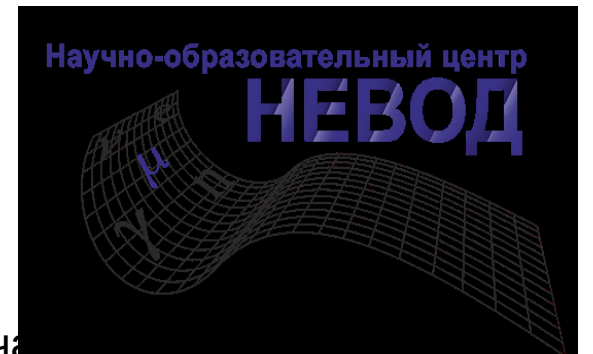




Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
XVI Черенковские чтения
«Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц»



Гибридный мюонный годоскоп для диагностики крупномасштабных объектов

Пасюк Н.А., Борисов А.А., Компаниец К.Г., Кожин А.С., Петрухин А.А.,
Фахрутдинов Р.М., Целиненко М.Ю., Шутенко В.В., Яшин И.И.

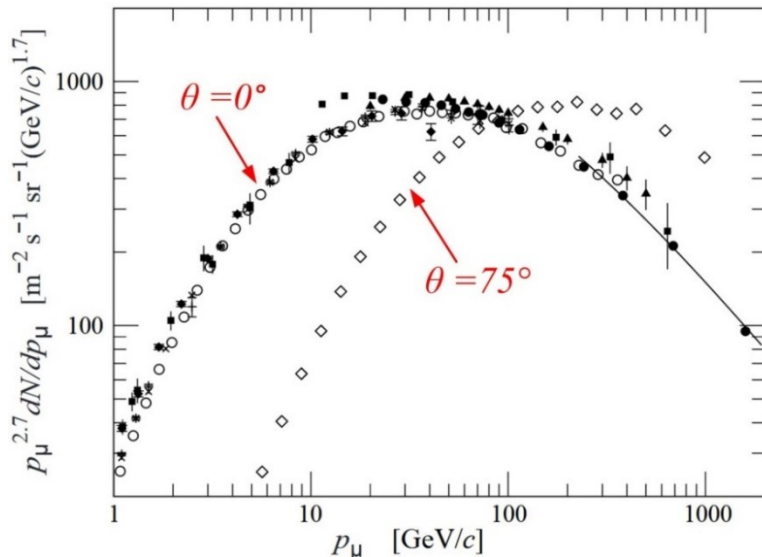
Пасюк Никита Александрович

19.04.2023

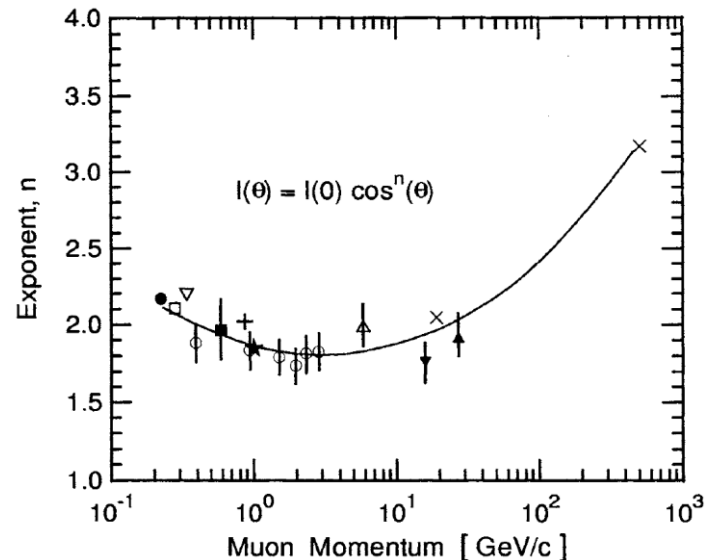
Москва 2023

1. Космические лучи: мюнография

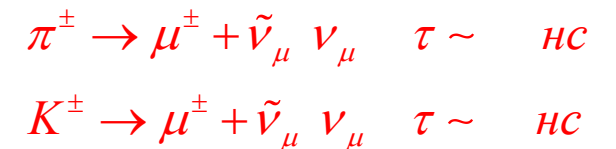
- **Мюнография** (по аналогии с рентгенографией) – метод исследования внутренней структуры крупномасштабных объектов с помощью потока космических мюонов.
- **Мюнограмма** (по аналогии с рентгенограммой) – графическое отображение на 2D плоскости областей анизотропии зарегистрированного потока мюонов, связанных с суммарным эффектом поглощения и рассеяния мюонов на особенностях строения исследуемого объекта.
- **Мюонная томография** – построение мюнограмм с разных направлений и получение на их основе объемного изображения.
- Аналогично рентгенограмме, **на мюнограмме отображаются объекты**, располагающиеся в промежутке от места появления мюона до приемника. Глубина изображения структуры на мюнограмме определяется структурой вещества и его суммарной толщиной.
- Мюоны рождаются в результате взаимодействия частиц первичных космических лучей с ядрами атомов атмосферы (в основном N_2 и O_2) Земли на высоте 15 - 20 км.



Энергетический спектр мюонов на уровне моря для зенитных углов 0° и 75°



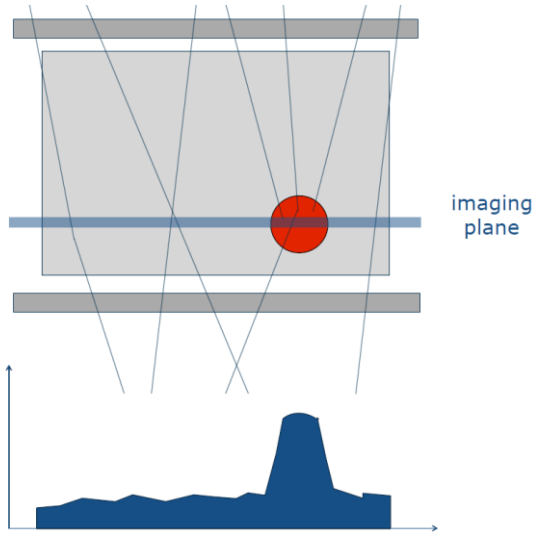
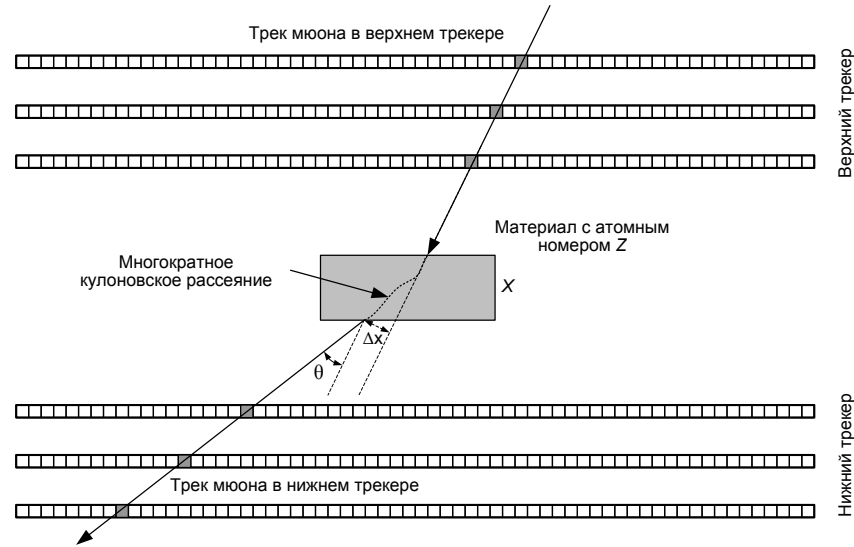
Зависимость степени зенитного угла мюонов от импульса на уровне моря



Средняя энергия для вертикальных атмосферных мюонов на уровне моря - около 4 ГэВ. Эти частицы могут пройти ~ 25 м воды или ~ 3.5 м свинца, а их поток на поверхности Земли составляет величину:
 ~ 1 мюон/дм²сек

2. Мюнография: метод рассеяния

Метод мюонной томографии на основе анализа многократного **кулоновского рассеяния мюонов**



Изображение при рассеянии мюонов

Средний угол многократного рассеяния

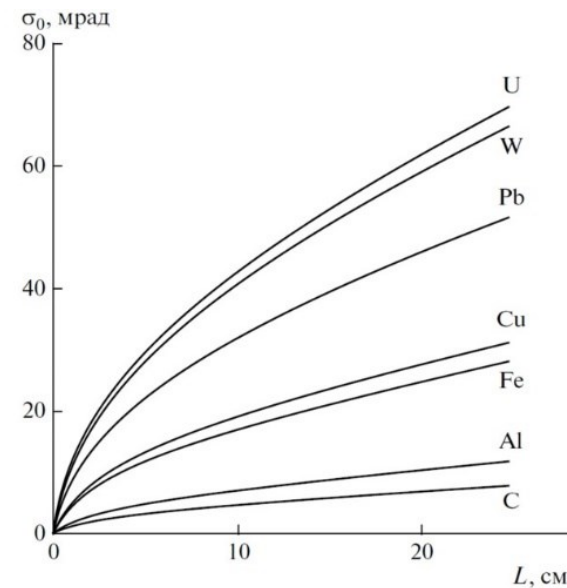
$$\theta_0 = \frac{14.1 \text{ МэВ}}{p\beta} \sqrt{\frac{l}{X_0}}; \quad \sigma_\theta = \frac{14.1 \text{ МэВ}}{p} \sqrt{\frac{l}{X_0}}$$

X_0 – радиационная длина материала.

Некоторые примеры X_0 [г/см²]:

H (63.1), C (42.7), Al (24.0), Fe (13.8), Cu (12.9), Pb (6.37), U (6.00).

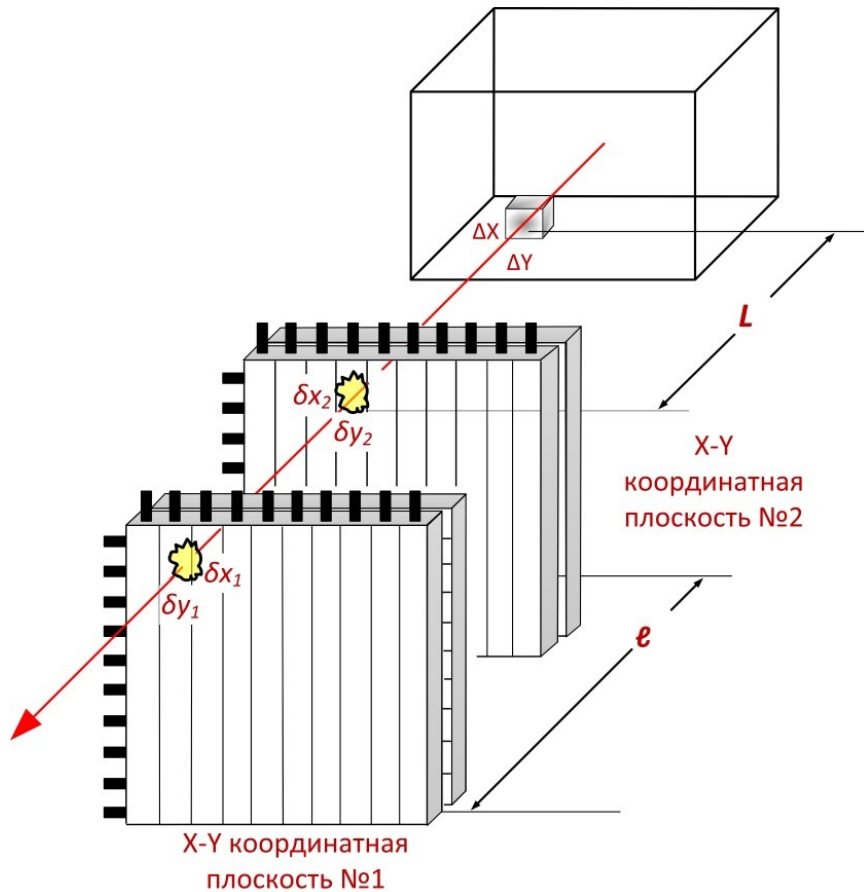
Вещество	Вода	Железо	свинец
X_0 , см	36	1,76	0,56
σ_θ (50 см)	0,28°	1,30°	2,20°



Зависимость среднеквадратичного отклонения угла рассеяния мюона (2 ГэВ/с) от толщины материала

