

# Статус эксперимента TAIGA

Свешникова Л.Г.

НИИЯФ МГУ. Лаборатория  
наземной гамма-астрономии.

Лидеры

Л.А. Кузьмичев Л.А. НИИЯФ МГУ,

Н.М. Буднев ИГУ Иркутск



51° 48' 35" N  
103° 04' 02" E  
675 m a.s.l.

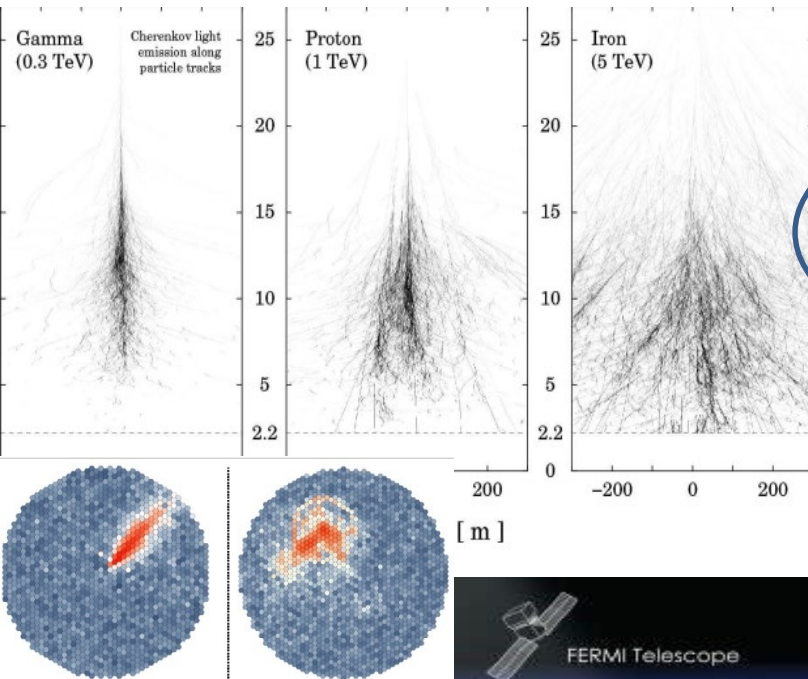


# Основные направления исследования

- Исследование космических лучей в области десятки ТэВ – 300 ПэВ, структура и состав спектров КЛ (основная проблема – нет направления)
- Гамма-астрономия высоких энергий  $> 6$  ТэВ, исследование высокоэнергичной части спектров источников, поиск ПэВатронов (основная проблема – очень трудно выделить на фоне КЛ)

Гамма-обсерватории TAIGA является самой северной обсерваторией ( $51.810^\circ$ ,  $103.067^\circ$ ) для детектирования гамма-квантов в области очень высоких энергий ( $> 1$  ТэВ), таких как сверхновая ТИХО БРАГЕ

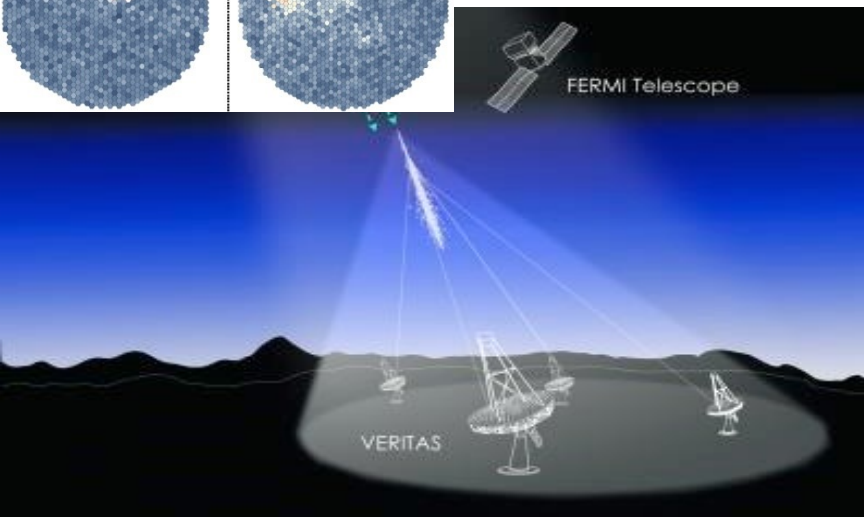
# Как разделяются ливни от гамма-квантов и адронов в различных экспериментах



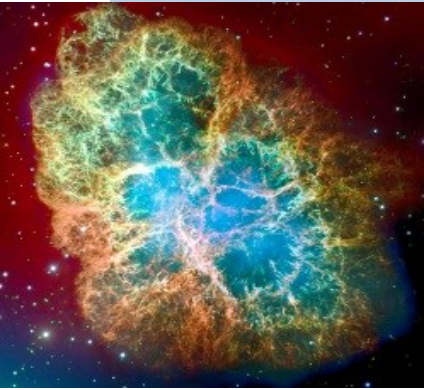
## Три подхода

1. По угловому распределению Черенковского света, образованного ШАЛ с помощью атмосферных Черенковских телескопов АЧТ, **IACT HESS, MAGIC, CTA, VERITAS** и тд
2. По функции пространственного Распределения заряженных частиц **HAWC, Tibet Asgam**
3. По числу мюонов в ШАЛ **LHAASO** array in Tibet

Обычно телескопы располагаются на высоте от 2 (**HESS, MAGIC, VERITAS** и тд) до 4 км (**HAWC, LHAASO**)



# Изменения за последние два года



Крабовидная  
туманность  
Пульсарная туманность  
1054

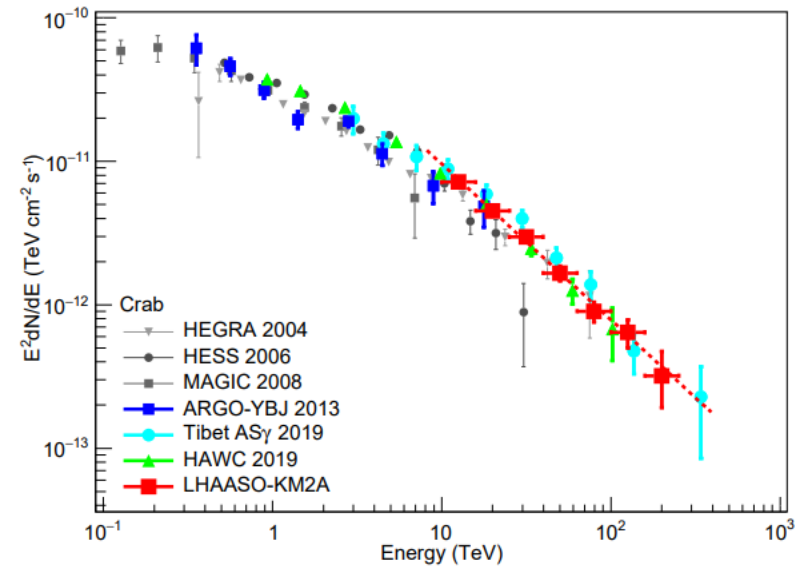
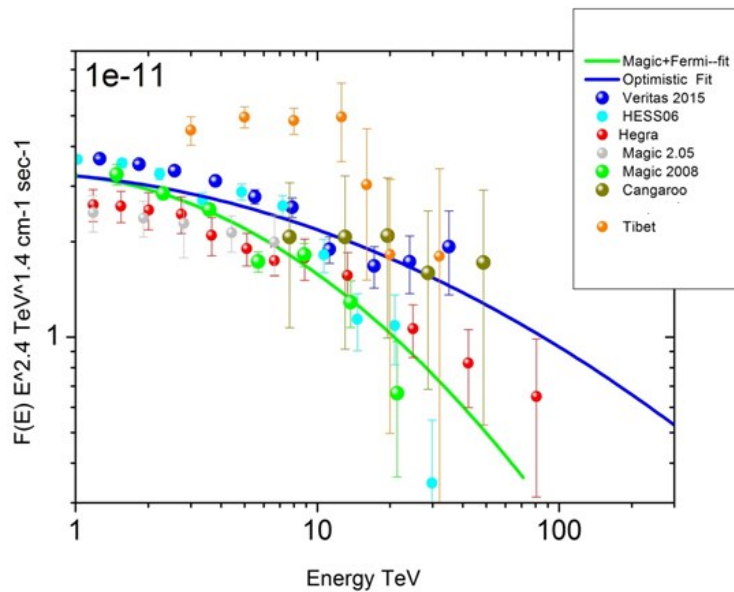


Fig. 17. The spectrum of the Crab Nebula measured by KM2A in red together with the spectra



# Содержание доклада

1. Основные компоненты комплекса
2. Методы регистрации гамма-квантов и адронов: одиночный АЧТ телескоп; стерео система телескопов; гибридный метод:
3. Первые результаты по регистрации гама-квантов высоких энергий
4. Планы в области исследования гамма и КЛ
5. Планируемое развитие эксперимента

# TAIGA Tunka advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy ( 50 km from the lake Baikal)



**Tunka-133 Cherenkov EAS array ( 2009)**

Area – 3 km<sup>2</sup>



**Tunka-Grande (2015)**

Detection of charged particles ( electrons, muons)

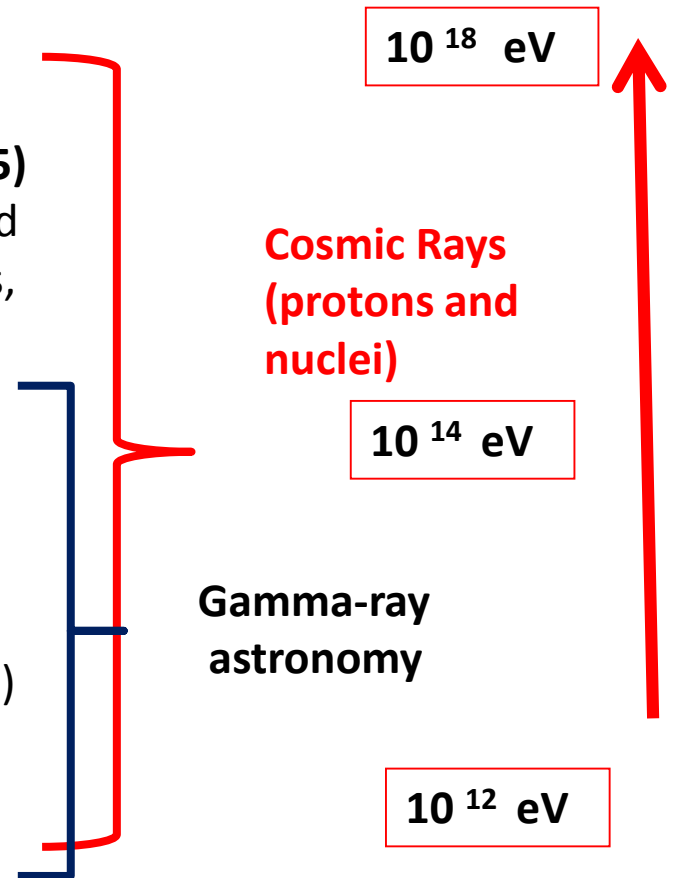


**TAIGA – HiSCORE**

( finishing of deployment in 2021)

