

**Современные портативные
системы для получения гамма-
изображений и их необходимость
при проведении характеристики,
вывода из эксплуатации и
реабилитации ядерно-опасных
объектов**

**А.Г.Волкович, В.Е.Степанов, О.П.Иванов,
В.Н.Потапов**

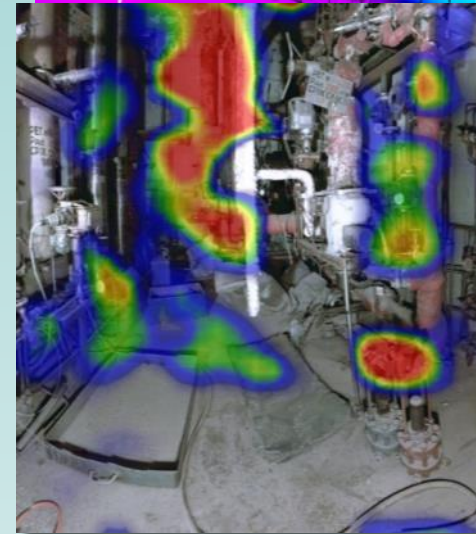
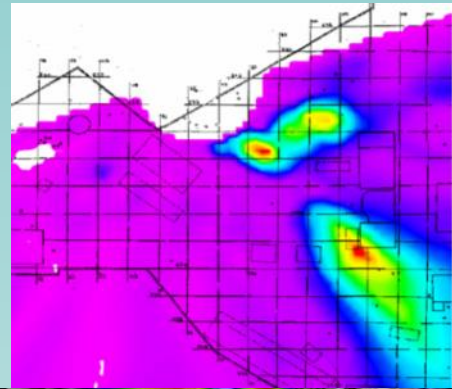
**НИЦ Курчатовский институт
Volkovich_AG@nrcki.ru**

**XVI Международное совещание
«Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» им. В.Н.Даниленко
16 - 18 октября 2023 г. Москва**

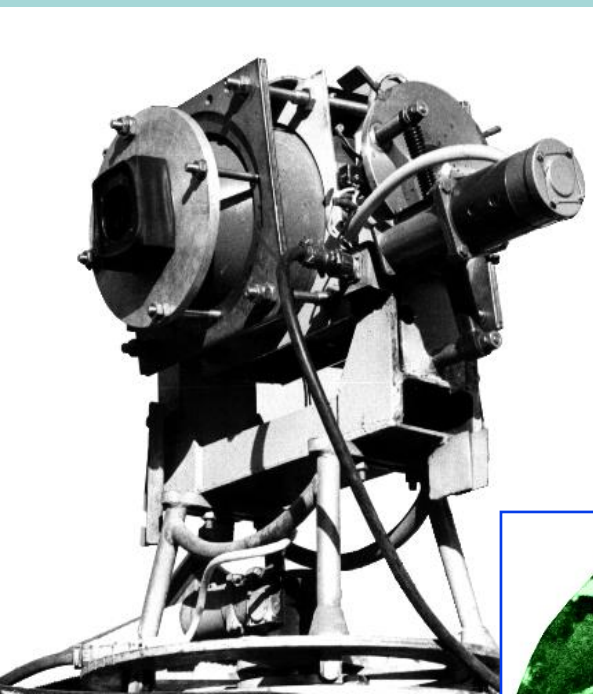
План

Какие задачи, какими приборами
Примеры проводимых работ и изображений
Новые приборы
Неожиданные результаты
Выводы

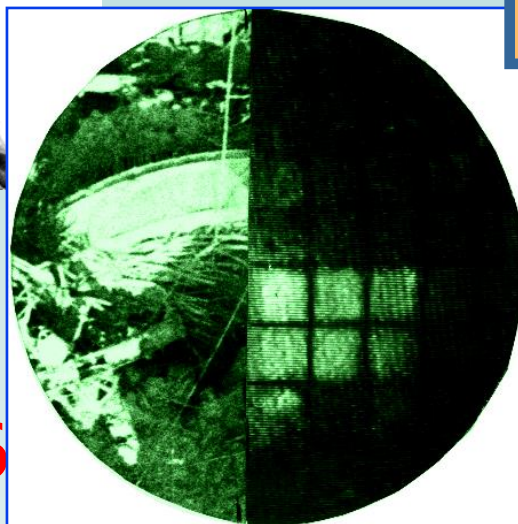
- Сканирование загрязненных помещений
- Гамма картирование загрязненного оборудования при выводе из эксплуатации
- Сканирование загрязненных объектов
- Контроль при проведении демонтажа
- Поддержка при переработке отходов, (кондиционирование)
- Контроль упаковок с отходов
- Создание и проверка радиационной защиты,
- Поиск потерянных источников, контроль за их перемещением
- Неразрушающий контроль с использованием гамма и рентгеновского излучений
- ЧС, поиск источников в окружающей среде
- И т д и т д



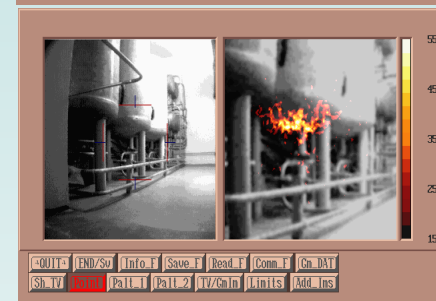
Все началось с работ по ликвидации аварии на 4-ом блоке ЧАЭС



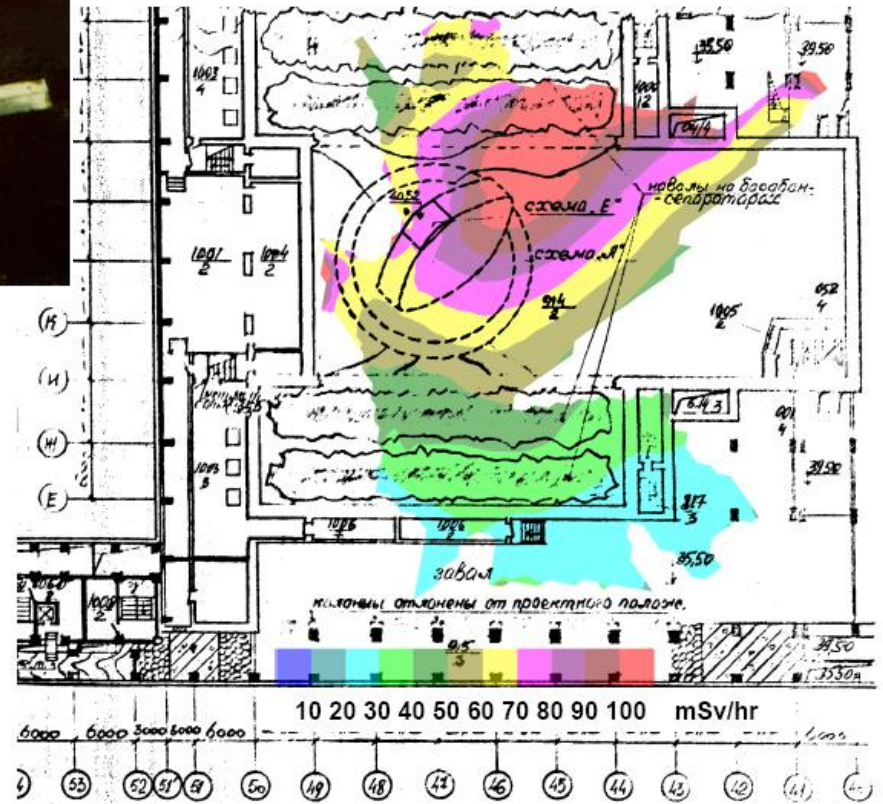
Гаммавизор
на ЧАЭС, 1986



Первый
компьютеризи-
рованный
гаммавизор,
1995



Гамма-локатор в ЦЗ 4-го блока ЧАЭС 1996



Портативные приборы – возможные методы получения гамма изображений

«Устоявшиеся методы»

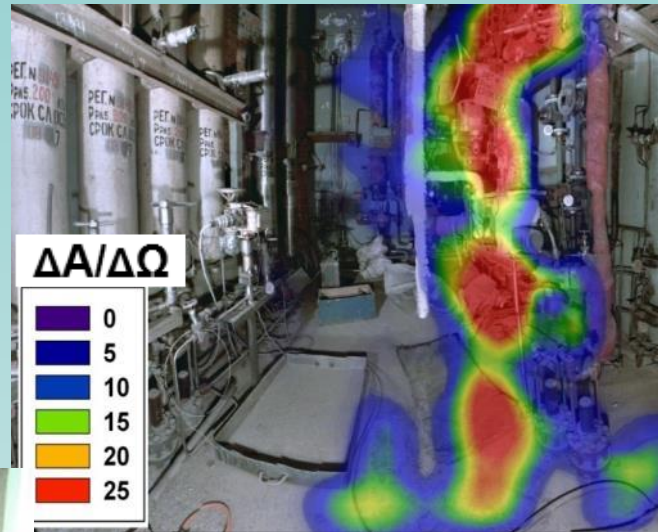
Сканирование коллимированным детектором

ПЧД с конусным (пинхольным) коллиматором

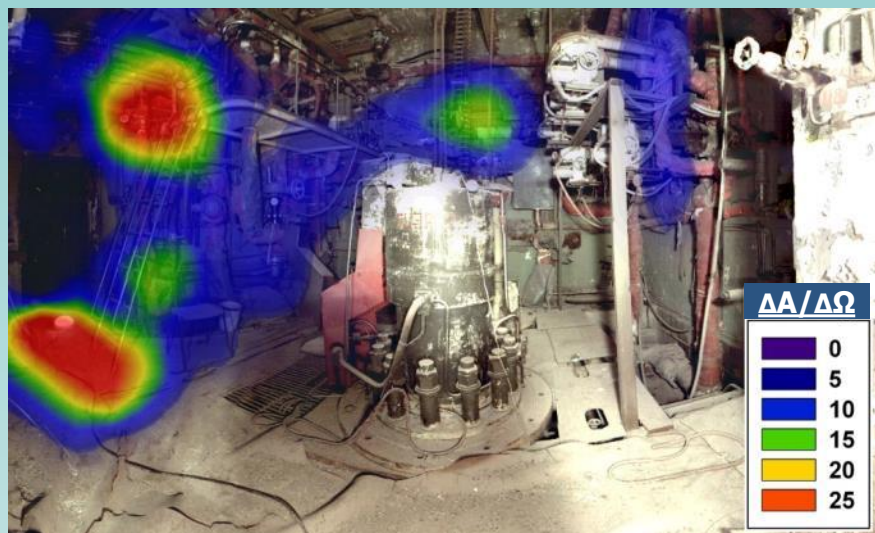
Новые методы

Кодирующая апертура (маска)