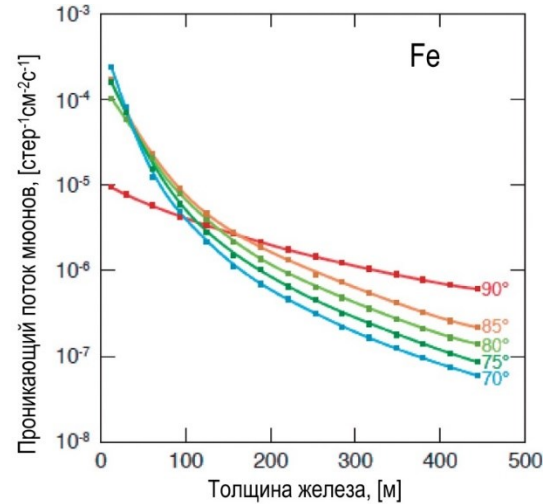
2. Мюнография: метод поглощения

Метод мюонной томографии на основе потерь мюонов
в веществе (**поглощение потока мюонов**)



Разрешение метода:

$$\Delta X, \Delta Y = (L/l)\delta x, (L/l)\delta y$$



Потери мюонов в веществе
(поглощение потока мюонов):

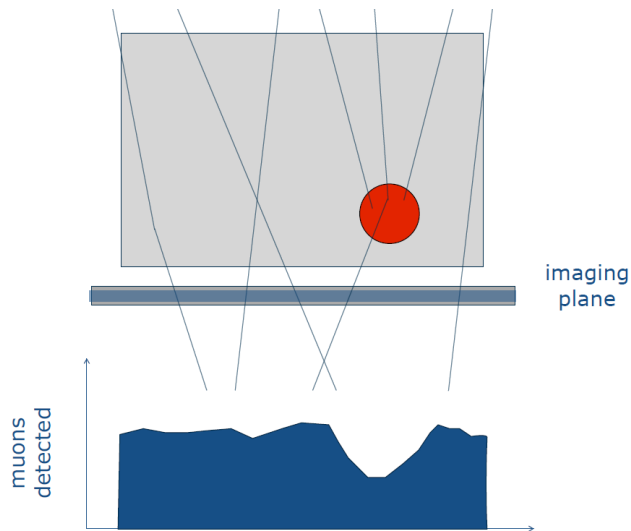
$$-\frac{dE_\mu}{dX} = a(E_\mu) + b(E_\mu) \cdot E_\mu$$

Ионизационные потери (формула Бете-Блоха):

$$a(E_\mu) = \left(\frac{dE_\mu}{dX} \right)_{ion} \sim z \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \cdot \varphi(E_\mu)$$

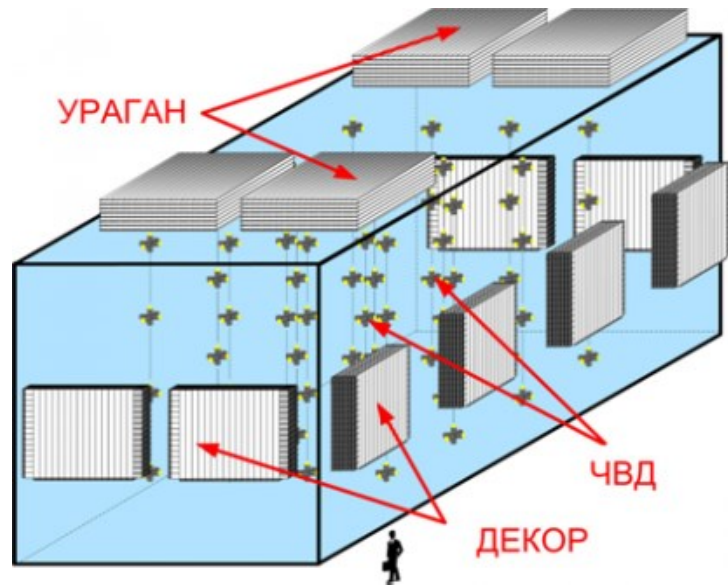
Радиационные потери:

$$b(E_\mu) = b_{br}(E_\mu) + b_{pp}(E_\mu) + b_{ni}(E_\mu)$$

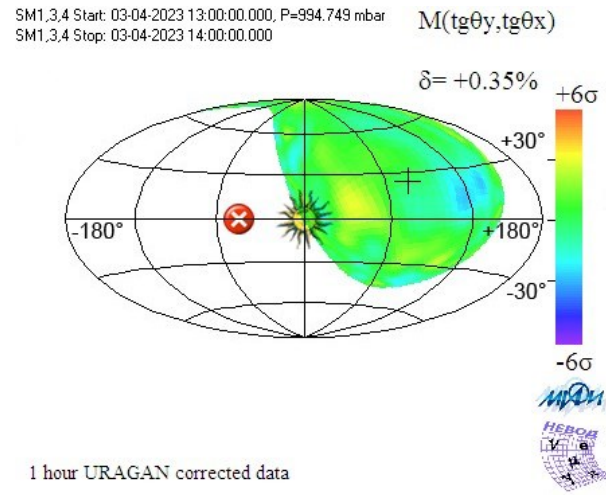
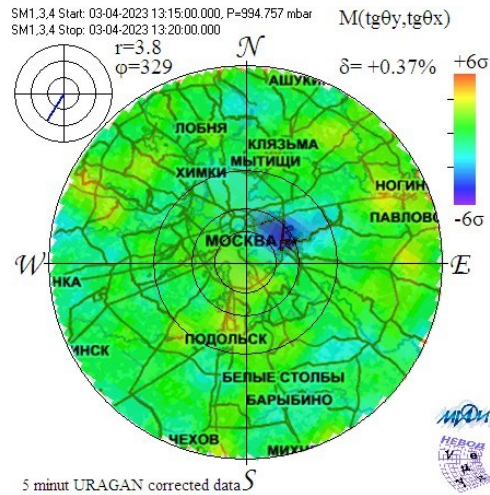


Изображение при поглощении мюонов

3. Мюнография: тестирование метода в ЭК НЕВОД НИЯУ «МИФИ»



Мюнография атмосферы и гелиосферы



Свинцовый блок с размерами 20×10×20 см был помещен на глубине 2.5 м воды на расстоянии 0.5 м от бетонной стенки бассейна

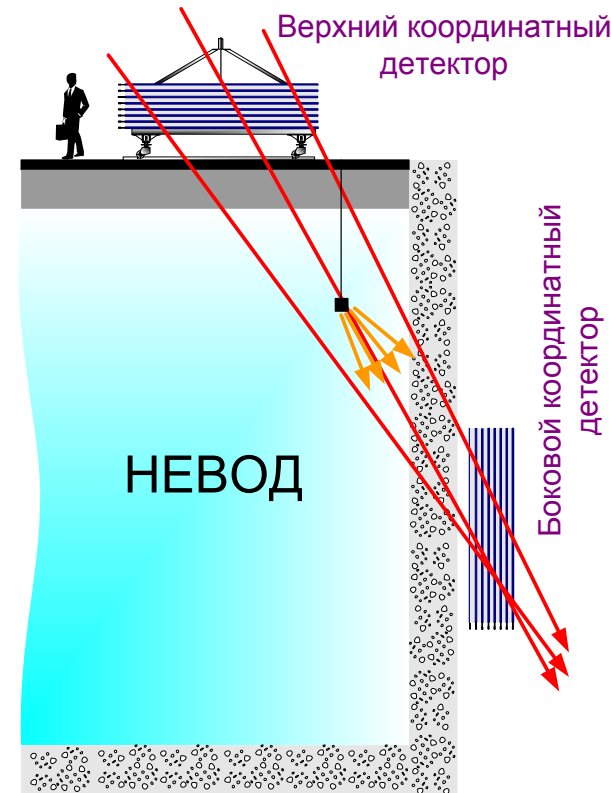
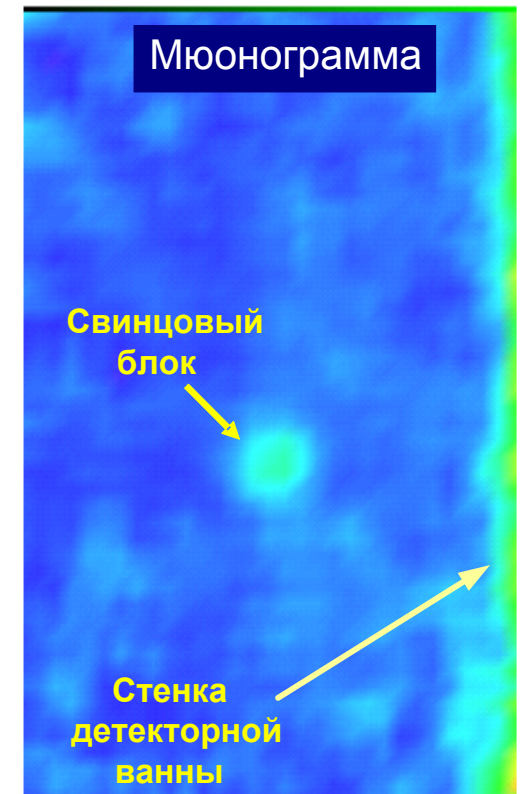


Схема эксперимента



Результат эксперимента

4. Гибридный мюонный годоскоп: конструкция

В рамках проекта, поддержанном АО «Наука и инновации» (Росатом) в сотрудничестве с АО ВНИИАЭС, создан гибридный мюонный годоскоп для мюнографии ядерного реактора.

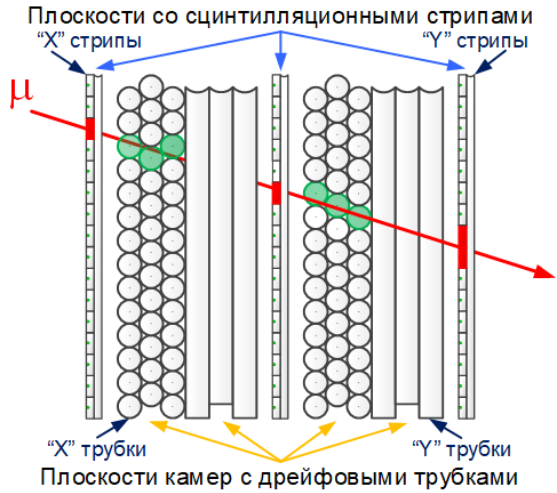


Схема ГМГ



Собранная однопроекционная плоскость ССД



Основная рама ГМГ



Поворотная платформа

Гибридный мюонный годоскоп:

- Сцинтилляционный стриповый детектор (ССД).
- Детектор на дрейфовых трубках (ДДТ).

10 однопроекционных плоскостей:

- 4 на дрейфовых трубках;
- 6 на сцинтилляционных стрипах.

Суммарно $1152+768=1920$ каналов регистрации.



ГМГ в сборе

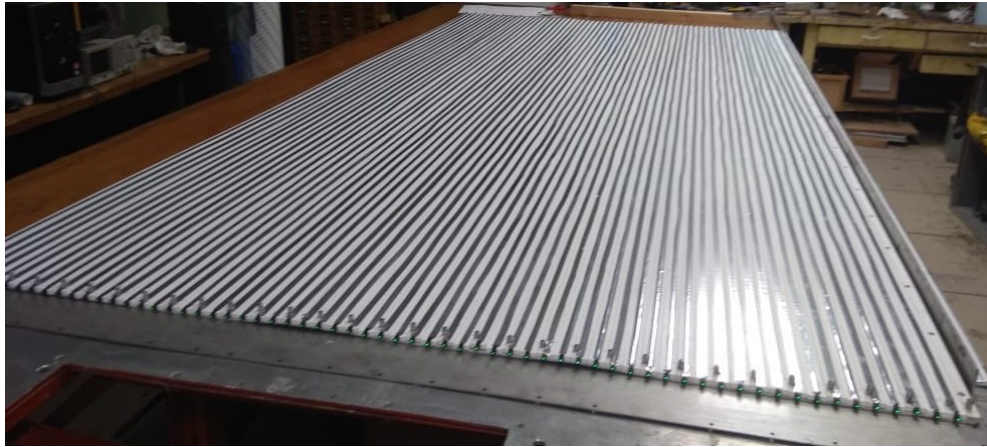
4. Гибридный мюонный годоскоп: ССД

6 однопроекционных плоскостей на сцинтилляционных стрипах образуют 3 координатные X-Y плоскости.