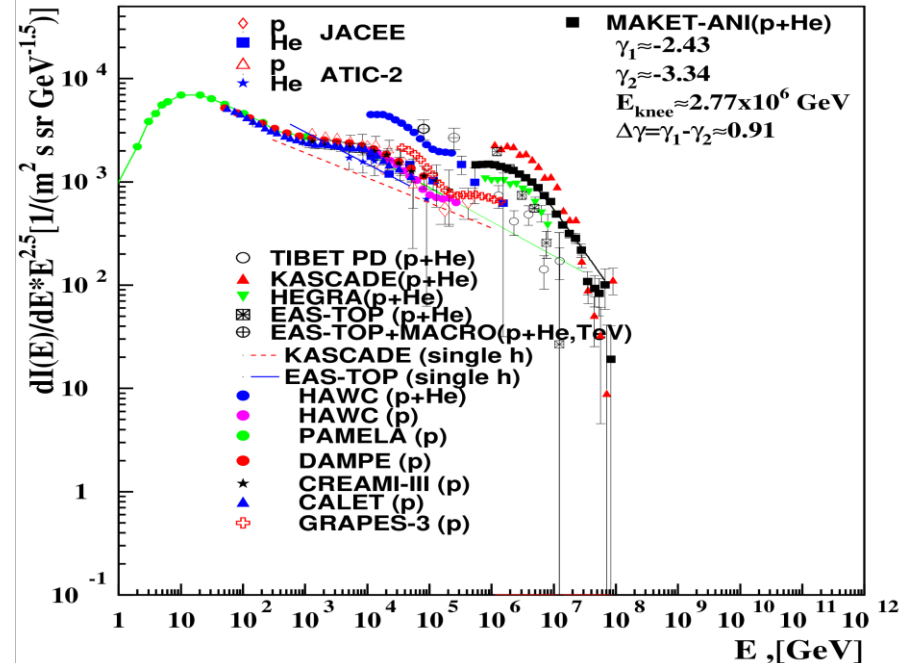
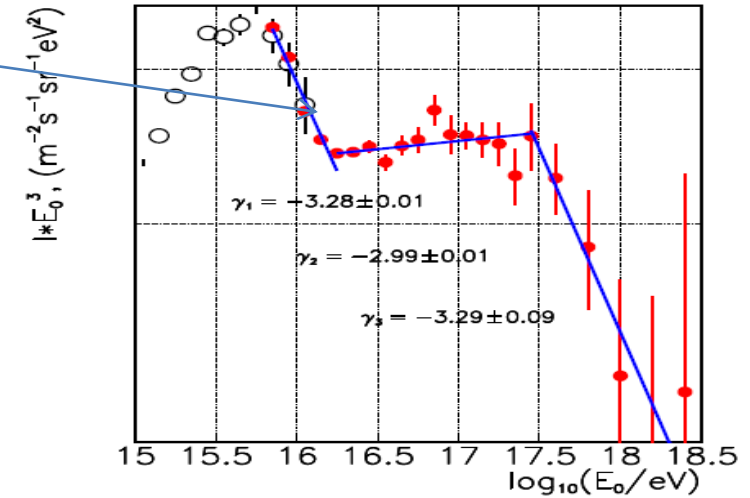
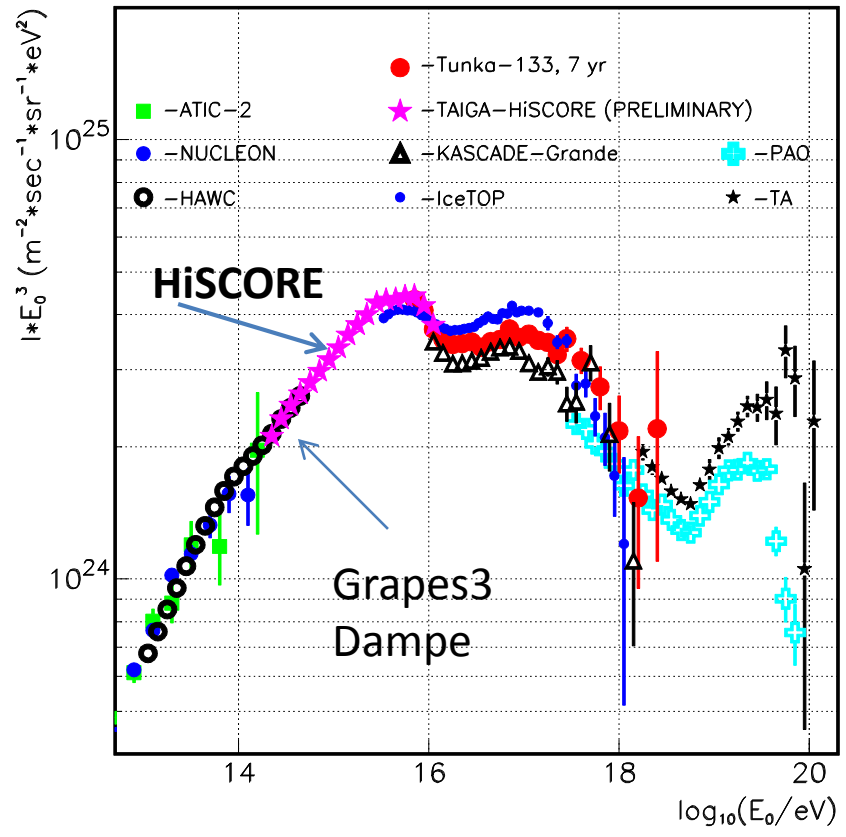
**TAIGA -IACT**

IACT – Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope



# Энергетический спектр КЛ в диапазоне $10^{14} - 10^{18}$ eV

Тунка 133

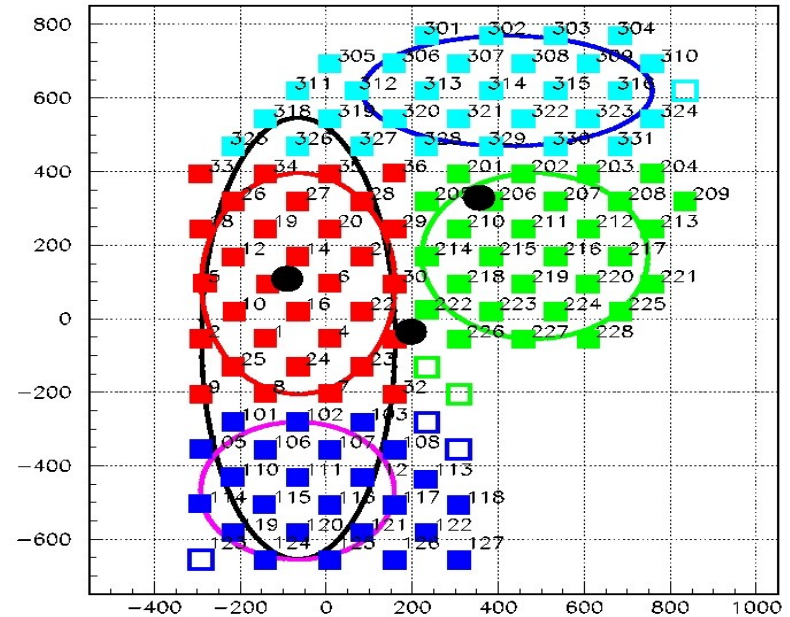
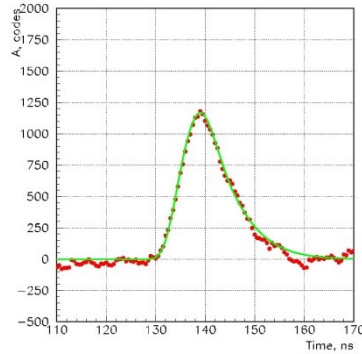


ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЛЕГКИХ ЧАСТИЦ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ ОТ ОТ 100 ГэВ ДО 10 ПэВ  
© 2022 г. Г.Г.Овсеян<sup>1,\*</sup> А. А.Чилингарян

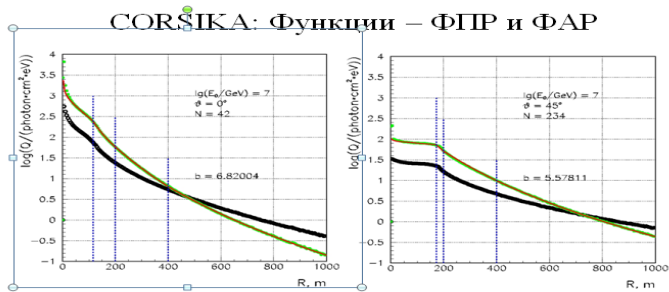
# TAIGA- HiSCORE ( FoV ~60° )

## для регистрации гамма-квантиов

$S_{tot} = 0.5 \text{ m}^2$



**Network of 120 stations  
(step 106 m)**



ФАР:  $A(R) = A(400) \cdot ((R/400+1)/2)^{-b_A}$  крутизна:  $b_A$   
 ФПР:  $Q(R) = Q(300) \cdot ((R/300+1)/2)^{-b_Q}$  крутизна:  $b_Q$   
 $b_A > b_Q$

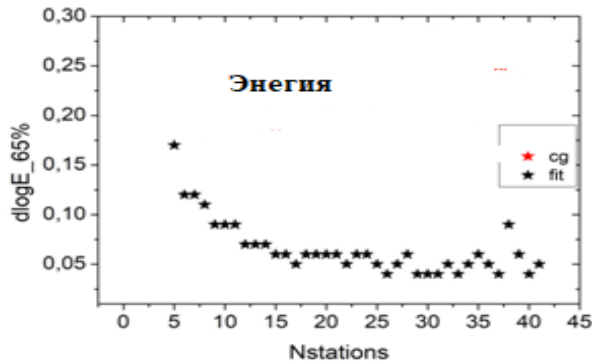
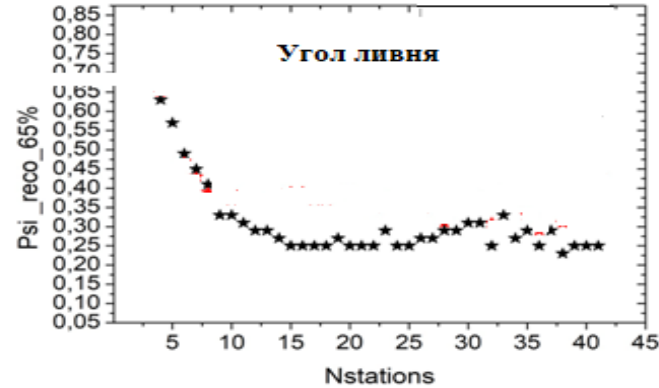
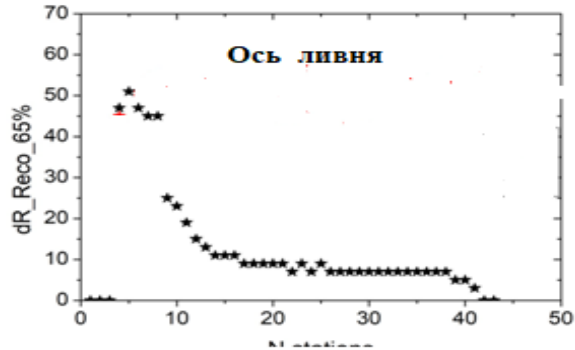
**1) Положение оси ШАЛ по ФАР  
Черенковского света**

**2) Угол ливня - по времени прихода**

**3) Энергия измеряется по числу фотоэлектронов на расстоянии 200 м от оси, а при более низких энергиях на 100 оси**



# Точности определения положения оси, угла ливня, энергии ШАЛ от гамма полученные для установки в два кластера



	Mean	RMS	
<u>dtet Fit</u>	0.06341	0.28087	угол Tet
<u>Dfi Fit</u>	-0.16904	0.61369	угол Fi
<u>DlogE Fit</u>	-0.01723	0.18846	lgE
<u>Dr Ft</u>	37.13213	50.0570	m ось шал

Точности углового разрешения не хватило для подавления фона адронов, поэтому для регистрации гамма квантов добавлены А

