

# Регистрация гамма-квантов от Крабовидной туманности телескопами TAIGA-IACT в стерео- режиме по данным 2020-2023 гг.

*Павел Волчугов*

*От коллаборации TAIGA*

17.02.2025

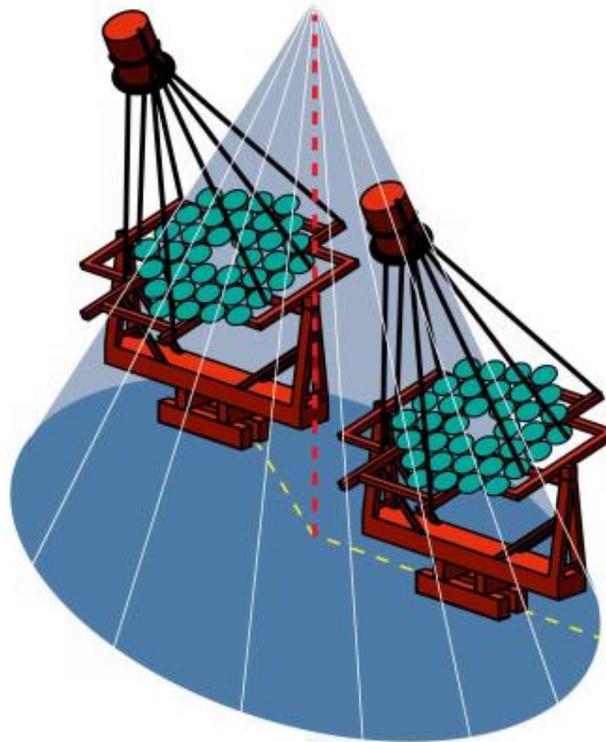
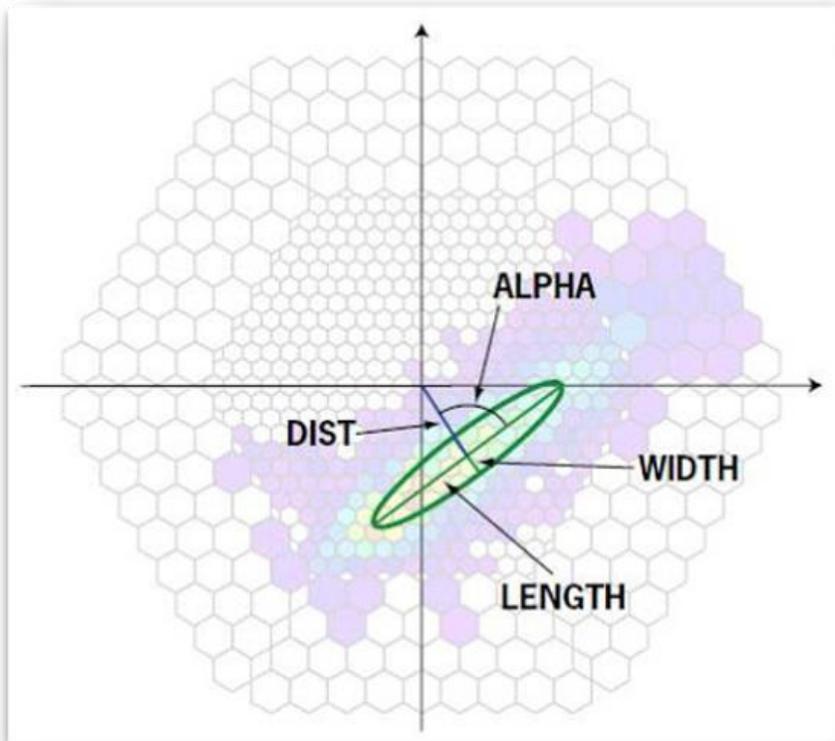
# TAIGA - Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy

## Характеристики TAIGA-IACT

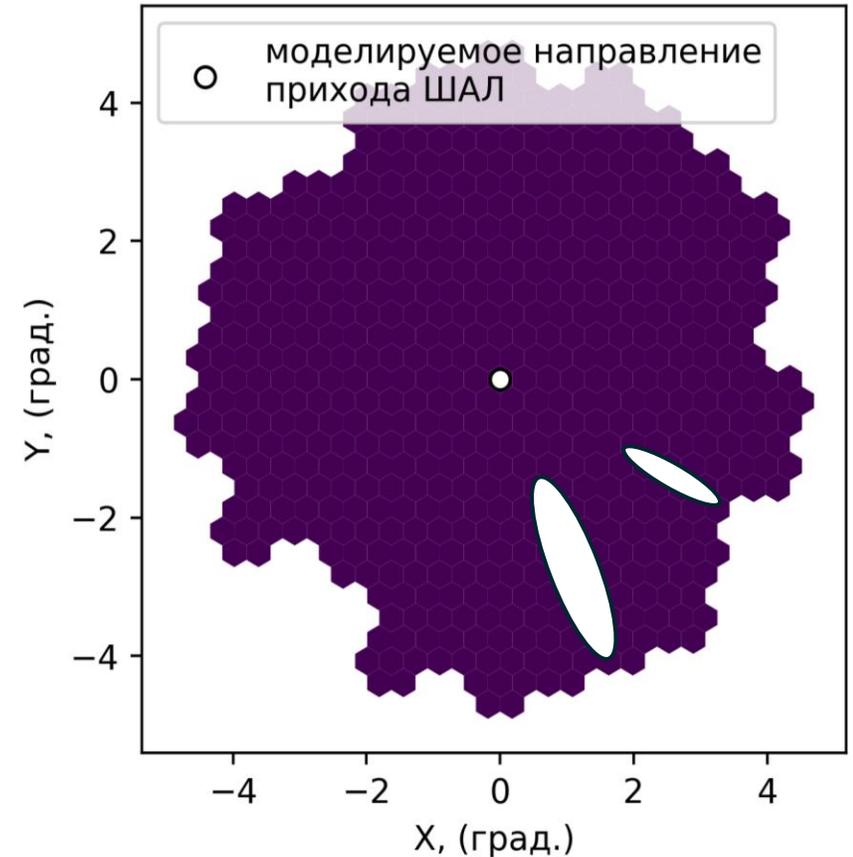
- Диаметр отражателя - 4.3 м;
- Широкий по сравнению с другими IACT угол обзора -  $9.6^\circ$ ;
- Размер одного пикселя -  $0.36^\circ$ ; Генерация триггера происходит при превышении амплитуды 10 ф.э. двумя соседними ФЭУ одного кластера.



# Стереонаблюдения



Энергетический порог -  
8 ТэВ

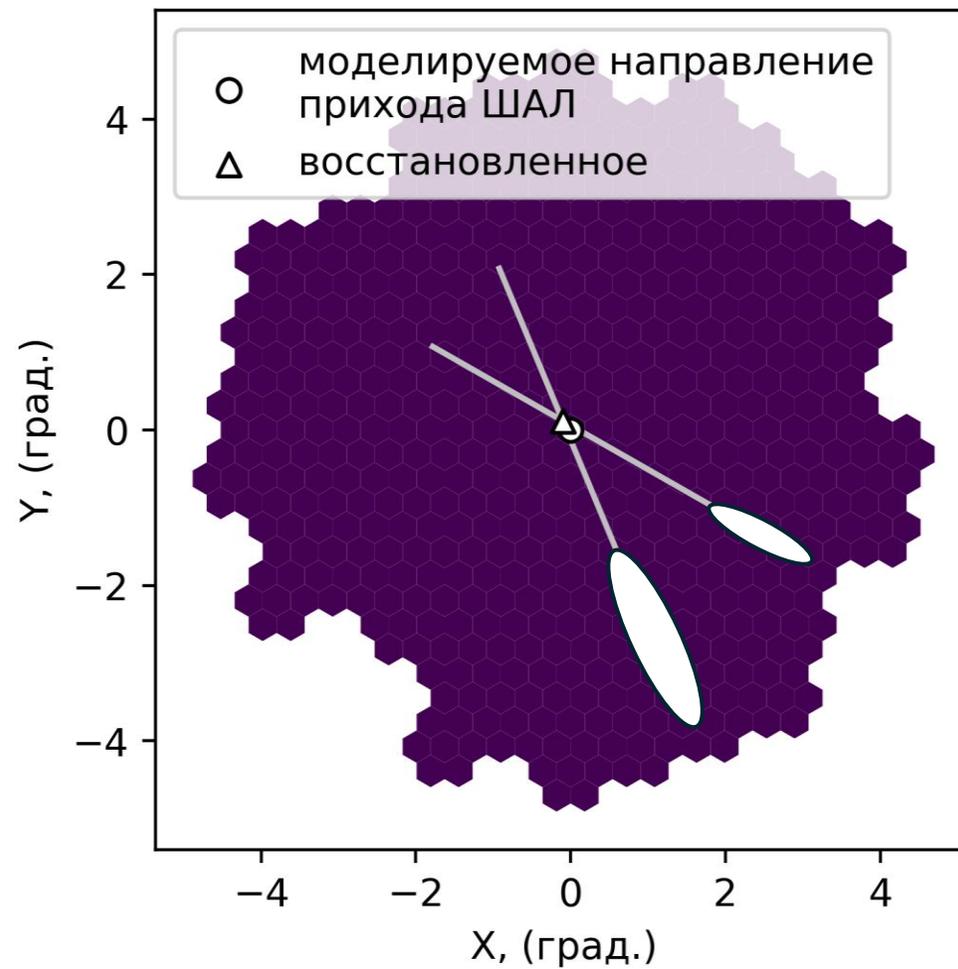
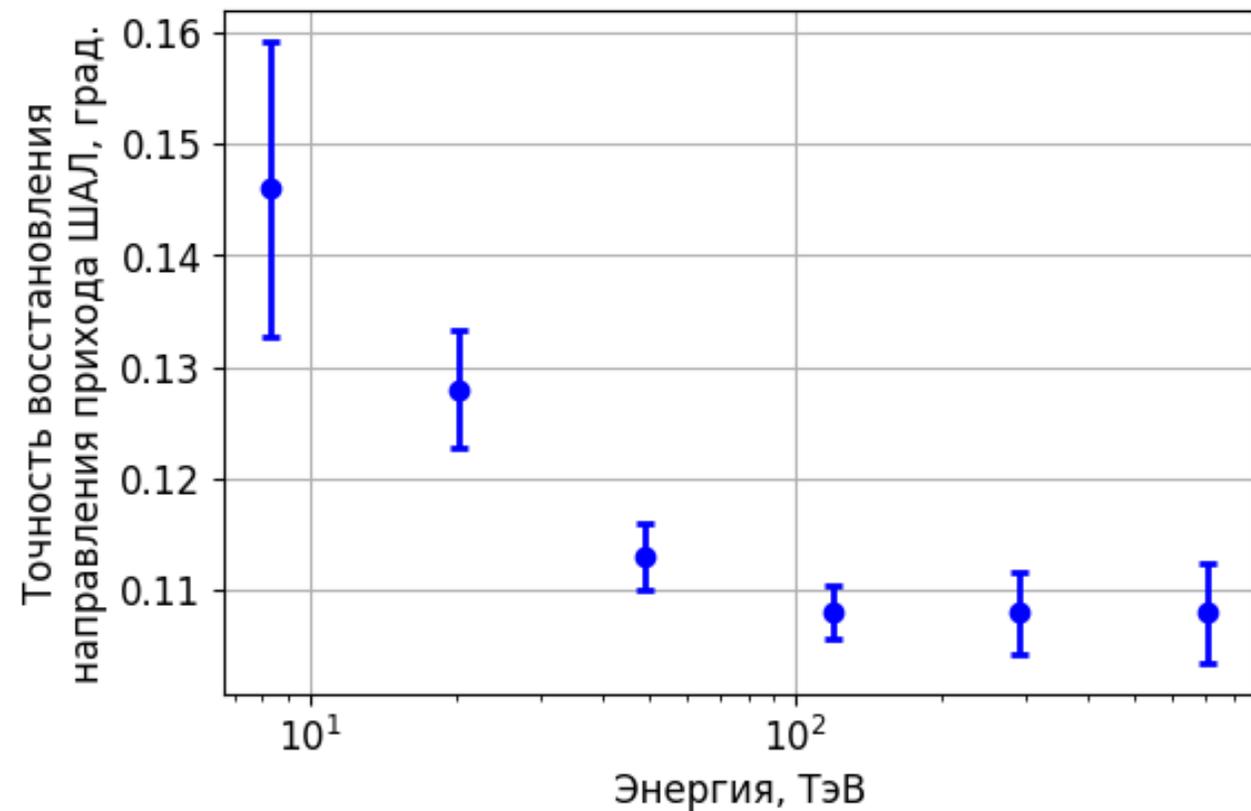


