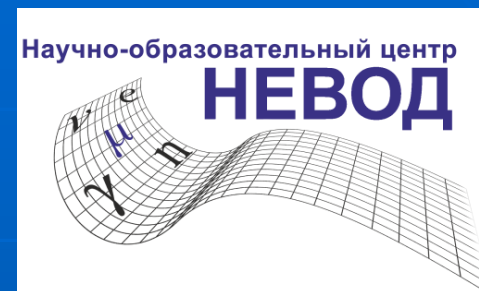


37 Всероссийская конференция по космическим лучам



Экспериментальный комплекс НЕВОД: результаты и планы

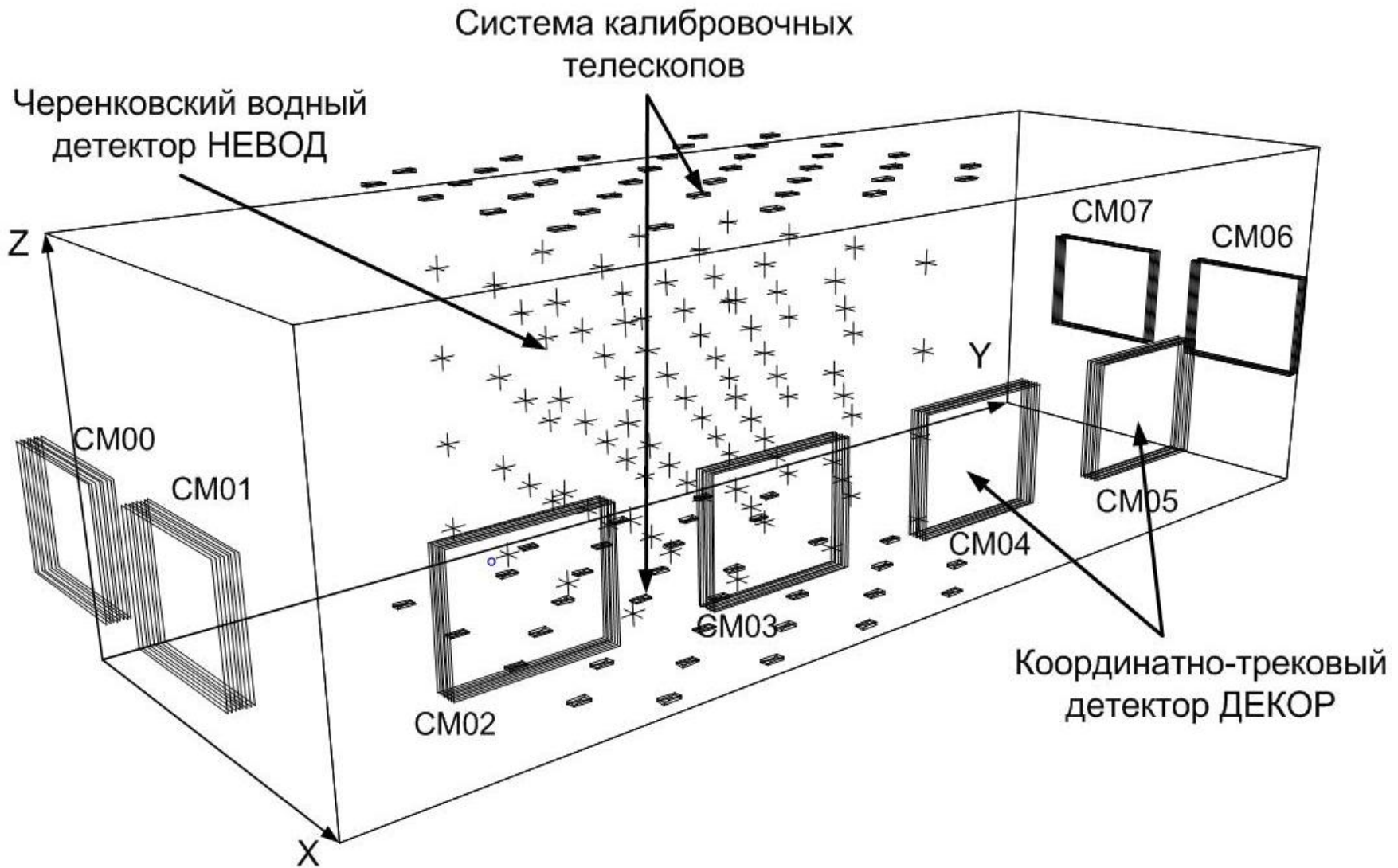
С.С. Хохлов от коллектива
Научно-образовательного центра НЕВОД

МГУ 29 июня 2022 г.

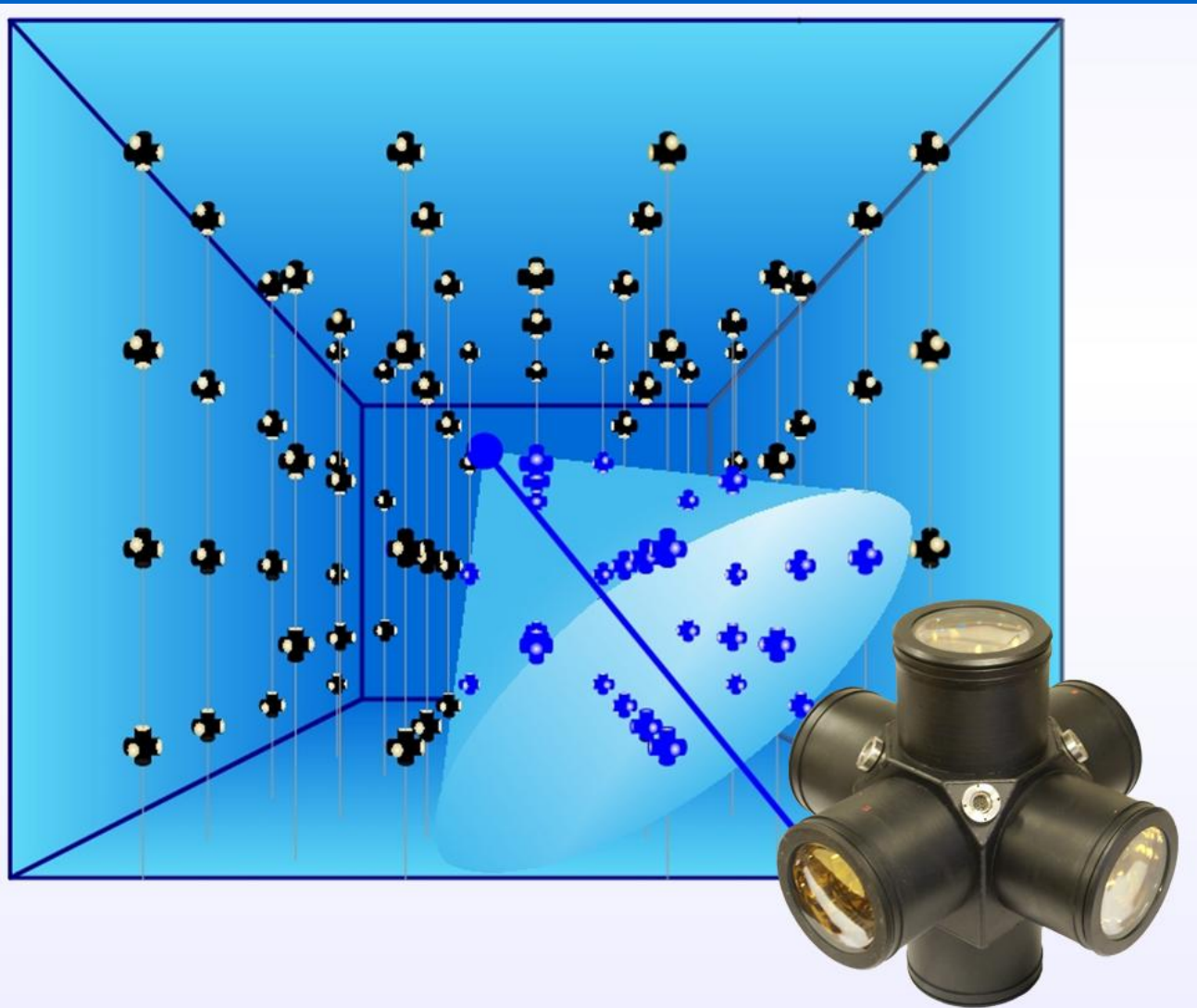
План доклада

1. Исследования групп мюонов.
2. Мультикомпонентные исследования ШАЛ.
3. Мюонная диагностика.
4. Развитие экспериментального комплекса.
5. Заключение.

Экспериментальный комплекс НЕВОД



Черенковский водный детектор НЕВОД

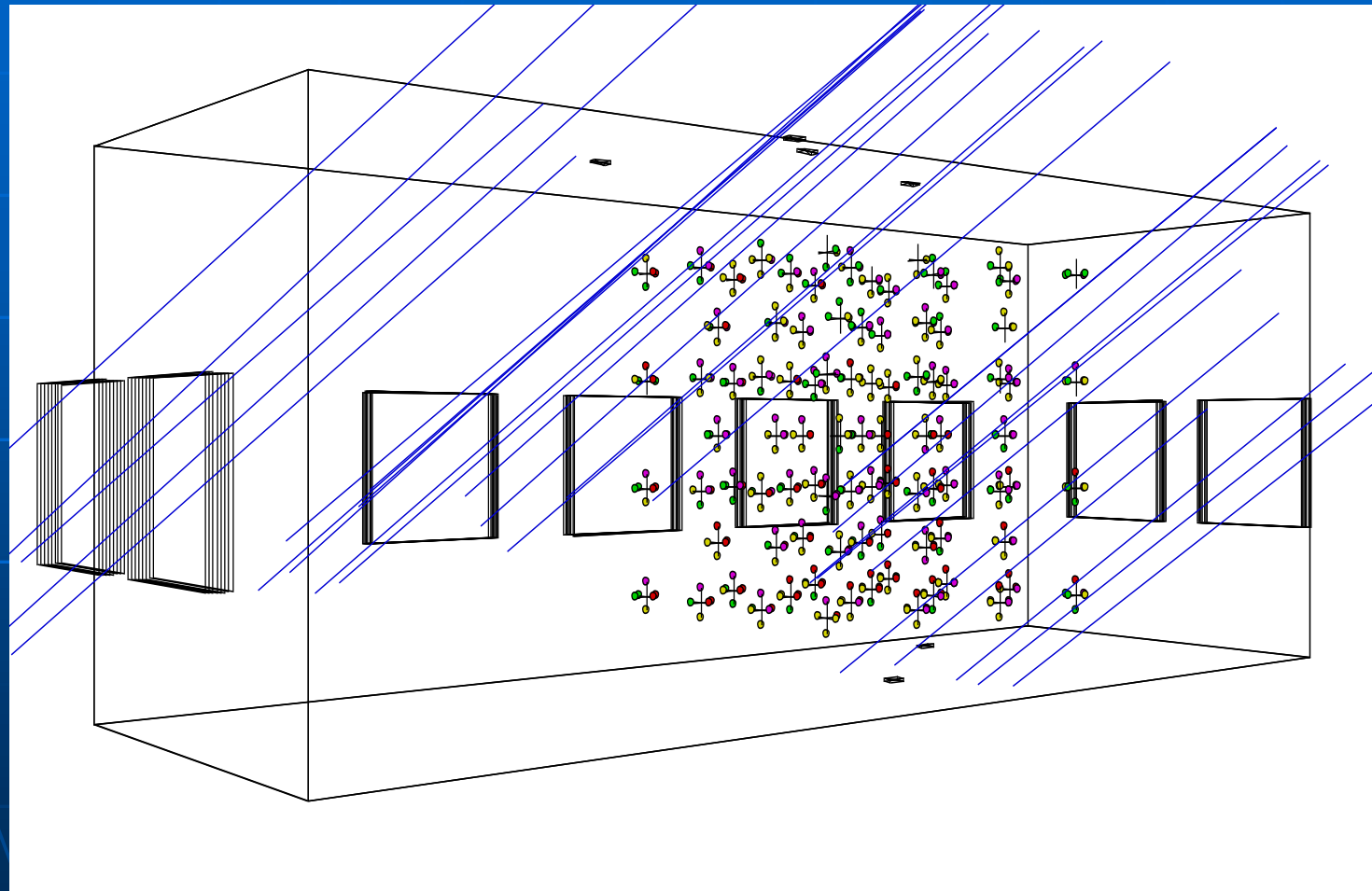


- Объем 2000 м³.
- Детектирование черенковского излучения производится квазисферическими модулями (КСМ).
- Пространственная решетка: 91 КСМ в 25 гирляндах.
- Динамический диапазон каждого канала 1 – 10⁵ ф.э.