# Гибридный метод – HiSCORE + IACT (3-5)

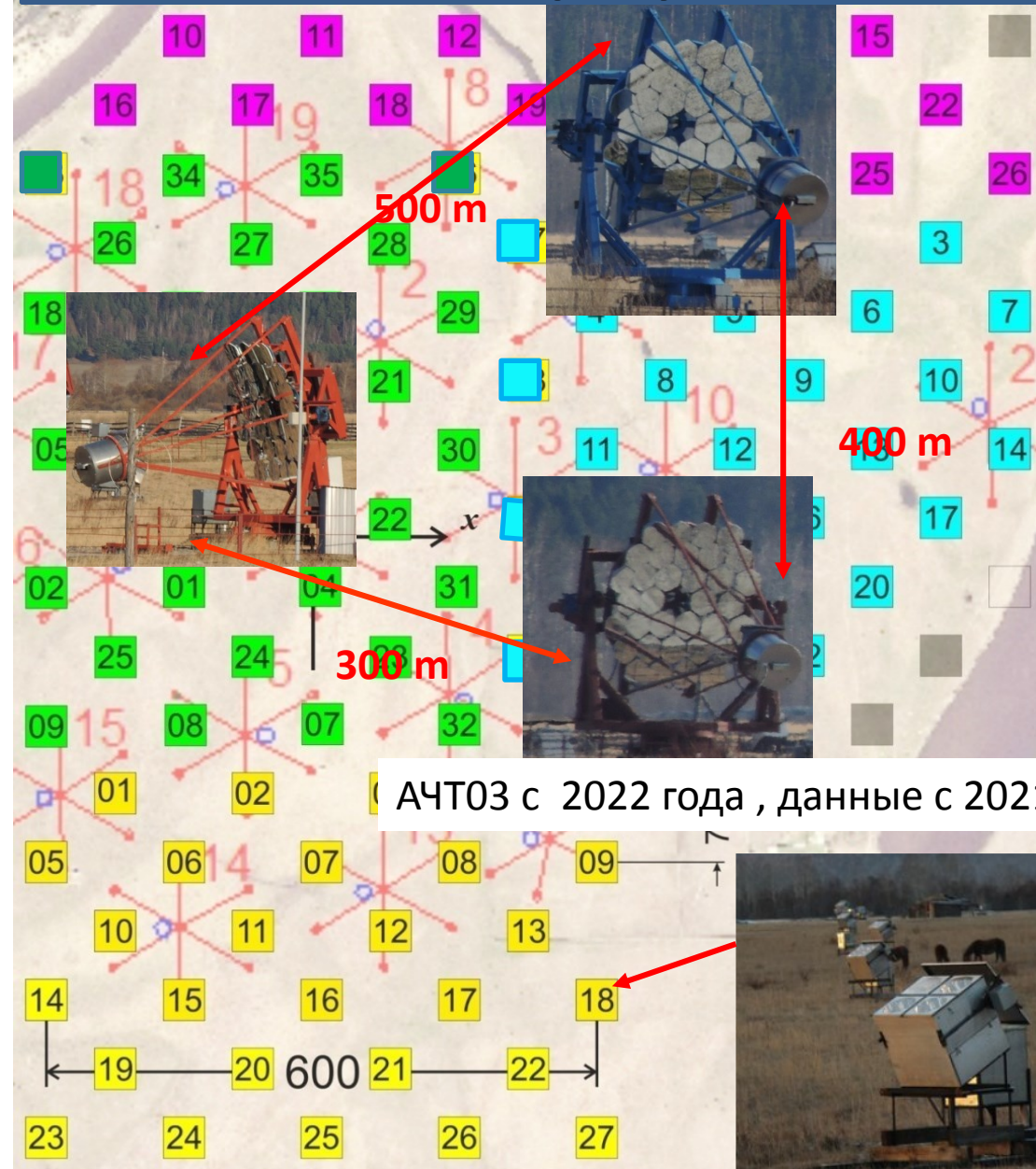
АЧТ01 с 2018 , с 2019 - данные



АЧТ02 с 2020 года , данные с 2021

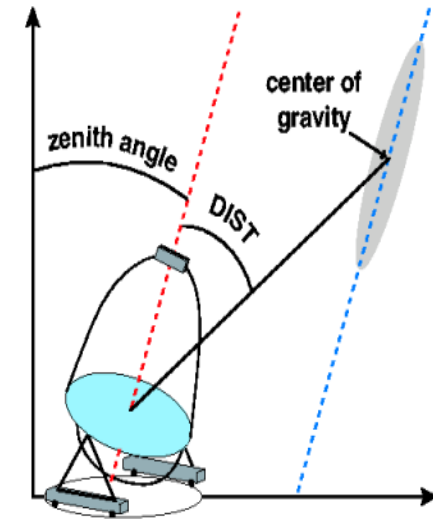
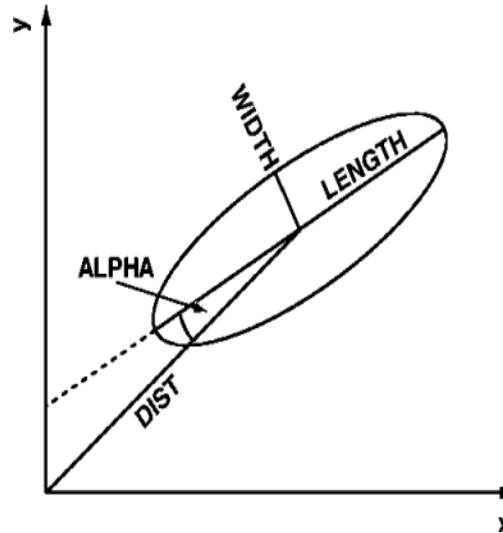
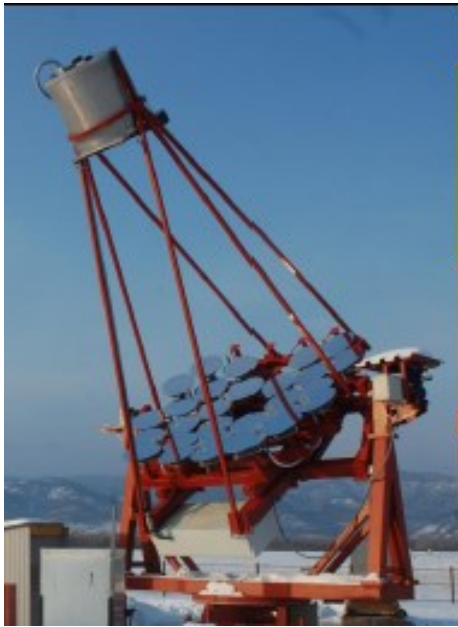


АЧТ03 с 2022 года , данные с 2021

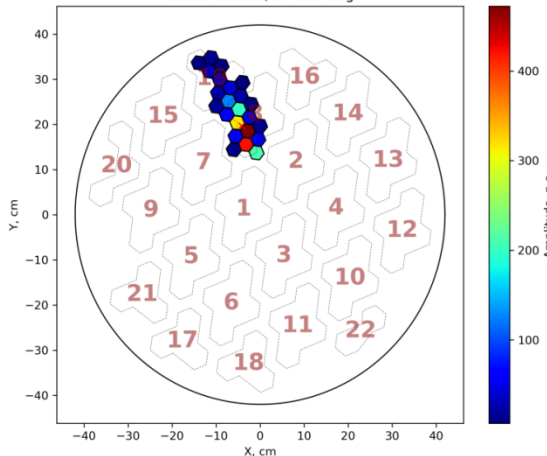


# TAIGA IACT (AЧТ)

Study of angular Cherenkov photon distribution from EAS –  
image of EAS



Event #3461815  
Ncl = 0, Npix = 23  
Size = 2230 p.e.  
Width=1.2 cm,  $\alpha=13.7$  deg



Area of mirrors - 9.6 m<sup>2</sup> ( 34mirrors )

Focus length 4.75 m

**FoV** 9.6°

pixel FoV 0.36°

600 pixels( pmt XP1911 Ø 19 mm)

PSF ~0.1°

CCD for checking telescope pointing  
direction.

Основные параметры

Width

Length

Dist

Alfa

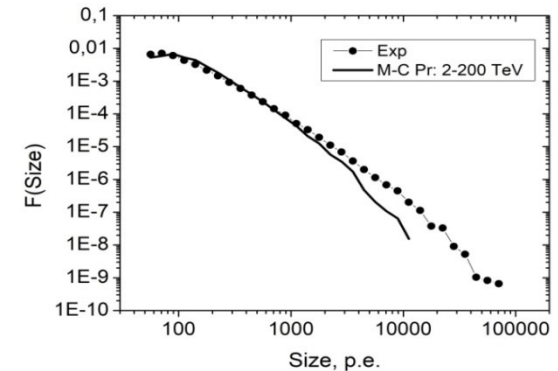
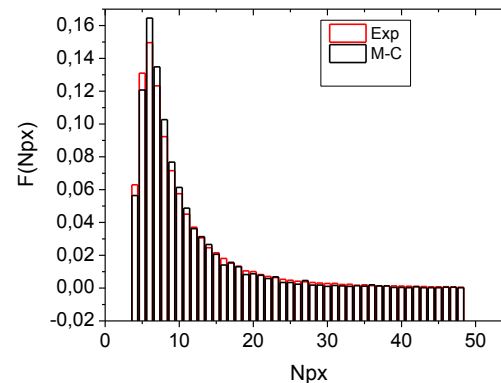
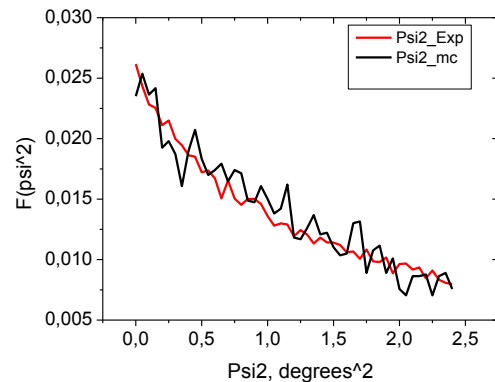
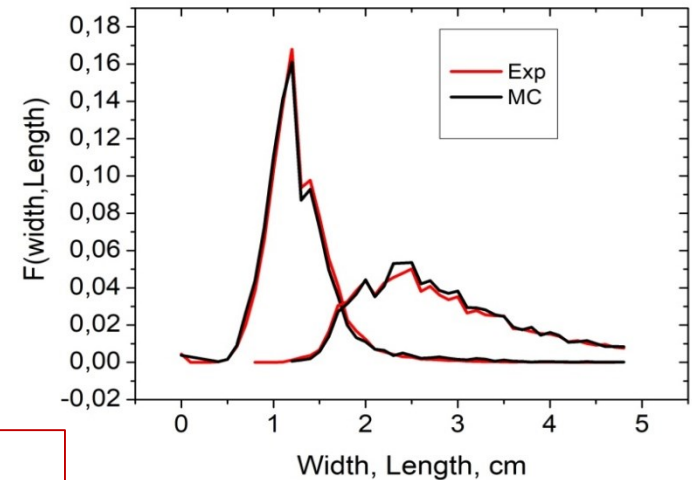
tet



# 1 Шаг : Монте-КАРЛО симуляции выбор критериев подавления фона

- 1) Настройка М-К для описания экспериментальных данных по **адронам**
- 2) Настройка оптимальных критериев для подавления фона адронов
- 3) Оценка коэффициентов подавления фона

