

## Восстановление параметров высокоэнергичных каскадов в ЧВД НЕВОД

Хомяков В.А., Богданов А.Г., Киндин В.В., Кокоулин Р.П.,  
Петрухин А.А., Хохлов С.С., Шутенко В.В., Яшин И.И.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

# Введение

- в настоящее время для исследования мюонов и нейтрино сверхвысоких энергий широко используются черенковские водные детекторы ([ANTARES](#), Байкал, [IceCube](#));
- в больших черенковских детекторах энергия мюонов и нейтрино оценивается по каскадным ливням, энергия которых определяется [в точечном приближении](#) на основе модельных расчетов;
- в данной работе каскадные ливни [впервые](#) исследуются в черенковском водном детекторе, в котором измеряется [полная каскадная кривая](#).

# Черенковский водный детектор НЕВОД

- Объем 2000 м<sup>3</sup>.
- Пространственная решетка: 91 квазисферический модуль (КСМ) в 25 гирляндах (шаг 1x1x1.25 м<sup>3</sup>).
- Каждый КСМ включает 6 ФЭУ-200.
- Динамический диапазон каждого ФЭУ: 1 – 10<sup>5</sup> ф.э.



Малый шаг пространственной решетки и широкий динамический диапазон позволяют детектору работать в режиме калориметра

# Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР

В воде бассейна ЧВД мюоны могут рождать каскадные ливни, отбору и оценке параметров которых посвящена работа

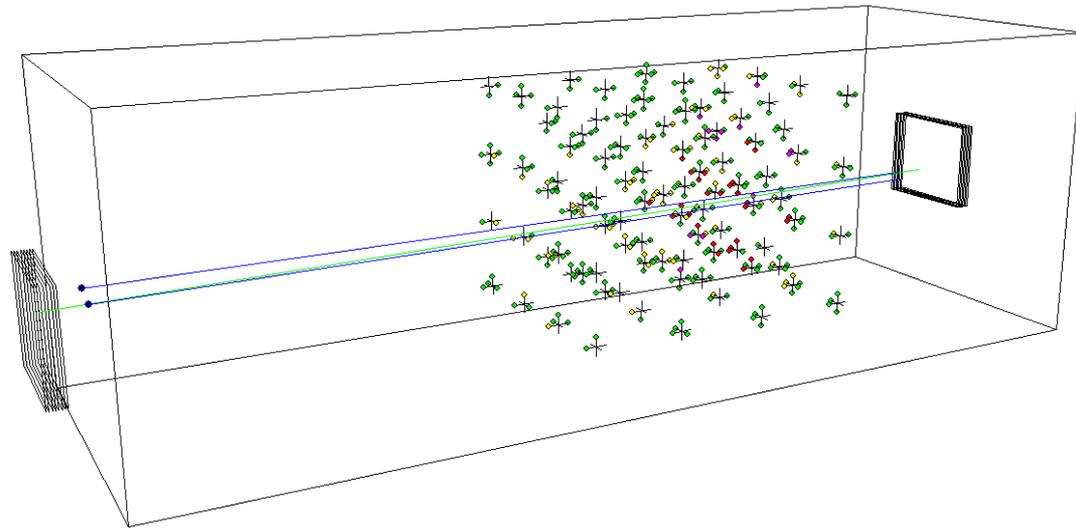
# Изучение ливней с известной осью

Исследовались ливни, рожденные окологоризонтальными мюонами  
(зенитный угол  $85^\circ \pm 90^\circ$ ).

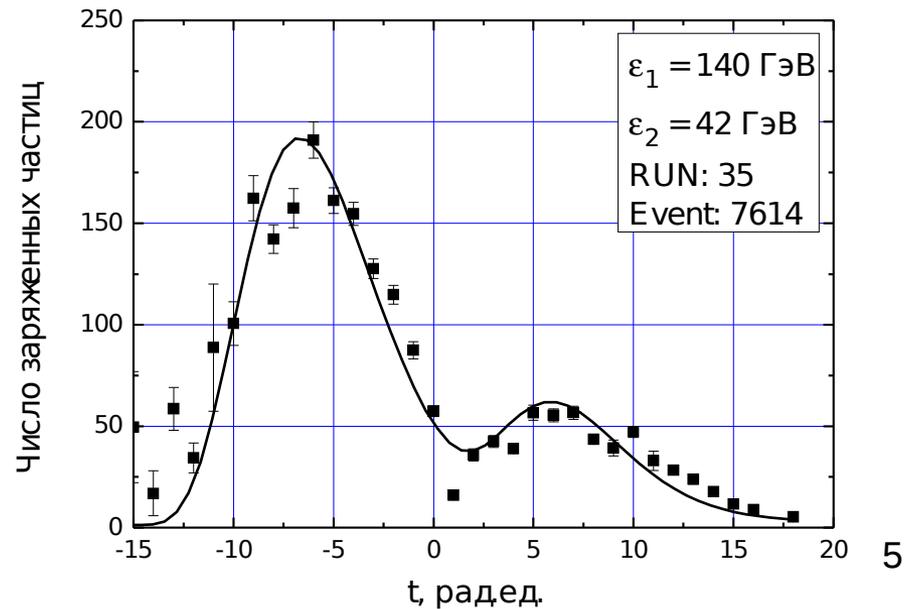
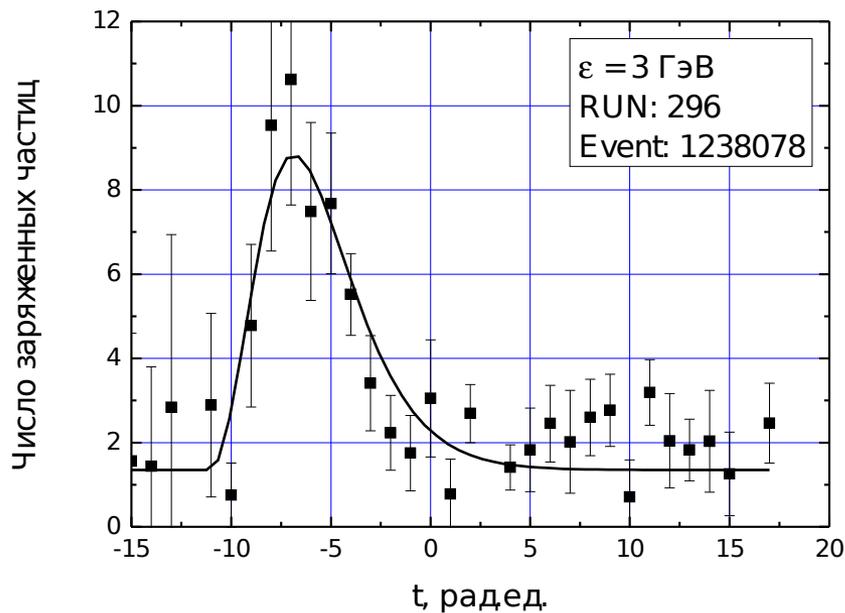
Треки определялись с помощью координатно-трекового детектора ДЕКОР

O. Saavedra et al., J. Phys. 409 (2013).

С.С. Хохлов и др., Изв. РАН, 77, 707-709(2013)