Анализ изображений ШАЛ в общем поле зрения телескопов позволяет восстанавливать направление прихода ливня

Каждый телескоп формирует параметризуемое изображение. На основе этих изображений проводится дальнейший анализ.

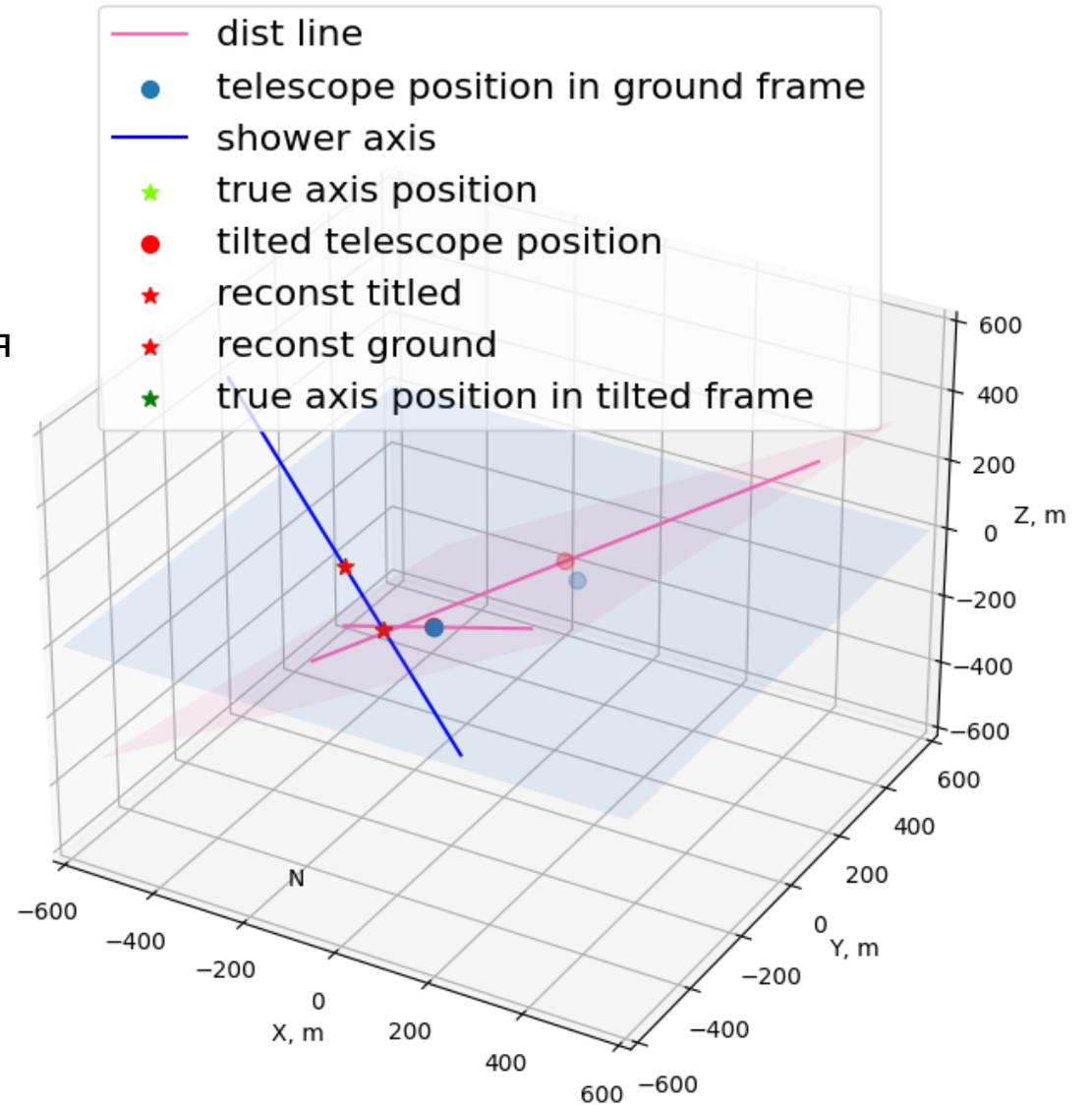
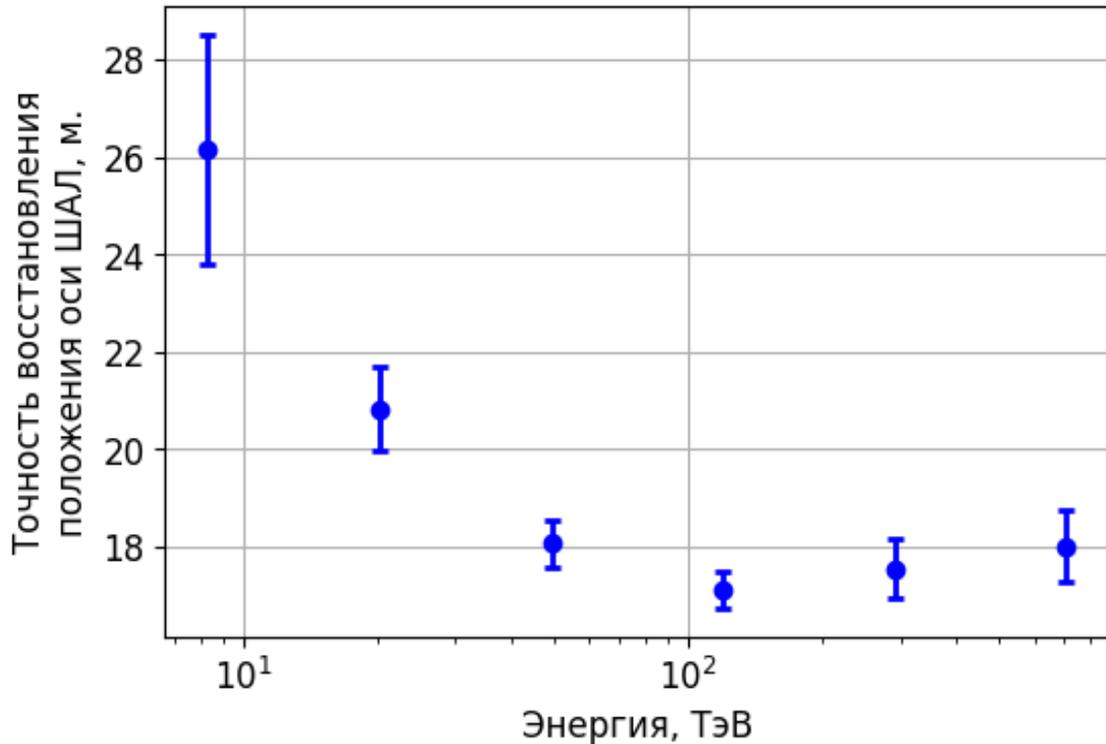
# Восстановление направления прихода ШАЛ

Положение источника в поле зрения телескопов определяется как точка пересечения главных осей изображений в каждом сработавшем телескопе