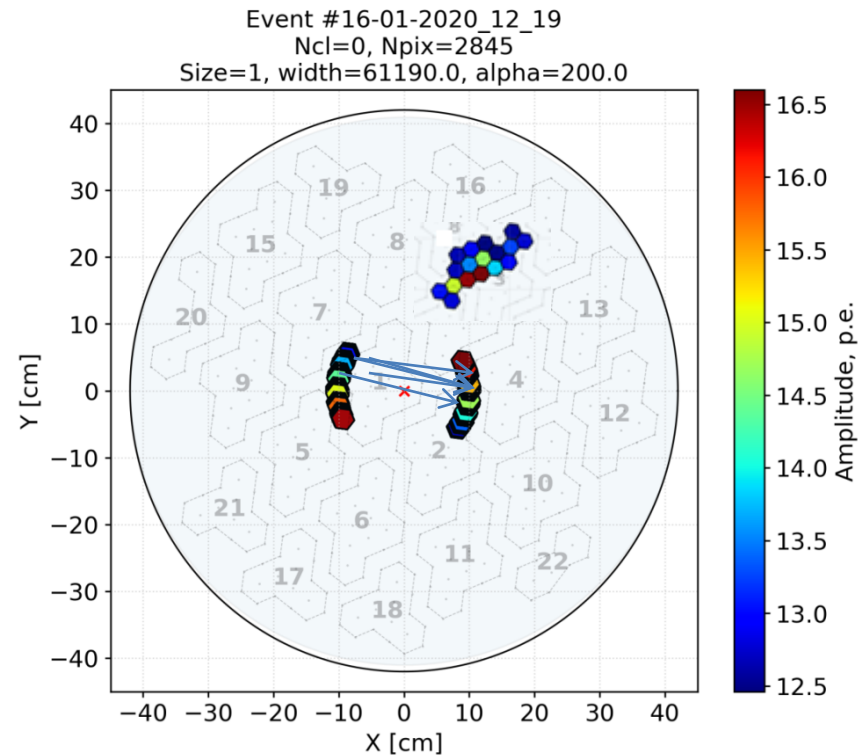
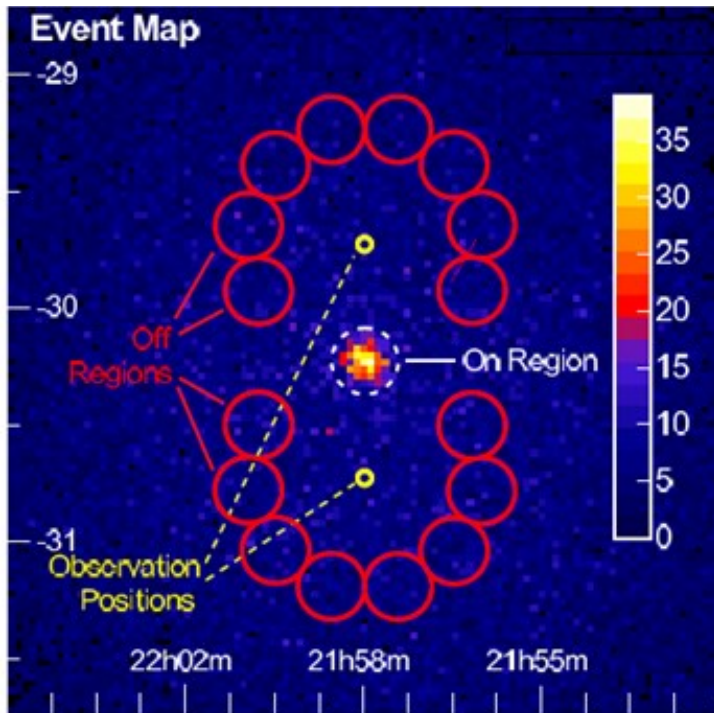
$$Qfactor = \epsilon_{\gamma} / (v \epsilon_h) \sim 4-8$$





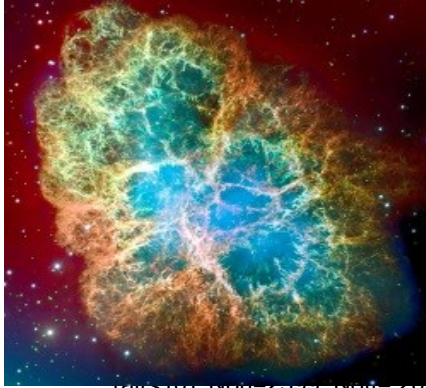
# 2) Процедура слежения и выбор фона

$$\text{Dec}=\text{Dec}_{\text{Crab}}, \quad \text{Ra}=\text{Ra}_{\text{Crab}}\pm 1.2$$



$$\text{Excess} = \text{Non} - \langle \text{Noff} \rangle \quad \text{Sigma} = \sqrt{\text{Non} + \langle \text{Noff} \rangle / \text{Nfon}}$$
$$\text{Significance} = \text{Excess} / \text{sigma}$$

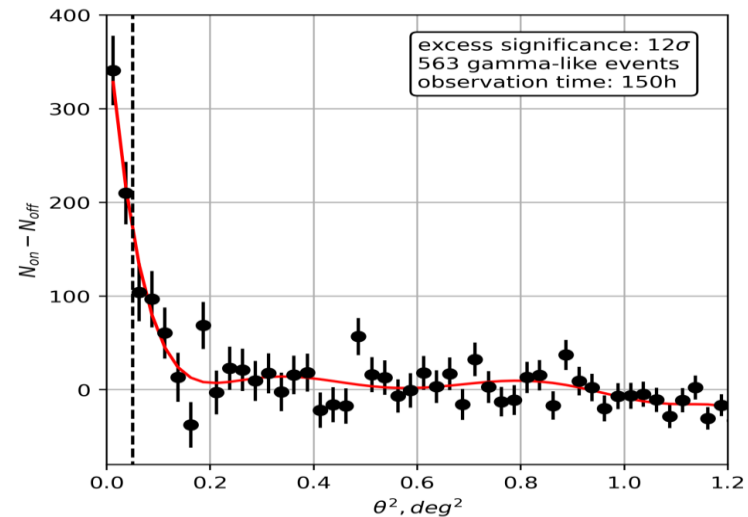
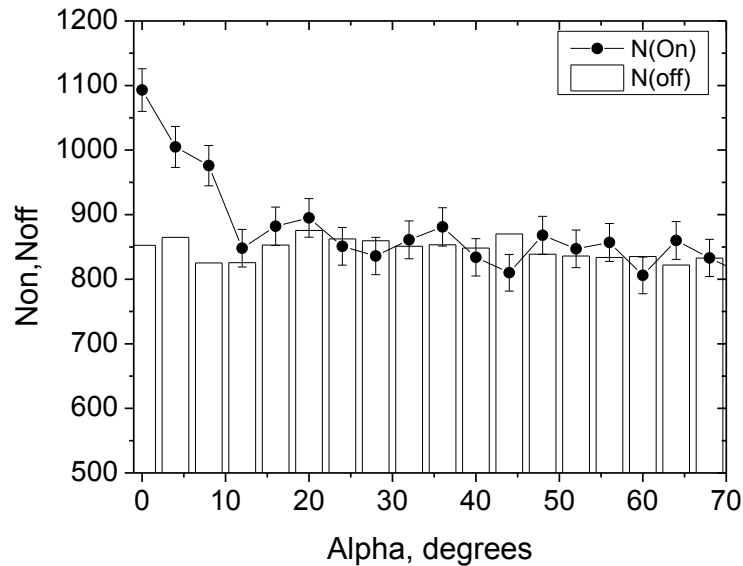
# 3) Проверка на Крабе : 2019 –2021: ~60 дней ~150 часов по данным 1 телескопа



**Основные каты  
подавления фона**

**Size > 120 p.h.; Npx>3;  
0.36 ° < dist < -1.44°,  
0.024 < width < (0.068° × lgSize-0.047°),  
length < 0.145° × lgSize**

(dir<10). Non= 2559, Noff= 2632 Exc= 567 (10.3 Sig)



Excess 450-550 частиц со значимостью 9-11 sigma

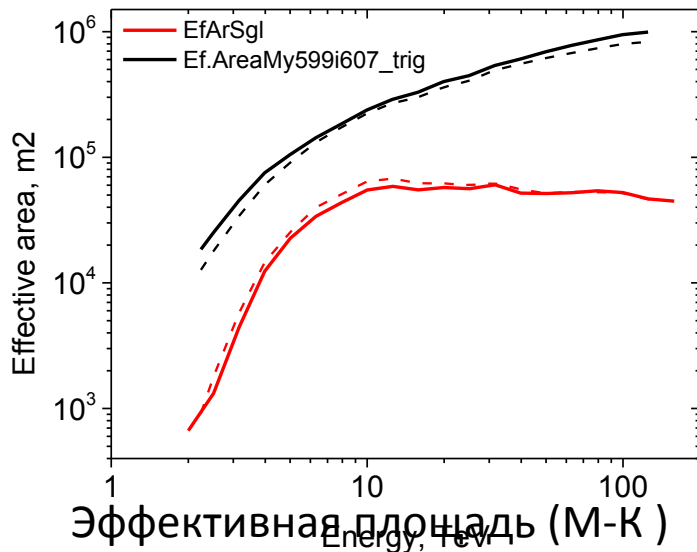
# Переход к Спектру по энергии

$$F(E_{\text{reco}}) = (N_{\text{on}}(E_{\text{reco}}) - N_{\text{off}}(E_{\text{reco}})) / S_{\text{eff}}(E_{\text{reco}}) / \text{Time},$$

$$S_{\text{eff}} = (N_{>\text{cut}} / N_0 * S_0)$$

$$\text{Time} = 150 \text{ hr}$$

## Основные критерии подавления фона



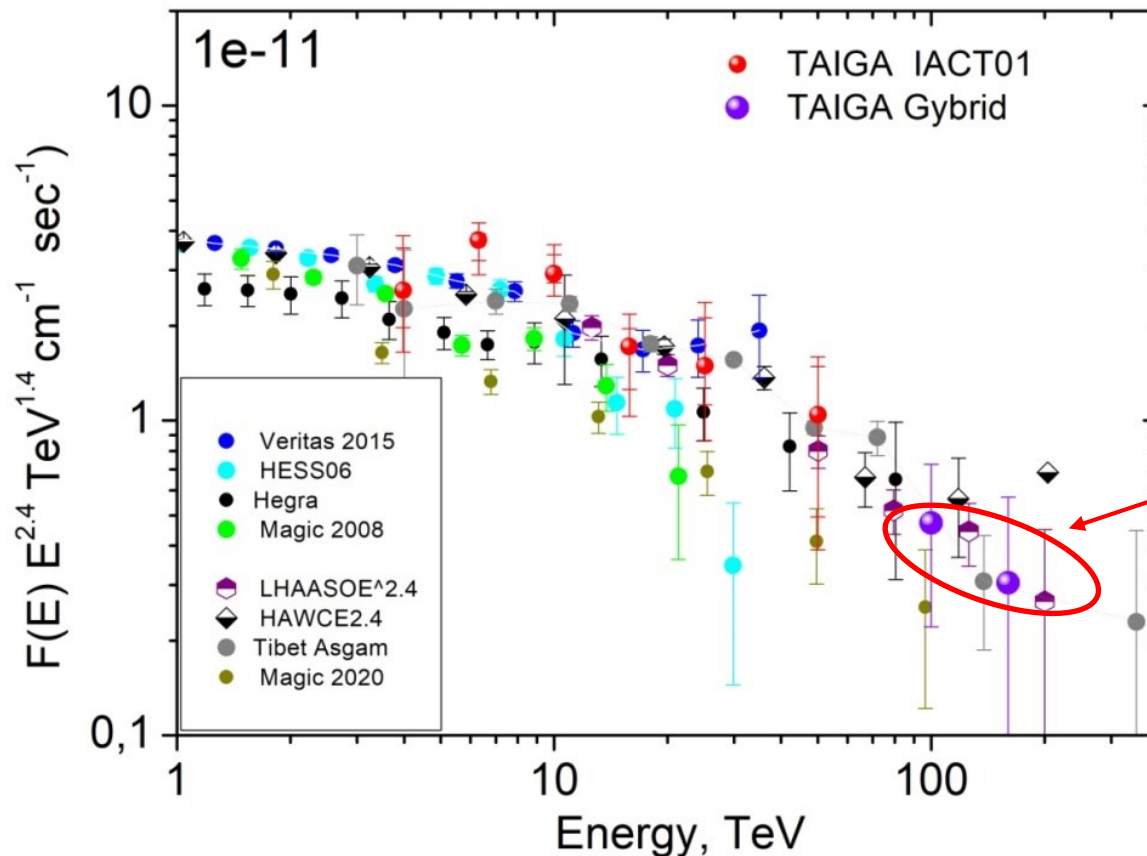
***Size* > 120 p.h.; N<sub>px</sub>>3;**

