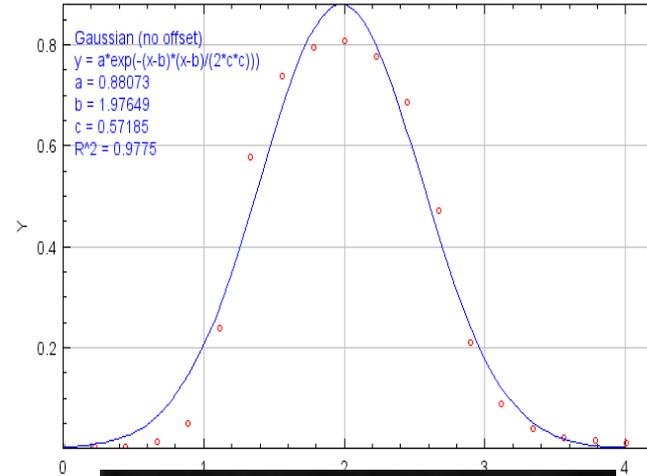
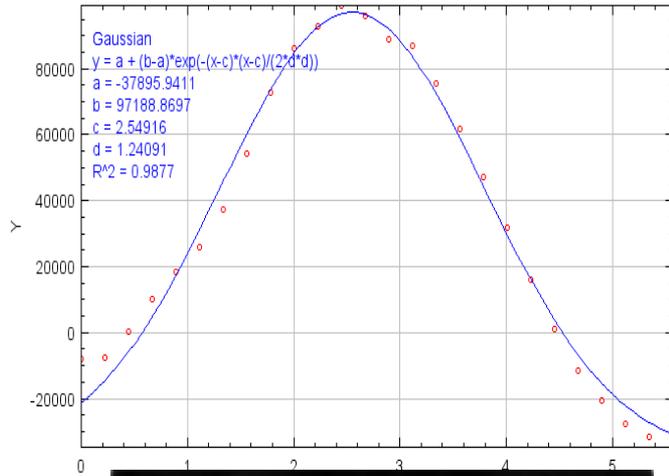
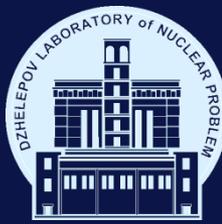


# SR Phantom



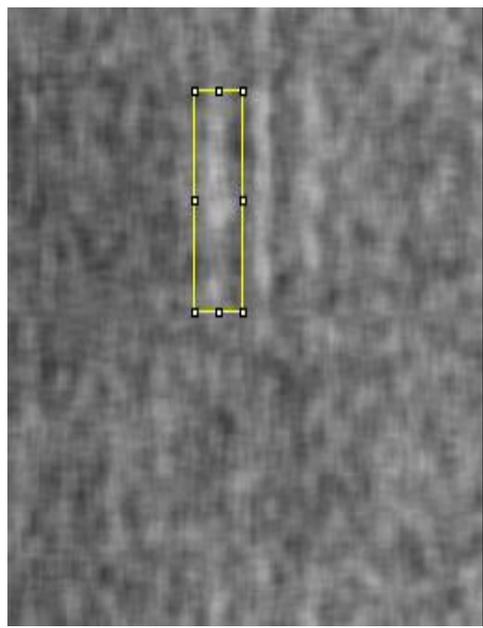
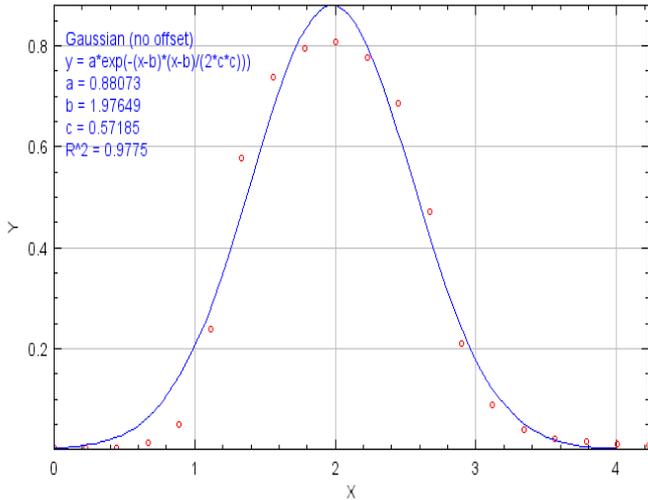
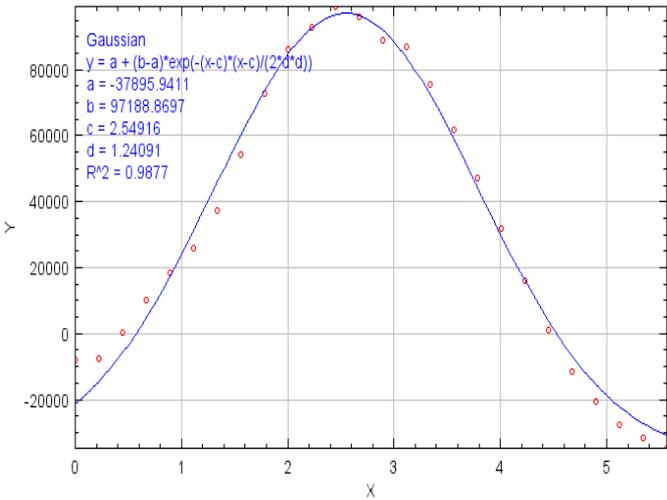


