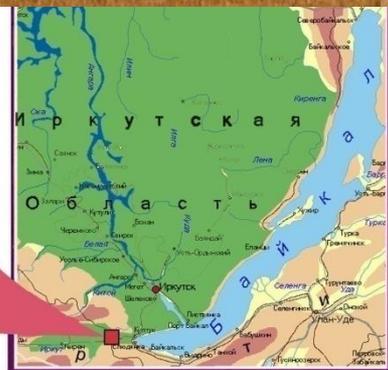


Эксперимент TAIGA: современный статус и перспективы развития.



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



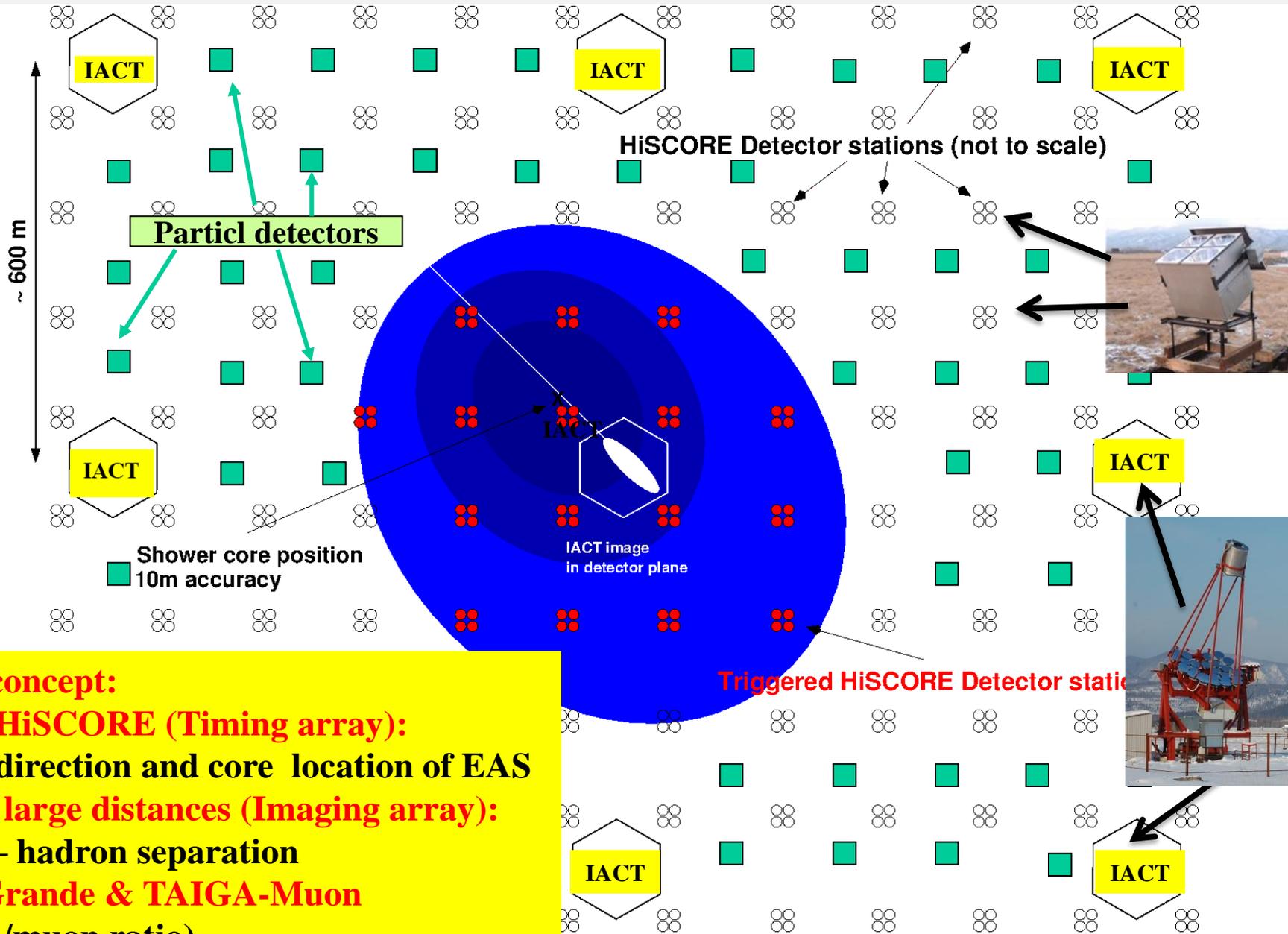
Н. Буднев,
Л. Кузьмичев
От коллаборации TAIGA

Грант РФФ 23-72-00016

TAIGA - Collaboration

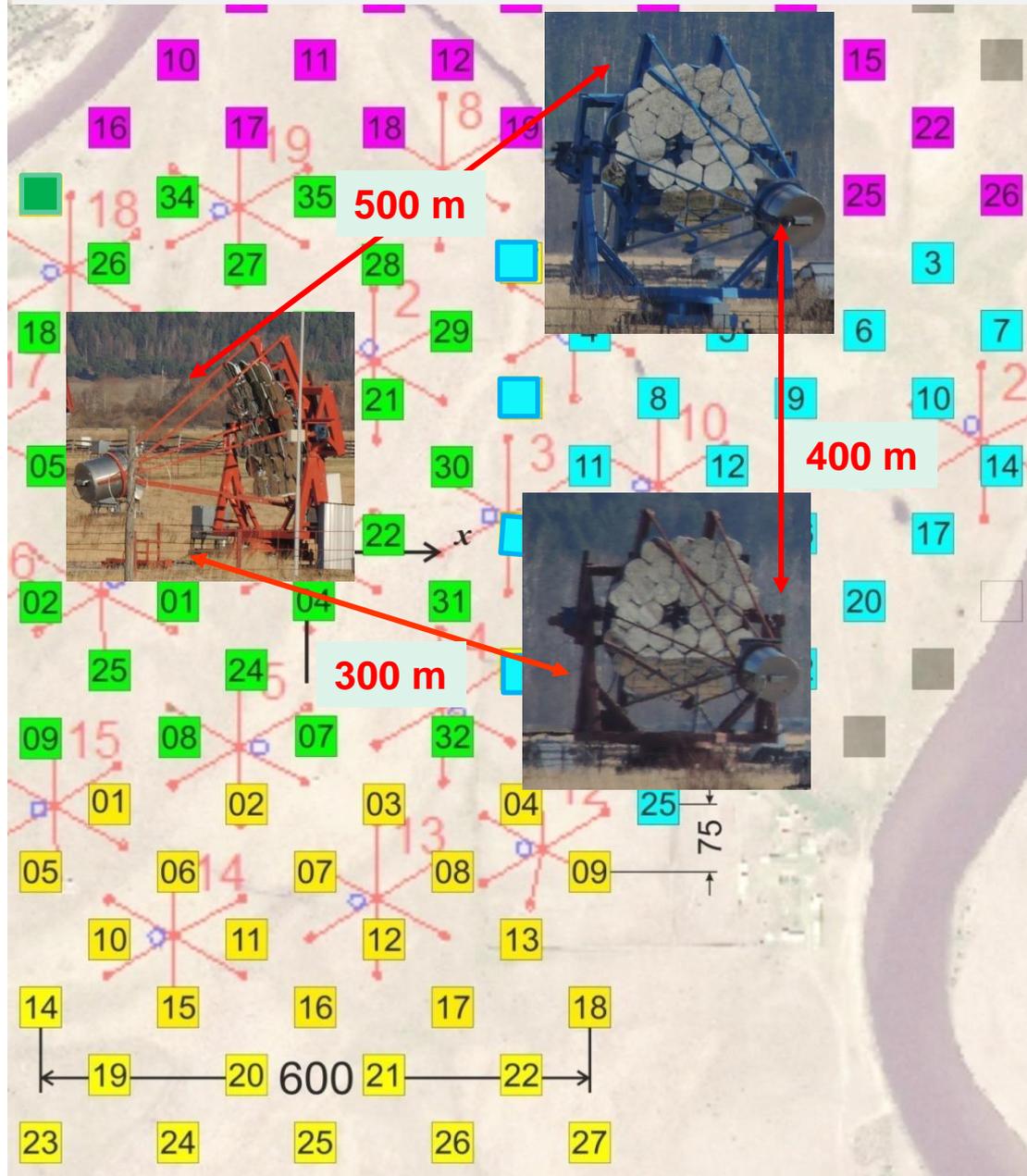
-  **Irkutsk State University (ISU), Irkutsk, Russia**
-  **Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University (SINP MSU), Moscow, Russia**
-  **Institute for Nuclear Research of RAS (INR), Moscow, Russia**
-  **Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of RAS (IZMIRAN), Troitsk, Russia**
-  **Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia**
-  **National Research Nuclear University (MEPhI), Moscow, Russia**
-  **Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (BINP), Novosibirsk, Russia**
-  **Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia**
-  **Altay State University (ASU), Barnaul, Russia**
-  **Fisica Generale Universita di Torino and INFN, Torino, Italy**

TAIGA: Imaging + non-imaging techniques



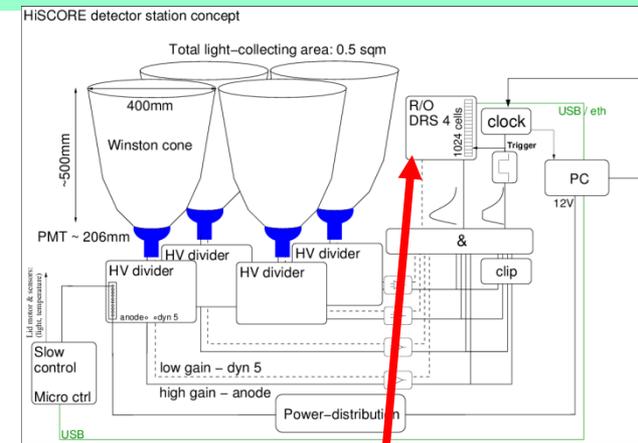
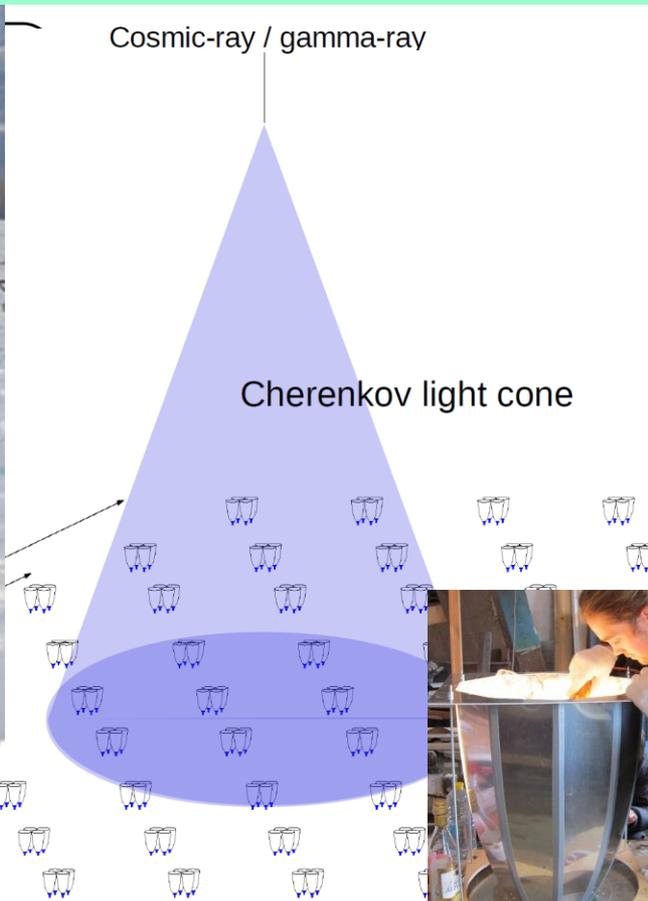
Hybrid concept:
TAIGA-HiSCORE (Timing array):
Energy, direction and core location of EAS
IACT at large distances (Imaging array):
gamma – hadron separation
Tunka-Grande & TAIGA-Muon
(electron/muon ratio)

TAIGA-1, in operation since 2022 year

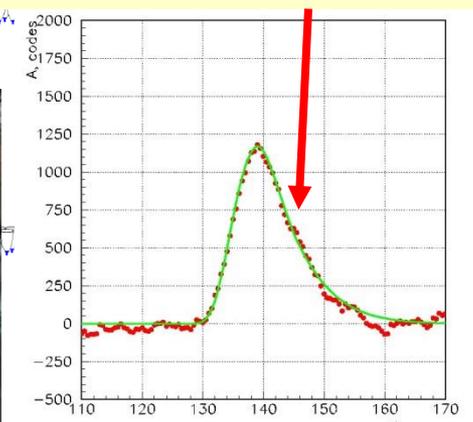


TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity Cosmic Origin Explorer)

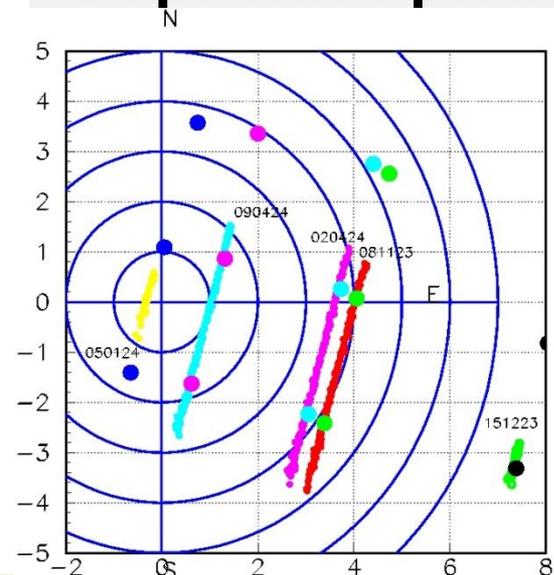
Consist of 120 Cherenkov stations distributed on 1,1 km² area with spacing 106 m. Each station includes four 8 inch PMTs equipped with a segmented Winston cone. The resulting total light collection area of a station is 0.5 m². **Threshold for CR- 100TeV, for γ - 50TeV**