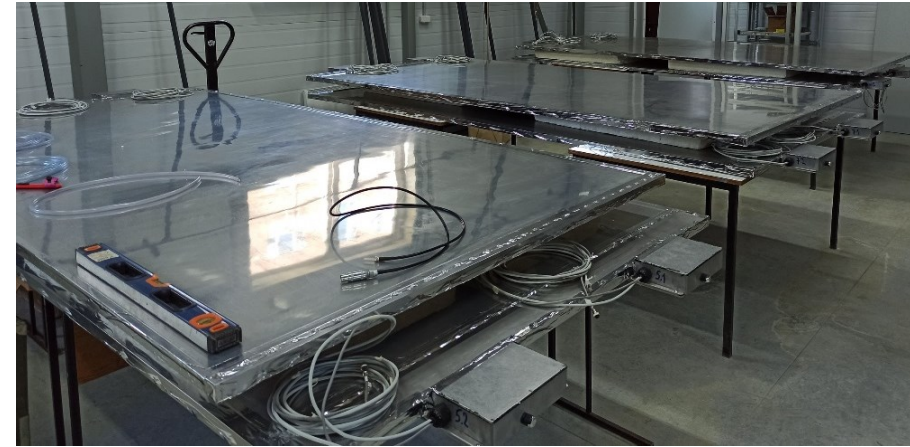
Однопроекционная плоскость – два состыкованных сцинтилляционных базовых модуля.

Сцинтилляционный базовый модуль – 64 сцинтилляционных стрипа.

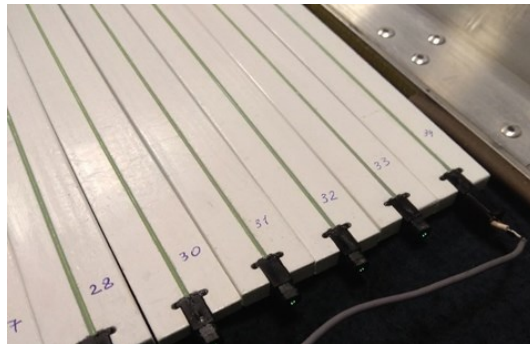
Сцинтилляционный детектор – 768 каналов регистрации.



Сборка 64-х стрипов



Собранные базовые модули (3196×1500×57 мм)



Стрип: полистирол + паратерфенил + РОРОР, размер 2960×23×7 мм, оптоволоконно KURARAY Y-11(200), 1mm



SiPM: Hamamatsu S13360-1350CS, напряжение пробоя: 53÷56 В, коэффициент усиления: 1.2×10^6

4. Гибридный мюонный годоскоп: ДДТ

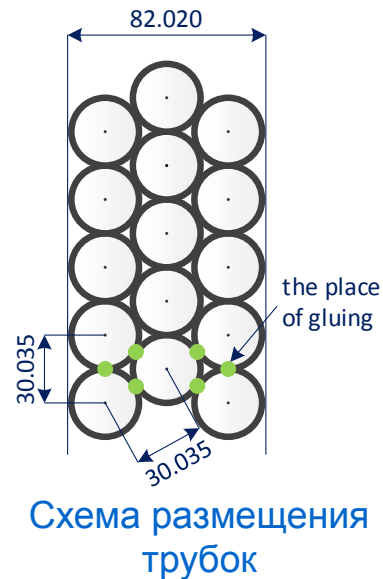
4 однопроекционные плоскости на дрейфовых трубках образуют 2 координатные X-Y плоскости.

Дрейфовая трубка – радиус 29.97 мм, длина 2996 мм, толщина стенки 0.4 мм, проволока W-Re (0.05 мм).

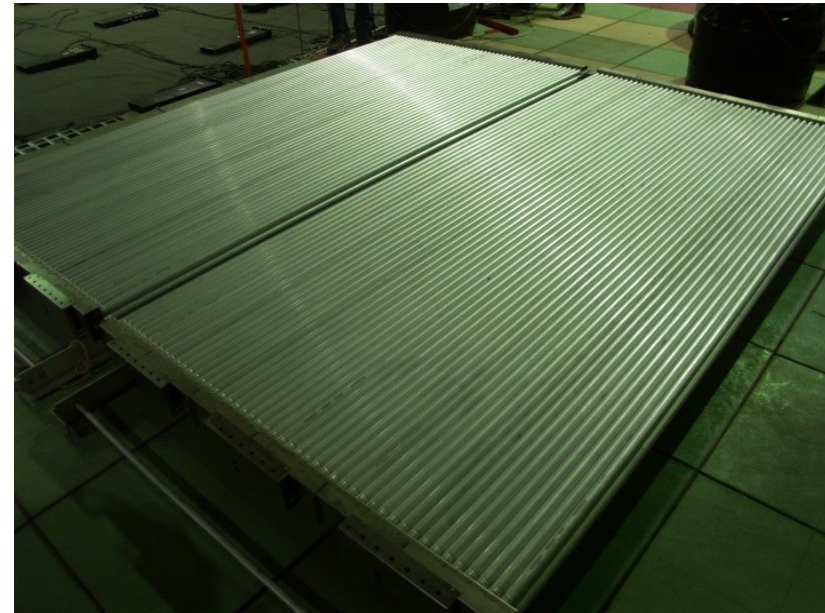
Дрейфовый базовый модуль (дрейфовая камера) – 144 дрейфовые трубки (3 ряда по 48 трубок).

Однопроекционная плоскость – два состыкованных дрейфовых базовых модуля.

Дрейфовый детектор – 1152 канала регистрации.

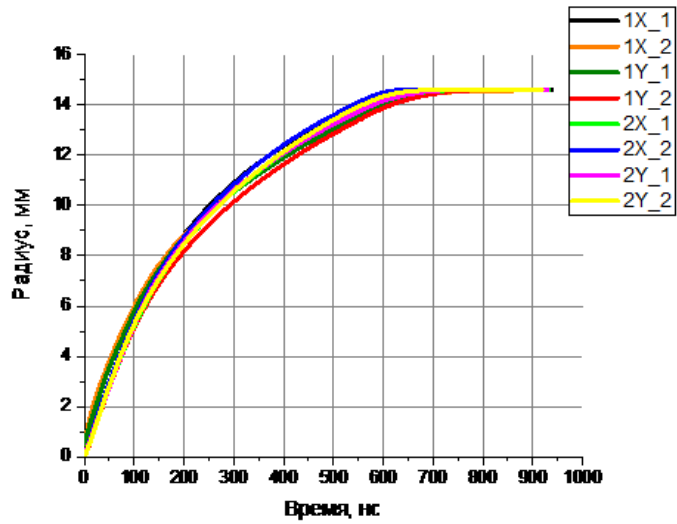


Дрейфовая камера
(3520×1460×210 мм)

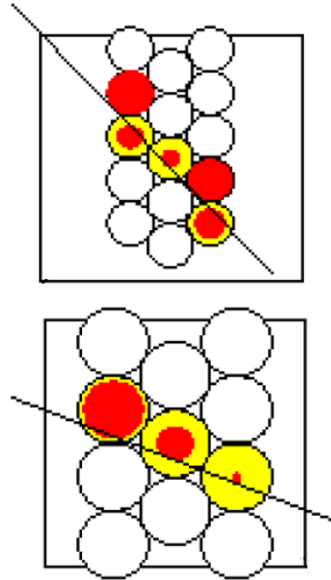


Слой из двух дрейфовых камер

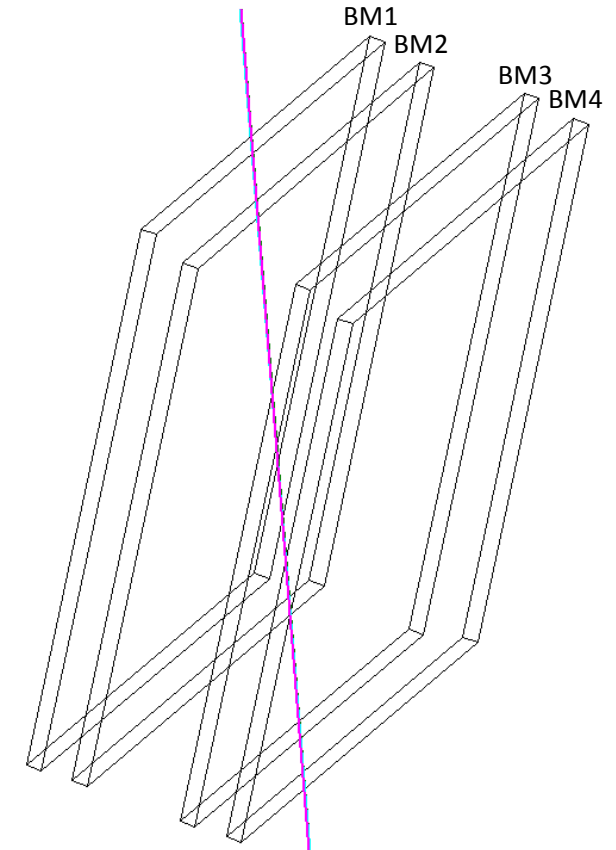
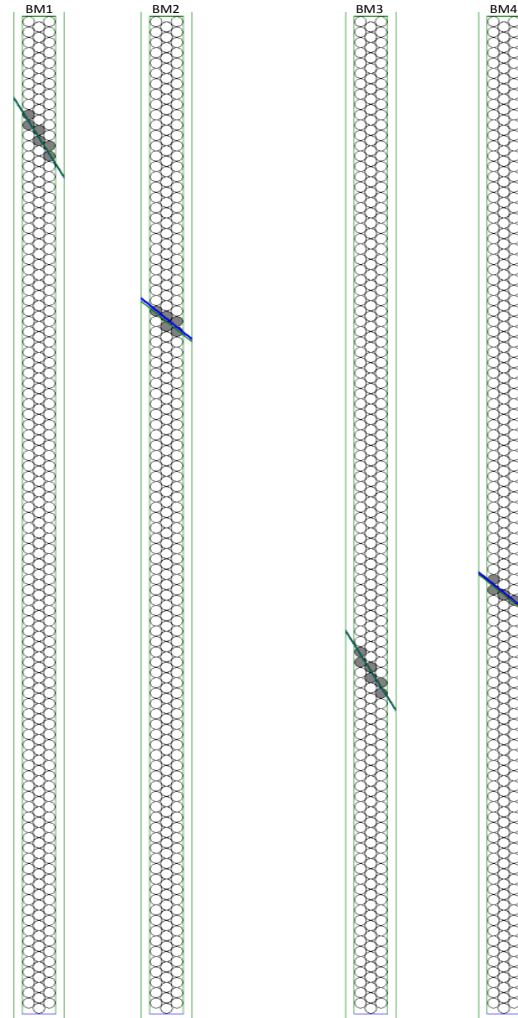
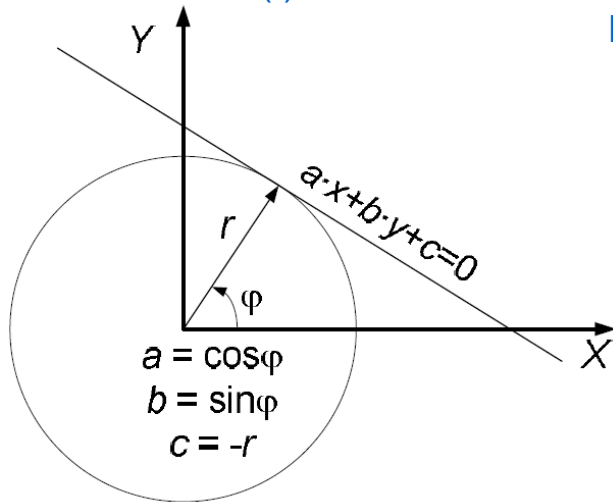
5. Гибридный мюонный годоскоп: метод реконструкции треков ДДТ



Начальные R(t)-зависимости



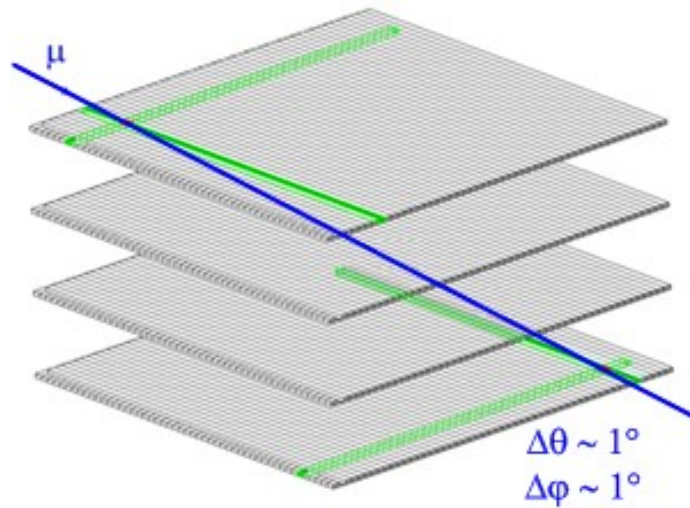
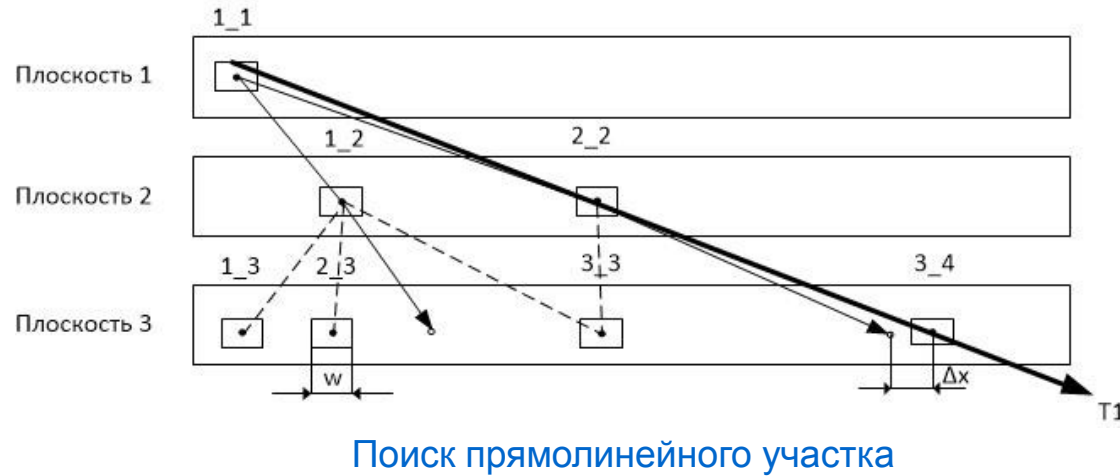
Касательные прямые к окружностям



Пример реконструированного трека частицы

Условие отбора: 11 трубок, минимум 2 трубки в слое.

