

38 Всероссийская конференция по космическим лучам



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НЕВОД В 2022 – 2024 ГГ.

К.Г. Компаниец от коллектива
Научно-образовательного центра НЕВОД

ФИАН 4 июля 2024 г.

Экспериментальный комплекс НЕВОД

Состав комплекса сегодня:

Центральная часть

- Черенковский водный детектор (ЧВД) НЕВОД объемом 2000 куб. м
- Система калибровочных телескопов (СКТ) – 2 плоскости по 40 детекторов - 90 кв. м
- Координатно-трековый детектор ДЕКОР площадью 72 кв. м
- Мюонный годоскоп УРАГАН площадью 4 x 11.5 кв. м
- Сцинтилляционный мюонный годоскоп (СцМГ) площадью 2 x 11 кв. м.

Периферийная часть

- Прототип нейтронной установки ПРИЗМА площадью 500 кв. м.
- Установка для регистрации атмосферных нейтронов (УРАН) площадью 1000 кв. м
- Установка для регистрации вариаций атмосферных нейтронов НЕЙТРОН
- Установка НЕВОД-ШАЛ площадью 10 000 кв. м

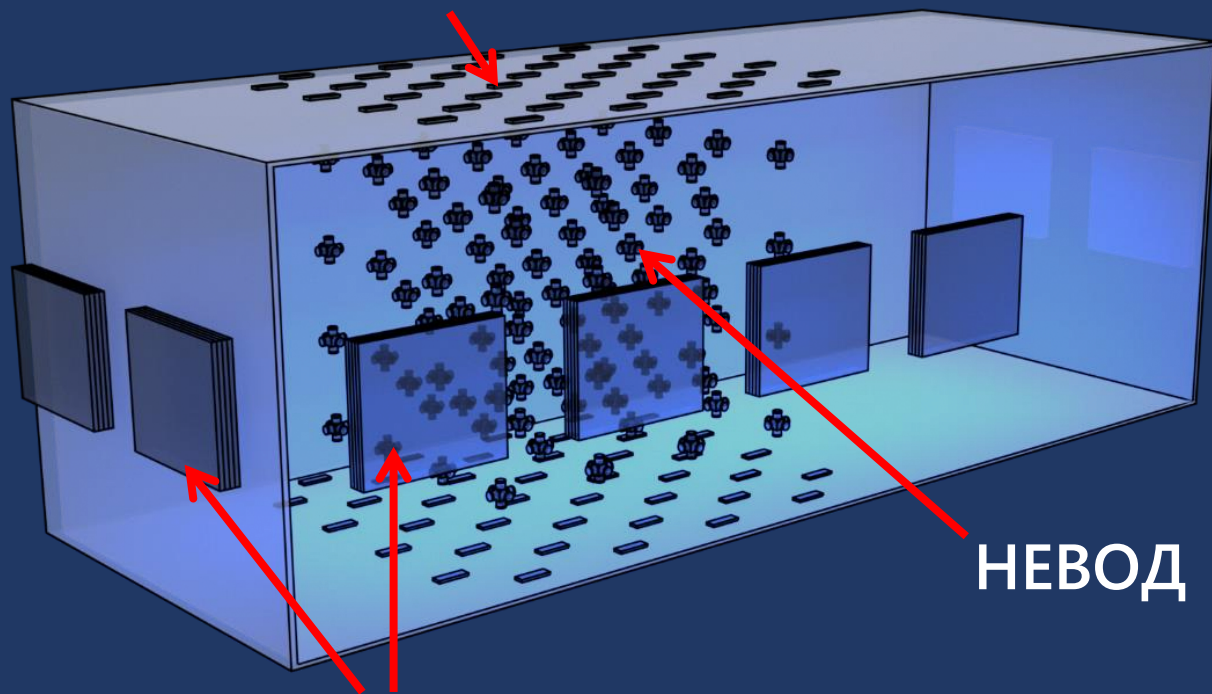
В настоящее время создается:

- координатно-трековый детектор ТРЕК площадью 250 кв. м.

для регистрации мюонов под большими зенитными углами (до горизонта).

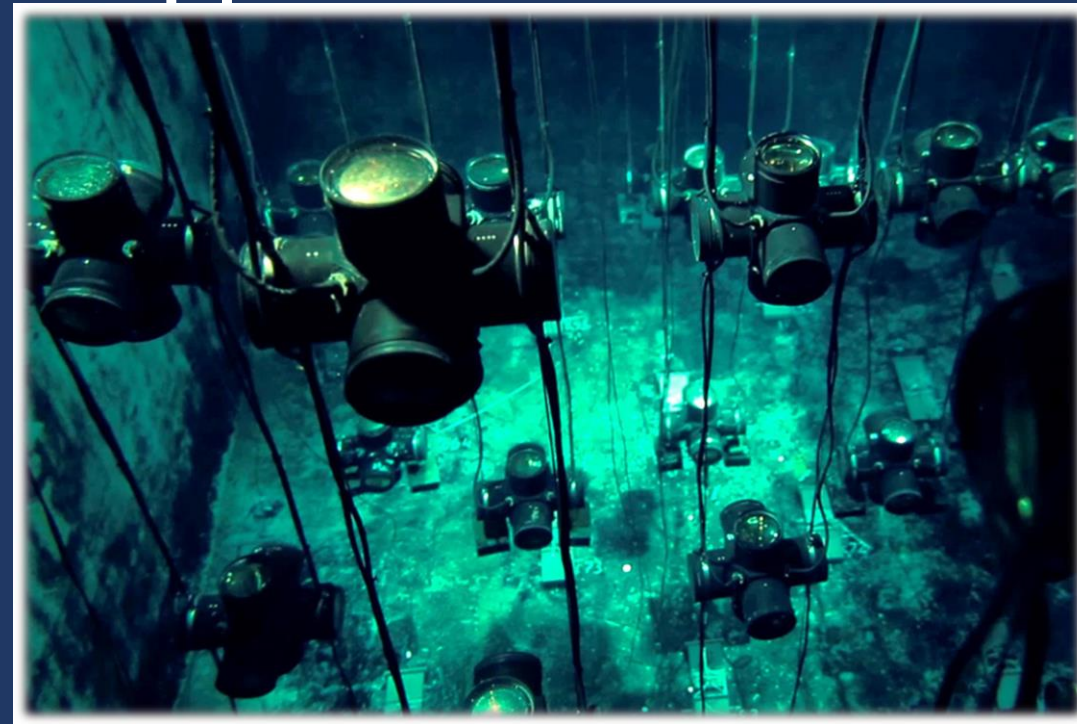
Комплекс ЧВД-СКТ-ДЕКОР

Система калибровочных
телескопов



Координатно-трековый детектор
ДЕКОР

НЕВОД

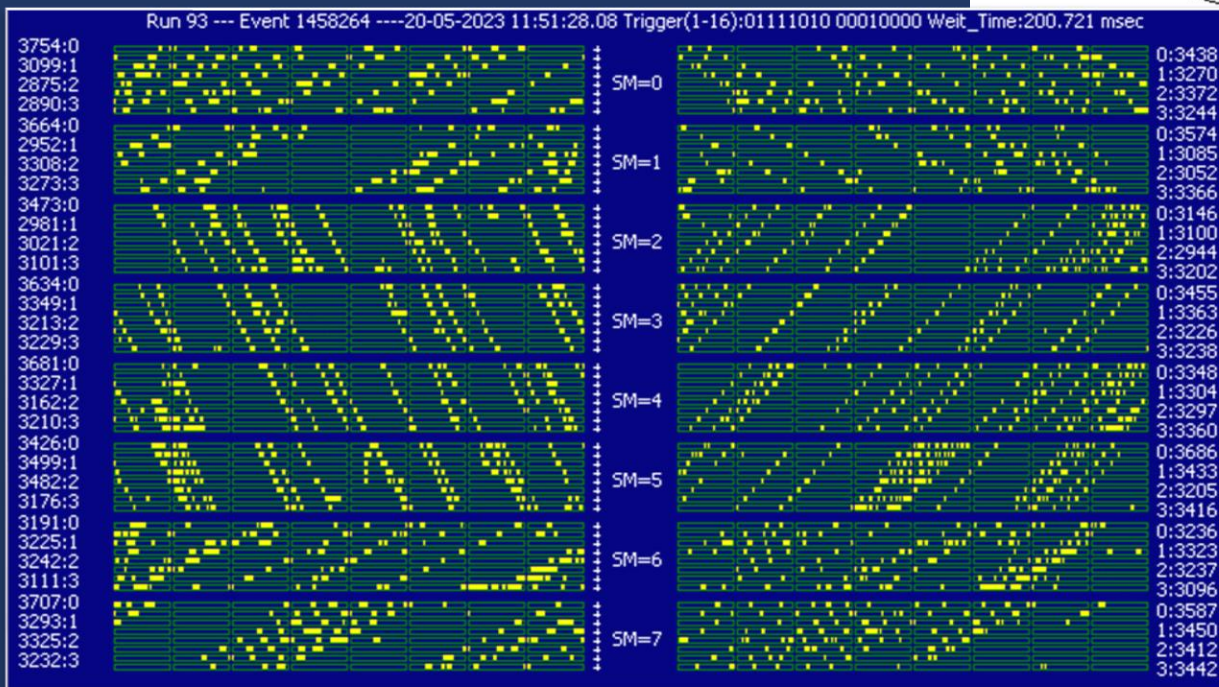
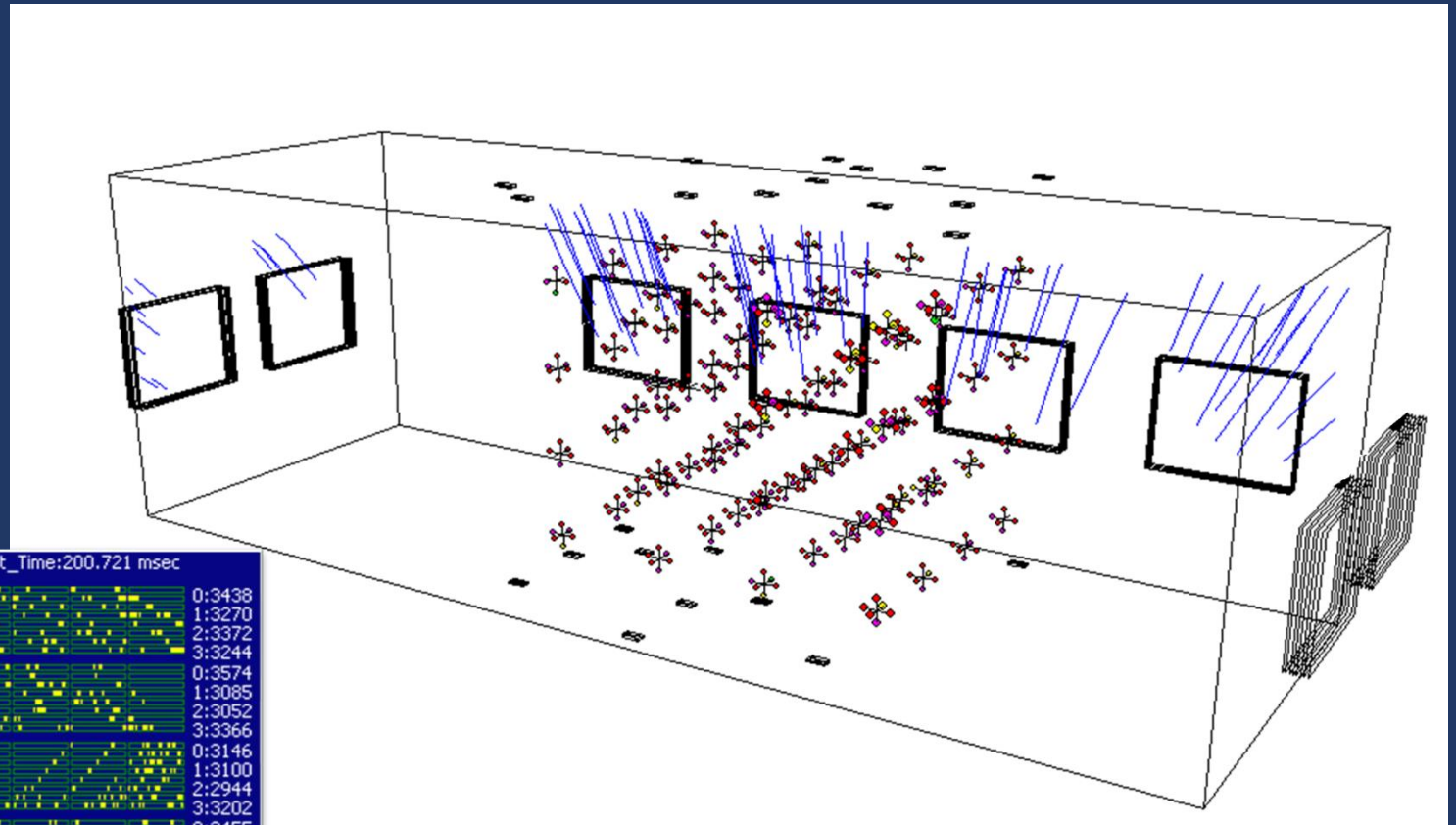