Координатно-трековый детектор ДЕКОР



Геометрическая реконструкция события с группой мюонов

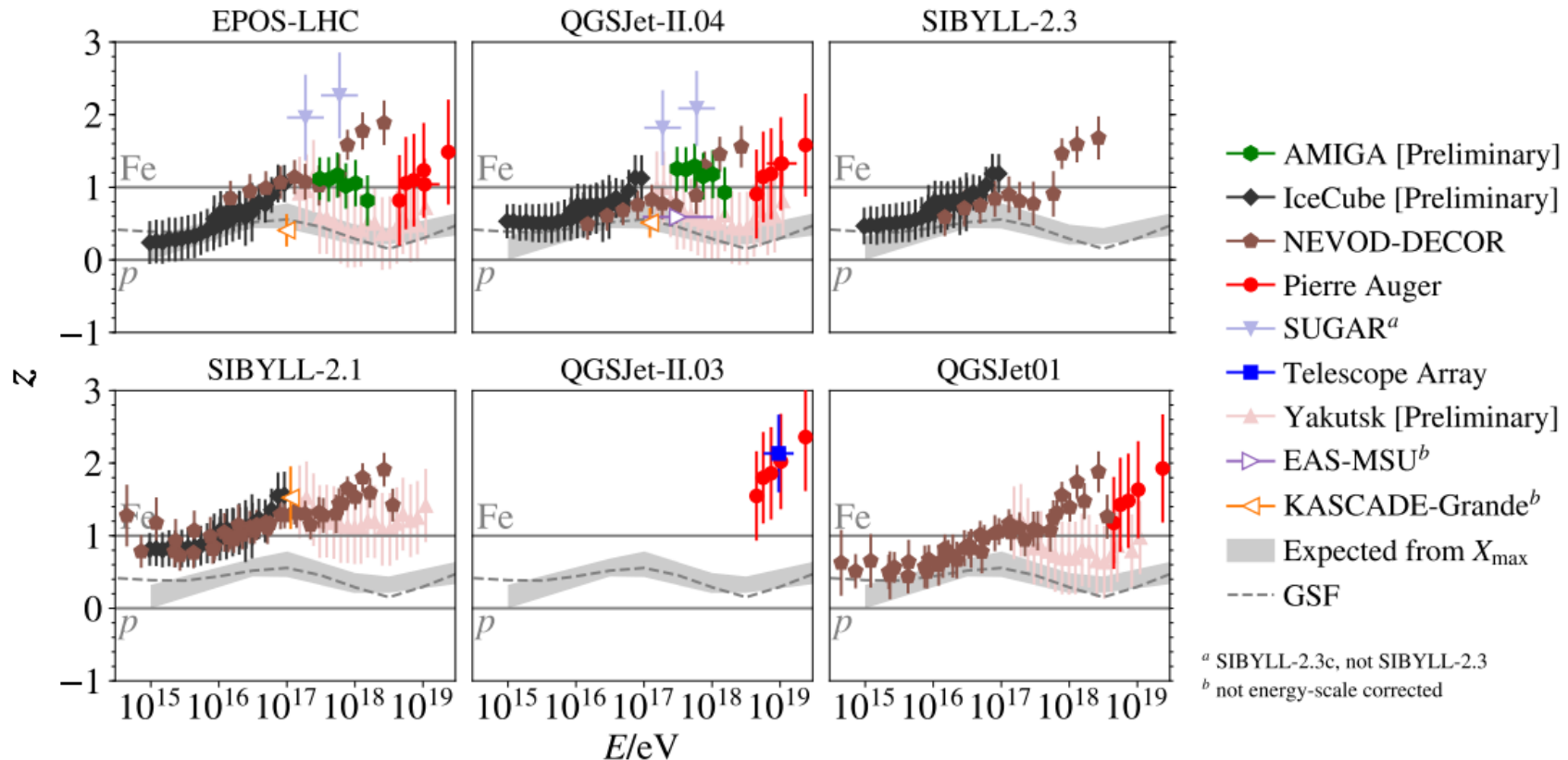


Мюонная загадка

Combining muon measurements

(WHISP: Working group in Hadronic Interactions and Shower Physics)

2018



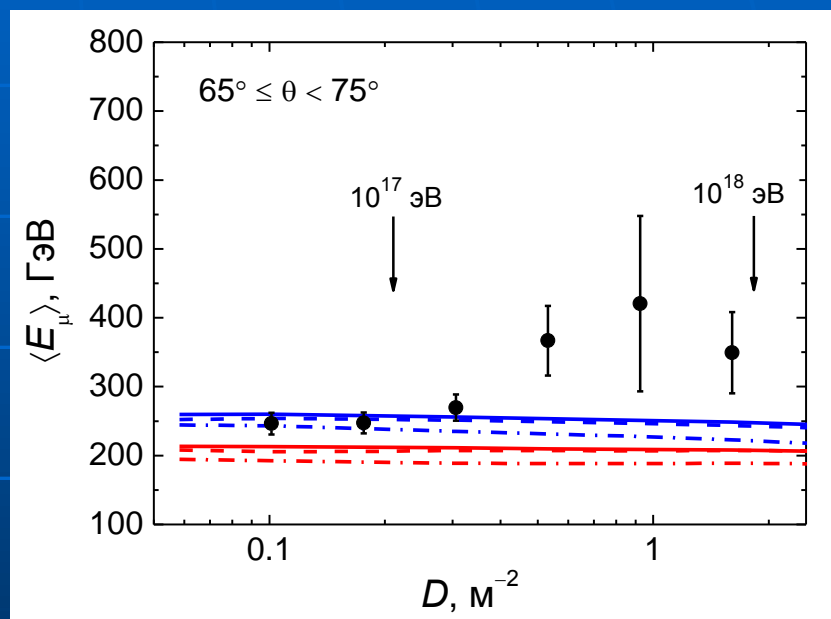
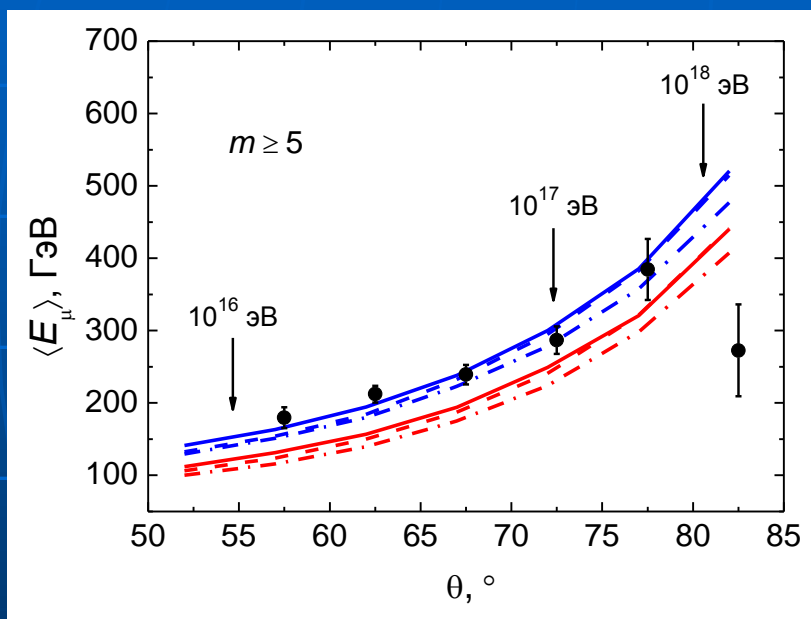
$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{det}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}{\ln(N_{\mu Fe}^{sim}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}$$

Кокоулин Р.П. «Мюонная загадка»

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-2.3с (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 .

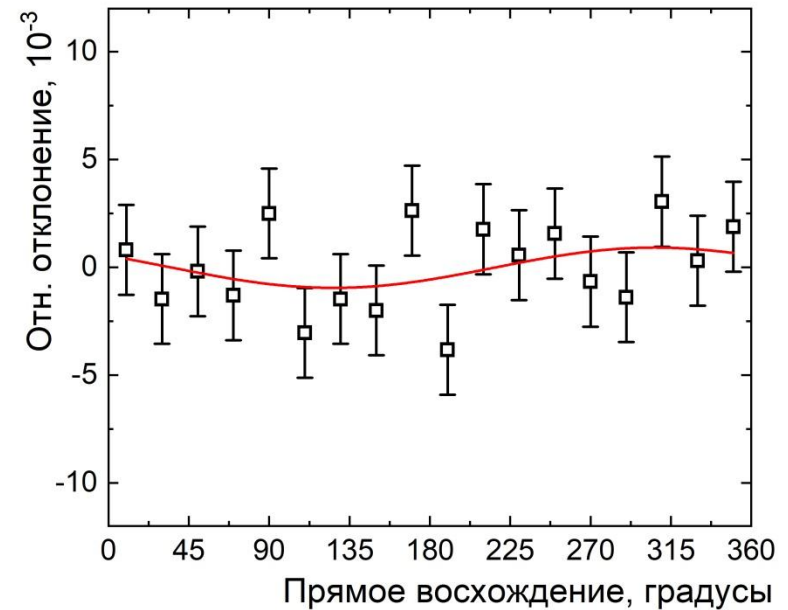
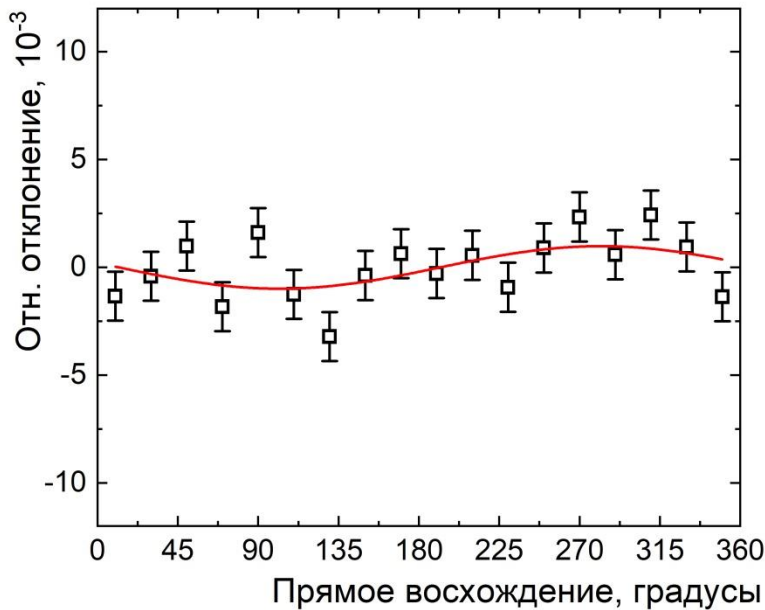
МН Юрина Е.А. и др. «Средние энергии мюонов в наклонных группах по данным эксперимента НЕВОД-ДЕКОР»