5. Гибридный мюонный годоскоп: метод реконструкции треков ССД



- Триггерное условие: 6 слоёв из 6.
- Перебор всех сработавших стрипов (отдельно по проекциям XZ и YZ) до условия подходящего стрипа:
 $|\Delta x| > w$

где $\Delta x = x - x_0$;

x – координата текущего стрипа;

x_0 – координата продолжения пробного трека;

$w = k \cdot 23.1$ мм – ширина допустимой области;

23.1 мм – шаг расположения стрипов;

k – целое число (кратность = 3) - ширина области поиска стрипов-кандидатов.

$|\Delta x| > w$ – берём другой стрип;

$|\Delta x| \leq w$ – сохраняем текущий;

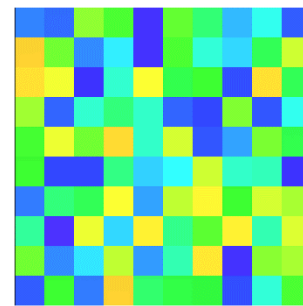
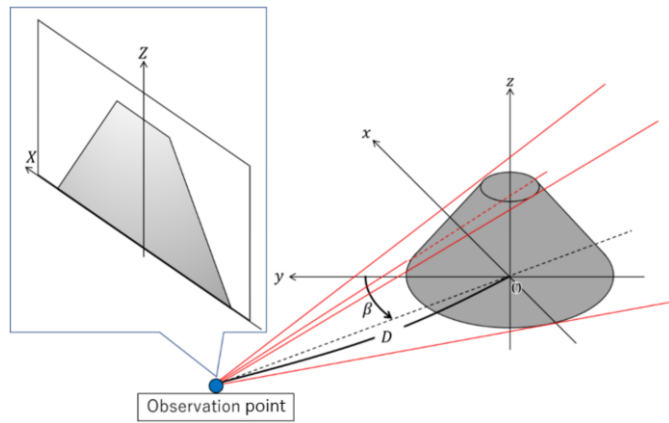
- Линейная аппроксимация точек-кандидатов.

5. Гибридный мюонный годоскоп: метод построения мюонографий

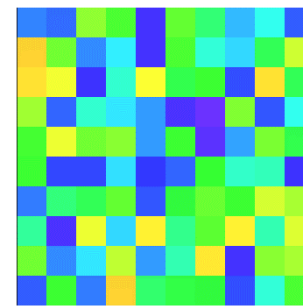
Процесс построения мюонограммы подразумевает восстановление треков мюонов и нахождение точек пересечения треков с плоскостью, проходящей через объект.

- **Мюонограмма** – матрица на плоскости, перпендикулярной оси детектора. Каждая ячейка матрицы содержит информацию о количестве пересечений реконструированных треков данной ячейки.
- Для выявления динамических изменений в структуре объекта применяется **разностный метод**: из базовой матрицы, полученной при «просвечивании» объекта в течение длительной экспозиции, вычитается матрица, полученная в период динамических изменений.

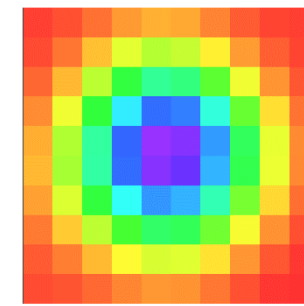
$$\frac{\Delta n_{i,j}}{\sigma(\Delta n_{i,j})}, \text{ где: } \Delta n_{i,j} = \frac{\sum_{l,m} f_k \cdot n_{l,m}}{\sum_{l,m} f_k} - \frac{\sum_{l,m} f_k \cdot d \cdot N_{l,m}}{\sum_{l,m} f_k}, \quad d = \frac{\sum_{i,j} n_{i,j}}{\sum_{i,j} N_{i,j}} \quad \sigma(\Delta n_{i,j}) = \frac{\sqrt{\sum_{l,m} f_k^2 \cdot [n_{l,m} + d^2 \cdot N_{l,m}]}}{\sum_{l,m} f_k}, \quad f_k - \text{веса ячеек (l,m)}$$



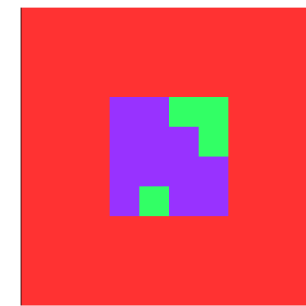
Без объекта



С объектом



Вычитание с
фильтром



Прямое
вычитание

6. Тестирование метода полноразмерным прототипом в НИЯУ МИФИ



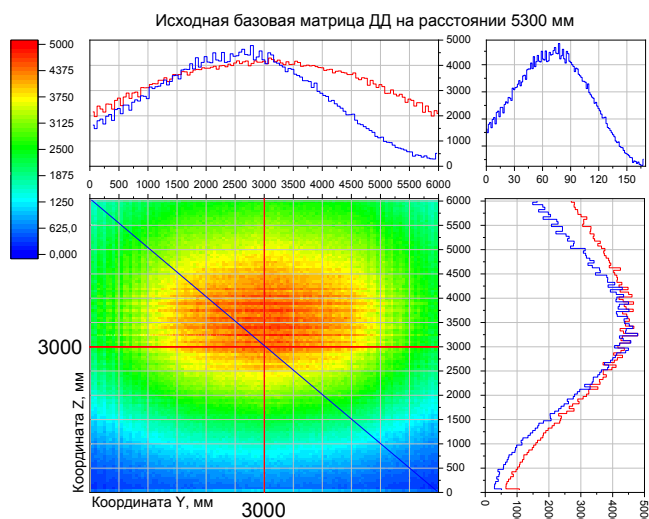
Схема расположение объектов наблюдения на карте



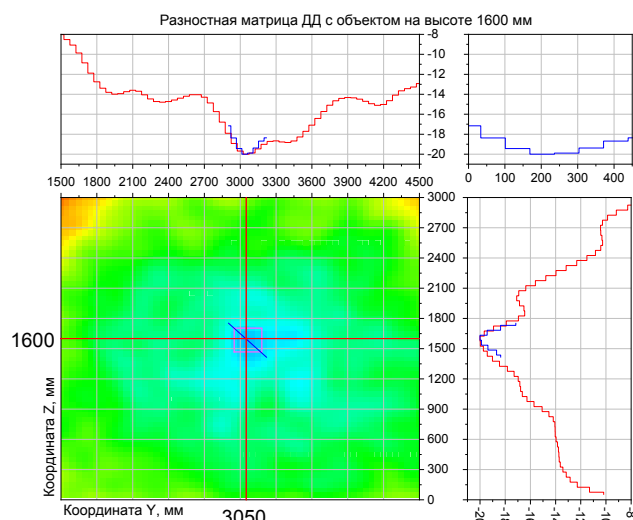
Расположение объектов №1 и №2



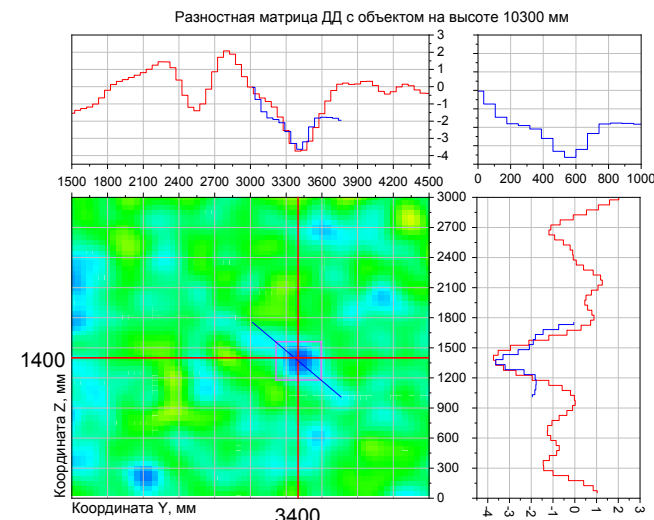
Расположение объектов №3 и №4



Базовая матрица на расстоянии 5300 мм



Разностная матрица с объектом на высоте 1600 мм



Разностная матрица с объектом на высоте 10300 мм

7. Эксперимент по мюнографии АЭС



Сборка ГМГ в машинном зале



● Палатка с мюонным томографом простит рядом с блоком несколько недель. Такова экспозиция для получения контрастного изображения

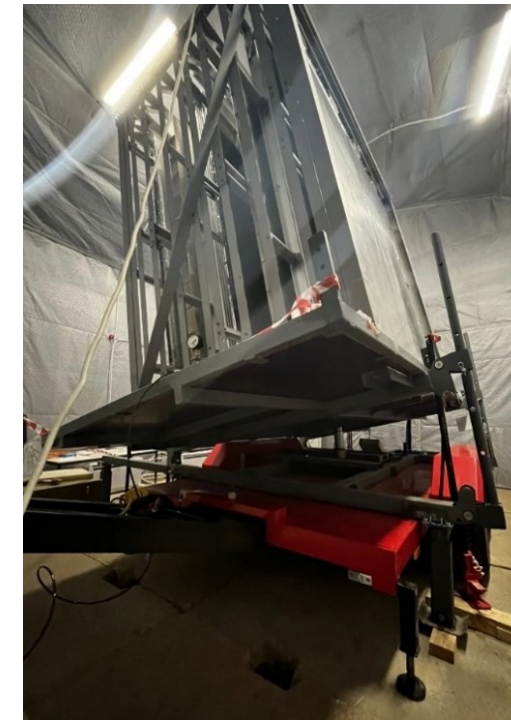
Положение ГМГ относительно объекта наблюдения



Собранный ГМГ в машинном зале

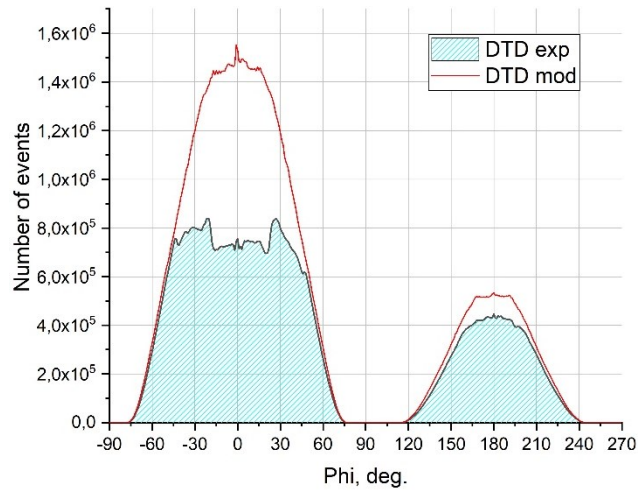


Перемещение ГМГ на площадку наблюдения

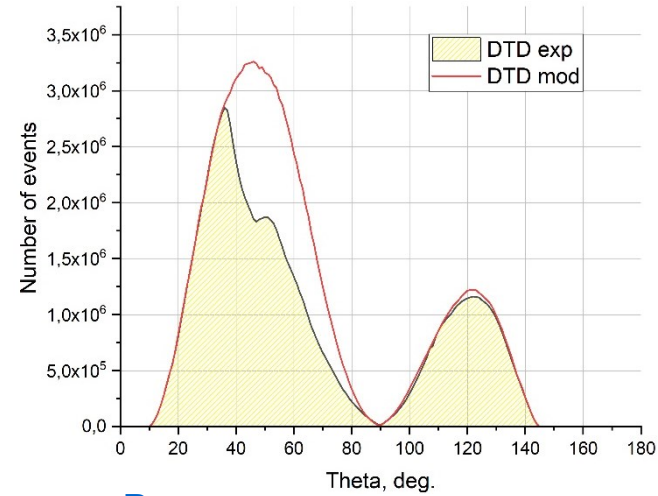


ГМГ в сборе

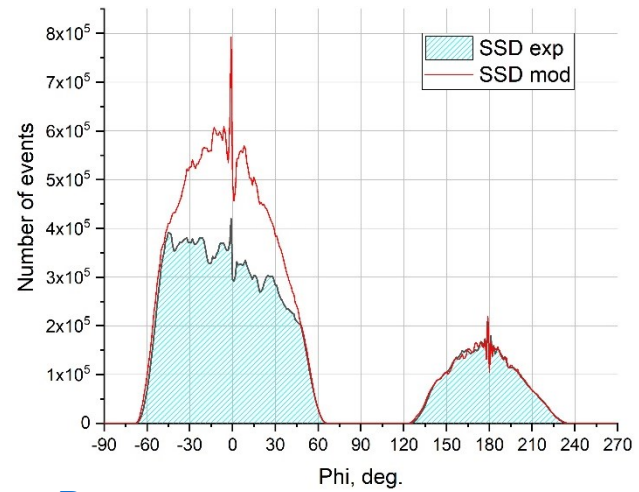
7. Эксперимент по мюнографии АЭС: апертура ГМГ