# Восстановление положения оси ШАЛ

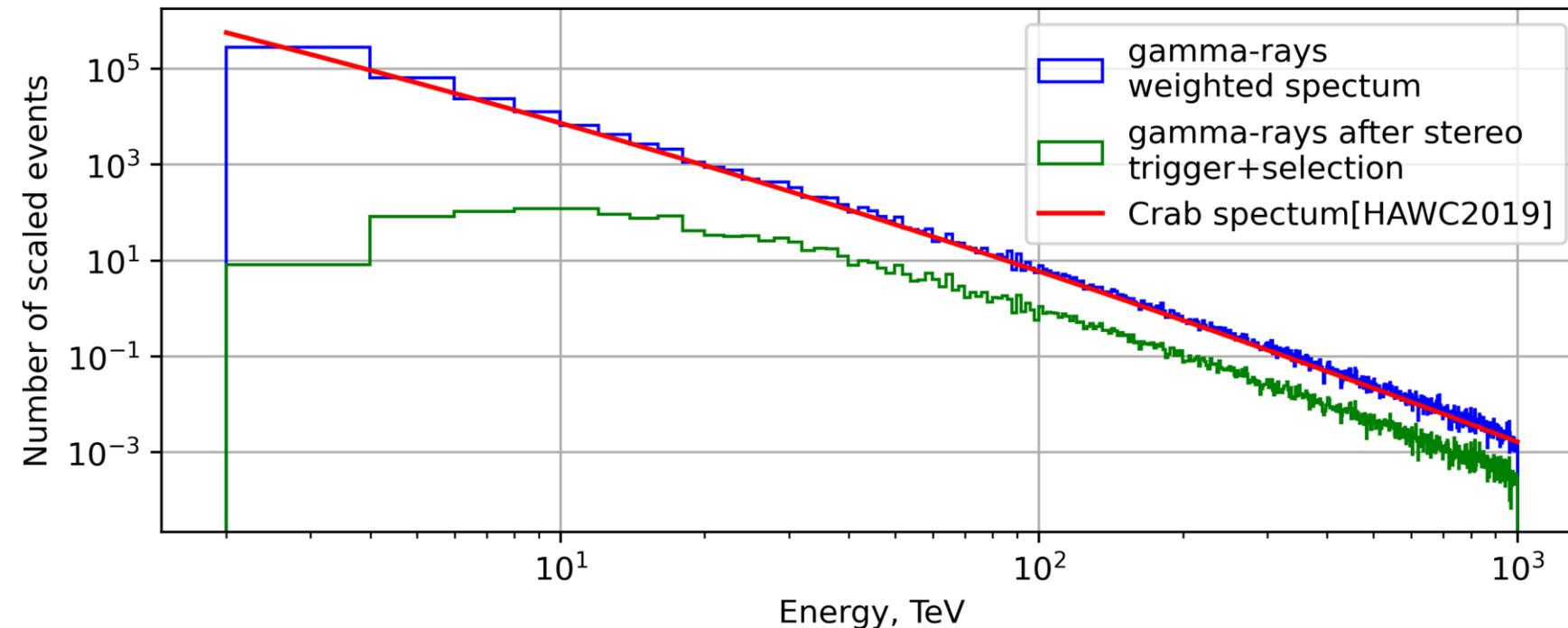
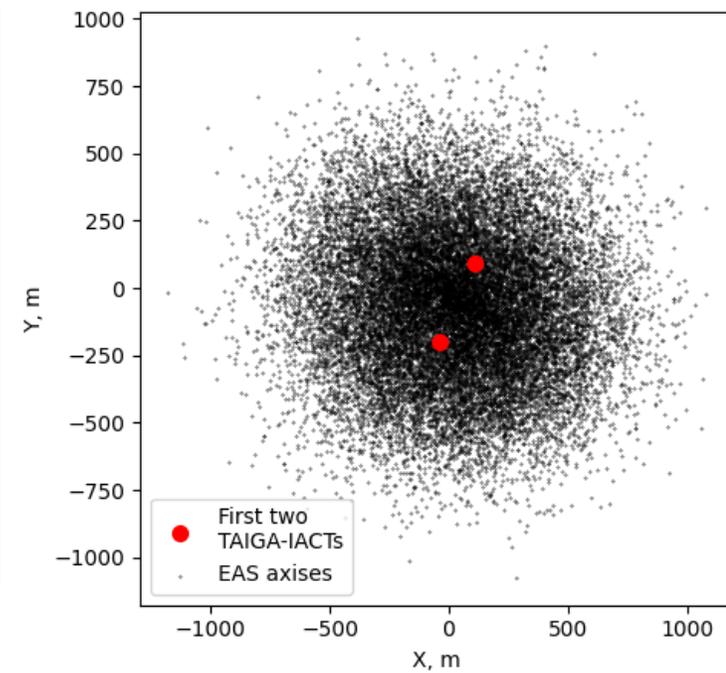
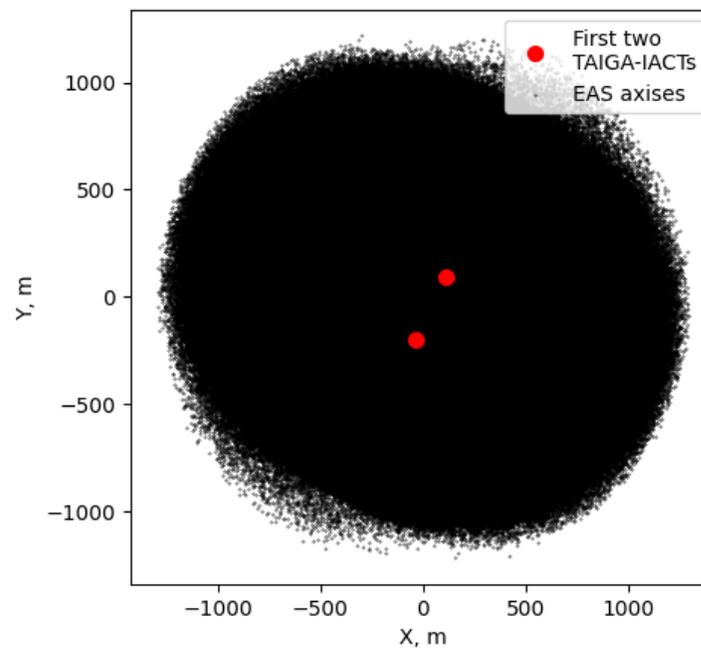
Положение оси ШАЛ определяется как точка пересечения главных осей имиджей сработавших телескопов в плоскости перпендикулярной направлению прихода ливня



# Моделирование гамма-квантов

Учитываются:

- Индивидуальные относительные чувствительности ФЭУ
- Интегральная квантовая чувствительность телескопов
- Тип конусов Винстона
- Количество и тип сегментов отражателя



Восстановление параметров первичной частицы проводится для событий, удовлетворяющих следующим условиям:

- Сработало два телескопа,
- Суммарное число фотоэлектронов в событиях (сайз)  $> 120$  фэ
- Центр тяжести изображения лежит в пределах  $3.5$  градусов от центра камеры

# Восстановление энергии

12 параметров изображения (width, size, length, skewness, kurtosis, и т.д.) + восстановленное расстояние до оси ШАЛ