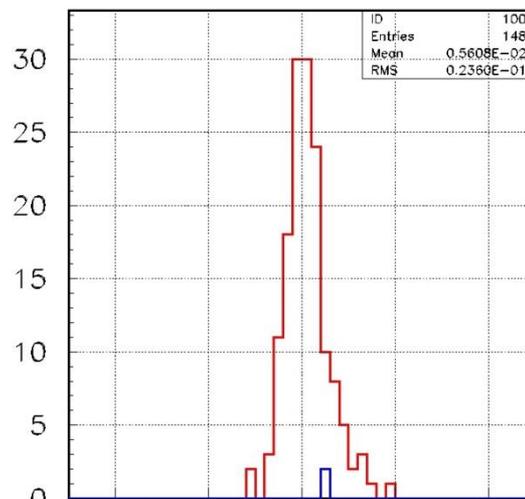
DRS-4 board (0.5 ns step)



Восстановления направления оси ШАЛ по данным о временах регистрации ШАЛ установкой TAIGA-HiSCORE

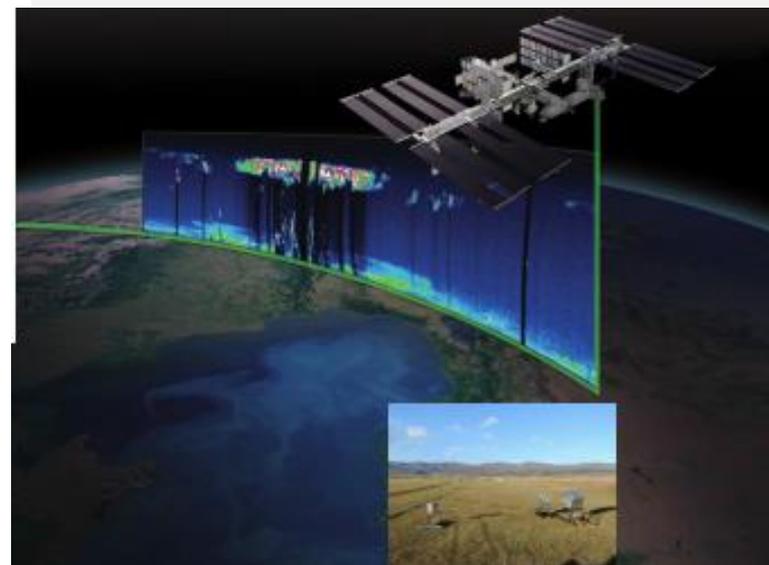


Траектории пролетов спутника DAQI-1 над комплексом TAIGA



Отклонение измеренного положения спутника от средней траектории

Угловое разрешение варьируется от **0,4–0,5 градуса** вблизи порога установки до **0,1 градуса** при срабатывании более 10 станций.



1. Energy resolution ~ 15%
2. Angular resolution ~ 0.1 – 0.4 deg
3. Accuracy positioning EAS core - 5 -6 m
4. Accuracy of X_{\max} measure ~ 20 -25 g/cm²
5. Large Field of View: ~ 0.6 sr

Для выравнивания аппаратных задержек всех станций установки TAIGA-HiSCORE с точностью **1нс** используются результаты регистрации световых импульсов от лидара на борту спутника DAQI1 и событий ШАЛ с числом сработавших станций больше 50.

The TAIGA – IACT

The TAIGA - IACT

First 2017y, second 2019y, third 2022y

situated at the vertices of a triangle

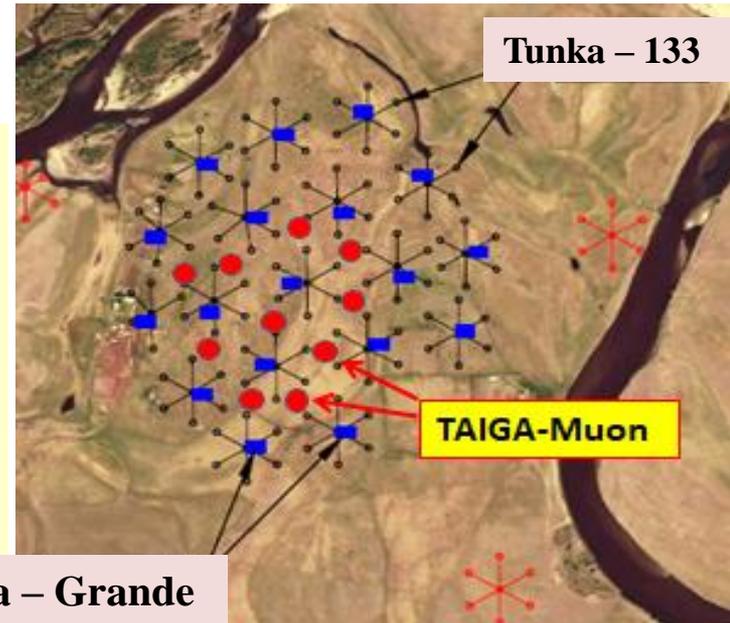
with sides: 300 m, 400 m and 500 m about

- **34-segment reflectors (Davis-Cotton)**
- **Diameter 4.3 m, area $\sim 10 \text{ m}^2$**
- **Focal length 4.75 m**
- **Threshold energy $\sim 2 - 3 \text{ TeV}$**
- **Camera - 600 PMT XP1911 $\varnothing 19 \text{ mm}$**
- **FoV - 9.6° (pixel FoV 0.36°)**
- **PSF $\sim 0.1^\circ$**
- **CCD for checking telescope pointing direction.**



The TAIGA particle detectors.

- Permanent absolute energy calibration of Cherenkov arrays Tunka-133 and TAIGA-HiSCORE.
 - Round-the-clock duty cycle;
 - Improvement of mass composition data
 - Rejection of p-N background
- For energy > 1 PeV



Tunka - Grande



19 Tunka - Grande scintillation station

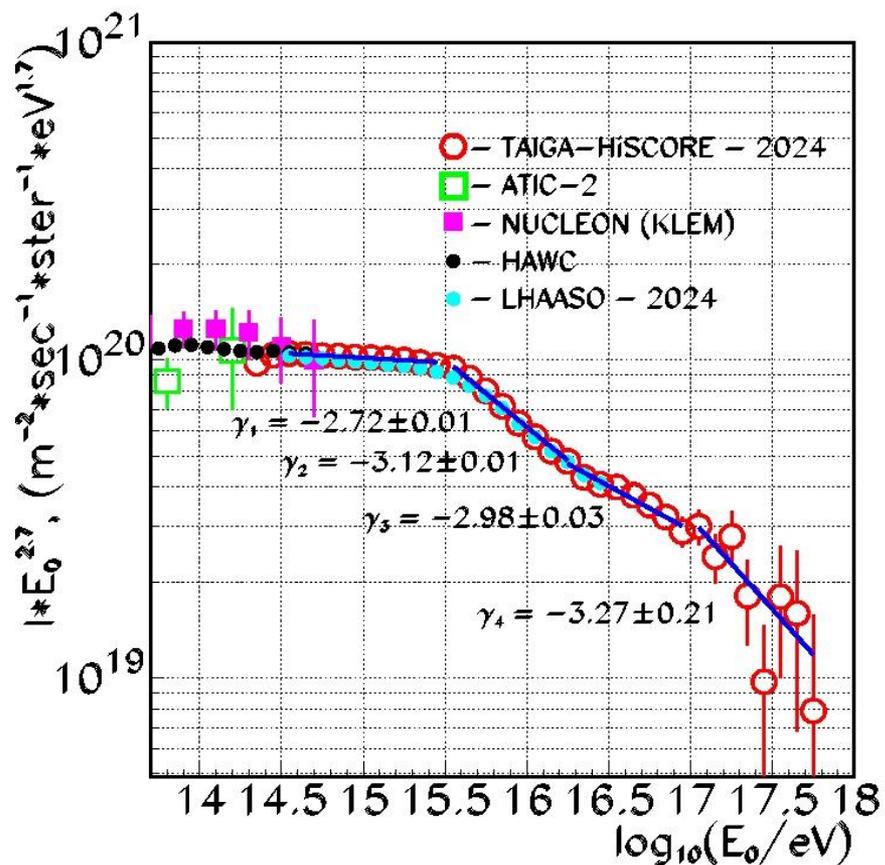


12 former KASCADE-Grande scintillation counters with $S=0.64 \text{ m}^2$ in surface part of 19 station

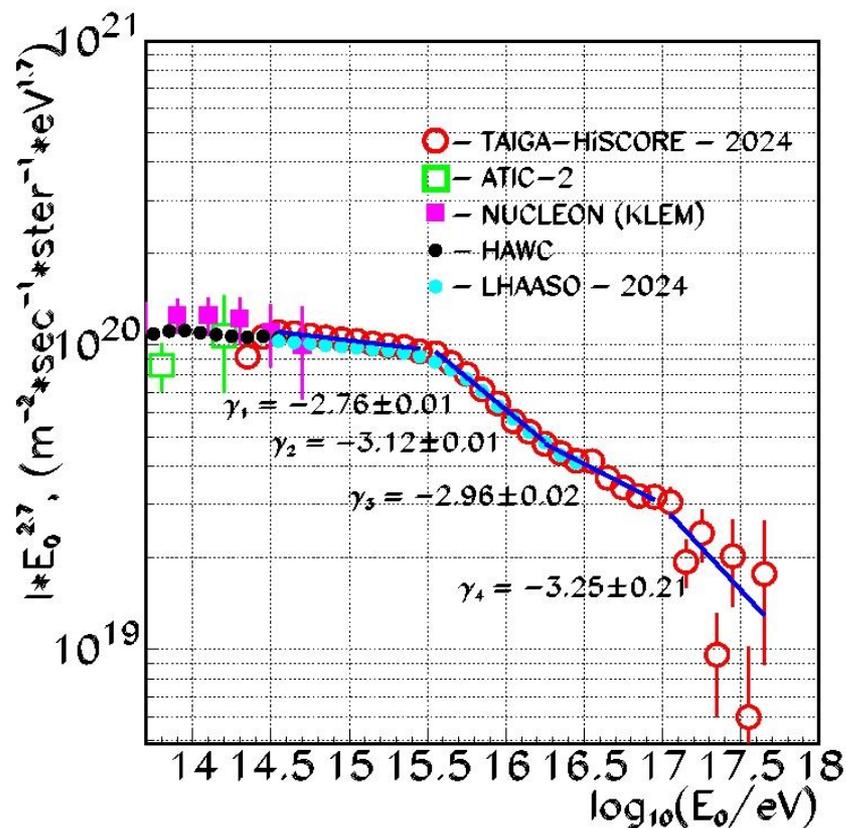


8 the same underground muon counters in 19 stations.

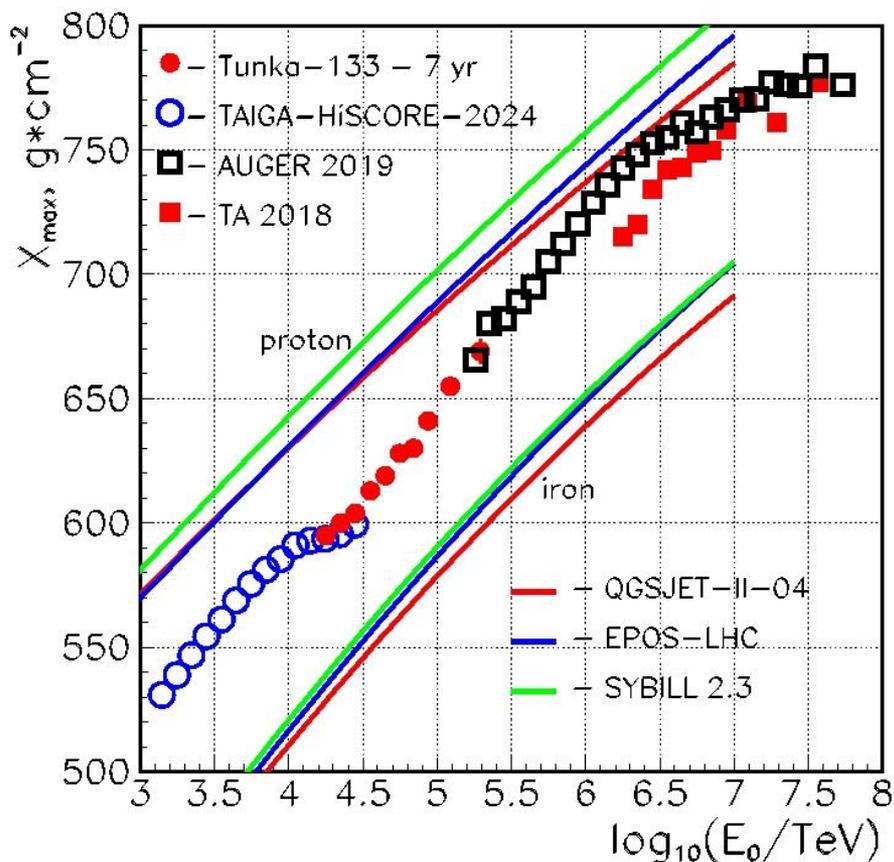
Cosmic-ray physics



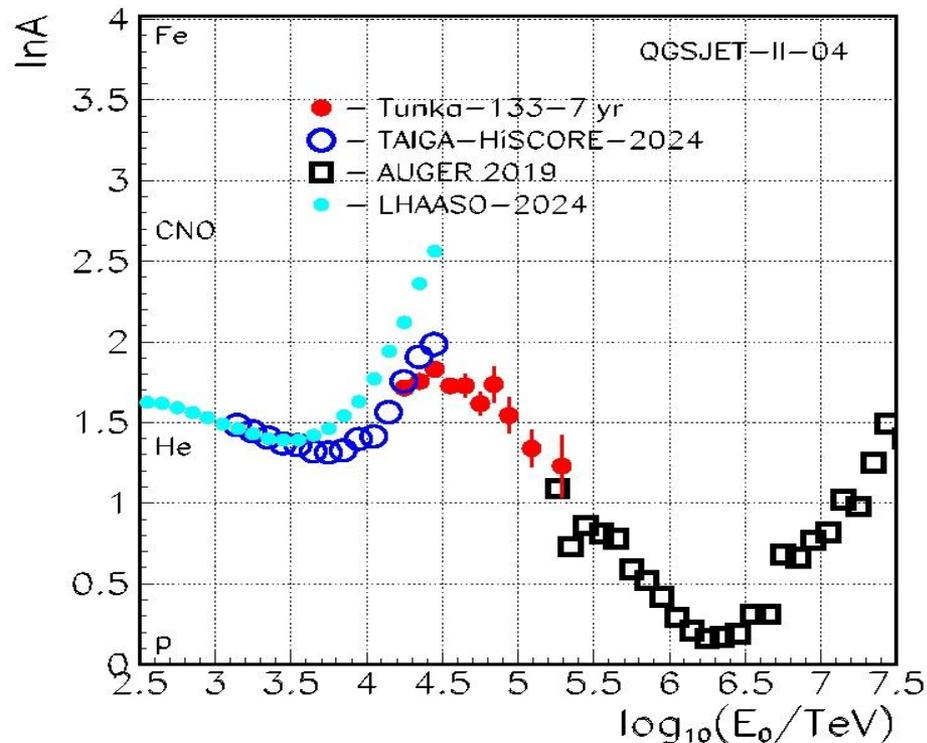
Дифференциальный энергетический спектр космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE для направления оптических станций в зенит (7.950.000 событий).