# SR Phantom



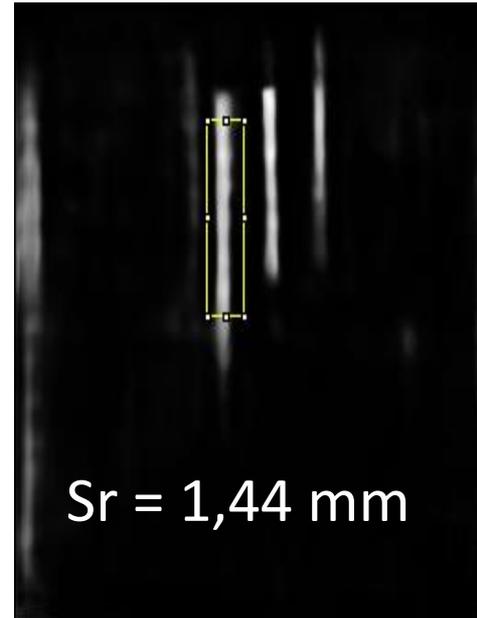
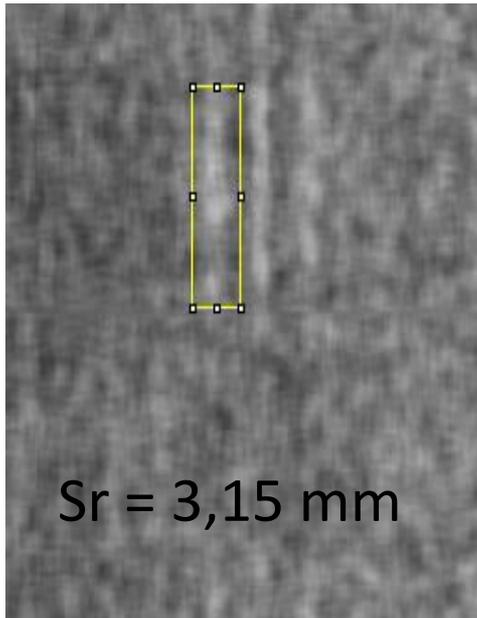
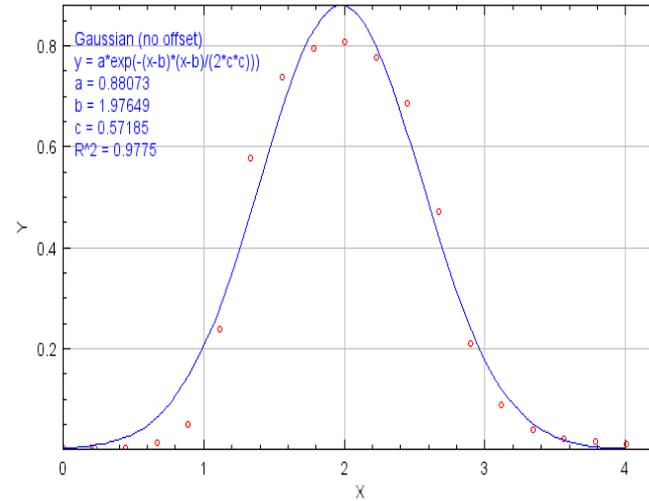
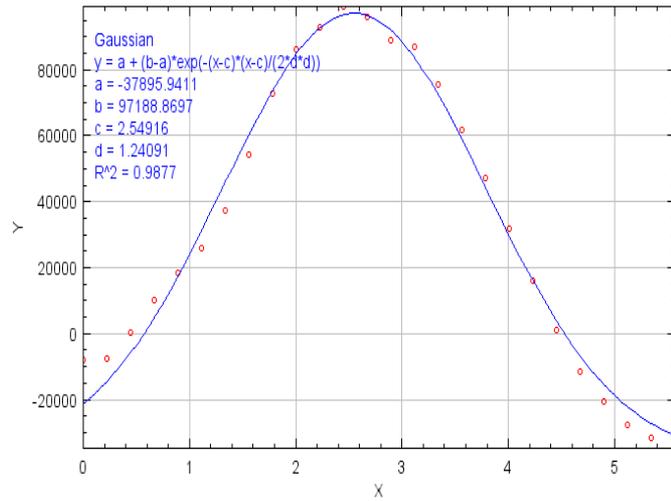
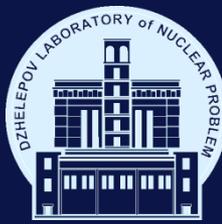