Анизотропия КЛ

II экваториальная система

$E_0 \sim 1$ ПэВ

$E_0 \sim 5$ ПэВ



$A = (1.01 \pm 0.38) \cdot 10^{-3}; \Delta\phi = 16^\circ \pm 22^\circ$ $A = (0.95 \pm 0.69) \cdot 10^{-3}; \Delta\phi = 40^\circ \pm 42^\circ$

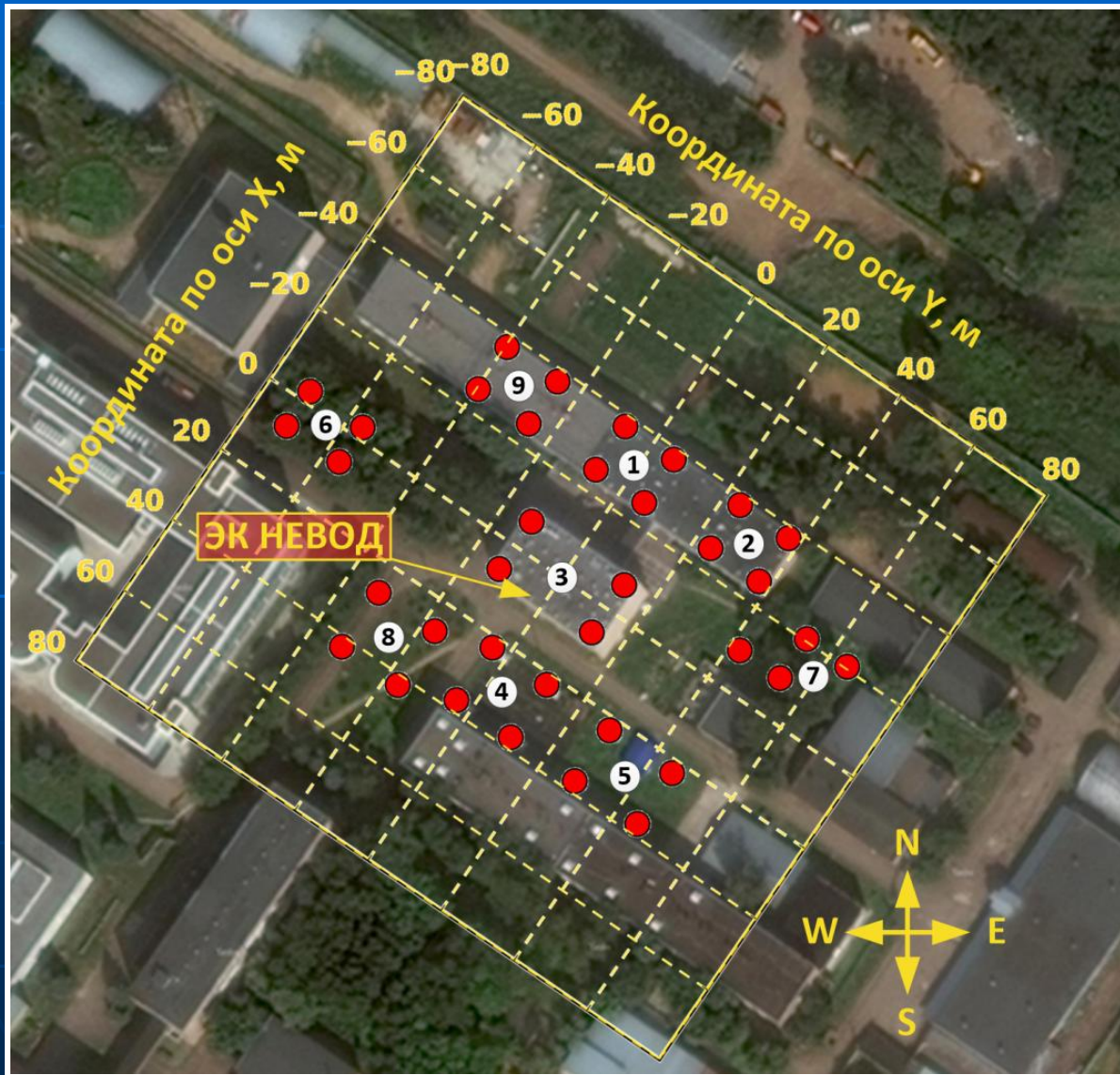
Значимость 2.6σ

Значимость 1.4σ

МН Амельчаков М.В. и др. «Исследование анизотропии космических лучей ПэВ-ных энергий с помощью групп мюонов»

Мультикомпонентные исследования ШАЛ

Установка НЕВОД-ШАЛ



144 счетчика;

36 станций;

9 кластеров ;

Характерный
размер кластера:

15 × 15 м²;

площадь установки:

10⁴ м²;

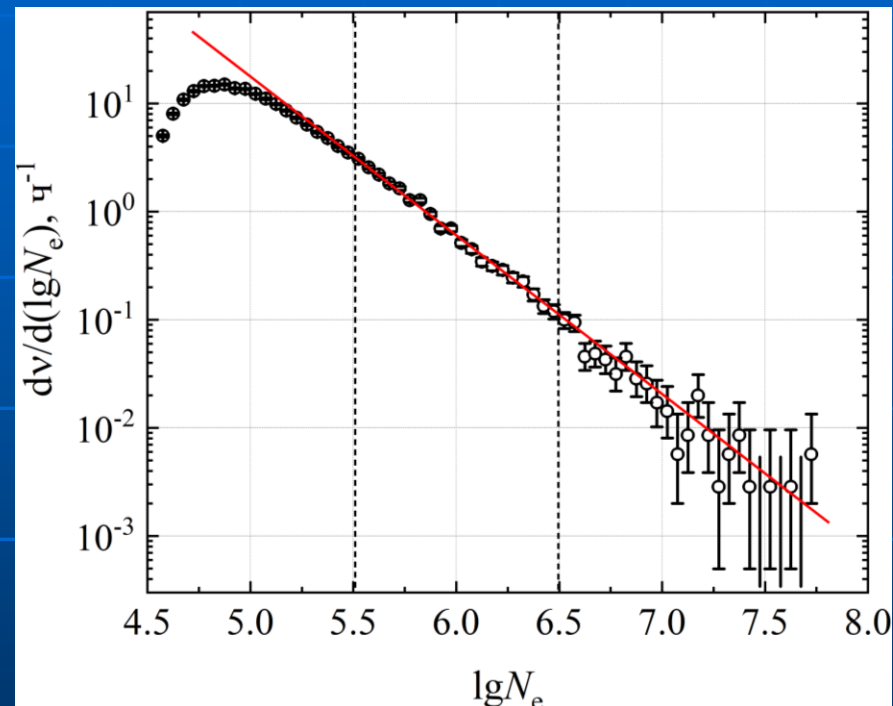
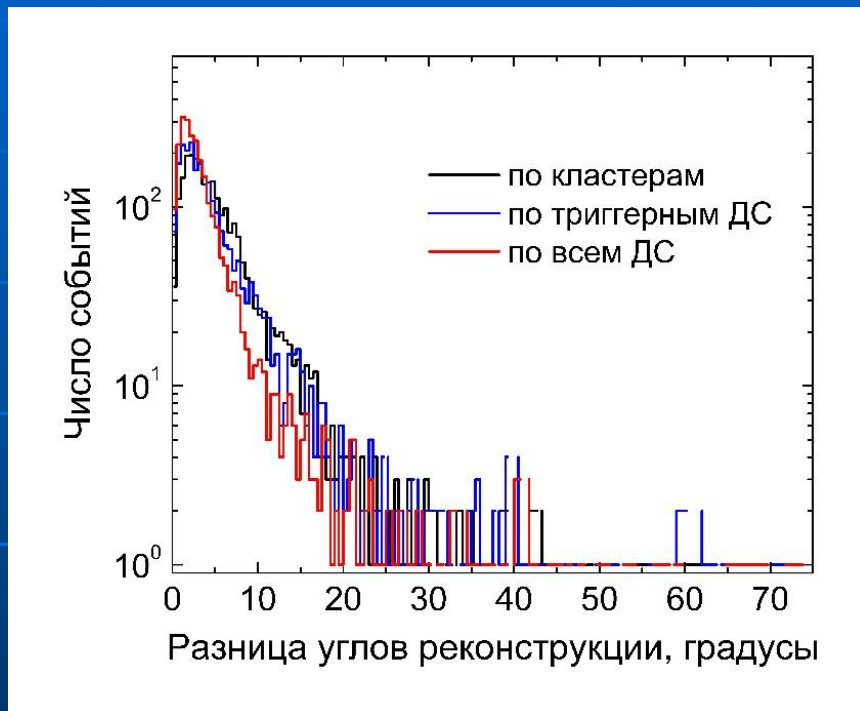
Диапазон энергий:

от 10¹⁵ до 10¹⁷ эВ.

Исследования на установке НЕВОД-ШАЛ

Исследование точности реконструкции направления

Спектр мощностей ШАЛ

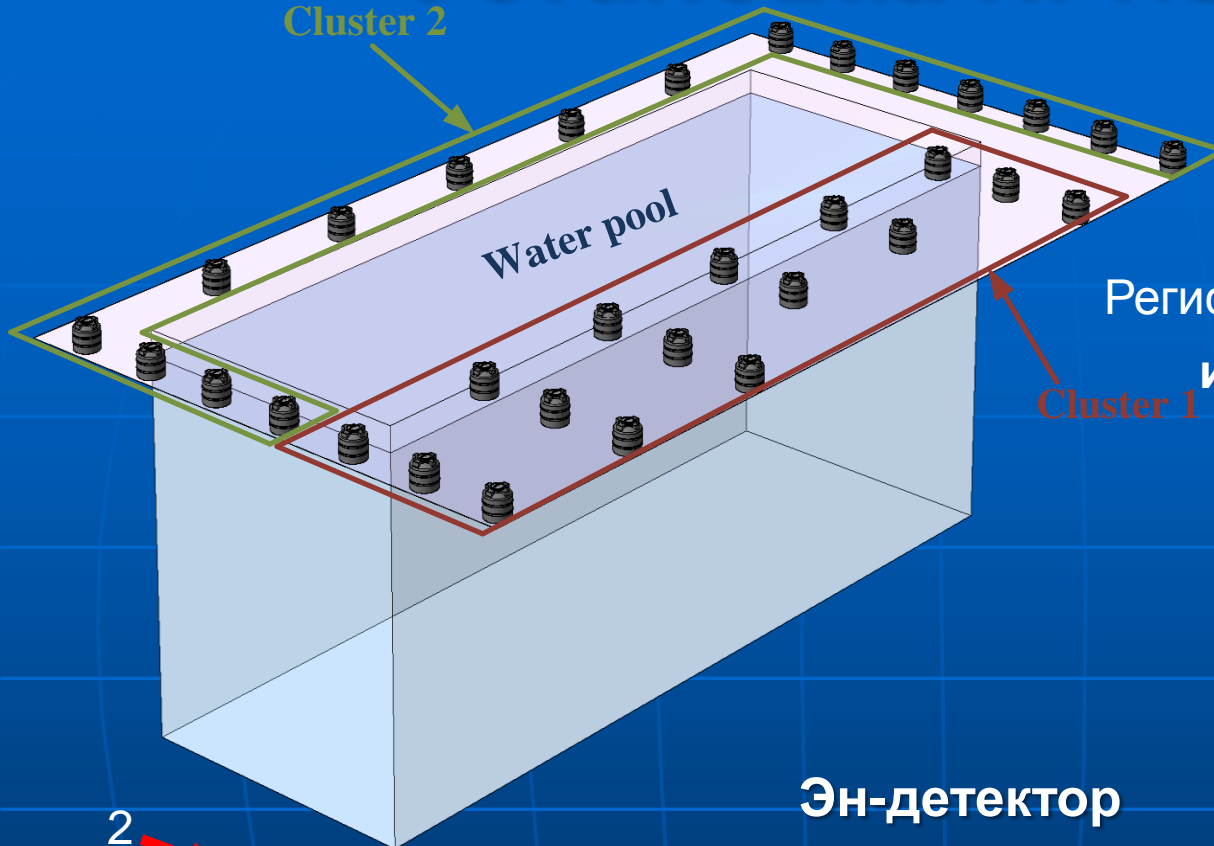


Точность: 3.5° .

