



Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

Детекторы, методика эксперимента и ядерно-физические методы

Научно-образовательный центр

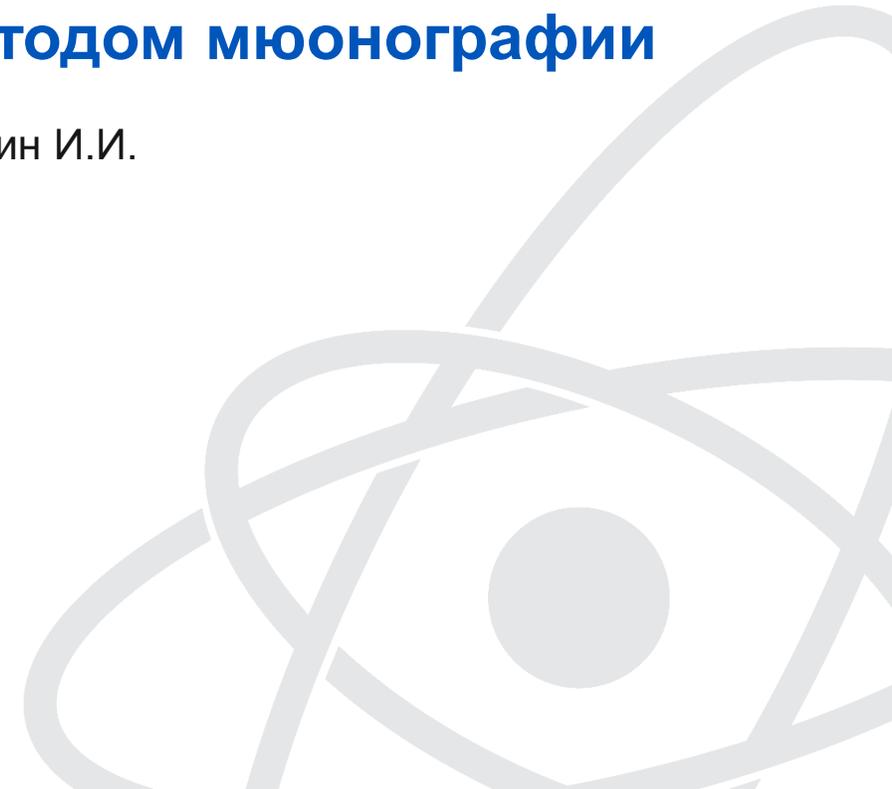
НЕВОД



Диагностика структуры энергоблока АЭС методом мюнографии

Пасюк Н.А., Петрухин А.А., Шутенко В.В., Яшин И.И.

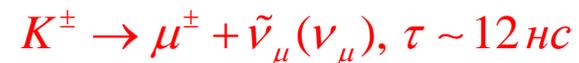
18.02.2025
Москва



Мюонография

- **Мюонография** (по аналогии с рентгенографией) – метод исследования внутренней структуры объектов с использованием естественного потока мюонов.
- **Мюоны** – элементарные частицы, рождающиеся в результате взаимодействия частиц первичных космических лучей с ядрами атомов атмосферы Земли (в основном N_2 и O_2) на высоте 15-20 км.

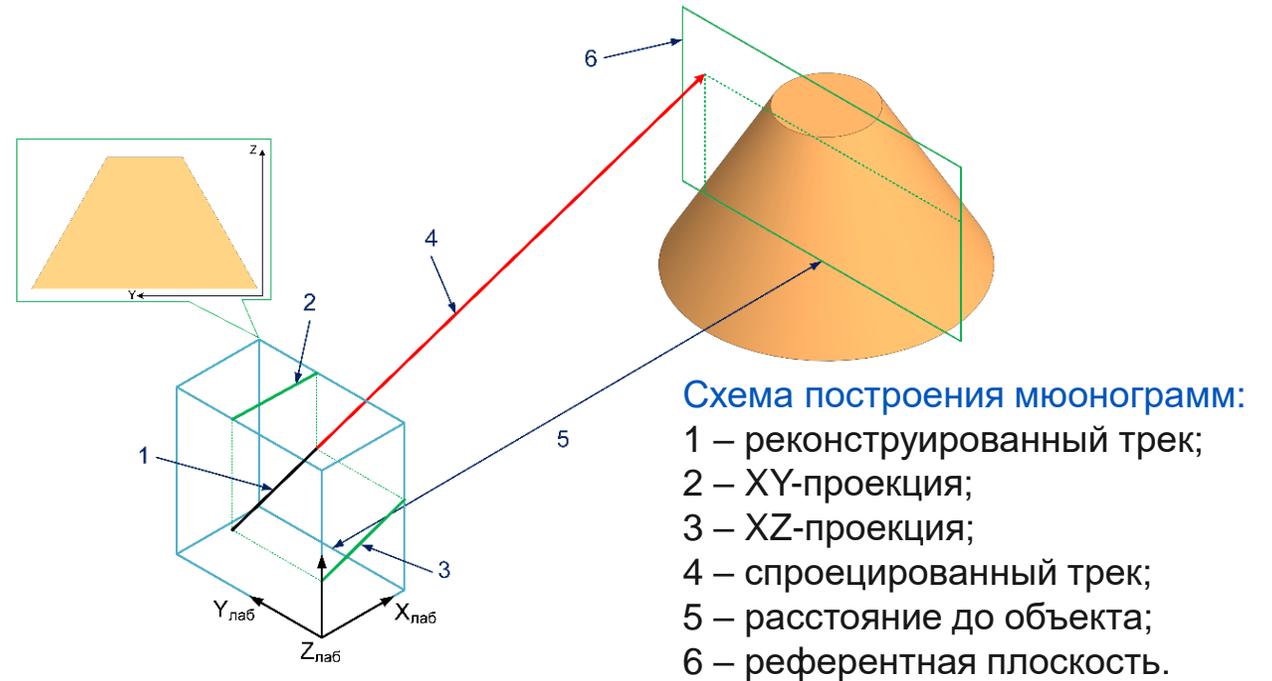
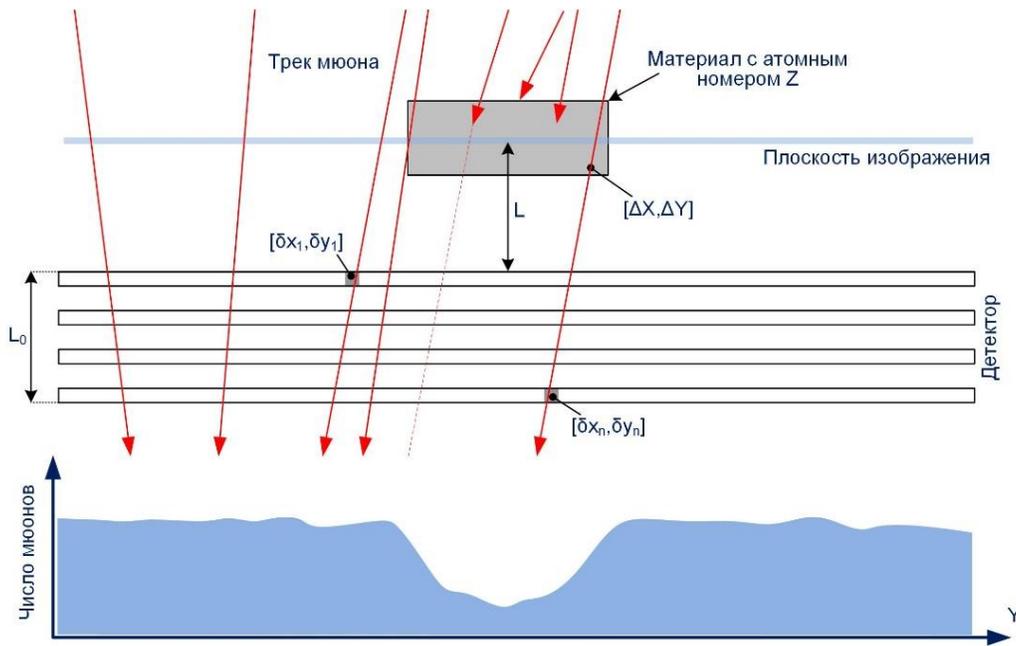
В результате взаимодействий рождаются в основном **пионы** и **каоны**, которые распадаются на **мюоны** и **нейтрино**.



