

# Галактические космические лучи и гамма-кванты (эксперименты НУКЛОН и TAIGA)

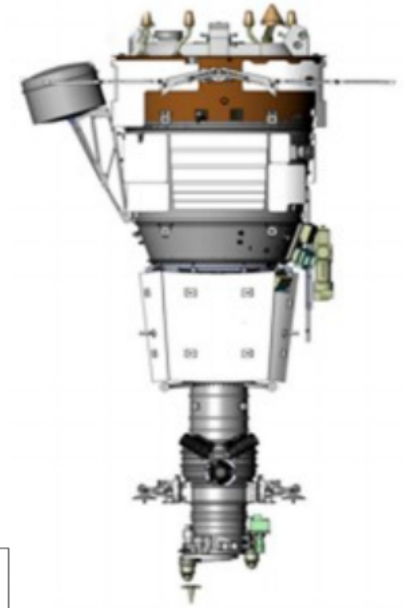
А.Д. Панов,  
по поручению ЛГКЛ и ЛНГА

**Прямые наблюдения космических лучей.  
Эксперимент НУКЛОН  
и другие космические эксперименты  
Лаборатория Галактических Космических Лучей  
ЛГКЛ**

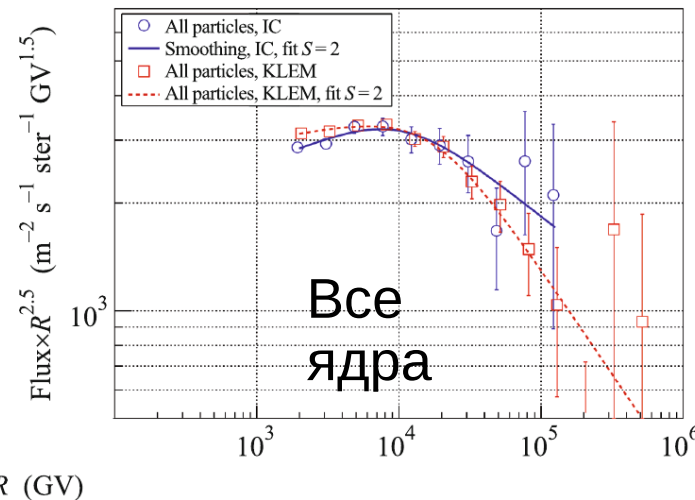
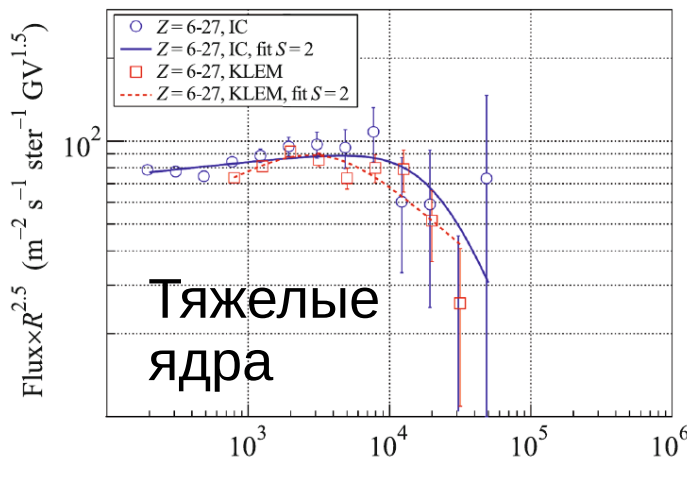
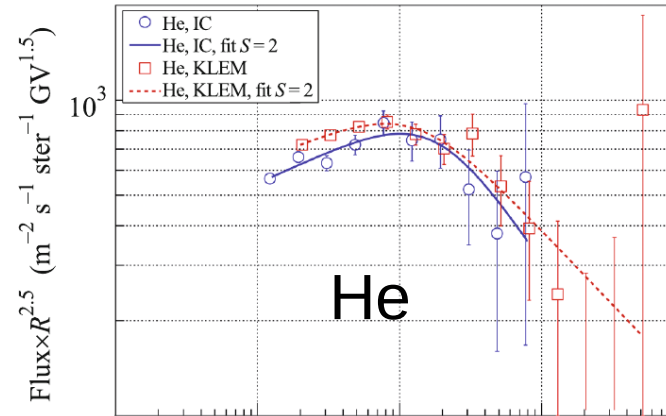
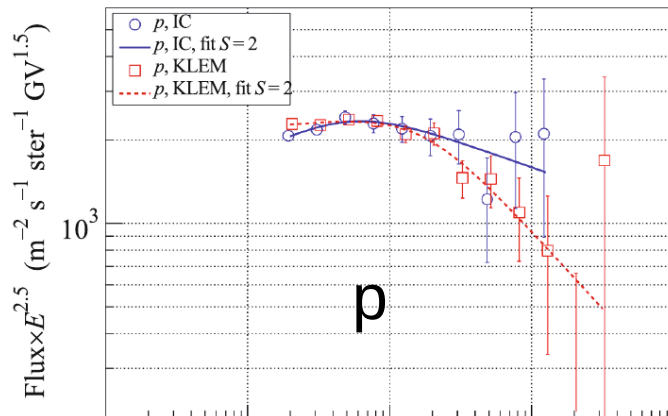
# Эксперимент НУКЛОН (2015-2018)