Дифференциальный энергетический спектр космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE для направления станций на юг под углом 25° к зениту (10.600.000 событий).



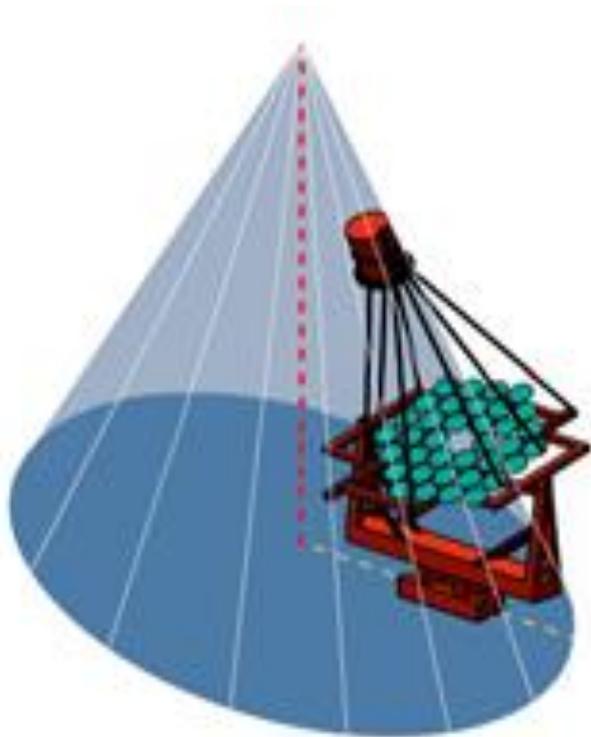
Глубина максимума ШАЛ, определенная по результатам измерения крутизны функции пространственного распределения черенковского света ($P = Q_{80}/Q_{200}$) с помощью установки TAIGA-HiSCORE



Средний логарифм массового состава космических лучей, восстановленный, используя результаты измерений средней глубине максимума ШАЛ с помощью установок TAIGA-HiSCORE и Тунка-133

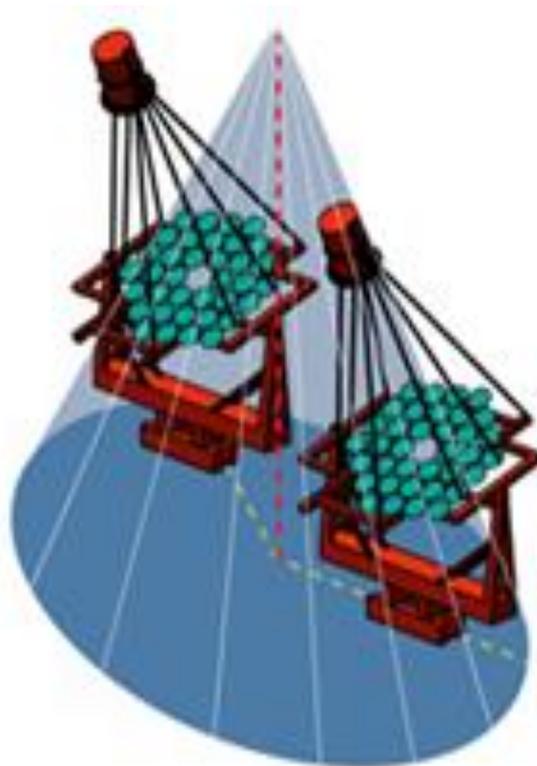
**Марк Терновой
Определение глубины максимума по длительности импульса для установки TAIGA-HiSCORE**

Три режима анализа совместных данных АЧТ установки TAIGA-IACT и широкоугольной установки TAIGA-NiSCORE при исследовании потоков космических лучей.



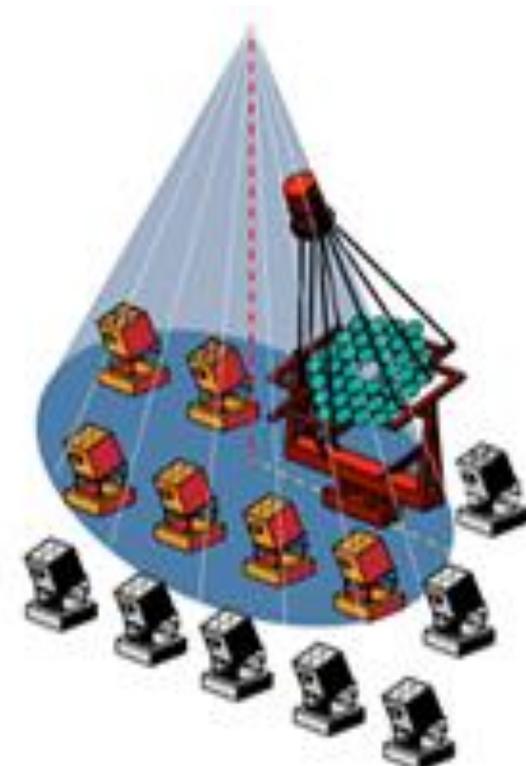
Автономный (моно) режим

Порог - 6 ТэВ



Сtereo режим

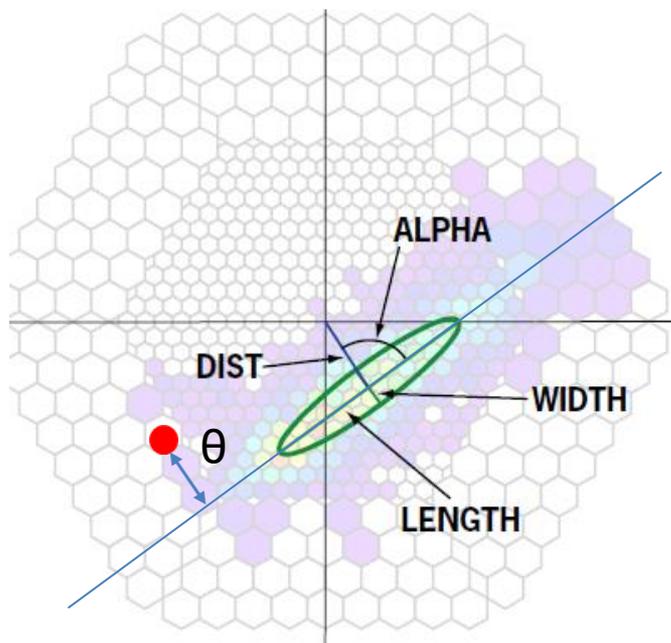
Порог - 12 ТэВ



Гибридный режим

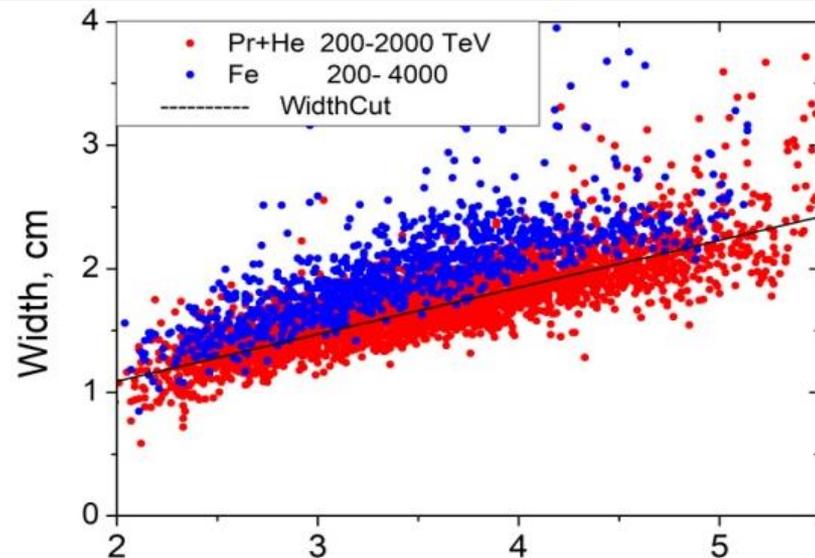
Порог 100 – 200 ТэВ

Выделение легкой компоненты ПКЛ, используя параметры черенковских изображений ШАЛ.

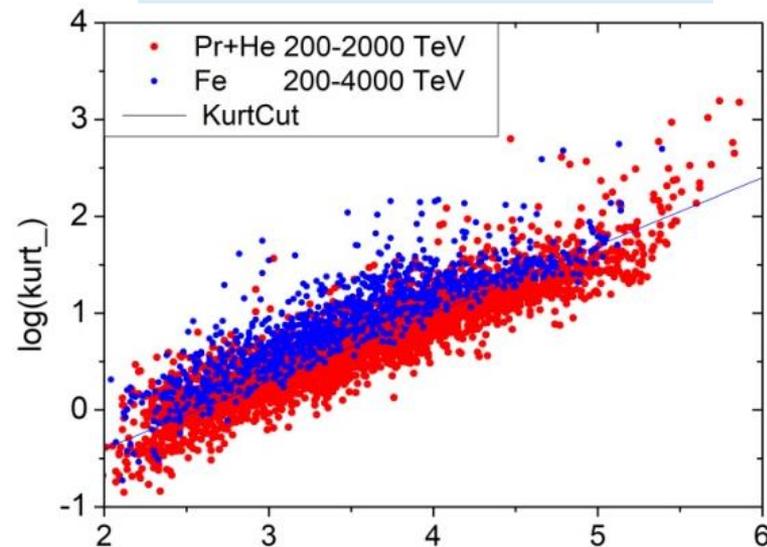


Параметры изображений ШАЛ, чувствительные к типу ядра ПКЛ:

- ширина изображения **width(Size)** в зависимости от полного числа фотоэлектронов в камере **Size**
- третий момент **kurt(Size)**, характеризующий остроту вершины изображения

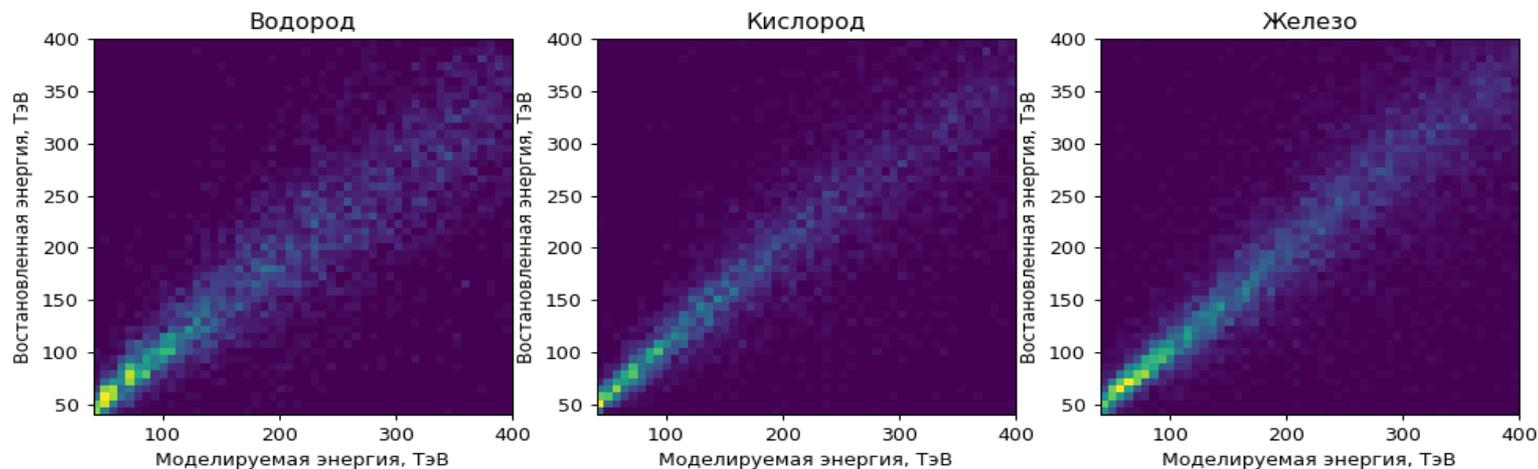


Зависимость Width от log (Size)

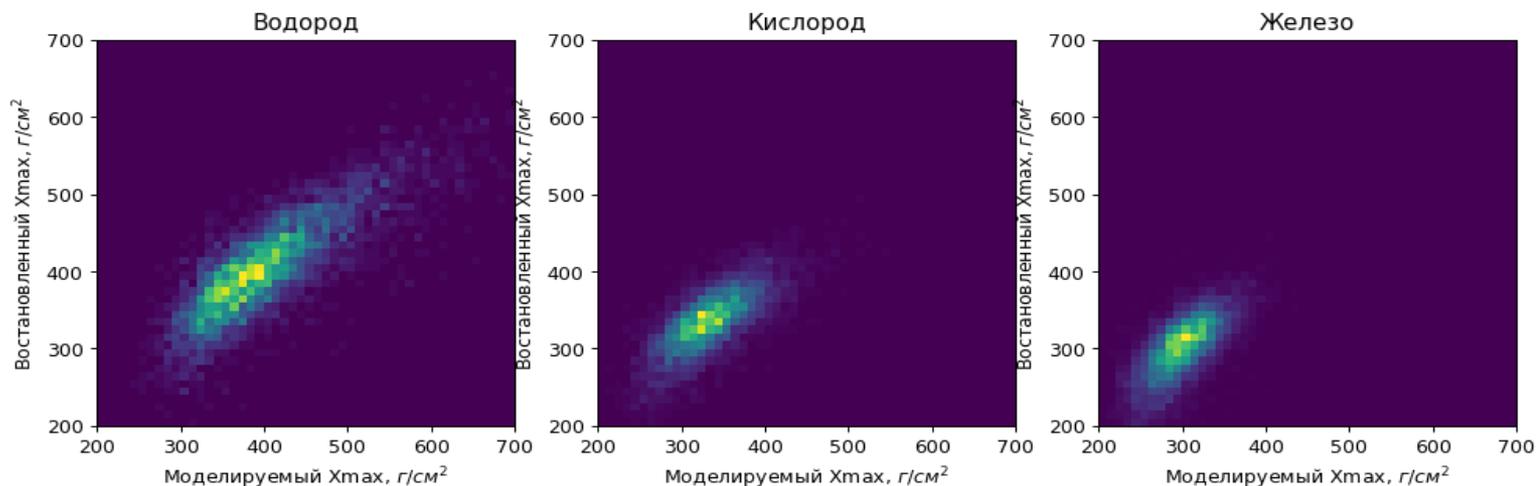


Зависимость Kurt от log (Size)