Показатель степени $\gamma = -2.48 \pm 0.03$.
 2.49 ± 0.03

ПКЛ-2 ID 65 Южакова Е.А. и др. «Характеристики широких атмосферных ливней, регистрируемых установкой НЕВОД-ШАЛ»

Установка ПРИЗМА-32



32 эн-детектора;

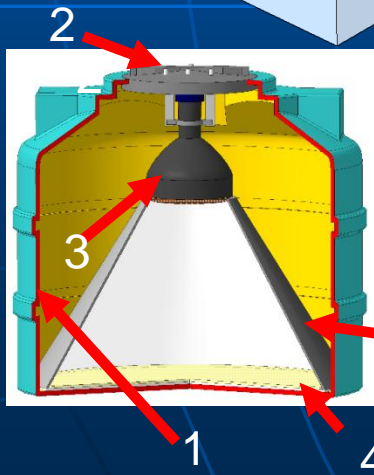
2 кластера ;

Площадь ~500 м² ;

Регистрирует тепловые нейтроны
и заряженные частицы.

Cluster 1

Эн-детектор



1 – Светоизолирующий корпус;

2 – Крышка;

3 – ФЭУ 200;

4 – Сцинтиллятор ZnS(Ag)+LiF

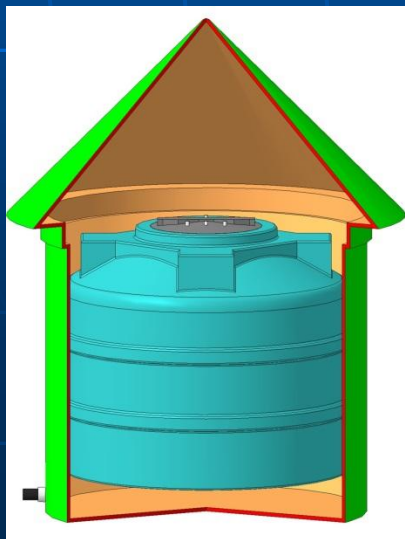
5 – Светособирающий конус

сцинтиллятор на основе сернистого цинка

ZnS(Ag) + LiF, обогащенного до 90% изотопом ⁶Li :



Установка УРАН



72 эн-детектора;

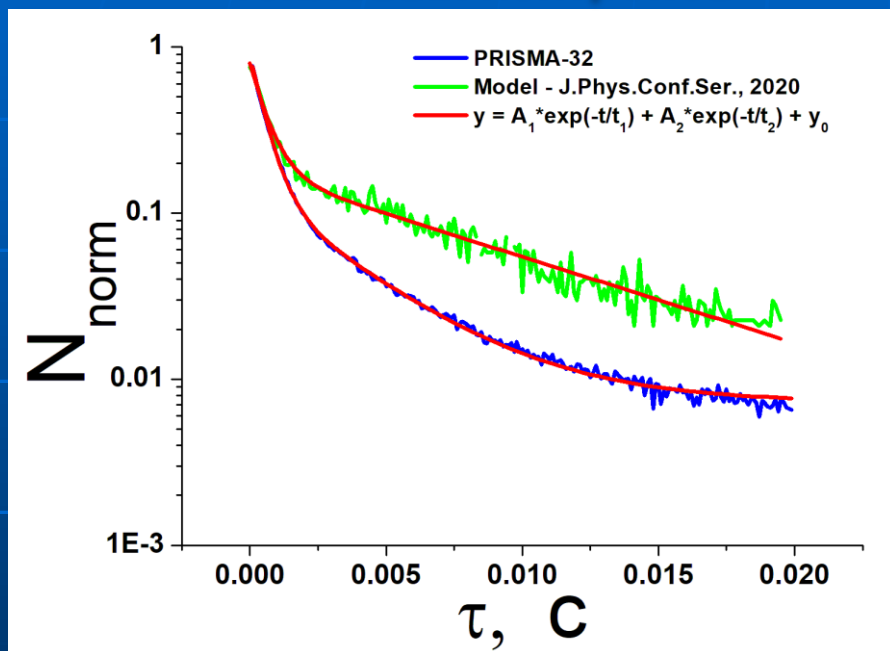
6 кластеров;;

Сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{B}_2\text{O}_3$.

Диапазон энергий от 10^{15} до 10^{17} эВ.

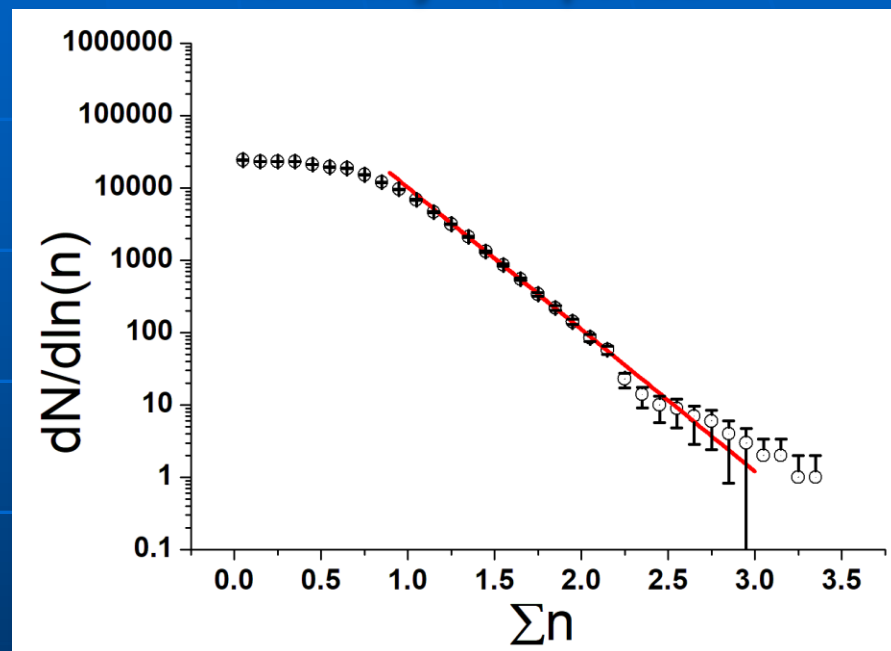
Исследования адронной компоненты ШАЛ

Временное распределение
тепловых нейтронов



$$t_1 = 0.53 \pm 0.01 \text{ мс}, t_2 = 3.43 \pm 0.07 \text{ мс}$$

Интегральный спектр
по числу нейтронов



$$\text{Показатель наклона} - 1.96 \pm 0.01$$

ПКЛ-2 ID 119 Громушкин Д.М. и др. «Исследование нейтронов,
сопровождающих широкие атмосферные ливни, по данным установки
ПРИЗМА-32»

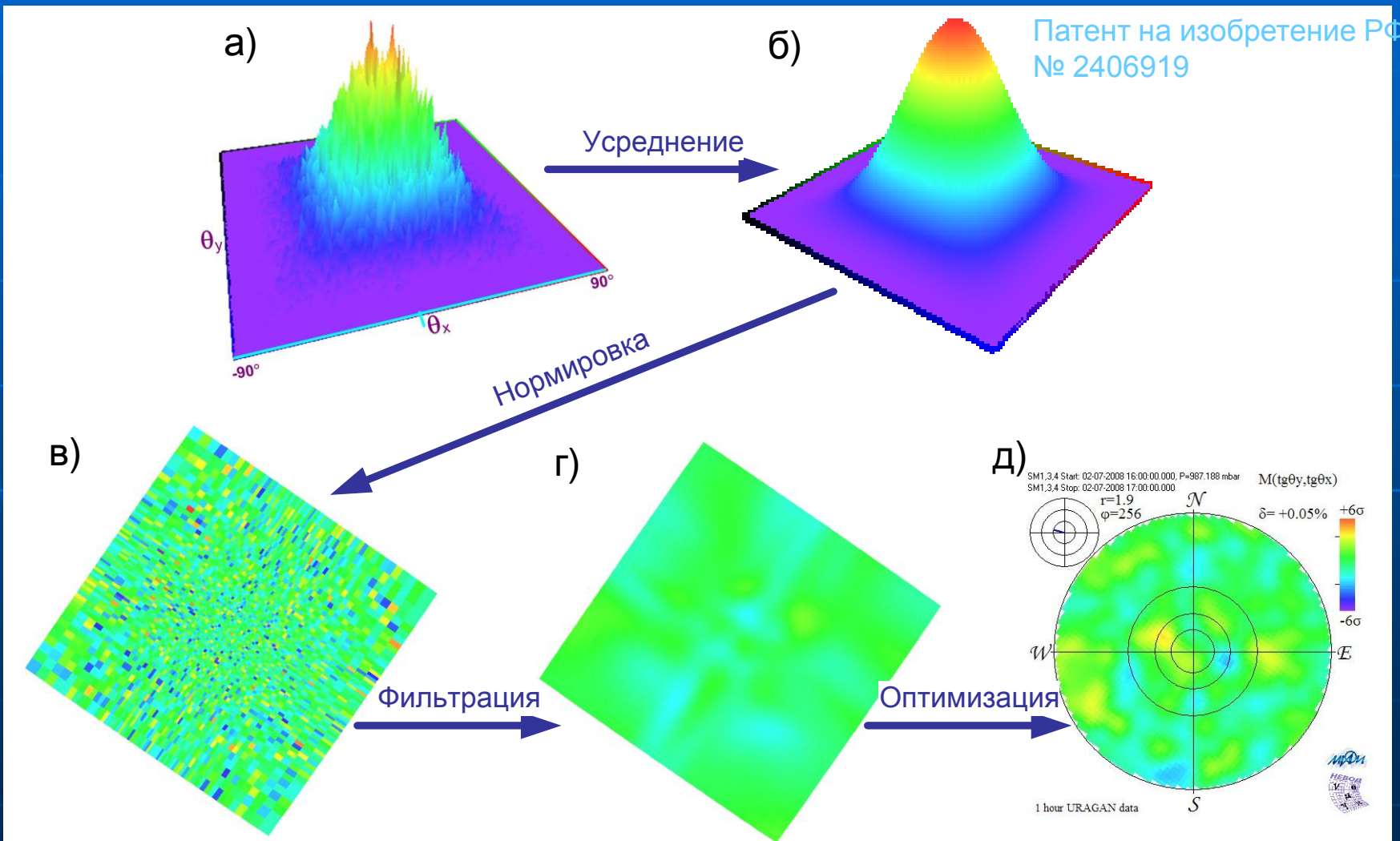
Мюонная диагностика (мюонография)