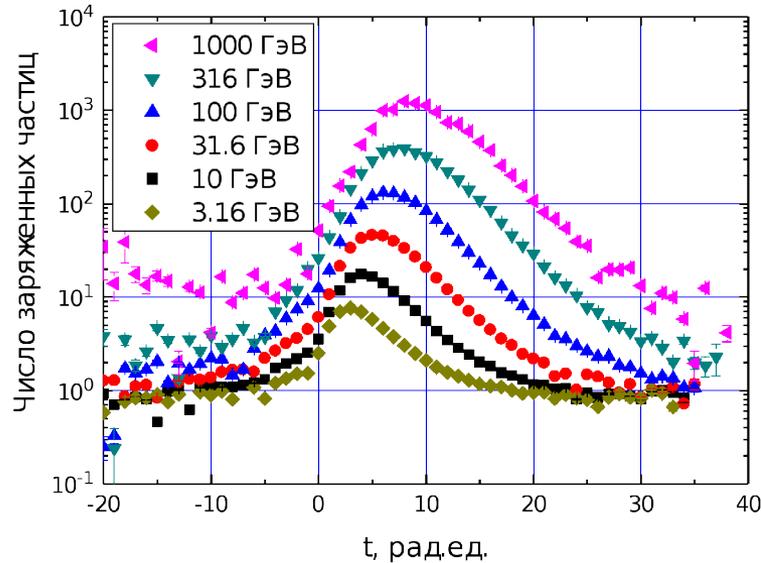


## Примеры восстановленных каскадных кривых:

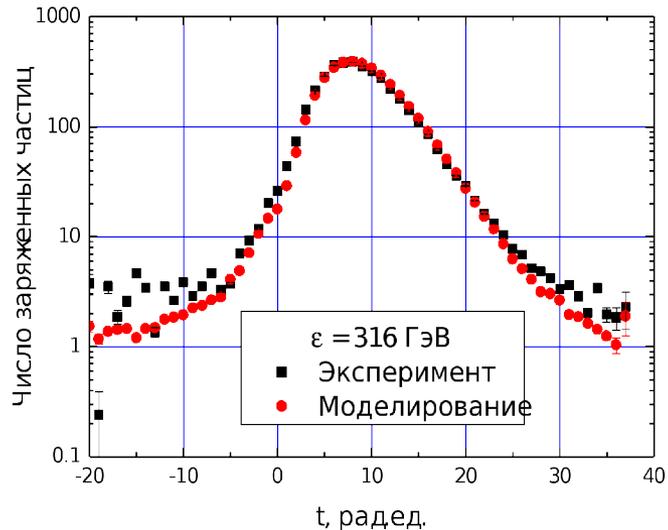


# Основные результаты исследования ливней с известной осью

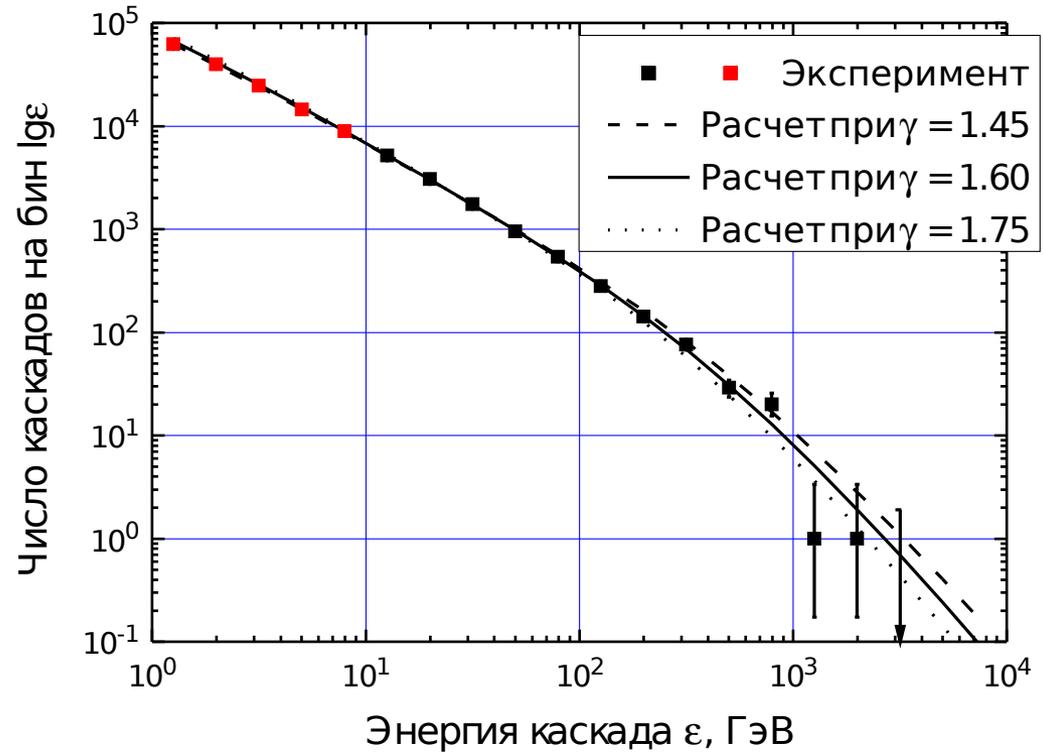
Средние экспериментальные каскадные кривые



Сравнение с моделированием



Энергетический спектр каскадных ливней



# Исследование ливней с неизвестной осью

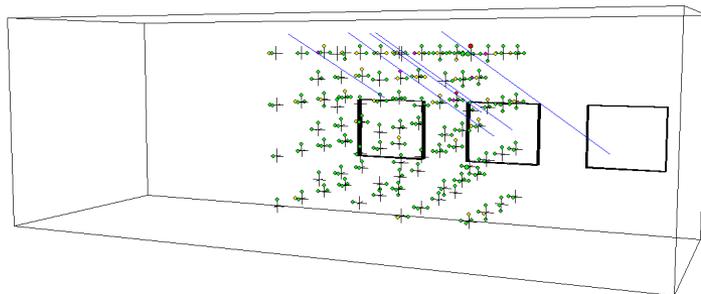
Цель – разработка методов оценки характеристик каскадов, рожденных мюонами, на основе только отклика ЧВД, без использования данных ДЕКОР.

Это позволит на порядок увеличить диапазоны зенитных и азимутальных углов изучаемых ливней. И, как следствие, объем статистики событий с каскадами.

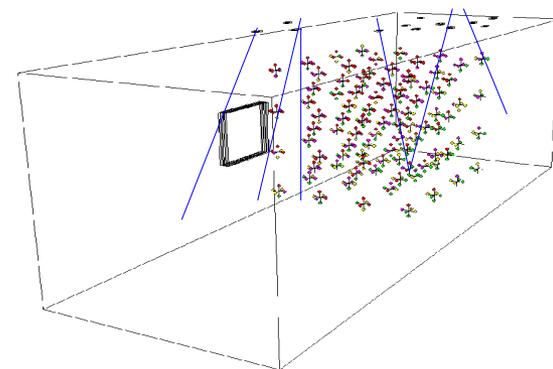
Исследовались события с большим энерговыделением: триггер « $\geq 60\text{с}$ » (около 80 млн. событий за период около 5900 часов живого времени).

Такие события включают:

- широкие атмосферные ливни;

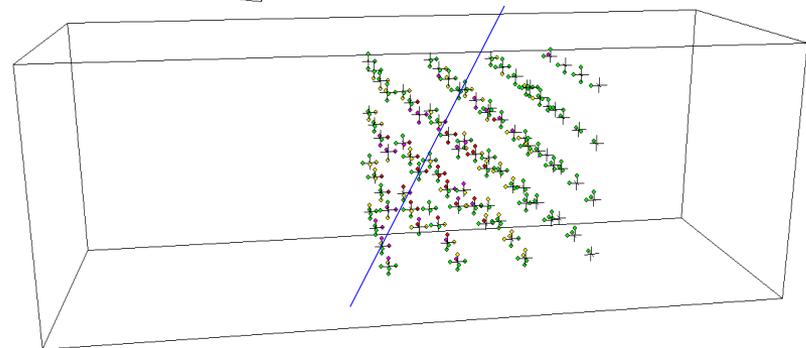


- группы мюонов;

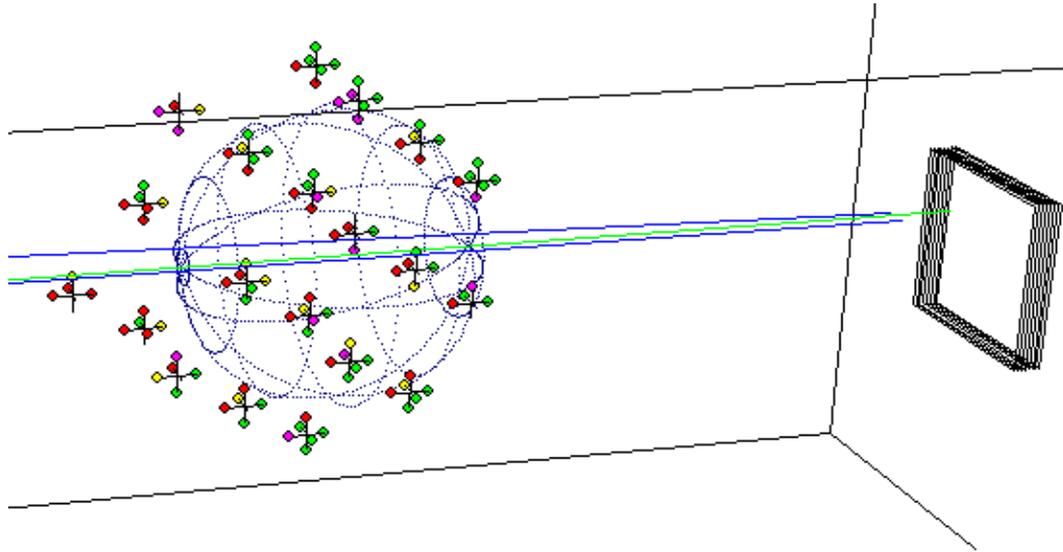


- каскады от мюонов или адронов.