Комптоновская камера



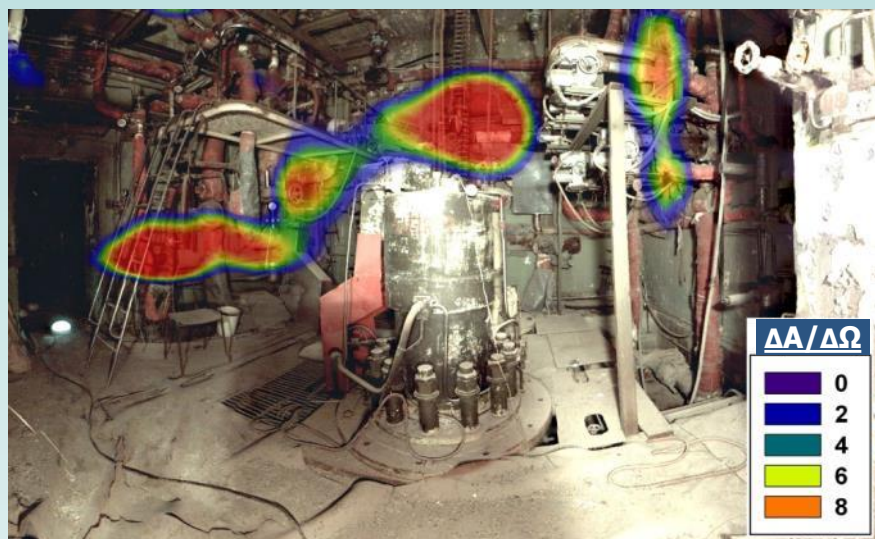
Изображения распределения активности



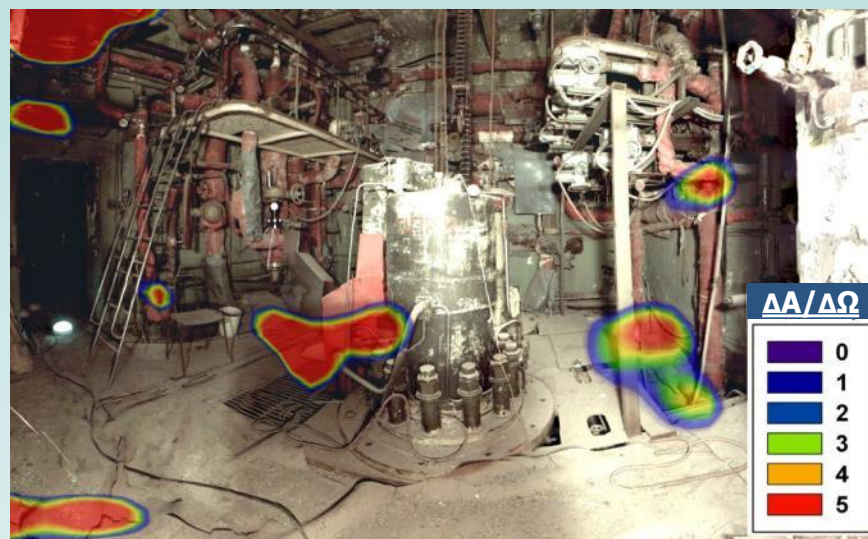
Суммарная активность ^{60}Co : $1.36 \cdot 10^9 \text{Bq}$



Суммарная активность ^{137}Cs : $3.82 \cdot 10^9 \text{Bq}$

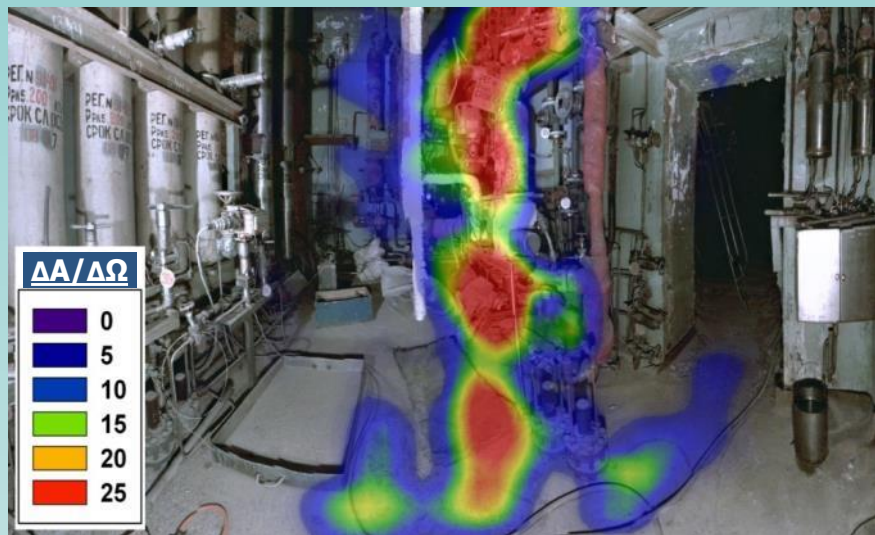


Суммарная активность ^{60}Co : $5.73 \cdot 10^8 \text{Bq}$
(Моделирование работ по демонтажу)

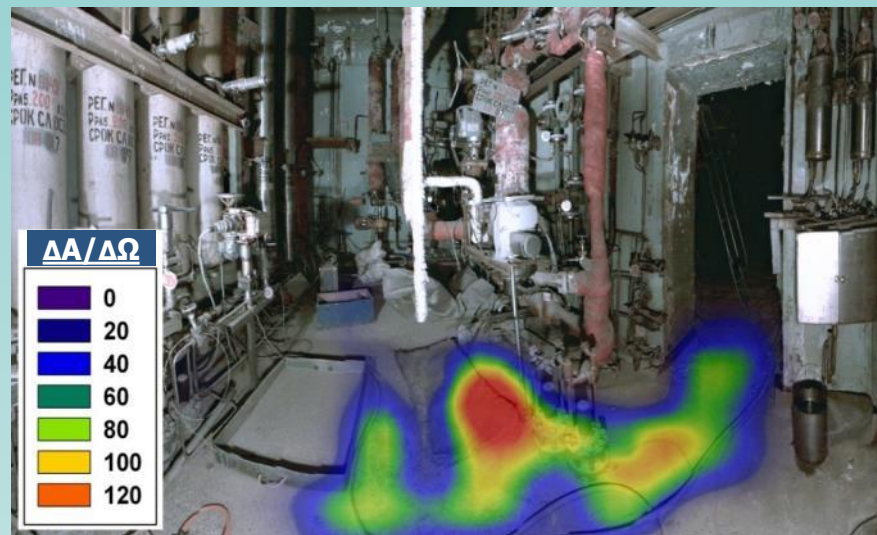


Суммарная активность ^{137}Cs : $3.54 \cdot 10^8 \text{Bq}$
(Моделирование работ по демонтажу)

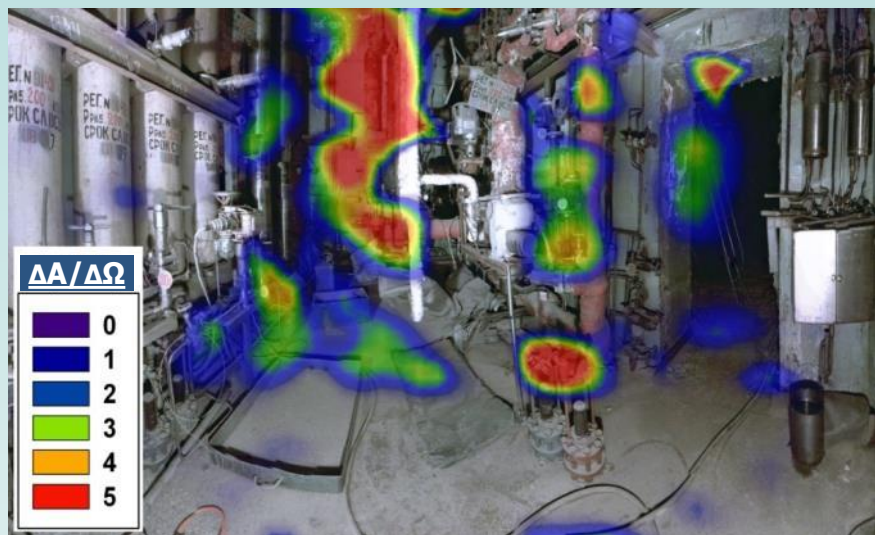
Изображения распределения активности



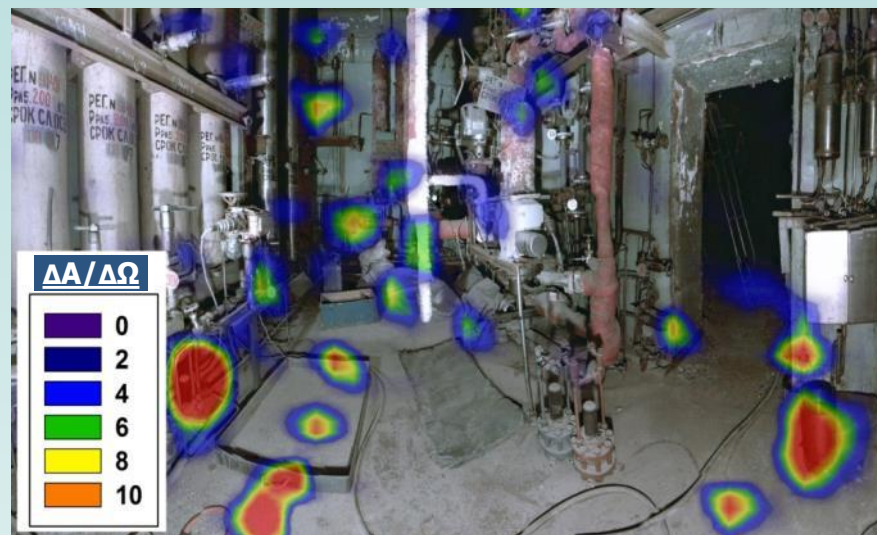
Суммарная активность ^{60}Co : $2.12 \cdot 10^9 \text{Bq}$



Суммарная активность ^{137}Cs : $5.9 \cdot 10^9 \text{Bq}$



Суммарная активность ^{60}Co : $3.67 \cdot 10^8 \text{Bq}$
(Моделирование работ по демонтажу)



Суммарная активность ^{137}Cs : $2.59 \cdot 10^8 \text{Bq}$
(Моделирование работ по демонтажу)

Портативные гамма-камеры (гаммавизоры)

Гамма-камера с дистанционным управлением применяется для получения детального распределения радиоактивности. Для работы в сильно загрязненных помещениях с неравномерным фоновым излучением эта камера оснащена вращающейся кодирующей маской

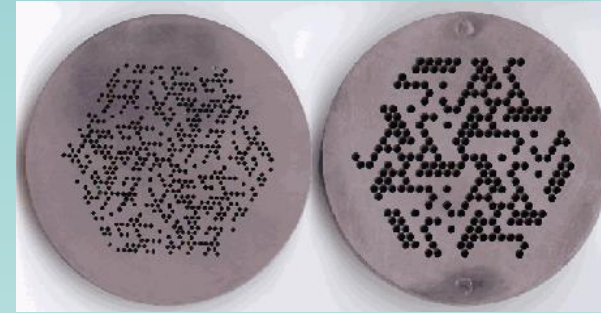
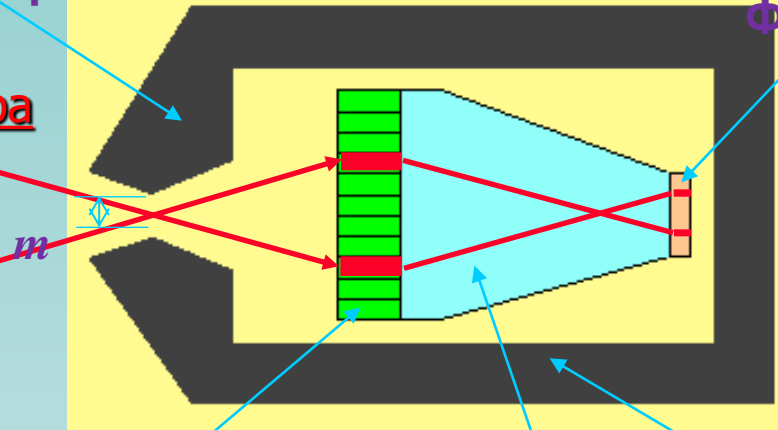