ЧВД:
2000 мЗ
91 КСМ
546 ФЭУ

СКТ:
2 × 40 счетчиков
 $S_d = 800 \text{ см}^2$
Толщина = 2 см
Площадь = 8 × 10 м²

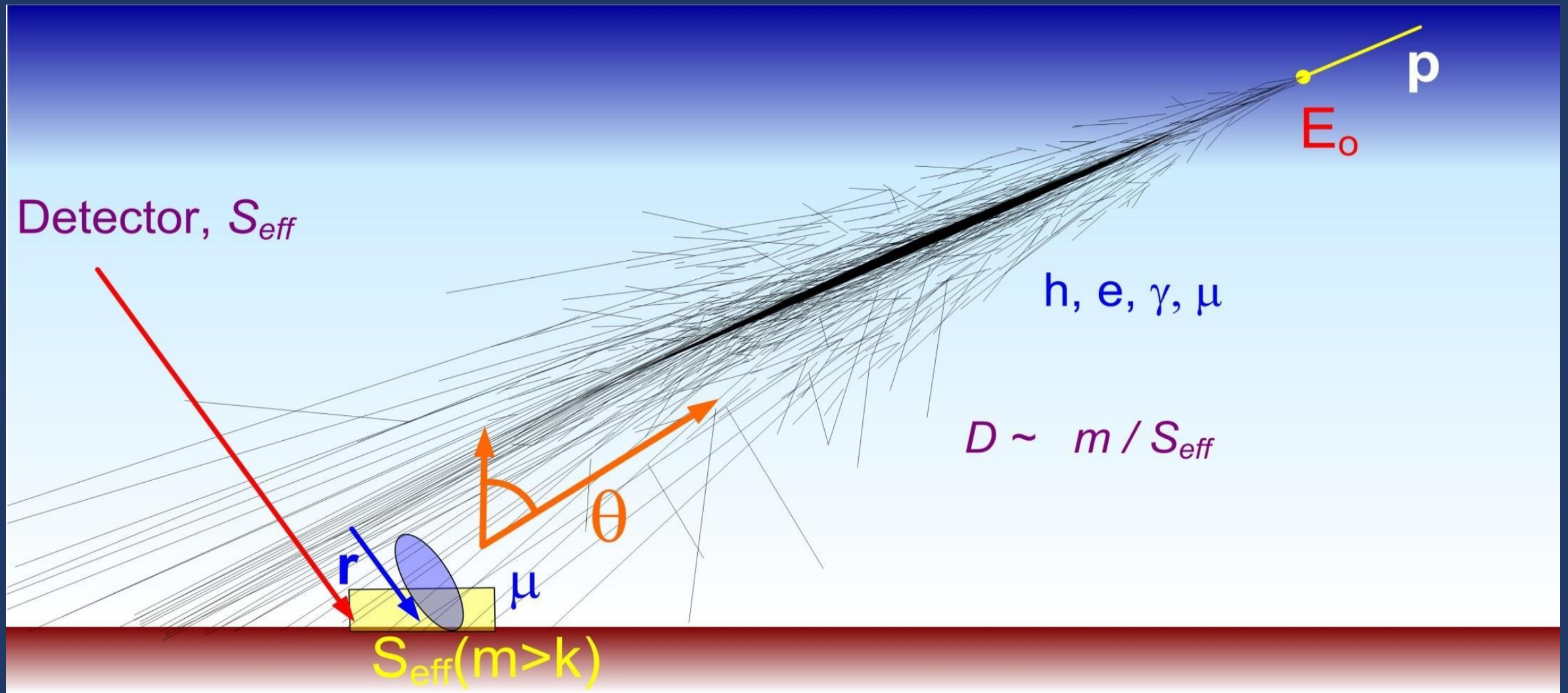
ДЕКОР:
Площадь ~ 70 м²
Точность лучше чем:
1 см и 1 градус

Пример события ДЕКОР-НЕВОД

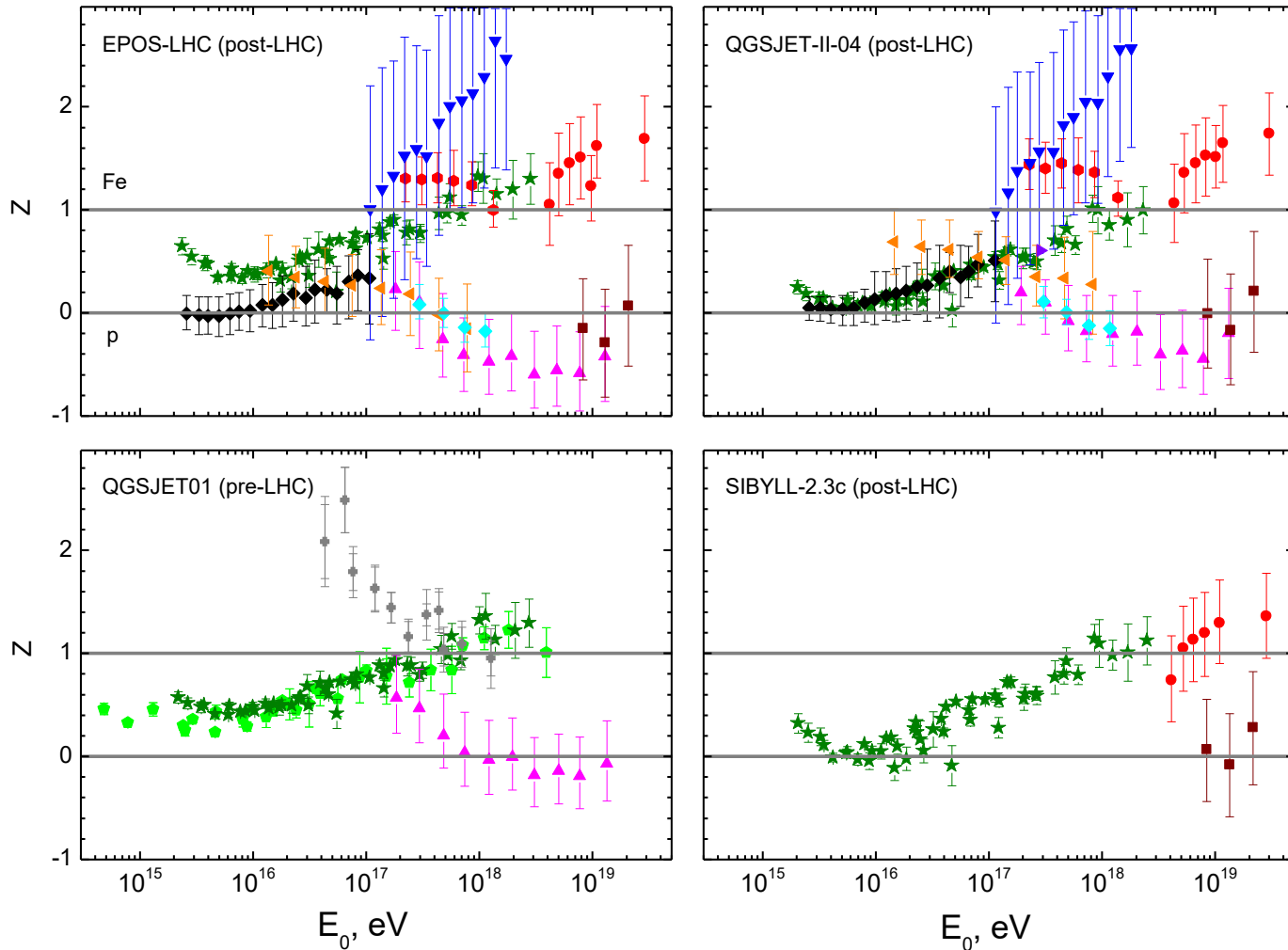


Группы мюонов космических лучей сверхвысоких энергий

Регистрация наклонных ШАЛ (измеряется спектр локальной плотности мюонов)



Сравнение данных НЕВОД-ДЕКОР с результатами измерений мюонной компоненты ШАЛ в других экспериментах



- ★ ND 2002-2007
- ◆ ND 2012-2023
- WHISP (ICRC 2023):
- Auger FD+SD
- Auger UMD+SD
- ◆ IceCube
- ▲ Yakutsk
- ▼ SUGAR
- ▲ KASCADE-Grande
- ▲ EAS-MSU
- AGASA
- HiRes-MIA
- ◆ Haverah Park

$$Z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}{\ln(N_{\mu}^{\text{Fe sim}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}$$

ПКЛ2 2.2 Интенсивность групп мюонов, зарегистрированных в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР #67
А. Г. Богданов и др. 04.07.2024

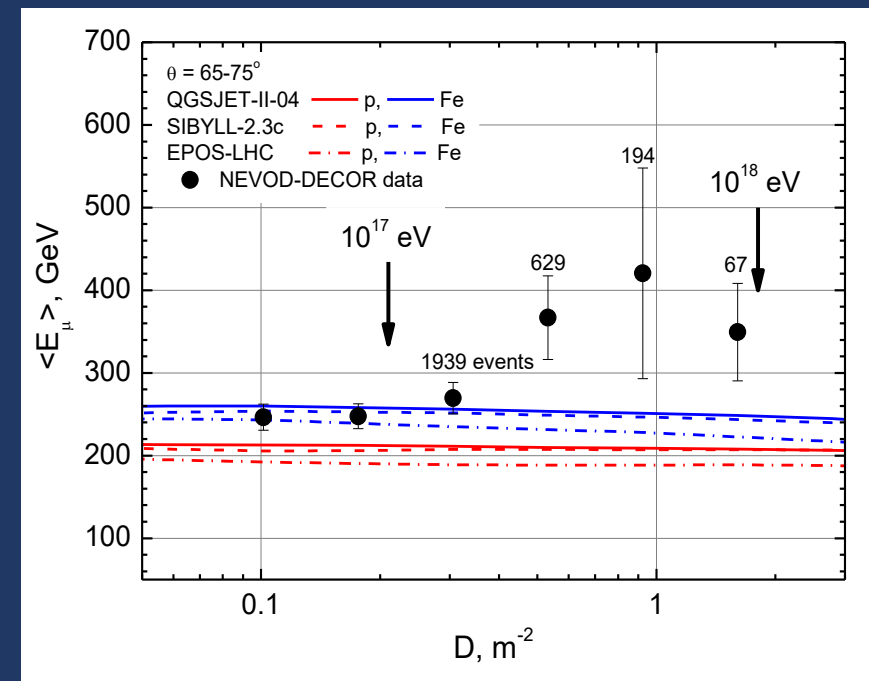
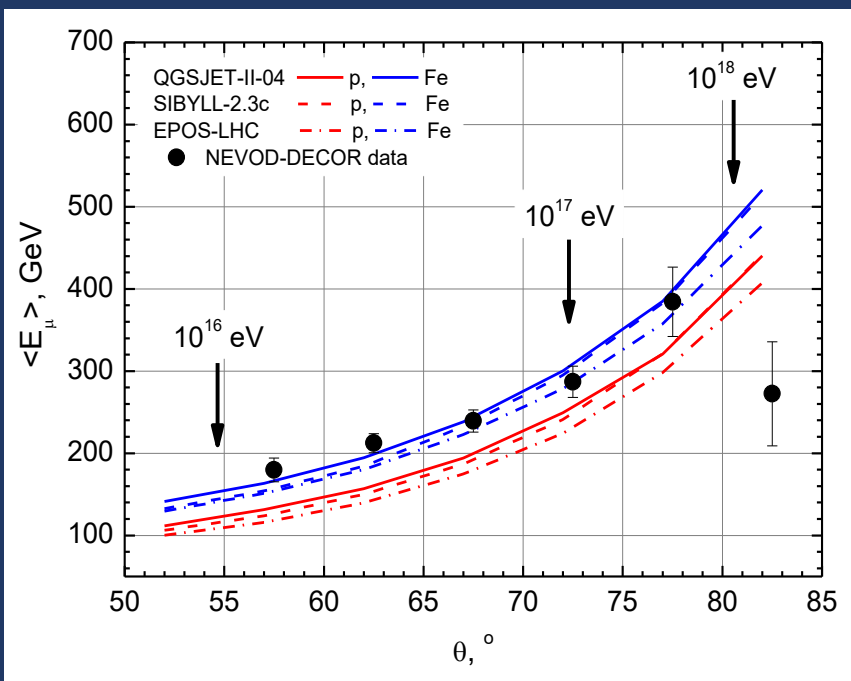
ПКЛ2 2.3 Zenитно-угловая зависимость спектров локальной плотности мюонов ШАЛ вблизи горизонта #142

Р.П. Кокоулин и др. 04.07.2024

ЗАВИСИМОСТИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ МЮОНОВ В ГРУППАХ ОТ ЗЕНИТНОГО УГЛА И ЛОКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МЮОНОВ

Кривые – ожидаемые результаты, полученные на основе моделирования ливней в CORSIKA для моделей адронных взаимодействий **QGSJET-II-04** (сплошная), **SIBYLL-2.3c** (штриховая), **EPOS-LHC** (штрих-пунктирная).