Отбор и восстановление характеристик таких событий основаны на компактности расположения КСМ с наибольшими амплитудами. Методы отработывались на событиях с известной осью.



# Метод оценки положения оси каскада на основе данных ЧВД



Для оценки взяты данные 20-ти КСМ с наибольшими суммарными амплитудами ФЭУ.

Такие КСМ обычно располагаются компактно находятся вблизи оси ливня

Рассчитывался вектор направления «на свет»:

$$\mathbf{r}_i = \{ a_{i2} - a_{i4}; a_{i1} - a_{i3}; a_{i6} - a_{i5} \}, \text{ где } a_{ij} - \text{амплитуда } j\text{-го ФЭУ } i\text{-го КСМ.}$$

Результирующий вектор направления «по свету»:  $\mathbf{r}_a = -\sum_{i=k}^N \mathbf{r}_i$

Ось проводилась через центр тяжести выбранных КСМ, рассчитанный с учетом амплитуд ФЭУ как весов

# Анализ точности оценки положения оси каскада

Были рассмотрены варианты с отбрасыванием (из исходных 20-ти) КСМ с наибольшей амплитудой, вносящих существенную погрешность

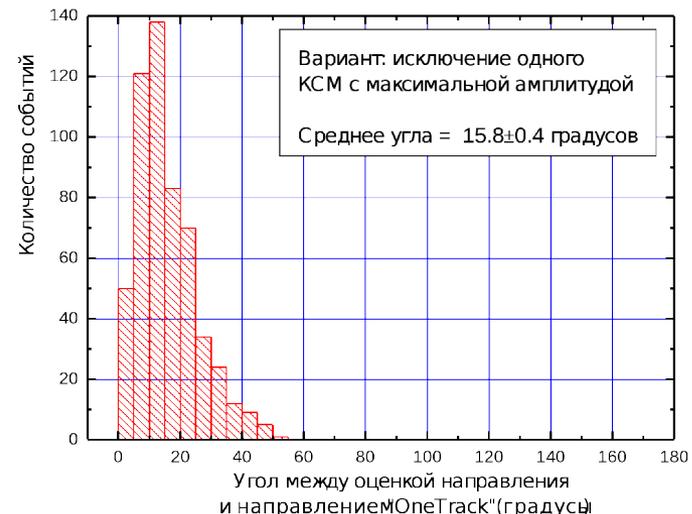
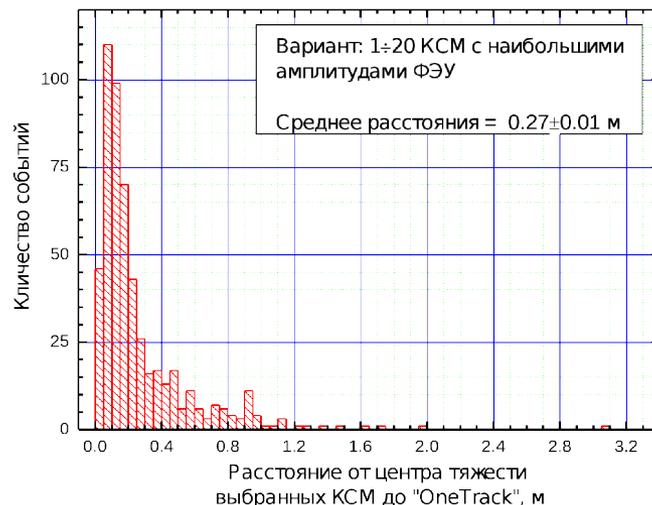
## Результаты:

количество исключенных КСМ в порядке убывания суммарной амплитуды всех ФЭУ

Средний угол между направлениями: оценочным и определенным с помощью данных ДЕКОР, градусы

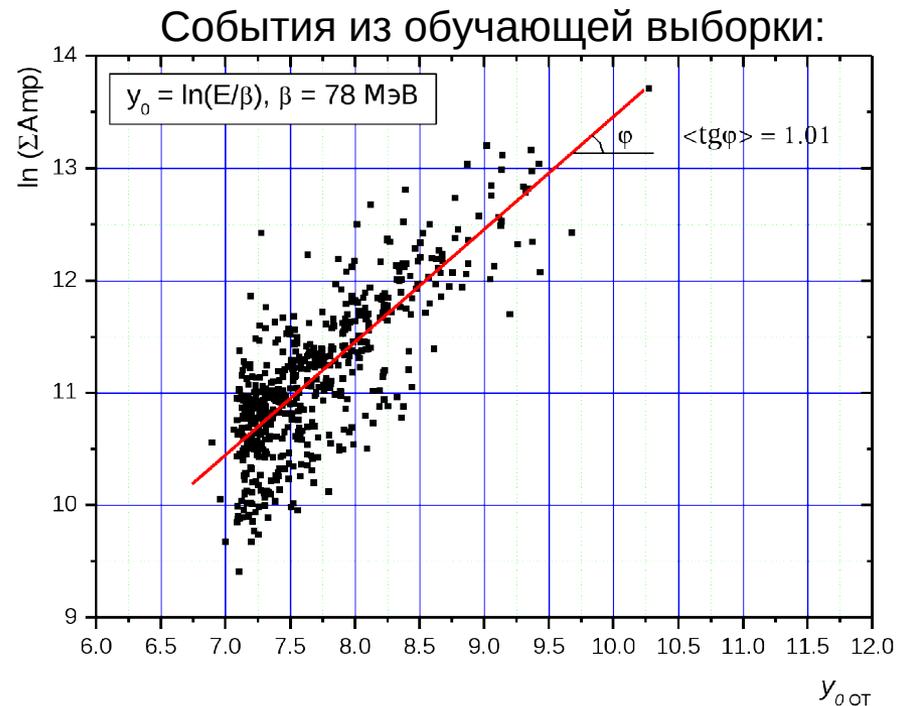
Расстояние от центра масс выбранных КСМ до ОТ, метры

	0	1	2	3	4
Средний угол между направлениями: оценочным и определенным с помощью данных ДЕКОР, градусы	19.2 ± 0.6	15.8 ± 0.4	15.6 ± 0.4	16.1 ± 0.4	17.6 ± 0.5
Расстояние от центра масс выбранных КСМ до ОТ, метры	0.27 ±0.01	0.38 ±0.02	0.45 ±0.02	0.49 ±0.02	0.53 ±0.02