Принцип работы «механических» гамма-камер

Коллиматор

Фотодетектор

обскура



$$\delta\Omega = m/f$$

$$d = m \cdot (L+f) / L$$

$$h = d \cdot L / f$$

$$\Omega = m(2R+1) / f$$

$$\delta\Omega = m/f$$

Радиоактивные источники

Сцинтилляционный детектор

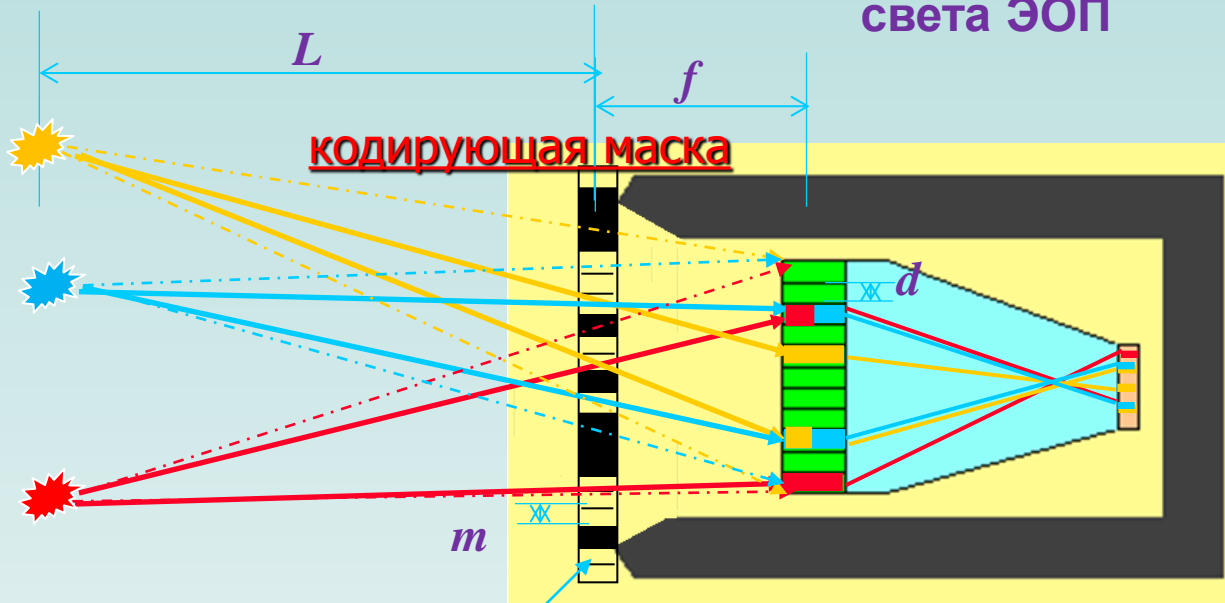
Защита

Усилитель света ЭОП

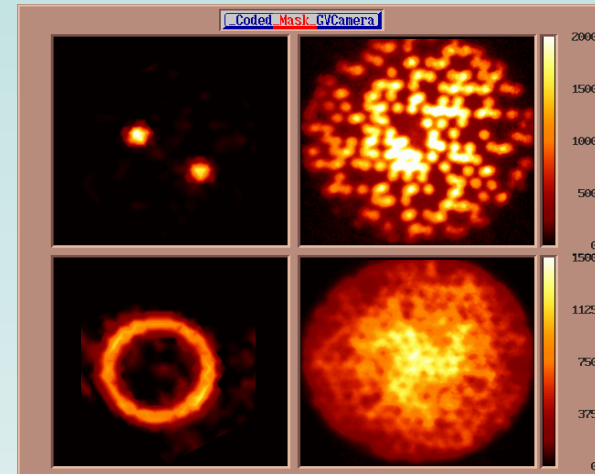
L

f

кодирующая маска



Маска

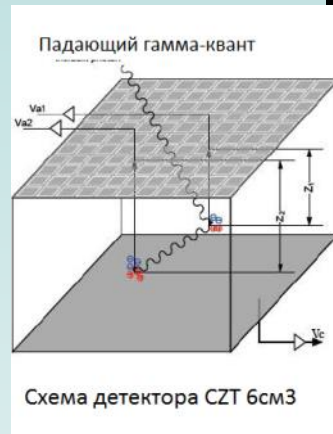
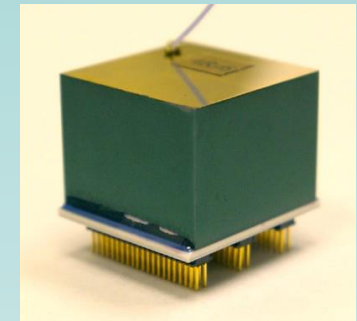
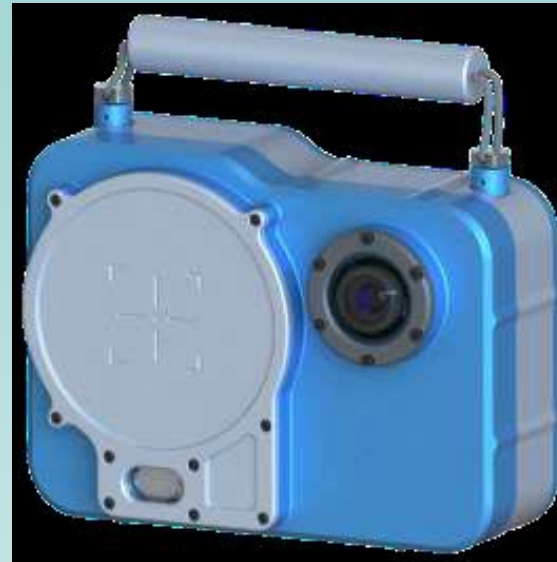
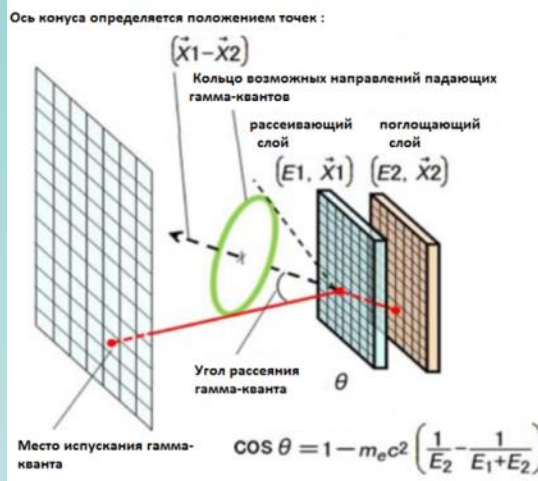


Комптоновская камера. Электронная

принцип работы комптоновской камеры.

Система Поларис НҚ

В ней 4 объемных
детектора CZT
2x2x1.5 см



Спектры от одного пикселя с разной глубины

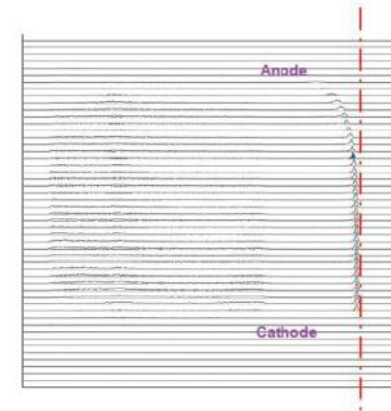
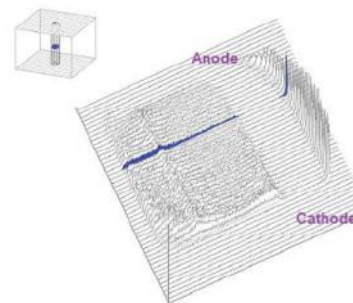


Схема сбора сигнала и определения положения событий в 3D CZT детекторе [2]. Координаты (x, y) определяются по пикселу анода, на который собирается заряд, а координата z определяется с использованием разности между временами прихода носителей на катод и анод. Энергия находится по собранному на аноде заряду с поправкой на положение точки взаимодействия в глубине кристалла z.

Характеристики гамма-камер:



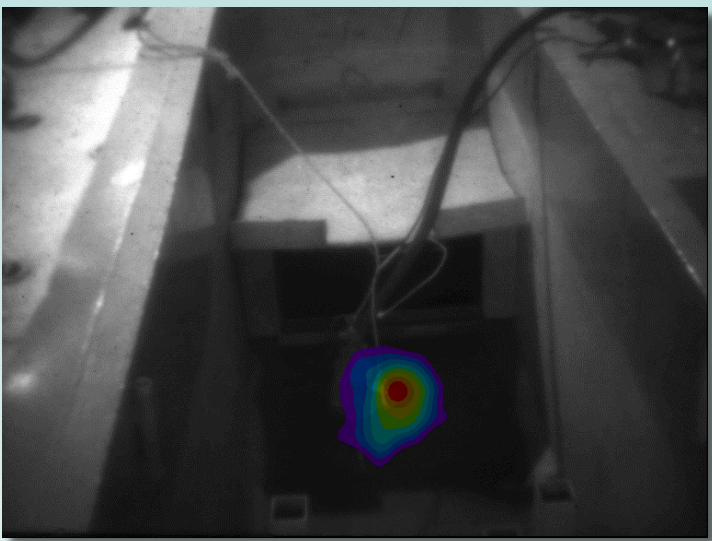
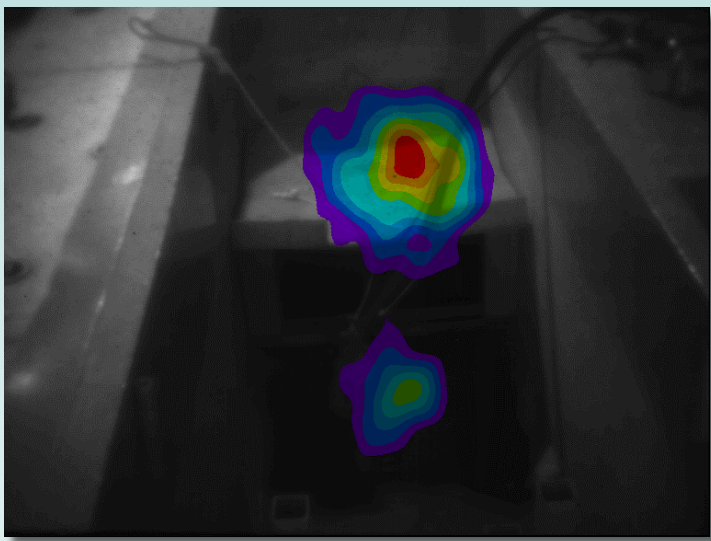
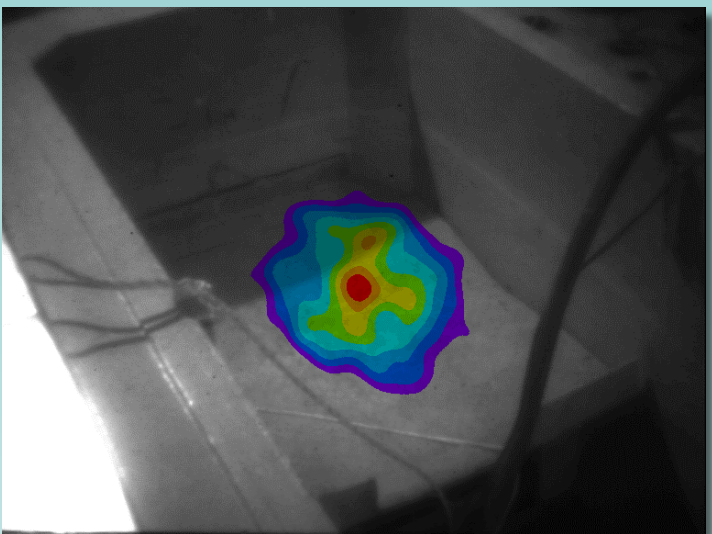
Камера, ссылка	тип	Энергетический диапазон, МэВ	Энергетическое разрешение, % @662кэВ	Угловое разрешение, град	Чувствительность, изображение, нЗв @662кэВ	Площадь детек., см ²	Объем дет., см ³	Материал детектора
КИ[1,2]	P-h	0.06-1.5	--	2	50	10	3	CsI(Tl)
КИ [5]	C-A	0.06-1.5	--	2	5	10	3	CsI(Tl)
Cartogam, Canberra, [7]	P-h	0.04-1.5	--	3	30	8	3.2	CsI(Tl) --
КИ [8]	C-A	0.04-1.5	--	1.2	150	2	0.4	CdTe
iPIX, Canberra, [9]	C-A	0.04-1.5	~8	2 - 5	20	2	0.4	CdTe
ФВКМ, Доза, [10]	C-A	0.04-1.5	--	0.5 - 3	50	2	0.4	CdTe
Polaris, НЗД, [11]	C-C	0.04-1.5 (<0.25 С-А или Р-Н)	1.1	20 (положение 5)	0.8	4 x 4	~20	CZT