Корреляция моделируемых и восстановленных параметров первичных ядер, по данным о черенковских изображениях ШАЛ, регистрируемых в стерео-режиме установкой TAIGA-IACT

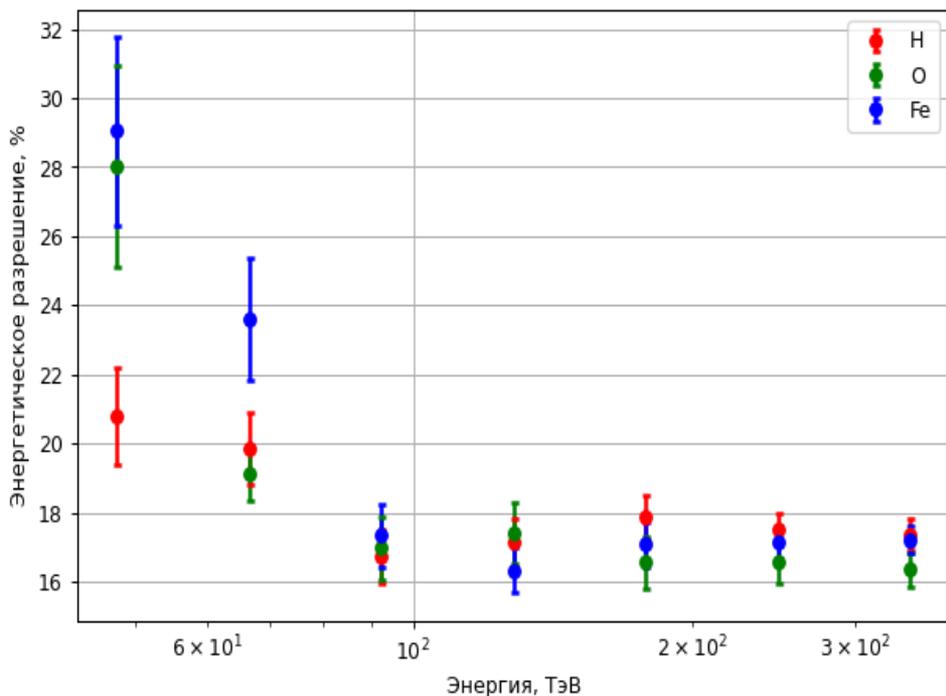


Корреляция моделируемой и восстановленной энергии первичных ядер водорода, кислорода и железа

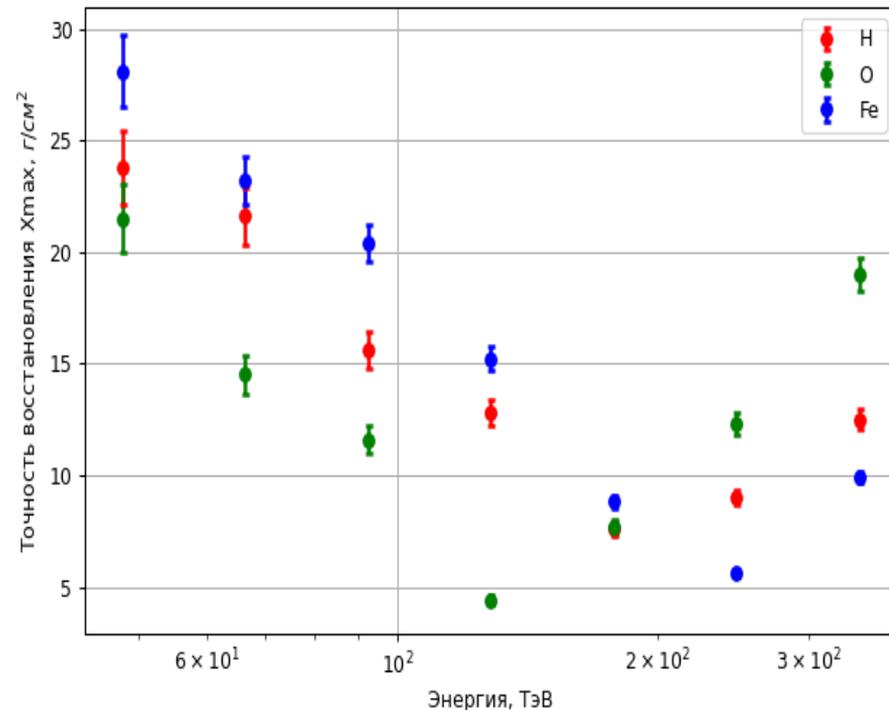


Корреляция моделируемых и восстановленных значений X_{\max} первичных ядер водорода, кислорода и железа

Корреляция моделируемых и восстановленных параметров первичных ядер, по данным о черенковских изображениях ШАЛ, регистрируемых в стерео-режиме установкой TAIGA-IACT

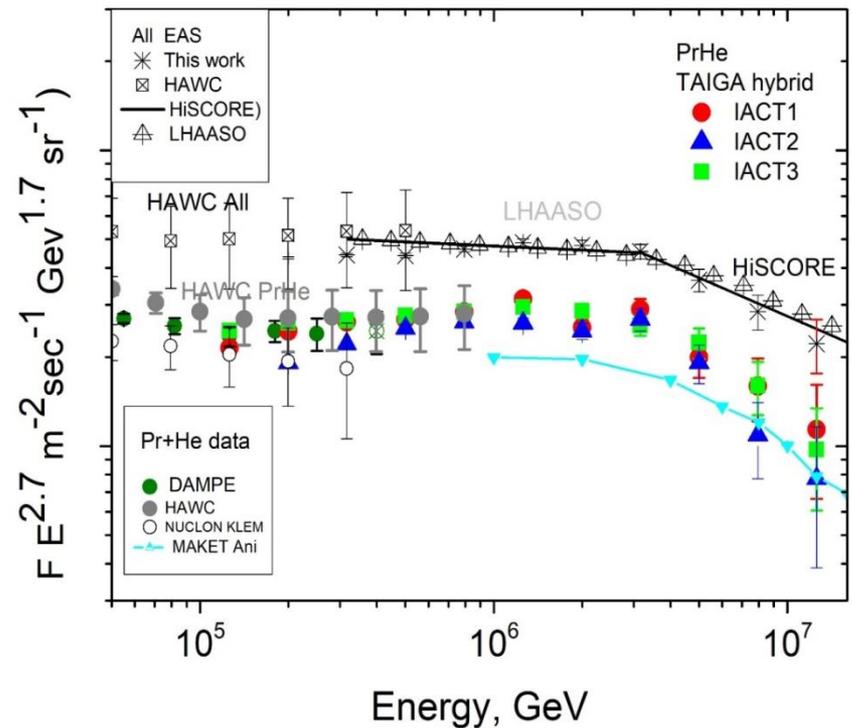
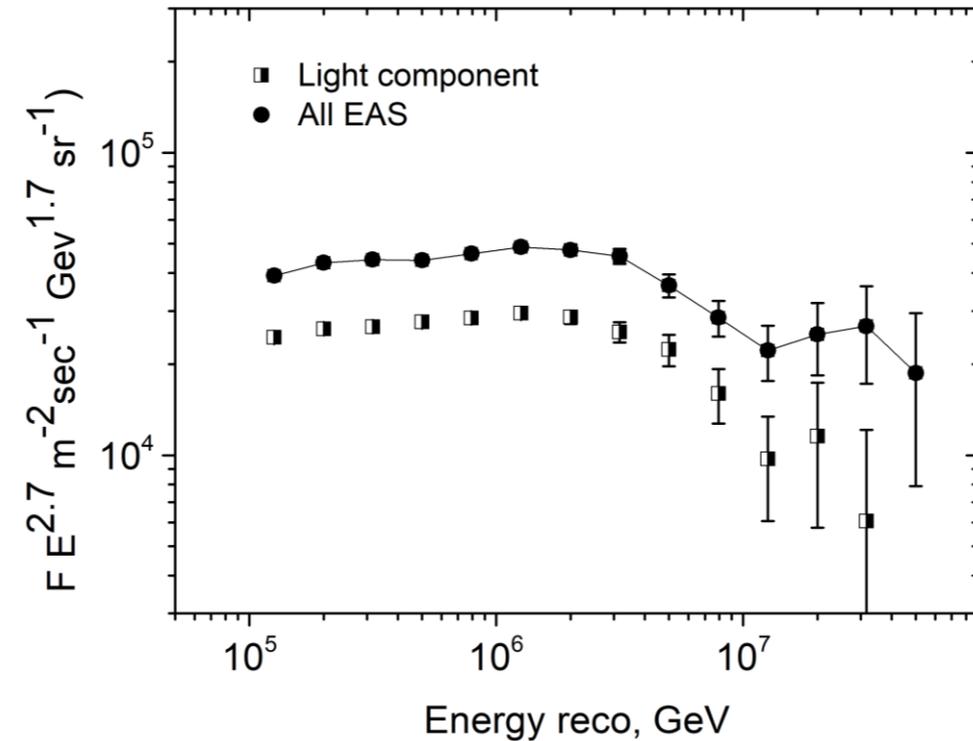


Энергетическое разрешение для ШАЛ от первичных ядер водорода, кислорода и железа, по данным о параметрах черенковских изображений ШАЛ, регистрируемых в стерео-режиме телескопами установки TAIGA-IACT.



Зависимость точности восстановления глубины максимума развития ШАЛ от энергии и типа первичного ядра, по данным о параметрах черенковских изображений ШАЛ, регистрируемых в стерео-режиме телескопами установки TAIGA-IACT

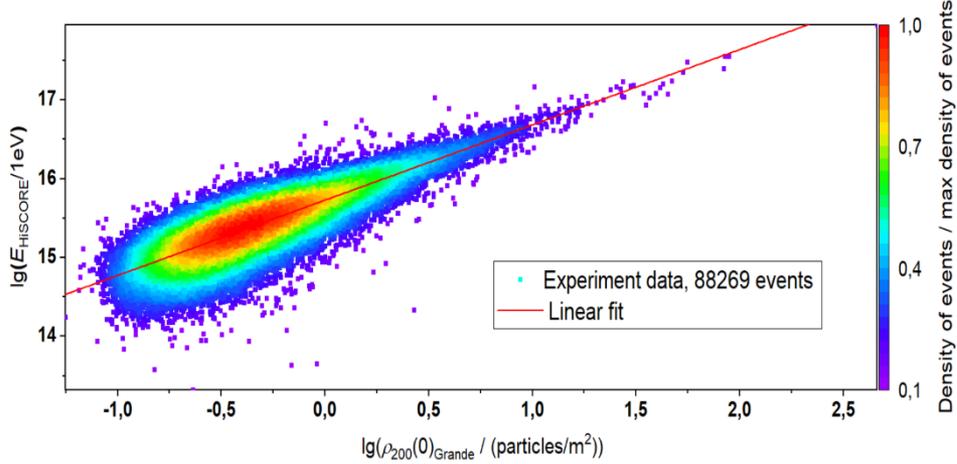
Легкая компонента ПКЛ (p, He) в области «классического колена» по результатам гибридных измерений.



1. Спектры легкой компоненты (Pr+He), демонстрируют ярко выраженный излом при энергии около 3 ПэВ, что подтверждает гипотезу, что излом различных компонент КЛ происходит по жесткости частиц, и определяется именно легкой компонентой, как наиболее представленной в спектре до энергии излома.
2. Не подтверждается излом спектра протонов при энергии 900 ТэВ, полученный ранее в эксперименте ARGO-YBJ.
3. Интенсивность Pr + He в области ~ 200 ТэВ хорошо согласуется с данными прямых экспериментов DAMPE и NUCLON

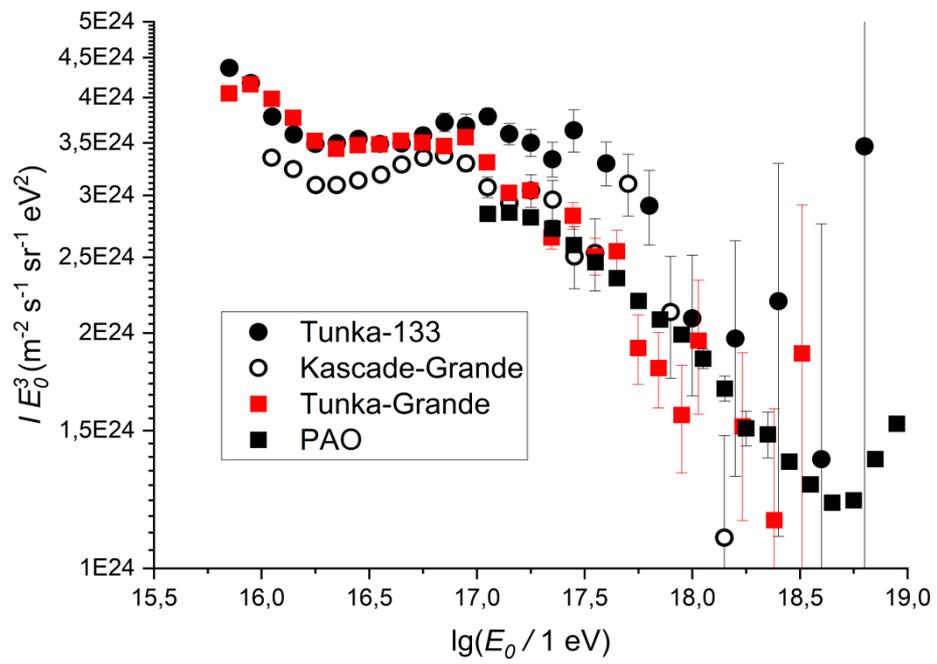
Энергетический спектр КЛ по данным установки Tunka-Grande

Для определения энергии ШАЛ по данным установки Tunka-Grande используется параметром ρ_{200} - плотность заряженных частиц на расстоянии 200 м от положения оси ШАЛ



Корреляция параметра ρ_{200} , с первичной энергией ШАЛ, восстановленный по данным черенковской установки TAIGA-HiSCORE.

Энергетическое разрешение 26% для $E \geq 30$ ПэВ.