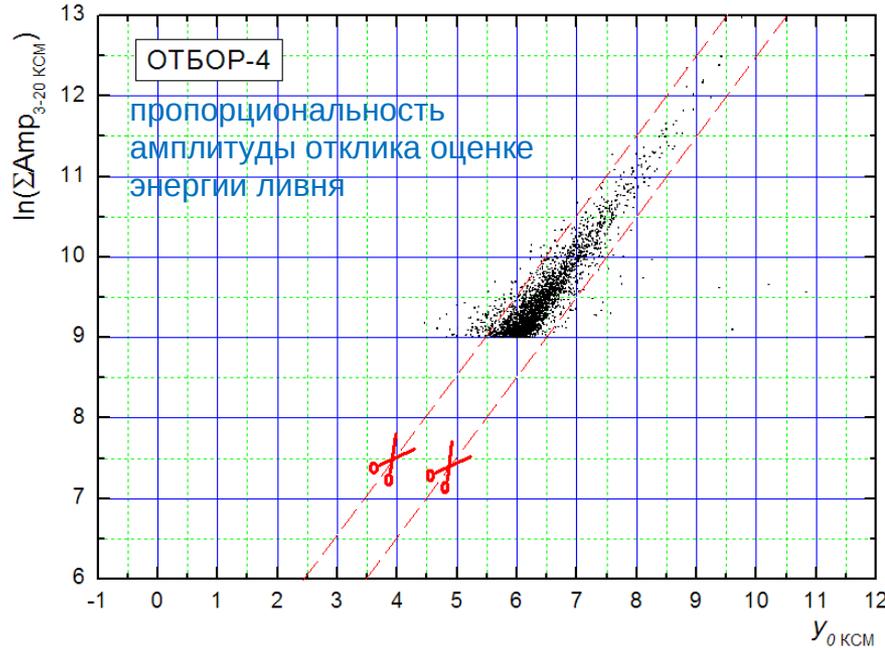
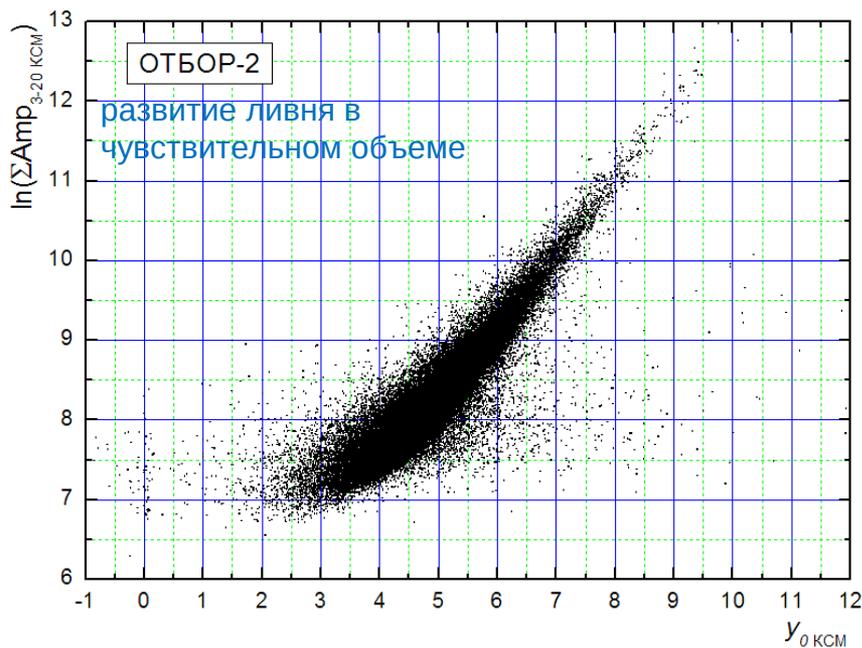
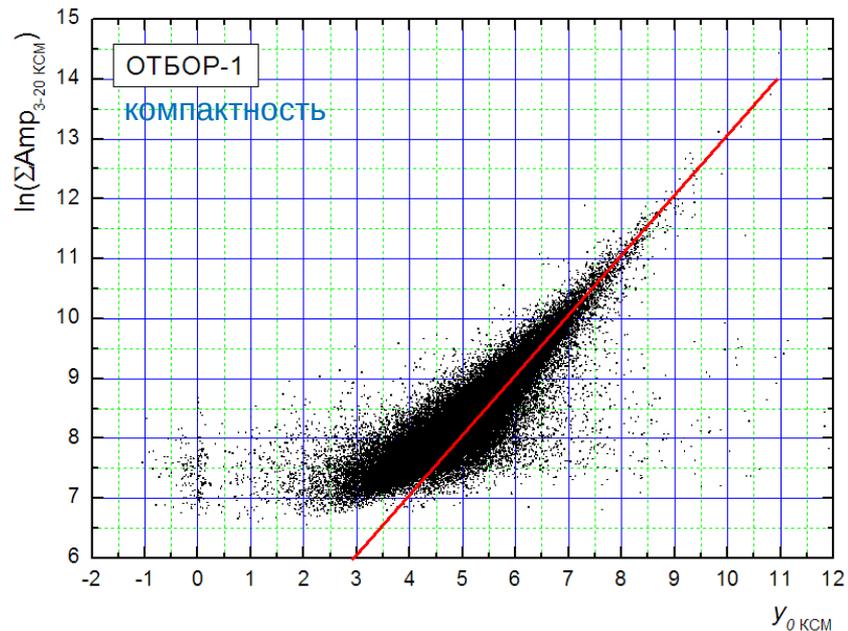
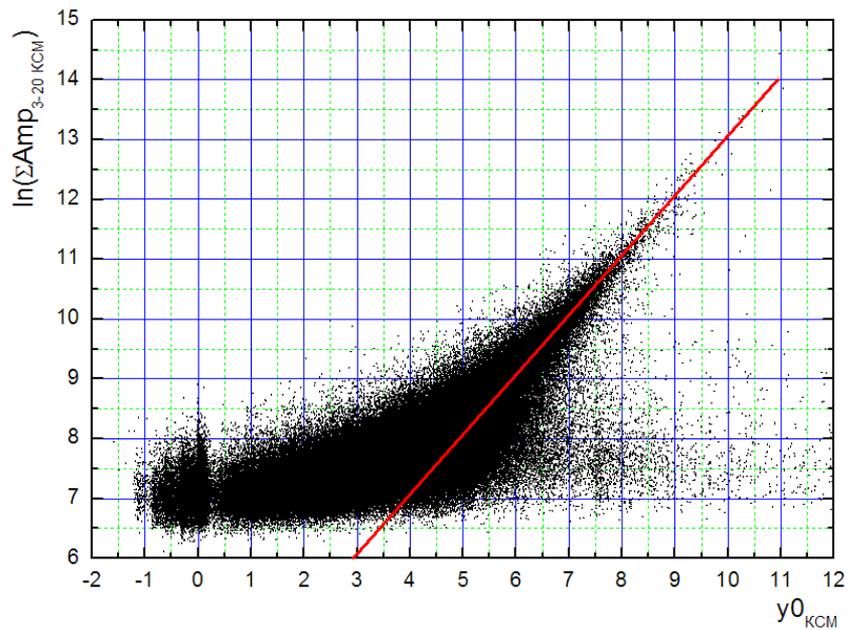


# Критерии отбора событий с каскадами

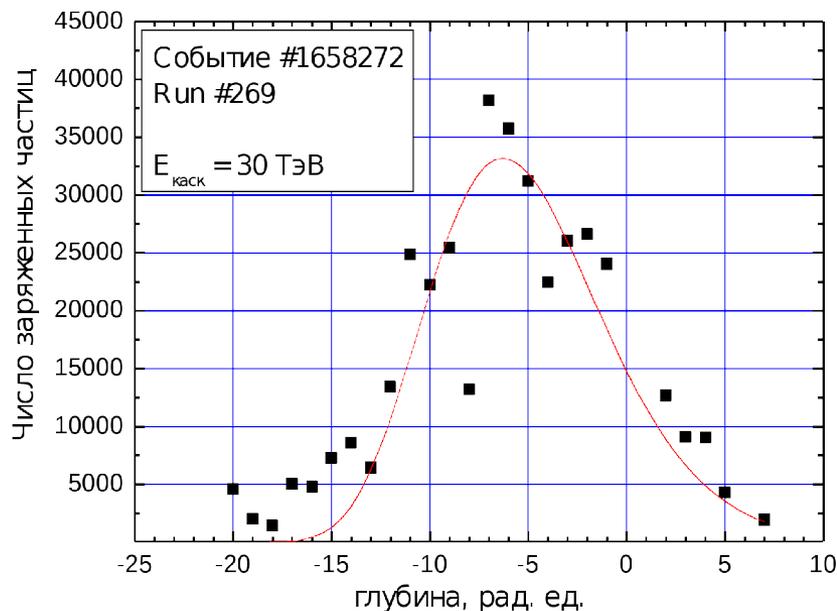
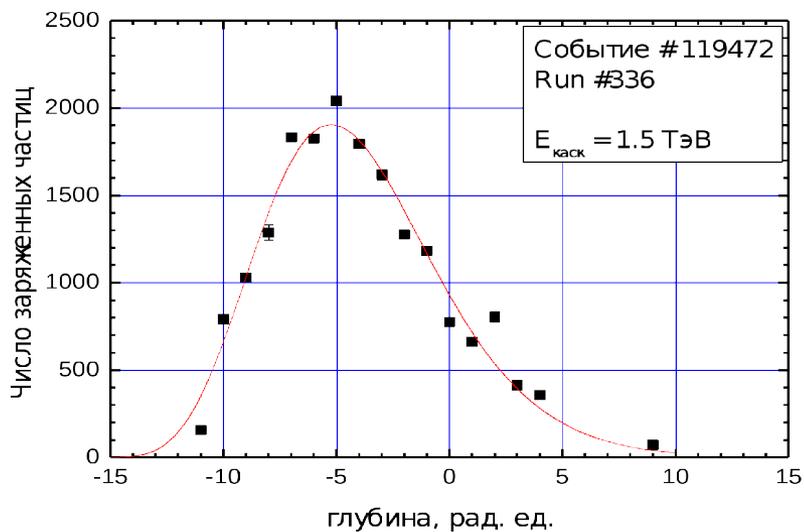
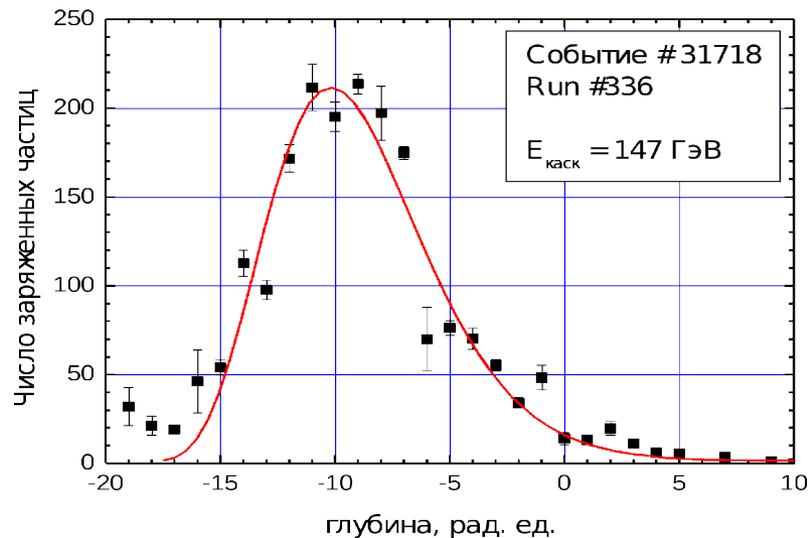
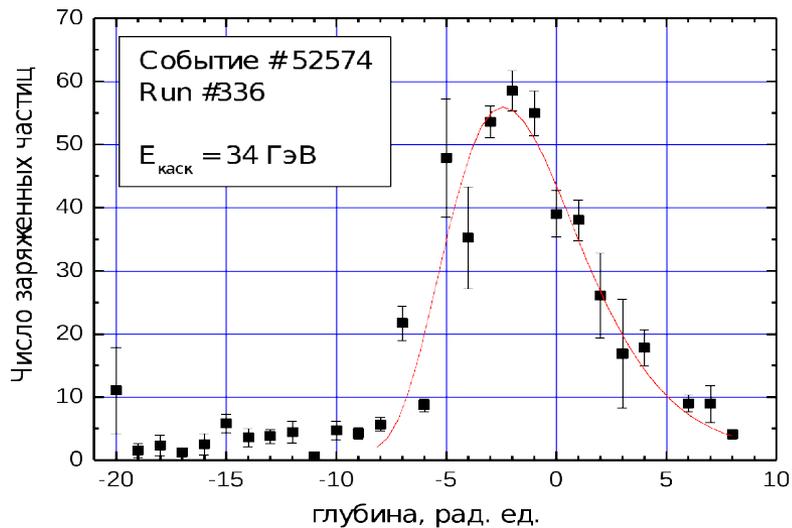
1. компактность расположения кластера КСМ, имеющих наибольшие суммарные отклики ФЭУ (среднеквадратичный радиус кластера  $< 2.35$  м);
2. развитие ливня в пределах чувствительного объема детектора: ограничение значений координат центра тяжести кластера КСМ с наибольшими амплитудами;
3. отбор каскадов, рожденных преимущественно мюонами, в интервале Зенитных углов  $50^\circ < \theta < 90^\circ$ ;
4. пропорциональность суммарной амплитуды восстановленной оценке энергии каскада