# SR Phantom

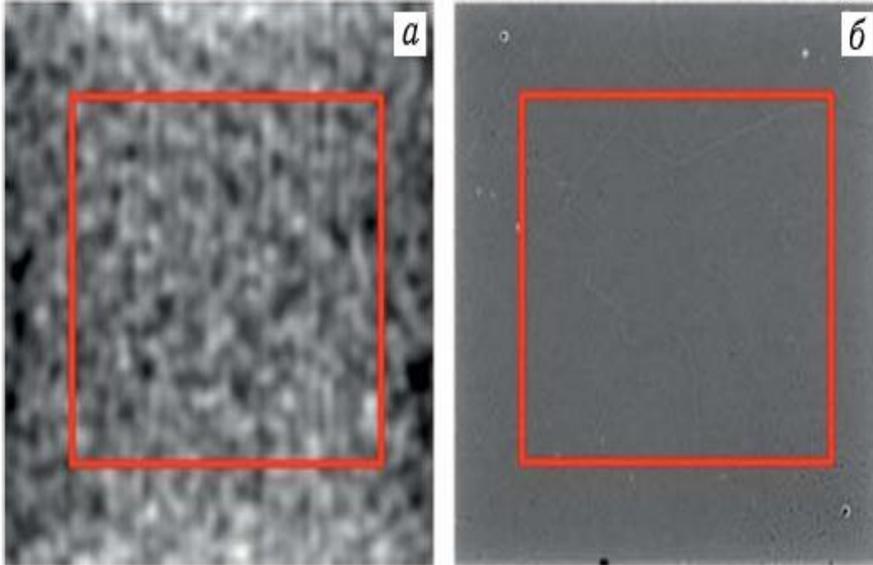




# SR Phantom



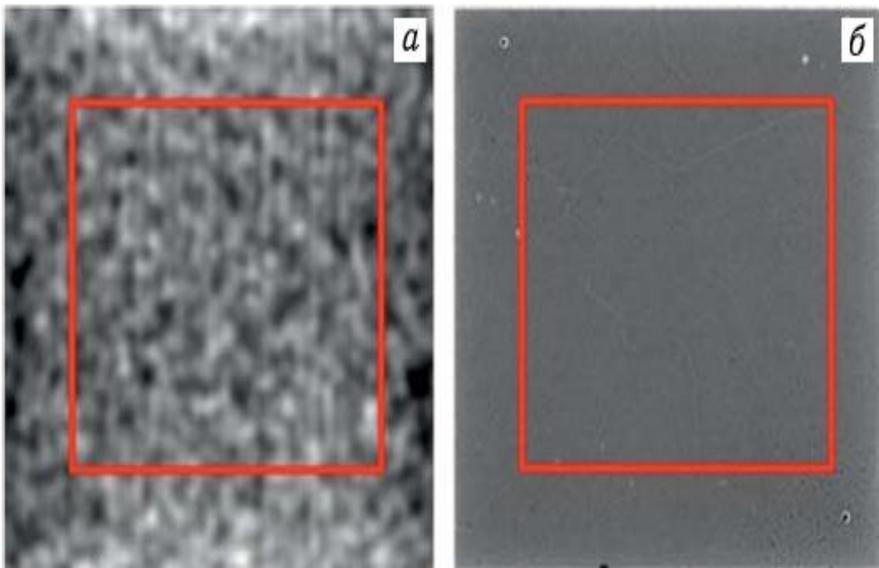
# Неоднородность



Для оценки пространственной неоднородности используются интегральная и дифференциальная неоднородности, указывающие соответственно на наличие артефактов во всей области сенсора и их появление от пикселя к пикселю. Для вычисления данных параметров использовался плоский фантом размером 45×50×5 мм. Фантом размещался таким образом, чтобы он полностью попадал в поле зрения установки, составляющее 57×57мм. Активность раствора  $^{99m}\text{Tc}$  в фантоме составляла 1 МБк. В связи с малой удельной активностью для увеличения статистики в каждом пикселе к декодированному изображению был применен бининг 2×2.



# Неоднородность



Для оценки пространственной неоднородности используются интегральная и дифференциальная неоднородности, указывающие соответственно на наличие артефактов во всей области сенсора и их появление от пикселя к пикселю. Для вычисления данных параметров использовался плоский фантом размером 45×50×5 мм. Фантом размещался таким образом, чтобы он полностью попадал в поле зрения установки, составляющее 57×57мм. Активность раствора  $^{99m}\text{Tc}$  в фантоме составляла 1 МБк. В связи с малой удельной активностью для увеличения статистики в каждом пикселе к декодированному изображению был применен бининг 2×2.