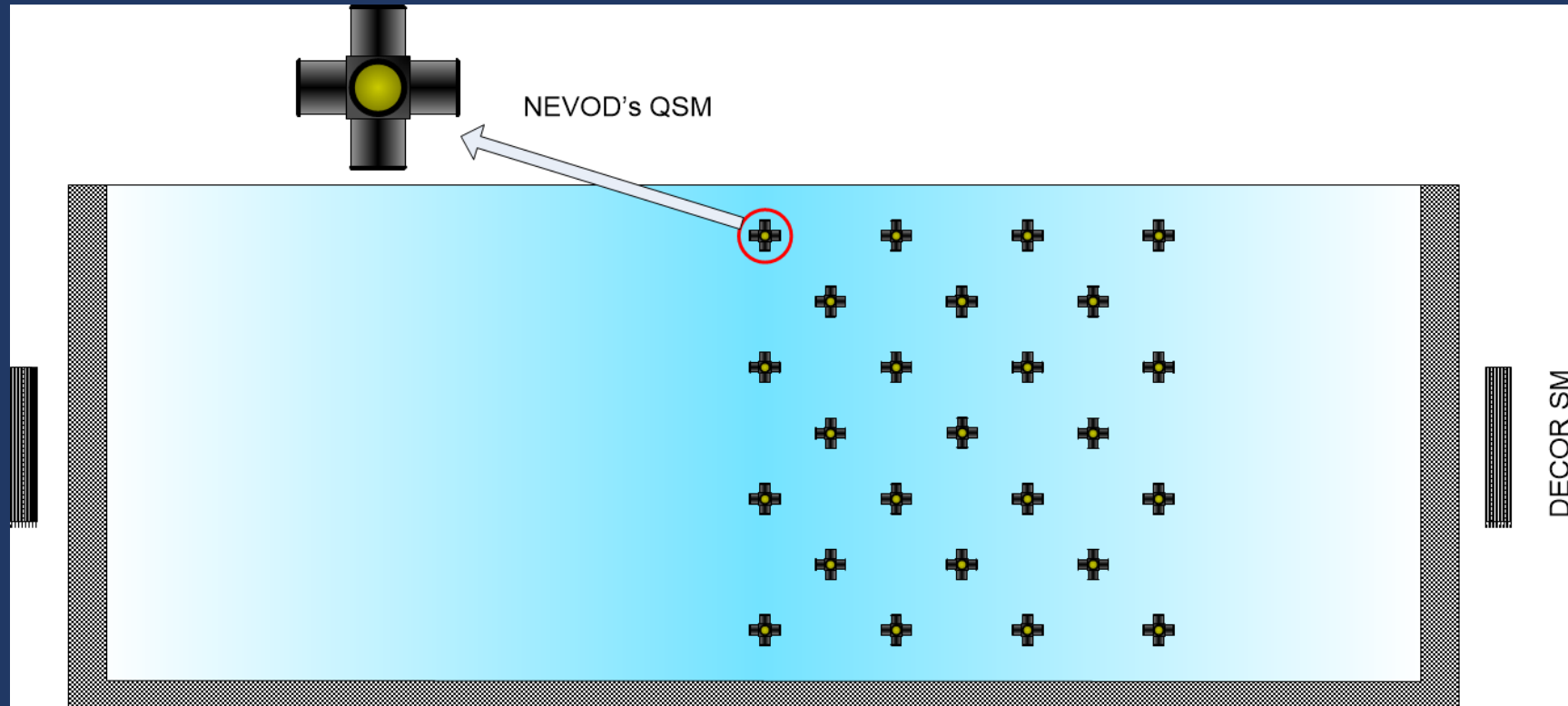
Верхние и нижние кривые – расчеты для ядер железа и протонов ПКЛ, соответственно.



Для больших плотностей, соответствующих первичным энергиям выше 10^{17} эВ, превышение экспериментальных оценок средней энергии мюонов над расчетными для первичных протонов находится в пределах от 4.2σ до 4.8σ , а для ядер железа от 3.1σ до 3.7σ .

Развитие центральной части экспериментального комплекса

Текущая конфигурация черенковского водного калориметра



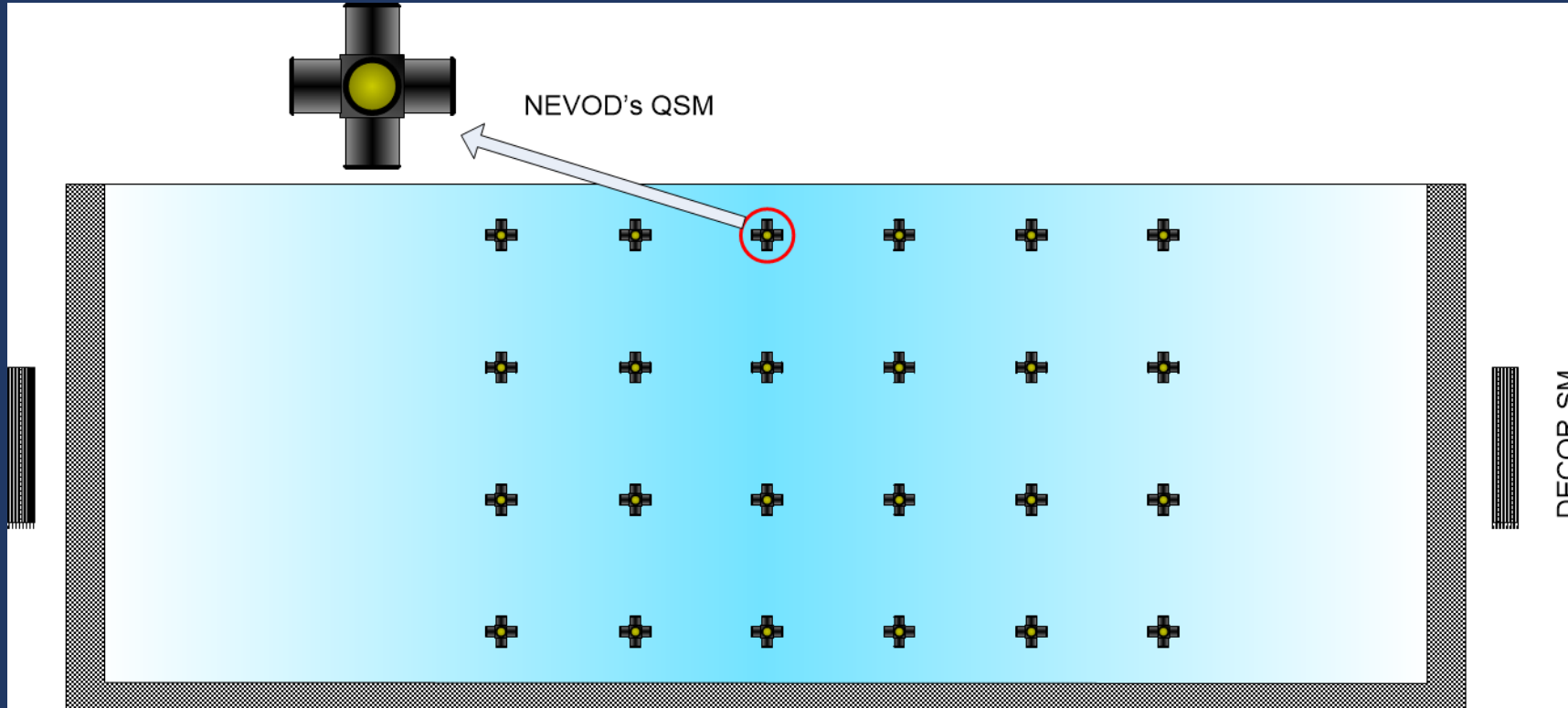
4 «больших» плоскости по 16 КСМ;

3 «малых» плоскости по 9 КСМ;

Эффективный объем $\sim 800 \text{ м}^3$;

Симметричное расположение относительно ДЕКОР.

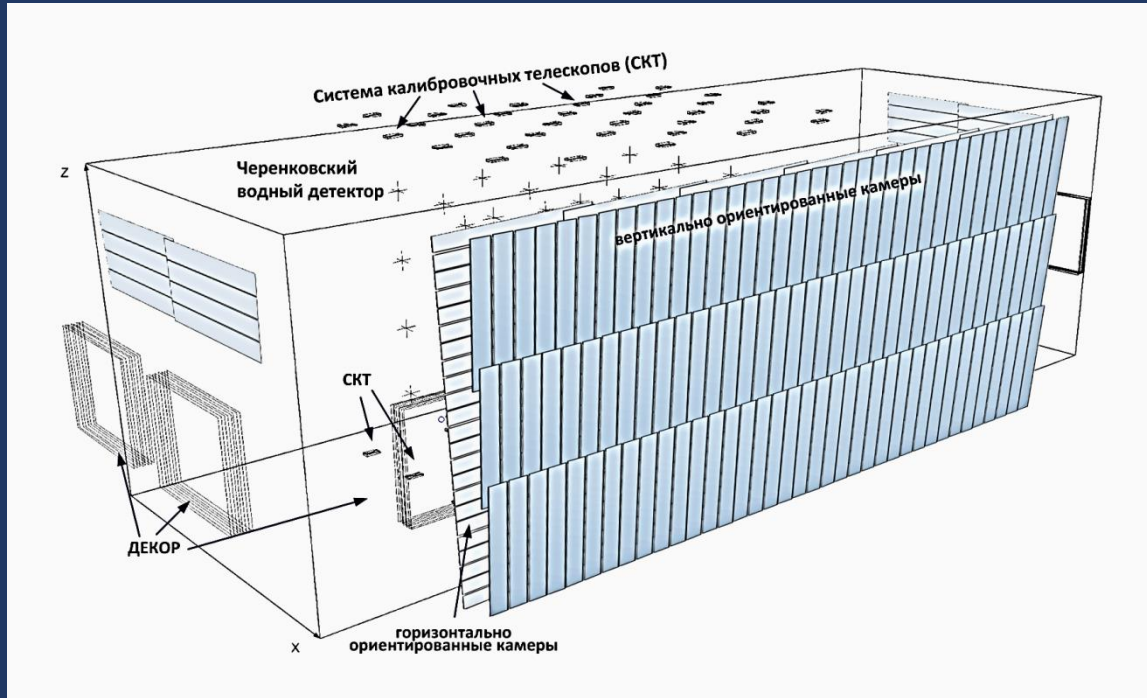
Планируемая конфигурация черенковского водного калориметра



6 «больших» плоскости по 16 КСМ;
Увеличение эффективного объема до 1200 м^3 ;
Симметричное расположение относительно ТРЕК.
Возможное изменение триггерных условий.

ПКЛ2 постер 4. #40
“Модернизированный
черенковский водный
калориметр НЕВОД-96”
Т.А. Каретникова и др.