***0.36* ° < *dist* < -1.44°,**

***0.024* < *width* < (0.068° × lgSize - 0.047°),**

***length* < 0.145° × lgSize**

# The energy spectrum of gamma quanta from the Crab Nebula (150 hours)



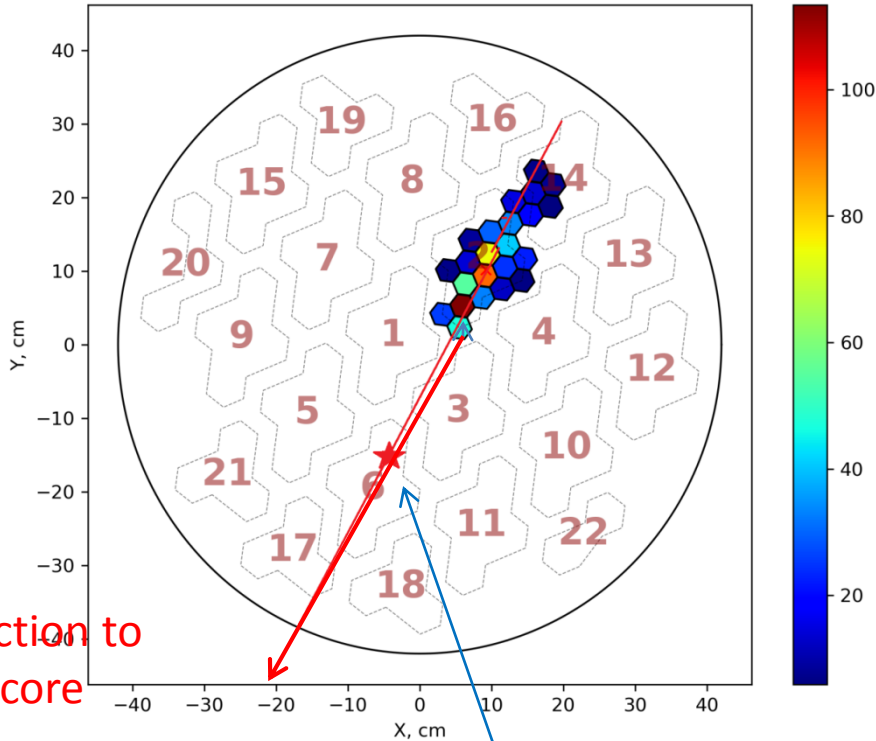
Hybrid events  
6 events  
0.25 km<sup>2</sup>

TAIGA -1 : >100 TeV 300 h ( 2-3 seasons) 40-60 gamma,



# ПРИМЕР ГИБРИДНОГО СОБЫТИЯ

Event #6281867  
 Ncl = 0, Npix = 23  
 Size = 709 p.e.  
 Width=1.6 cm,  $\alpha=8.8$  deg



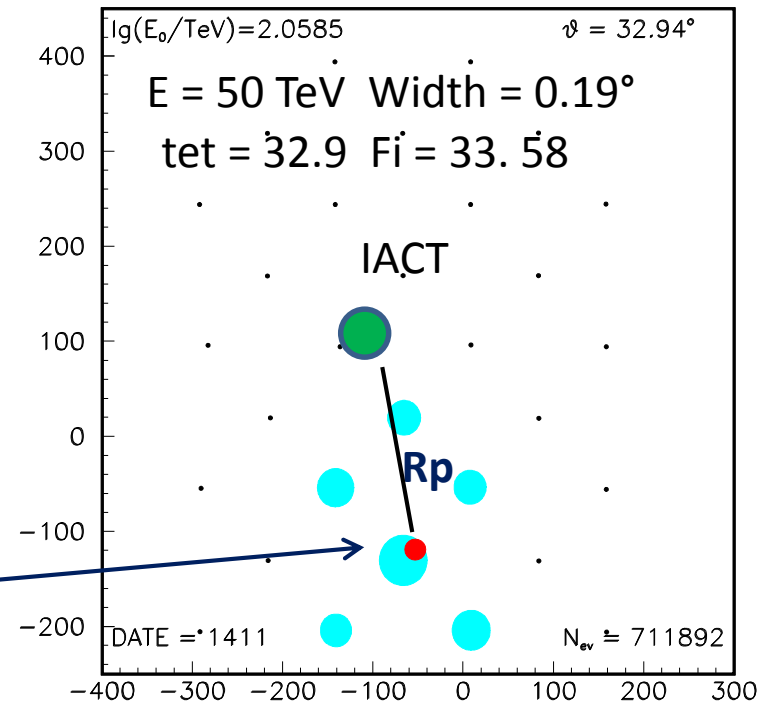
## Основные параметры

<b>IACT01</b>	<b>HiSCORE</b>
<b>Width</b>	<b>Thet, Fi</b>
<b>Length</b>	<b>X0, Y0 ось</b>
<b>Dist</b>	<b>Энергия</b>
<b>Alfa</b>	<b>Крутизна ФПР</b>
<b>Tet</b>	
<b>En</b>	

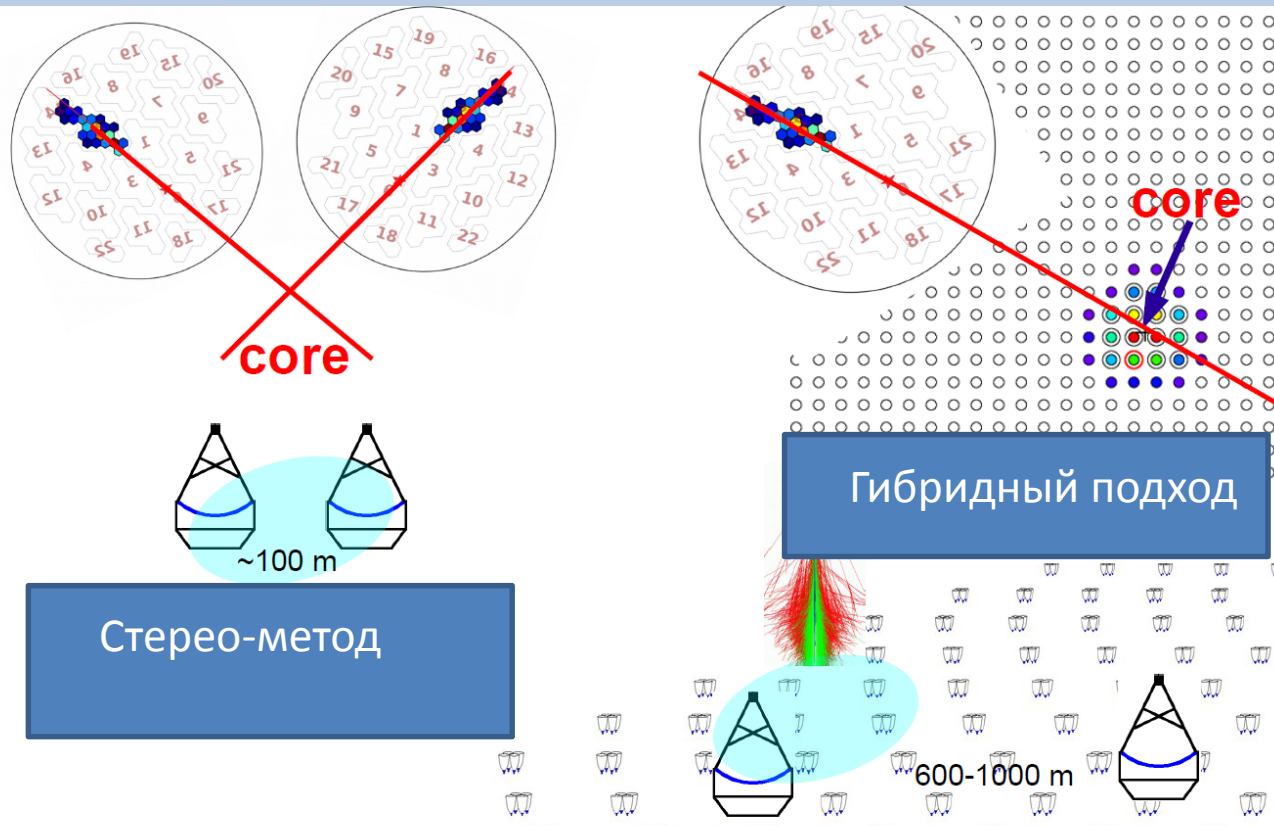
Direction to  
the core

Core position in IACT  
 after introduction of scaling factor  
 $Rp' = Rp/1500$

Core position  
in HiSCORE



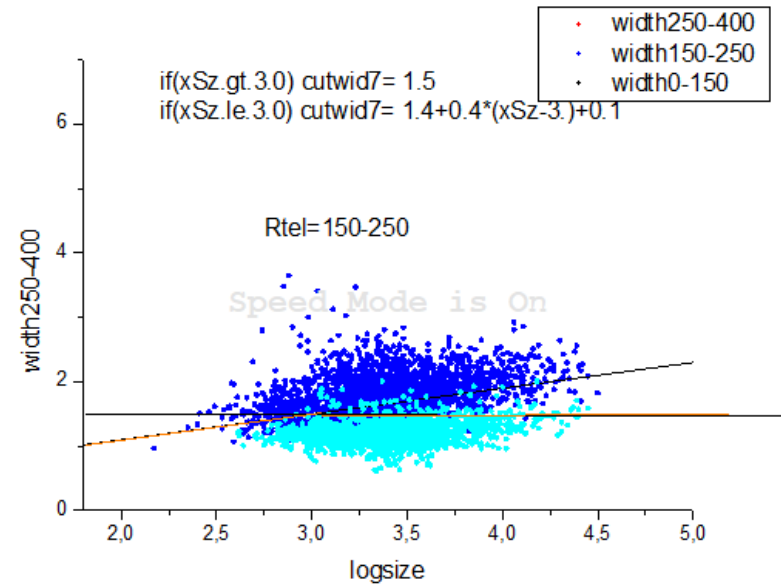
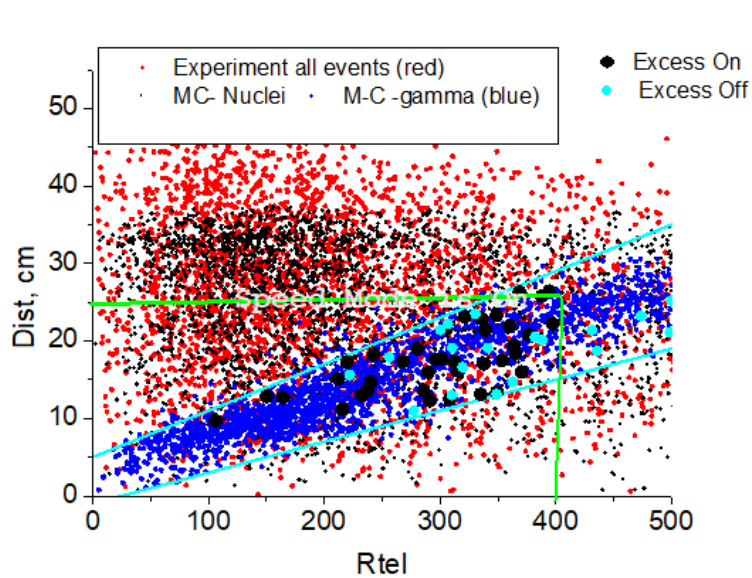
# РАЗВИТИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА



**СТА** – много очень дорогих телескопов

**ТАИГА** – немного дорогих телескопов АЧТ и много дешевых широкоугольных детектор – более дешевый подход для достижения большей площади установки

# Критерии отбора гамма событий гибридным методом



Критерии:  $X_S = \log_{10}(\text{Size})$   $\text{Size} > 150$  p.e.