Мюонный годоскоп УРАГАН



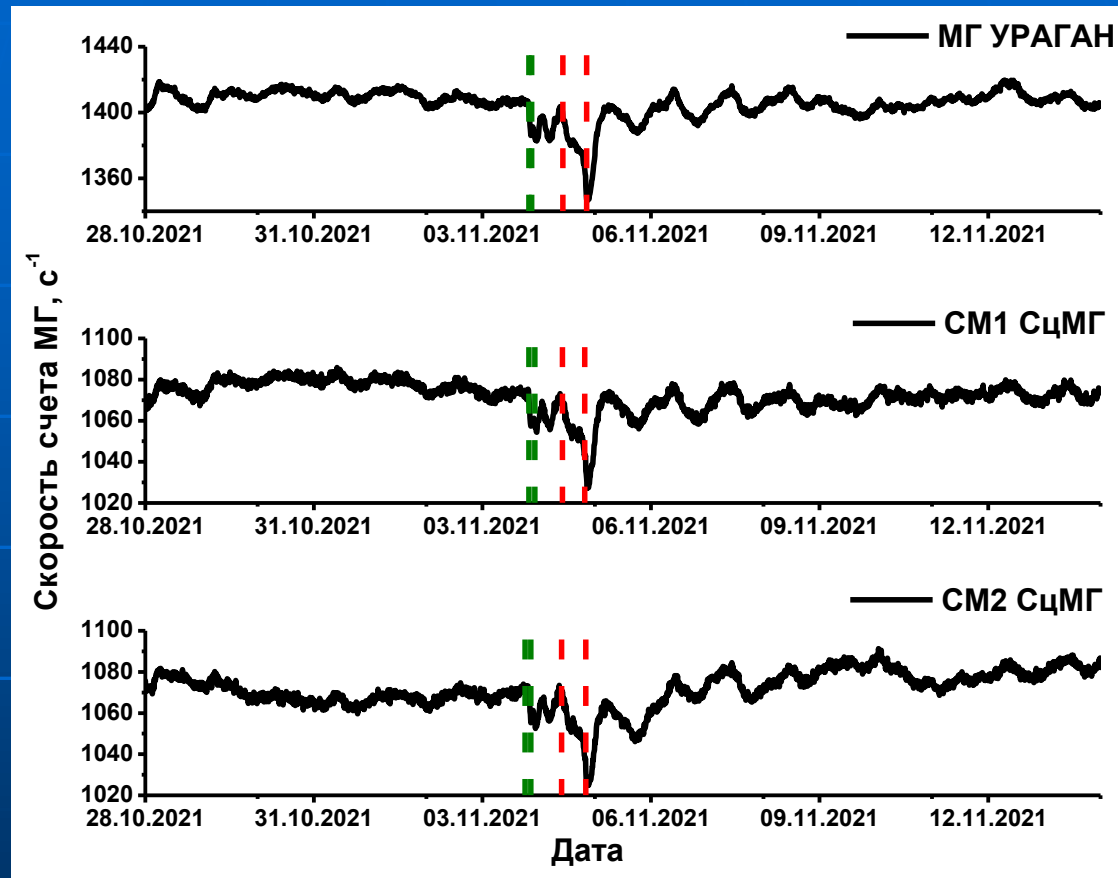
Построение мюонных изображений (мюонографий)

Патент на изобретение РФ
№ 2406919



Исследование форбуш-эффектов

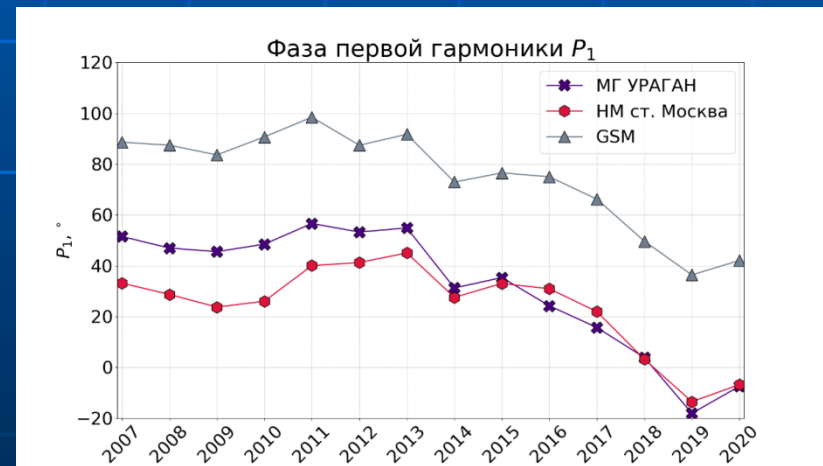
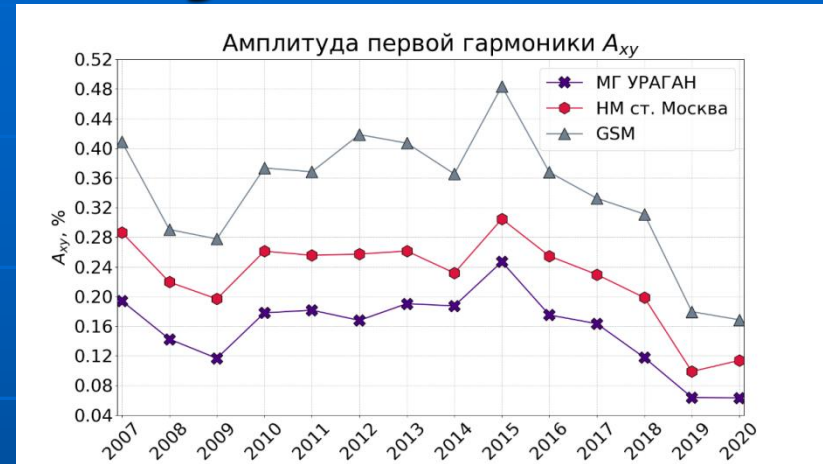
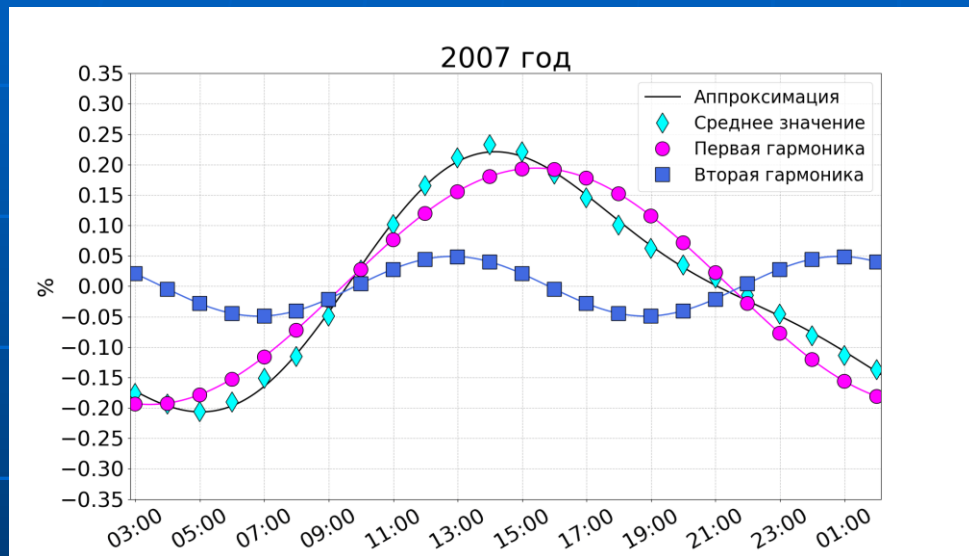
Событие 4 ноября 2021 года



После вспышек класса M1.5 и M1.7, зарегистрированы два форбуш-понижения с амплитудами падения 1.3 % и 3.6 %.

МОД, ID 35 Ковыляева А.А. и др. «Характеристики форбуш-эффекта 4 ноября 2021 года»

Суточная анизотропия космических лучей



МОД ID 53 Кузьменкова П.С. И др. «Солнечно-суточная анизотропия космических лучей по данным мюонного годоскопа УРАГАН и нейтронных мониторов»