- Поток атмосферных мюонов на поверхности Земли составляет ~ 1 **мюон/см²/мин** и обладает сильной зенитно-угловой зависимостью.
- **Мюонограмма** (по аналогии с рентгенограммой) – графическое отображение на плоскости областей анизотропии зарегистрированного потока мюонов, прошедшего через объект наблюдения.
- **Методы мюонографии:** многократное кулоновское рассеяние мюонов и поглощение мюонов.

Аналогично рентгенограмме, на мюонограмме отображаются объекты, располагающиеся на пути появления потока мюонов до детектора. Глубина изображения структуры на мюонограмме определяется структурой вещества и его суммарной толщиной.

Метод поглощения мюонов



- Каждая ячейка референтной плоскости содержит информацию о количестве пересечений реконструированных треков данной ячейки.
- Для выявления динамических изменений в структуре объекта используется **разностный метод** – из матрицы после изменений вычитается матрица до изменения с учетом нормировки каждой ячейки. При вычитании дополнительно применяется гауссов фильтр низких частот, учитывающий вес каждой ячейки матрицы.

$$M_{\delta} = \frac{M_d - M_s d}{\sqrt{M_s d}}$$

Гибридный мюонный годоскоп

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



Общий вид ГМГ: вес 4.5 т,
высота 4.5 м, ширин 2.5 м, длина 6.2 м

Гибридный мюонный годоскоп:

- **Сцинтилляционный стриповый детектор:** стрипы 2960×23×7 мм и SiPM.
- **Детектор на дрейфовых трубках:** трубки Ø30 мм×3 м и газ 7%Ar + CO₂.

10 однопроекционных плоскостей:
4 на дрейфовых трубках;
6 на сцинтилляционных стрипах.

Чувствительная площадь: 3×3 м²

Суммарно: 768+1152=1920 каналов регистрации.

Пространственная точность:

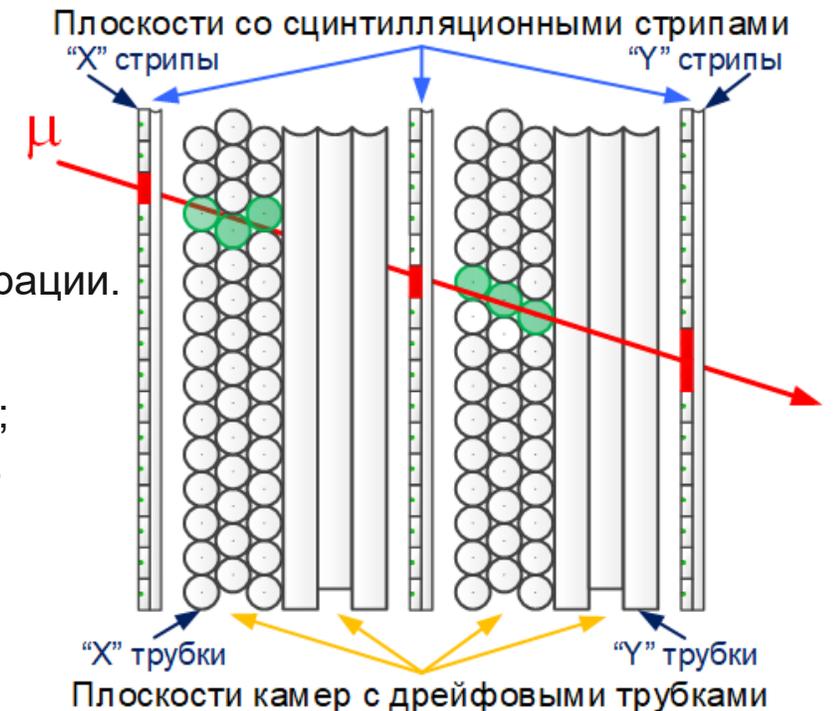
ССД: FWHM (ΔZ) = 8.9 мм, $\sigma(\Delta Z)$ = 3.8 мм;

ДДТ: FWHM (ΔZ) = 1.3 мм, $\sigma(\Delta Z)$ = 0.6 мм.

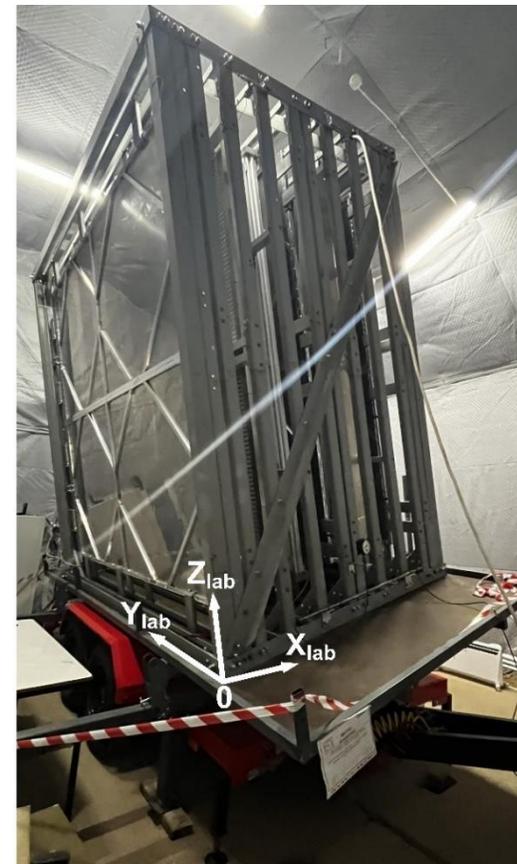
Угловая точность:

ССД: FWHM ($\Delta\theta$) = 0.5°, $\sigma(\Delta\theta)$ = 0.2°;

ДДТ: FWHM ($\Delta\theta$) = 0.1°, $\sigma(\Delta\theta)$ = 0.04°.



Испытание гибридного мюонного годоскопа на Калининской АЭС



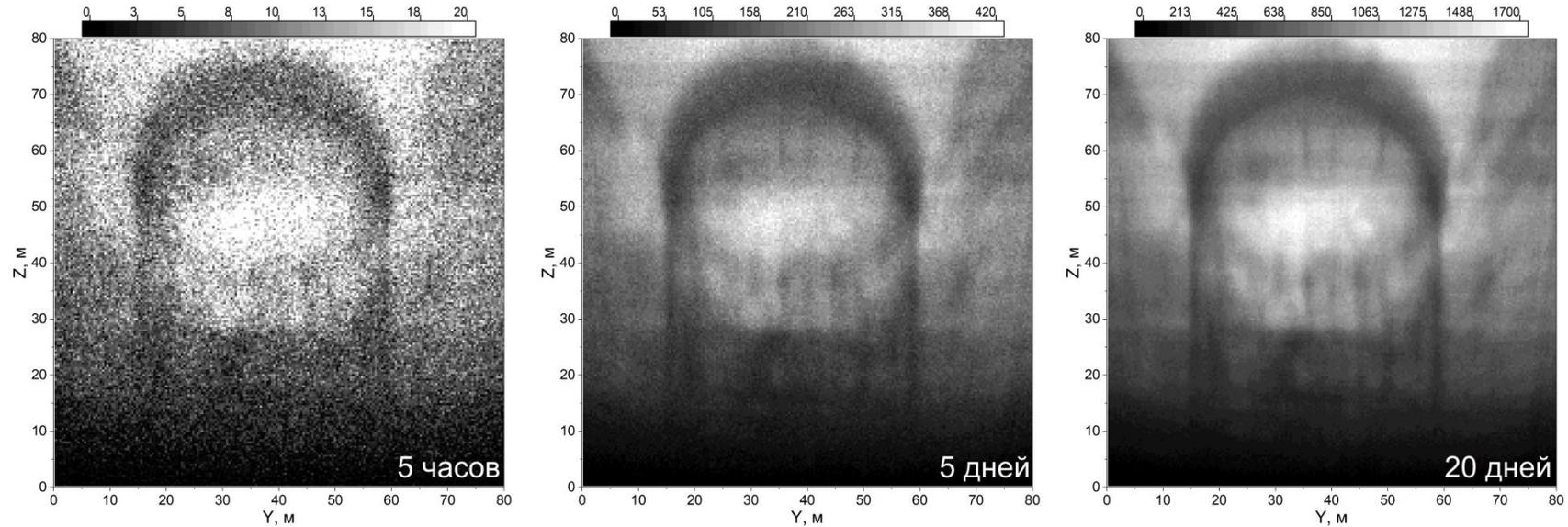
Эксперименты на АЭС проводились в период с октября 2022 по ноябрь 2023 года.