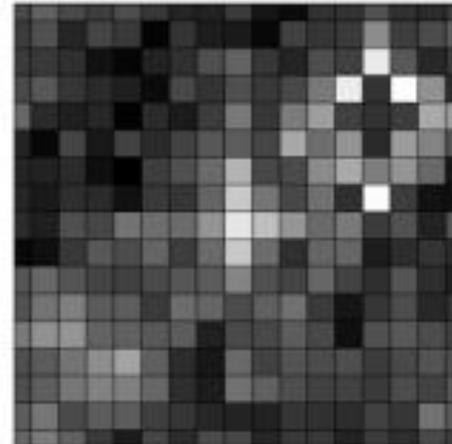
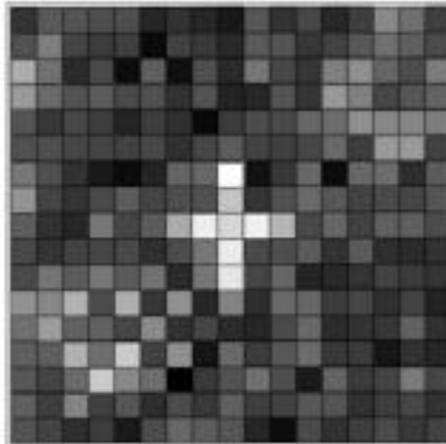
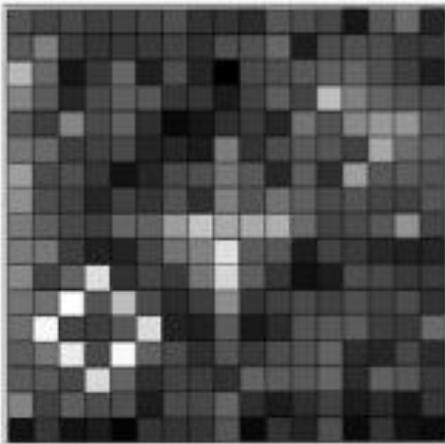
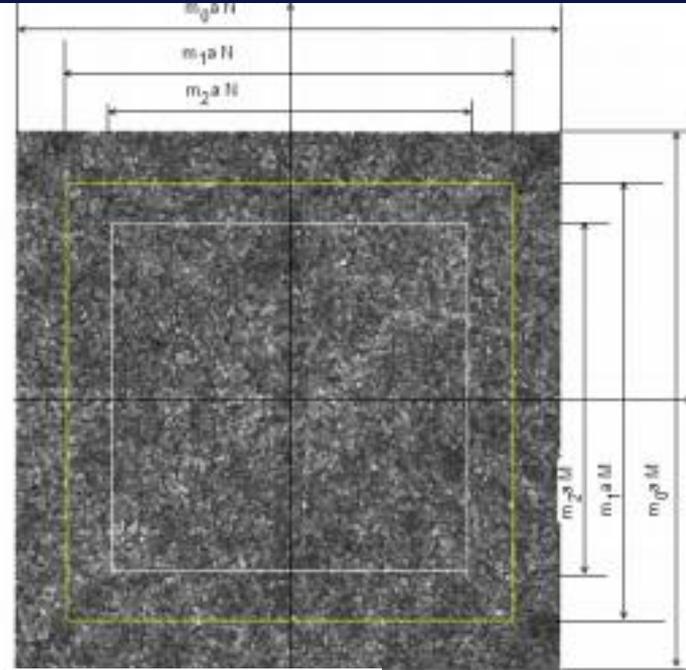
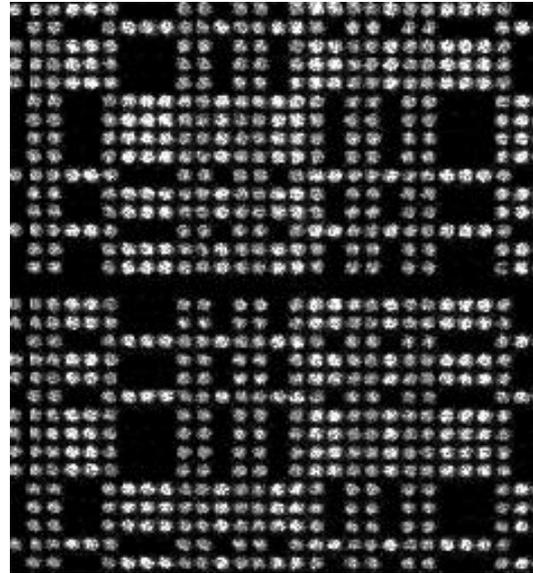
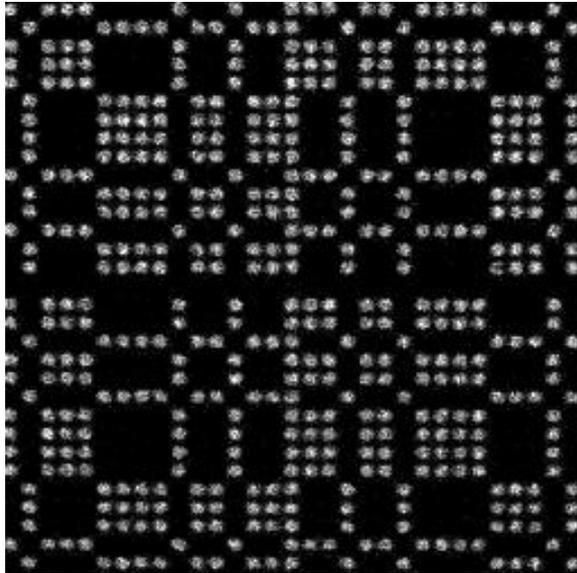
1	2	1
2	4	2
1	2	1