Волновые процессы в атмосфере Земли

Область формирования грозы

Поток космических лучей

Ударная волна

μ

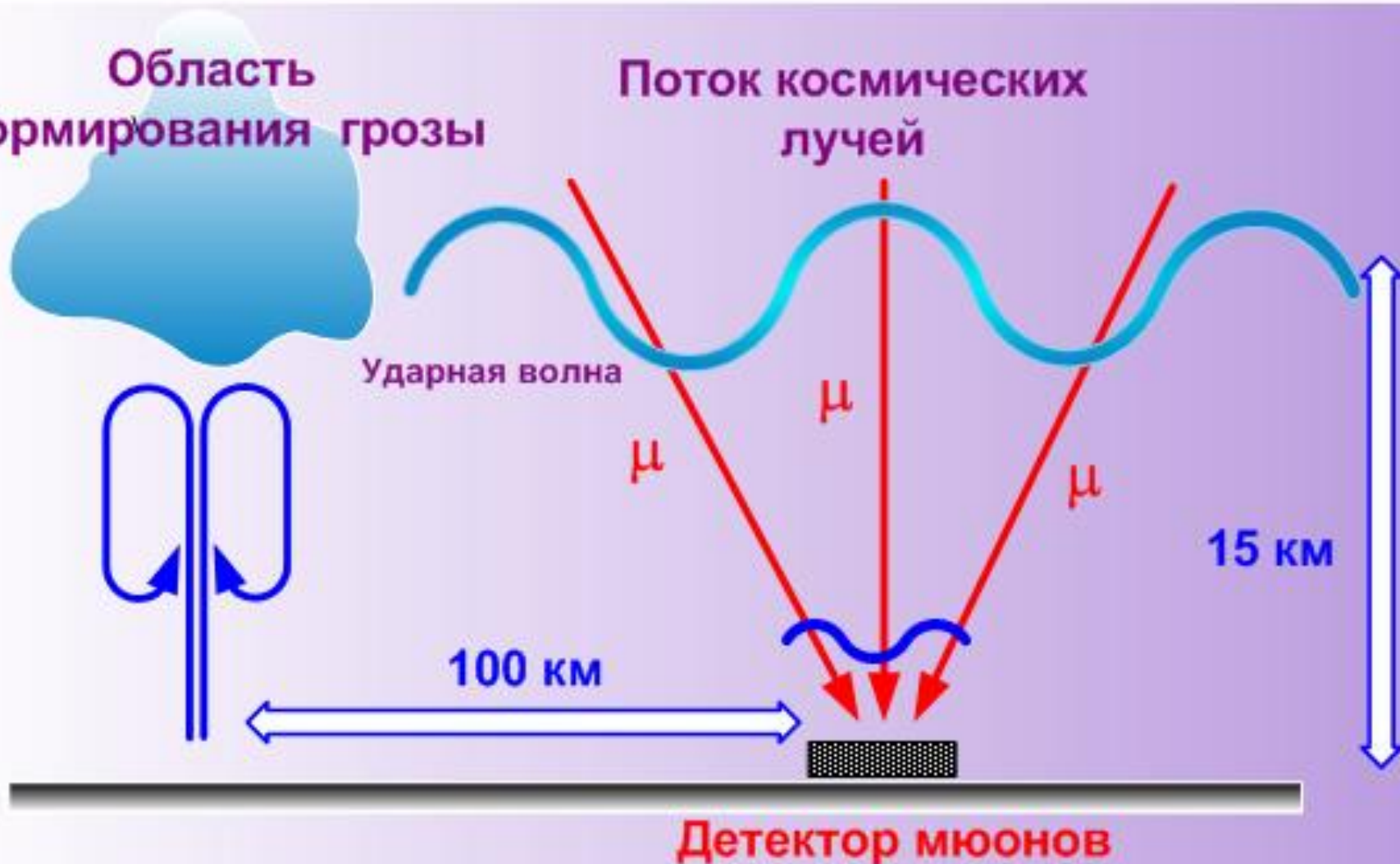
μ

μ

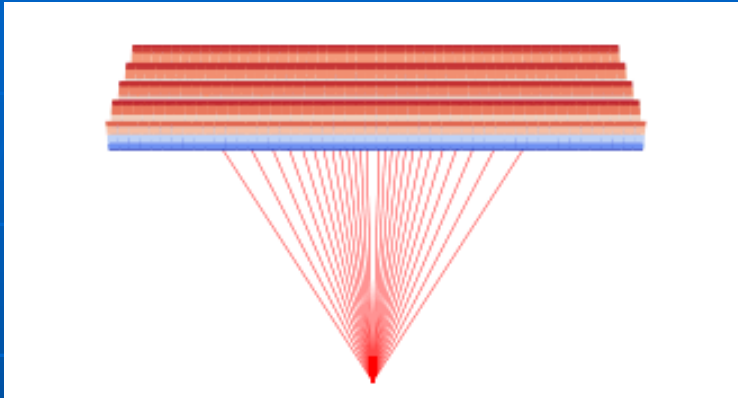
15 км

100 км

Детектор мюонов

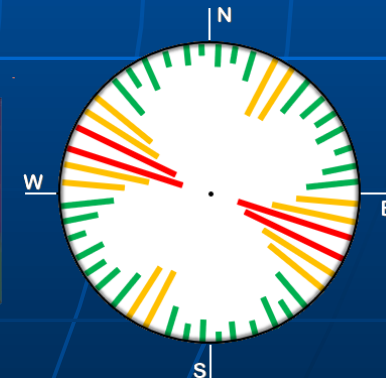
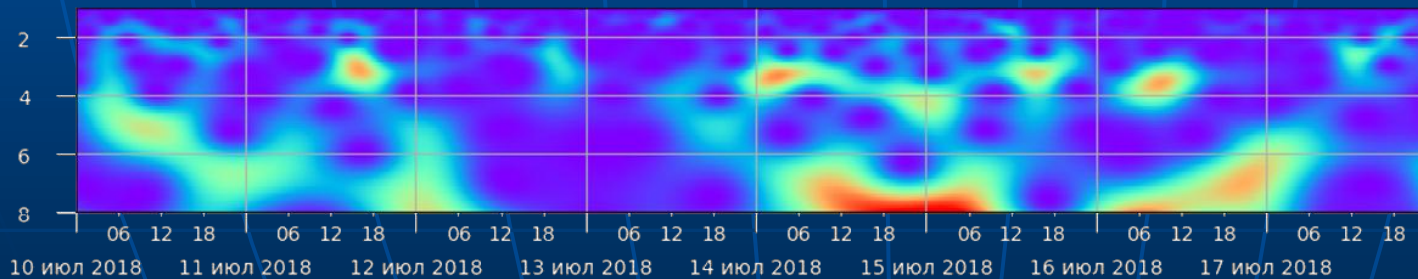


Метод поиска волн в слое генерации мюонов

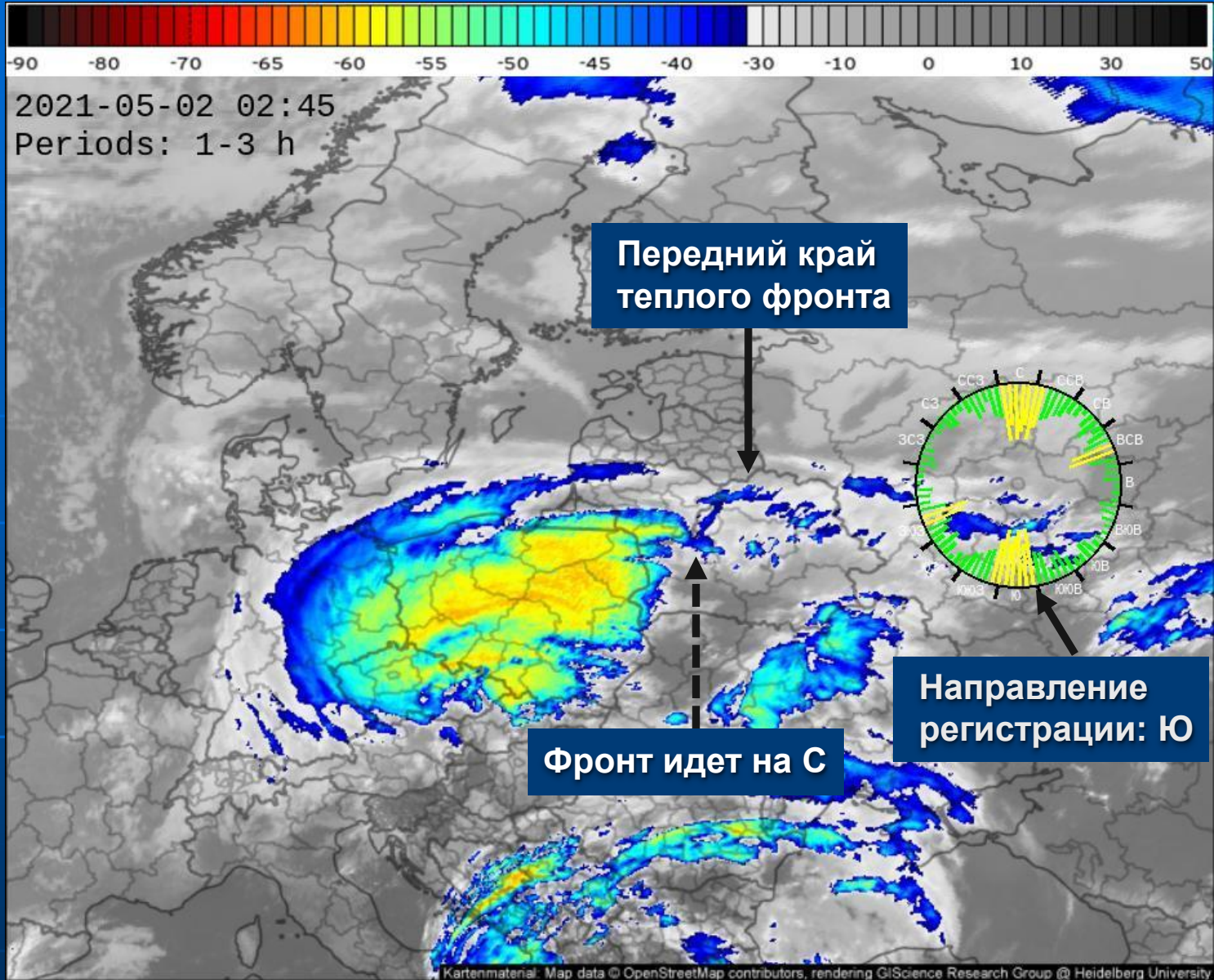


Отбор мюонов в плоскости, ортогональной волновому вектору плоской волны

- Ряд интенсивности покажет волну.
- 45 вейвлетов для всех направлений.
- Вейвлеты сводятся к «радарному отклику».



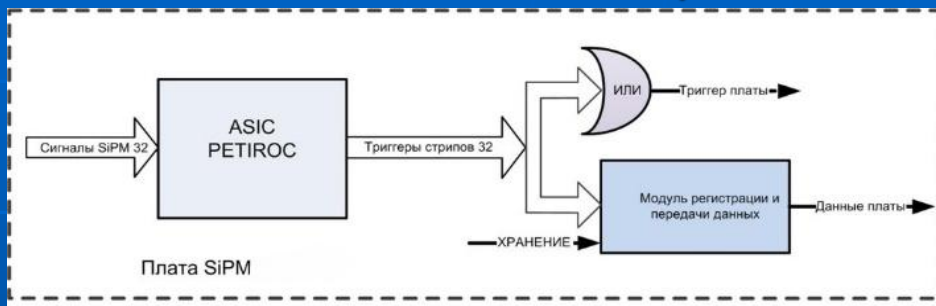
Мощность коэффициентов вейвлет-анализа получившегося ряда интенсивности и отклик, сделанный из всех вейвлетов



ГЕО Тимаков С.С. и др. «Новый подход к мюнографии атмосферы»

Разработка МГ нового поколения

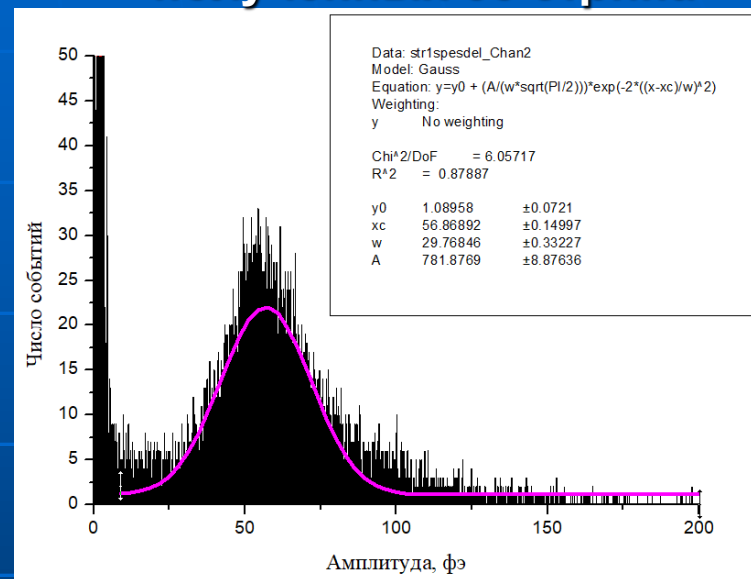
Система сбора данных основана на базе 32-х канальной ASIC (PETIROC 2A, либо CITIROC 1A)



Стрипы из Пластикового сцинтиллятора (полистирол), производства АО «УНИПЛАСТ», г. Владимир

МН ID 50 Целиненко М.Ю. и др. «Проект компактного мюонного годоскопа для мюонографии различных объектов»

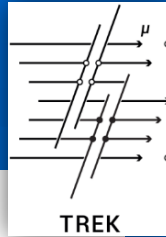
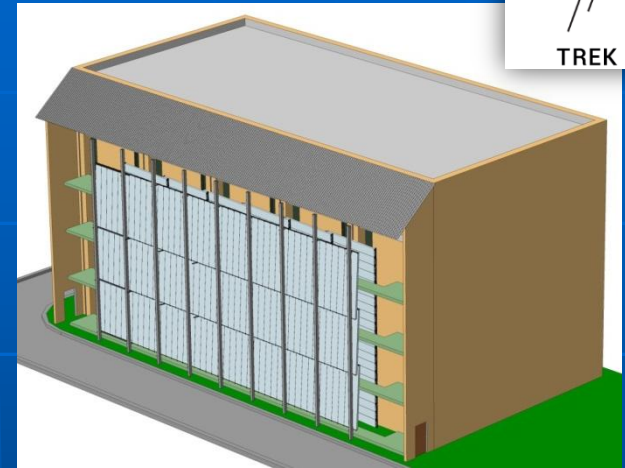
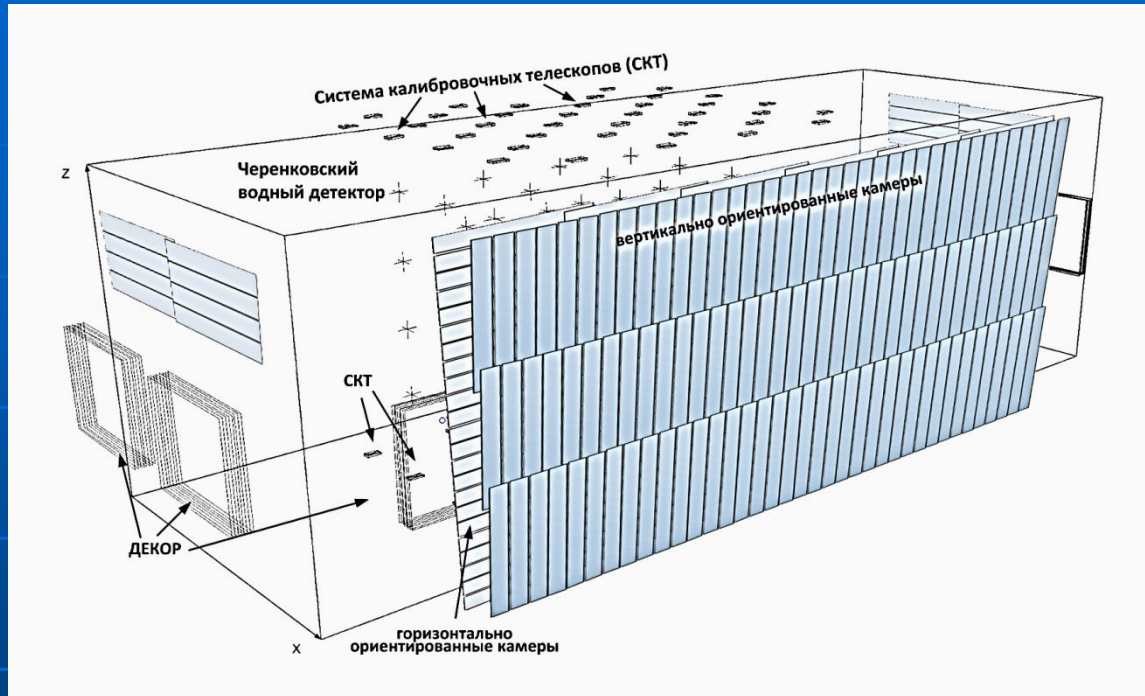
Спектр сигналов откликов полученных со стрипа



По результатам тестирования пробной партии стрипов (5 шт.) средняя амплитуда сигнала составила 57 ± 15 ф.э.