Первая серия измерений была пробной и проходила в период с октября по декабрь 2022 года.

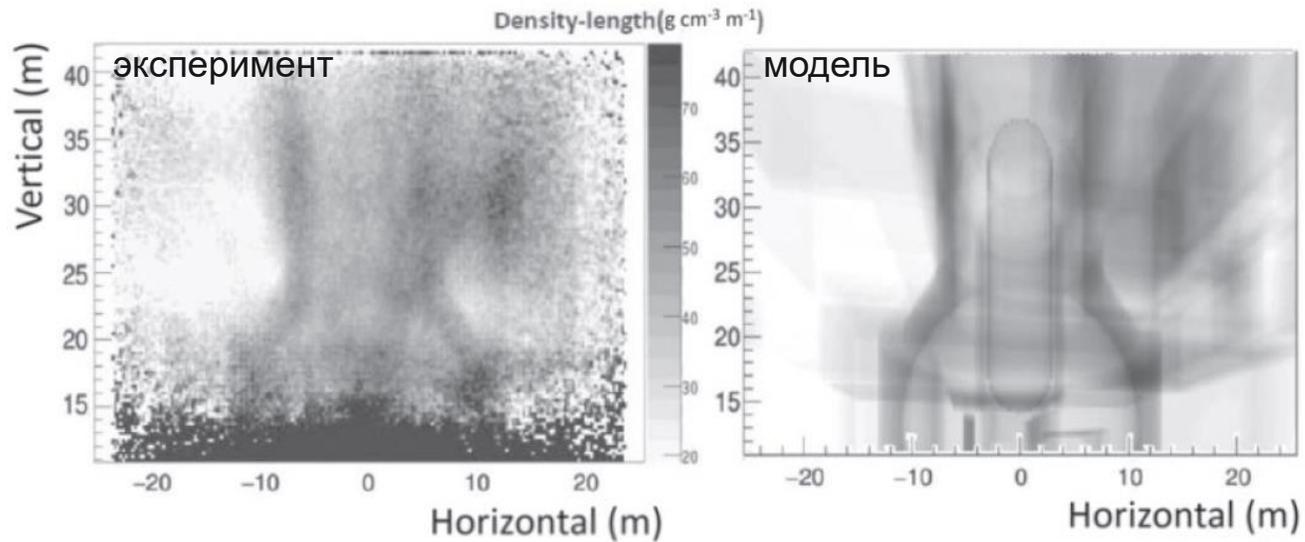
Вторая серия измерений проходила с мая по ноябрь 2023 года и была нацелена на проверку разностного метода получения мюнограмм в период планово-предупредительных ремонтных работ (ППР) на 4 энергоблоке АЭС.

ППР проходили в период с 24.06.2023 по 21.07.2023: тех. обслуживание оборудования, загрузка и выгрузка топлива. 5

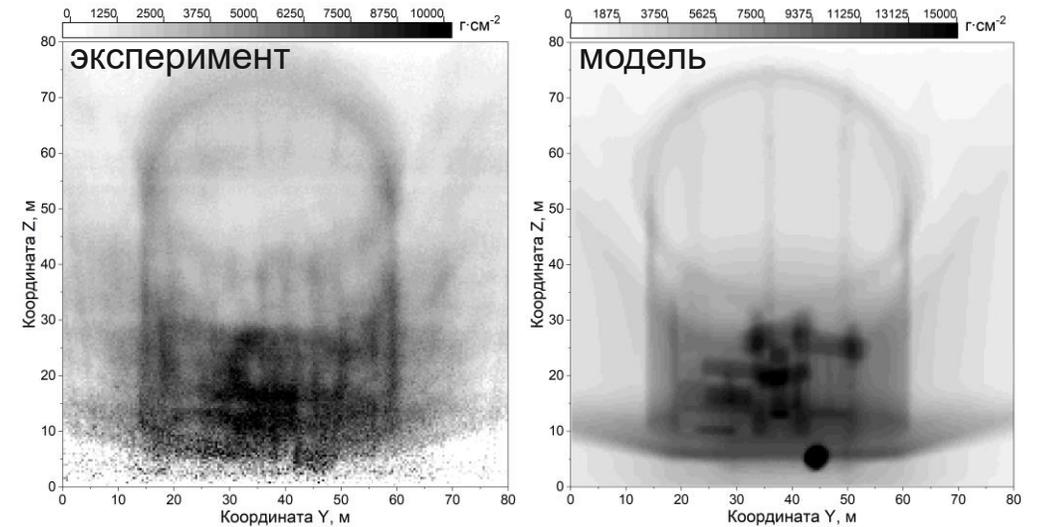
Мюнограммы АЭС



Влияние статистики на качество мюнограмм в точке 60 м

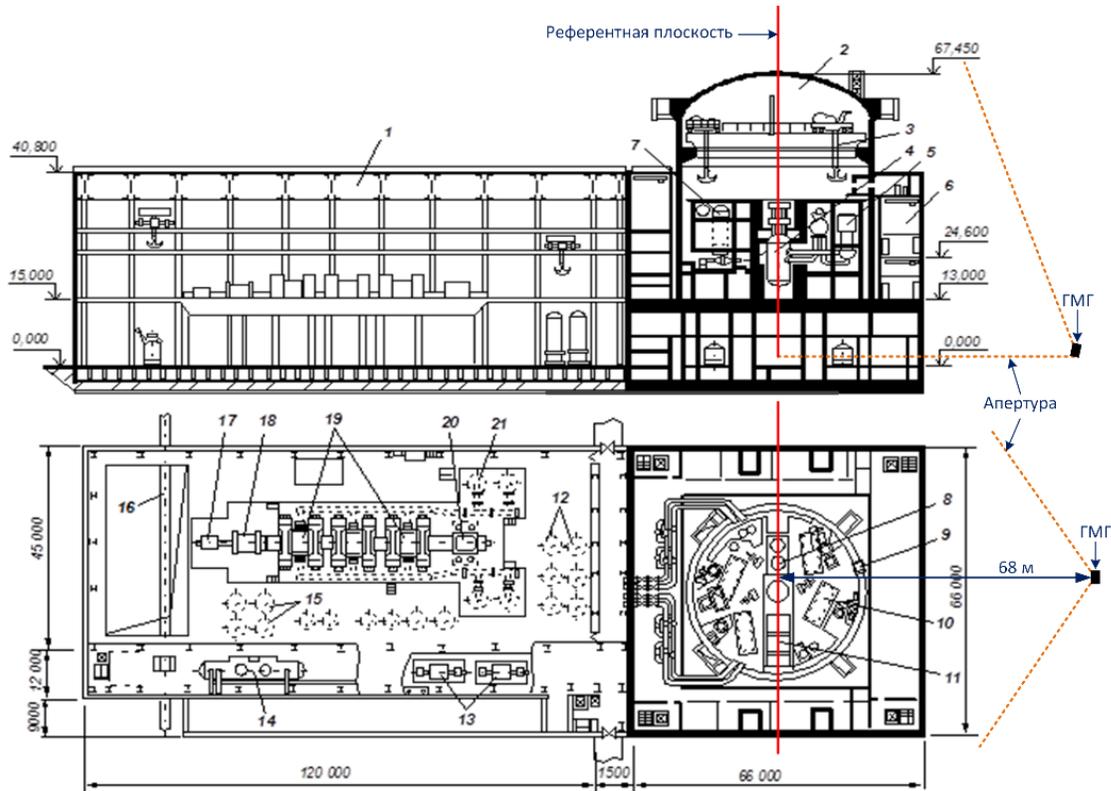


Фукусима, 7 месяцев [Fujii H. et al., 2021]