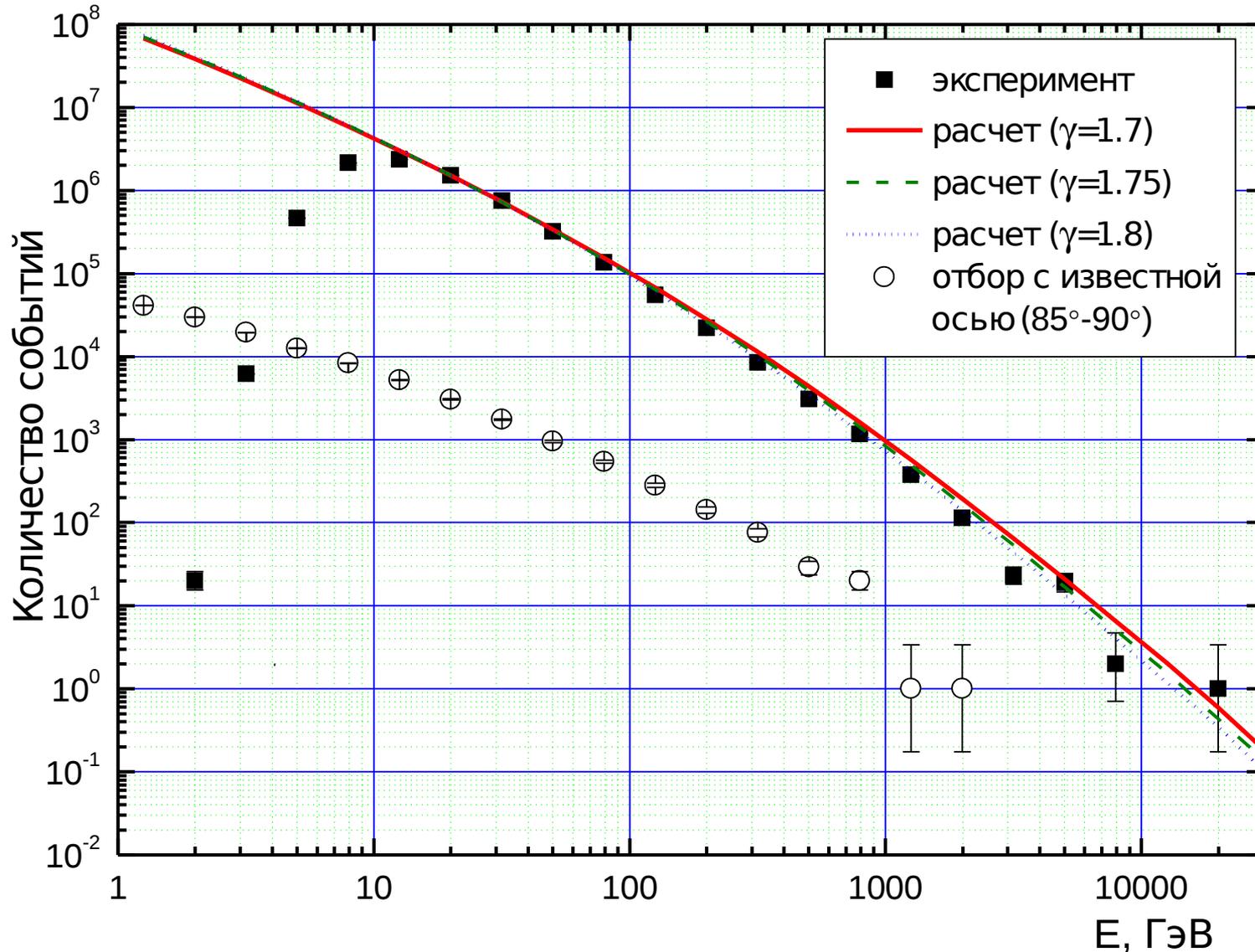
# Отбор каскадов



# Примеры событий с каскадами разных энергий



# Предварительный результат: дифференциальный спектр каскадов с энергиями до 30 ТэВ



# Заключение

- разработаны критерии и на их основе отобраны события, связанные с образованием мюонами каскадов высокой энергии в рабочей области детектора
- восстановлены параметры каскадов с неизвестной осью - на основе только амплитуд откликов ФЭУ ЧВД;
- на два порядка увеличена статистика событий с каскадами по сравнению с результатами восстановления ливней с известной осью;
- получены экспериментальные каскадные кривые для ливней, рожденных в ЧВД мюонами в широком интервале зенитных углов и диапазоне энергий каскадов от 30 ГэВ до 30 ТэВ;
- в диапазоне энергий от 30 ГэВ до 30 ТэВ измерен дифференциальный спектр каскадных ливней, рожденных мюонами с зенитными углами от  $50^\circ$  до горизонта.

**Спасибо за внимание!**



# Приложения

# Восстановление каскадной кривой

**Модель каскада:** каскад рассматривался в одномерном приближении.

Формула расчета количества каскадных частиц от глубины и энергии (аппроксимация Грейзена, приближение Б):

$$N^{\text{амп}}(y_0, t_0, t) = \begin{cases} 1.35 & \text{если } t < t_0 \\ \left( \frac{0.32}{\sqrt{y_0}} \right)^{\frac{1}{j}} \times \exp((t - t_0) \times (1 - 1.5 \ln s)) + 1.35 & \text{если } t > t_0 \end{cases}$$

Отклик на одиночную заряженную частицу:

$$A_1(R, \alpha) = \frac{C \times \cos \alpha}{R + r_{\text{ФЭУ}}} \left( (1 - F) \times \exp\left(-\frac{R}{L_{\text{short}}}\right) + F \times \exp\left(-\frac{R}{L_{\text{long}}}\right) \right)$$

Число частиц по отклику  $j$ -го ФЭУ:

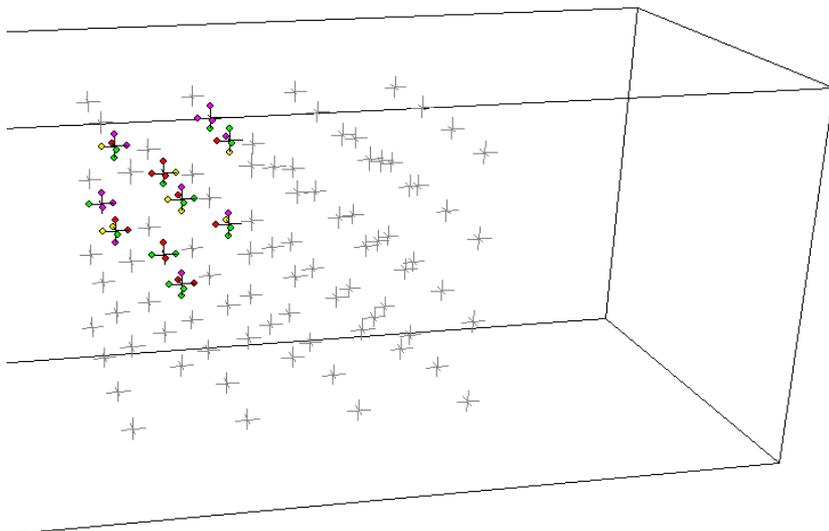
$$N_{ij} = \frac{A_{\text{ФЭУ}}^j}{A_1(R_j, \alpha_j)}$$

Число частиц в  $i$ -ом бине:

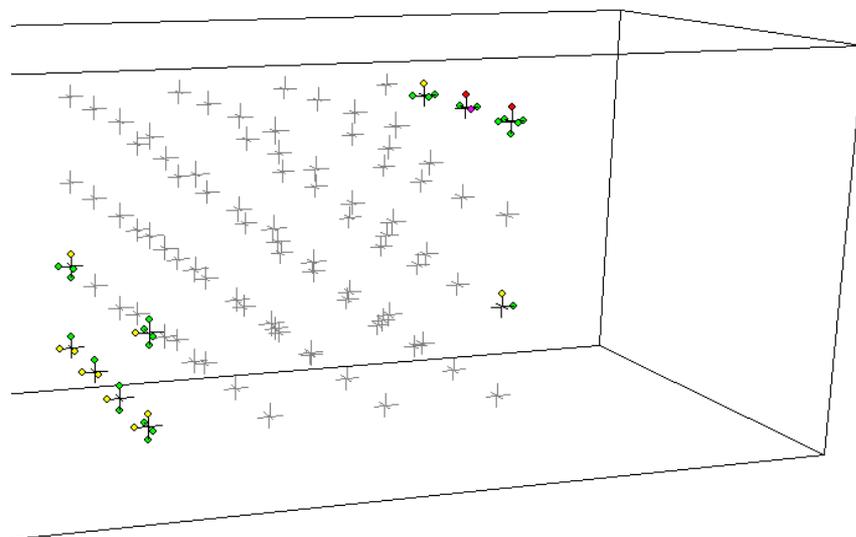
$$N_i^{\text{ЭКСП}} = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{N_{ij}}{\sigma^2(N_{ij})}}{\sum_{j=0}^n \frac{1}{\sigma^2(N_{ij})}} = \frac{\sum_{j=0}^n A_{\text{ФЭУ}}^j}{\sum_{j=0}^n A_1(R_j, \alpha_j)}$$

# Принципы выделения каскадных ливней в событиях от триггера « $\geq 60c$ » (1)

Принцип 1: компактность расположения кластера КСМ, имеющих наибольшие суммарные отклики ФЭУ



показаны 10 КСМ с наиб. ампл.  
из сработавших 91



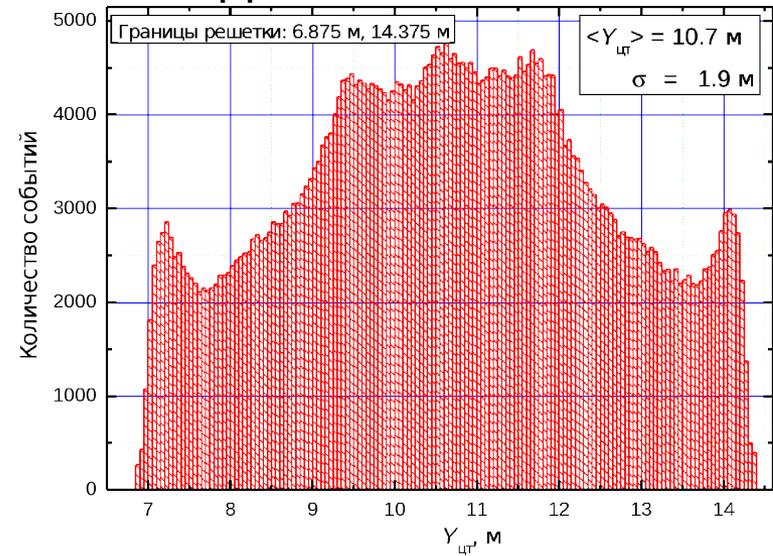
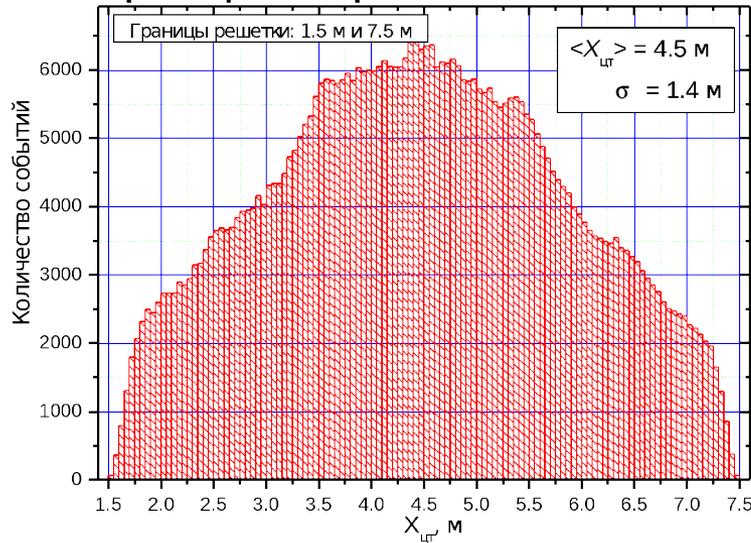
показаны 10 КСМ с наиб. ампл.  
из сработавших 83

Показатель для оценки степени компактности группы КСМ:

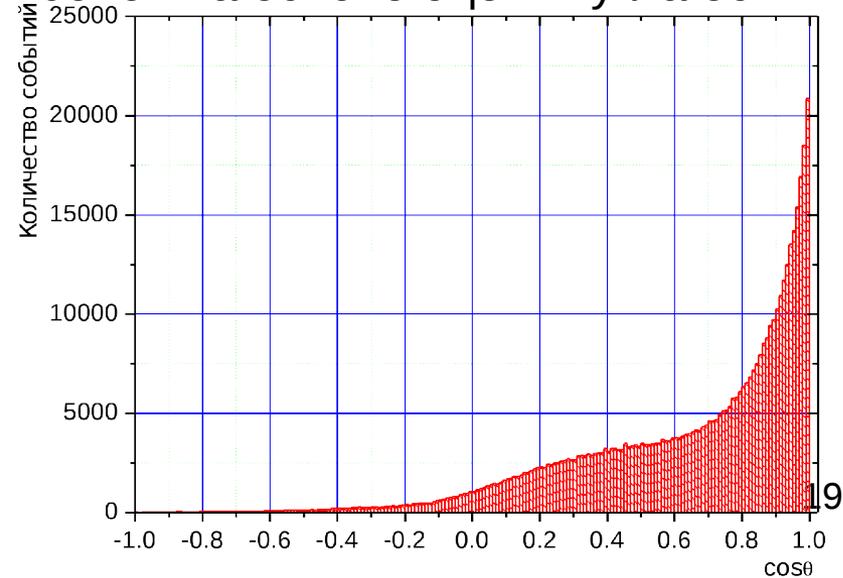
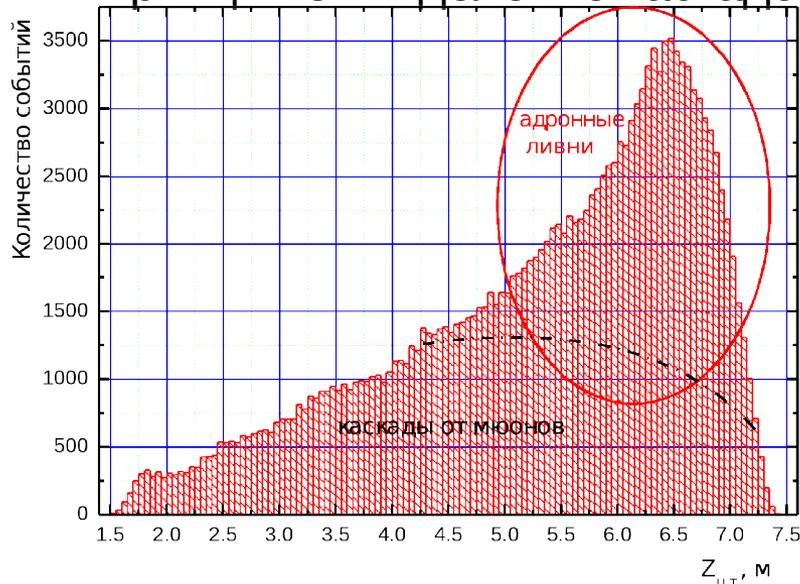
$$R_{\text{кл}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \text{Amp}_i ((X_{\text{КСМ}i} - X_{\text{ЦТ}})^2 + (Y_{\text{КСМ}i} - Y_{\text{ЦТ}})^2 + (Z_{\text{КСМ}i} - Z_{\text{ЦТ}})^2)}{\sum_{i=1}^N \text{Amp}_i}}$$