$$U = \frac{\max + \min}{\max - \min} \cdot 100\%$$

Интегральная неоднородность – 56%  
Дифференциальная неоднородность – 16%

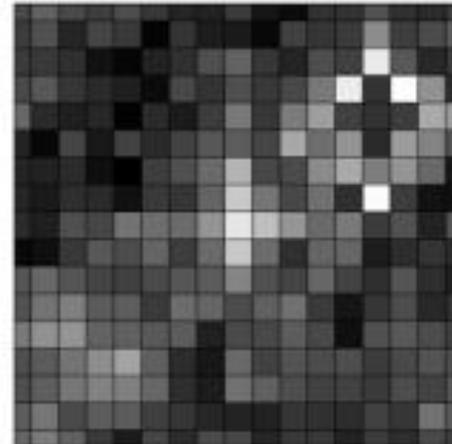
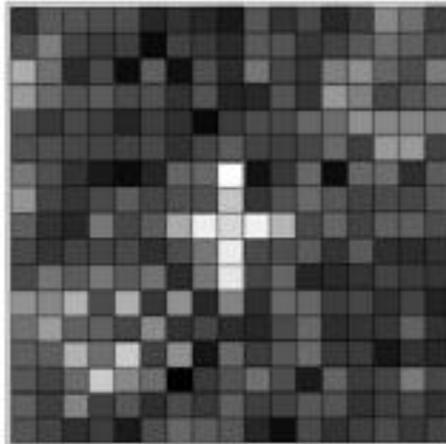
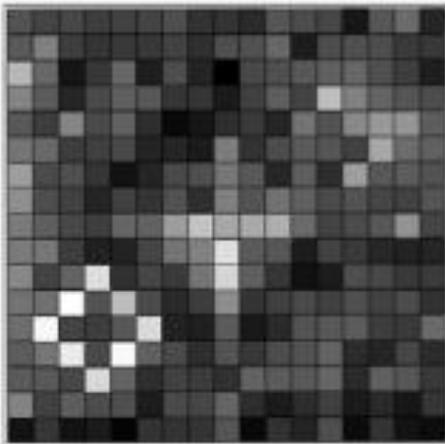
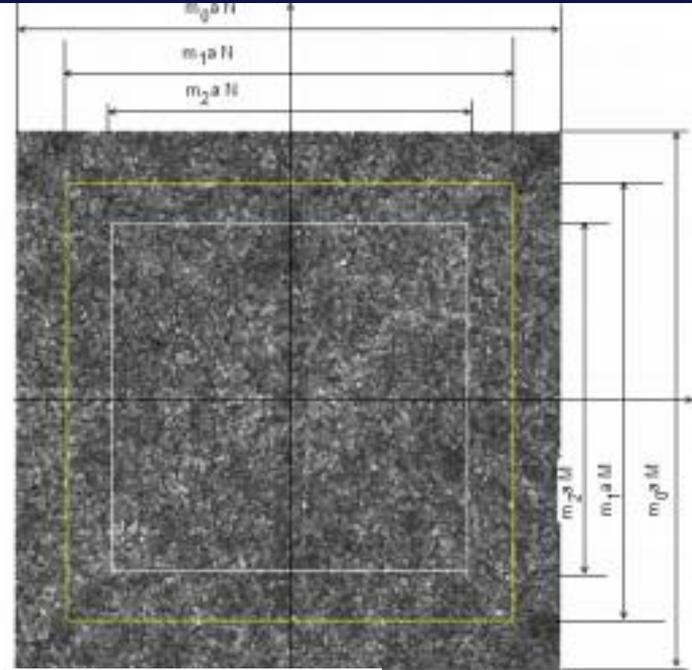
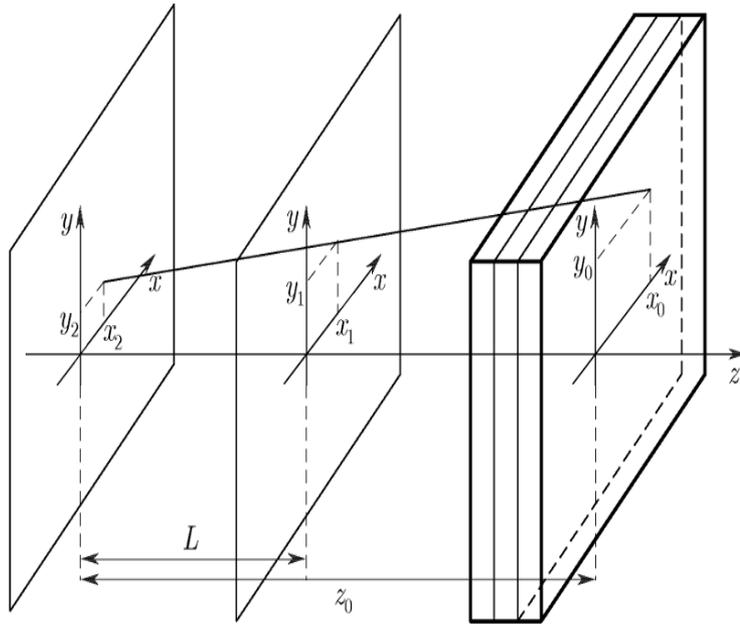
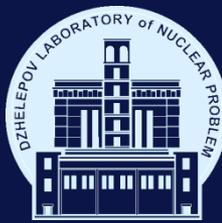


# Неоднородность





# Неоднородность





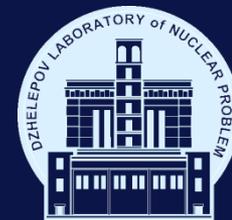
# Системные параметры



Детектор	Timepix CdTe 2 мм
Поле зрения	57 мм x 57 мм
Энергетическое разрешение	22% (140 кэВ)
Чувствительность	35 cps/MBq
Линейность	99,9%
Время сканирования	<2 мин/проекцию
Энергетический диапазон РФП	30 – 180 кэВ
Отношение сигнал/шум	>70%