1)  $\text{Width} < 1.5$  cm ( $X_S > 3$ ) cm

$\text{Width} < 1.4 + 0.4 * (x_{Sz} - 3.) + 0.1$  ( $X_S < 3$ ) cm

2)  $R_{tel} = 0-150$ m:  $\text{Length} < 3. + 1.8 * (x_{Sz} - 3.) - 0.5$  cm

$R_{tel} = 150-250$ m:  $\text{Length} < 5. + 0.5 * (x_{Sz} - 3.) - 0.5$  cm

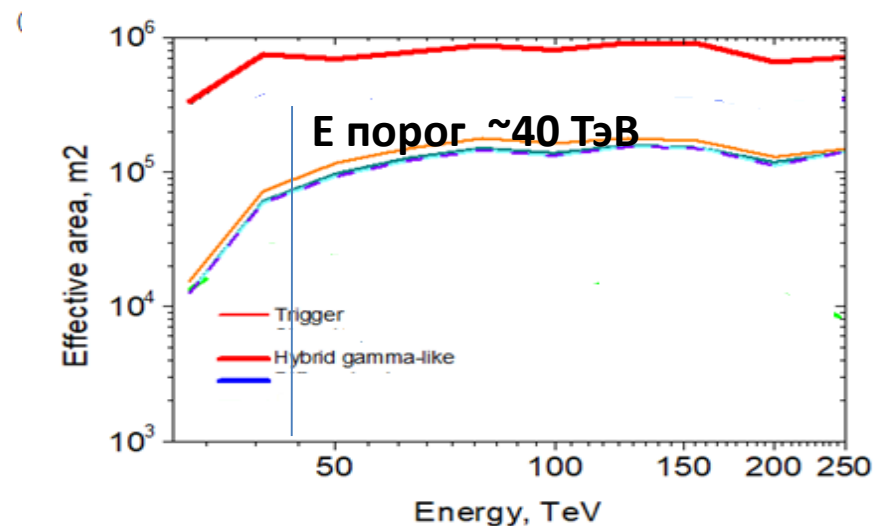
$R_{tel} = 250-400$ m:  $\text{Length} < 6. + 1.3 * (x_{Sz} - 3.) - 0.5$  cm

3)  $-1. + 0.04 * R_{tel} < \text{distance} < 5. + 0.06 * R_{tel}$

4)  $R_{tel} < 400$ m

5)  $\text{Psi}^2 < 1.5^\circ$

6)  $\alpha < 25^\circ$



# Избыток гамма-подобных ливней , полученных гибридным методом

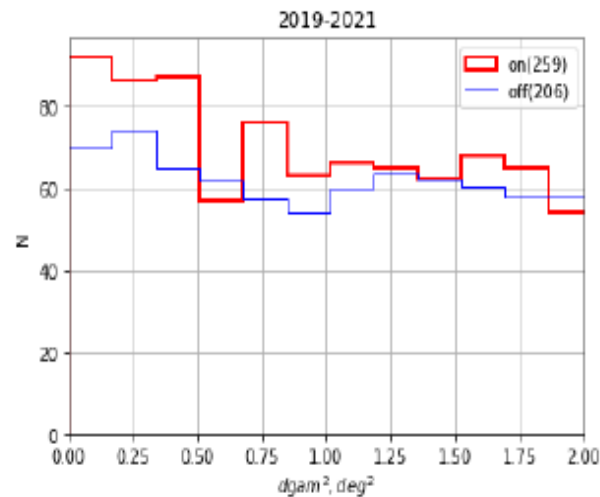
## Оптимальные критерии отбора для гамма-адронного разделения:

- 1)  $R_{tel} < 400$  m
- 2)  $size \geq 140$  p.e.
- 3)  $width > 0.2$  and  $width < cutwid$   
 $cutwid = 1.15 + 0.1 * \lg(size)$
- 4)  $Dist > RcPg\gamma 1$  and  $dist < RcPg\gamma 2$

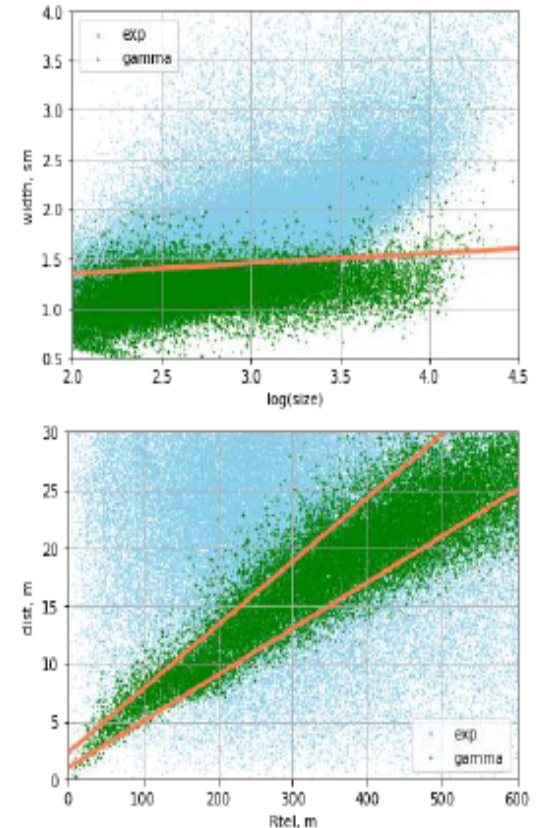
$$RcPg\gamma 1 = 2.3 + 0.055 * R_{tel}$$

$$RcPg\gamma 2 = 1 + 0.04 * R_{tel}$$

- 5)  $d\gamma_{am}^2 < 0.25 \text{ deg}^2$



Non = 259      Noff = 206      Excess = 53  
Наблюдаемый максимум распределения  
событий от источника находится в области  
меньше  $(0,5^\circ)^2$  и имеет статистическую  
значимость **3,8 $\sigma$** .

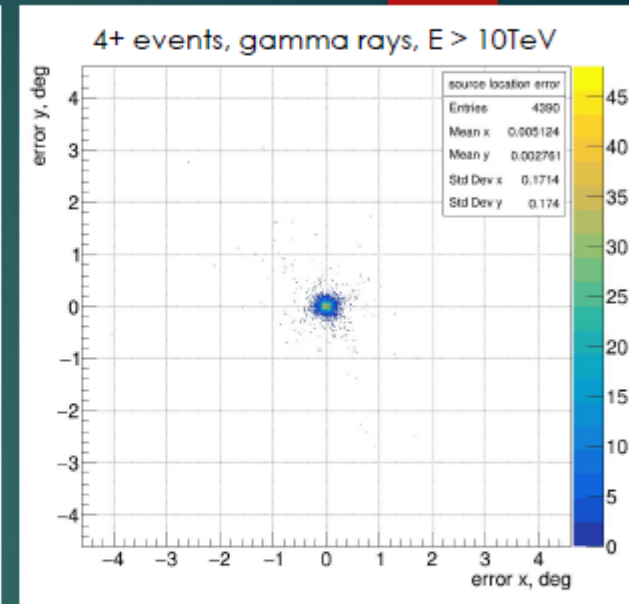
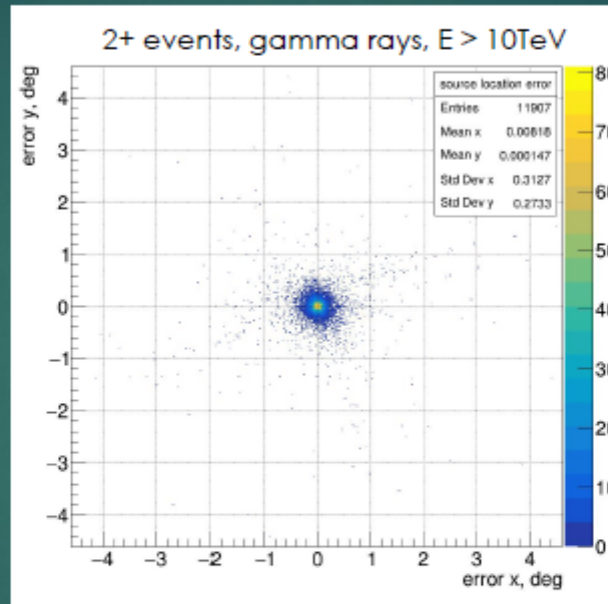
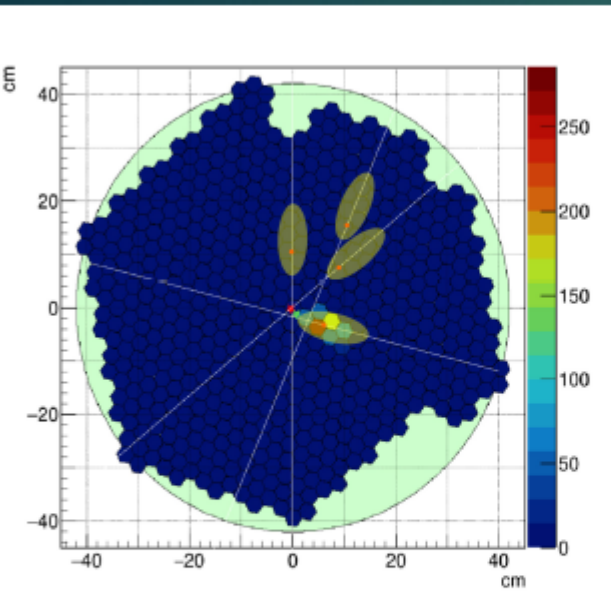


Полученное распределение по  $\gamma_{am}^2$  , ( $\gamma_{am}$  – угол между осью ливня и направлением на Крабовидную туманность в области более 40 ТэВ



# Стерео метод – Монте Карло

## Восстановление направления прихода ШАЛ



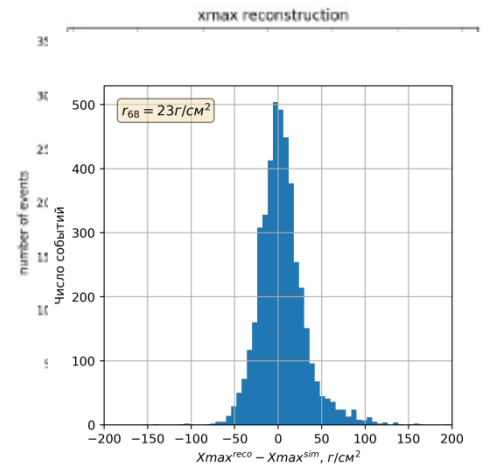
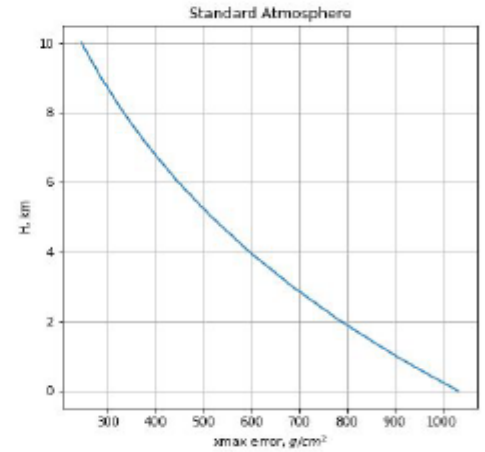
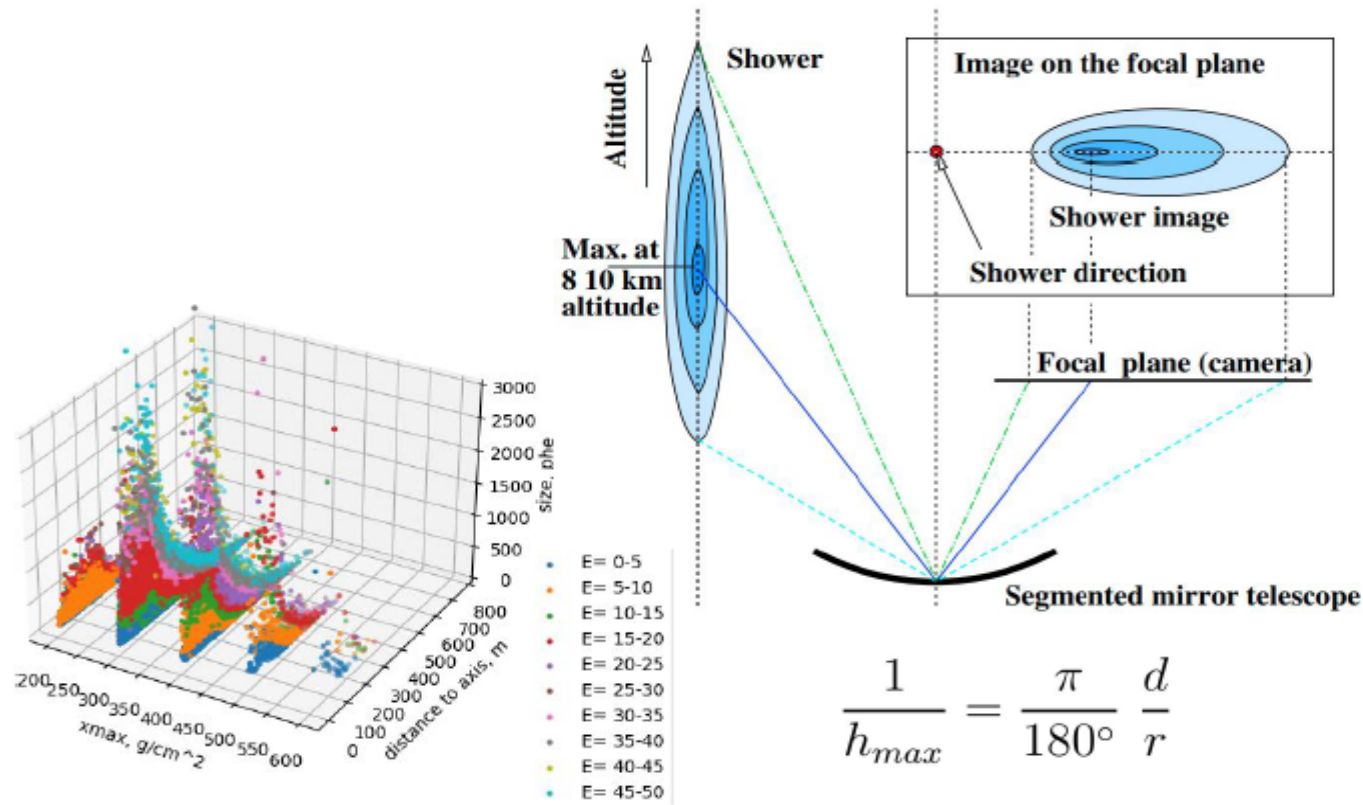
Направление прихода ШАЛ определяется как вынесенное (по размеру изображения и  $\sin\theta$  между линиями пересечения) среднее положение точек пересечения больших осей всех эллипсов.