# Принципы выделения каскадных ливней в событиях от триггера « $\geq 60\text{с}$ » (2,3)

## Принцип 2: развитие ливня внутри решетки ЧВД

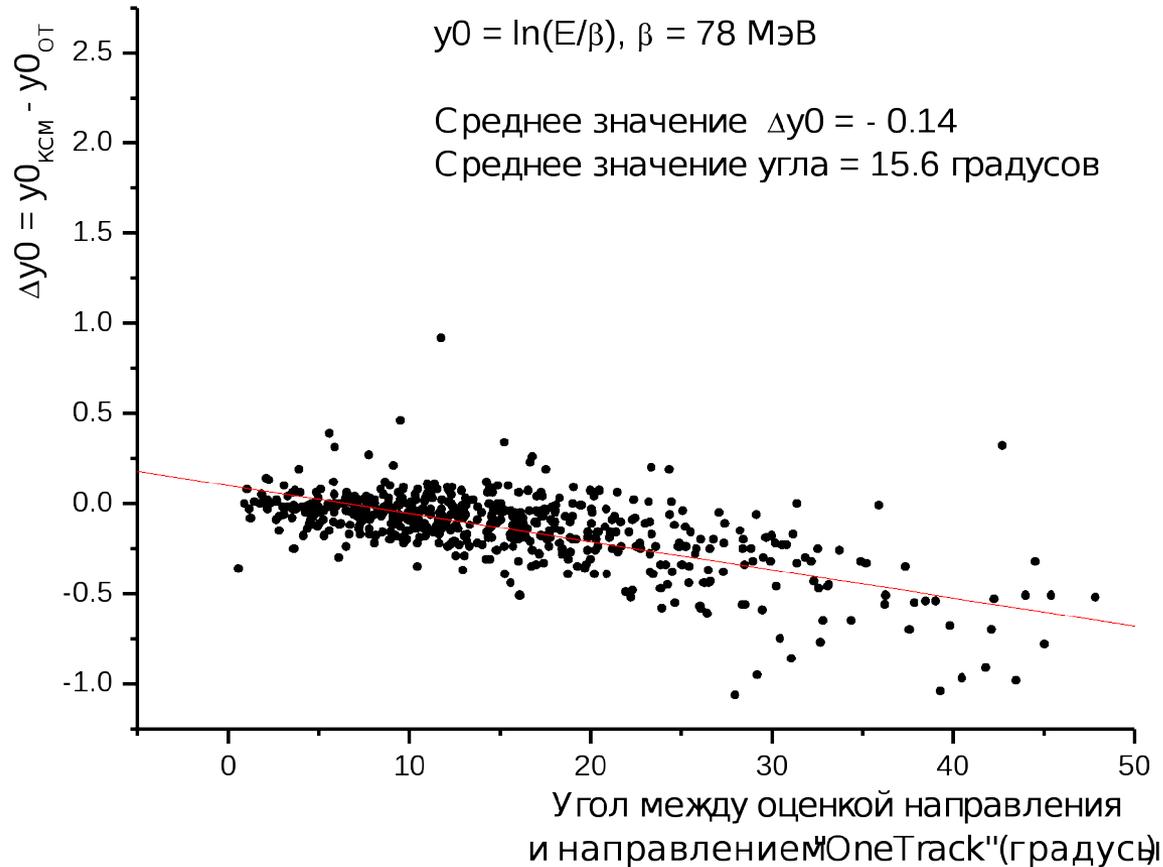


## Принцип 3: выделение каскадов от мюонов на основе оценки угла оси



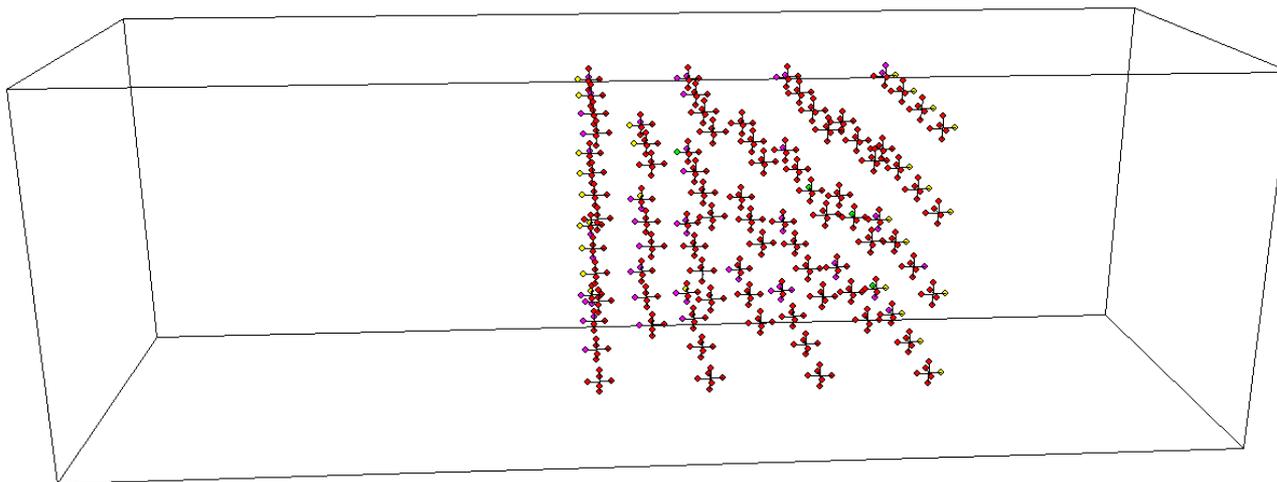
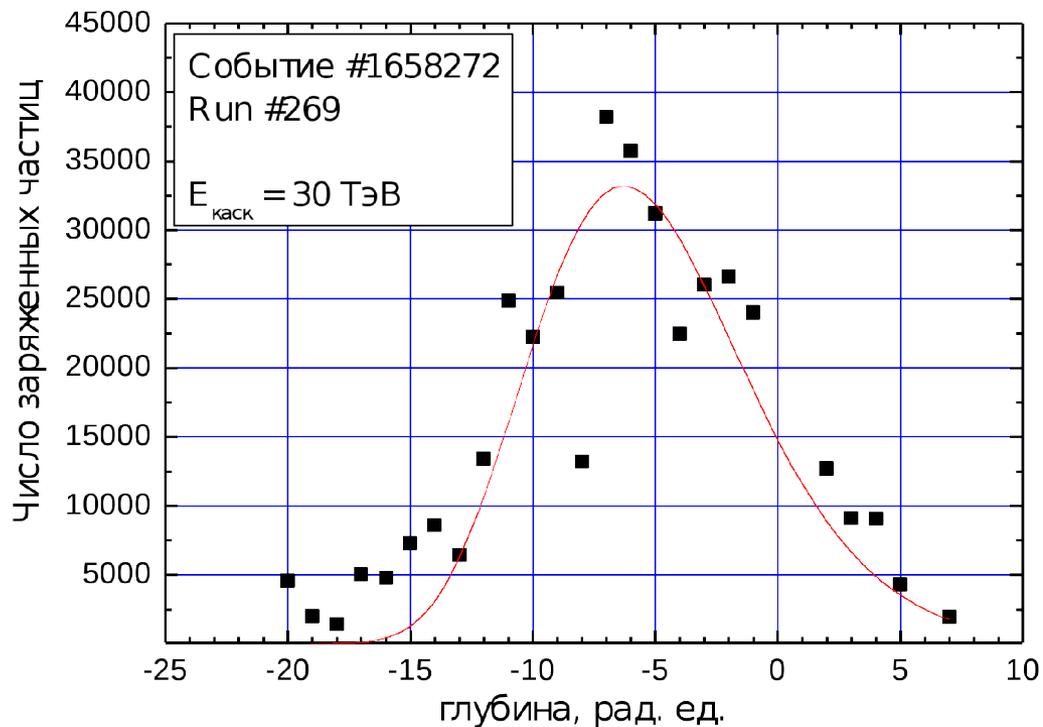
# Анализ точности восстановления параметров каскада