До 2023 г.  
Несколько новых результатов:  
систематическое нарушение  
«стандартной модели» физики космических лучей.

## «Малое колено» по жесткости вблизи 10 ТВ

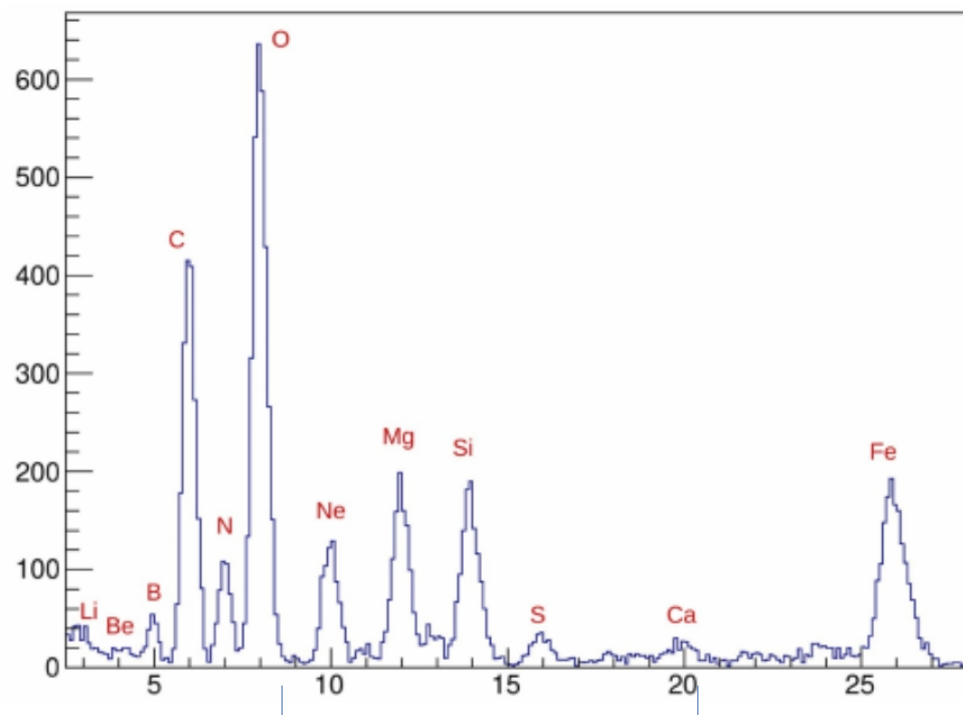


Ресурс

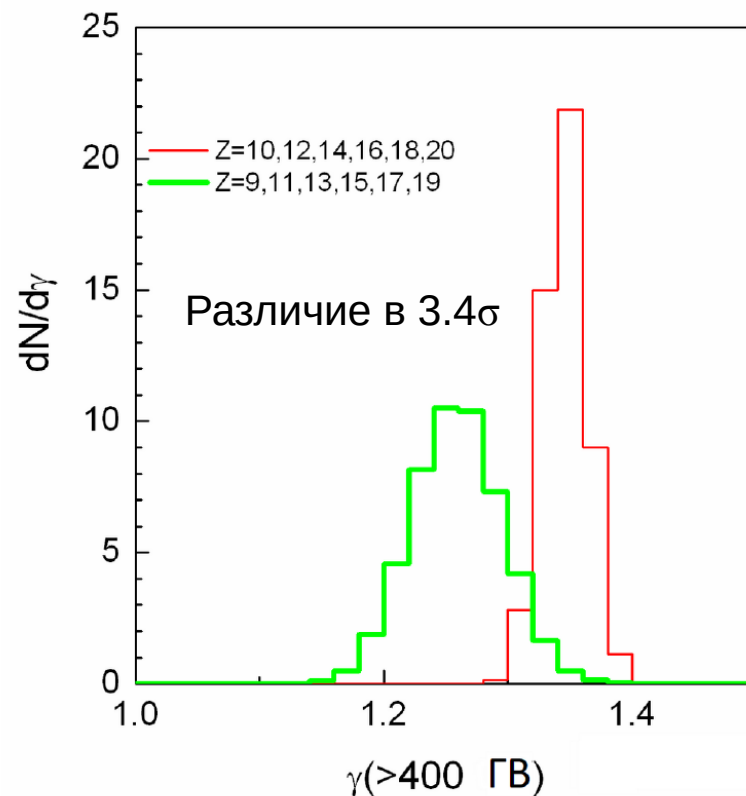


# Спектры малообильных нечетных ядер положе спектров обильных четных ядер

Зарядовое распределение по данным эксперимента НУКЛОН

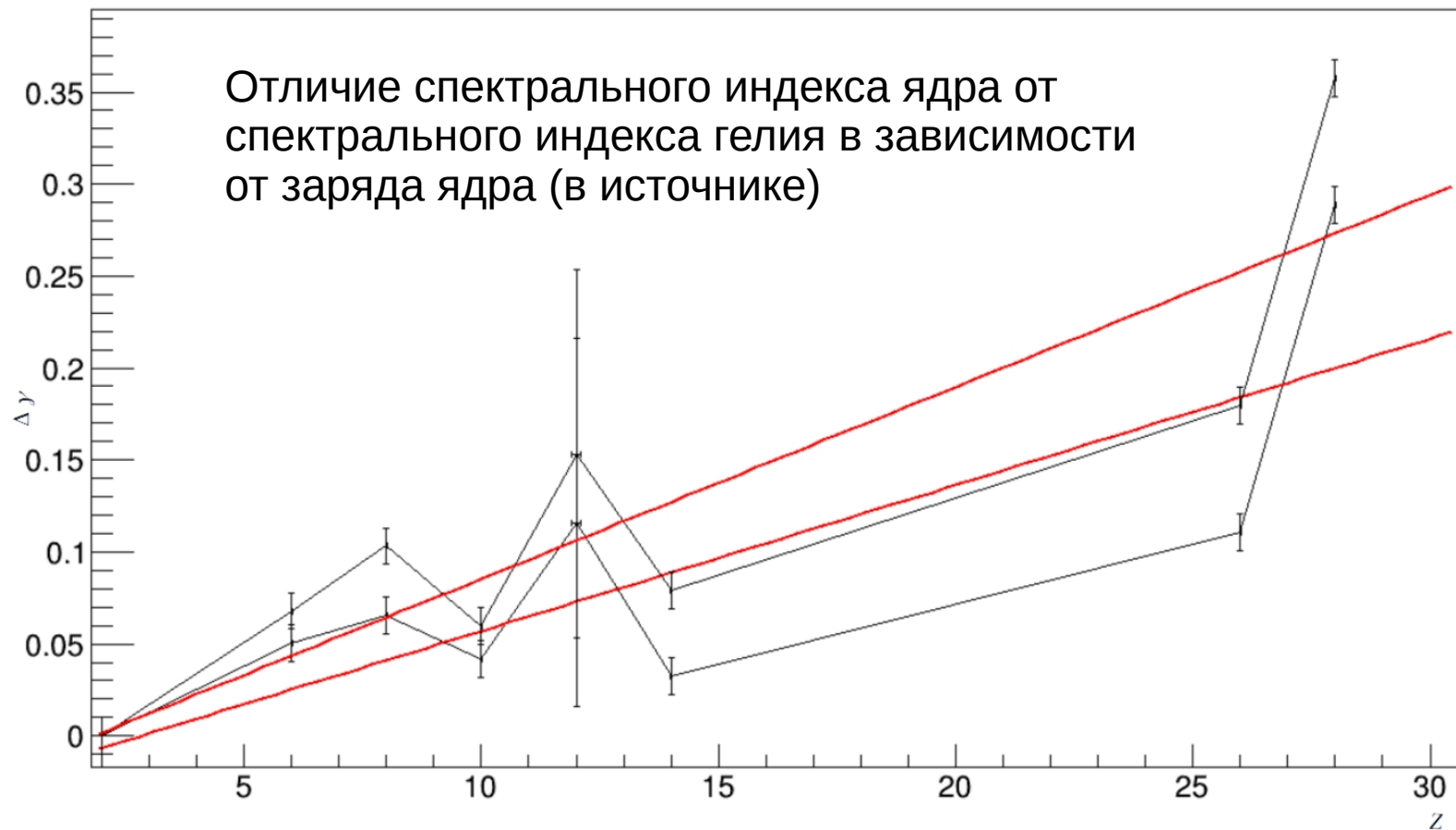