Точность восстановления угла - 0.015-0.2 градуса, оси  $\sim 10$  м

Кат направление прихода был определен как радиус круга содержащего 68% событий, прошедших базовое подавление. Угловое разрешение для событий зарегистрированных более чем 2-мя телескопами:  $\theta_{68} = 0.2^\circ$

# Восстановление энергии

## Восстановление энергии



Точность восстановления глубины максимума  $23 g/cm^2$   
 Точность восстановления энергии  $\sim 10 \%$

# Эффективная площадь

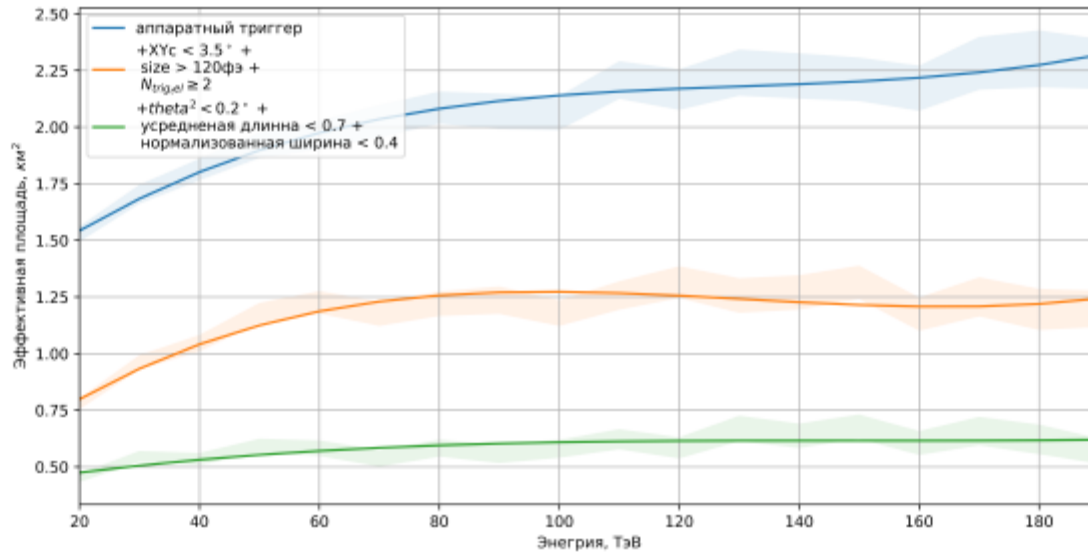


Рис. 7: Эффективная площадь установки TAIGA-IACT на разных этапах применения оптимальных критериев отбора для подавления адронного фона

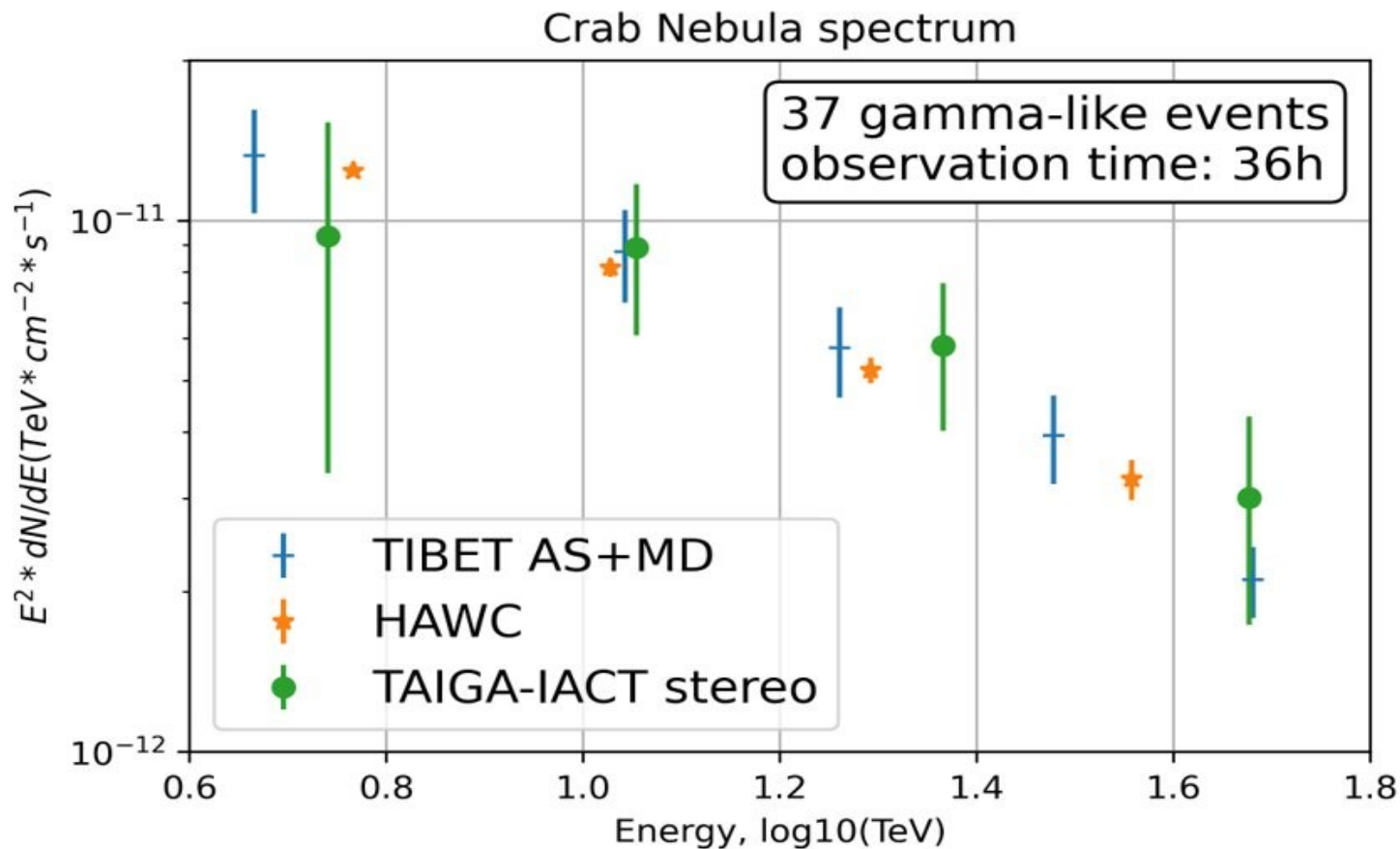
# Точности восстановления параметров ШАЛ стерео в М-К

Точности установки TAIGA-IACT, состоящей из 5 телескопов.:

- 1) положения источника составила 0.15 градуса;
- 2) положение оси ШАЛ восстанавливается с точностью 5 м.
- 3) Положение максимума развития с точностью 36 г/см<sup>2</sup>,
- 4) разрешение восстанавливаемого спектра гамма-квантов на уровне ~ 10%.
- 5) подавление адронного фона составляет ~  $4.2 * 10^{-5}$  при эффективной площади установки 0.6 км<sup>2</sup> в энергетической области выше 30ТэВ.
- 6) Это позволит набрать статистику при наблюдении Краба видной туманности - 1225 событий,
- 7) остатка сверхновой СТА1 - 132 события
- 8) от остатка сверхновой Тихо Браге 48 событий за 200 часов наблюдений.