Энергетический спектр ПКЛ по данным установки Tunka-Grande за 2017 – 2023 годы

$\gamma = -3,18 \pm 0,005$ при $E < 20$ ПэВ
 $\gamma = -3,0 \pm 0,01$ при $20 \text{ ПэВ} < E < 100 \text{ ПэВ}$
 $\gamma = -3,26 \pm 0,03$ при $E > 100 \text{ ПэВ}$
 (второе колено!)

Gamma-astronomy

1 Наблюдение галактических ПэВатронов:

Крабовидная туманность, Dragonfly, J2227+610 (G106.3+2.7), J2031 +415

(Cygnus Cocoon), CTA-1, LHAASO J0341+5258, LHAASO J07003+14005, LHAASO J2228+6100 и т.д., поиск новых источников

Первые результаты

- Крабовидная туманность - (Доклад П.Волчугова)
- J2227+610 (G106.3+2.7)(Boomerang) - спектр осенью 2025

2. Долговременный мониторинг и изучение энергетического спектра ярких блазаров: 1ES 0229+200, 1ES 1959+650, Mrk 501, Mrk 421, Arp 220, M82.

3. Поиск диффузных гамма-квантов сверхвысоких энергий (

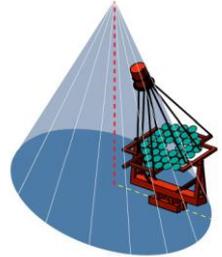
4. Поиск гамма-квантов Тэвного диапазона от гамма-всплесков

5. Поиск гамма-квантов ассоциированных с энергичными нейтрино.

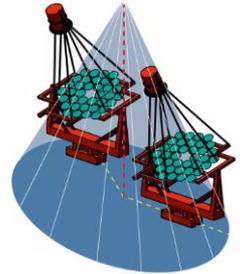
6 Поиск наносекундных оптических транзиентов астрофизического происхождения

Three approaches for detecting of gamma rays in the TAIGA experiment by Cherenkov detectors

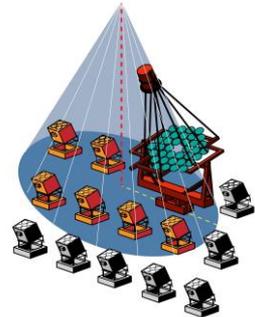
1. Standalone mode of IACTs operation ($E > 2-3$ TeV).
Hadronic background rejection $\sim 10^{-4}$



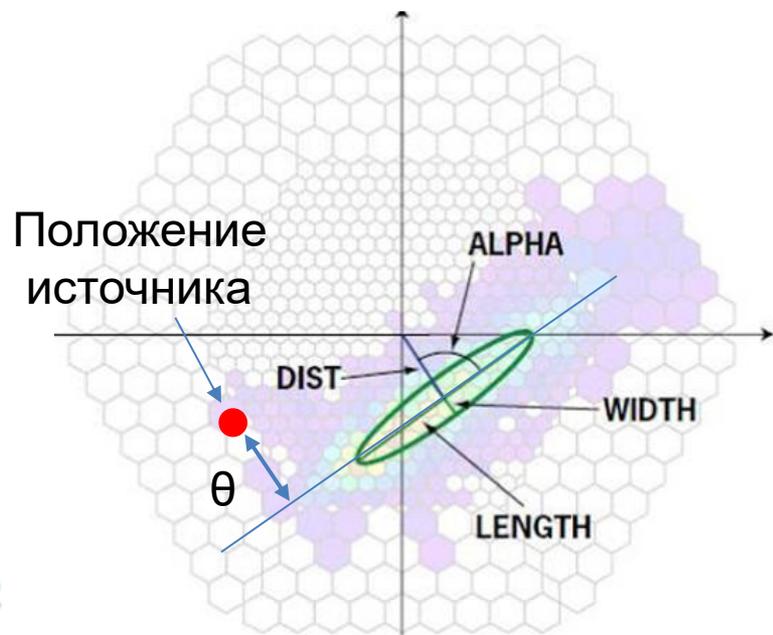
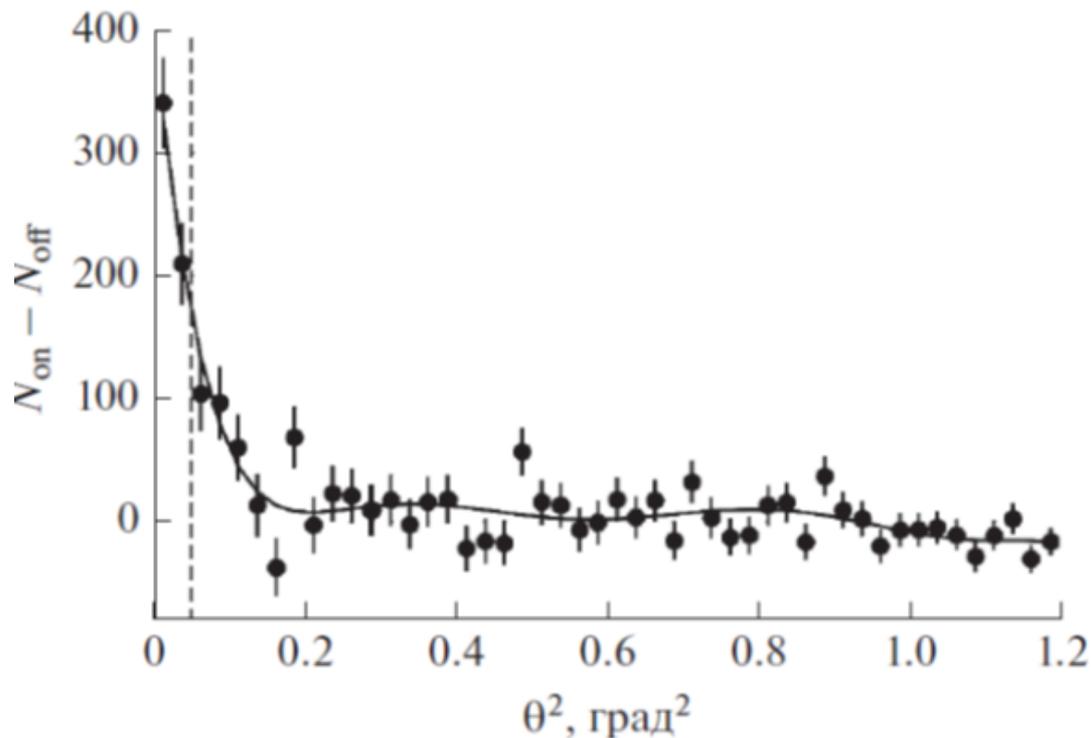
2. Stereoscopic mode for large distances between the IACTs ($E > 8$ TeV). Hadronic background rejection $\sim 5 \cdot 10^{-5}$



3. Hybrid mode - joint operation of the TAIGA-HiSCORE and some IACTs ($E > 40$ TeV). Hadronic background rejection $\sim 10^{-4}$



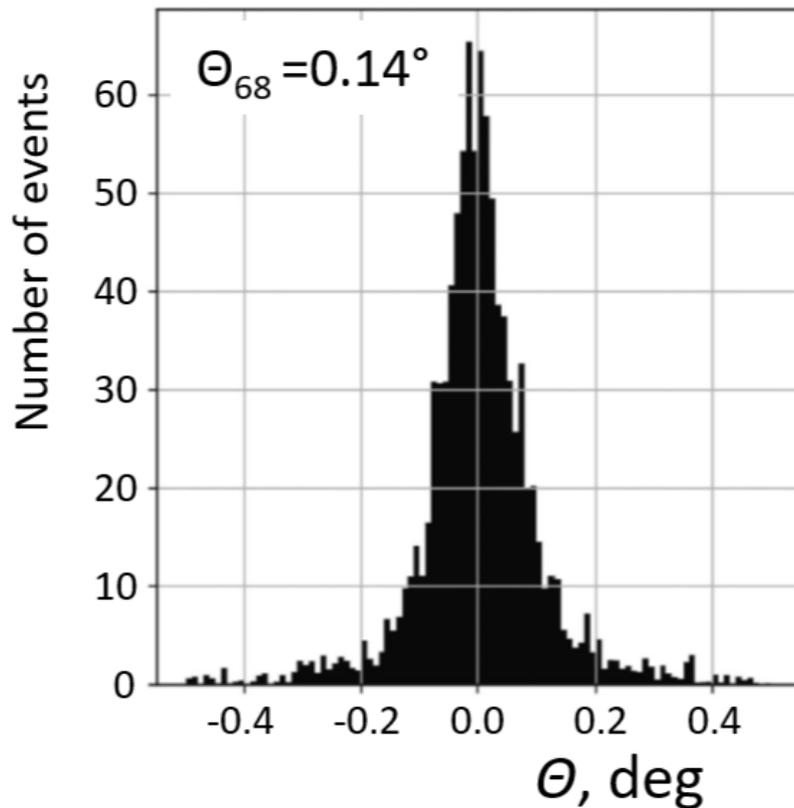
Наблюдение Крабовидной туманности в моно-режиме



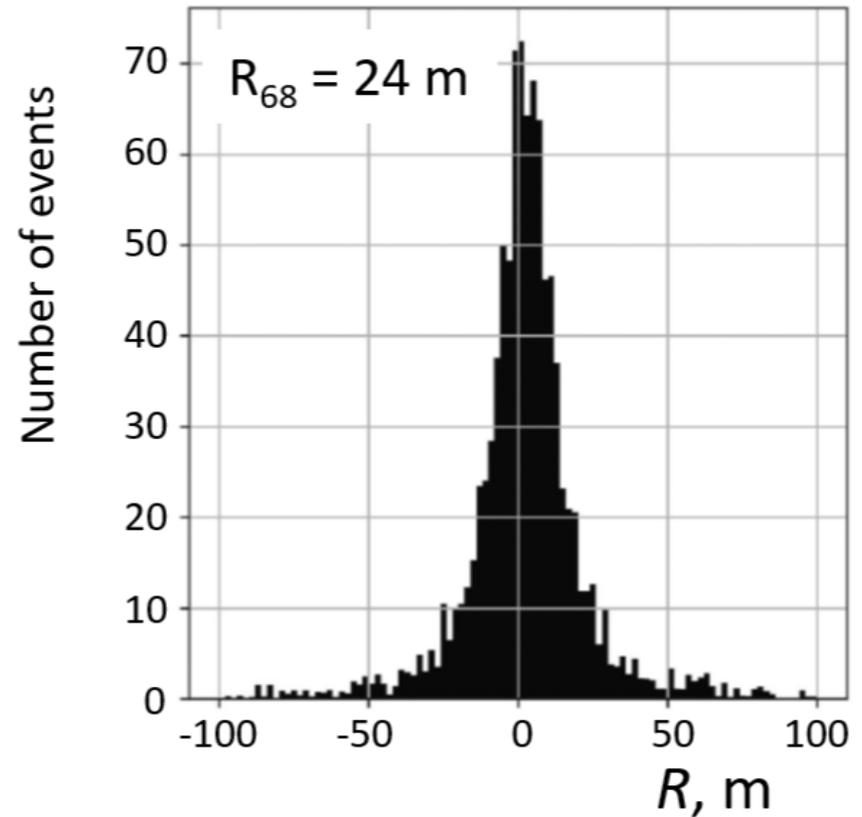
Избыток 560 событий за 150 часов, уровень значимости 12 σ

**Л.Г. Свешникова и др.(коллаборация TAIGA),
Известия РАН. серия физ., 2023, 87, 966**

The accuracy of reconstructing the position of the EAS axis and its direction of arrival by stereo method



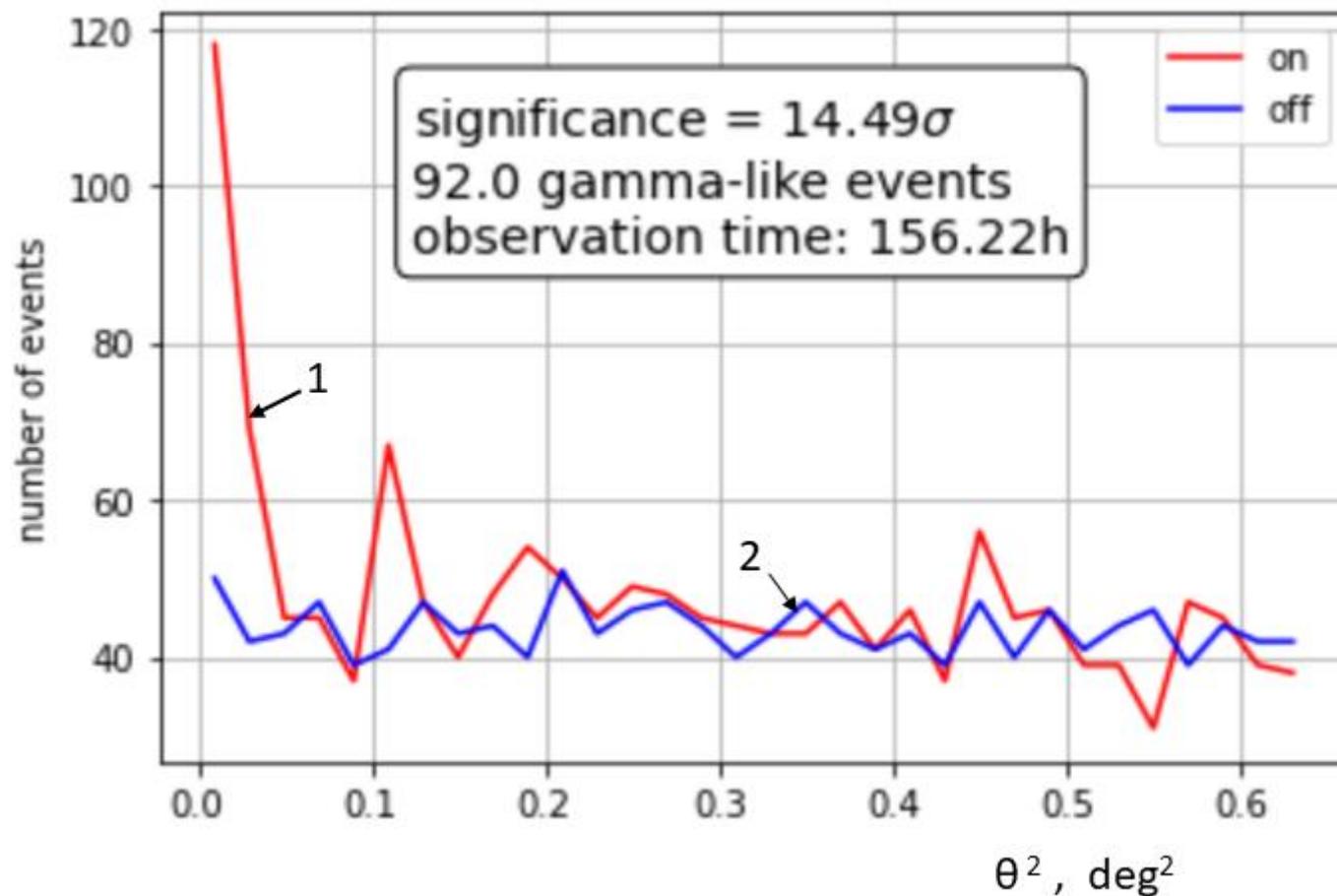
Accuracy of reconstructing
of EAS direction