Восстанавливалась энергия каскадов обучающей выборки по «стандартной» методике с подстановкой вместо параметров известной оси каскада оценки положения оси



При использовании оценки оси восстановленная энергия в среднем занижена

# Каскад с восстановленной энергией около 30 ТэВ



# Результаты: средняя каскадная кривая для энергии 4 ТэВ

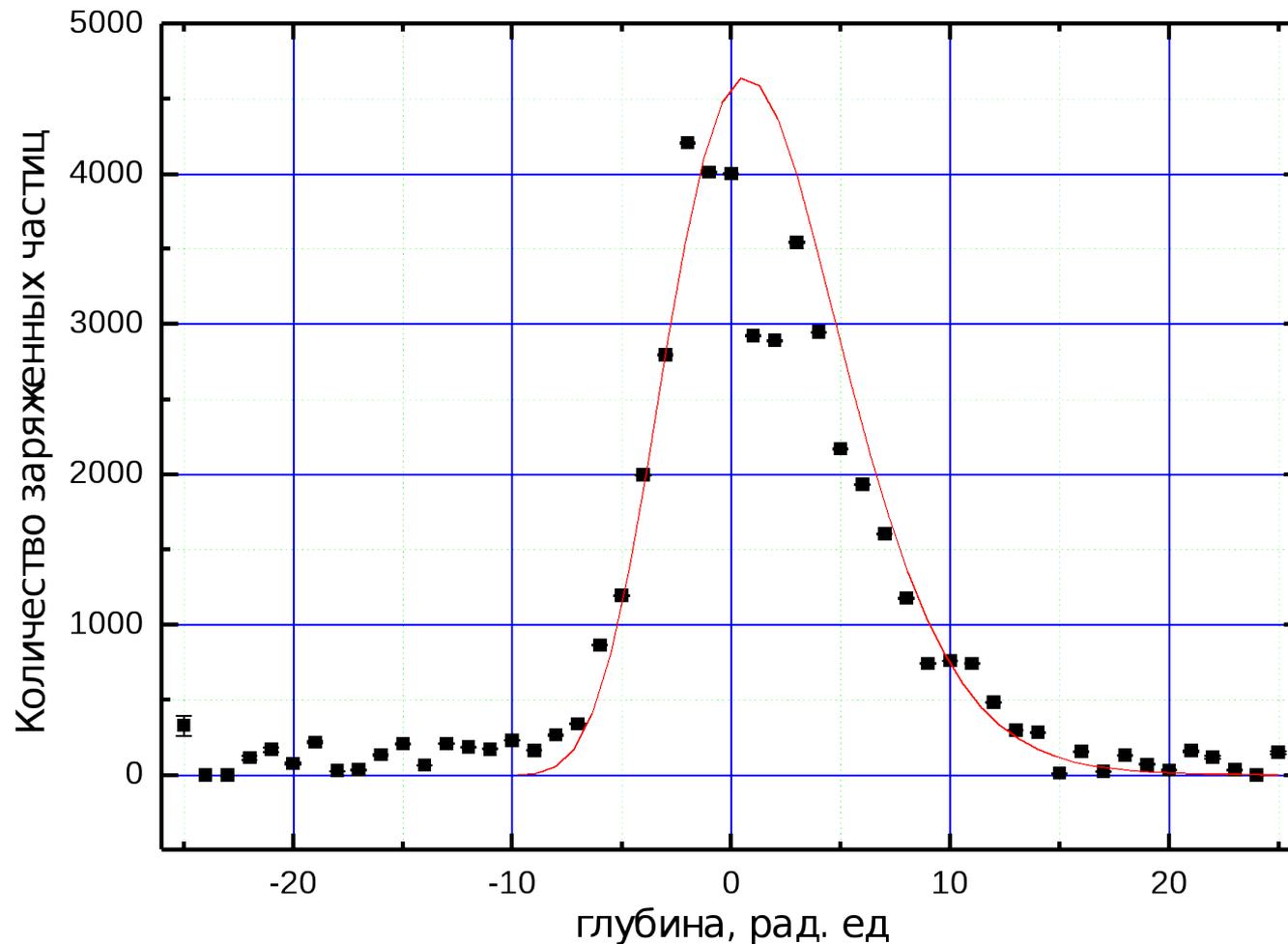
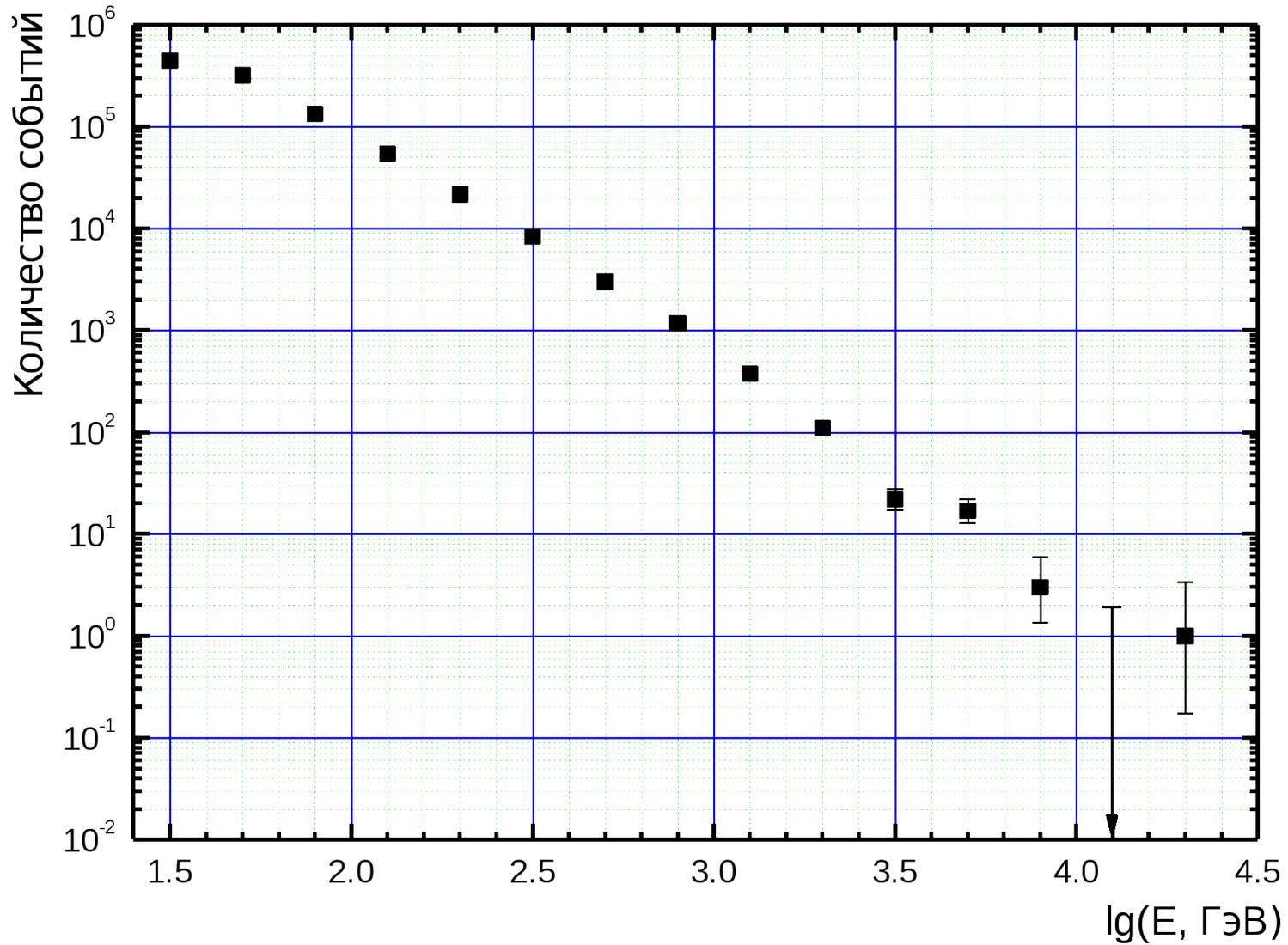


График построен на основе восстановленных каскадных кривых с энергией от 2.5 ТэВ: таких событий оказалось 45 шт.

# Дифференциальный спектр каскадов с восстановленными энергиями от 30 ГэВ до 30 ТэВ



# Распределения значений $\eta$ для последовательности отборов