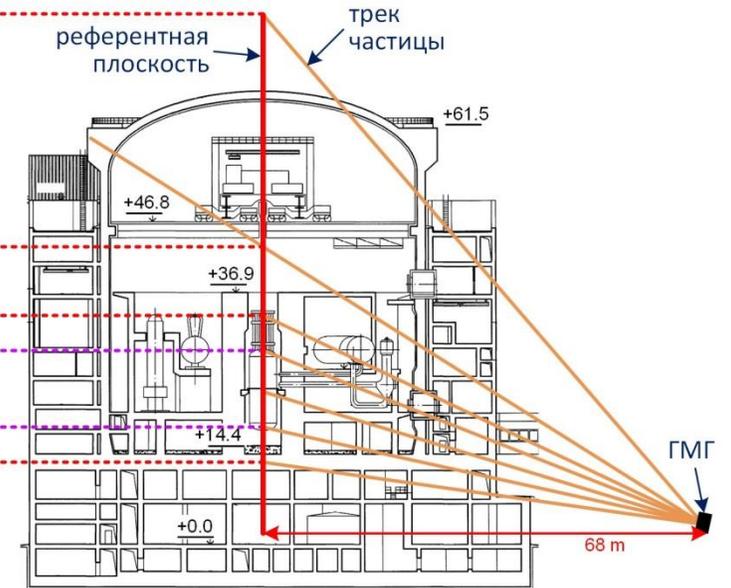
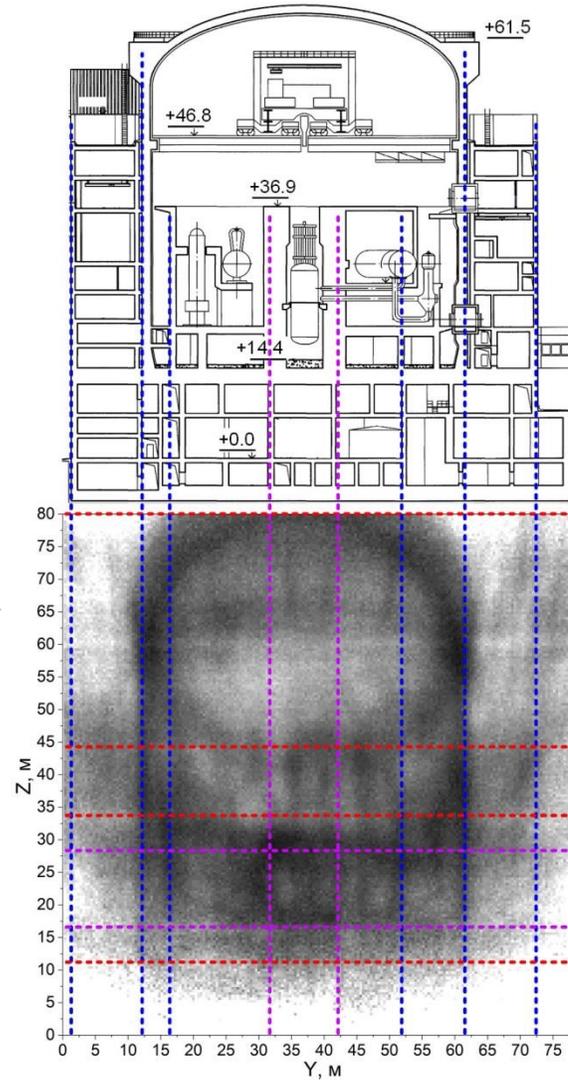


Матрица распределения толщин

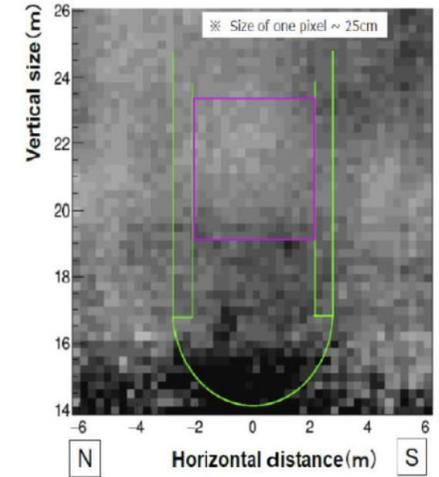
Анализ мюнограммы АЭС



Схем расположения ГМГ относительно энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000



Структура энергоблока

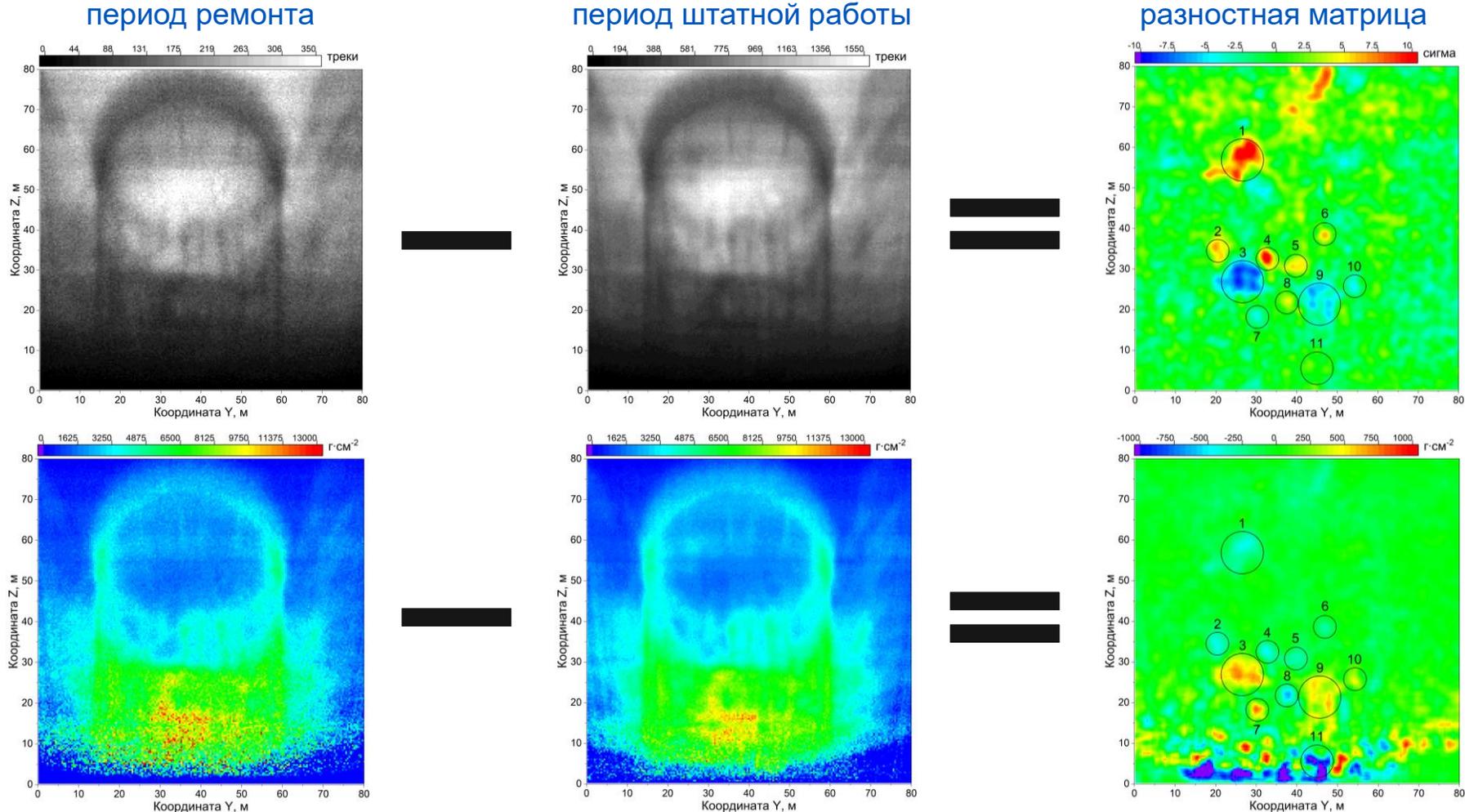


Фукусима [Fujii H. et al., 2021]