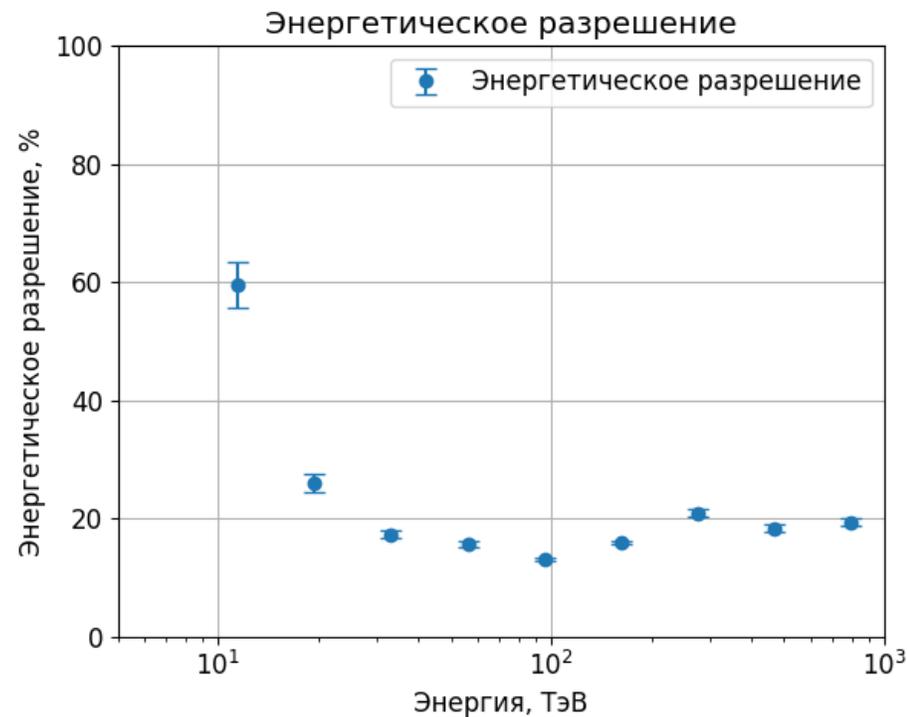
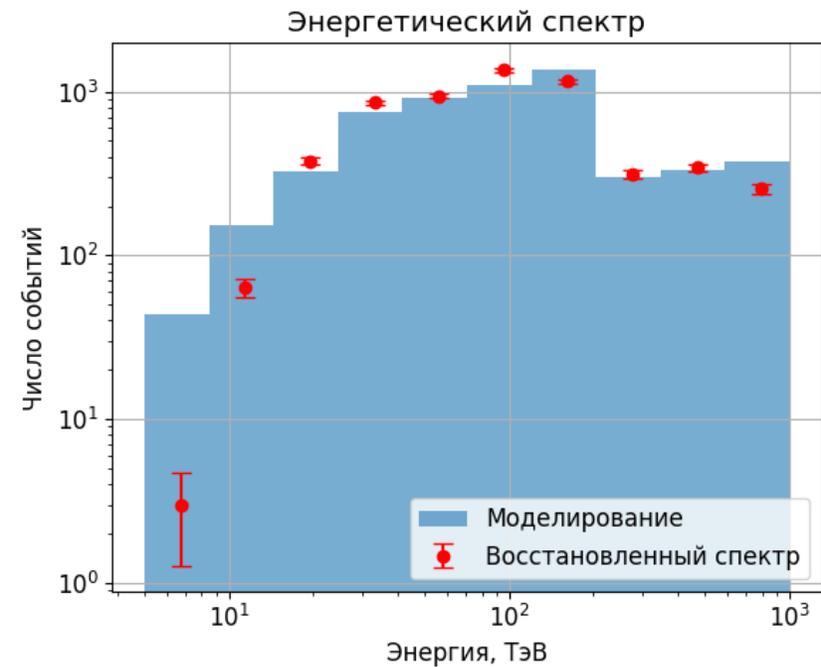
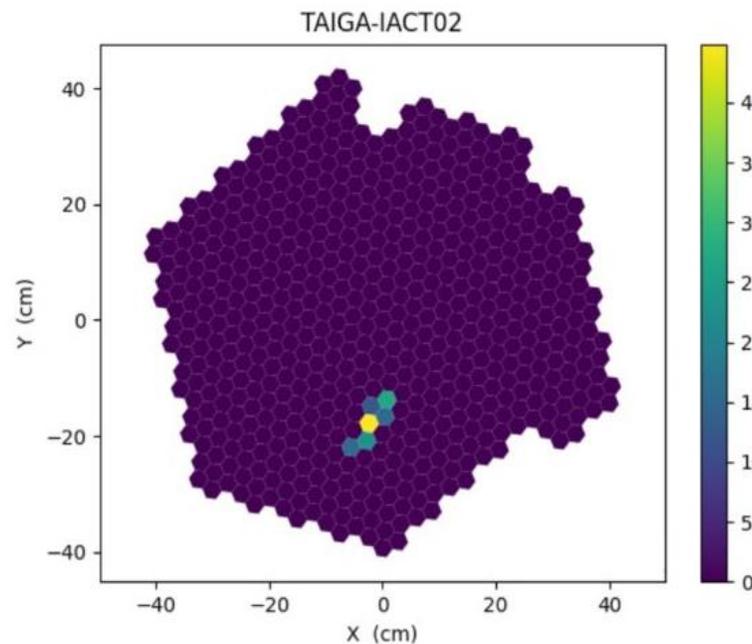
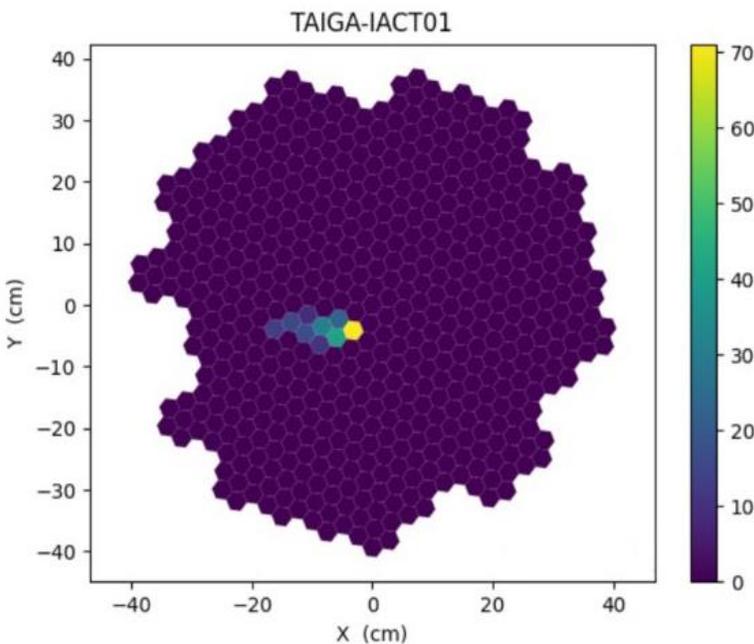
Для каждого IACT формируется своя модель восстановления энергии

Значение энергии стереособытия определяется как средневзвешенное (пропорционально size) для всех сработавших телескопов

Параметризация исходных изображений

Обучение LGBM регрессора

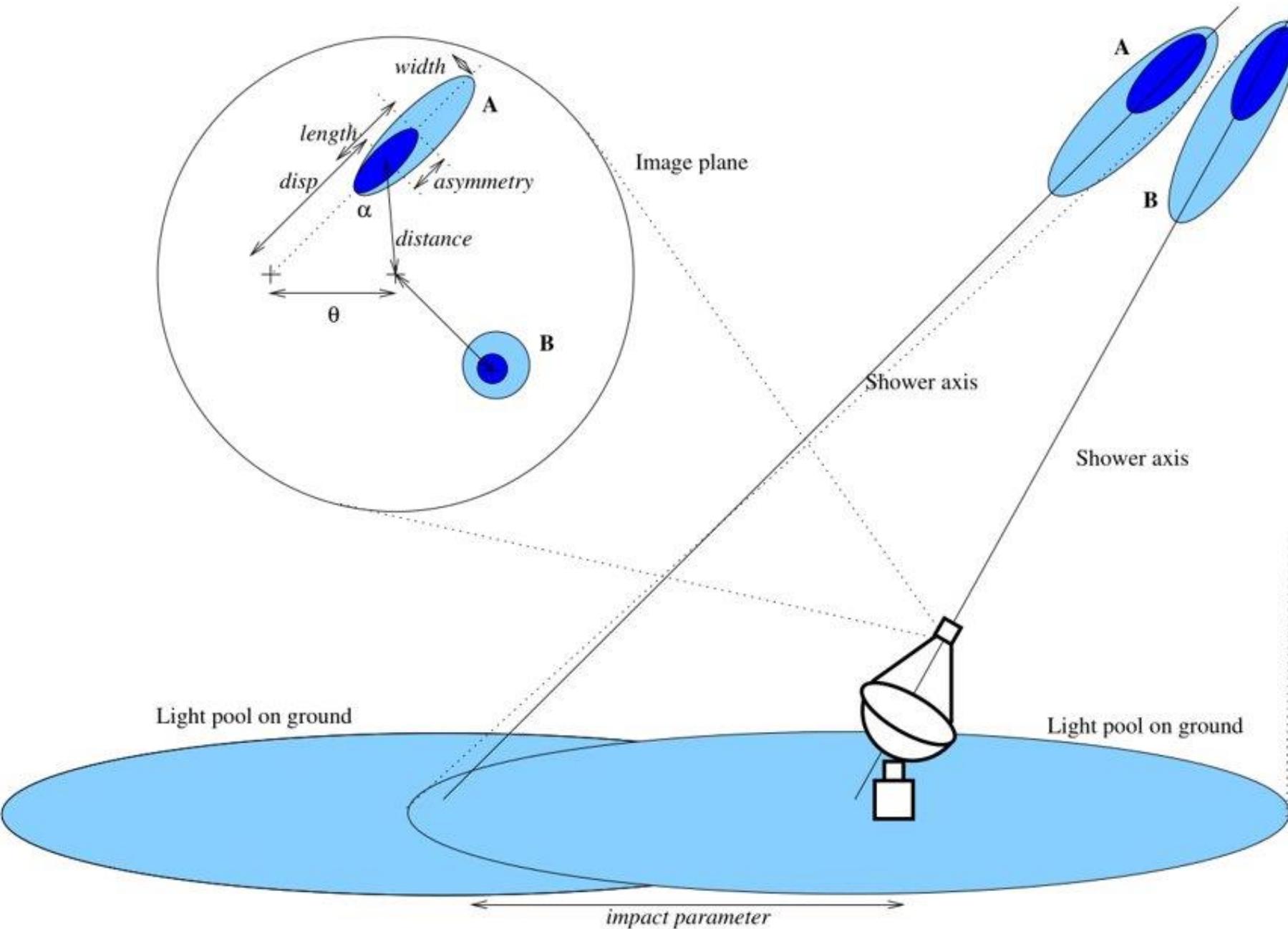
Восстановление энергии



# Тип частицы

Для выделения гамма-квантов, изображения регистрируемых событий параметризуются. В анализе используется следующий набор параметров:

- width - момент второго порядка вдоль малой оси эллипса
- $\theta^2$  - квадрат угла между восстановленным направлением прихода ливня и истинным