Детектор ТРЕК – крупнейшая в мире установка в своём классе



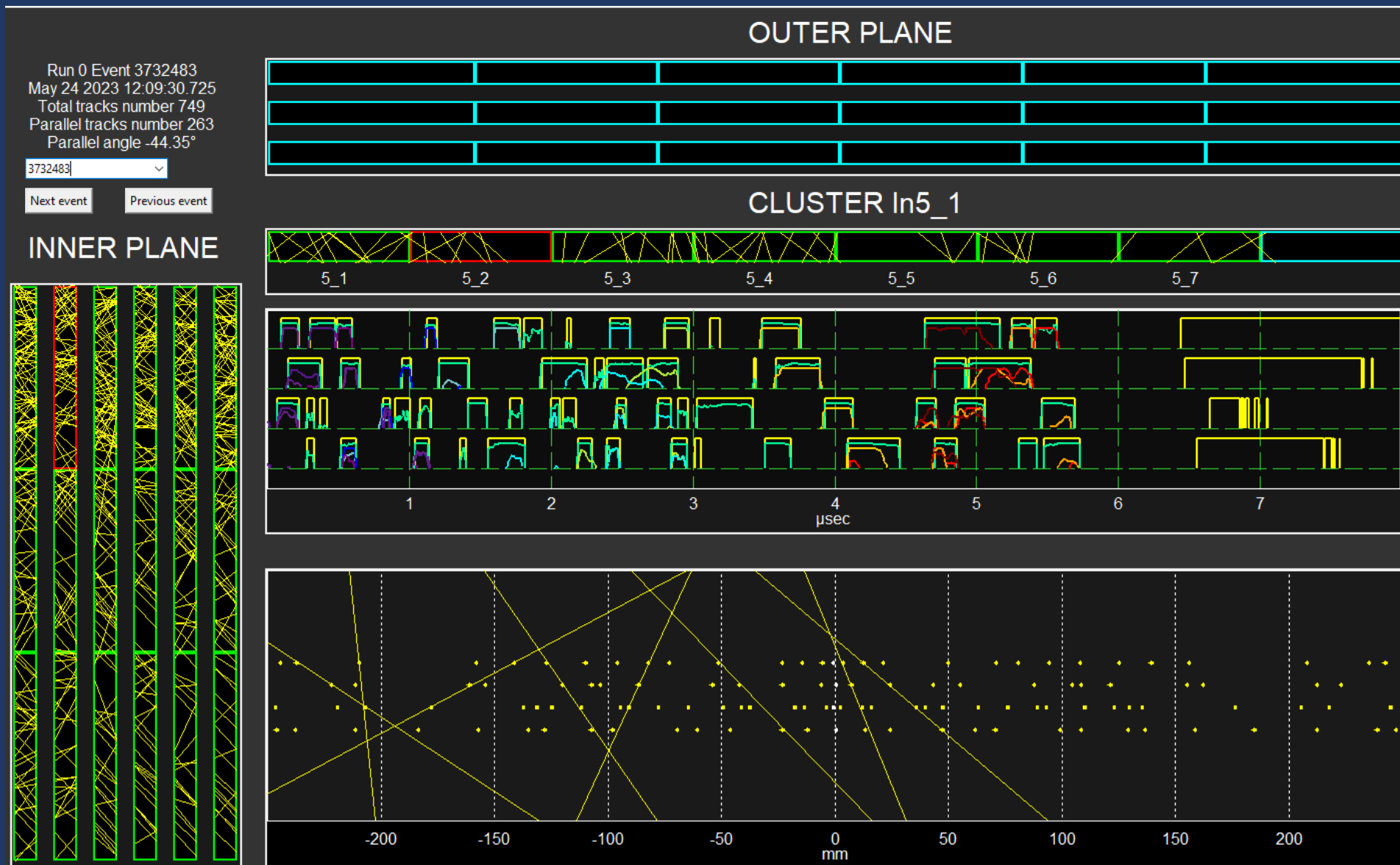
264 дрейфовые камеры;
Полное перекрытие апертуры ЧВД;
Площадь детектора—254 м²;
Разрешение двух треков ~ 3 мм.



- Завершена сборка обеих плоскостей.
- Испытана регистрирующая система.
- Проведена тестовая серия измерений на внутренней плоскости детектора.

МН постер 6. Регистрирующая система детектора на дрейфовых камерах для изучения околоразрешенных групп мюонов #75
Е. А. Задеба и др.

Пример события в одной плоскости ТРЕК



Периферийные детекторы: НЕВОД-ШАЛ, УРАН, ПРИЗМА, НЕЙТРОН

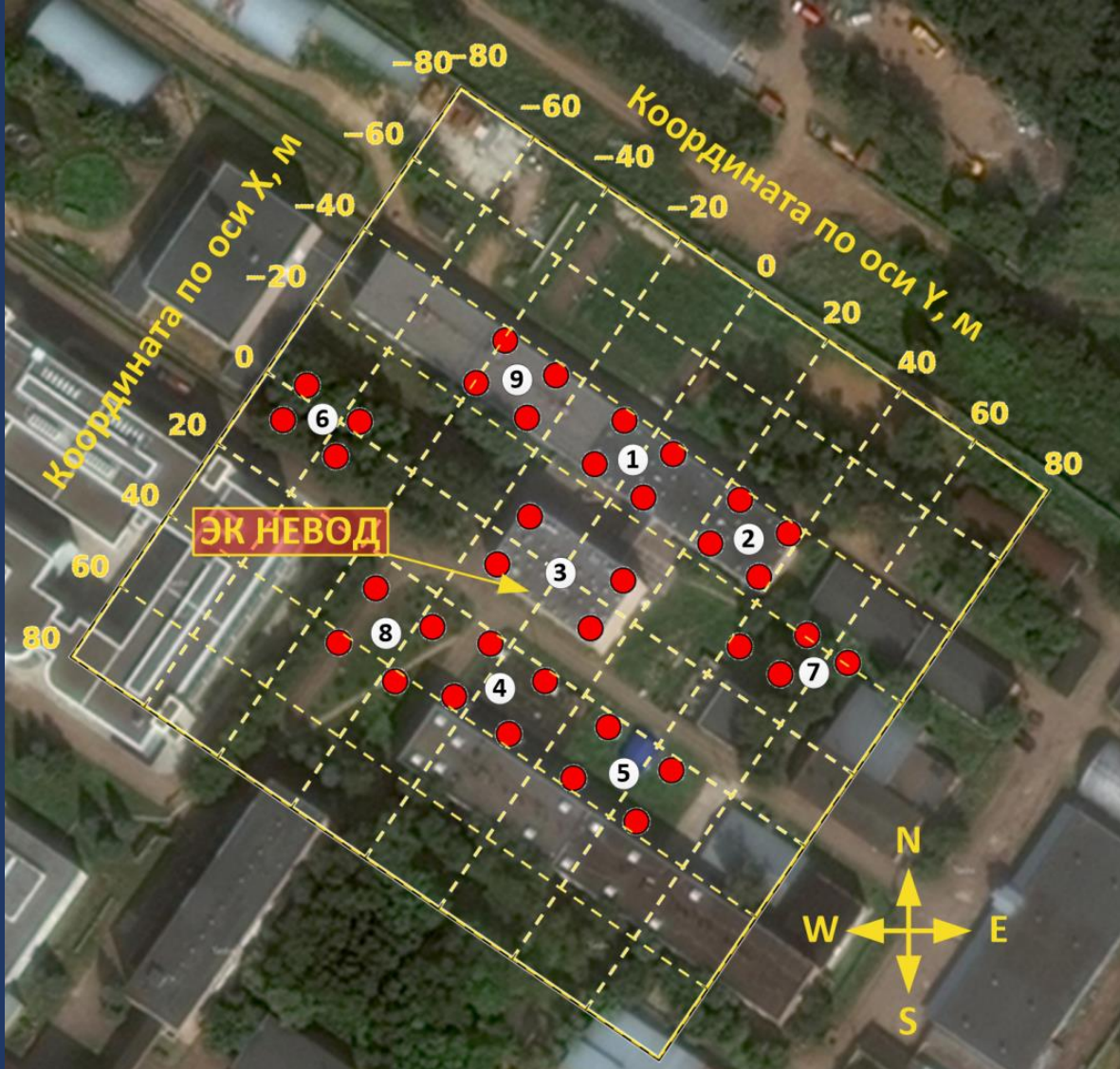
Центральная часть



Схема размещения



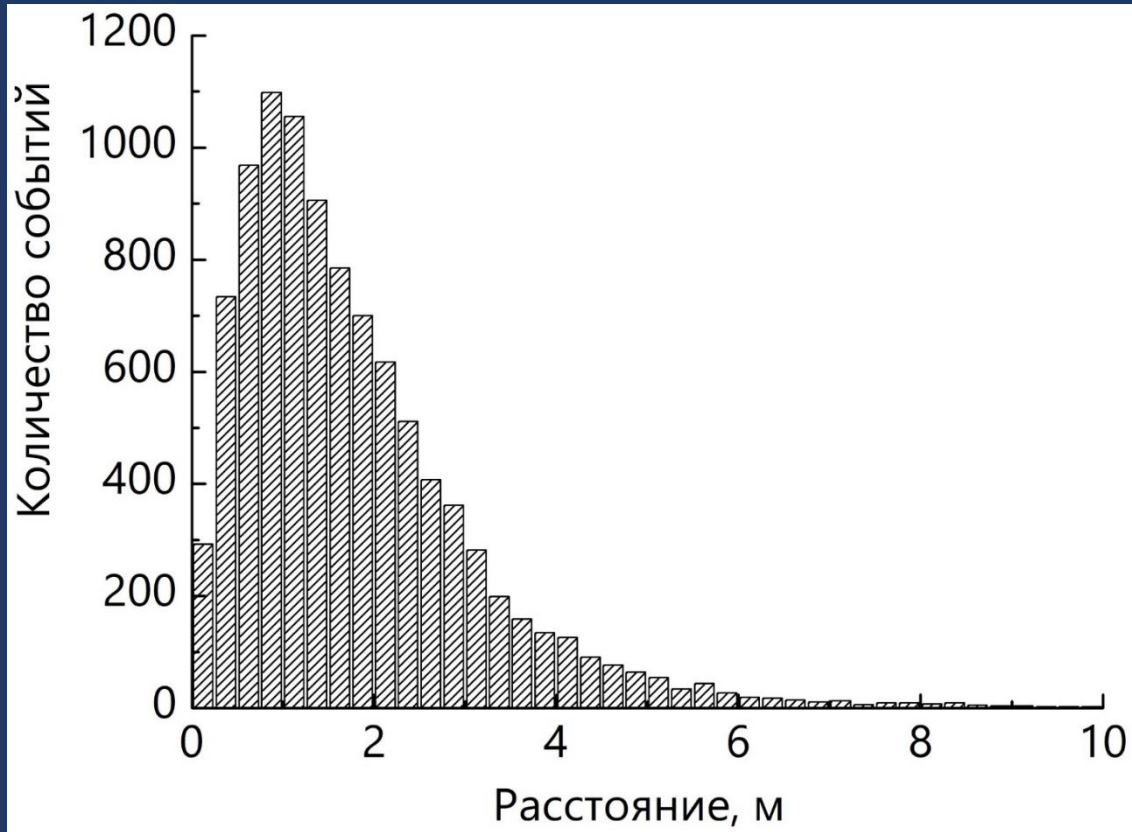
Установка НЕВОД-ШАЛ



- 9 кластеров;
- 36 детектирующих станций (ДС);
- площадь установки: 10^4 м²;
- 144 сцинтилляционных детектора;
- Энергетический диапазон: 10^{15} - 10^{17} эВ.

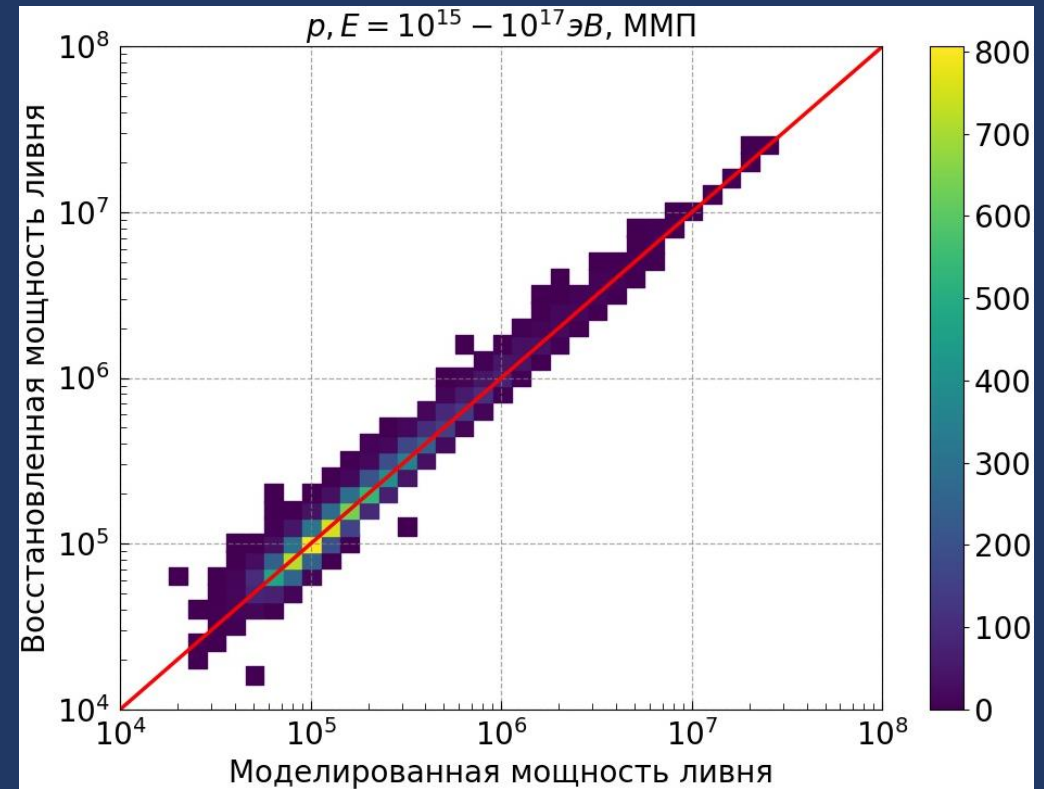
Точность восстановления параметров ШАЛ

Точность восстановления оси ШАЛ



$\Delta R \sim 3.6$ м.