Развитие Экспериментального комплекса

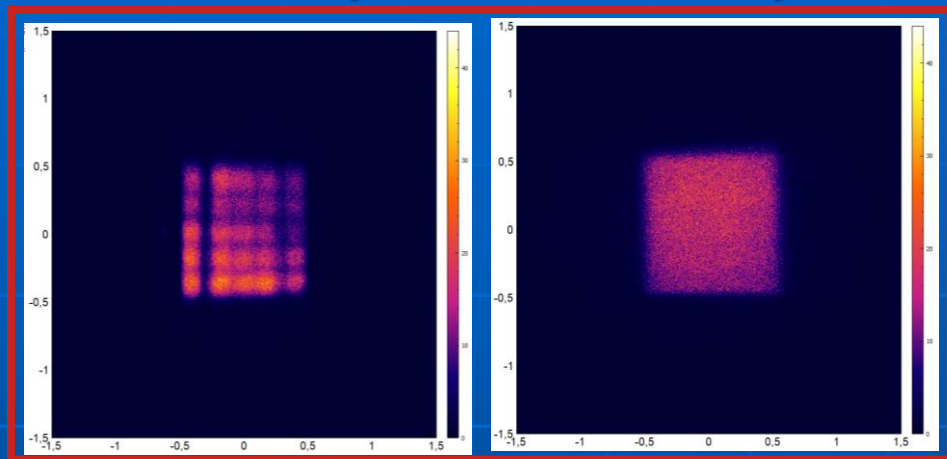
Координатно-трековый детектор ТРЕК



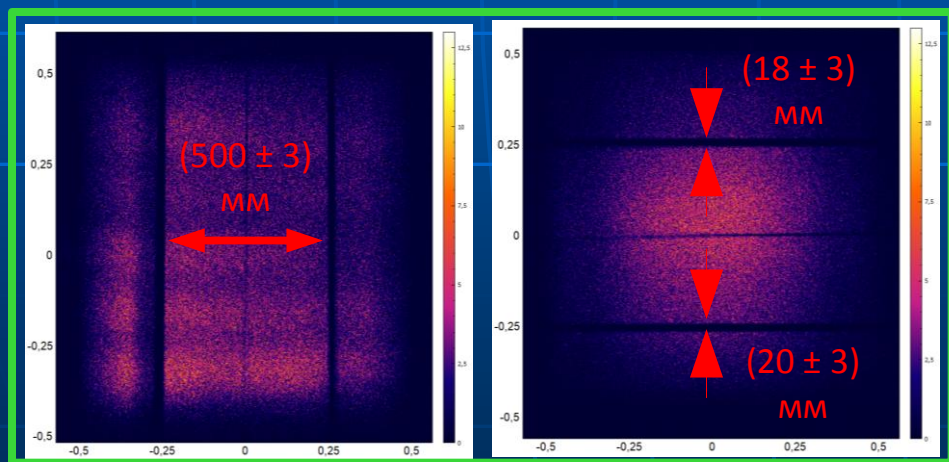
- 264 дрейфовые камеры;
- Полное перекрытие апертуры ЧВД;
- Площадь детектора – 254 м²;
- Разрешение двух треков ~ 3 мм.



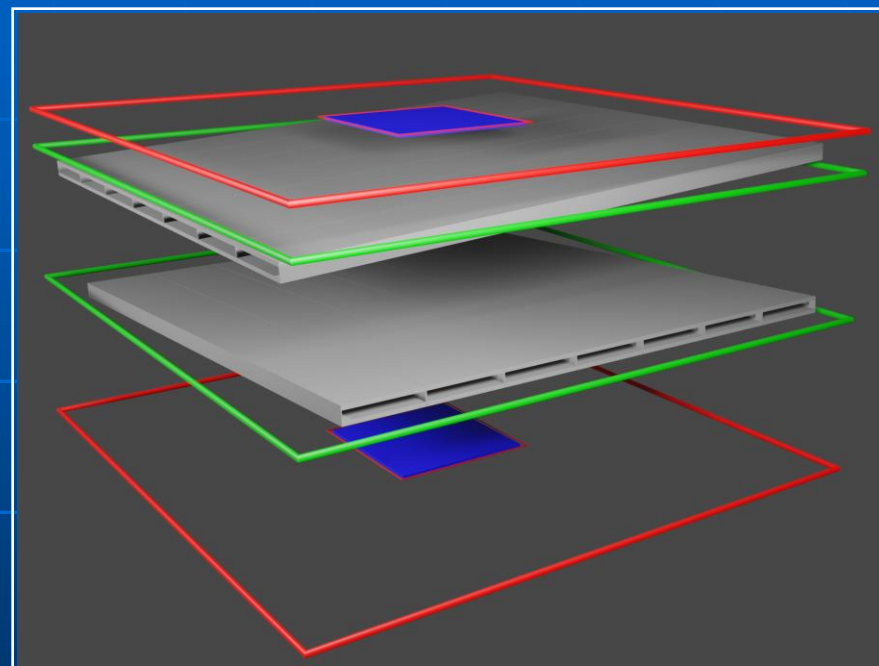
Анализ мюнограмм дрейфовых камер и сцинтилляционных детекторов



Мюнограмма сцинтилляционных детекторов



Мюнограмма дрейфовых камер



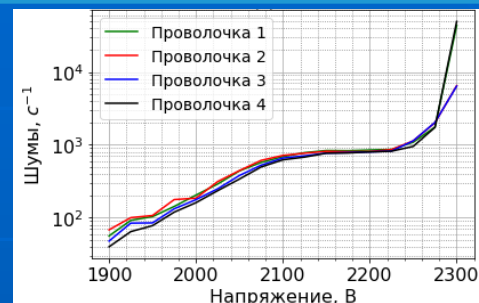
Модель ПротоТРЕК

МН ID 52 Трошин И.Ю. и др. «Координатно-трековый детектор
ПротоТРЕК для исследования околоразрывных ШАЛ»

Стенд для калибровки дрейфовых камер детектора ТРЕК



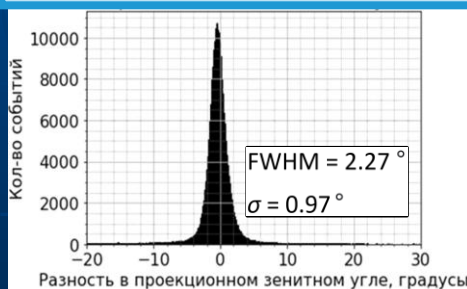
Счетная характеристика ДК



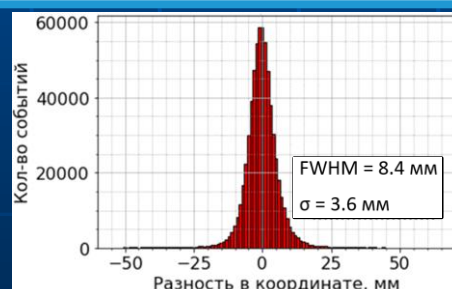
Распределение по времени заднего фронта сигнала



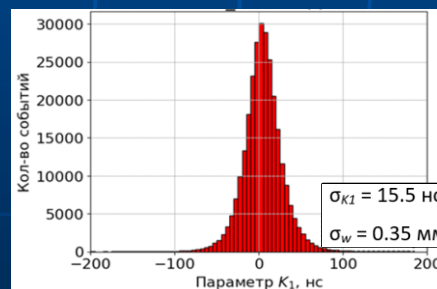
Распределение по разности координаты трека в эталонных и тестируемой ДК



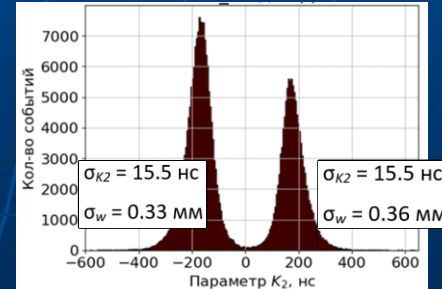
Распределение по угловому отклонению трека в эталонных и тестируемой ДК



Распределение по параметру K_1

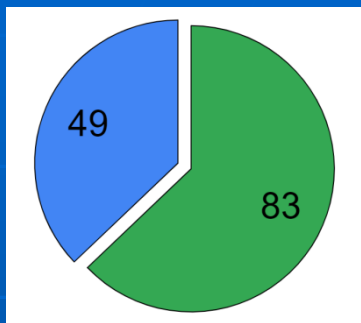


Распределение по параметру K_2



МН ID 40 Хомчук Е. П. и др. «Исследования характеристик многопроволочных дрейфовых камер детектора ТРЕК»