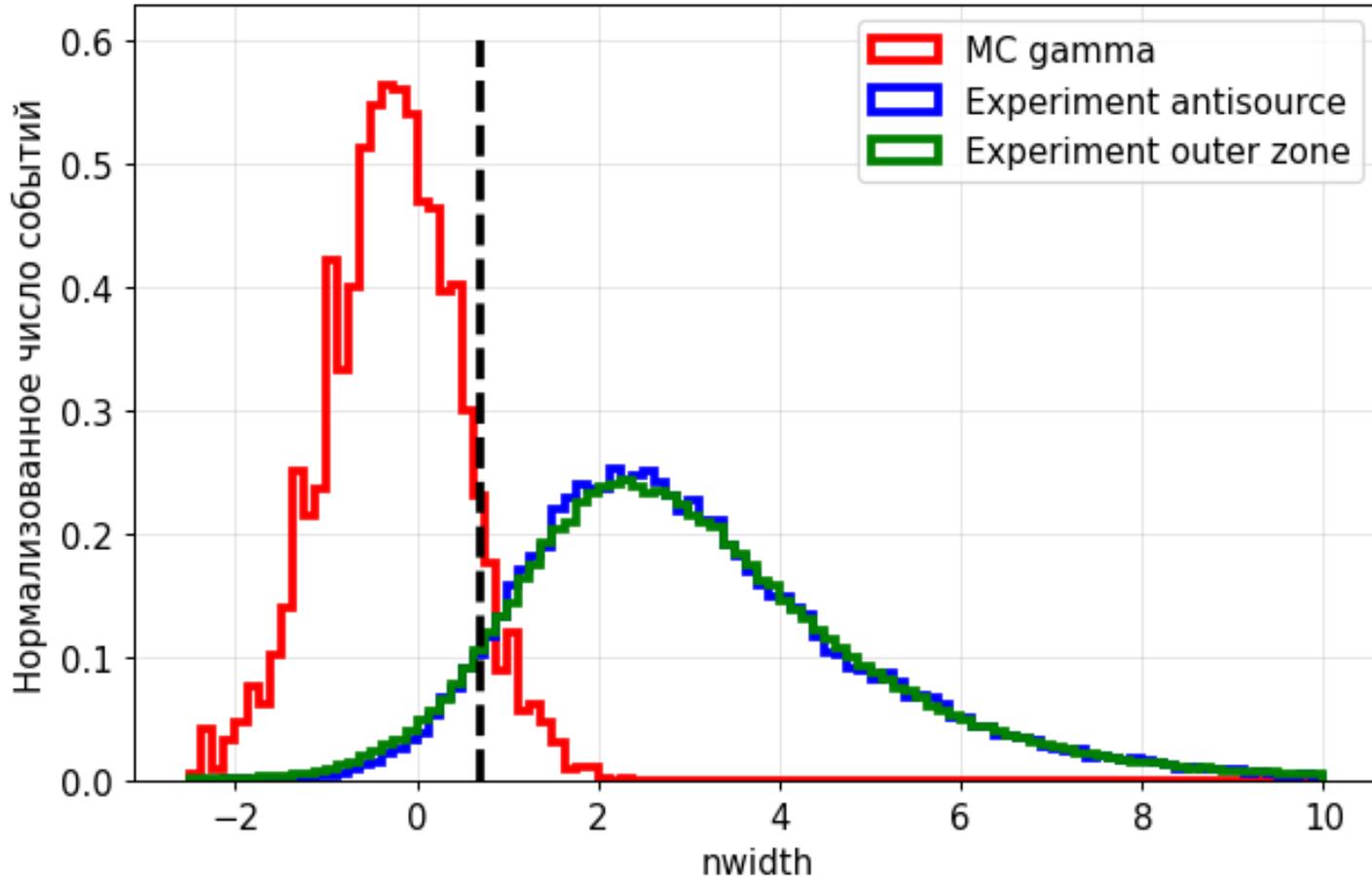


# Гамма-адронное разделение

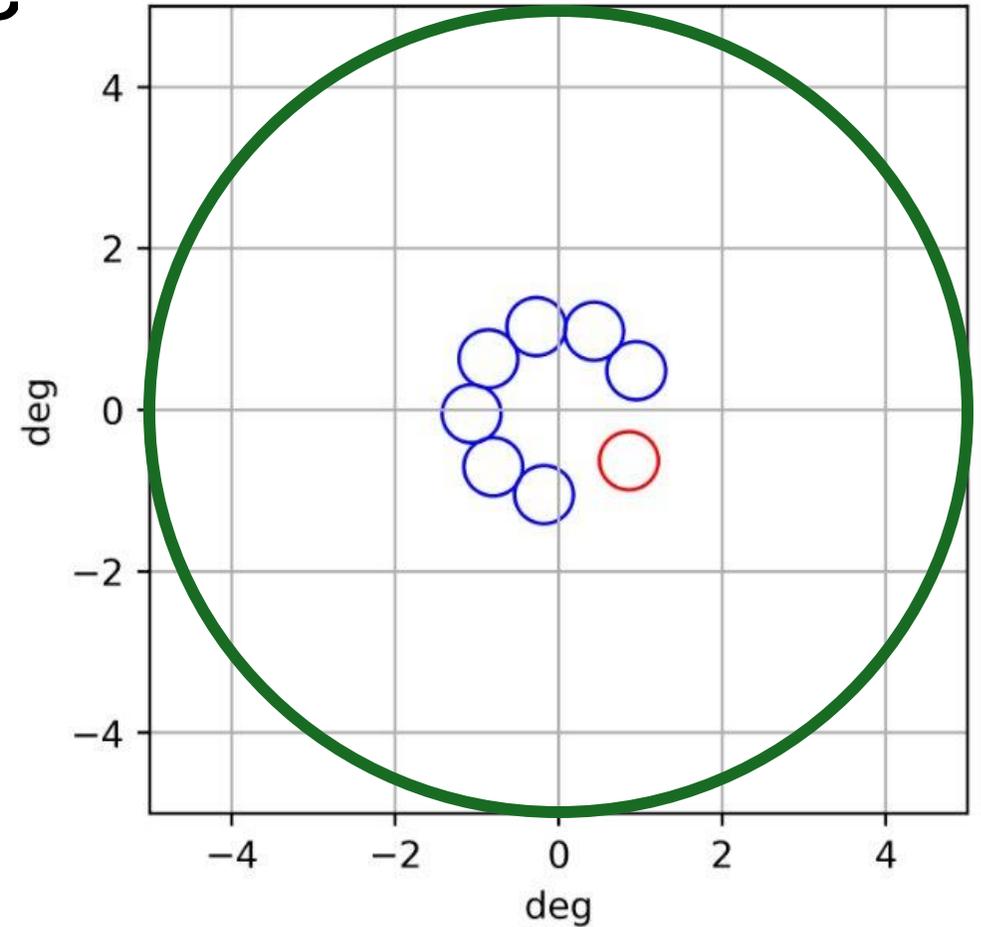
Нормализованная ширина:

$$nwidth = \frac{1}{N_{tel}} \left[ \sum_i^{N_{tel}} \frac{width_i - width_m(r_i, size_i, X_{max_i}, zen_i)}{width_{MAD}(r_i, size_i, X_{max_i}, zen_i)} \right]$$

Нормализованная ширина (nwidth)



IACTs FOV, wobble

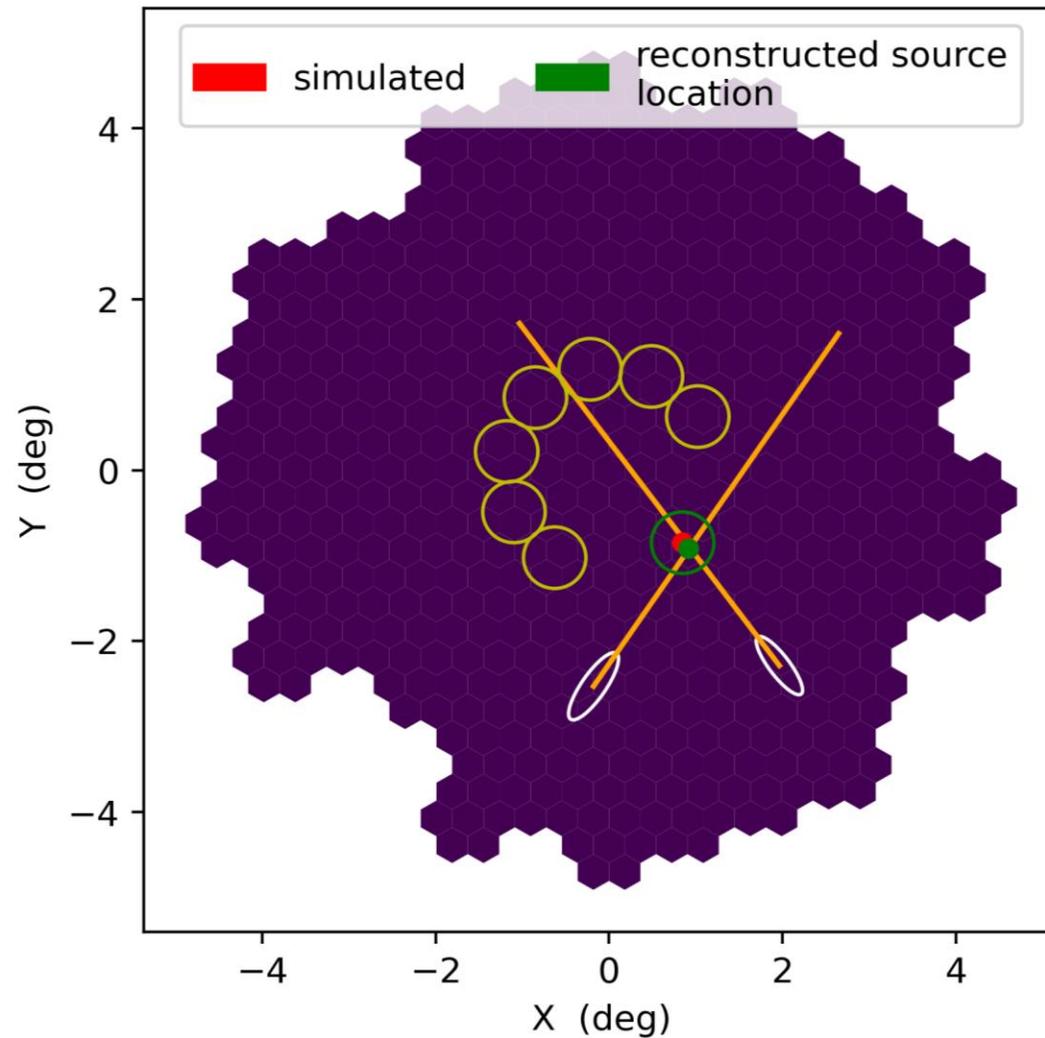
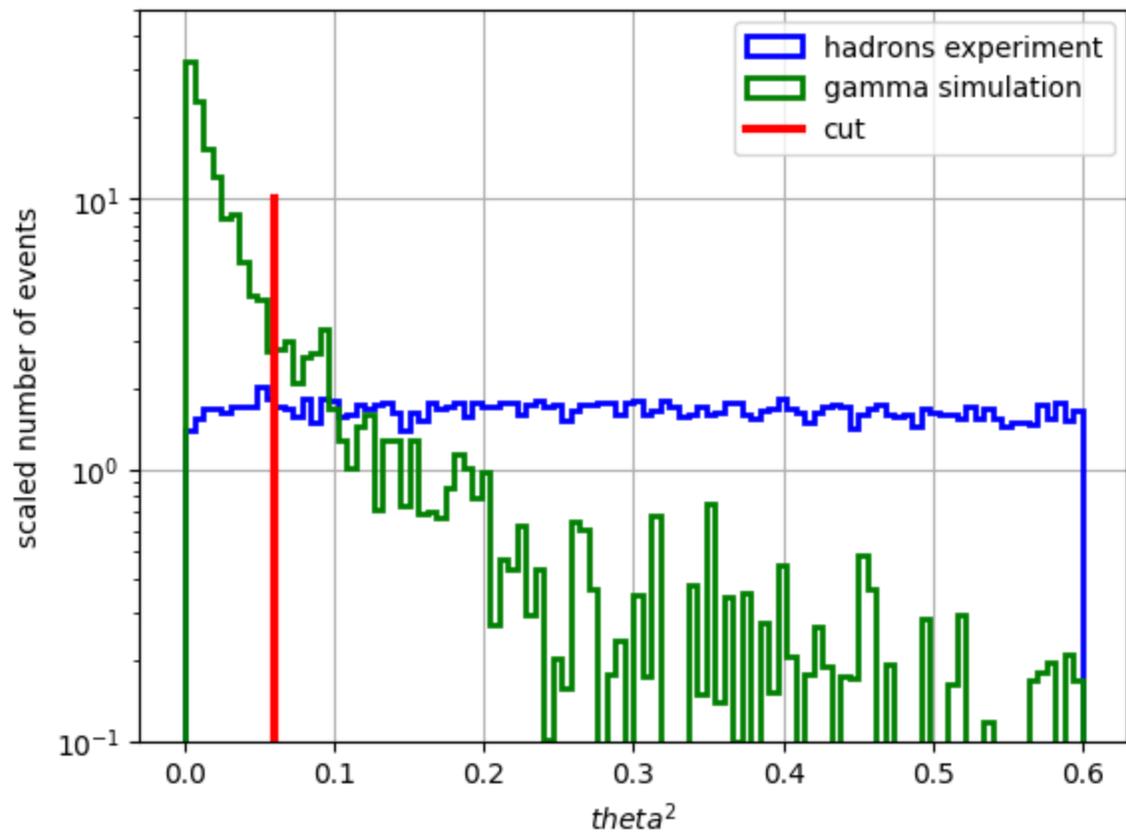