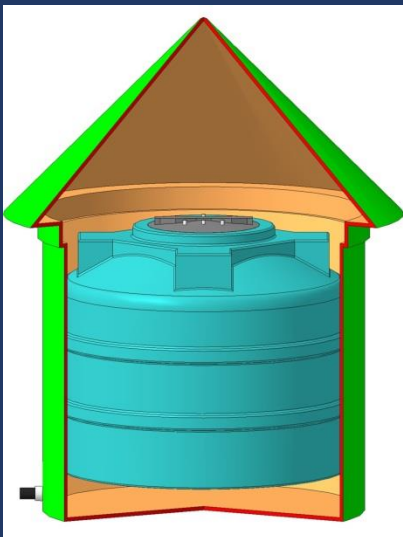
Корреляция восстановленной и моделированной мощности ливня



Для $N_e = 10^5$: $\sigma = 12$ %.

ПКЛ2 постер “реконструкция направлений широких атмосферных ливней по данным установки НЕВОД-ШАЛ” #55 К.Р. Нугаева и др.

Установка УРАН

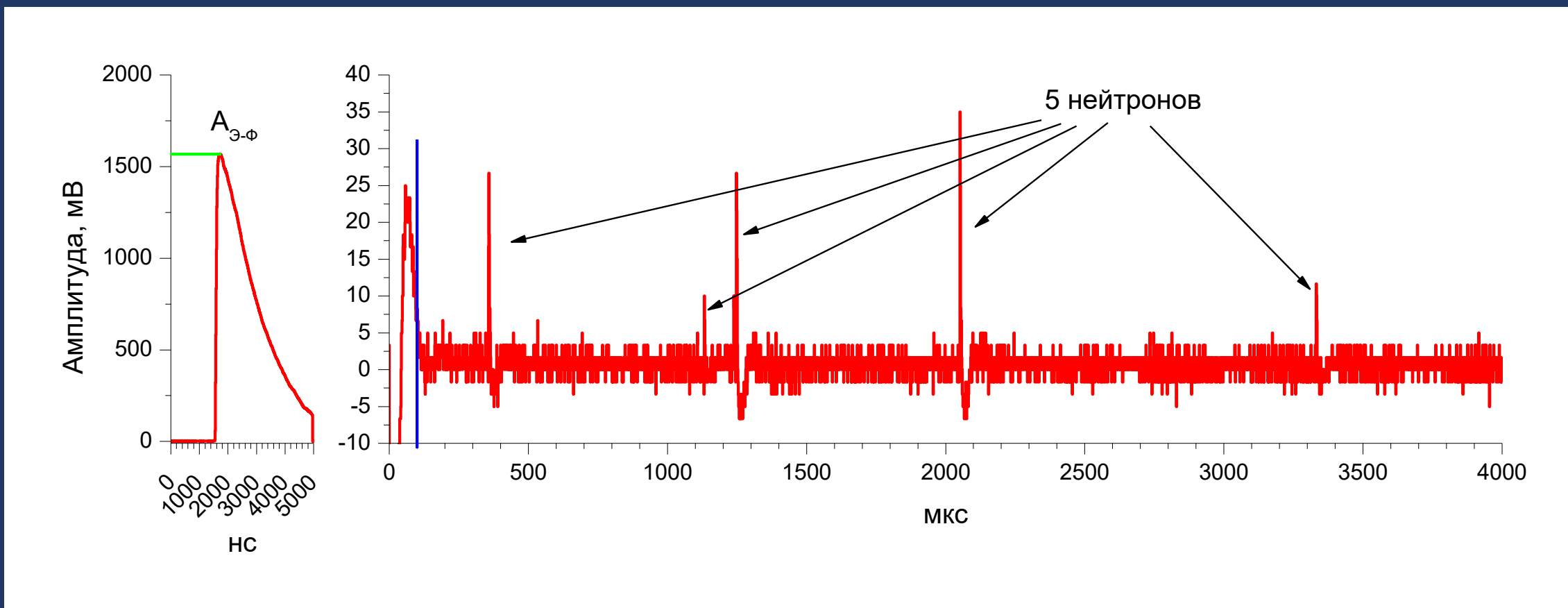


- 72 эн-детектора;
- 6 кластеров;
- Сцинтиллятор: $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{B}_2\text{O}_3$;
- Диапазон энергий от 10^{15} до 10^{17} эВ.

Регистрация нейтронов ШАЛ

Электронно-фотонная
компонента ШАЛ

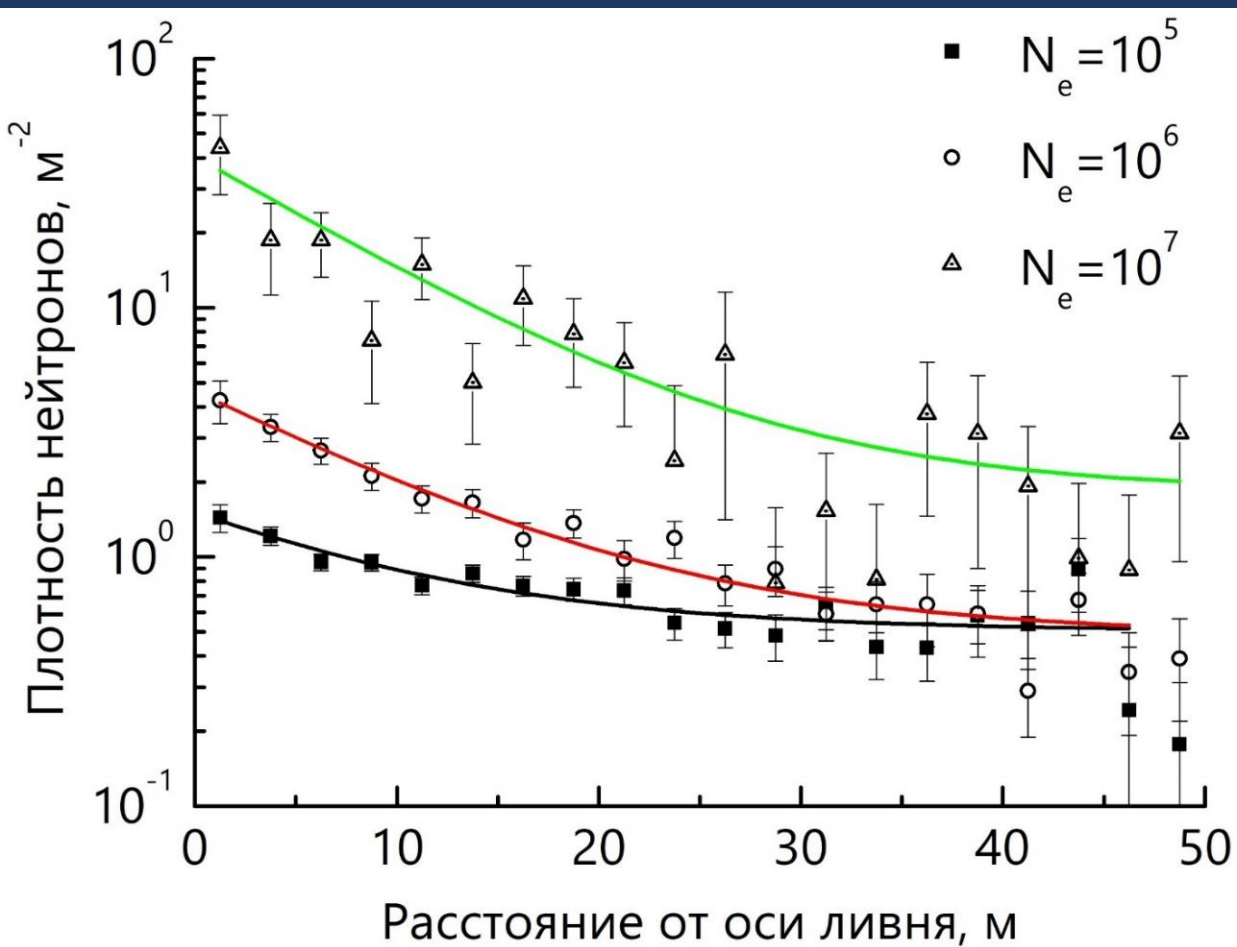
Нейтроны в ШАЛ



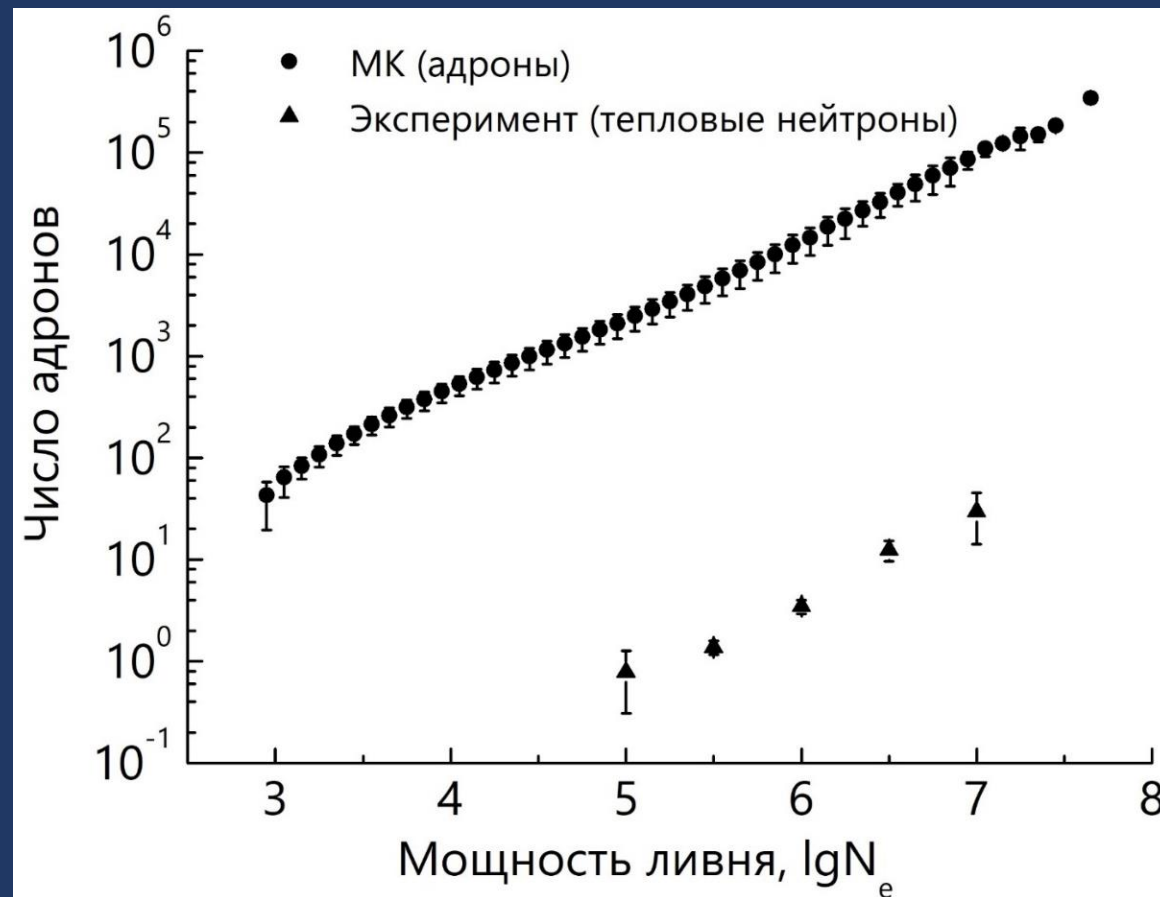
Нейтроны регистрируются с эффективностью порядка 10%