НТК "Р"



Поиск горячих точек в лотке для подводной резки элементов петлевых установок реакторов



Выгрузка РАО из хранилища #4

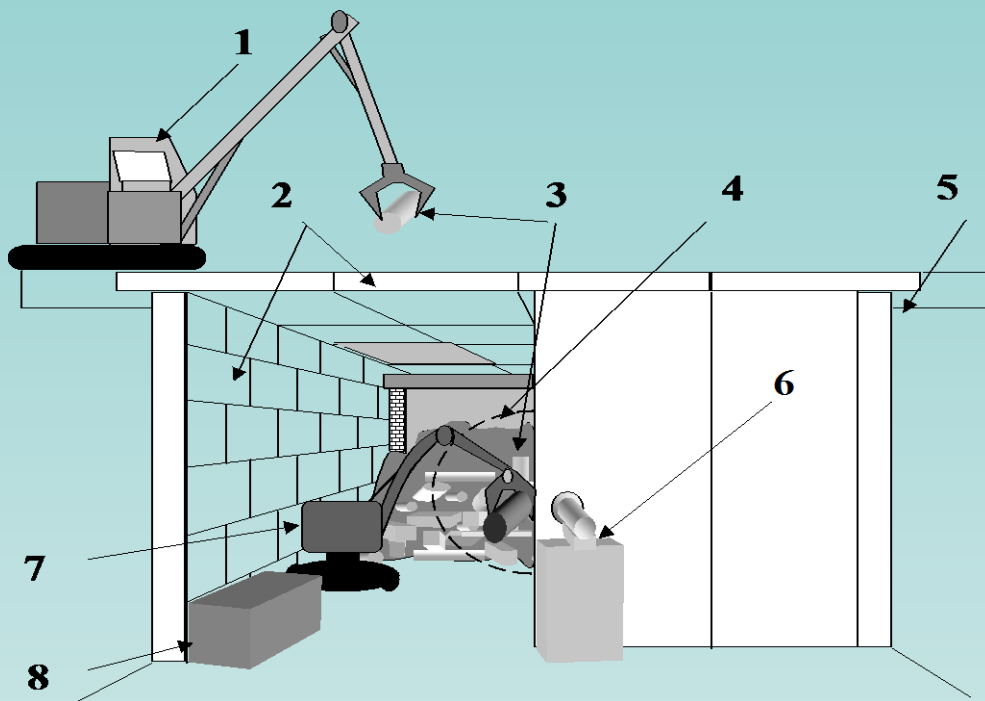


Схема хранилища РАО.

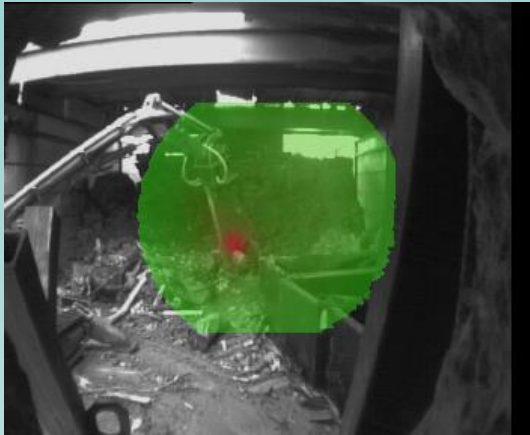
1 - экскаватор, используемый для извлечения радиоактивных отходов из хранилища,
2 - дополнительная экранирующая конструкция бетонных блоков с потолком из бетонных плит,
3 - радиоактивные отходы, подготовленные для загрузки в контейнеры,
4 - поле зрения гамма-камеры,
5 - уровень земли,
6 - гамма-камера, установленная на стенде у входа в хранилище,
7 - радиоуправляемый робот BROKK,
8 - усиленный контейнер для высокоактивных радиоактивных отходов.

Наложение необработанных гамма-изображений, представленных в псевдоцветках на черно-белые видеоизображения

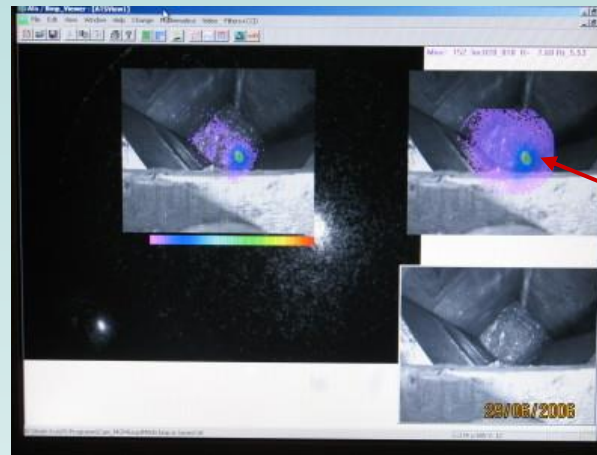


Гамма-изображения хранилища, полученные при извлечении фрагмента высокоактивных радиоактивных отходов

Гамма-изображения при работе с РАО



манипуляция с радиоактивными отходами высокого уровня с использованием робота, контролируемая непрерывной гамма-визуализацией.



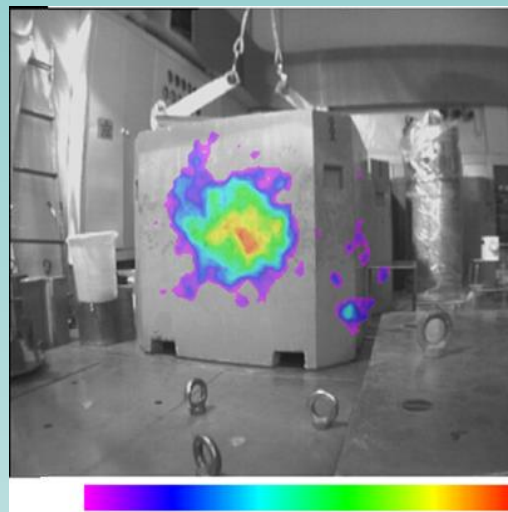
ИСТОЧНИК

Мониторинг извлечения РАО из глубинного хранилища (слева - система установлена над хранилищем, справа - изображение яркого источника в нижней части хранилища)

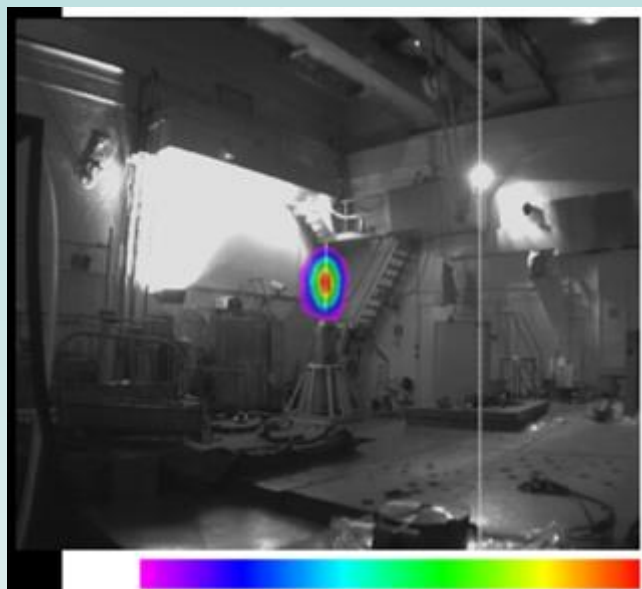
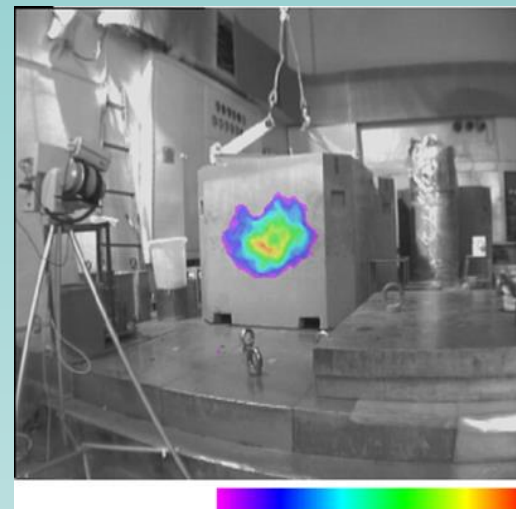
Получение изображений в широком диапазоне внешних условий



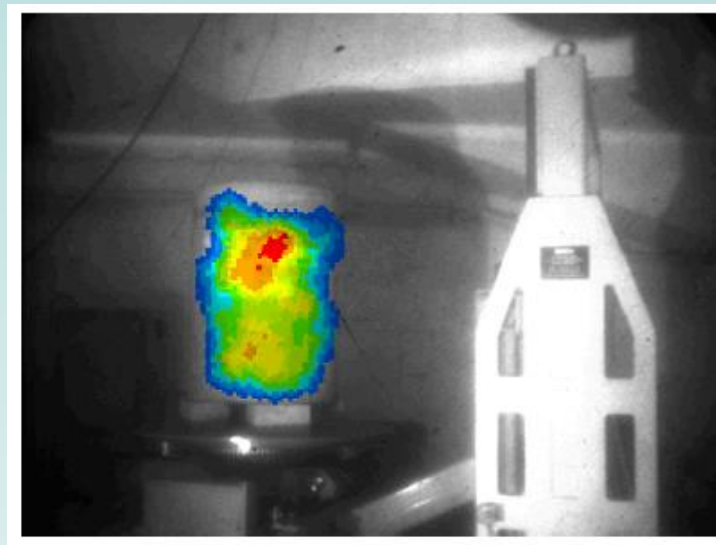
МЭД: 200 мР/ч



2,75 м_ МЭД: 40 мР/ч 4,0 м_

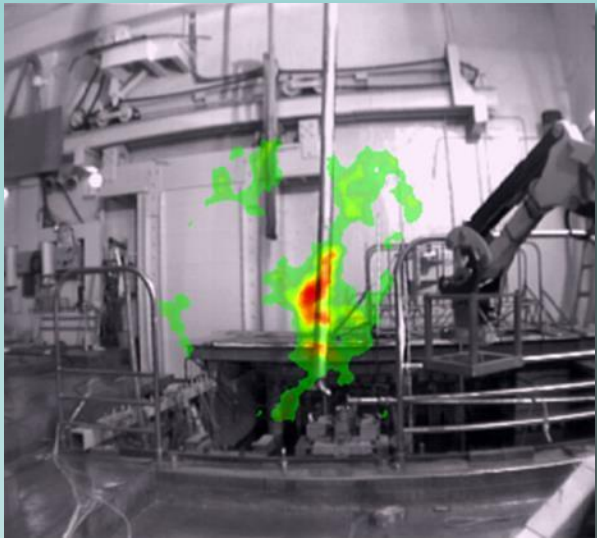


МЭД: 2,5 Р/ч

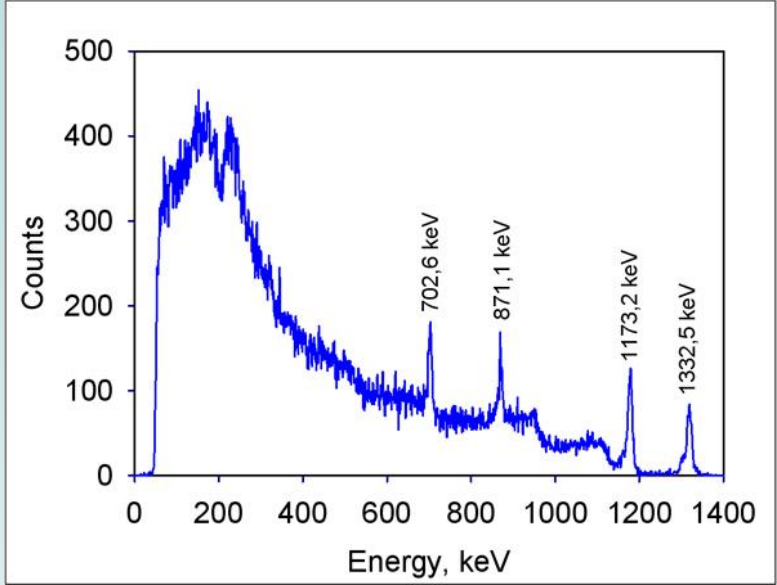


МЭД : 30 мкР/ч

Обследование элементов петлевых каналов



Гамма изображение наложено на видео.