Поле зрения телескопов содержит:

- область с источником гамма-излучения (красный круг)
- области оценки адронного фона (синие круги)

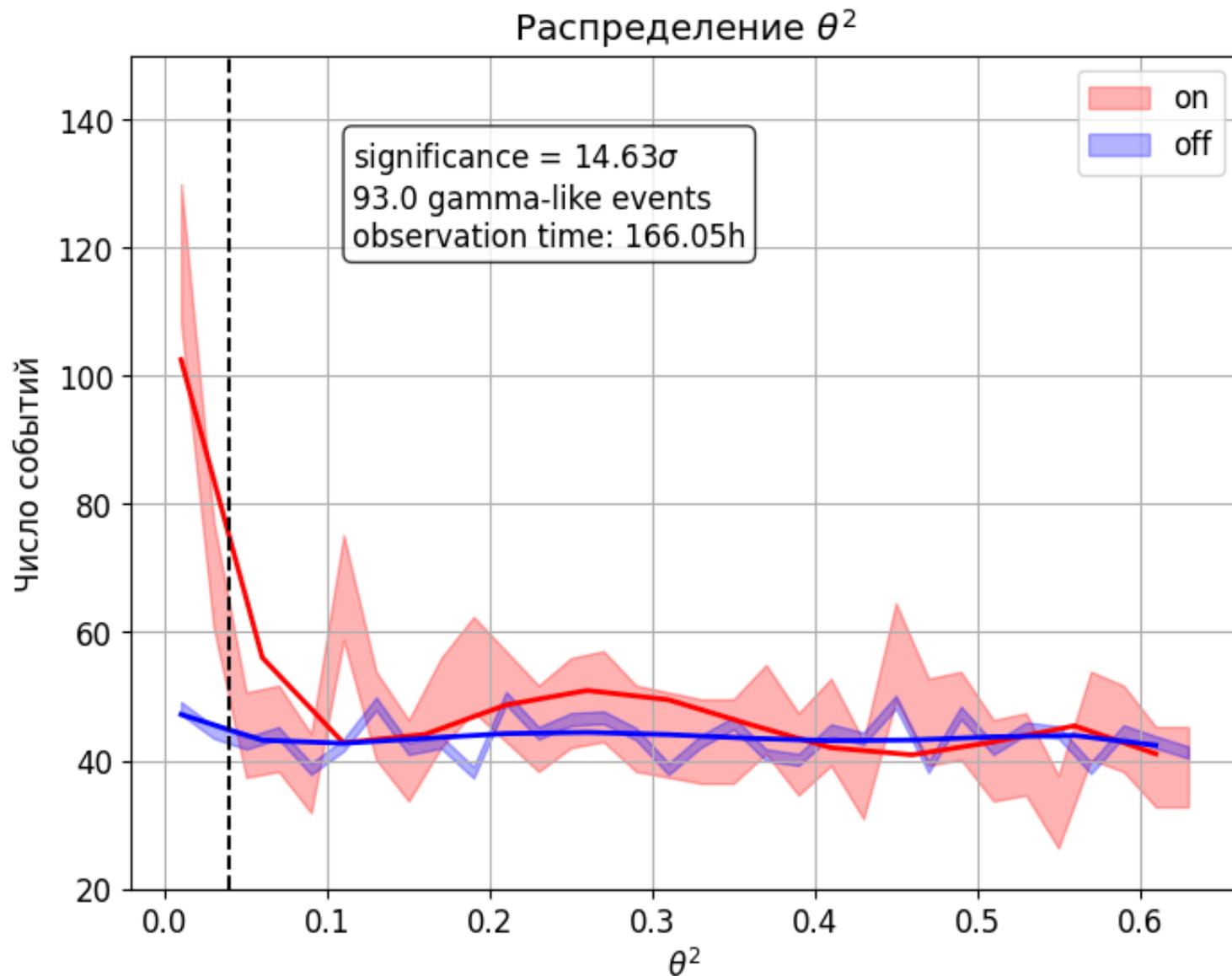
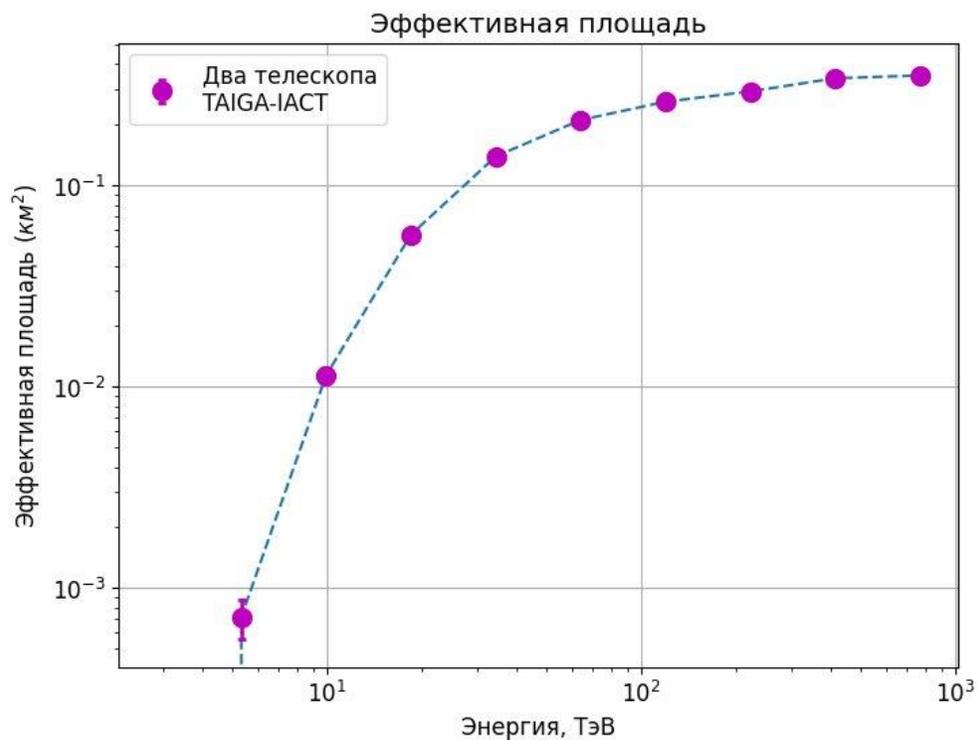
# Гамма-адронное разделение

Распределение событий по  $\theta^2$  - углу  
между восстановленным и истинным направлением  
прихода ШАЛ



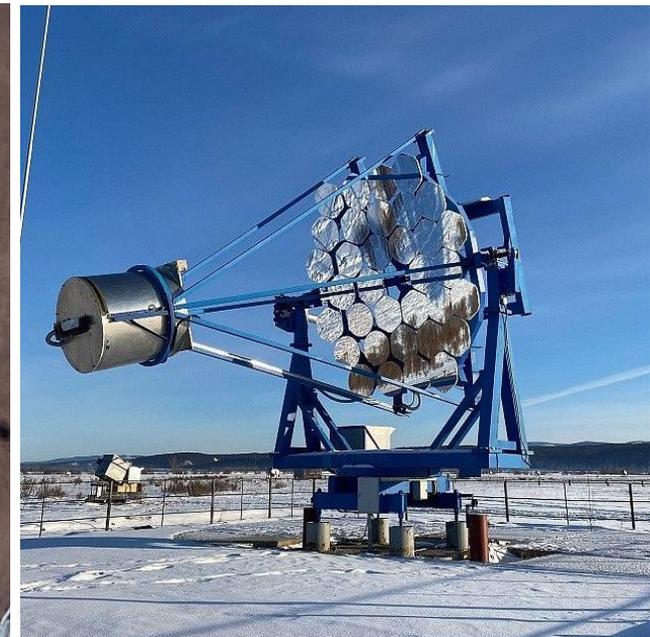
# Избыток и эффективная площадь гамма-квантов в сезонах 2020-22 гг.