# Эффективность



Параметр	Вклад в эффективность
<b>Геометрический фактор</b>	<b><math>3,4 \cdot 10^{-4}</math></b>
<b>Ослабление в воздухе</b>	<b>0,57</b>
<b>Системная эффективность регистрации, включая:</b>	<b>0,21</b>
Коллиматор	0,39
Ослабление в воздухе	0,88
Эффективность регистрации детектора	0,6



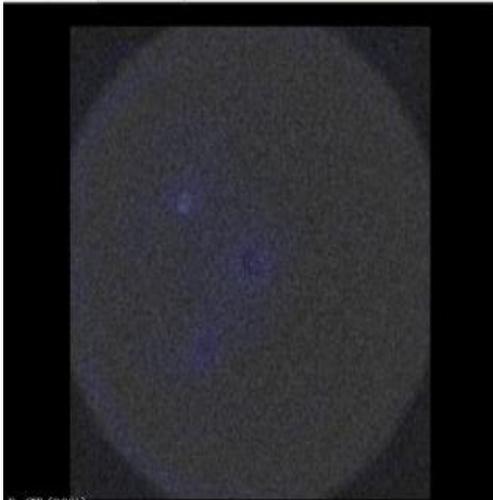
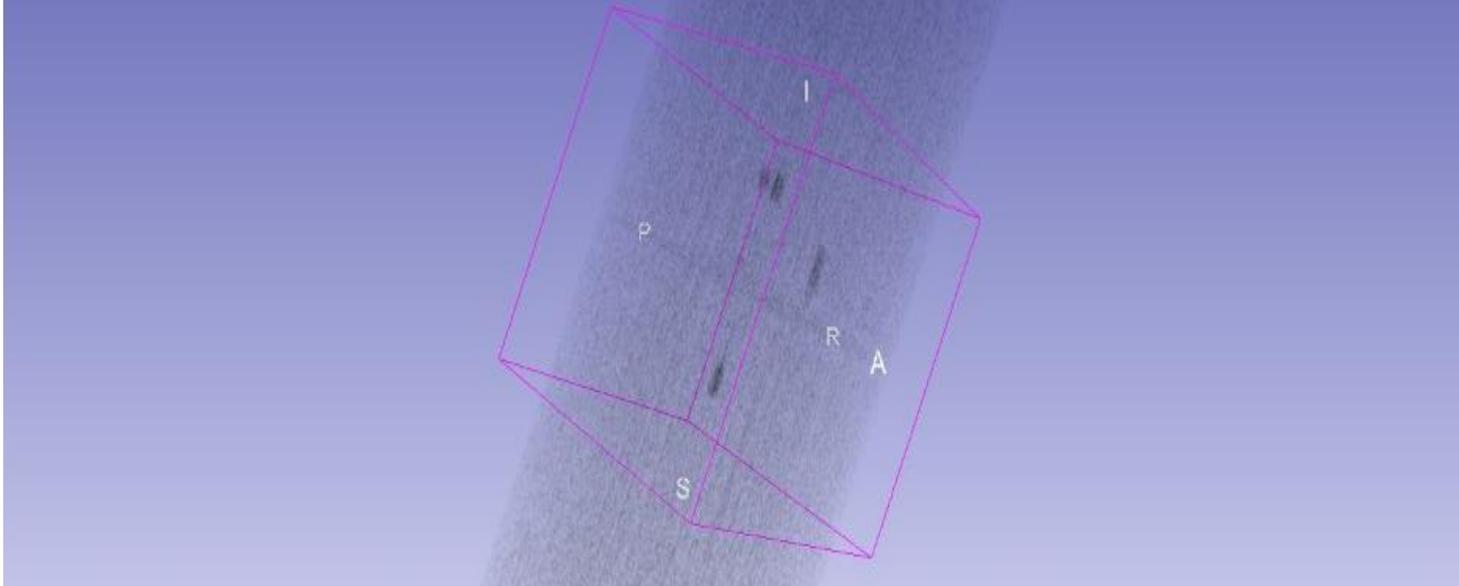
# Современные системы диагностики



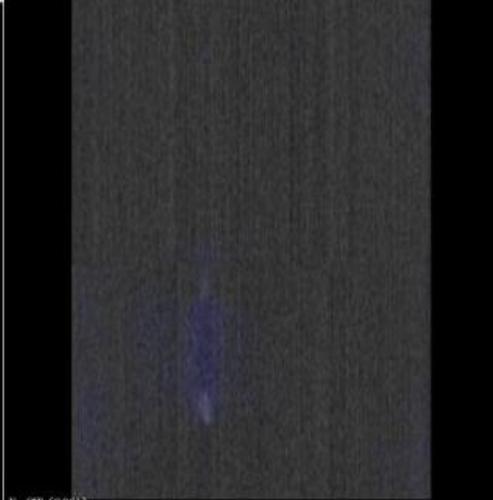
Name	FoV, mmxmm	Spatial Res, mm	Spatial Linearity, mm	Spatial uniformity, mm
Infinia Hawkeye	540x540	7.4	0.5	3
MONICA	49x92	2.2	-	<3
Ergo	396x311	3	-	<5
EZ SCOPE	32x32	2.2	-	4.5
Mediprobe (0.35 pinhole)	28x28	1.09	-	-
Mediprobe (coded mask 0.07 mm)	6.25x6.25	0.49	-	-
TCA	57x57 30x30	1.44 0.8	0.2 0.2	-