Монтаж дрейфовых камер (ДК) на детектор ТРЕК



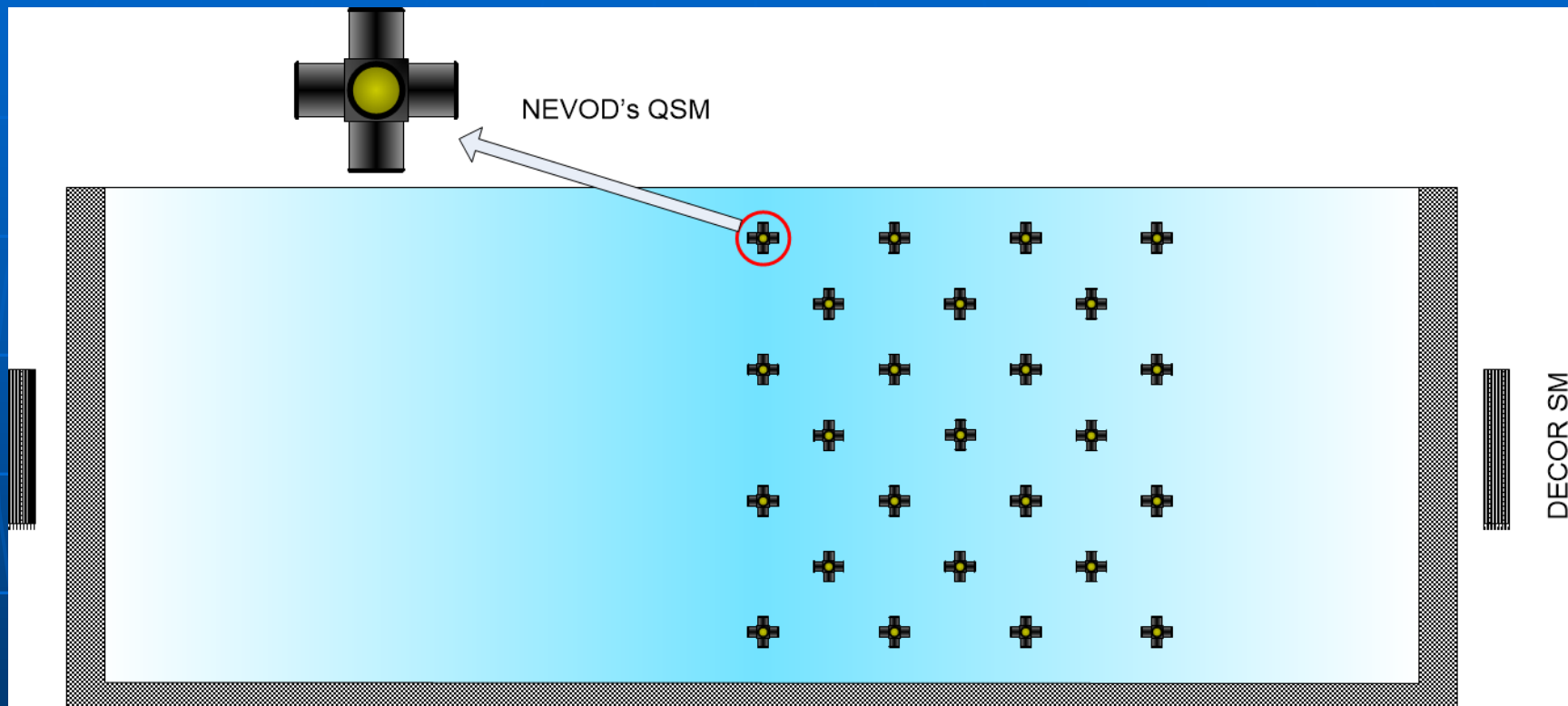
Сборка внутренней плоскости



Монтаж одной ДК

Секция №1	Секция №2	Секция №3	Секция №4	Секция №5	Секция №6
Кластер №1	Кластер №1	Кластер №1	Кластер №1	Кластер №1	Кластер №1
1	1	1	1 484	1 450	1 514
2	2	2	2 501	2 457	2 483
3	3	3	3 488	3 346	3 413
4	4	4	4 502	4 489	4 407
5	5	5	5 458	5 499	5 308
6	6	6 472	6 478	6 498	6 322
7	7	7 331	7 504	7 492	7 404
Кластер №2	Кластер №2	Кластер №2	Кластер №2	Кластер №2	Кластер №2
1	1	1 454	1 494	1 344	1 503
2	2	2 383	2 518	2 430	2 335
3	3	3 384	3 364	3 433	3 422
4	4	4 360	4 468	4 445	4 214
5	5	5 342	5 482	5 320	5 285
6	6	6 480	6 510	6 431	6 464
7	7	7 428	7 471	7 341	7 528
Кластер №3	Кластер №3	Кластер №3	Кластер №3	Кластер №3	Кластер №3
1	1	1 368	1 525	1 339	1 385
2	2	2 417	2 438	2 316	2 490
3	3	3 350	3 305	3 421	3 393
4	4	4 481	4 319	4 379	4 439
5	5	5 377	5 329	5 410	5 398
6	6	6 309	6 509	6 512	6 347
7	7	7 467	7 353	7 296	7 232
8	8	8 372	8 465	8 283	8 298

Текущая конфигурация черенковского водного калориметра



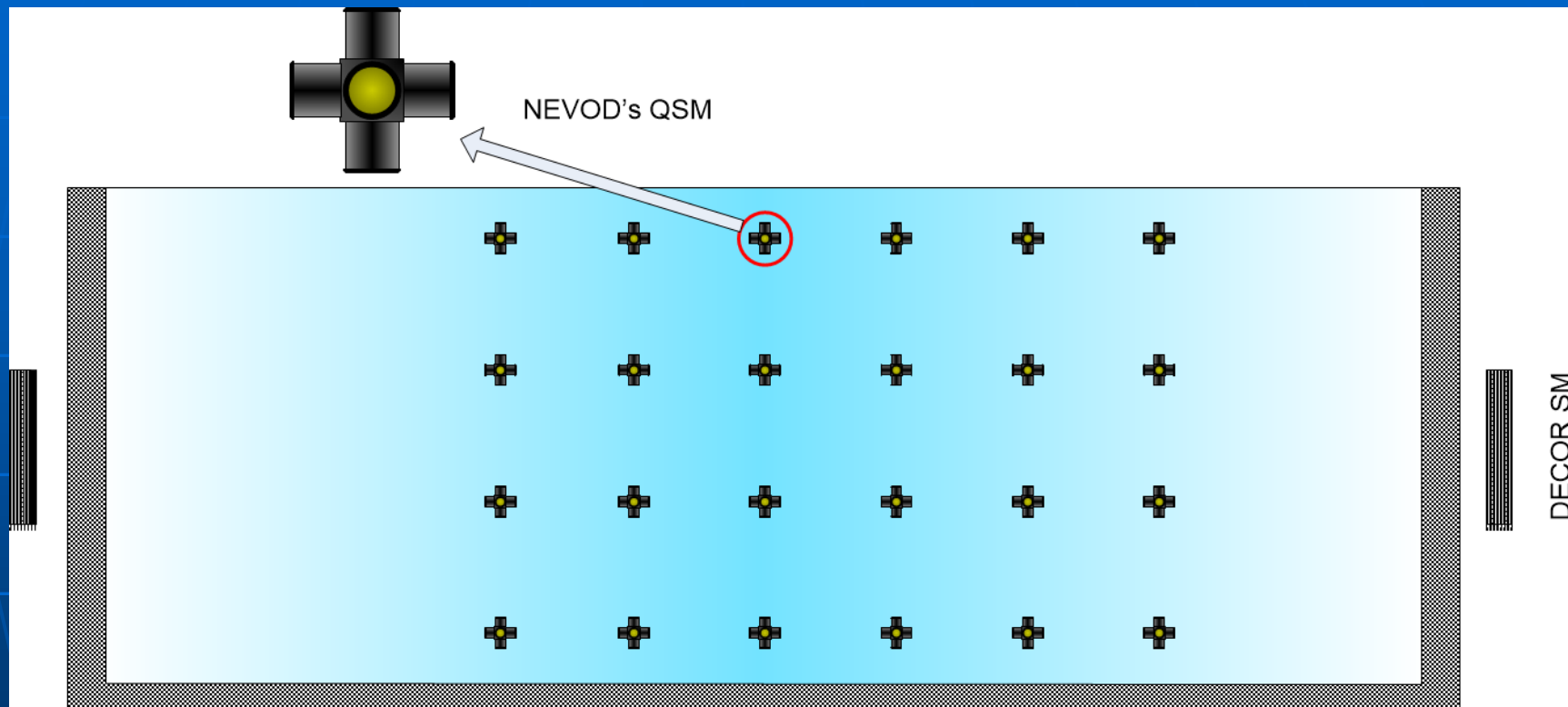
4 «больших» плоскости по 16 КСМ;

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;

Эффективный объем $\sim 1200 \text{ м}^3$;

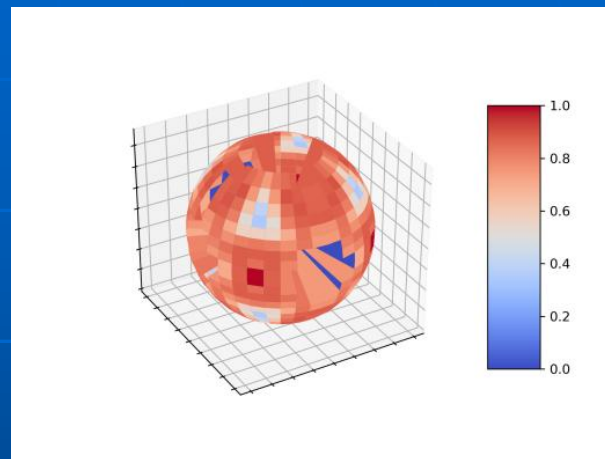
Симметричное расположение относительно ТРЕК.

Тестирование нового модуля КСМ-6М в воде (04/2021 – 06/2022)

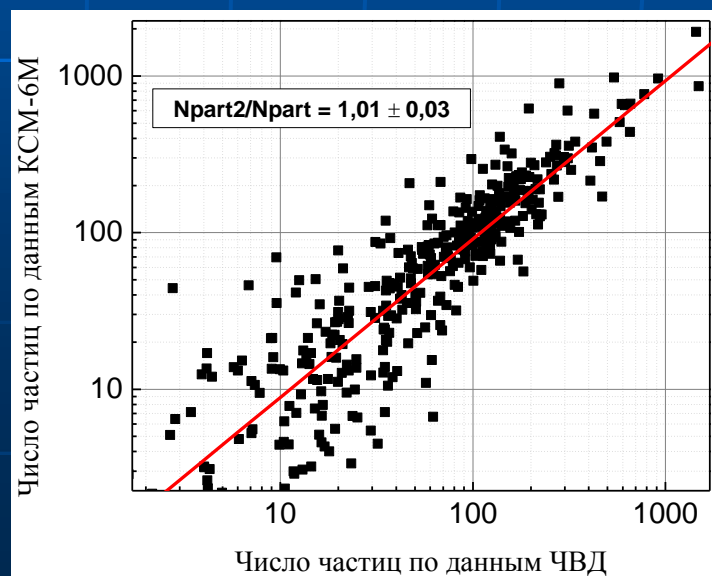
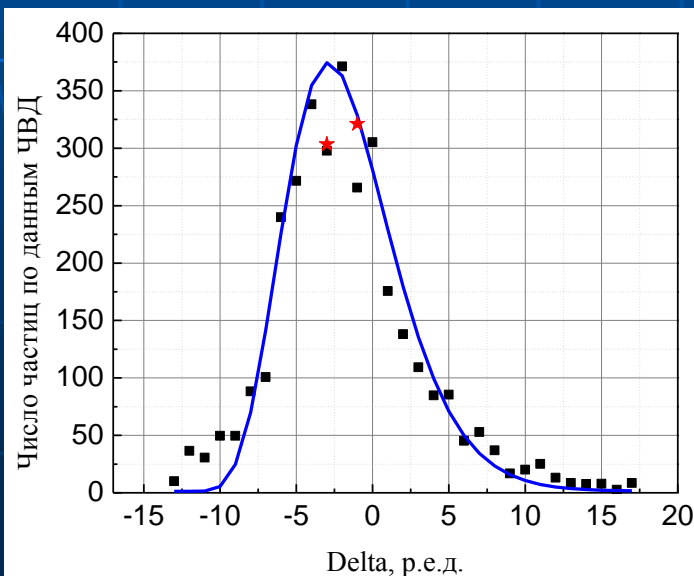
ФЭУ-200

Hamamatsu R877

Сферичность отклика $\sim 14\%$.



Энергетическая калибровка по событиям с каскадами



Заключение

- Продолжаются исследования наклонных групп мюонов – локальной плотности и средних энергий мюонов в группах
- Развивается программа мультикомпонентных исследований электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ.
- Мюонная диагностика открывает новые возможности для исследований динамических процессов в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.
- В 2024-2025 гг. планируется запуск детектора ТРЕК совместно с модернизированным черенковским водным калориметром.

Спасибо за внимание!