Эффективная площадь установки TAIGA-IACT в сезонах 2020-2022 гг. Достигает  $0.3 \text{ км}^2$  при энергии 100 ТэВ. В работу запущено 2 телескопа

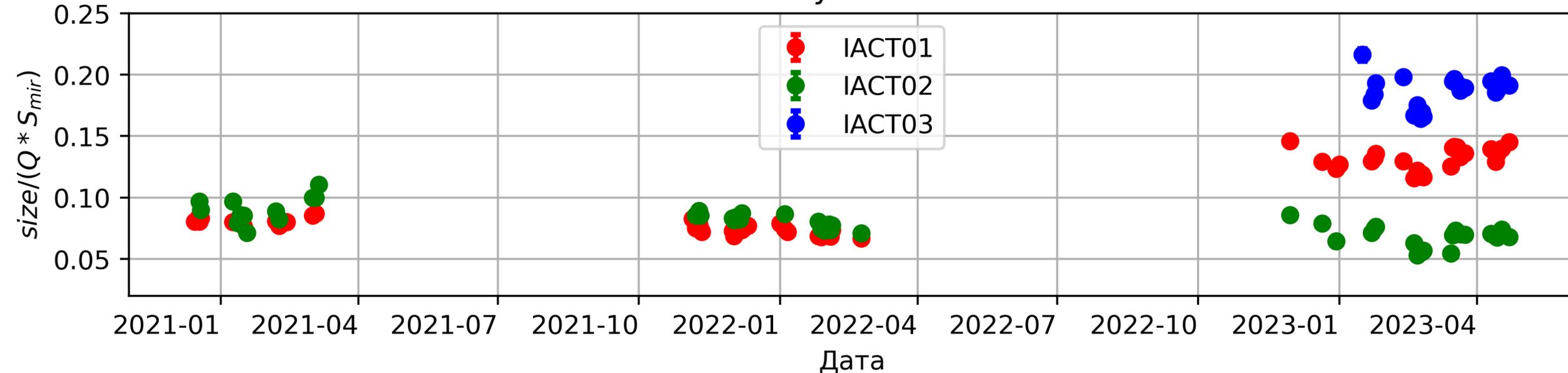


# Изменение конфигурации установки

- Выполнена замена конусов Винстона на TAIGA-IACT01. Эффективность светосбора увеличена в 2.17 раза
- Весной 2022 года запущен в работу TAIGA-IACT03

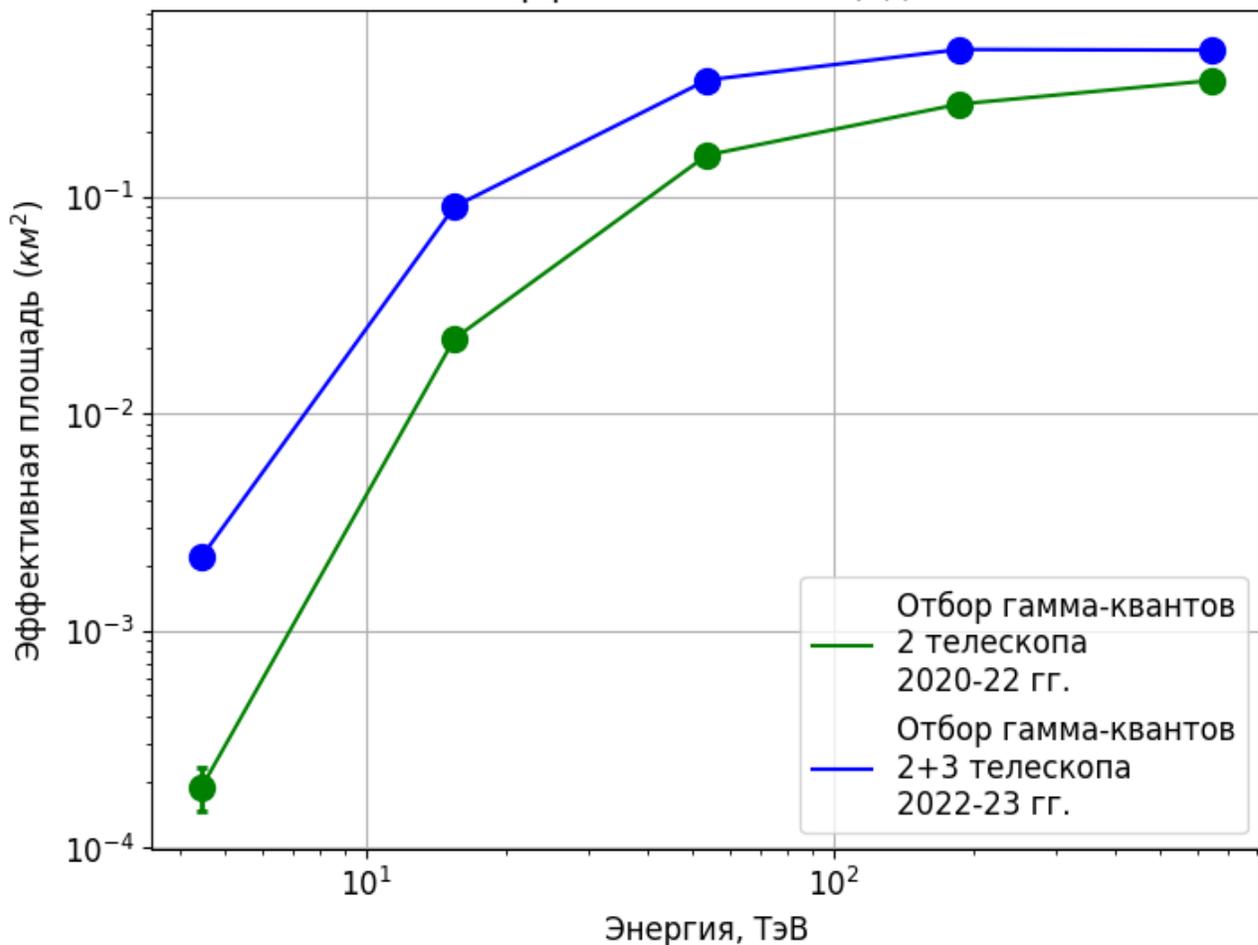


## Квантовая чувствительность

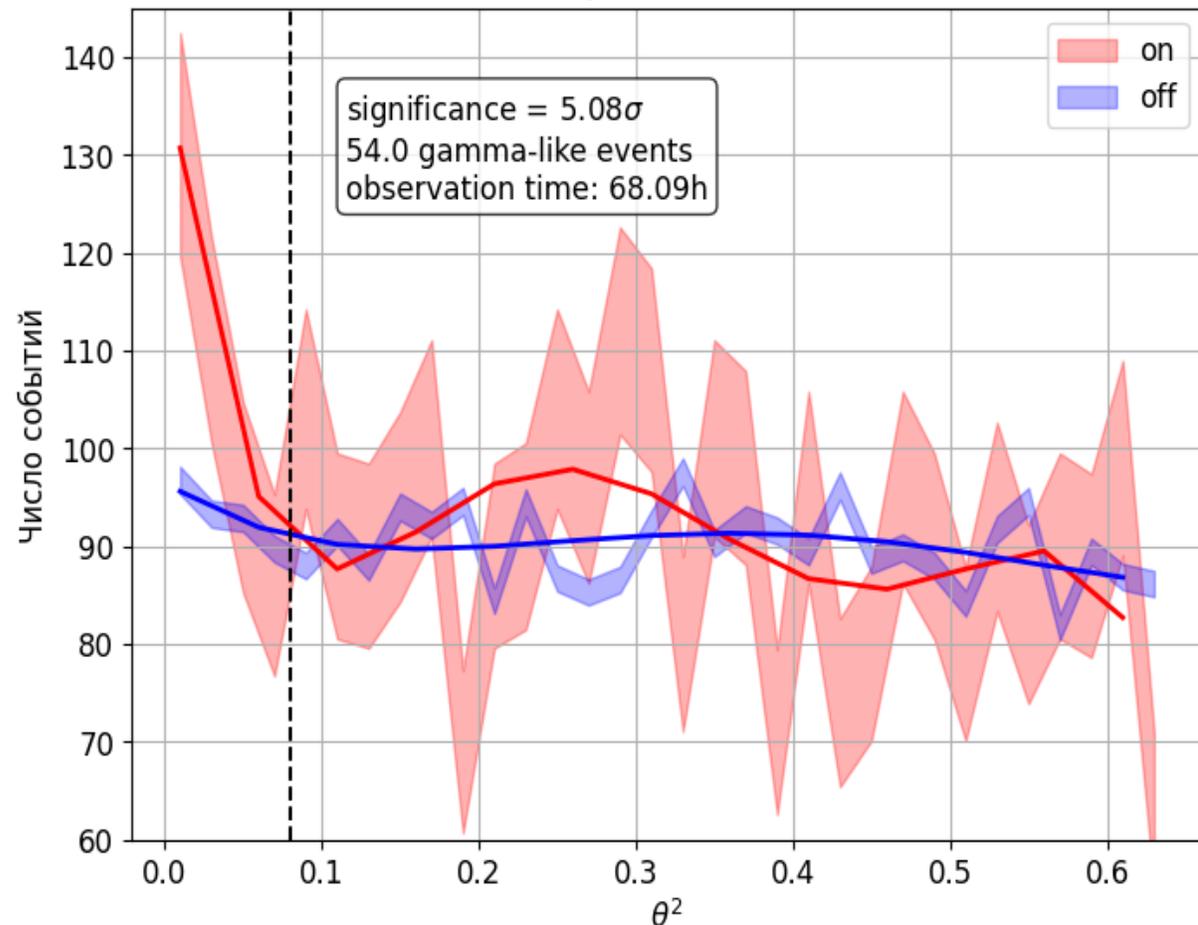


# Эффективная площадь и избыток гамма-квантов в сезоне 2022-23 гг.

Эффективная площадь



Распределение  $\theta^2$



- Время наблюдения Крабовидной туманности сокращено в связи с попаданием в поле зрения телескопов Марса
- Высокий уровень фона может быть связан с неоптимальным выбором порогов клингина событий