Средняя крутизна (интегральный спектральный индекс  $\gamma$ ) четных и нечетных ядер



Ожидалась обратная картина!

## Рост крутизны спектров обильных ядер с ростом заряда в источнике (25 ГВ - 1500 ГВ)



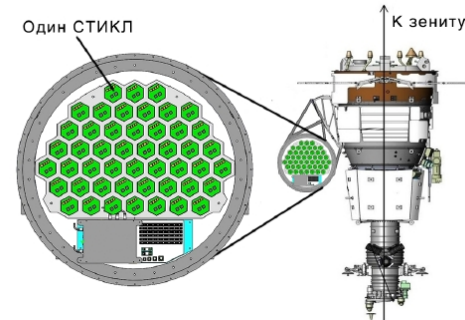
- Положительный наклон зависимости в эксперименте НУКЛОН обеспечен с надежностью  $9\sigma$
- В эксперименте АТІС надежность результата была  $3\sigma$

# Планы

## В Федеральной космической программе (ФКП) три эксперимента

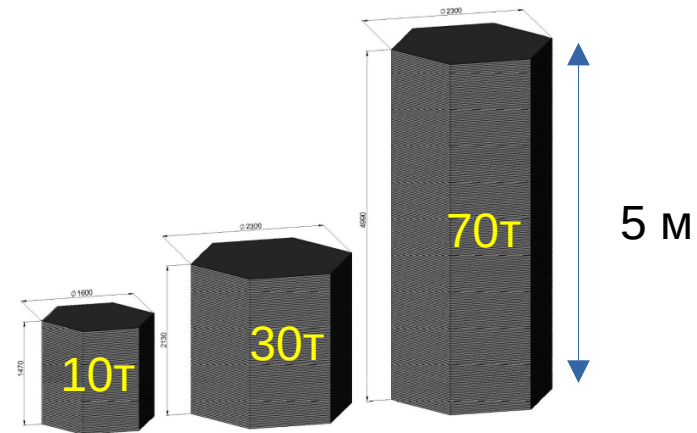
### 1. **НУКЛОН-2 (Менделеев)**

Зарядовый и изотопный состав  
сверхтяжелых ядер  
(тяжелее железа)



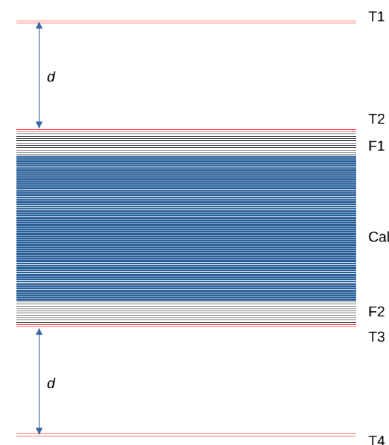
### 2. **ОЛВЭ**

(Обсерватория Лучей  
Высоких Энергий)  
Сверхтяжелый калориметр для  
измерения спектров КЛ с  
поэлементным разрешением  
в области колена КЛ