Мюнограммы АЭС

Экспериментальные данные были разделены на несколько периодов:

- 1) штатная работа **осенью 2022** года (409 часов живого времени);
- 2) штатная работа **весной 2023** года (162 часа живого времени);
- 3) штатная работа **летом 2023** года (150 часов живого времени);
- 4) перегрузка топлива (91 час живого времени);
- 5) выгрузка топлива (147 часов живого времени).

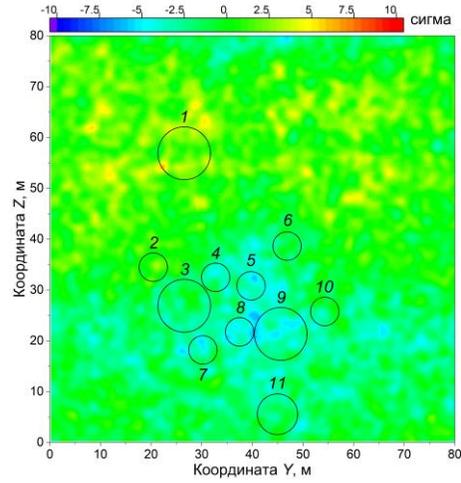


- 1 и 6 – кран;
- 2 – транспортный контейнер;
- 3 – бассейн выдержки;
- 4 – циркуляционный насос;
- 5 – оснастка;
- 7 – ТВС в бассейне выдержки;
- 8 – блок защитных труб;
- 9 – бассейн перегрузки;
- 10 – крышка реактора;
- 11 – турбина машинного зала.

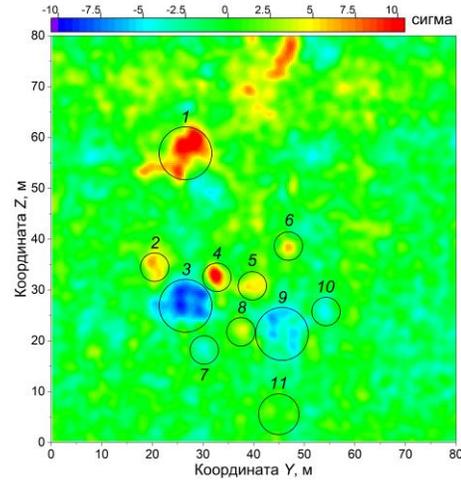
плотность ↑ поток частиц ↓

Разностные мюнограммы АЭС

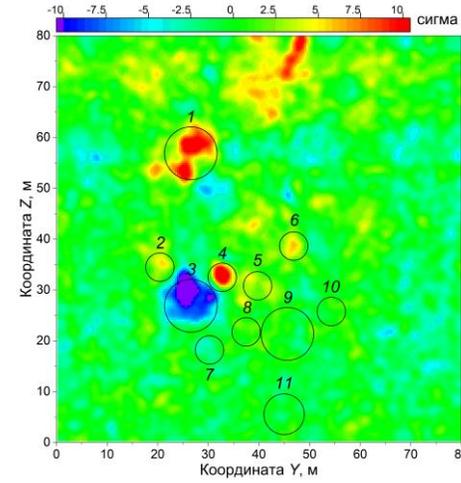
по трекам



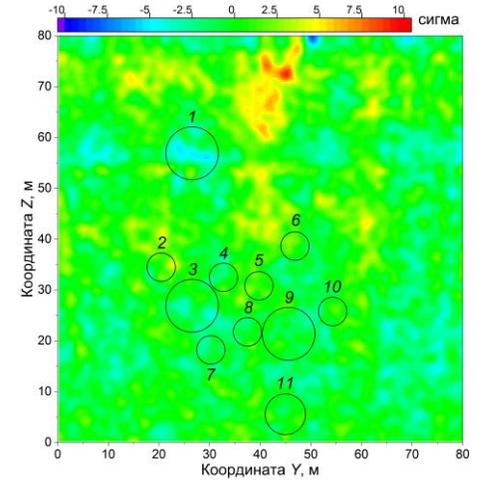
весна 2023 минус осень 2022



перегрузка топлива 2023
минус осень 2022

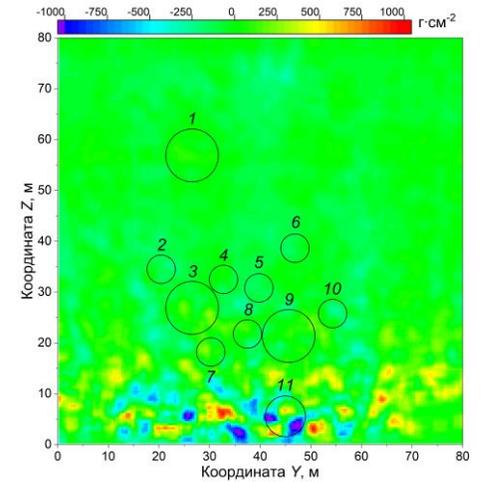
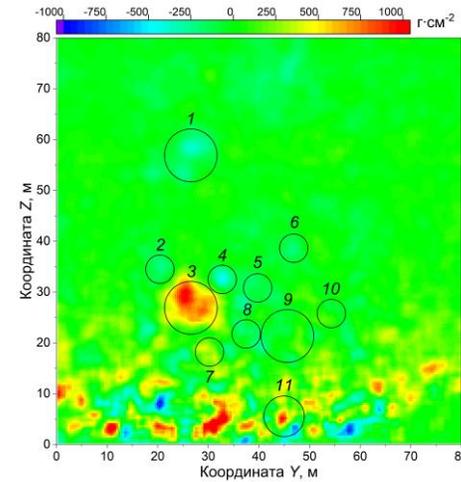
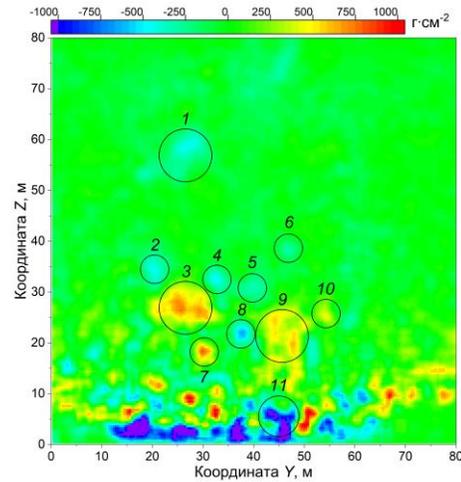
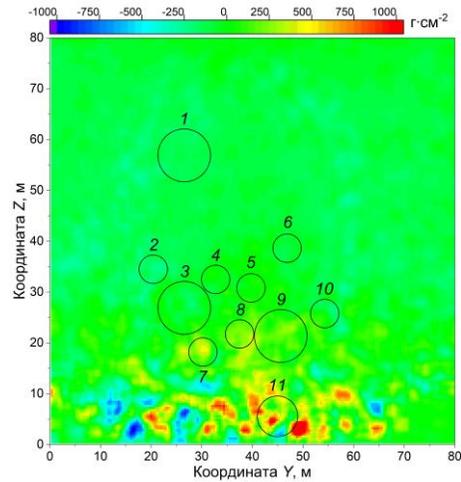