# Анфолдинг энергетического спектра

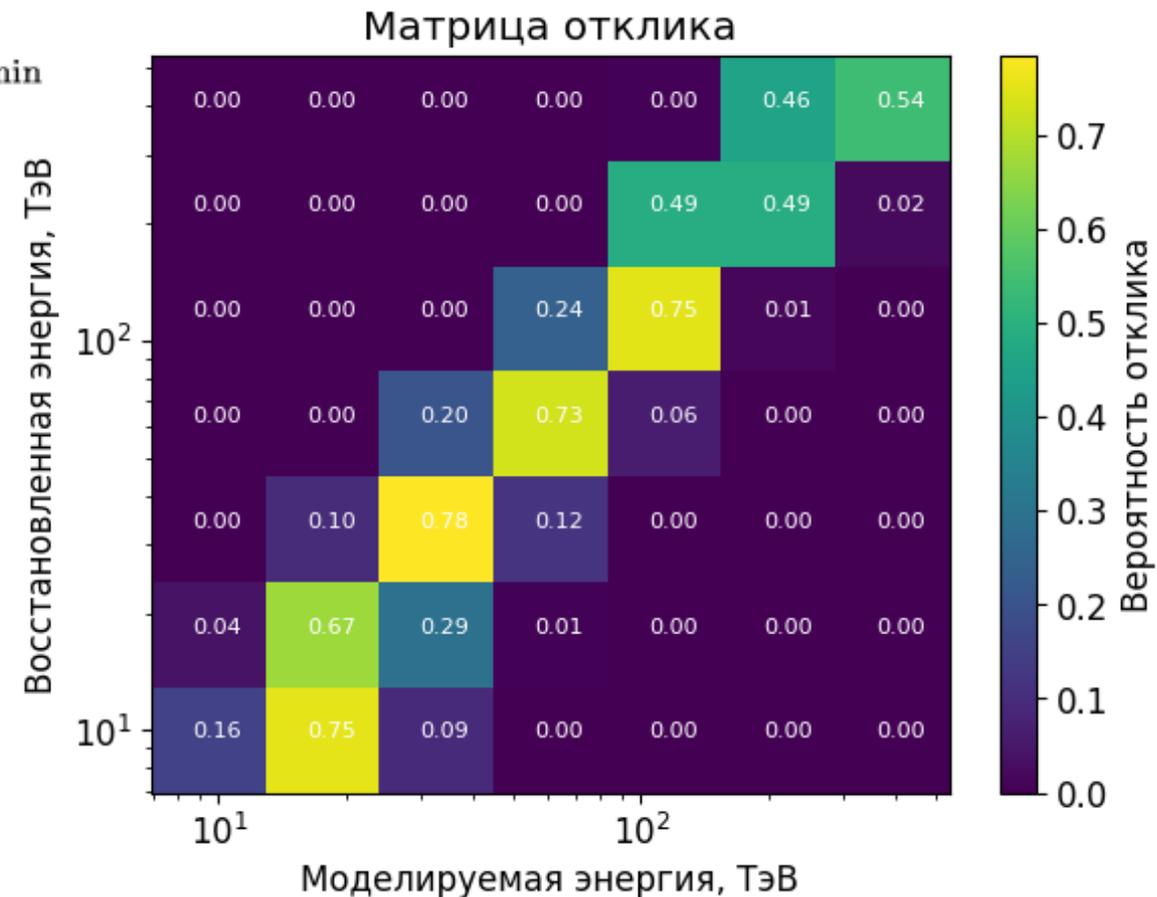
Регуляризация Тихонова - позволяет перейти от энергетического спектра гамма-квантов в восстановленных энергиях к истинным

$$S'(N_1, \dots, N_n) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} N_j - M_i}{\sigma_i} \right)^2 + \tau \cdot \sum_{j=2}^{n-1} \left( \frac{N_{j+1} - 2N_j + N_{j-1}}{\sigma_j} \right)^2 \rightarrow \min$$

Согласие с  
экспериментальными  
данными

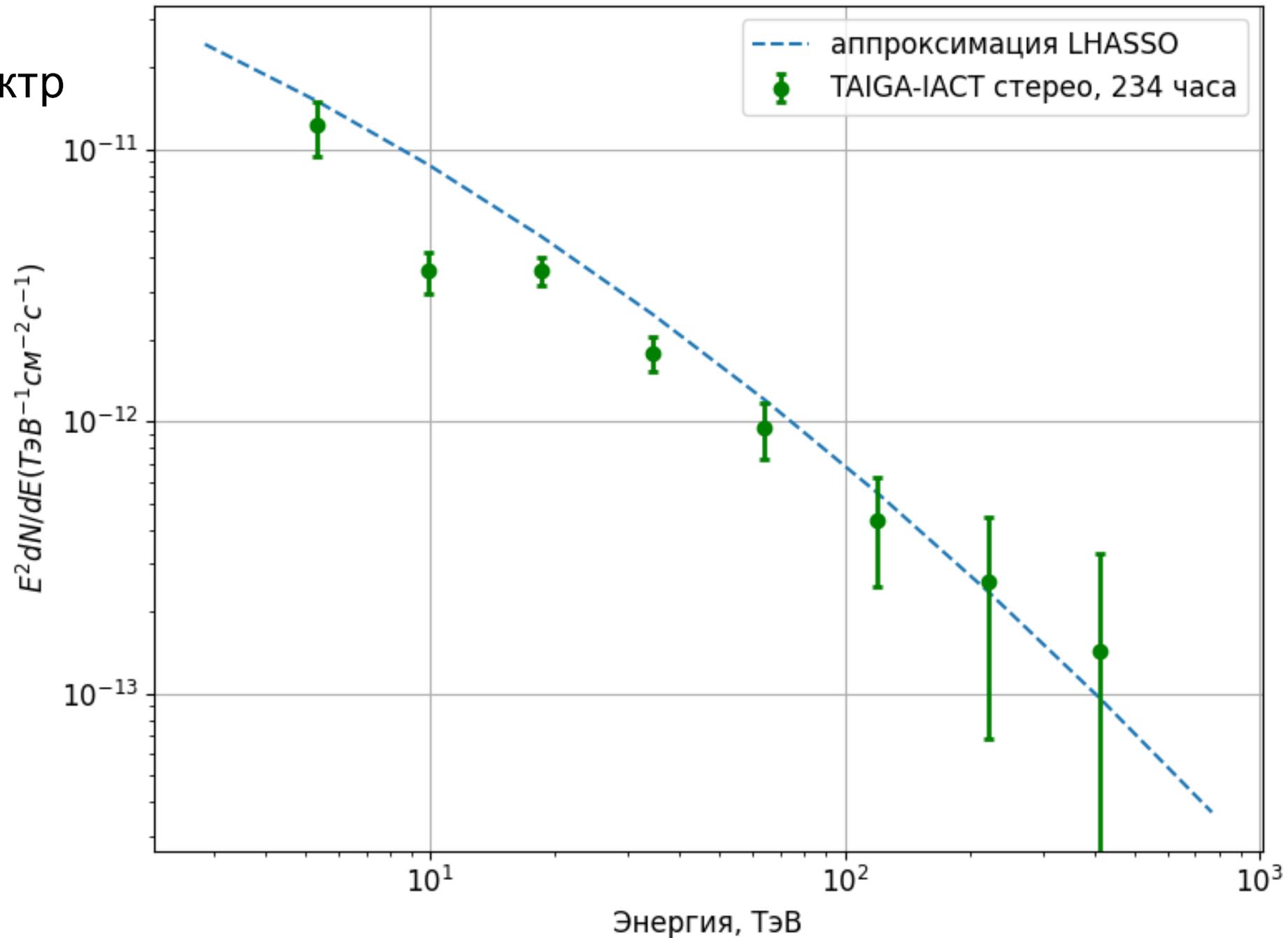
Гладкость решения

$a$  - матрица отклика по энергиям  
 $N$  - число событий по бинам после  
анфолдинга  
 $M$  - измеренное число событий по бинам  
 $\tau$  - коэффициент регуляризации



# Объединенный энергетический спектр Крабовидной туманности

Объединение спектров производится путем учета эффективных площадей каждого сезона наблюдения пропорционально времени наблюдения (166 и 68 часов соответственно)



# Заключение

- Получен энергетический спектр источника, согласующийся с наблюдениями других установок;
- Отобрано 5 событий с энергией выше 100ТэВ. Выделить сигнал от гамма-квантов в данной энергетической области до сих пор удавалось только с помощью высокогорных обсерваторий детектирующих заряженную компоненту ШАЛ. Ожидается, что за 300 часов наблюдения Крабовидной туманности пятью телескопами выше 100 ТэВ будет зарегистрировано 30-40 событий.
- Планируется :
  - применение более сложной методики выделения гамма-квантов (разделение событий по  $X_{\text{max}}$ , LGBM классификация, оптимизация клининга)
  - Увеличение статистики за счет сезона 2023-2024 года. Учет погодных условий наблюдений.

Спасибо за внимание