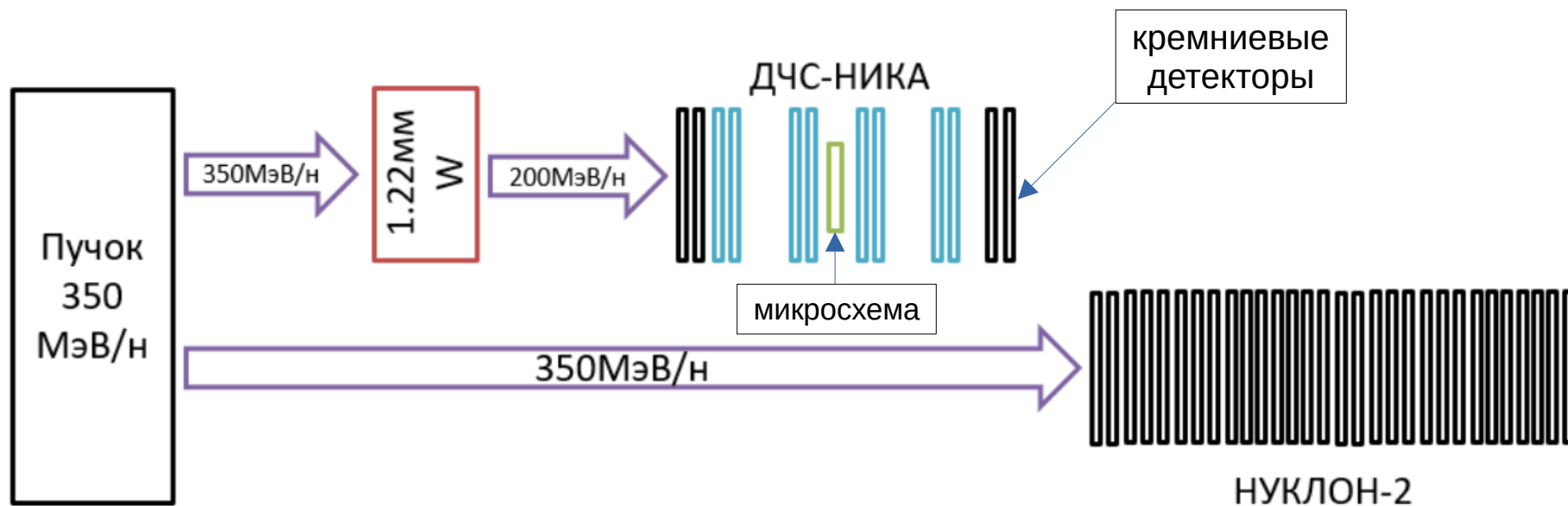
### 3. **Модуляция**

Спектры ядер от протонов до  
железа в области энергий  
30 эВ — 1000 эВ  
(область сильной модуляции)



На станцию  
РОС

# НУКЛОН-2 => Проект ДЧС-НИСА (Детекторная Часть Системы)





*Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2023, V.87, №7,  
P.870-873*

**Fluxes and Spectral Indices of Rare and Abundant Nuclei in Cosmic Rays, According to Data from the NUCLEON Satellite Experiment**

*Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2023, Т.87, № 7,  
С.927-930*

**Потоки и спектральные индексы редких и обильных ядер космических лучей по данным спутникового эксперимента НУКЛОН**

*Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра", 2023 ,  
Т.20, № 4, С.634-649*

**Фрагментация ядер космических лучей и ее экспериментальное изучение**

*arXiv:2306.13406 [astro-ph]*

**HERO (High Energy Ray Observatory) optimization and current status**

*Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, издательство  
Springer Nature (Switzerland), 2023, P.71-90*

**Space Project "Modulation", a New Approach to Studying the Fluxes of Galactic Cosmic Rays in the Field of Solar Modulation Energies**

*Принято к печати в журнал «Успехи физических наук»*

**Прямые наблюдения космических лучей: современное состояние проблемы.**

*Доклад на конференции ISCRA-23. Принято к печати в журнал «Ядерная физика».*  
**Обсерватория лучей высокой энергии: задачи и проектный облик**