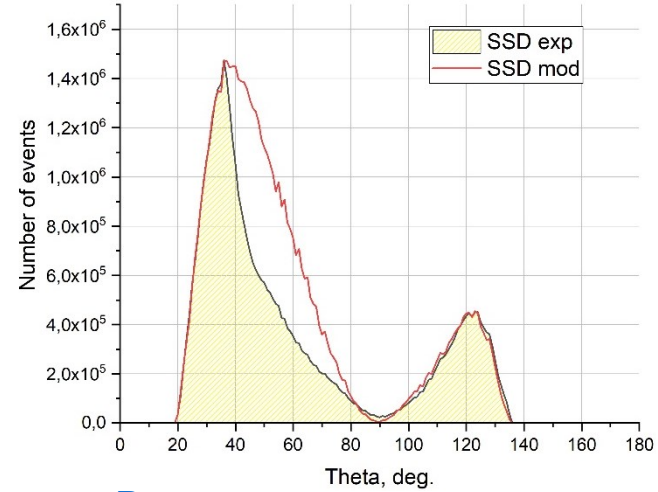
Распределение по азимутальному углу ДДТ



Распределение по зенитному углу ДДТ

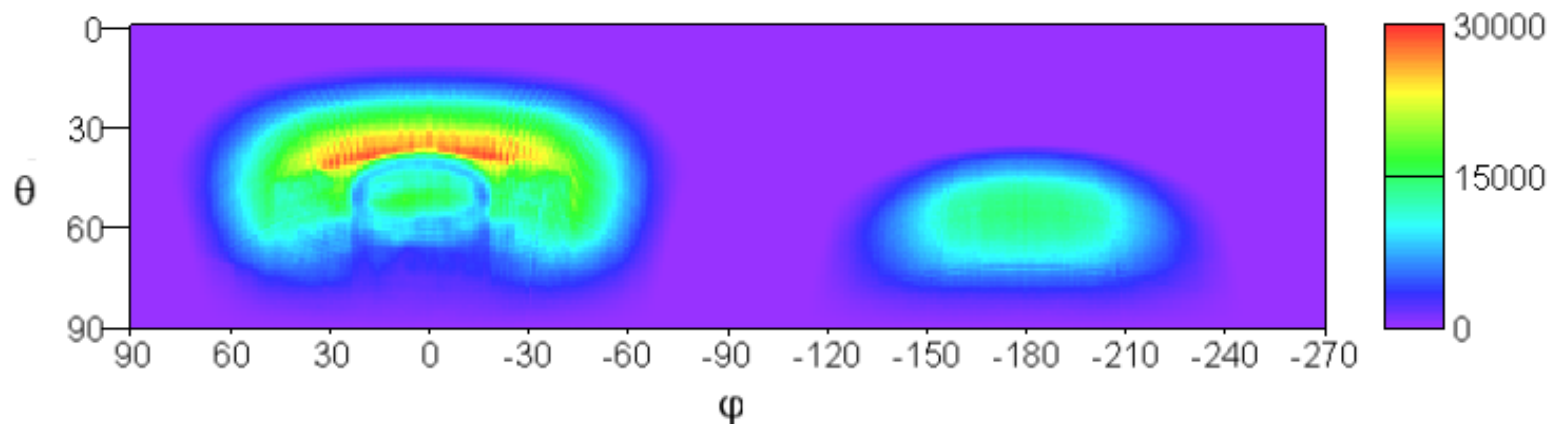


Распределение по азимутальному углу ССД

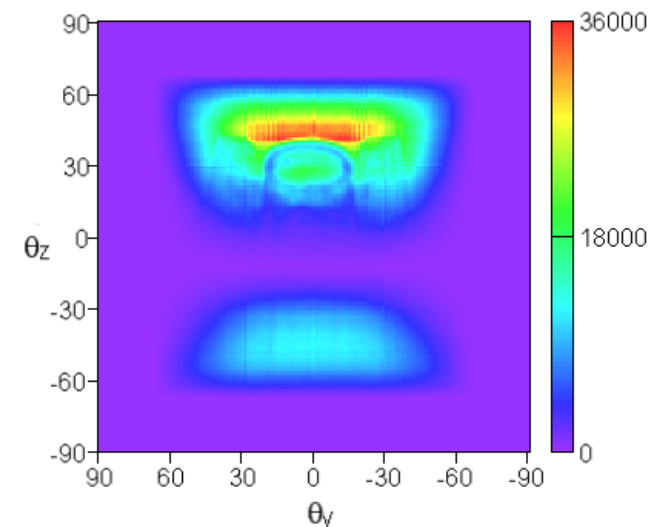


Распределение по зенитному углу ССД

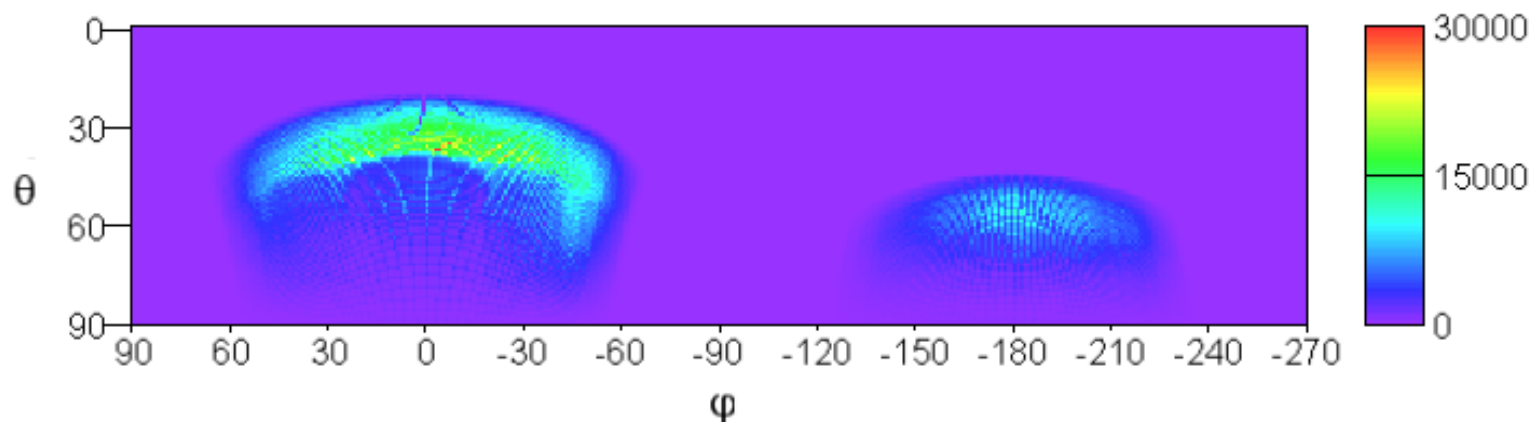
7. Эксперимент по мюнографии АЭС: угловые распределения



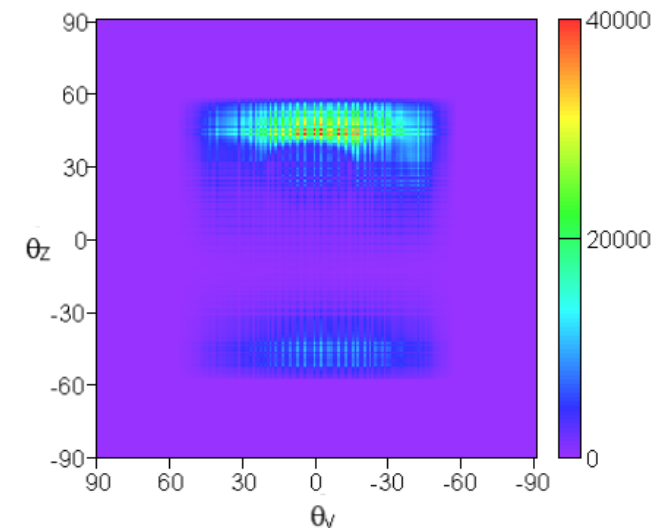
Распределение треков ДДТ по зенитно-азимутальному углу



Распределение треков ДДТ по проекционным углам

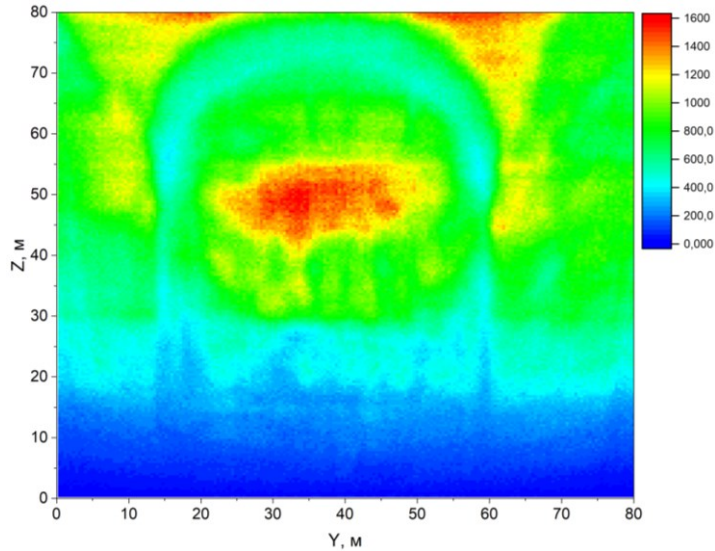


Распределение треков ССД по зенитно-азимутальному углу

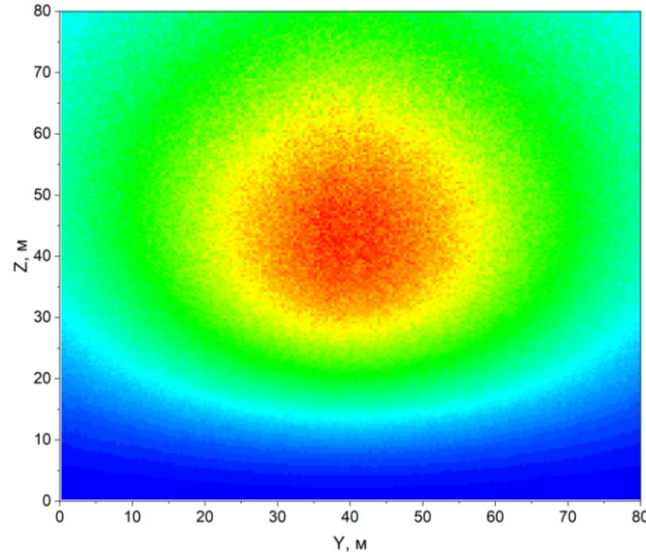


Распределение треков ССД по проекционным углам

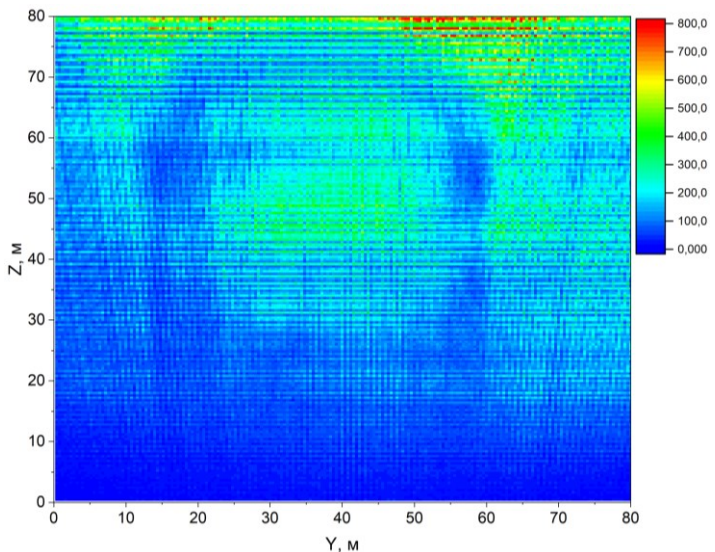
8. Результаты эксперимента на АЭС: результат ДДТ и ССД