выгрузка топлива 2023 минус
осень 2022



лето 2023 минус осень 2022

по толщинам

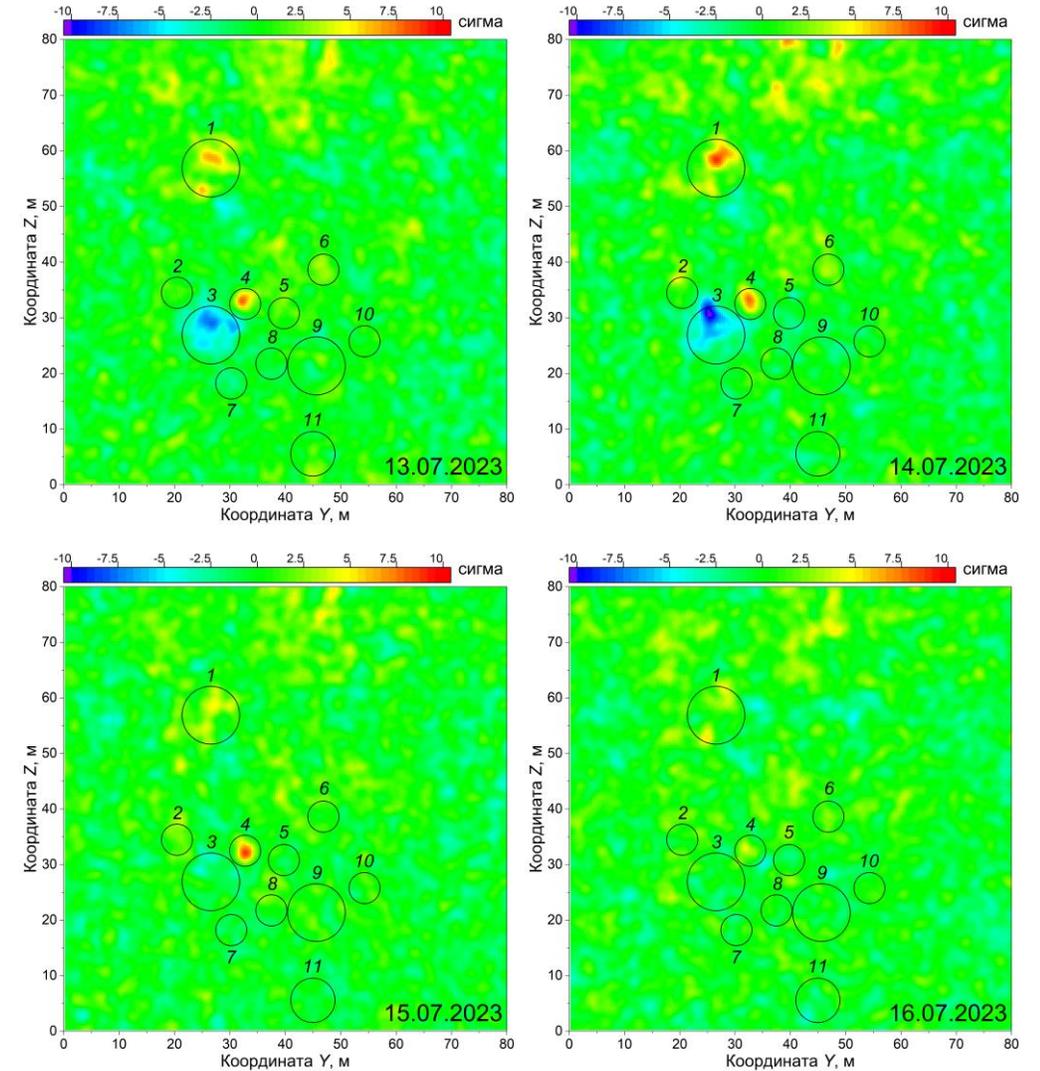
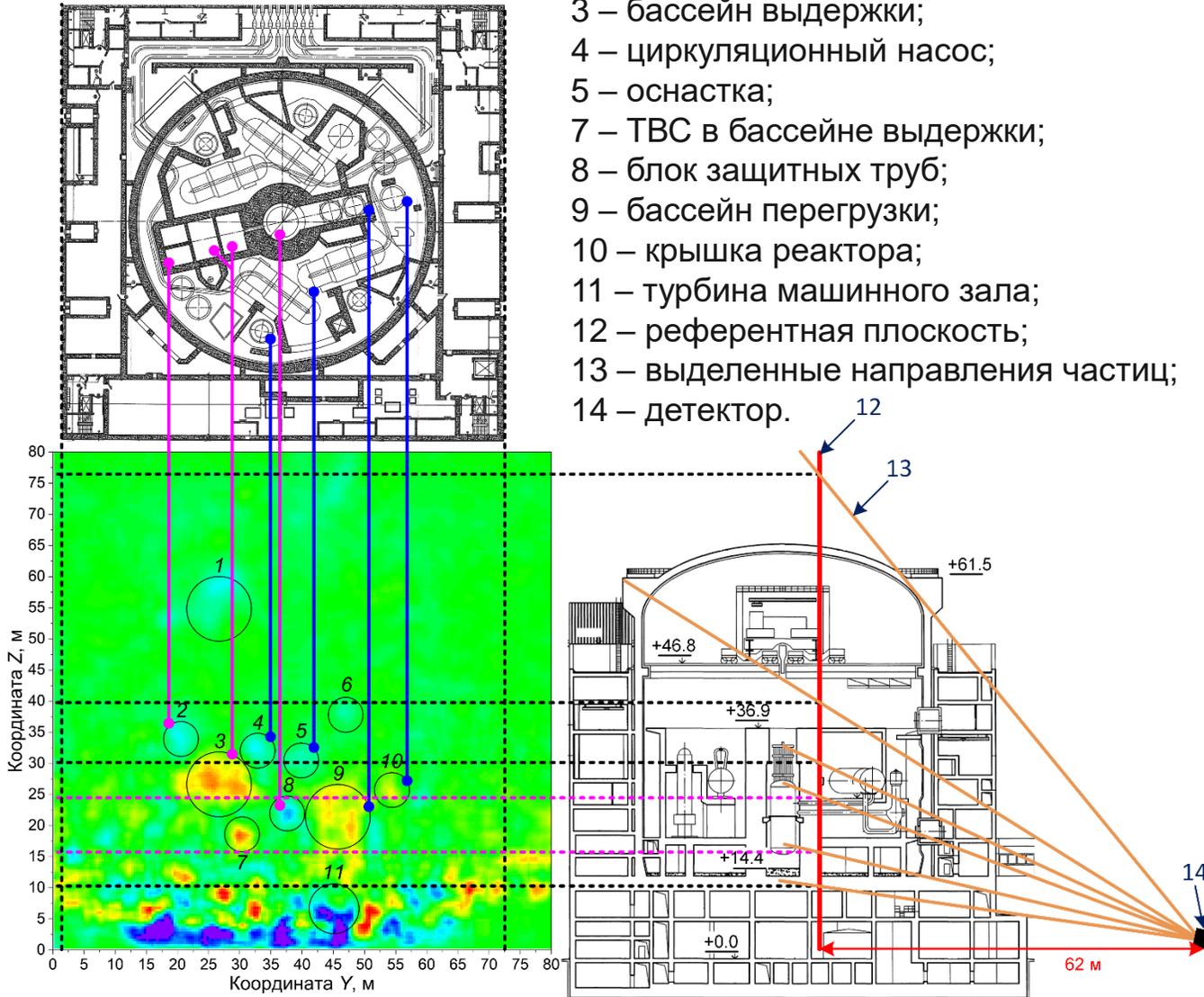


плотность ↑ ПОТОК ЧАСТИЦ ↓

Разностные мюнограммы АЭС

Сопоставление мюнограммы со схемой энергоблока

- 1 и 6 – кран;
- 2 – транспортный контейнер;
- 3 – бассейн выдержки;
- 4 – циркуляционный насос;
- 5 – оснастка;
- 7 – ТВС в бассейне выдержки;
- 8 – блок защитных труб;
- 9 – бассейн перегрузки;
- 10 – крышка реактора;
- 11 – турбина машинного зала;
- 12 – референтная плоскость;
- 13 – выделенные направления частиц;
- 14 – детектор.