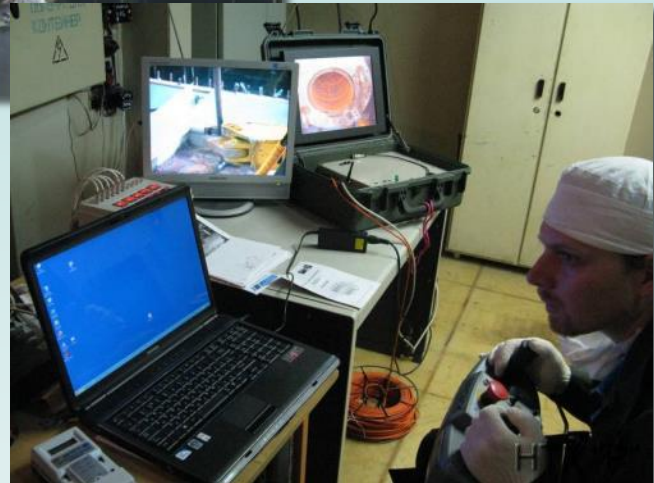


Гамма спектр канала (детектор CdZnTe).

Резка элементов петлевых каналов



Проведенный анализ позволил определить оптимальную схему резки и упаковки элементов петлевых каналов в зависимости от активности их загрязнения



Новые гамма камеры

Детектор Medipix2 с кристаллом CdTe 2 (1) мм и кодирующие маски используются в трех сверхлегких портативных камерах

Прототип НИЦ
КИ



Камера ФВКМ
Фирма «Доза»



Camera iPIX,
Canberra

Прототип сверхлегкой гамма-камеры НИЦ КИ для задач безопасности и аварийных ситуаций

Поле зрения видеоканала $\sim 49^\circ$.
 Поле зрения гамма канала $\sim 30^\circ$.
 Чувствительность системы с гексагональной маской (источник Cs-137, $E_\gamma = 662\text{keV}$) по дозе $\sim 100 \text{ мкР}$



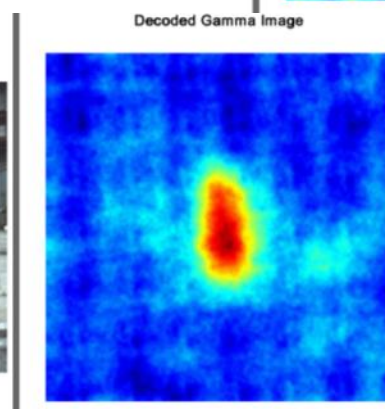
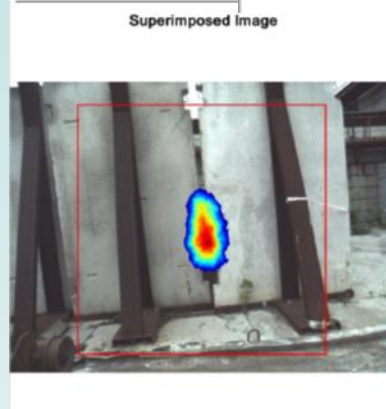
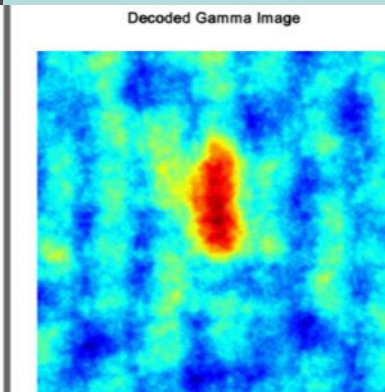
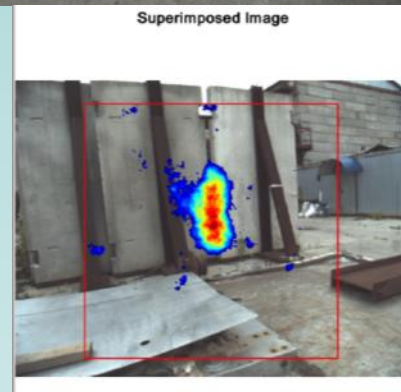
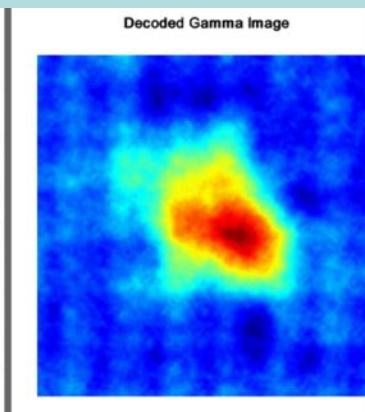
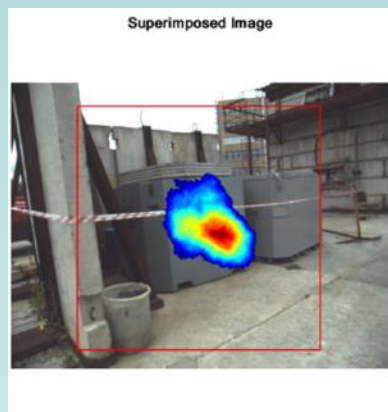
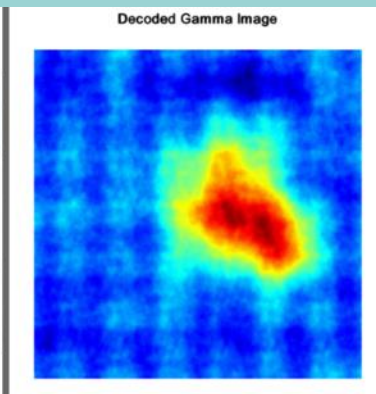
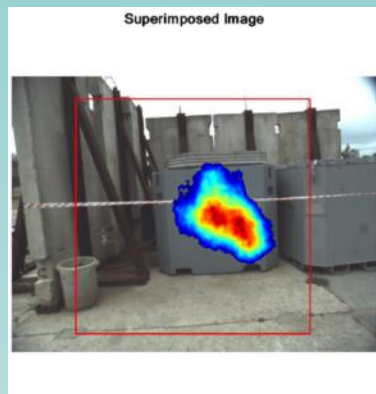
Детектор Медипикс2 с модулем связи FITPiX и блок кодирующей маски – основа камеры



Вес компонентов системы для работы «с рук» (грамм)

Компьютер	960
Детектор Медипикс в сборе	110
Кабели	80
Корпус детектора и маска	740
Общая рама	720
Всего	2610

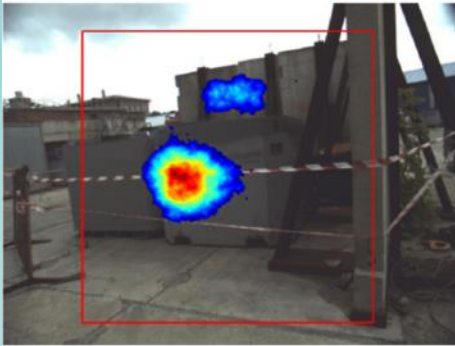
Контейнеры с РАО в пеналах (iPIX)



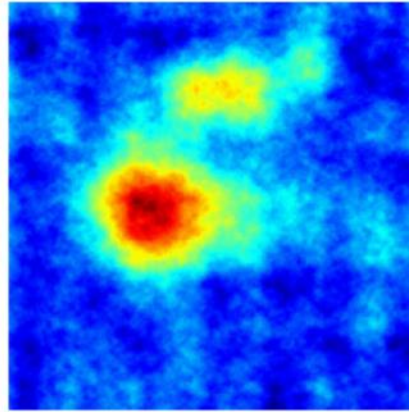
Прохождение излучения
через щель в защитной
стенке

Загрязнение стены источниками или рассеяние? (iPIX)

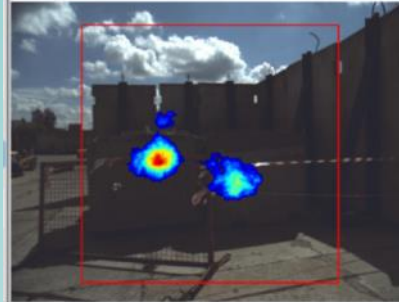
Superimposed Image



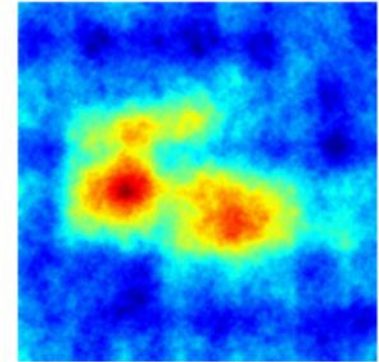
Decoded Gamma Image



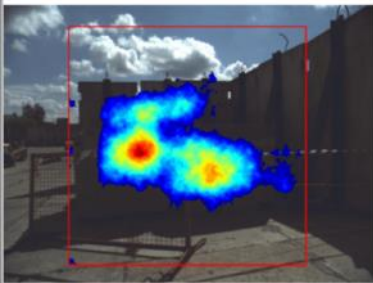
Superimposed Image



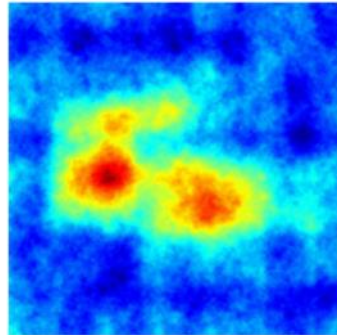
Decoded Gamma Image



Superimposed Image

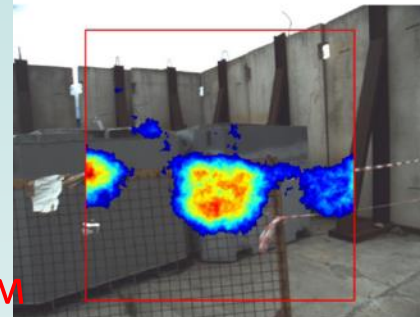


Decoded Gamma Image

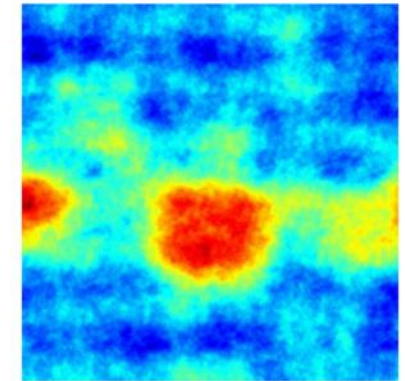


Представление гамма-изображения с разным уровнем дискриминации

Superimposed Image

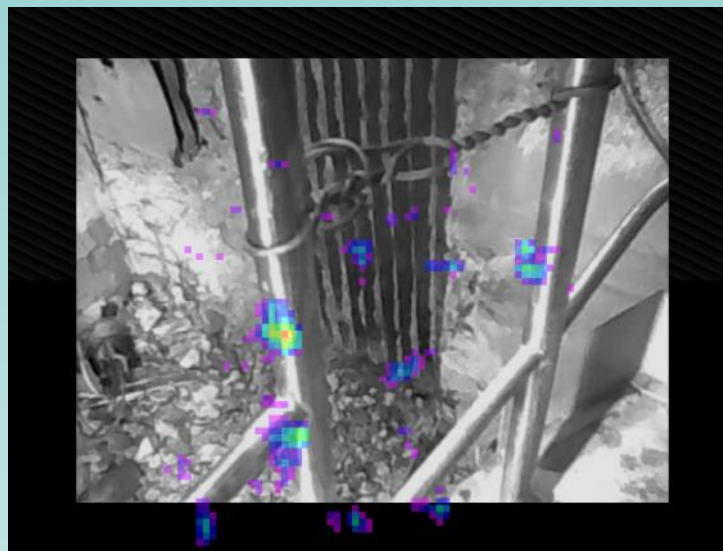
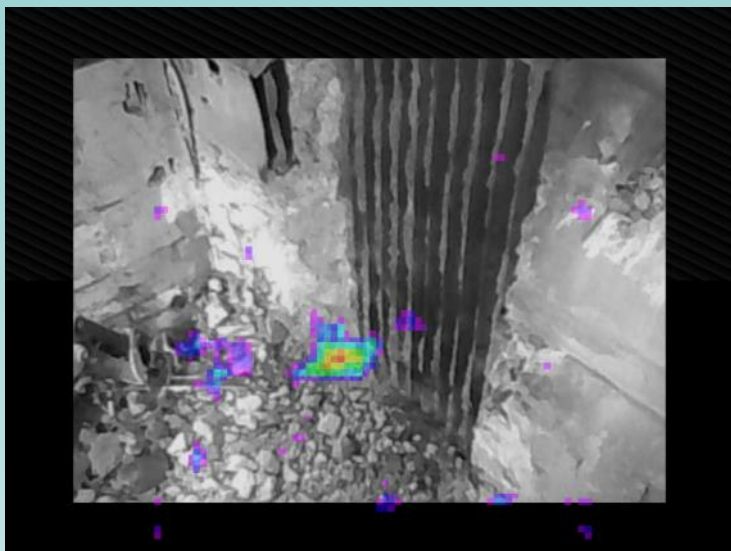