Тепловые нейтроны в ШАЛ

ФПР тепловых нейтронов

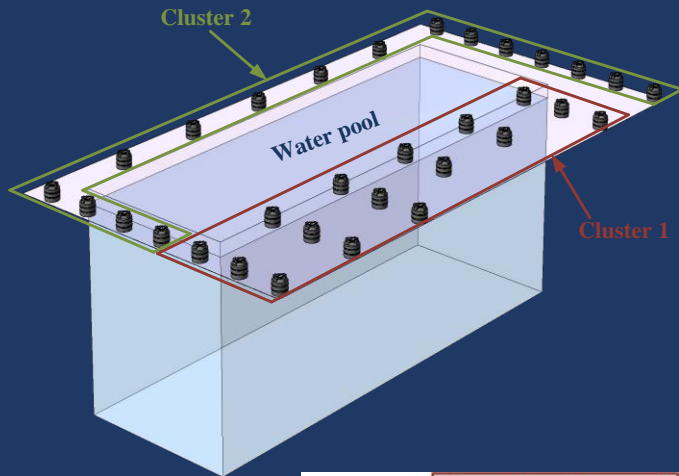


Корреляция числа адронов и
МОЩНОСТИ ЛИВНЯ

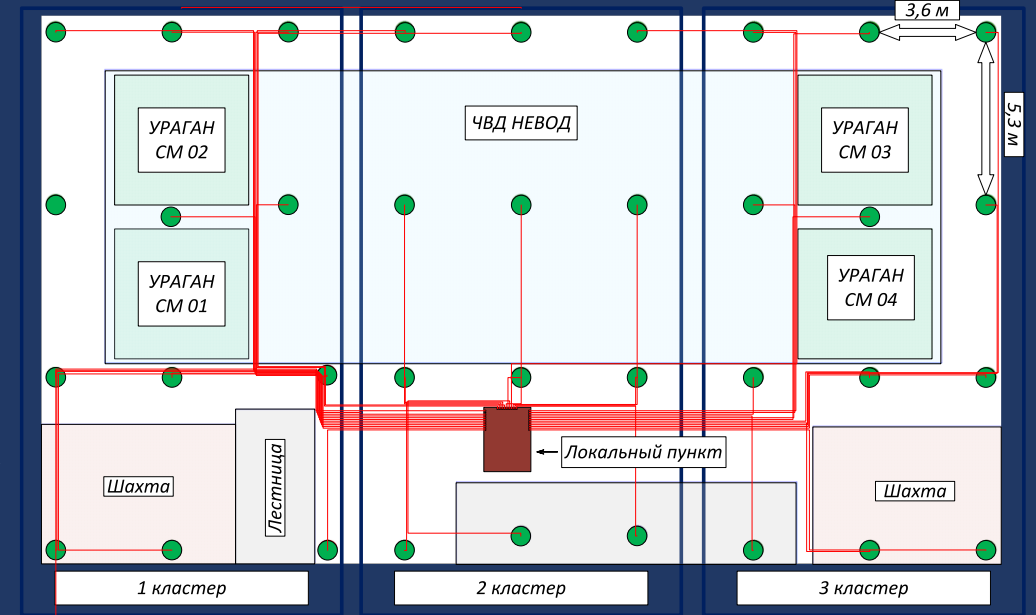
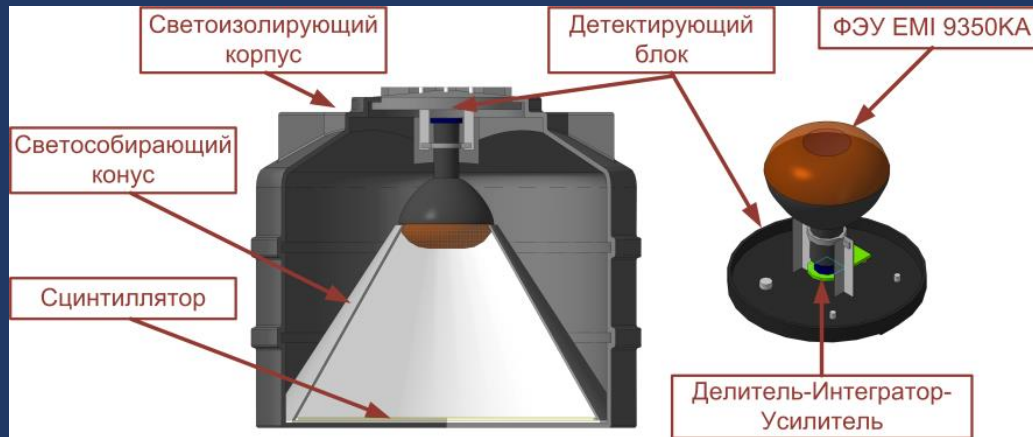


ПКЛ2 постер "Характеристики шал, зарегистрированных установкой УРАН" #39 С.Ю. Жежера и др.

Модернизация установки ПРИЗМА



- Замена детектирующей и регистрирующей систем
- Системы высоковольтного, низковольтного питания
- Конфигурация и структура размещения детекторов
- Отдельный канал для регистрации нейтронного фона



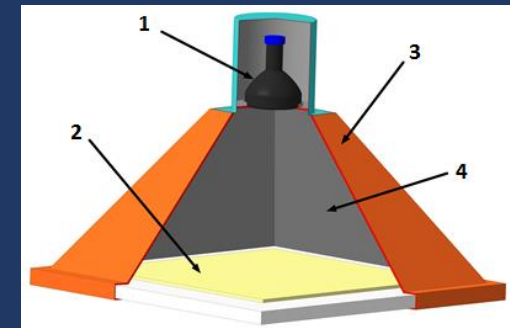
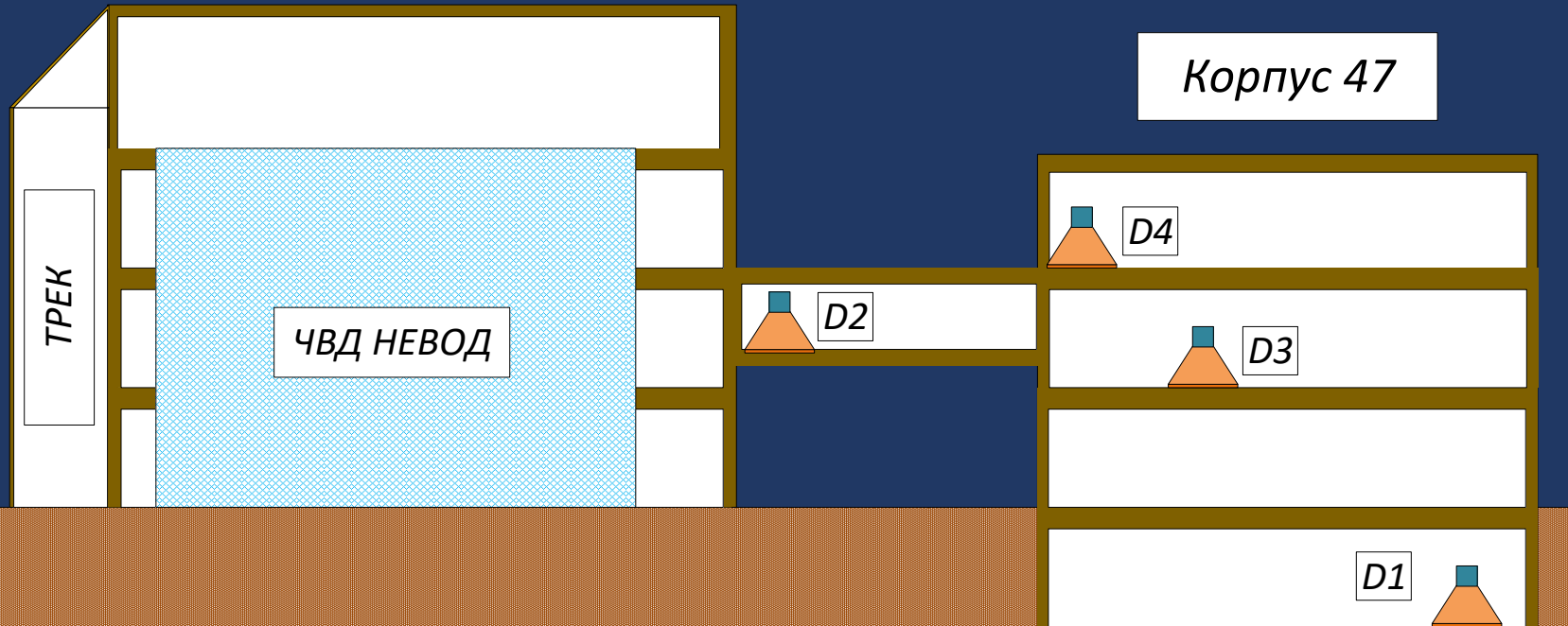
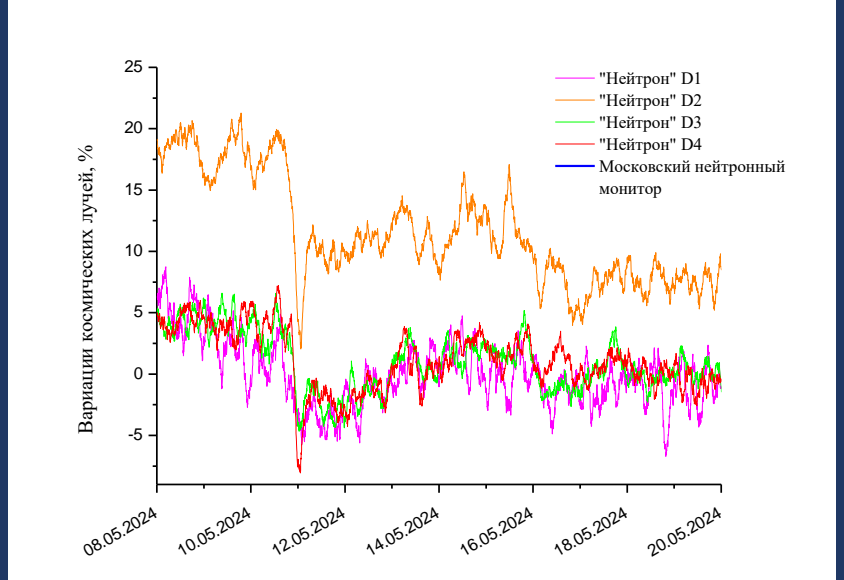
- Сцинтиллятор ZnS(Ag) с добавкой ${}^6\text{Li}$
- Три кластера по 12 детекторов
- Равномерная структура 3.6 м x 5.3 м
- ФЭУ ЕМІ 9350КА с полусферическим фотокатодом
- Внутренний триггер
- Делитель с тремя встроенными ИУ
- Единый локальный пункт, управление из пультовой
- Синхронизация с СГВС ЭК НЕВОД

- Исследование нейтронов, сопровождающих ШАЛ

- Исследование вариаций нейтронного фона вблизи поверхности Земли

Установка «Нейтрон»

- 4 детектора
- Сцинтиллятор ZnS(Ag)+⁶LiF
- Эффективная площадь детектора 0.75 м²
- Расположение на разных уровнях
- ФЭУ-200 с плоским фотокатодом
- Триггер от дискриминатора
- Делитель + Дискриминатор-Интегратор-Усилитель (12d)



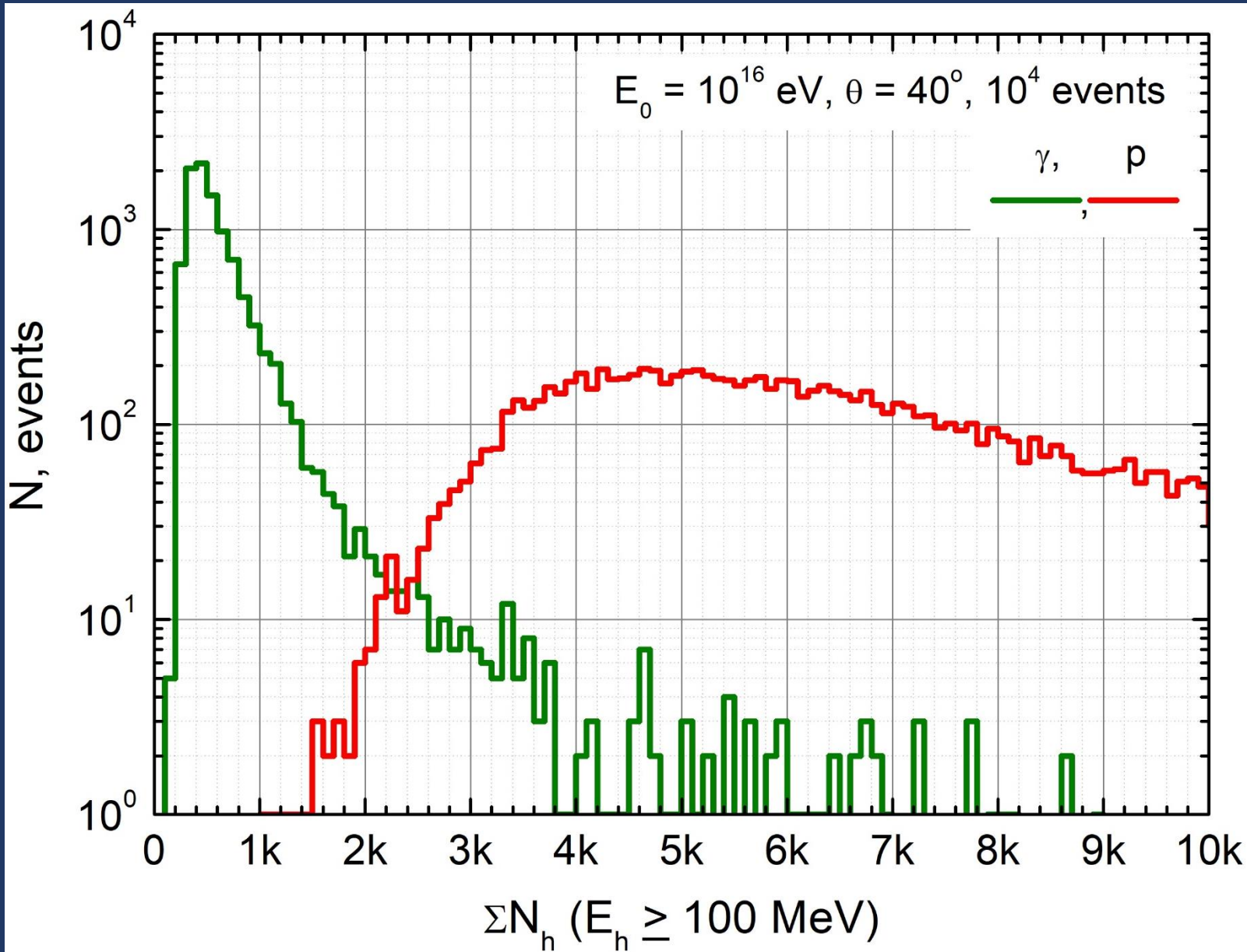
- 1 - ФЭУ-200
- 2 - сцинтиллятор ZnS(Ag) + ⁶LiF
- 3 - светозащитный корпус
- 4 - светоотражающее покрытие.