Суточные мюнограммы во время завершения ремонтных работ

Заключение

- Разработана, создана и протестирована гибридная регистрирующая система широкоапертурного мюонного годоскопа и методы обработки событий по его данным.
- Впервые проведены экспериментальные исследования структуры энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 в разные периоды работы методом мюнографии.
- Большие толщины структурных объектов реакторного блока и их 2D проецирование на реактор не позволили в текущей конфигурации эксперимента выделить область активной зоны на мюнограмме.
- Примененный разностный метод построения мюнограмм позволил обнаружить различные изменения в конструкции энергоблока в период ремонтных работ. Однако в случае 2D мюнограммы невозможно получить пространственное расположение выявленных артефактов.
- Качество мюнограмм (детализация) может быть улучшено путём применения различных способов обработки изображений (фильтров) и варьированием параметров самих мюнограмм (изменением шага и размеров ячеек, цветовой градуировки и т.п.).
- Для получение 3D мюнограмм необходимо провести мюнографию энергоблока с нескольких направлений.



Научно-образовательный центр

НЕВОД



Спасибо за внимание!

Пасюк Никита Александрович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

E-mail: NAPasyuk@mephi.ru

Научно-образовательный центр НЕВОД

<http://www.nevod.mephi.ru/ru/>



Сцинтилляционный стриповый детектор

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

Однопроекционная плоскость ССД – два состыкованных базовых модуля.

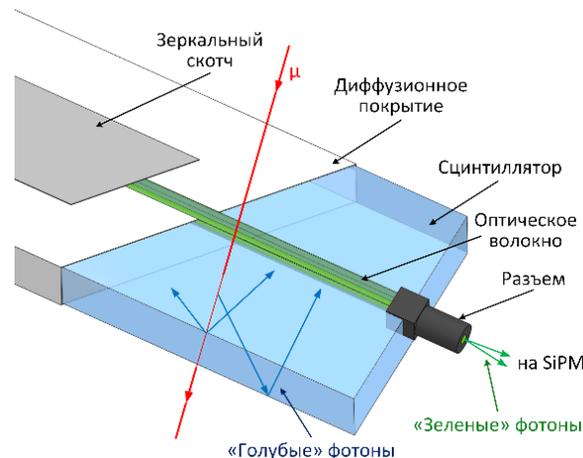
Базовый модуль – 64 сцинтилляционных стрипа.



Базовый модуль
3196×1500×57 мм



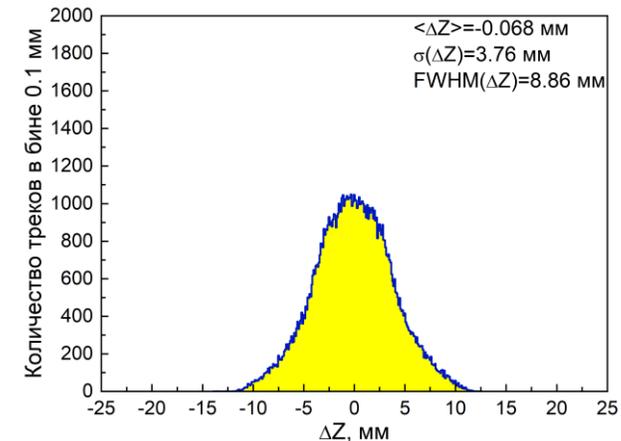
SiPM: Hamamatsu
S13360-1350CS



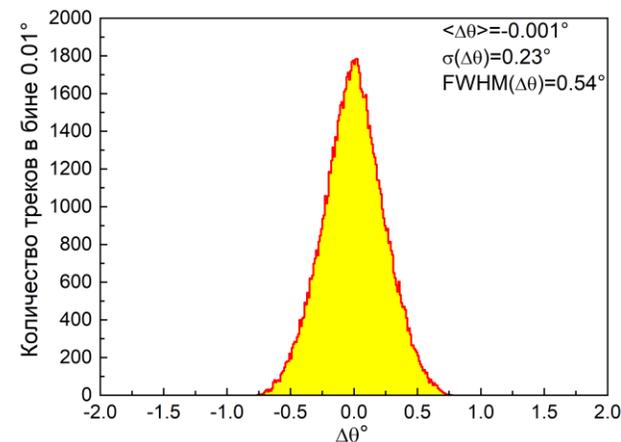
Стрип: полистирол + паратерфенил + РОРОР, размер 2960×23×7 мм, оптоволокну 1 мм



Плата считывания на базе ASIC PETIROC 2B и FPGA Cyclone III



Пространственная точность
FWHM (ΔZ) = 8.9 мм, $\sigma(\Delta Z)$ = 3.8 мм



Угловая точности
FWHM ($\Delta \theta$) = 0.5°, $\sigma(\Delta Z)$ = 0.2° 13

Детектор на дрейфовых трубках

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

Однопроекционная плоскость ДДТ – две состыкованные дрейфовые камеры.

Дрейфовая камера – 3 ряда по 48 дрейфовых трубок (144 трубки).