Accuracy of reconstructing
of EAS axis position

Accuracy are understood as the angle θ_{68} and the radius of the circle R_{68} , which contain 68% of the reconstructed events

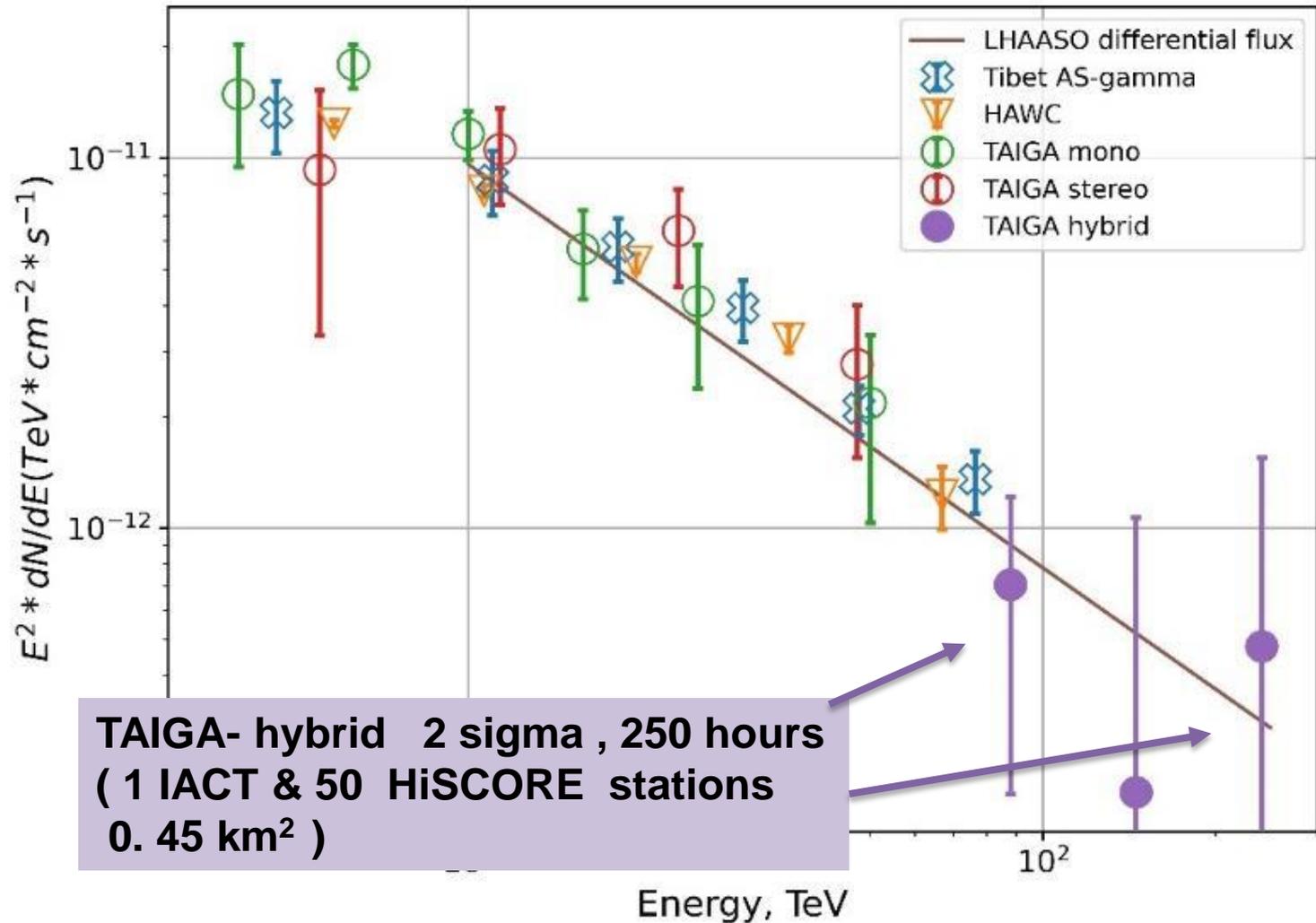
Background subtracted Θ^2 -distributions for 150 hours of the Crab Nebula observation (stereo mode)



Pavel Volchugov

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

The energy spectrum of gamma quanta from the Crab Nebula



Поиск фотонов ТэВных энергий от гамма-всплесков и по алертам от установок: Baikal-GVD, IceCube и HAWC

.Разработана и внедрена система автоматизации измерений и автоматического наведения телескопов установки TAIGA-IACT на гамма-всплески по сигналам, полученным от General Coordinate Network (GCN)

Всего ~10 наблюдений по алертам. Время наблюдения около 1 часа

GRB 221226A (Fermi GBM)

GRB 230116E (Fermi-GBM)

GRB 230816A (Swift-BAT)

GRB-231115A (INTEGRAL)

Вспышка от двойного пульсара Be/X-ray LS V +44 17 (Swift-BAT)

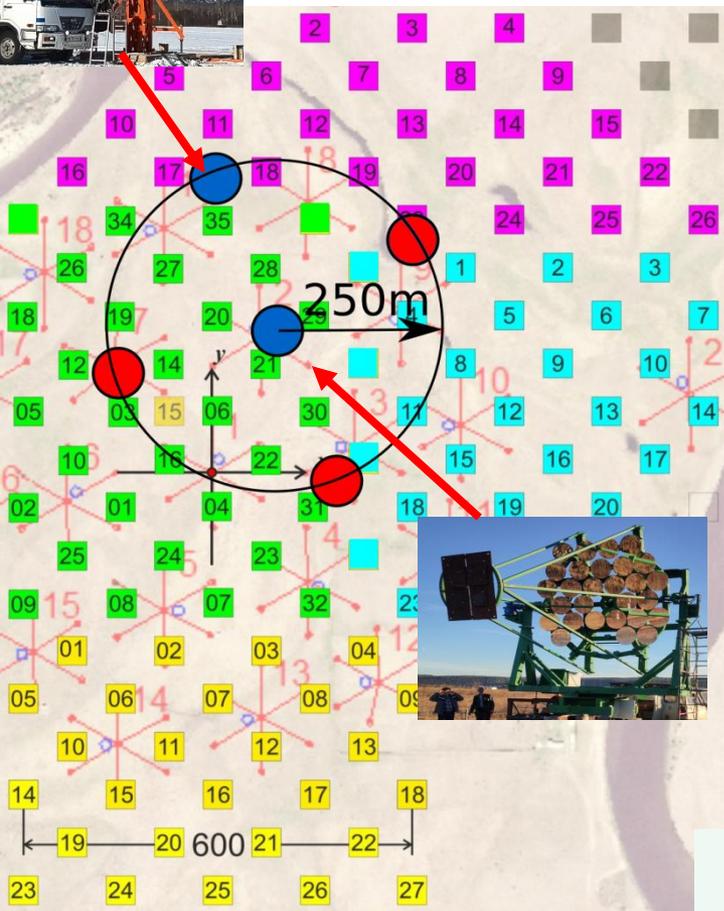
Наведение по совпадению IceCube и HAWC NuEm-240118A.

От источника GRB 221009 – 3 телескопами могло быть зарегистрировано 600 гамма-квантов - 14 сигма

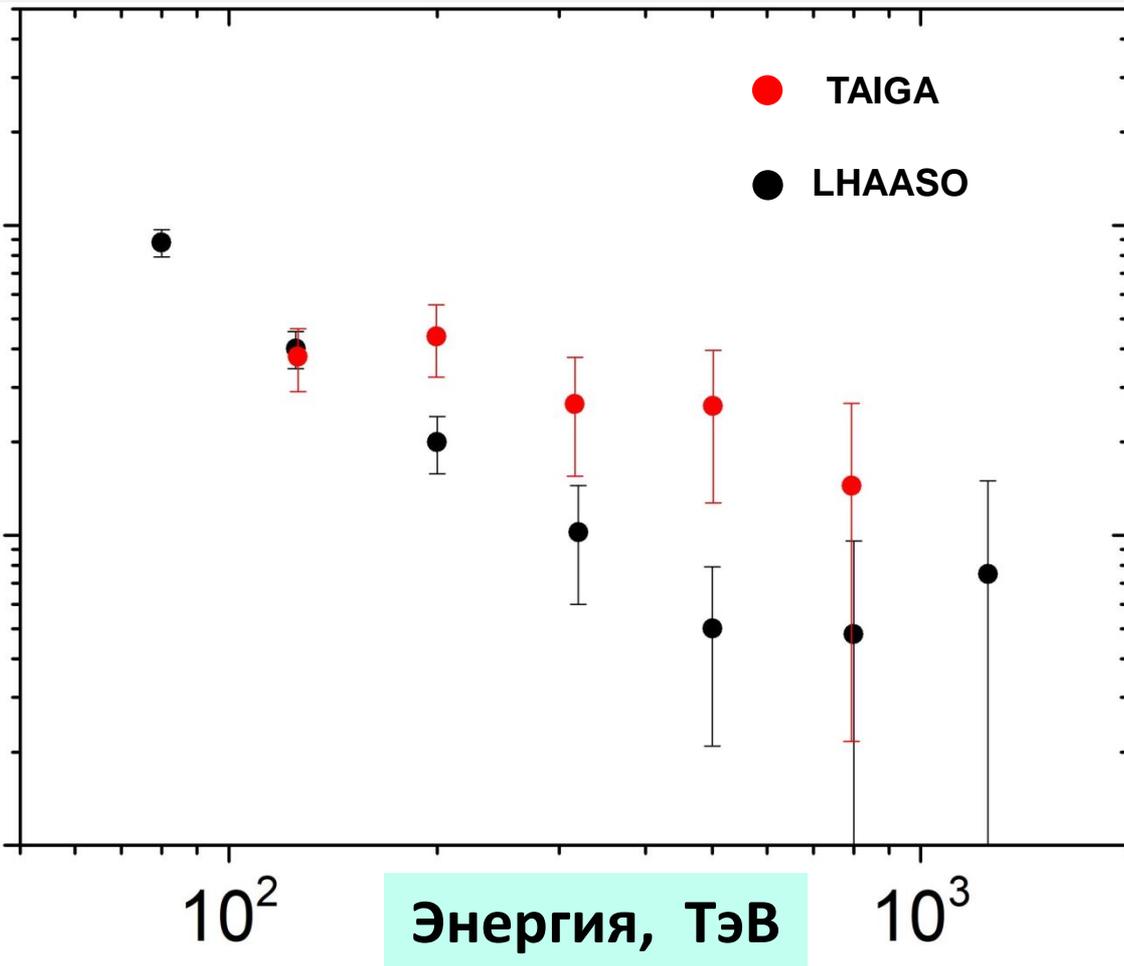
От вспышки в 10 раз слабее – 60 событий, около 5 сигма

Near future TAIGA-1 upgrade

2 new IACT with 4.3 m mirror diameter TAIGA-IACT (2025-2026y)