МОД "Анализ форбуш-понижений 2024 года по экспериментальным данным неэкранированных нейтронных детекторов ЭК НЕВОД" #66 Е.П. Волков и др.

Возможность исследования гамма-квантов высоких энергий на экспериментальном комплексе НЕВОД

- При регистрации гамма-квантов высоких энергий одной из главных задач является разделение гамма-ливней и ливней, инициированных протонами и ядрами.
- Для надежной регистрации гамма-квантов высоких энергий необходимо одновременно анализировать электронно-фотонную, мюонную и адронную компоненты ШАЛ.
- Такой мультикомпонентный анализ широких атмосферных ливней может быть реализован на экспериментальном комплексе НЕВОД.

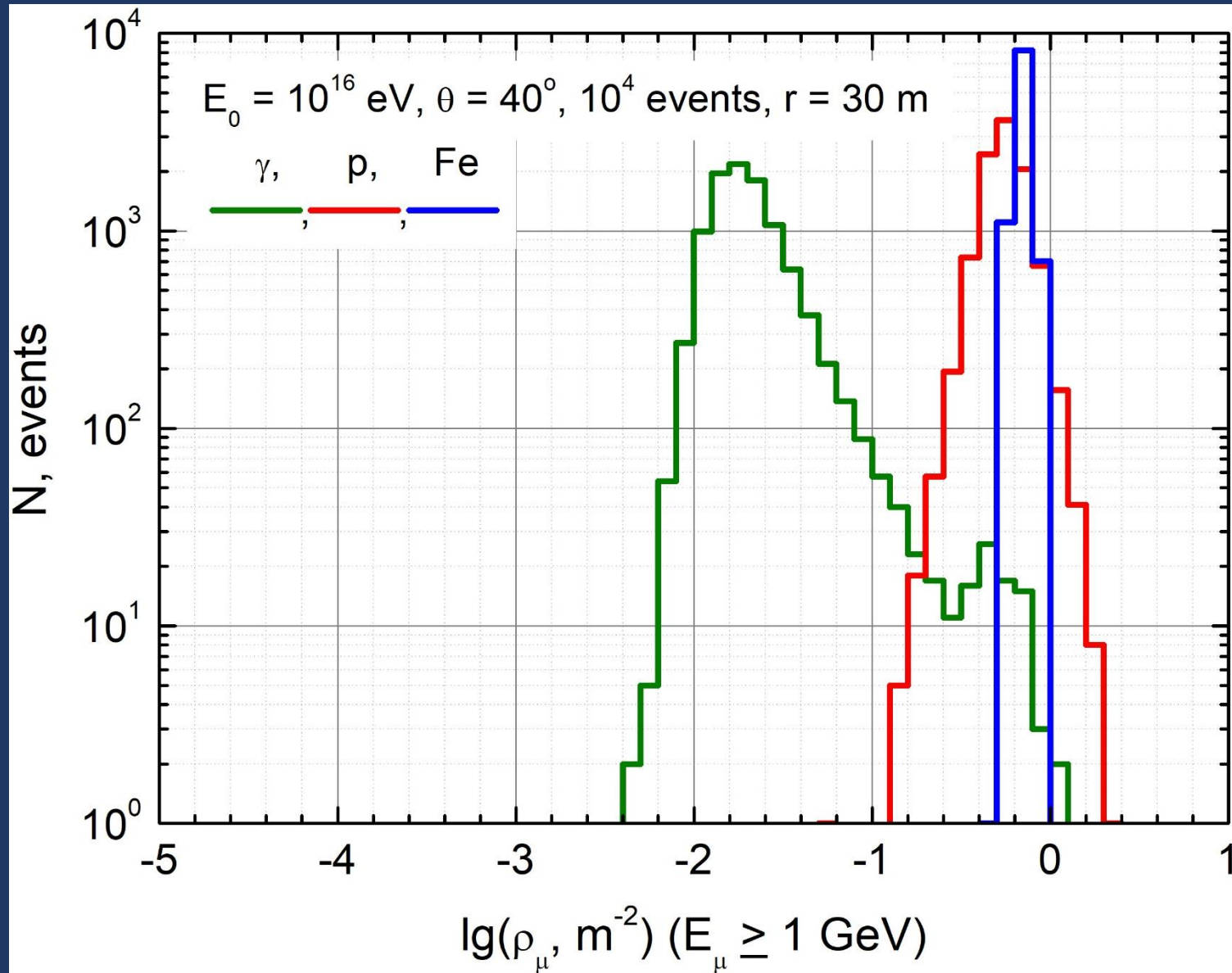
Полное число адронов



При $N_h < 3000$:

- Эффективность отбора гамма-ливней = **98.7 %**;
- Коэффициент режекции = **78**.

Плотность мюонов на расстоянии 30 м от оси ШАЛ



При $\rho_\mu < 0.32$:

- Эффективность отбора гамма-ливней = **99.1 %**;
- Коэффициент режекции = **110**.

Планы для проведения исследований гамма-квантов

- Существующая конфигурация мюонных и нейтронных детекторов позволяет разделять ШАЛ от гамма-квантов и адронов с фактором режекции на уровне $\sim 10^4$.
- Для решения этой задачи необходимо изменить триггерную систему и подготовить новое программное обеспечение.
- Для обеспечения надежного поиска источников гамма-квантов сверхвысоких энергий необходимо существенное улучшение точности угловых измерений, которое может быть достигнуто путем расширения имеющихся установок для регистрации электронно-фотонной и нейтронной компонент за счет создания удаленных кластеров.

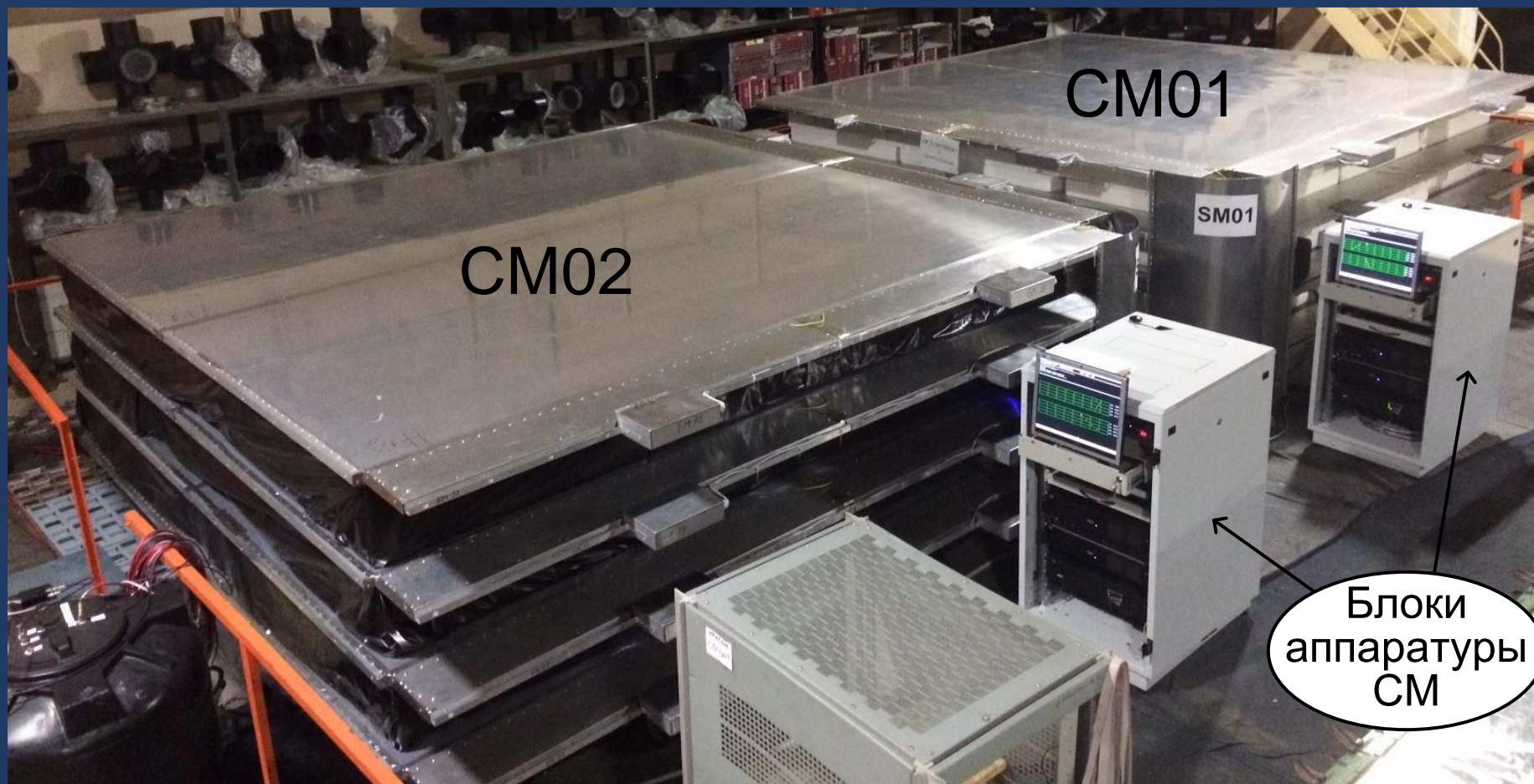
Мюонная диагностика (мюонография)

Мюонный годоскоп УРАГАН



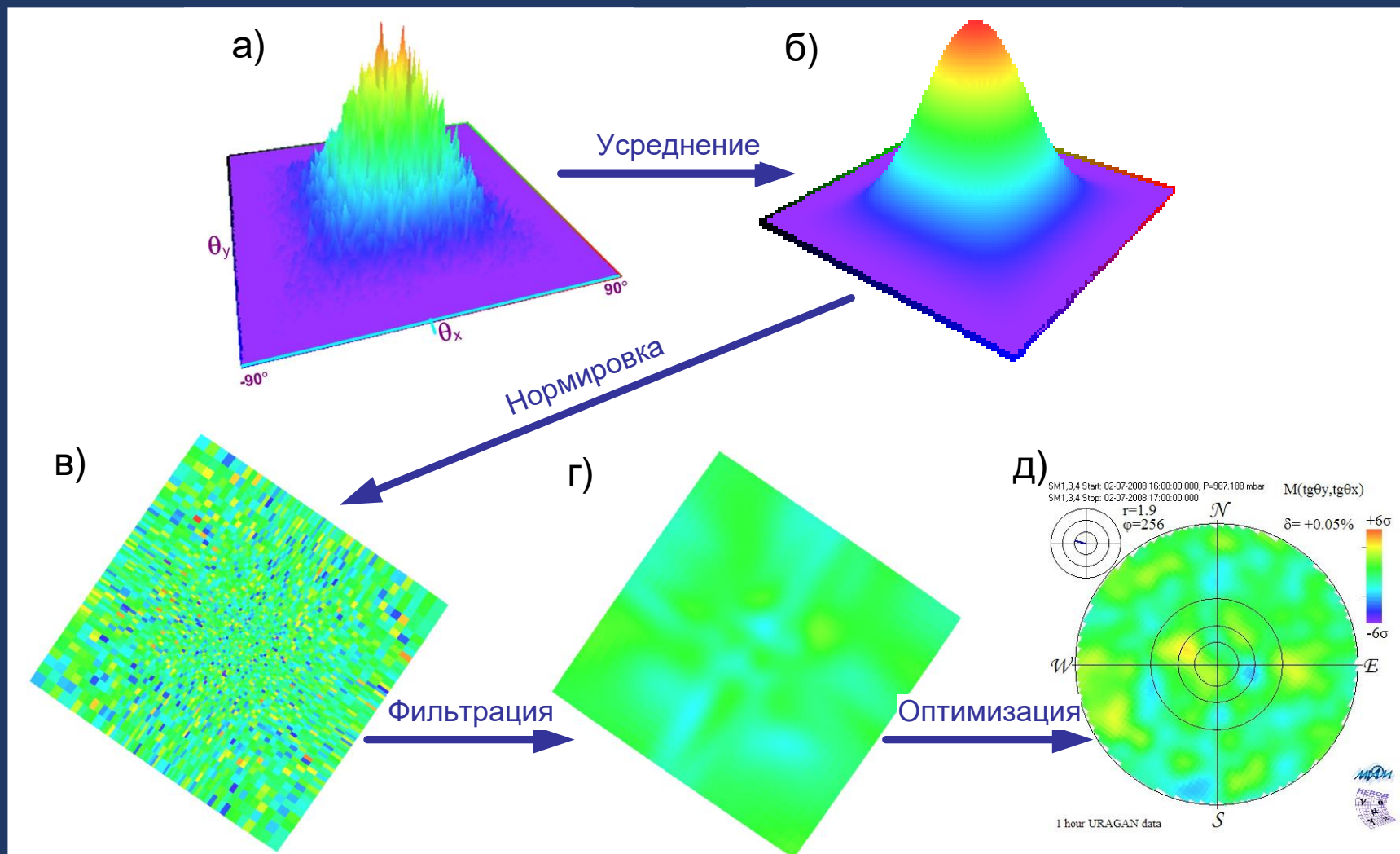
Площадь СМ	11,5 м ²
Количество координатных плоскостей	8
Количество СМ	4
Угловая точность	$< 1^\circ$
Апертура	- $0^\circ - 80^\circ$
Эффективность регистрации, %	- 99
Скорость счета, с-1	- 5400
Доля "живого" времени	- 90%