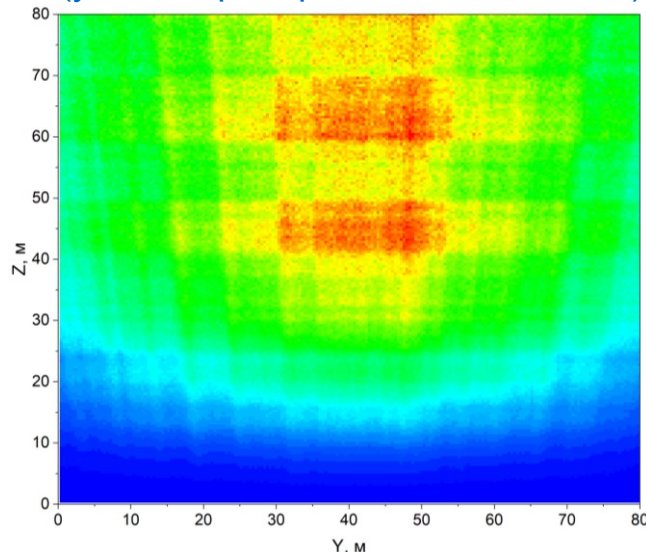
Экспериментальная матрица ДДТ



Модельная матрица ДДТ
(угловое распределение мюонов)



Экспериментальная матрица ССД

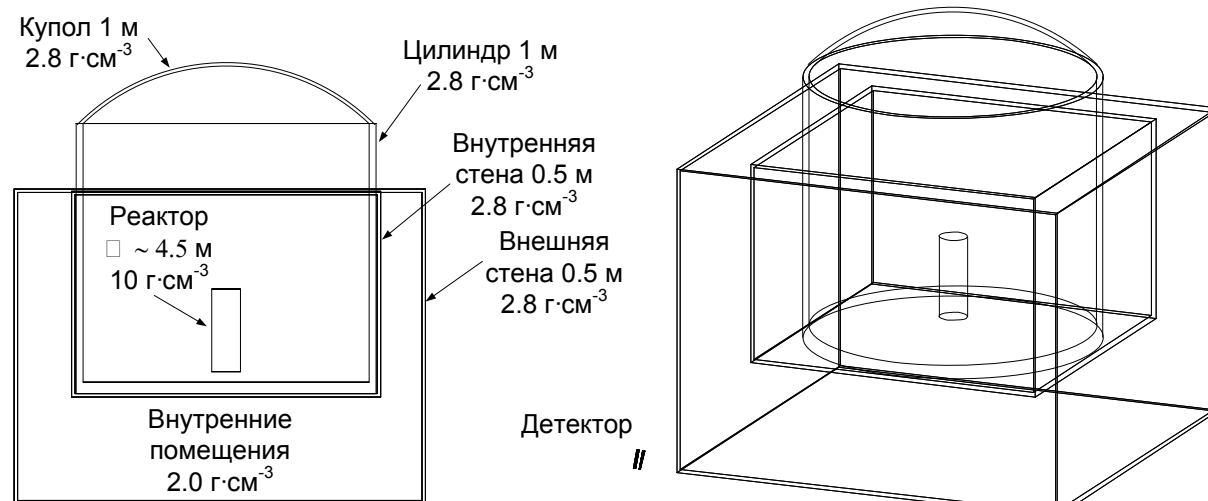


Модельная матрица ССД
(угловое распределение мюонов)

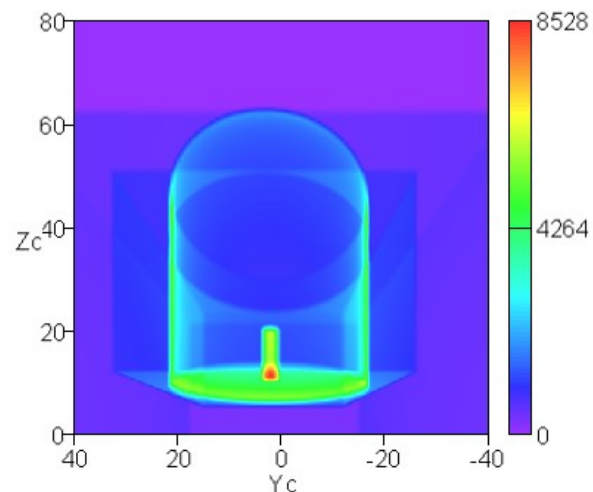
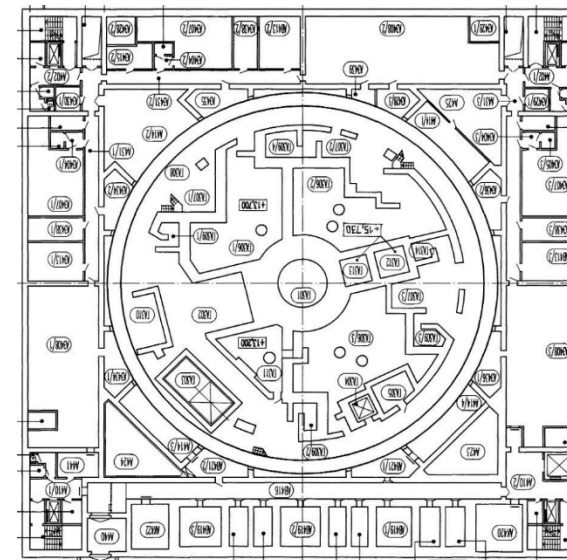
По полученным трекам строилась **мюонограмма** – матрица точек пересечения треков с плоскостью, проходящей через центр реактора.

Для исключения вклада углового распределения мюонов была получена модельная мюонограмма в той же геометрии без реакторного блока.

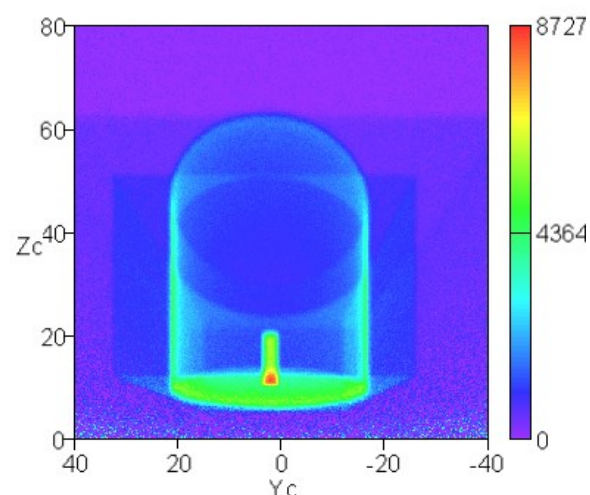
8. Результаты эксперимента на АЭС: толщина вещества



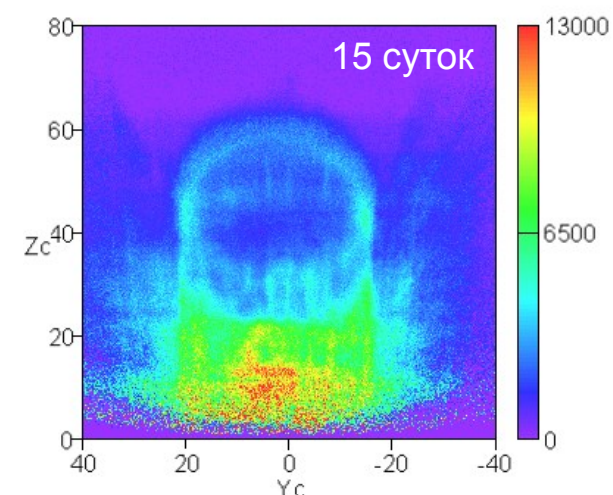
Упрощенная модель реакторного здания и расположение ГМГ (детектора)



Распределения толщин вещества на мюнограмме (точное)

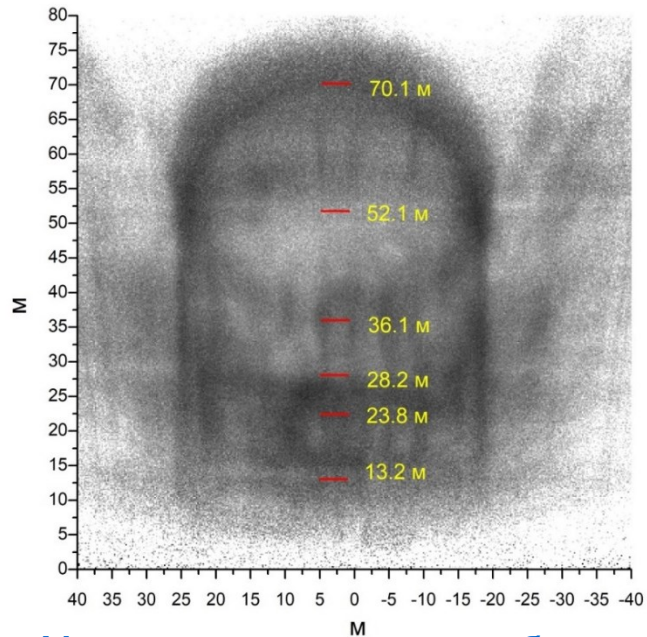


Распределения толщин вещества на мюнограмме, восстановленное по реконструкции моделированных событий (без учета многократного кулоновского рассеяния)

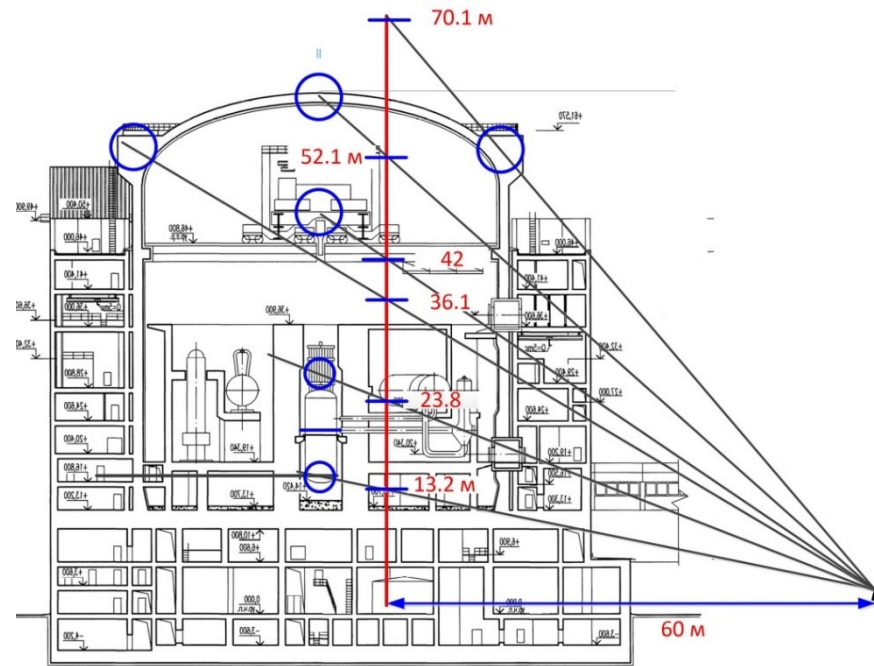


Распределения толщин вещества на мюнограмме по реконструкции экспериментальных треков