Decoded Gamma Image



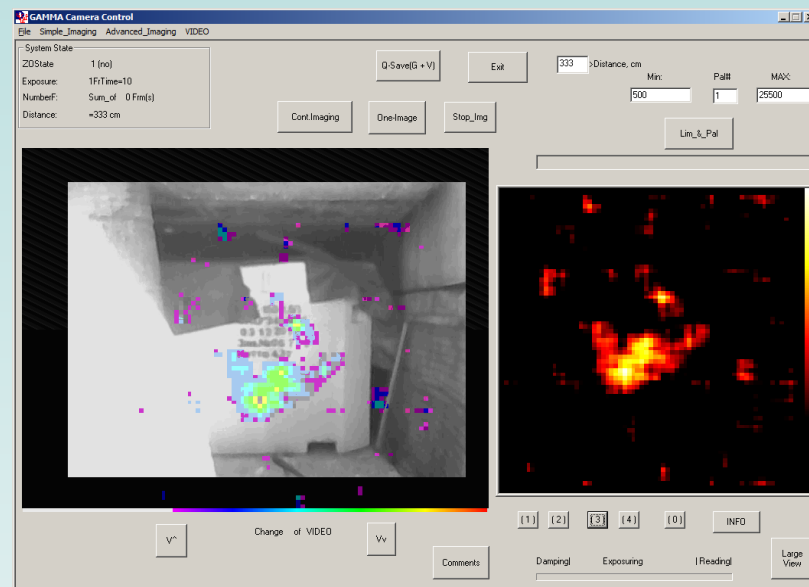
Артефакты в изображении контейнеров при неполном кодировании

Изображения от камеры фирмы «ДОЗА»

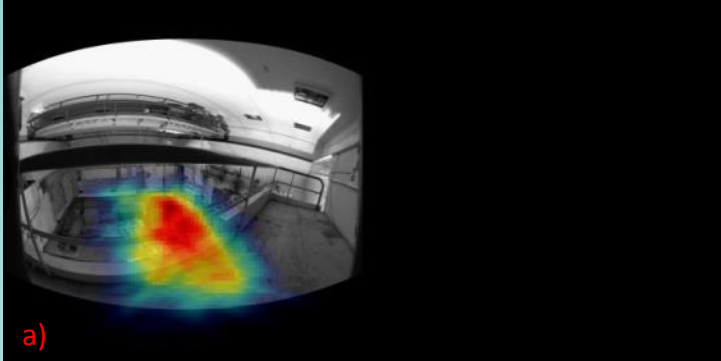


Поиск остаточного загрязнения в зале реактора МР

Распределение РАО в контейнера

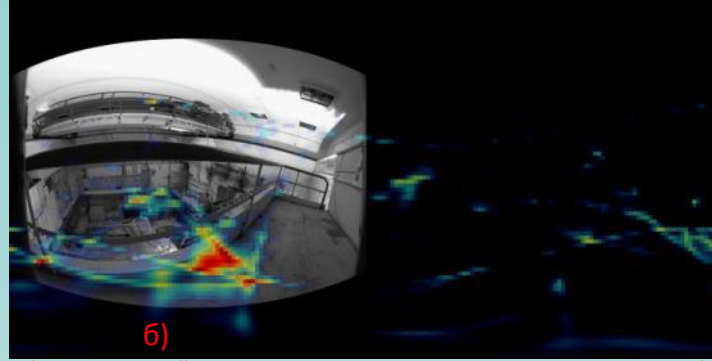


Изображения от камеры Поларис

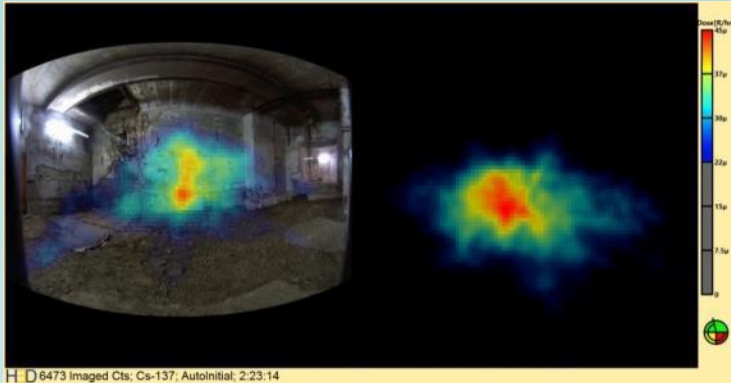


а)

Загрязнение в зале реактора, выведенного из эксплуатации. а) Cs-137, б) Co-60. МЭД в точке расположения прибора 1.0мР/ч, МЭД в области расположения активных источников 30 мР/ч, расстояние до этих областей примерно 15м. Экспозиция 240 сек.



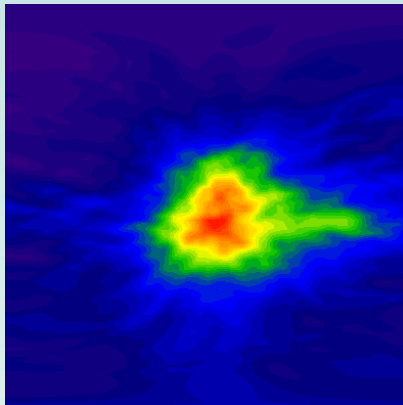
б)



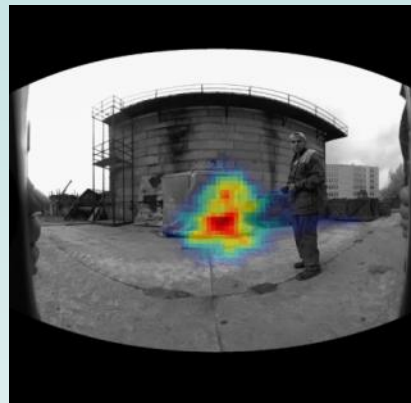
H D 6473 Imaged Cts: Cs-137, Autofinal, 2.23.14

Остаточное загрязнение на стене помещения, нуклид Cs-137. МЭД в точке расположения прибора 30 мкР/ч, МЭД на расстоянии 10 см пятен 60 мкР/ч, расстояние до стен примерно 3 м. Экспозиция 8000 сек.

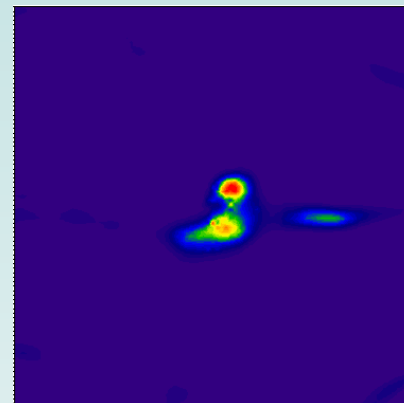
Улучшение разрешения полученных изображений



Исходное изображение




Исходное гамма и видео



После 1000 итераций

Новые камеры с детектором Медипикс 2019, CEA

list **FROM CARTOGAM TO NANOPIX...**
... THE SMALLEST CODED APERTURE GAMMA CAMERA



8 cm x
5,1 cm x
4,3 cm
268 g!

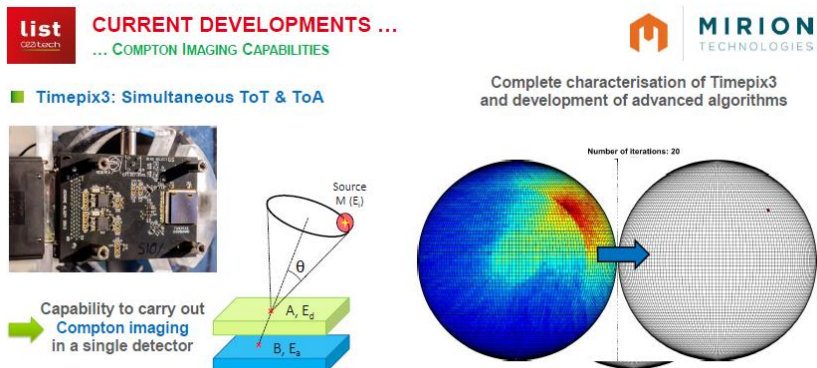
orano

list **CURRENT DEVELOPMENTS ...**
... COMPTON IMAGING CAPABILITIES

MIRION TECHNOLOGIES

Complete characterisation of Timepix3 and development of advanced algorithms

Timepix3: Simultaneous ToT & ToA



Capability to carry out Compton imaging in a single detector

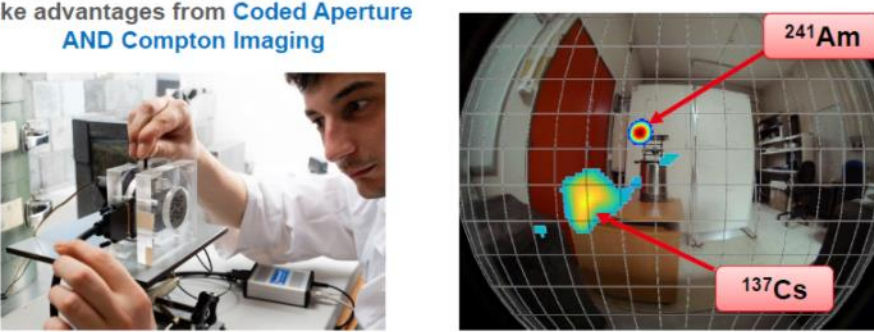
Guillaume Amoyal – 2019 – Development of an hybrid gamma camera TPX3