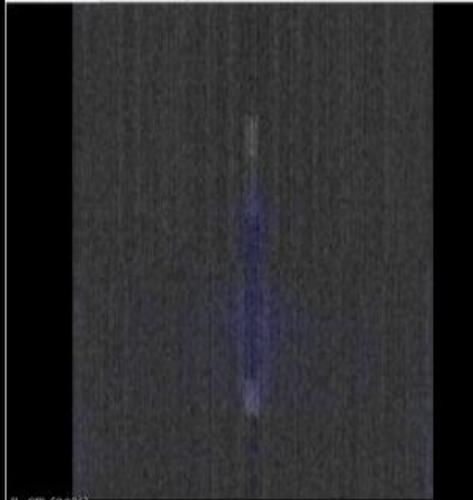
# SPECT/CT



F: CT (90%)  
B: SPECT



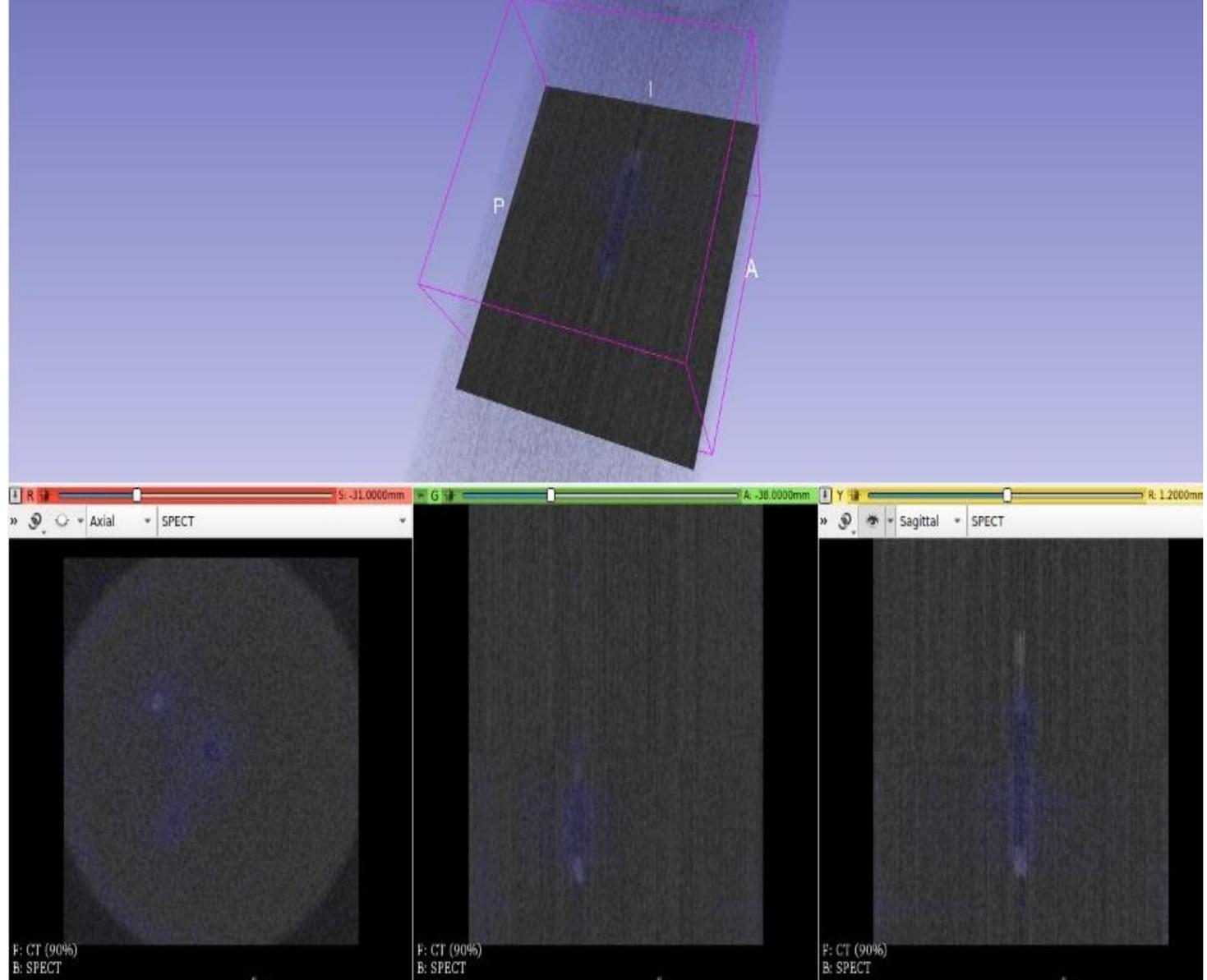
F: CT (90%)  
B: SPECT



F: CT (90%)  
B: SPECT



# SPECT/CT



F: CT (90%)  
B: SPECT

F: CT (90%)  
B: SPECT

F: CT (90%)  
B: SPECT



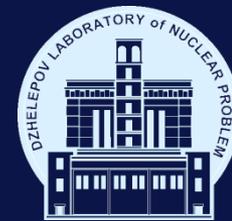
# Заключение



- Создан прототип системы ОФЭКТ для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ), на основе маски с кодирующей апертурой типа MURA и гибридного пиксельного детектора Timerix с CdTe сенсором
  - Разработано программное обеспечение для управления ОФЭКТ-системой.
- Разработанная методика определения оптимальных параметров детектора и времени экспозиции
  - Разработана методика и создано программное обеспечение для предобработки проекций и восстановления томографических изображений
- Проведены испытания полученной ОФЭКТ-системы с разными типами источников излучения. Получены проекционные и томографические изображения.
- Разработаны конструкции фантомов для измерения характеристик ОФЭКТ-системы. Определены пространственное разрешение, контрастность, линейность, однородность и эффективность регистрации (для радиопрепарата Tc-99m)
- Представлены результаты реконструкции ОФЭКТ изображений с использованием различных способов фильтрации. Обоснован выбор метода фильтрации с помощью сверточных нейронных сетей, как обеспечивающего наилучшее пространственное разрешение



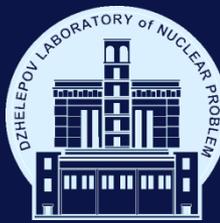
# Положения выносимые на защиту



- Разработана система для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ), на основе маски с кодирующей апертурой типа MURA и гибридного пиксельного детектора Timerix с CdTe сенсором. Экспериментально продемонстрирована возможность применения этой системы для визуализации радиофармпрепаратов.
- Разработана методика измерения характеристик системы ОФЭКТ с высоким пространственным разрешением. Показано, что ОФЭКТ-система на основе маски с кодирующей апертурой типа MURA и гибридного пиксельного детектора Timerix с CdTe обеспечивает высокую пространственную разрешающую способность ( $< 1\text{ мм}$ ) и контрастность при поле зрения ( $57\text{ мм} \times 57\text{ мм}$ ). Экспериментально определены такие характеристики указанной системы, как линейность, контрастность, однородность, эффективность регистрации.
- Экспериментально обоснован выбор метода фильтрации с помощью сверточных нейронных сетей как обеспечивающего наилучшее пространственное разрешение в системах ОФЭКТ с высоким пространственным разрешением.



# Публикации и апробация



- *Visualization of radiotracers for SPECT imaging using a Timepix detector with a coded aperture.* // V.Rozhkov et al. 2020 JINST 15 P06028. Doi: [10.1088/1748-0221/15/06/p06028](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/p06028)