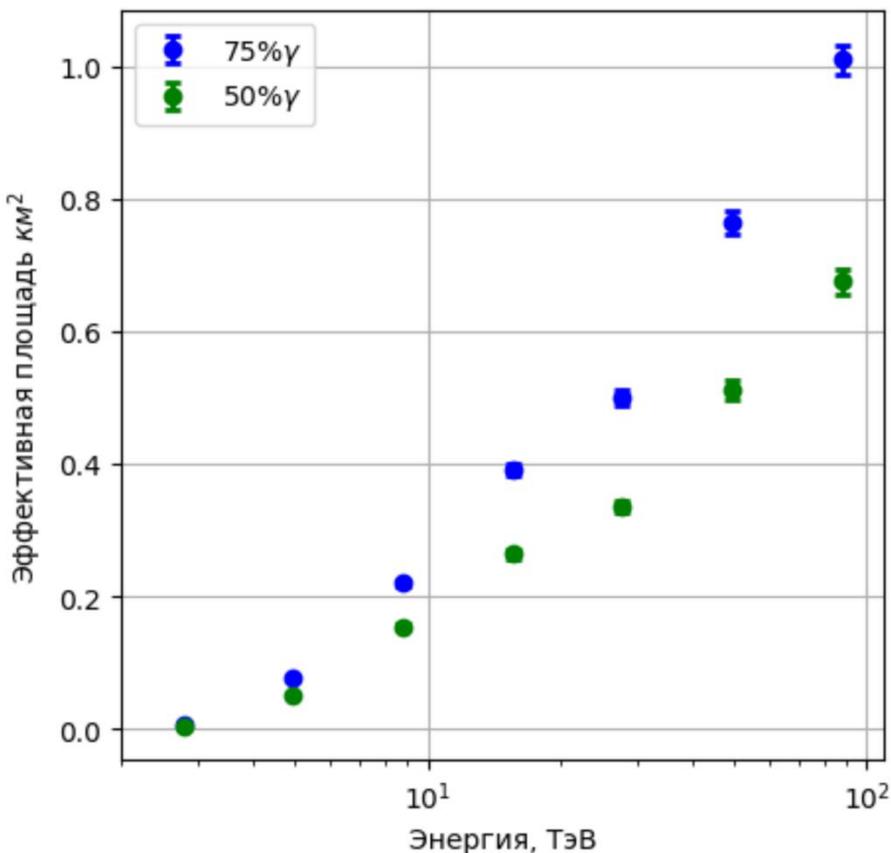


● IACT in operation ● planned IACT

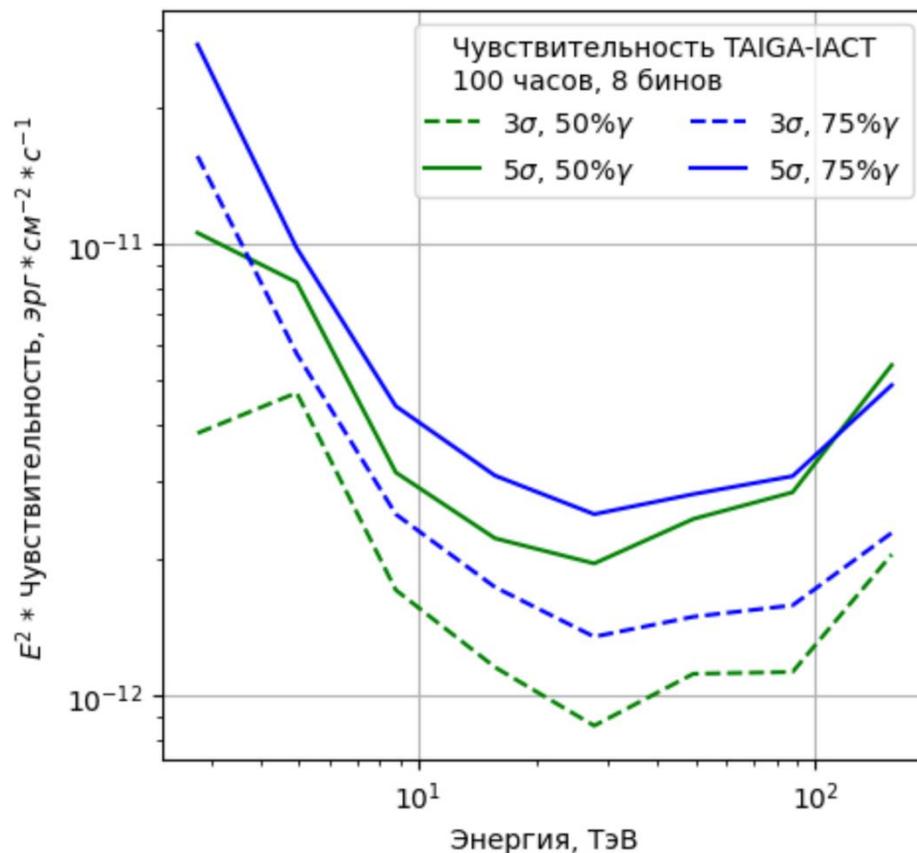


При работе 5 телескопов за 300 часов наблюдения ожидается 30-40 событий с энергиями выше 100 ТэВ от Крабовидной туманности при показателе наклона спектра в источнике -2.9

Чувствительность системы из 5 телескопов

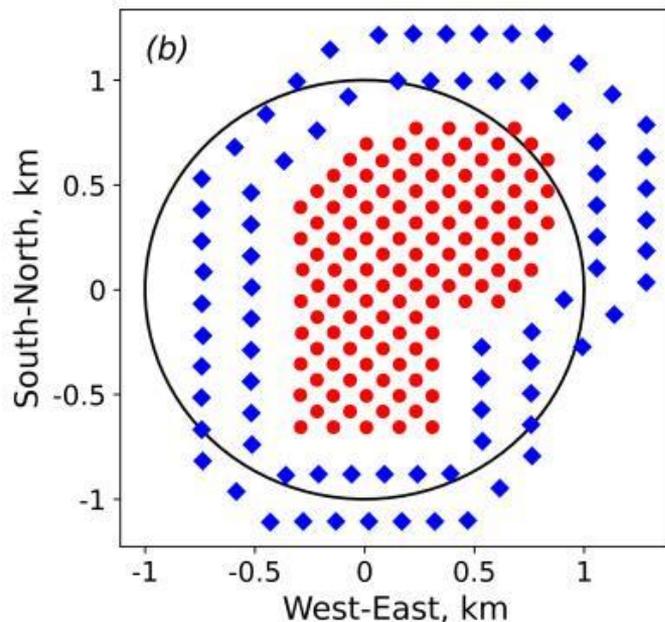


Эффективной площади при условии сохранения 50% и 75% гамма-квантов после применения критериев отбора на gammaness и θ^2 .

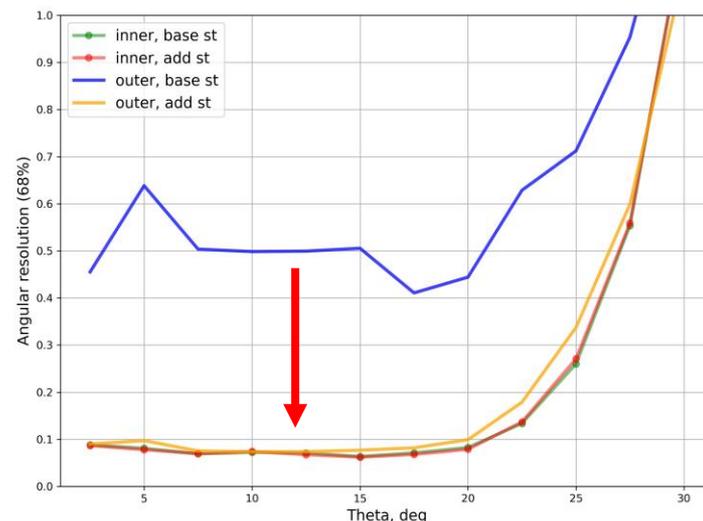


Дифференциальная чувствительность установки TAIGA-IACT в стерео режиме наблюдений.

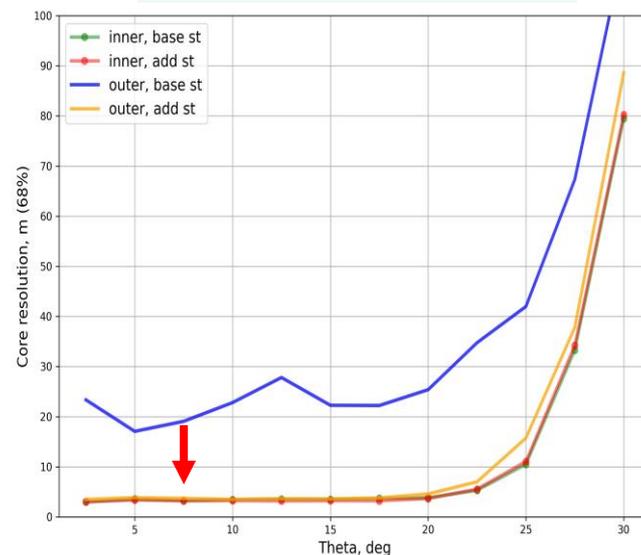
Внешние оптические станции установки TAIGA-HiSCORE



Развертывание дополнительных колец оптических станций установки TAIGA-HiSCORE, позволит увеличить ее эффективную площадь и точность восстановления направления и положения оси ШАЛ в 5 - 8 раз для краевых событий.



Угловое разрешение



Положения оси ШАЛ.

The TAIGA-Muon scintillation array

Counter dimension
 $1 \times 1 \text{ m}^2$ designed
NSU& BINP

Wavelength shifting
bars are used for
collection of the
scintillation light.

Mean amplitude
from cosmic muon
is 23.1 p.e. with
 $\pm 15\%$ variation.

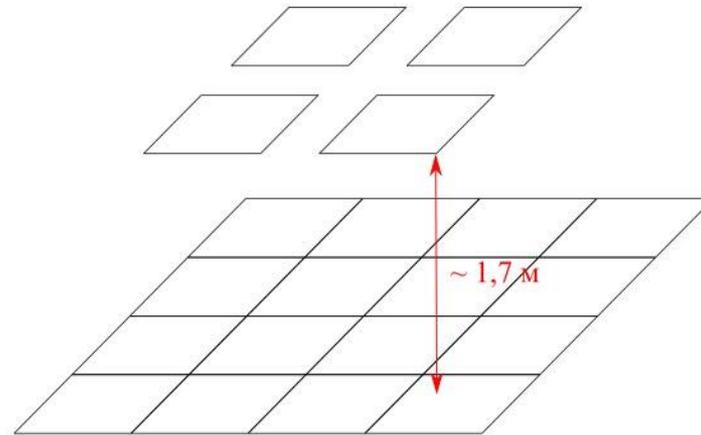
A clear peak in
amplitude spectrum
is seen from cosmic
muons in a self
trigger mode



The TAIGA-Muon counters



Surface counters of
a TAIGA-Muon cluster

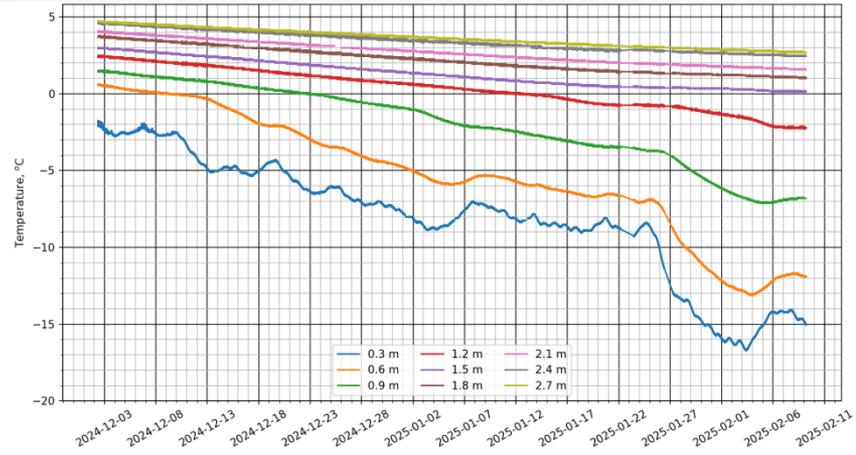
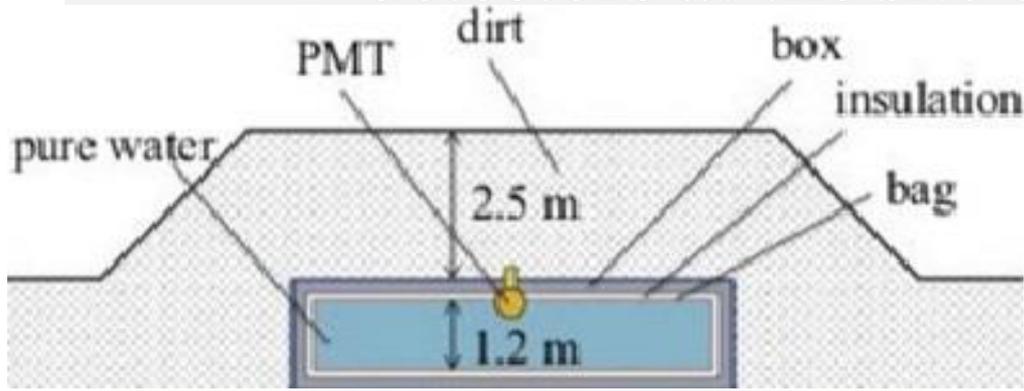


The position of the counters
in a cluster of TAIGA-Muon

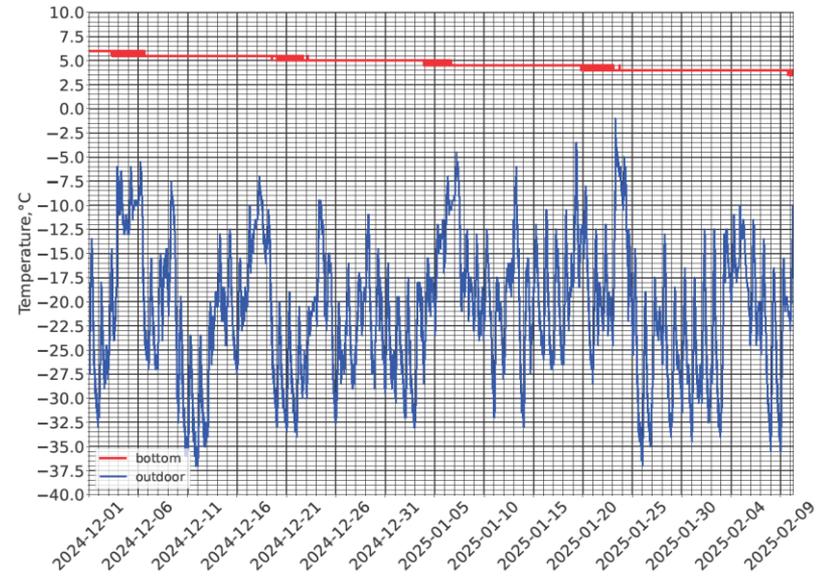


Surface counters of
a TAIGA-Muon cluster

Deployment of the prototype of water Cherenkov detectors at the site of the TAIGA-1