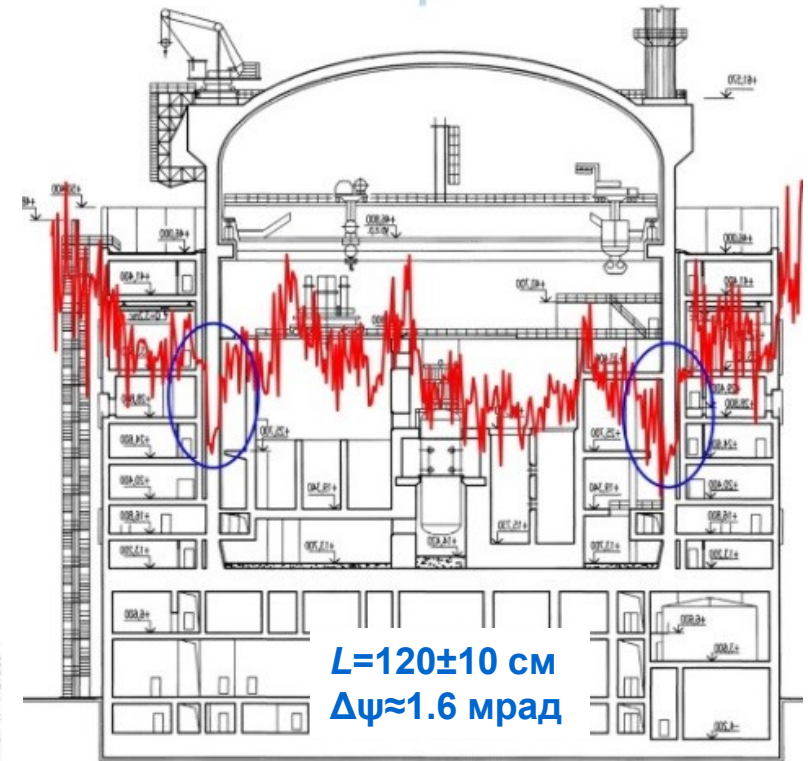
8. Результаты эксперимента на АЭС: анализ мюнографии



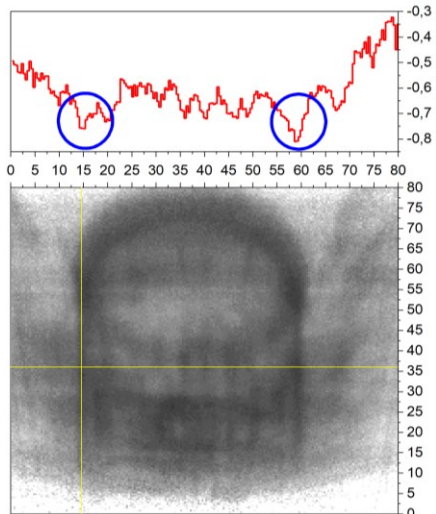
Мюнограмма реакторного блока



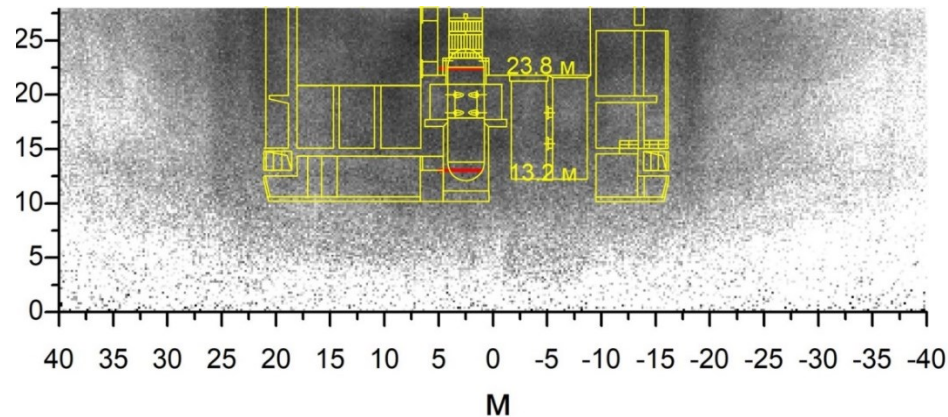
Структуры энергоблока



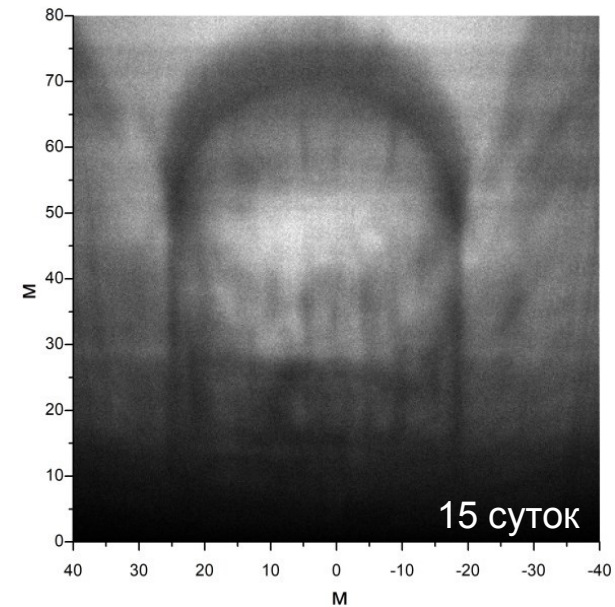
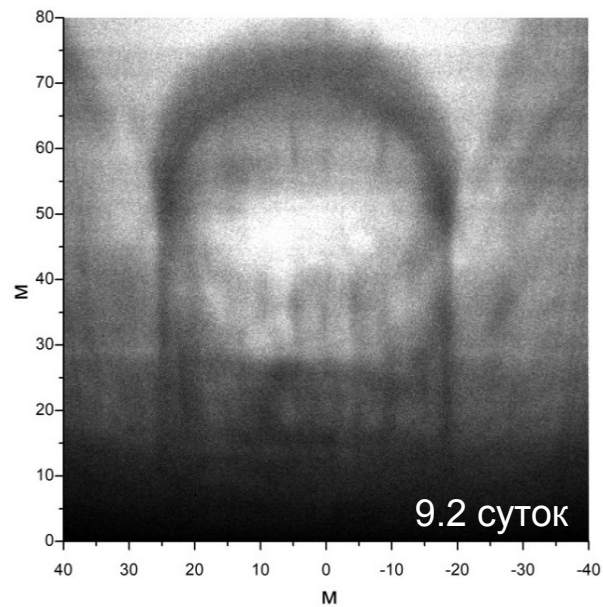
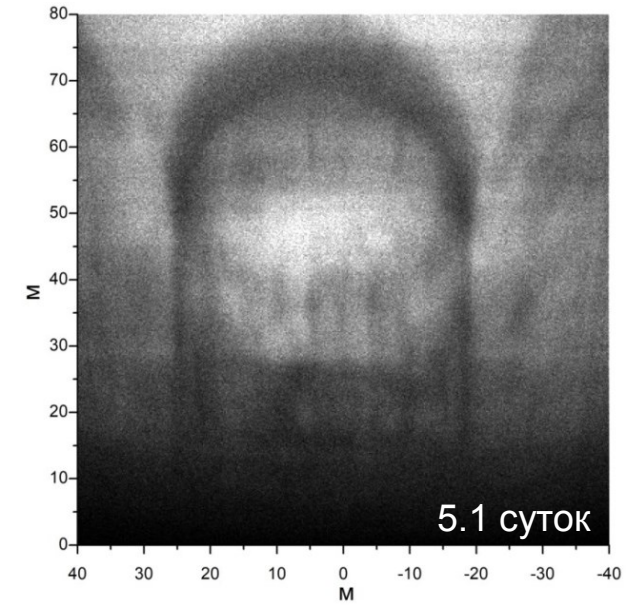
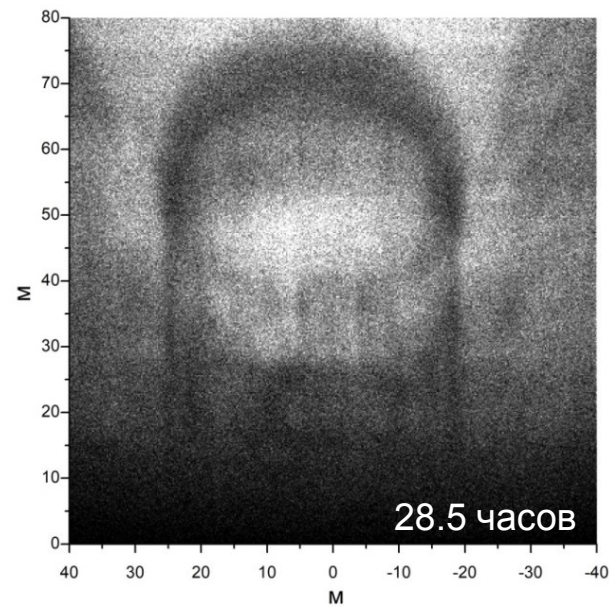
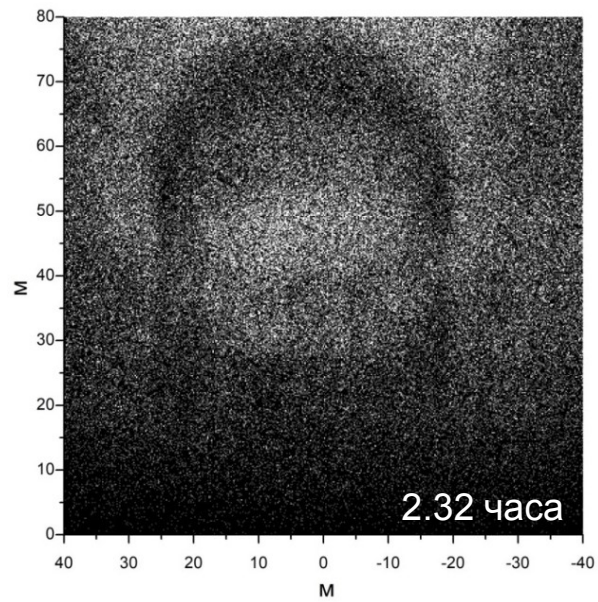
Проекция гистограммы реакторного блока



Измерение толщины стенки гермооболочки на отм. 36 м



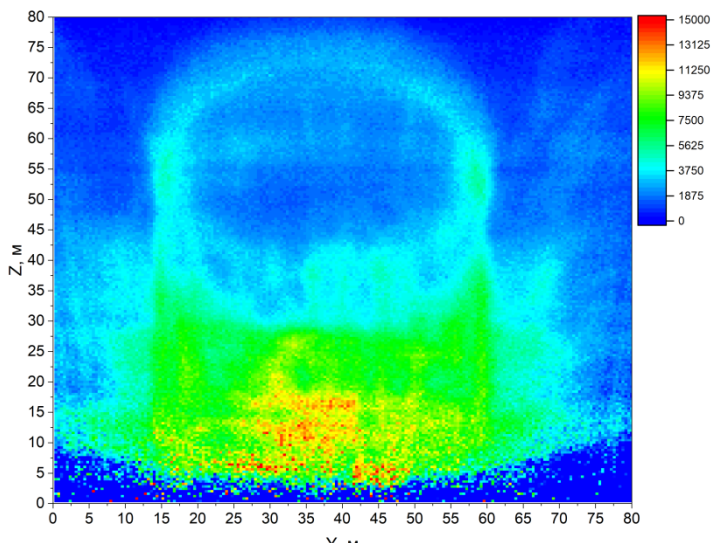
8. Результаты эксперимента на АЭС: зависимость от статистики



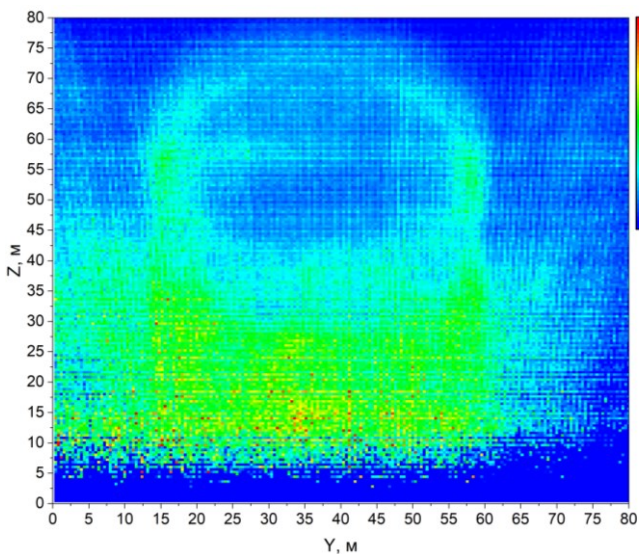
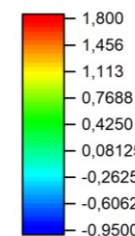
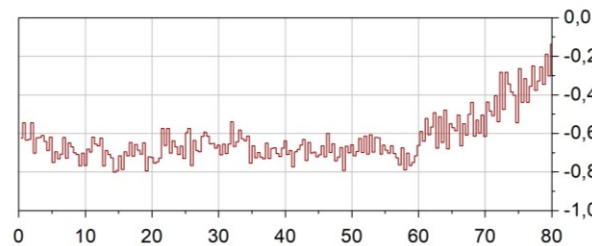
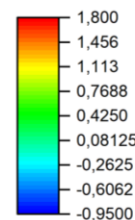
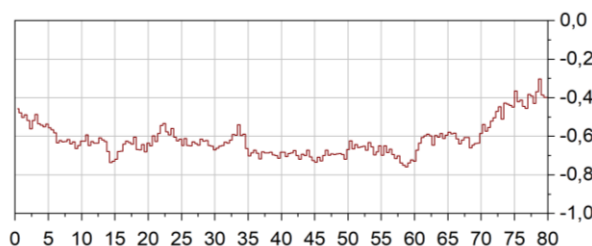
8. Результаты эксперимента на АЭС: обработанные матрицы