# Спектр Краба, полученный стерео методом по одному сезону

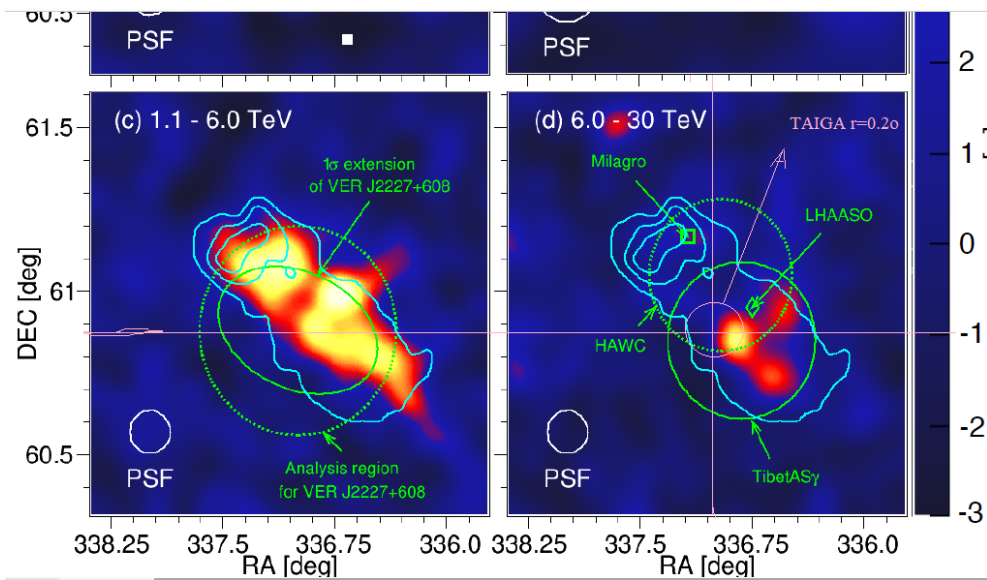


# LHAASO:12 источников, где есть гамма-кванты более 100 ТэВ

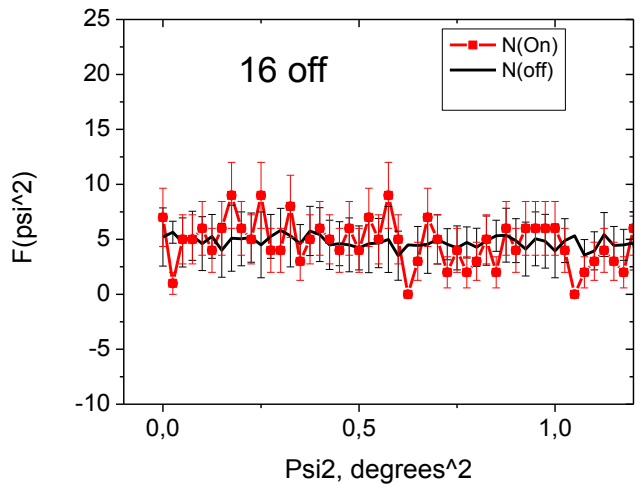
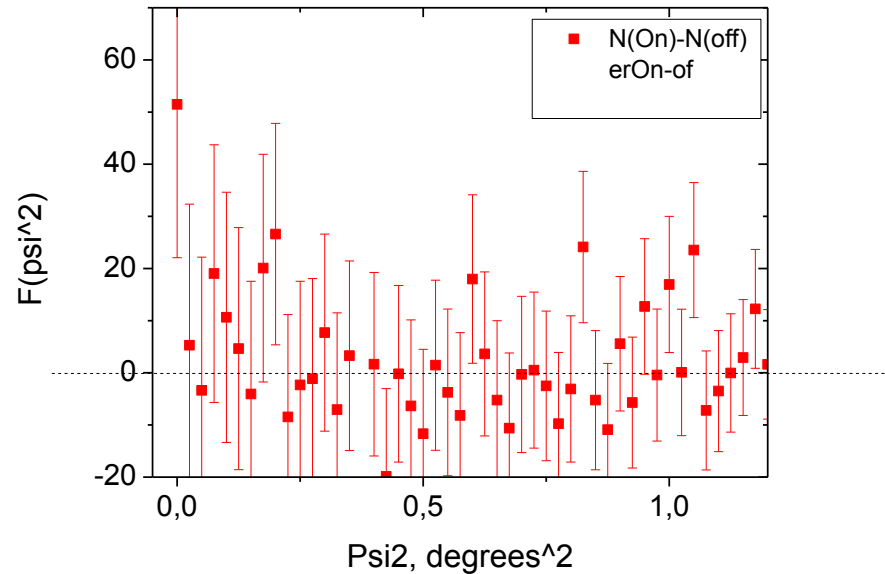
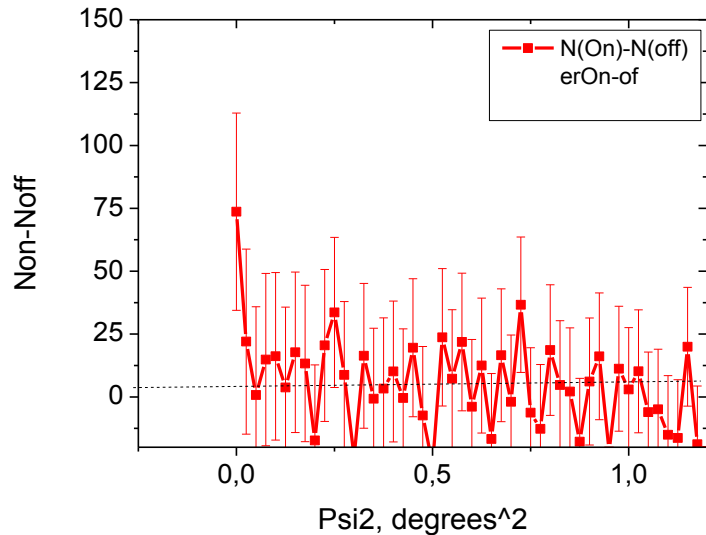
TABLE 1 | UHE  $\gamma$ -ray sources

Source name	RA (°)	dec. (°)	Significance above 100 TeV ( $\times\sigma$ )	$E_{\max}$ (PeV)	Flux at 100 TeV (CU)
LHAASO J0534+2202	83.55	22.05	17.8	$0.88 \pm 0.11$	1.00(0.14)
LHAASO J1825-1326	276.45	-13.45	16.4	$0.42 \pm 0.16$	3.57(0.52)
LHAASO J1839-0545	279.95	-5.75	7.7	$0.21 \pm 0.05$	0.70(0.18)
LHAASO J1843-0338	280.75	-3.65	8.5	$0.26 - 0.10^{+0.16}$	0.73(0.17)
LHAASO J1849-0003	282.35	-0.05	10.4	$0.35 \pm 0.07$	0.74(0.15)
LHAASO J1908+0621	287.05	6.35	17.2	$0.44 \pm 0.05$	1.36(0.18)
LHAASO J1929+1745	292.25	17.75	7.4	$0.71 - 0.07^{+0.16}$	0.38(0.09)
LHAASO J1956+2845	299.05	28.75	7.4	$0.42 \pm 0.03$	0.41(0.09)
LHAASO J2018+3651	304.75	36.85	10.4	$0.27 \pm 0.02$	0.50(0.10)
LHAASO J2032+4102	308.05	41.05	10.5	$1.42 \pm 0.13$	0.54(0.10)
LHAASO J2108+5157	317.15	51.95	8.3	$0.43 \pm 0.05$	0.38(0.09)
LHAASO J2226+6057	336.75	60.95	13.6	$0.57 \pm 0.19$	1.05(0.16)

Из них только один источник – Крайне точечный источник, остальные – протяженные - до 1 градуса. Поэтому необходимо развивать методику регистрации протяженных источников

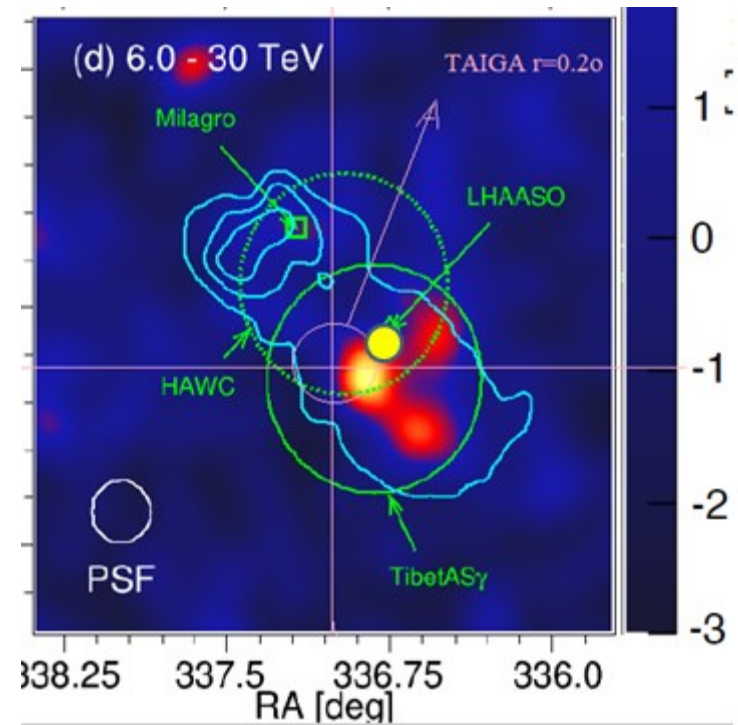
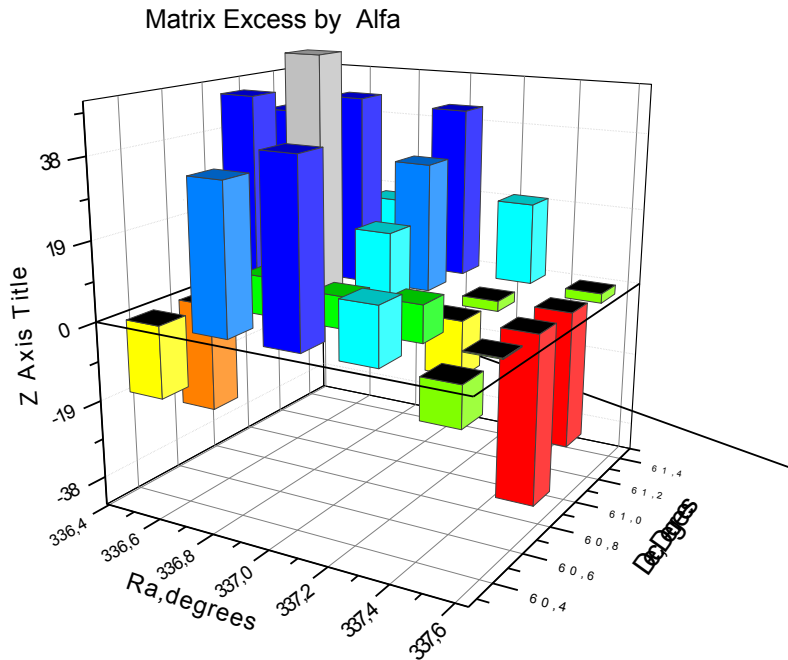


# Boomerang



По 1 и по 2 телескопу при отборе по alfa и tet2 избыток для разных фонов 50 – 96 событий с  $S= 1.5-2.5$ , по стерео режиму высокий порог  $\sim 50$  ТэВ, поэтому ничего не наблюдаем.

# Поиск максимума излучения в радиусе 0.5 градуса от выбранной позиции



# Заключение

- 1. Сформулирована научная программа и завершено развертывание первой очереди комплекса TAIGA – 120 станций HiSCORE и 3 телескопа.**  
Результаты первых тестовых сезонов работы комплекса, как гамма обсерватории вполне успешны:
- 2. Зарегистрированы сигналы от Краба и восстановлен спектр, также проведен поиск сигнала от Бумеранга тремя методами, развиваемыми для регистрации гамма квантов:**
  - а) одиночными телескопами,**
  - б) АЧТ 01 + АЧТ02 в стерео режиме**
  - в) гибридным методом АЧТ01+HiSCORE**
- 3. Зарегистрирован сигнал от Mkn-421 , и Mkn 501**
- 4. Перешли к исследованию особенностей КЛ в очень актуальной области энергетического спектра в диапазоне  $10^{14}$  - $10^{15}$  на установках HiSCORE +АЧТ, предваряющей колено, и продолжены исследования адронов по данным установки Тунка-133 до  $10^{18}$ , так как не получено интерпретации обнаруженных ‘колен’**
- 5. Начаты работы по созданию широкоугольных камер для на базе SiPM для совместной работы с HiSCORE**



# Программа на 4-5 лет

Обсерватория TAIGA будет самой Северной гамма-обсерваторией, и это расположение обеспечивает определенные преимущества для наблюдения источников с большими склонениями - источник гамма-излучения в остатках сверхновой Тихо Браге, СТА-1, будет в поле зрения детекторов обсерватории TAIGA в течение 500 ч в год.

## **1. Исследование энергетического спектра гамма-квантов от галактических источников**

**PWN : Крабовидная туманность, Dragonfly Nebula  
SNR: J2227+610 (G106.3+2.7), J2031 +415 (Cygnus Cocoon),  
сверхновая Тихо-Браге, СТА-1**

**Где адронные Пузыри – источники космических лучей ?**

**2. Длительный мониторинг и исследование края энергетического спектра ярких блазаров (Mrk-421, Mrk-501 и др) как метод поиска аномалий в распространении гамма-квантов во Вселенной и поиска аксионо-подобных частиц**

# Программа ( продолжение)

3. Поиск новых источников гамма-квантов, поиск гамма-квантов, ассоциированных с нейтрино высоких энергий и гамма-всплесков
4. Исследование спектра и массового состава космических лучей в диапазоне 100 -1000 ТэВ методами гамма-астрономии
- 5.Продолжить работы по исследованию массового состава при сверхвысоких энергий ( Тунка-133, Тунка-Гранде)
- 6.Поиск наносекундных оптических транзиентов с помощью установки HiSCORE ( $FoV = 60^\circ$  )и системы телескопов.  
«Открытие» сигнала от МКС и спутника Калипсо.

# TAIGA-10, 10 km<sup>2</sup>

Диапазон энергий 50 ТэВ – 1 ПэВ

1. 1000 станций HiSCORE
2. 100 малых широкоугольные черенковские телескопов.
3. 5-10 АЧТ

600 гамма от Краба с энергией выше 100 ТэВ за 300 часов  
6 сигма при режекция адронов только по углу.

10 сигма при совместной работой с малыми телескопами

Спасибо за внимание

# Согласование параметров выборок (Experiment-M-C)