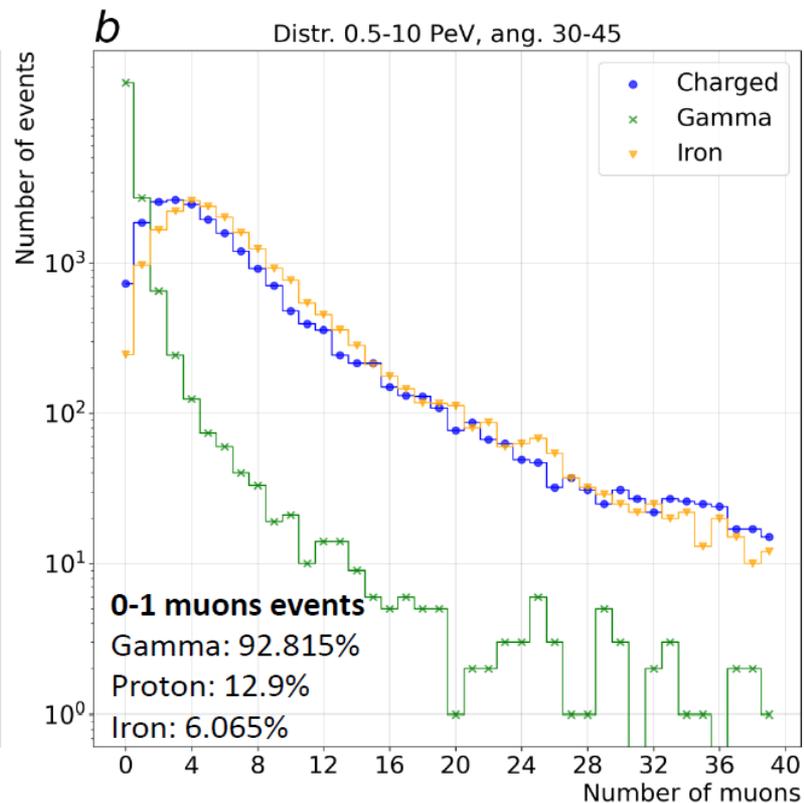
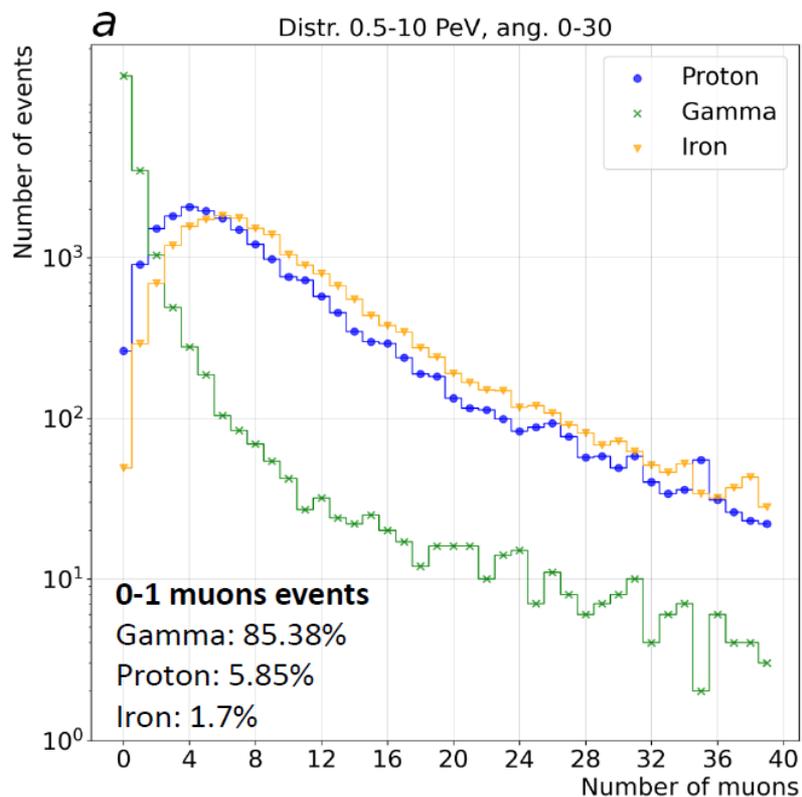
The temperature of soil



The temperature of water

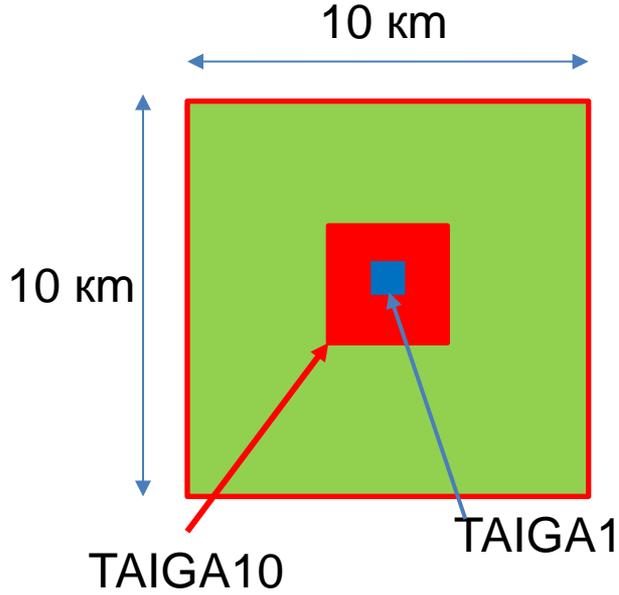


Подавление адронов водными чаренковскими детекторами

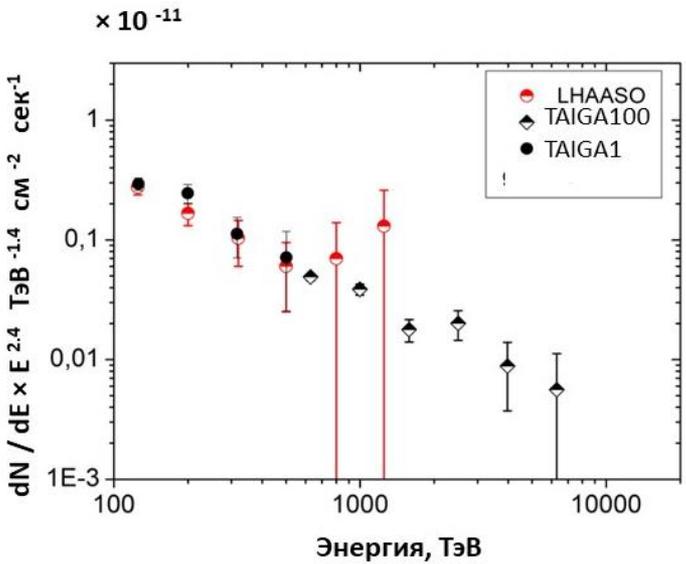


**Our dream:
Full scale array TAIGA-100**

Full scale TAIGA-100 array for PeV gamma astronomy



- 3000 wide-angle Cherenkov stations with 1 PMT, FoV 1 ster.
- 5 - 10 4 m class IACTs (like in Tunka-1)
- 1 - 2 10 m class IACTs (mini ALEGRO)
- ~ 1000 scintillation detectors
- ~ 3000 underground water Cherenkov detectors, 40m² area
- 1-2 Fluorescent detectors



Energy range 100 TeV – 10 PeV. About 350 gamma from Crab Nebula with energy > 500 TeV for 300 hours of observation (3 years)

The significance level is 10 sigma.

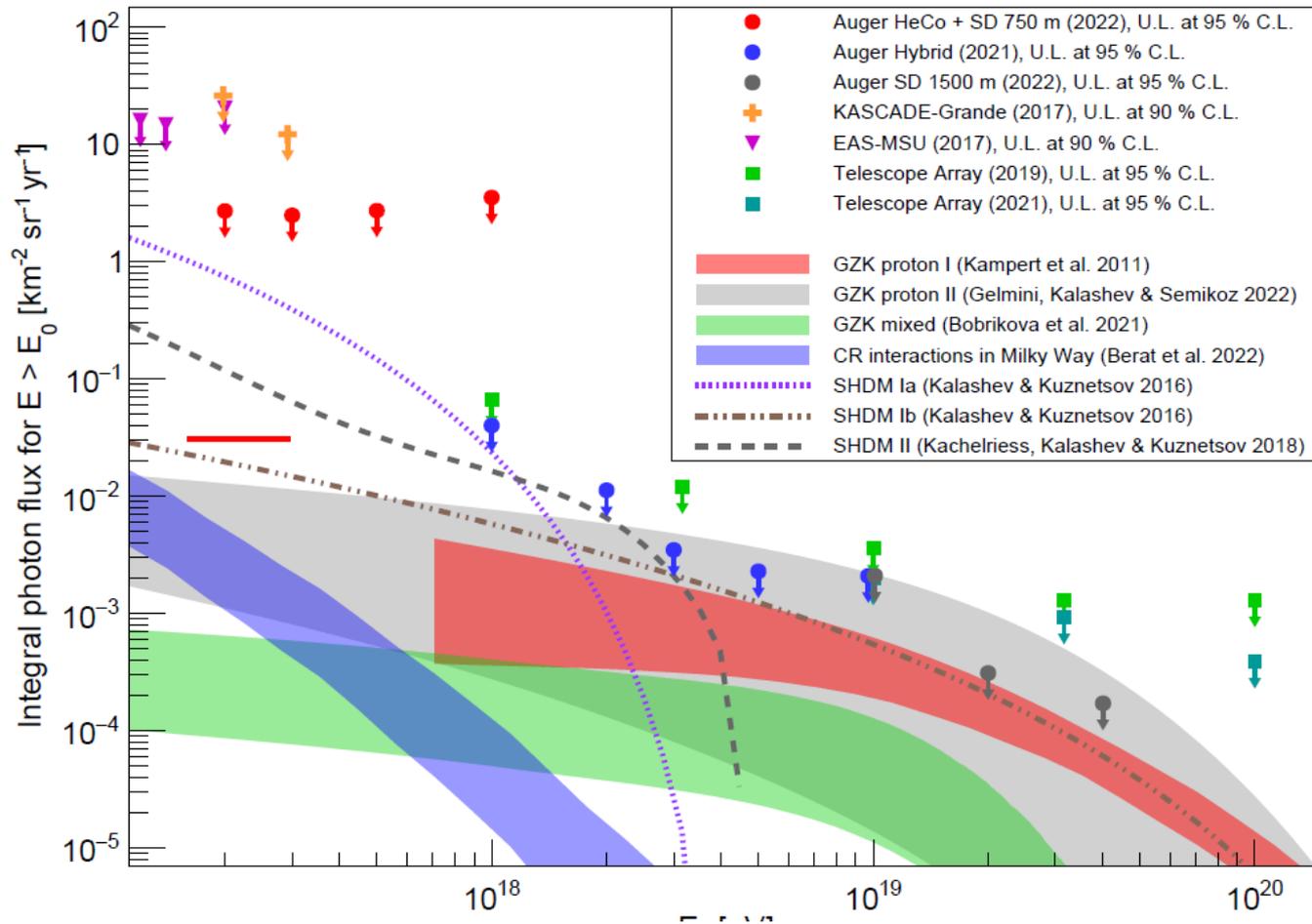
Hadronic background rejection ~10 times by muon detectors

Р.Монхоев
Проект астрофизического комплекса TAIGA-100
Секция «Детекторы, методика эксперимента и ядерно-физические методы.» 21.02.25. 16:00

Научная программа TAIGA-100

1. Гамма астрономия ультравысоких энергий.
2. Космические лучи в диапазоне 10^{14} - 10^{19} эВ
3. Поиск фотонов в диапазоне 10^{17} - 10^{18} эВ
4. Транзиентные явления и гамма-всплески
5. Горизонтальные нейтрино (?)
6. Экзотика (темная материя, странглеты и т.д)
7. Геофизика

Поиск фотонов с энергией в диапазоне 10^{17} - 10^{18} эВ



Можно ожидать 10 гамма-квантов за 10 лет

Выбор места

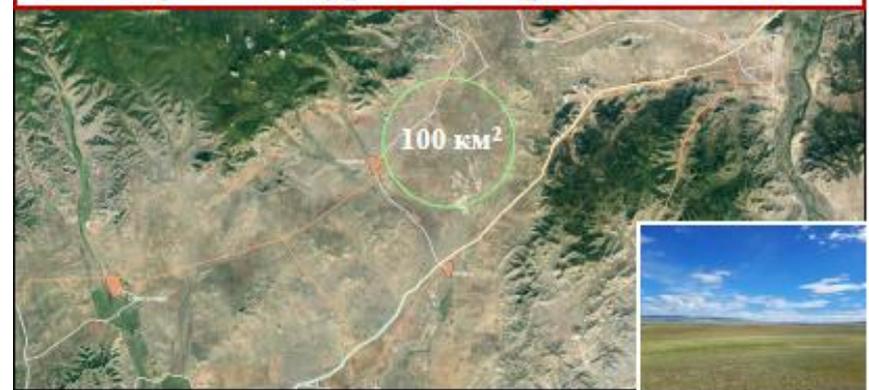
Перспективные территории:

Степи Южной Сибири в границах Байкальской и Алтае-Саянской горных физико-географических стран

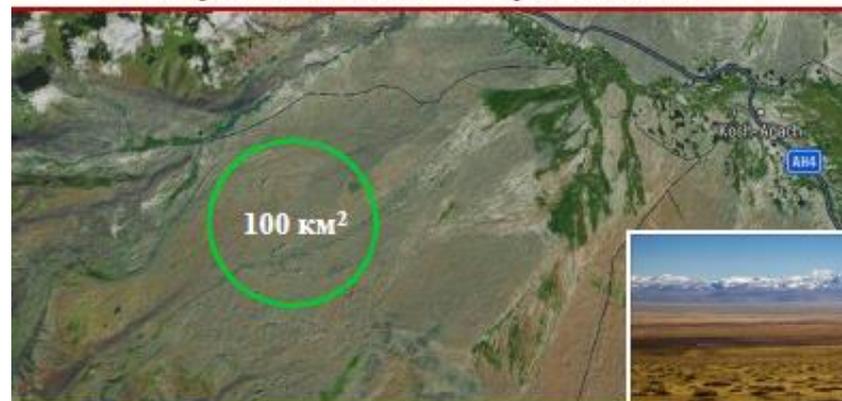
Иркутская область: окрестности с. Гаханы



Республика Бурятия: Боргойская степь



Республика Алтай: Чуйская степь



104.0

106.0

52.0

Irkutsk

Ulan-Ude

• TAIGA-1

• Baikal-GVD

TAIGA-100

• Borgoy Steppe

0 25 50 km



Borgoy steppe – a site for the TAIGA-100

Dzhidinsky District, Republic of Buryatia, 50.84° s. w., 105.81° v. d.



Astroclimatic features*

- high proportion of cloudless nights – 68–71%
- low precipitation and low water vapor content in the atmosphere (3.1–3.3 kg/m²)
- low level of aerosols pollution in the atmosphere (AOT \approx 0.11)
- low level of light pollution
- snow cover thickness – 2–3 cm

Topographic features*

- altitude of \sim 800 m a.s.l.
- area $>$ 100 km²
- site surface slope angles \leq 5°
- soils suitable for digging to a depth of more than 3 m
- water for water Cherenkov detectors is available
- absence of permafrost on the site

Infrastructure features

- 200 km from the regional center (Ulan-Ude)
- automobile, rail and air communications
- power supply - 3 power lines 35 kV and 110 kV
- availability of radio engineering and optical telecommunication systems

* according to the MODIS, VIIRS (NOAA) satellite systems, the MAIAC algorithm (Aqua, Terra) from 2019 to 2023 and the CALIPSO lidar from 2016 to 2021

Заключение

- 1. Создание комплекса TAIGA-1 близко к завершению, осталось подготовить еще 2 регистрирующие камеры для атмосферных черенковских телескопов и развернуть дополнительные сцинтилляционные детекторы установки TAIGA-Muon.**
- 2. Обработка данных продвигается вполне успешно – получены новые результаты в области космических лучей и гамма-астрономии. Осваиваются новые методы анализа данных на основе машинного обучения.**
- 3. Началась подготовка проекта астрофизического комплекса TAIGA100. Планируется протестировать основные детекторы TAIGA100 (водный черенковский детектор мюонов и сцинтилляционные детекторы, новый черенковский детектор и др.) и систему сбора данных на полигоне TAIGA-1 до выбора места развертывания новой установки.**

**Thank you
for attention!**