Основные выводы по результатам анализа мюнограмм:

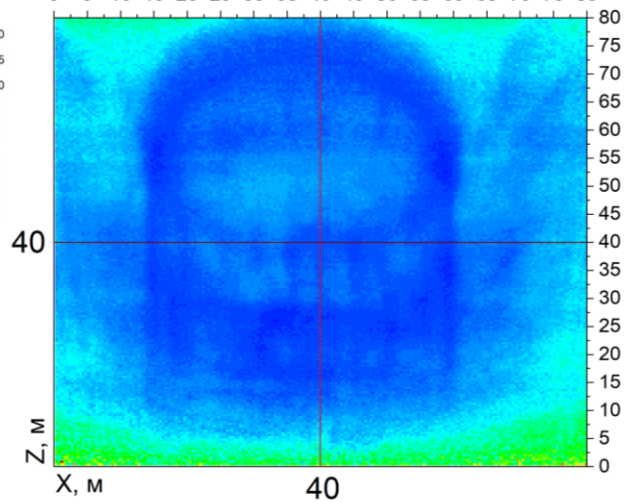
- 1) В нижней части мюнограммы проецируется оборудование машинного зала, для того чтобы выделить АЗ на фоне 12 м бетона и стали, нужно время экспозиции от 1 до 3 месяцев (результаты представленные на слайде получены в течение 15 дней экспозиции).
- 2) Для фиксации зоны динамического изменения внутренней структуры объектов, нужна разностная мюнограмма за 2-3 дня экспозиции.



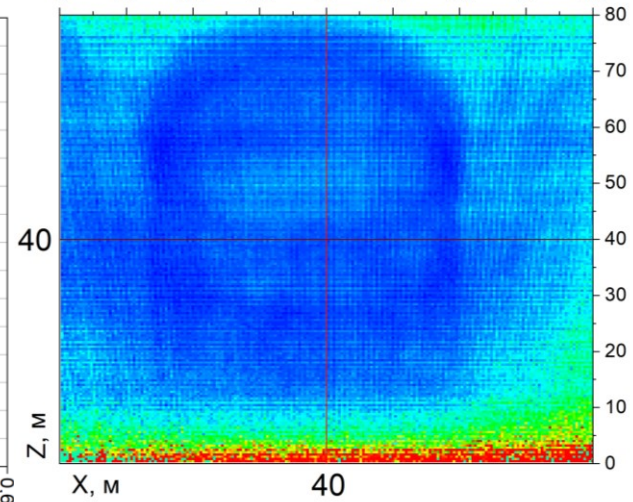
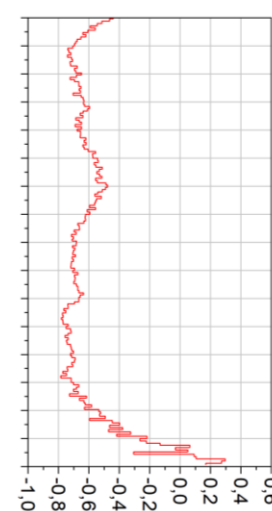
Плотностная матрица ДДТ



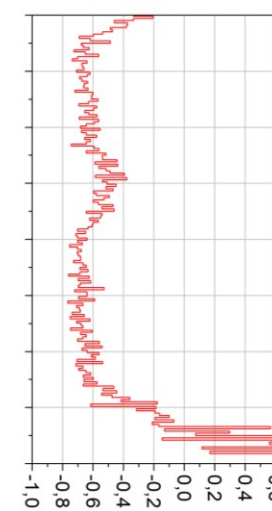
Плотностная матрица ССД



Нормированная матрица ДДТ



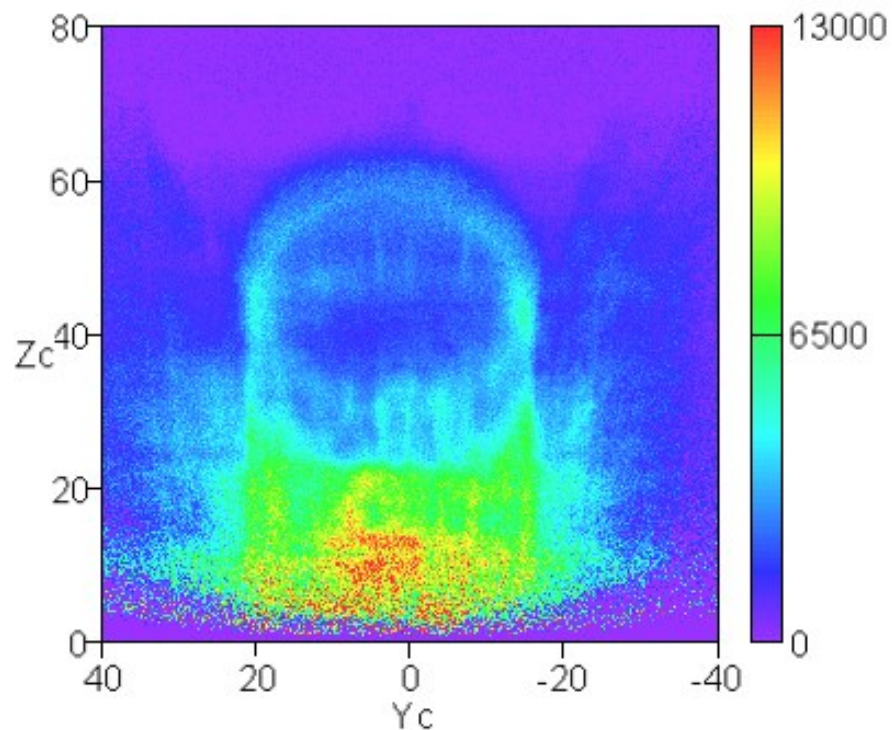
Нормированная матрица ССД



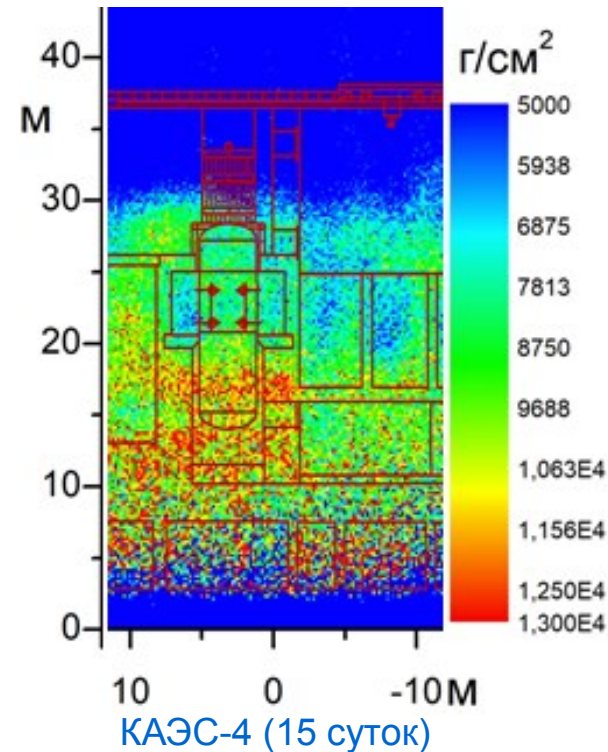
8. Результаты эксперимента на АЭС: сравнение качества

Важное отличие:

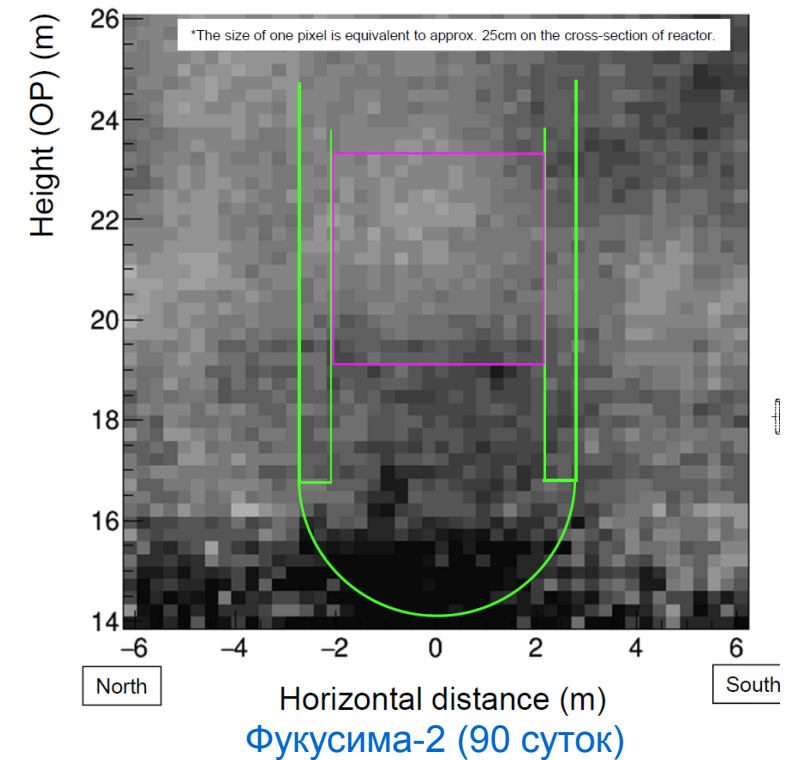
- 1) Условия экспериментов (расстояние до активной зоны, толщина бетона) на Калининской АЭС более жесткие, нежели на АЭС Фукусима;
- 2) Время экспозиции на Фукусима в 12 раз выше (180 суток против 15 суток).



Распределение плотности вещества



КАЭС-4 (15 суток)



Фукусима-2 (90 суток)

Задачи на 2023:

- ❖ Увеличение статистики базовой мюнограммы (до 2 месяцев экспозиции).
- ❖ Реализация разностного метода для отслеживания динамики изменений в наблюдаемом реакторном здании.
- ❖ Исследование других объектов АЭС.
- ❖ Реализация стерео метода при наблюдении реакторного здания с разных сторон.



Градирни АЭС

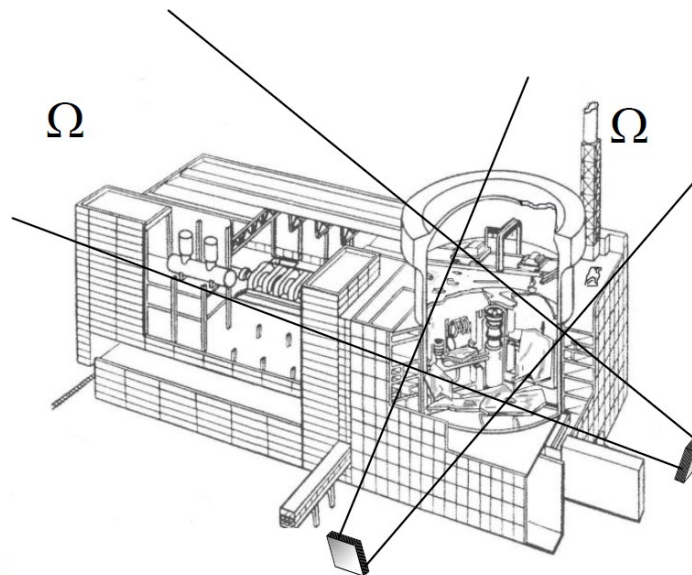
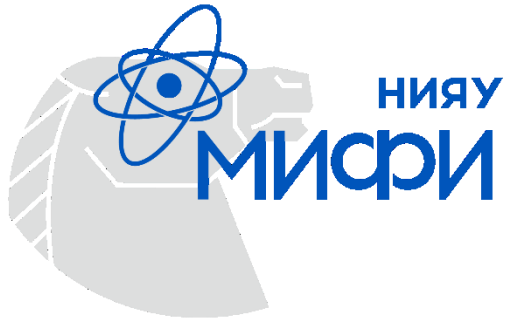


Схема измерения реактора АЭС



Спасибо за внимание!

Пасюк Никита Александрович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

E-mail: NAPasyuk@mephi.ru

Научно-образовательный центр НЕВОД

<http://ununevod.mephi.ru/ru/>

19.04.2023

Москва 2023