- *Timepix pixel detector data pre-processing for SPECT.* // V. Rozhkov, A. Zhemchugov, A. Leyva, P.Smolyansky. Journal of Physics: Conference Series DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0134345>.
- *Uniformity and sensitivity measurements for small field of view pixelated SPECT system with coded aperture* // V. Rozhkov, A. Zhemchugov, A. Leyva, P. Smolyansky PEPLAN V. 19, №5, 2022  
Doi:[10.1134/S1547477122050363](https://doi.org/10.1134/S1547477122050363)
- *3D visualization of radiotracers for SPECT imaging using a Timepix detector with a coded aperture.* // V.A.Rozhkov, A.S. Zhemchugov, A. Leyva, P.I. Smolyanskiy Physics of Atomic Nuclei. V. 85, 2022.  
DOI:[10.56304/s2d79562922030423](https://doi.org/10.56304/s2d79562922030423)
- *Quantitative Comparison of Planar Coded Aperture Imaging Reconstruction Methods* // T. Meißner, V.Rozhkov, J. Hesser, W. Nahm, N. Loew. JINST DOI: [http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/18/01/P01006](https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/18/01/P01006)



# Публикации и апробация



1. LXX International conference "NUCLEUS – 2020" г. Санкт-Петербург. 2020. Доклад
2. IX летняя конференция молодых ученых и специалистов. г. Алушта, 26 сентября — 3 октября 2020 г.
3. Молодёжная конференция по теоретической и экспериментальной физике. (26-29 Nov. 2019)
4. V International Symposium on «Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine».
5. Medipix Collaboration meeting 2021 (18-19, Nov. 2021) in Prague
6. LXXI международная конференция NUCLEUS – 2021, г. Санкт-Петербург. 20-25 сентября 2021 г.
7. Межвузовская молодёжная школа-конференция им. Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 22-23 ноября 2021 г.
8. Молодёжная конференция по теоретической физике 2021. г. Москва 16-20 ноября 2021 г.
9. XXV international scientific conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2021) 11-15 Oct. 2021
10. JINR Association of Young Scientists and Specialists Conference «Alushta-2021» 8-15 June 2021
11. JINR Association of Young Scientists and Specialists Conference «Alushta-2022» 5-12 June 2022
12. XXV international scientific conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022) 24-28 Oct. 2021
13. LXXII международная конференция NUCLEUS – 2022, г. Санкт-Петербург. 11-16 июля 2022 г.
14. IV International Scientific Forum «Nuclear science and Technologies», г. Алматы, Казахстан, 26-30 сентября 2022г.
15. XVIII Workshop on Nuclear Physics, г. Гавана, Куба, 17-22 октября 2022 г.
16. XVIV Workshop on Nuclear Physics, г. Гавана, Куба, 7-11 октября 2024 г.



**Спасибо за внимание!**