Vincent SCHOEPPF | Gamma & Neutron Imaging for Nuclear Industry and Homeland Security Applications | 19

list **CURRENT DEVELOPMENTS ...**
... IMPLEMENTATION IN AN HYBRID IMAGER

MIRION TECHNOLOGIES

Take advantages from Coded Aperture AND Compton Imaging



241Am

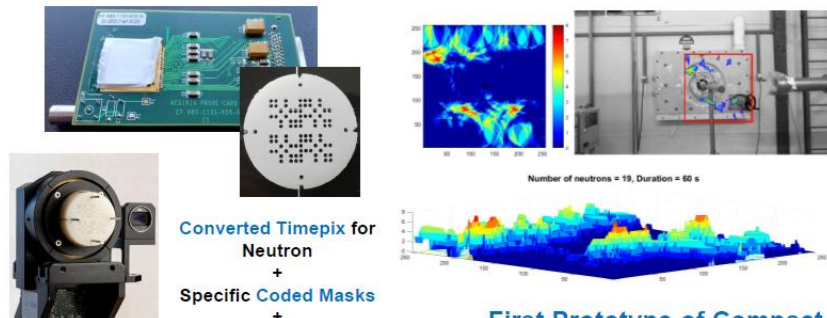
137Cs

Guillaume Amoyal – 2019 – Development of an hybrid gamma camera TPX3

Vincent SCHOEPPF | Gamma & Neutron Imaging for Nuclear Industry and Homeland Security Applications | 20

list **CURRENT DEVELOPMENTS ...**
... NEUTRON IMAGING CAPABILITIES

orano



Converted Timepix for Neutron + Specific Coded Masks + Processing algorithms

First Prototype of Compact Neutron Imager

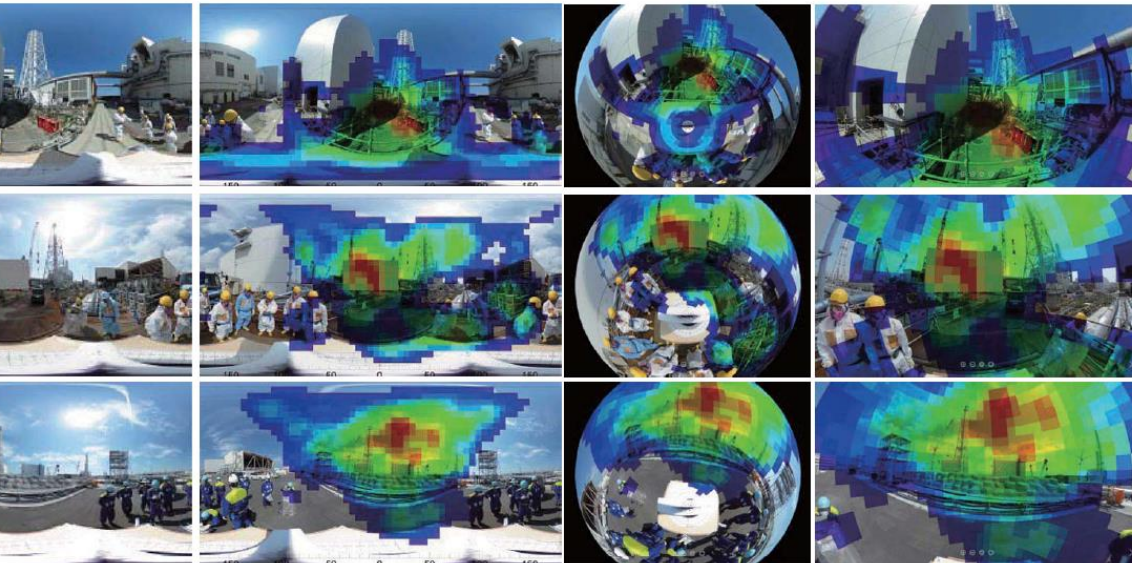
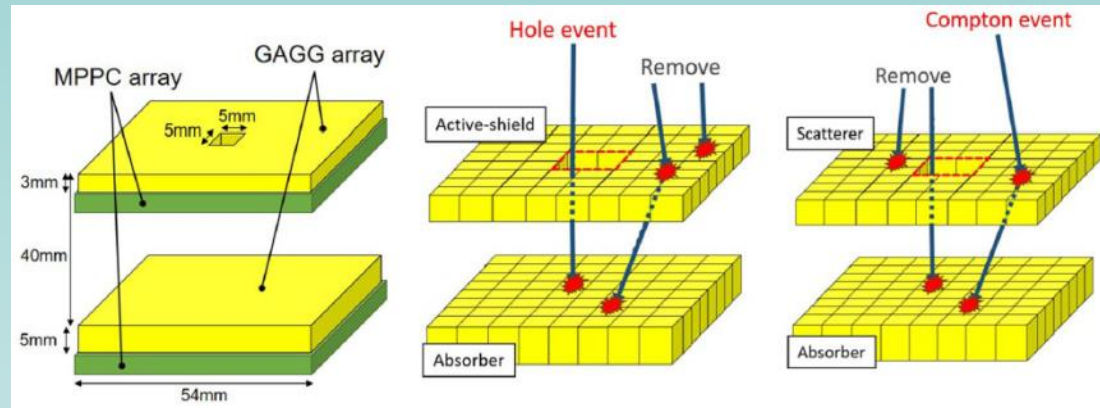
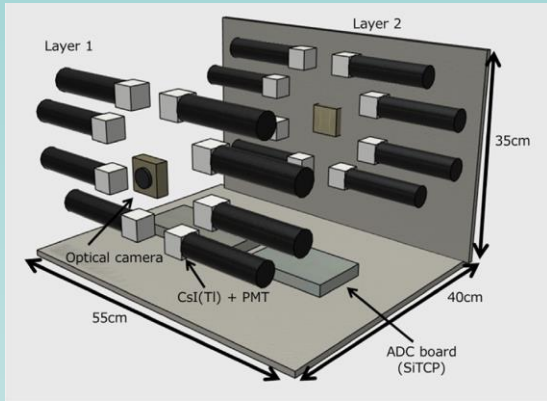
Clément Lynde – 2019 – Development of portable neutron camera TPX

121

Новые комптоновские камеры

Набор отдельных модулей Сцинтиллятор-ФЭУ (или CZT)

Сцинтиллятор со считыванием сигнала матрицей SiPM (MPPC array -Hamamatsu



Material	Density (g/cm ³)	Light yield (NaI=100 %)	Decay (ns)	Application
LFS	7.35	85	33	PET, HEP
LYSO	7.25	80	41	PET, HEP
NaI:TI	3.67	100	230	γ-ray, X-ray
CsI	4.53	120	1050	X-ray CT
CWO (CdWO ₄)	7.68	40	5000	X-ray CT
BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	7.13	12	300	PET, HEP
PWO (PbWO ₄)	8.20	1.3	10	HEP
GAGG	6.63	140	88	HEP

Новые быстрые сцинтилляторы LFS LYSO GAGG
LFS-3 (Ce_xLu_{2+2y-x-z}Al_zSi_{1-y}O_{5+y}) - (Lutetium Fine Structure)
LYSO (Ce) - ортосиликат лютеция-иттрия (Lu₂SiO₅: Ce)
GAGG (Ce) (Ce: GAGG, Gd₃Al₂Ga₃O₁₂) - новый сцинтиллятор

Камера Дельта Т

Детекторы:

CeBr3, объем 17 см3

CeBr3 5.10 6000ph/Mev 20 4.5% при 662 370nm

CZT, объем 0,5 см3

Энергетический диапазон:

регистрируемого гамма-излучения 0,05 ÷ 3 МэВ

визуализируемого гамма-излучения 0,3 ÷ 3 МэВ

Энергетическое разрешение ПШПВ для энергии 662 кэВ, не более 1,5 %

Угловая точность локализации одиночного точечного источника, не более $\pm 1^\circ$

Угловое разрешение источников с энергиями 0,3 ÷ 3 МэВ, не более 8°

Видеокамера $95^\circ \times 95^\circ$

Максимальная рабочая мощность дозы должна быть не более 2 мЗв/ч

Время детектирования точечного источника Cs 137 (0,03 мкЗв/ч), не более 30 с

Время локализации точечного источника Cs 137 (0,03 мкЗв/ч), не более 60 с

Время установления рабочего режима при температуре $+23^\circ\text{C}$, не более 5 мин

Интерфейс связи

Ethernet, Wi-Fi (опционально)

Диапазон рабочих температур минус $20 \div +40^\circ\text{C}$

Габариты модуля детектирования:

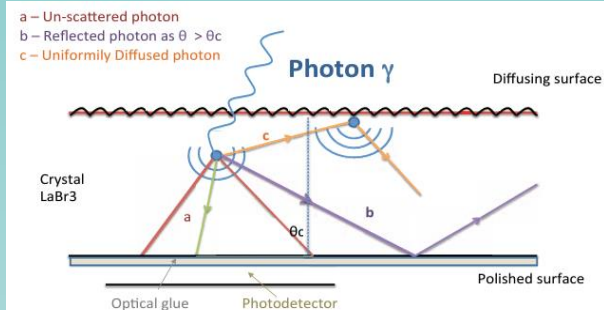
без защитного каркаса

310×210×240 мм

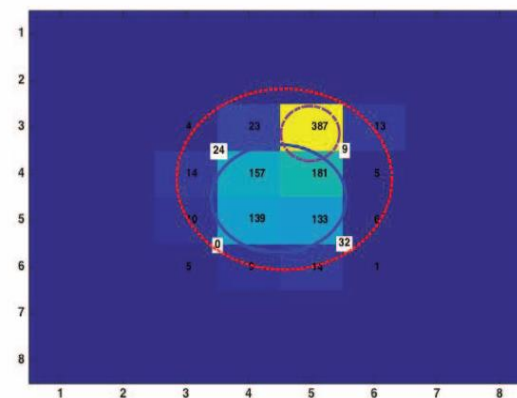
с защитным каркасом

310×260×240 мм

Вес: без защитного каркаса 5,0 кг



(a)



Необычные применения портативных гамма-камер

при наблюдении радиоактивных источников

Polaris, H3D

Temporal δ , Damavan Imaging

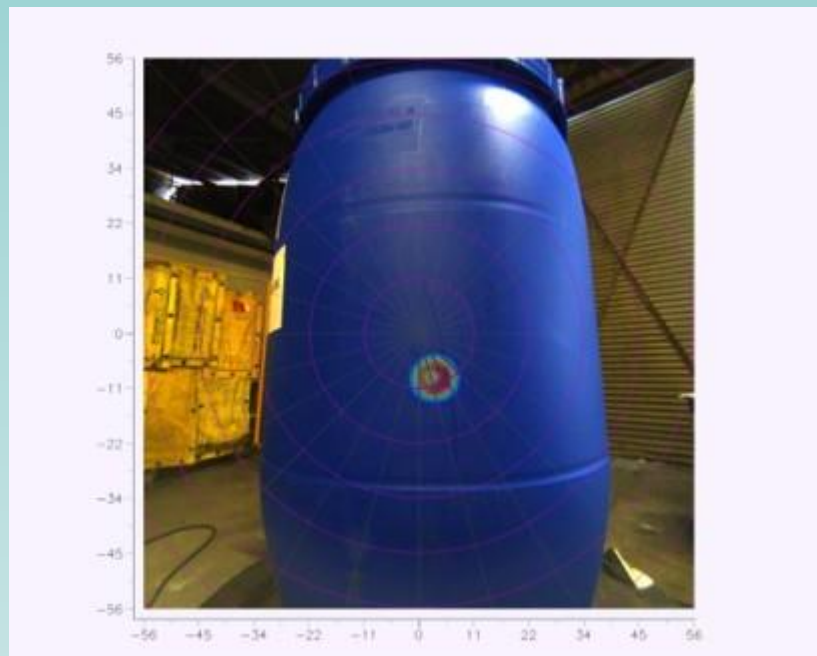
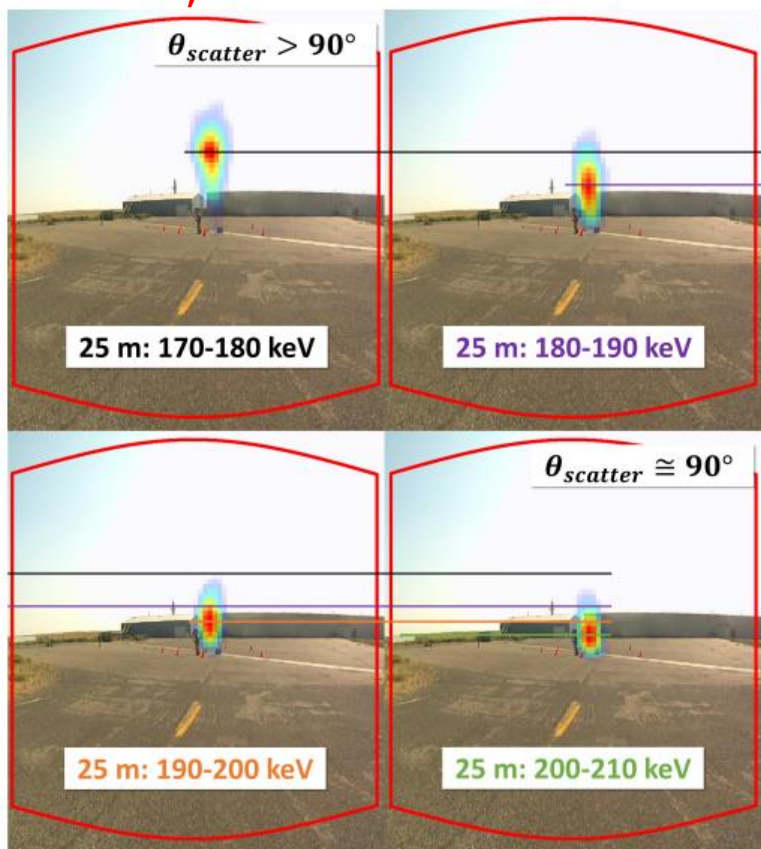


Figure 4.19: Energy-dependent coded aperture reconstructions of air-scattered gamma rays above a lead collimator at a source-to-detector standoff of 25 m. Air scattered spectra from the base of the beam are harder due to the negative correlation between Compton scatter angle and outgoing gamma-ray energy. Color coded lines at the center of each reconstruction are added to guide the eyes.