Сцинтиляционный мюонный годоскоп

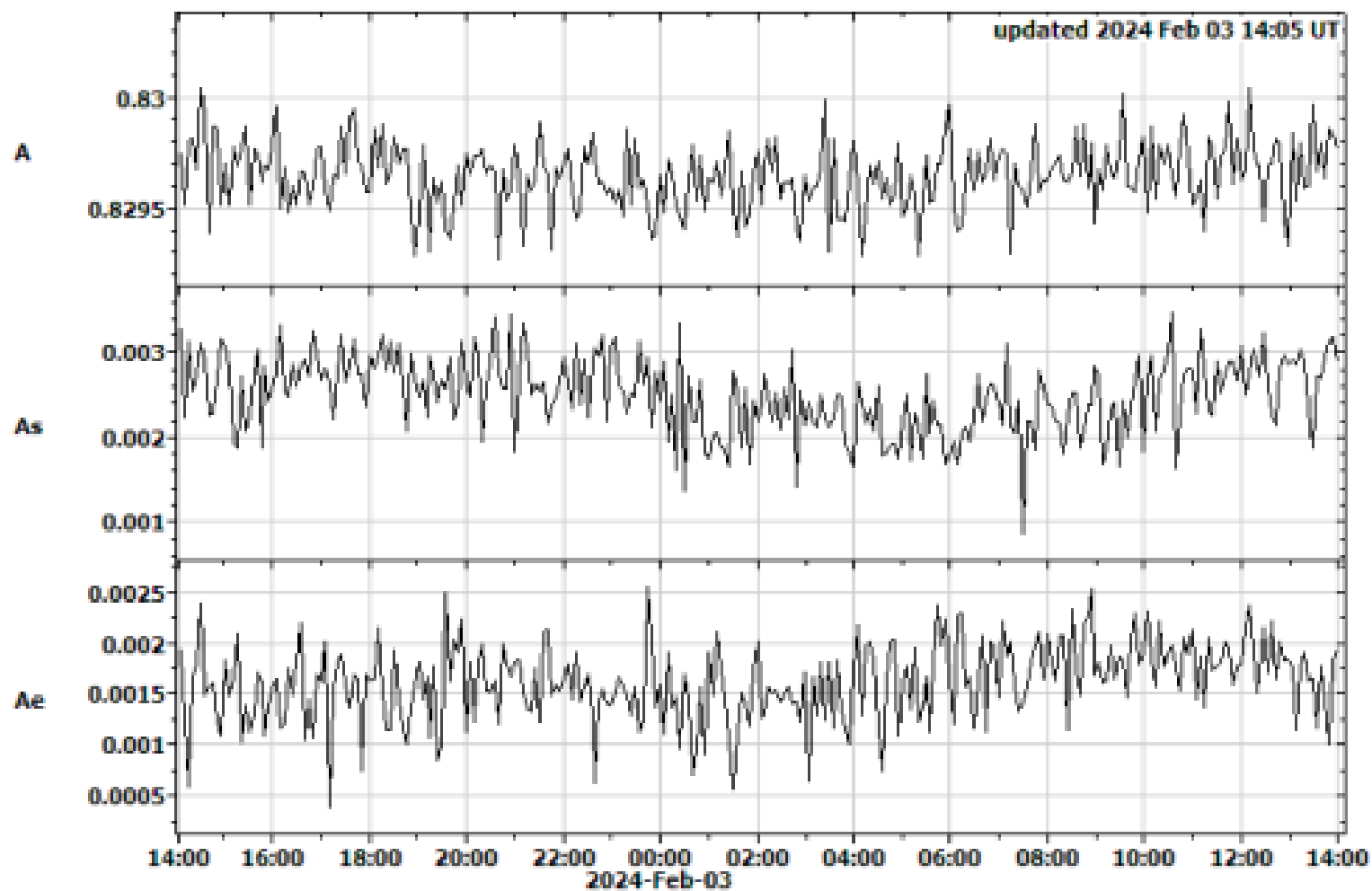


Площадь СМ	11 м ²
Количество координатных плоскостей	4
Количество СМ	2
Угловая точность	< 2°
Апертура	- 0° - 80°
Эффективность регистрации, %	- 97
Скорость счета, с-1	- 3050
Доля "живого" времени	- 95%

Построение мюонных изображений (мюонографий)



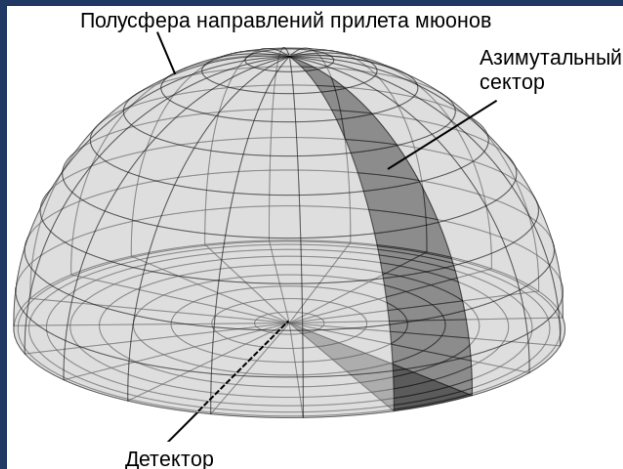
Анализ интегральных рядов



МОД Сессия 3 05.07.2024
3.1 Исследование жесткостных спектров форбуш-эффектов в 25-м цикле солнечной активности #54
П.А. Сухова и др.

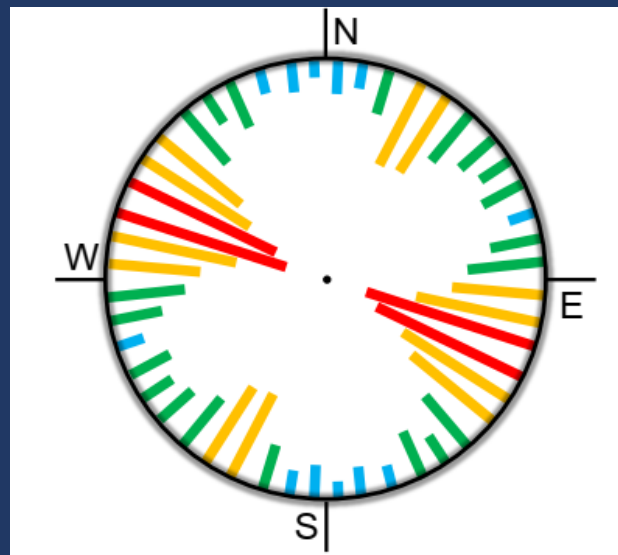
3.2 Мониторинг геоэффективных квм в мае 2024 года в потоке солнечного ветра и космических лучей на уровне Земли #117
В.В. Борог и др.

Метод азимутального сканирования

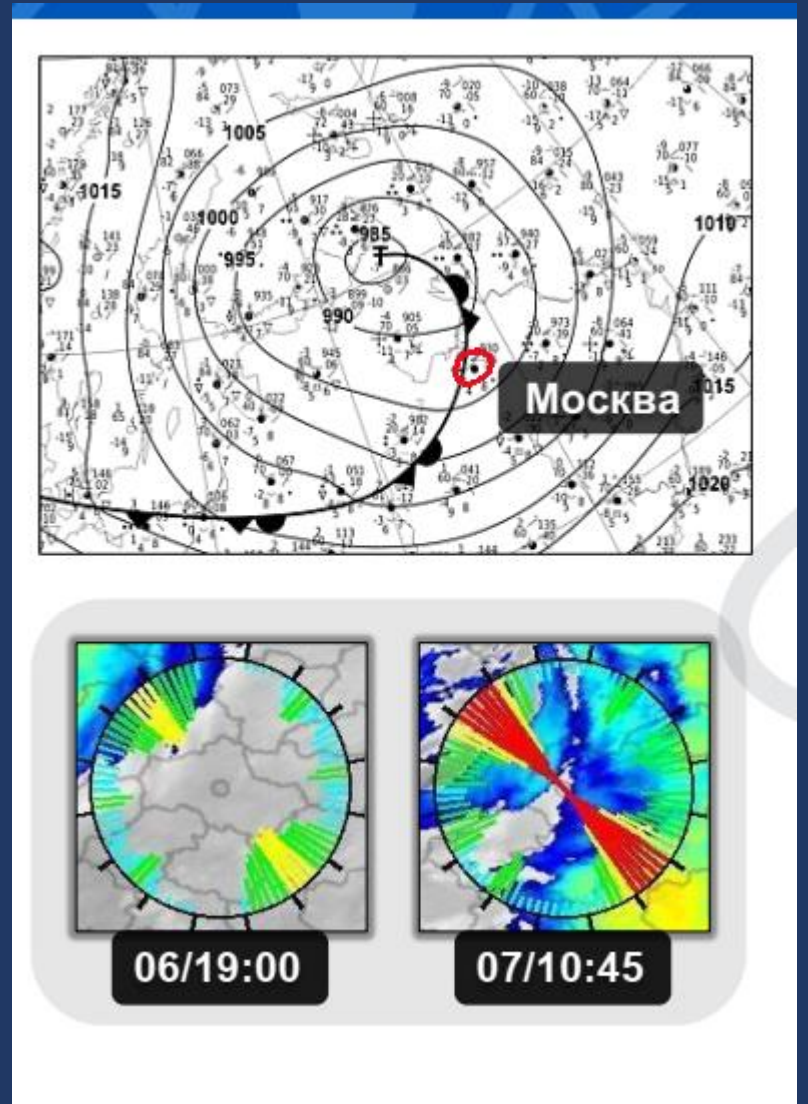


Анализ потока мюонов со всех
зенитных и выделенных
азимутальных углов

Компромисс между
информацией о направлениях и
статистикой



ГЕО Сессия 1 “Исследование
атмосферных процессов методом
азимутального сканирования” #74
С.С. Тимаков, А.А. Петрухин 01.07.2024



Заключение - ближайшие задачи

1. Решение мюонной загадки

- Завершение модернизации черенковского водного детектора.
- Ввод в эксплуатацию установки ТРЕК.
- Проведение исследований наклонных групп мюонов на комплексе НЕВОД – ДЕКОР - ТРЕК

2. Исследования ШАЛ, в том числе от гамма - квантов

- Проведение мультикомпонентных исследований электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ.
- Изучение возможности проведения поисковых исследований гамма квантов высоких энергий.

3. Мюонная диагностика (мюонография)

- Продолжение исследований динамических процессов в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли и разработка аппаратуры для мюонографии наземных объектов. МН постеры “ Гибридный мюонный годоскоп для мюонографии крупномасштабных объектов” #18 Н.А. Пасюк и др. “Мобильный мюонный годоскоп для мюонографии различных объектов” #95 М.Ю. Целиненко и др.

Спасибо за внимание!