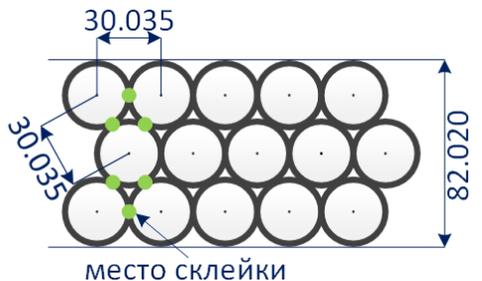


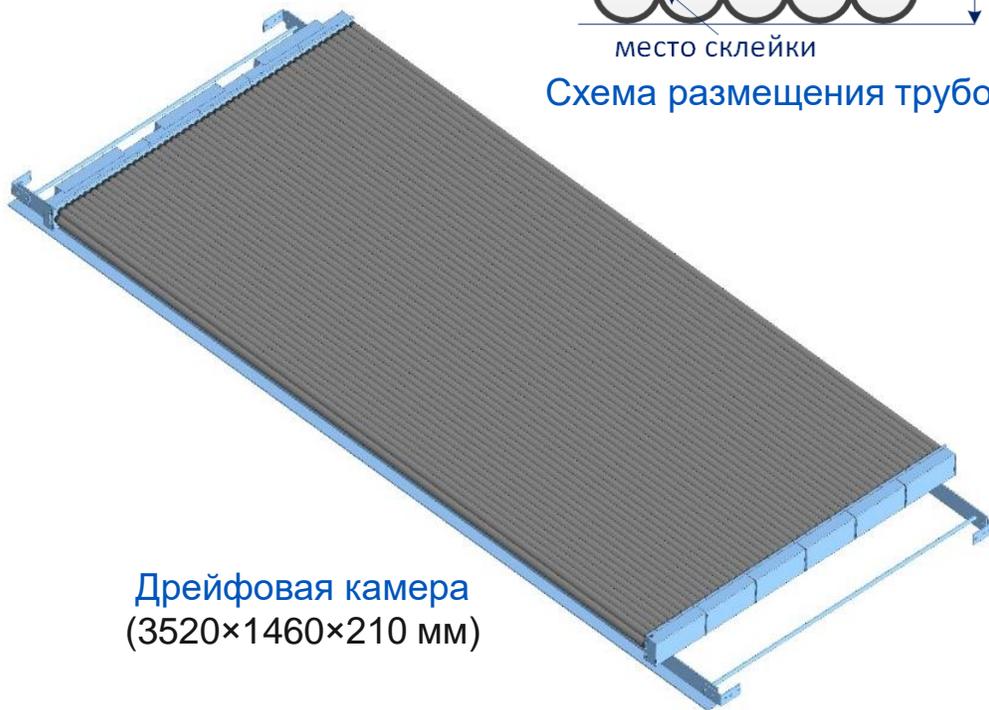
Схема размещения трубок



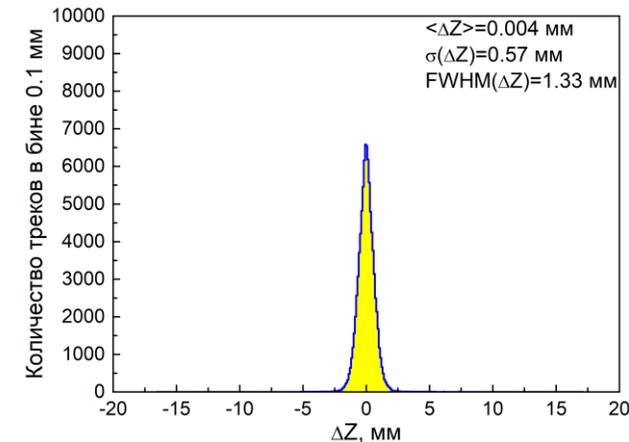
Дрейфовая трубка
Ø30 мм×3 м



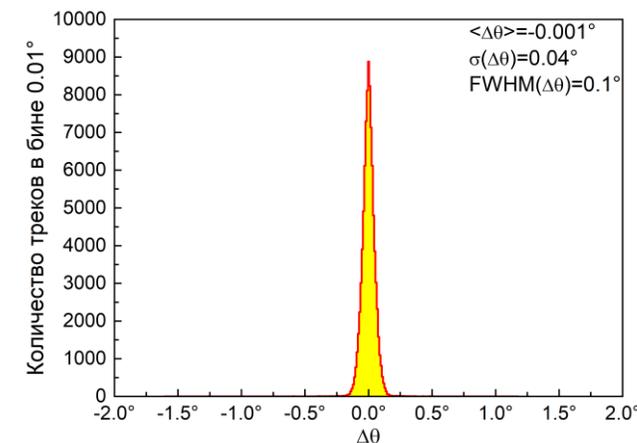
Плата считывания на базе FPGA ALTERA



Дрейфовая камера
(3520×1460×210 мм)



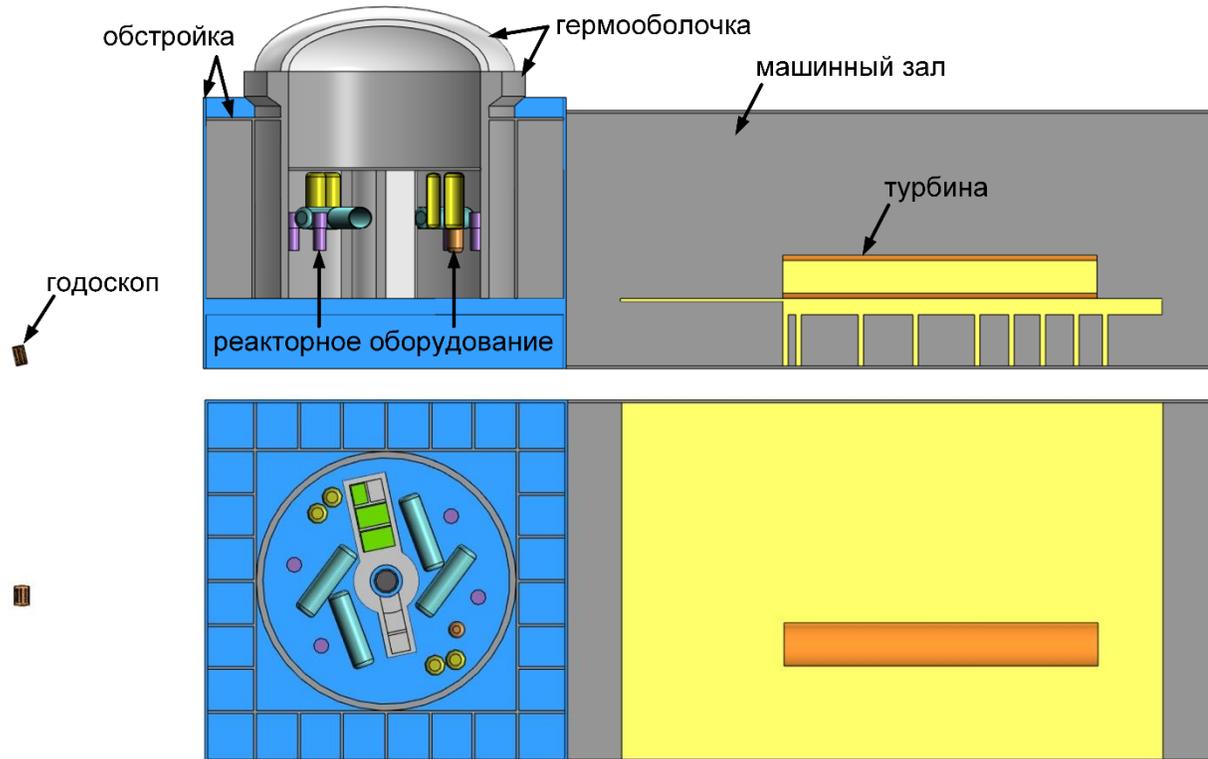
Пространственная точность
 $FWHM(\Delta Z) = 1.3$ мм, $\sigma(\Delta Z) = 0.6$ мм



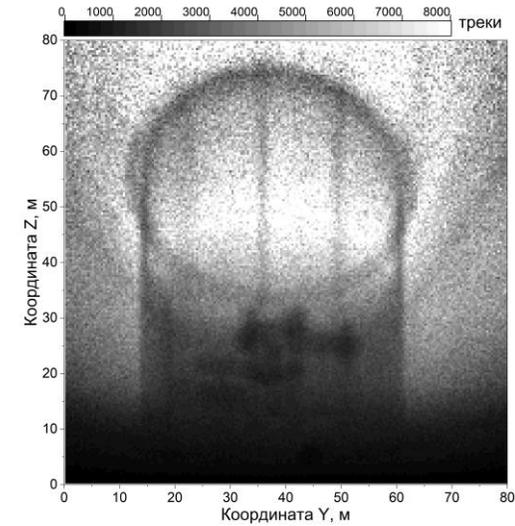
Угловая точности
 $FWHM(\Delta\theta) = 0.1^\circ$, $\sigma(\Delta Z) = 0.04^\circ$

Пример разностной мюнограммы

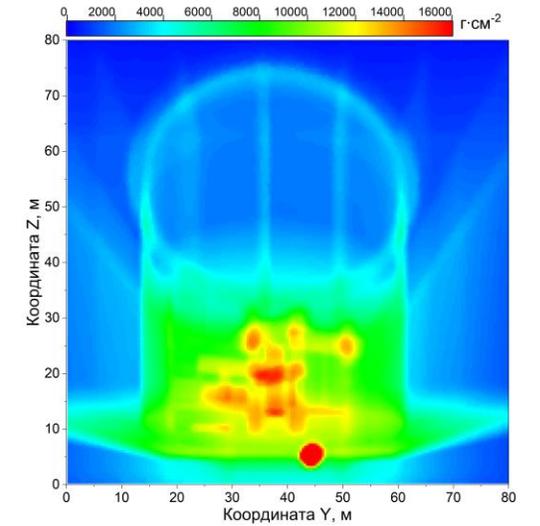
Упрощенная модель энергоблока



плотность \uparrow поток частиц \downarrow



Распределения треков



Распределения толщин