It is impossible to detect directly the weak lines of U-235, or plutonium, or Am-241 which are below 300 keV with a Compton camera. Anyway those lines are difficult to correctly image with coded mask cameras in realistic situations because they are screened out by shielding and often swamped in the background of diffused photons... But this image of radiation in 0.7-1.8 MeV connected with Am-241 source..

(<https://damavan-imaging.com/2023/04/07/neutron-image-activation-fissile-materials/>)

Collimated ^{83}Ci Ir-192 source, strongest emission triplet in 295-316, 468 keV.

(David I. Goodman, Passive Characterization of Unknown Spaces Using Large-Volume Pixelated CdZnTe Dissertation: The University of Michigan 2019)

16 задач для использования гамма-камер (на действующих блоках по мнению НЗД)

1. Определение расположение основных источников излучения/МЭД перед началом работ
2. Дизайн и оптимизация экранирующей защиты
3. Поиск дискретных радиоактивных частиц
4. Поиск изотопов в транспортных контейнерах
5. Поиск и слежение за активностью в трубах и клапанах
6. Отслеживание источников во времени
7. Идентификация целостности топлива (в системе КГО?)
8. Контроль дезактивации
9. Определение пространственной степени загрязнения
10. Изотопные характеристики и количественная оценка
11. Заполнение данных по необследованным областям при проведении традиционных обследований
12. Чрезвычайная ситуации, аварии
13. Снятие с эксплуатации и дезактивация
14. Идентификация других источников во время работы реактора
15. Дифференциация рассеяния излучения на объектах и загрязнения объектов
16. Контроль распространения загрязнения

Выводы

- Системы для дистанционных измерений имеют высокие рабочие и эксплуатационные характеристики, работоспособность проверена при различных уровнях мощности доз, и они дают возможность решать широкий класс задач, связанных с визуализацией источников радиоактивного излучения при проведении работ по выводу из эксплуатации и реабилитации.
- Поэтому системы получения гамма-изображений для сопровождения работ в ядерном комплексе, несомненно, перспективны.
- Возможно, необходимо введение методических (законодательных) требований необходимости использования таких систем.
- Для решения всех возможных задач требуются различные приборы с разным диапазоном характеристик. Универсальных приборов не существует.
- Если у потребителя есть выявленная и формализованная методически измерительная задача требующая получения изображений, то возможна автоматизация работы систем и с ними могут работать техники, лаборанты, дозиметристы без привлечения высококвалифицированного персонала.
- Для работы в нестандартных ситуациях – аварии, сложные распределения дозовых полей, сложные источники необходимо обучение персонала. НИЦ «Курчатовский институт» может быть базой для такого обучения. Здесь имеется высококвалифицированный персонал и необходимые радиационно-физические условия для проведения практического обучения.

СПАСИБО за ВНИМАНИЕ !!!

Литература

1. G. Imbard, H. Carcreff, "Development of a prototype gamma camera for use in decommissioning facilities", Waste Management 1995, Tucson, Arizona, March 1995.
2. Z.He, S.V.Guru, D.K.Wehe, G.F.Knoll, A.Truman, D.Ramsden, "Portable wide-angle γ -ray vision system", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 42, No. 4, pp. 668-674, 1995.
3. Migliaccio, R., Petito D., Nutter V., and Smith D. Gamma ray imaging in nuclear power plants. -Nuclear Plant Journal. 1996, March-April, v. 14, n 2, pp.205-212.
4. D. Ramsden, A. J. Bird, M. J. Palmer, and P. T. Durrant. Gamma-Ray Imaging Systems for the Nuclear Environment. – In: Proceedings of Remote techniques for hazardous Environment, BNES, London, 1996.
5. Ivanov O.P., Chesnokov A.V., Sudarkin A.N., Stepanov V.E., Urutskoev L.I. History of development and application of gamma-ray imagers in Russia since 1986. NIM A. 1999. v. 422. n 1-3. C. 677-682.
6. Gmar M., Gal O., Le Goaller C. Ivanov O. P., Stepanov V.E., et. al. Development of coded-aperture imaging with a compact gamma camera. - IEEE Trans. on Nucl. Science 2004, v. 51; n 4; p. 1682-1687.
7. Ivanov O.P., Potapov V.N., Schmidt C., et. al. Development of new version of RayMoS gamma-camera with coded mask. - Abstract Book of IEEE NSS/MIC, Dresden, Germany 19 - 25 October 2008 p.37.
8. Polaris-H: gamma-ray camera [on line] <http://www.h3dgamma.com/applications.html>
9. RMD, RadCam, [on line] <http://www.rmdinc.com/radcam>
10. F. Carrel, R. A. Khalil ; S. Colas ; D. de Toro. GAMPIX: A new gamma imaging system for radiological safety and Homeland Security Purposes NSS/MIC 20111
11. Ivanov O, Semin I., Potapov V., et al. Ultra-Light Gamma-Camera for Security and Emergency Situation WM2014 Conference, March 2 – 6, 2014, Phoenix, Arizona, USA
12. Иванов и др. Испытания системы визуализации полей гамма-излучения iPIX в НИЦ «Курчатовский Институт»//АНРИ. 2017. № 2(89). С. 66-70.
13. Иванов и др. Исследование возможностей и областей применения портативной комптоновской гамма-камеры Поларис в работах по выводу из эксплуатации и реабилитации объектов атомной промышленности. АНРИ 2018.

Литература

- 1 Ivanov O. P., Stepanov V. E., Volkov V. G., et.al. New Portable Gamma-Camera for Nuclear Environment and Its Application at Rehabilitation V MIC Conference, Rome, Italy, October 16-23, 2004. P.89
- 2 Ivanov O. P., Stepanov V. E., Volkov V. G., et.al. Application of portable gamma camera for the control on extraction of the radioactive wastes territory of RRC Kurchatov Institute, ICEM05/DECOM05, Glasgow, UK, 2005, P.78, Conference Record on CD: paper ICEM09-1197.
- 3 Stepanov A.V., Ivanov O.P., Stepanov V.E., Potapov V.N. Simulation of Safe Methods for Performing Decontamination Work, *Atomic Energy*. 2010. Т.108, № 3, P.33-37
- 4 Иванов О.П. Программное обеспечение гамма-камер для картирования радиоактивного загрязнения. Атомная энергия. 2010. Т.108, № 3, P.33-37
- 5 Artem'ev B.M., Ivanov O.P., Stepanov V E, Danilovich A.S. Gamma-imaging systems for ecological and nuclear environment measurements. 10th International Conference on Nuclear Science and Technology for the Environment – ECNDT 2010, Moscow, Russia, 2010. [online] https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/3_08.pdf
6. Г.А.Федоров, А.М.Дмитриев, С.А.Терещенко, М.А.Антаков Реконструкция изображений пространственных распределений источников и объектов на основе итеративного обратного проецирования в интегрально-кодовых системах измерений. АНРИ №1 (68), 2012. С.62–70
7. O. Gal, F. Jean, F. Laine, et al. The CARTOGAM portable gamma imaging system. *IEEE Trans. Nuc. Sci.* Vol. 47, № 3, June 2000. P.952 - 956
8. O. Ivanov, I. Semin, V. Potapov, et al Ultra-Light Gamma-Camera for Security and Emergency Situation. Proceedings of WM2014 conference [online] www.wmsym.org/archives/2014/papers/14066.pdf
9. О.П.Иванов, И.А.Семин., А.М Сафронов, О.С. Торицын. Испытания системы визуализации полей гамма-излучения iPIX в НИЦ "Курчатовский институт". АНРИ № 2 (89), 2017. С. 66-70.
10. Ю.Н. Мартынюк и И.Б. Вишневецкий. Промышленный прототип портативной гамма-камеры для применения на объектах атомной энергии. АНРИ № 2 (89), 2017. С. 13-23.
11. Christopher G. Wahl, Willy Kaye, Weiyi Wang et al. Polaris-H measurements and performance. Published in: Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Seattle, WA, United States. 2014.
12. Сайт фирмы H3D, [online]: <https://h3dgamma.com/polarishquadspecs.pdf>; сайт ООО «ГаммаТех», [online]: <https://gammatech.pro/catalog>
13. О.П.Иванов, В.Н.Потапов, А.М.Сафронов Исследование возможностей портативной комптоновской гамма-камеры Поларис при выводе объектов атомной промышленности. АНРИ № 2 (89), 2018. С.24-36
14. O. Ivanov, V. Potapov, I. Semin , The Method to Improve the Angular Resolution of the Portable Gamma Camera with Pinhole Collimator (paper N08-5). Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Strasbourg, France.2016.
15. O. Ivanov, V. Potapov, V. Stepanov, Y. Martynyuk. The Image Processing for Improvement of Angular Resolution and Sensitivity of the Portable Gamma Camera with Pinhole Collimator (paper N08-5). Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Strasbourg, France.2016.
16. O. P. Ivanov, V. N. Potapov, A.S. Safronov, A.V. Stepanov, The Improving of the Angular Resolution of Gamma-Ray Images of Portable Compton Camera by Iterational Method. Published in: Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, UK, 2019.
17. H. Lemaire, R Abou Khalil, K.Amgarou, et al. Implementation of an imaging spectrometer for localization and identification of radioactive sources. *IEEE Trans. Nuc. Sci.* Vol. 763, 2014. P.97-103.
22. L. Caballero et. al. Gamma-ray imaging system for real-time measurements in nuclear waste characterization. *Journal of Inst.* Vol. 13, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/13/03/P03016/pdf>
23. Камера NanoPIXpix [on-line] https://www.cea-tech.fr/cea-tech/english/Pages/ec_2018/nanopix-smallest-gamma-camera-information-comm
24. Гамма-камера «Дельта-Т» НПФ ДОЗА [on-line] https://www.doza.ru/about_us/news/6799/
25. Иванов О.П., и др Опыт применения портативных гамма-камер (гаммавизоров) в работах по выводу из эксплуатации и реабилитации объектов атомной промышленности. АНРИ № 2 (89), 2017. С.19-35

Characteristics of Polaris HQ camera

Energy Resolution: $\leq 1.1\%$ FWHM at 662 keV

Radiation Field of

View:

4 π (360°) omnidirectional

Angular Precision: $\pm 1^\circ$ source localization for all 4 π
(real time)

Angular Resolution: $\sim 30^\circ$ FWHM for all 4 π (real time)
 $\sim 20^\circ$ FWHM for all 4 π (post processing)

Sensitivity: Detects Cs-137 producing ~ 3
 $\mu\text{R/hr}$ with 19 cm³ CZT

Energy Range: 50 keV to 3 MeV (spectroscopy)
250 keV to 3 MeV (imaging)

Crystal Volume: > 19 cm³ CZT

Count-Rate Limit: 0.5 rem/hr (5 mSv/hr) bare Cs-137 equivalent