**Наземные наблюдения космических лучей  
и гамма-астрономия.**

**Астрофизический комплекс TAIGA**

**Лаборатория Наземной Гамма-Астрономии  
ЛНГА**

# Астрофизический комплекс TAIGA

( 50 км от озера Байкал)



**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

**Cosmic Rays (protons and nuclei)**

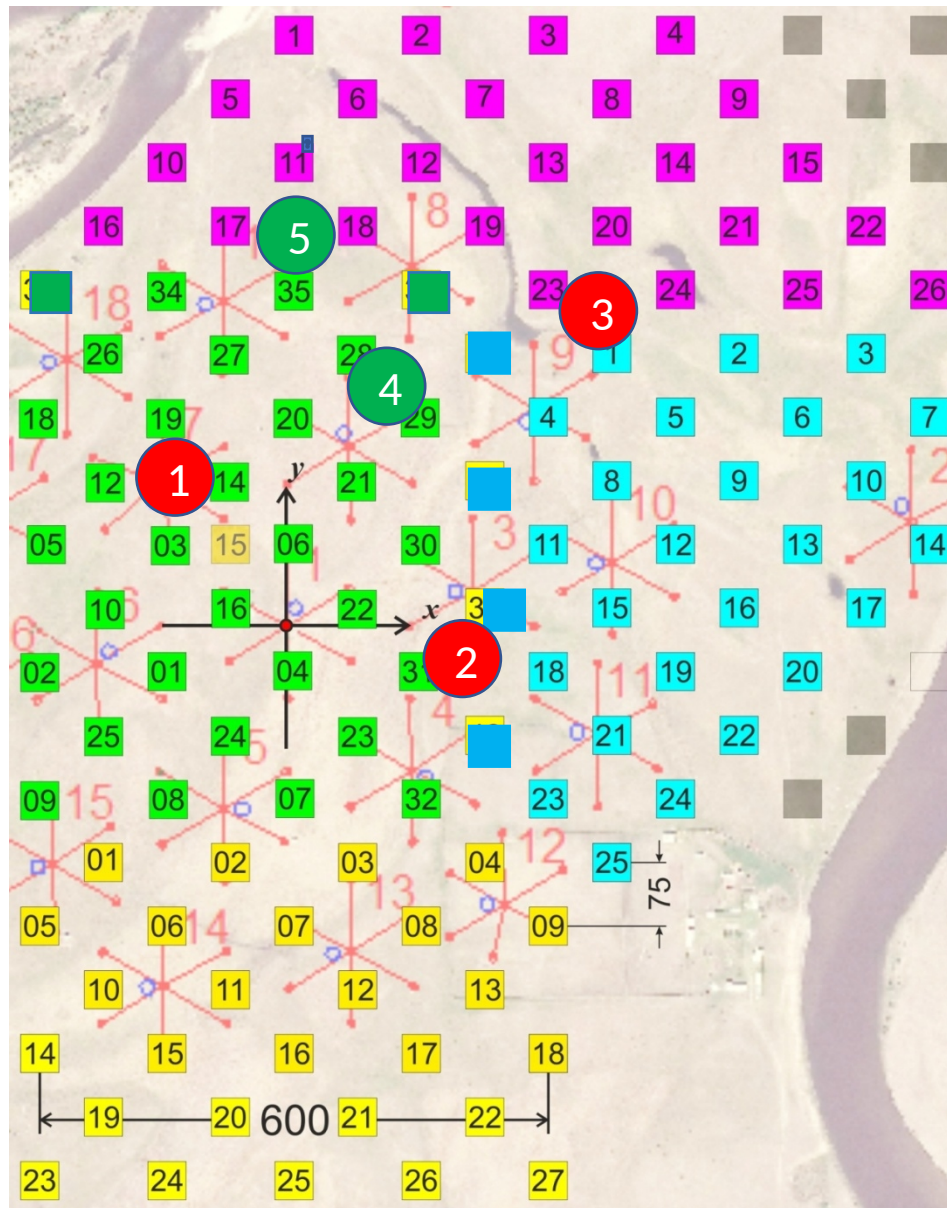
**Gamma-ray astronomy**

**10<sup>18</sup> eV**

**10<sup>14</sup> eV**

**10<sup>12</sup> eV**

# TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT (TAIGA-1)



HiSCORE



IACT

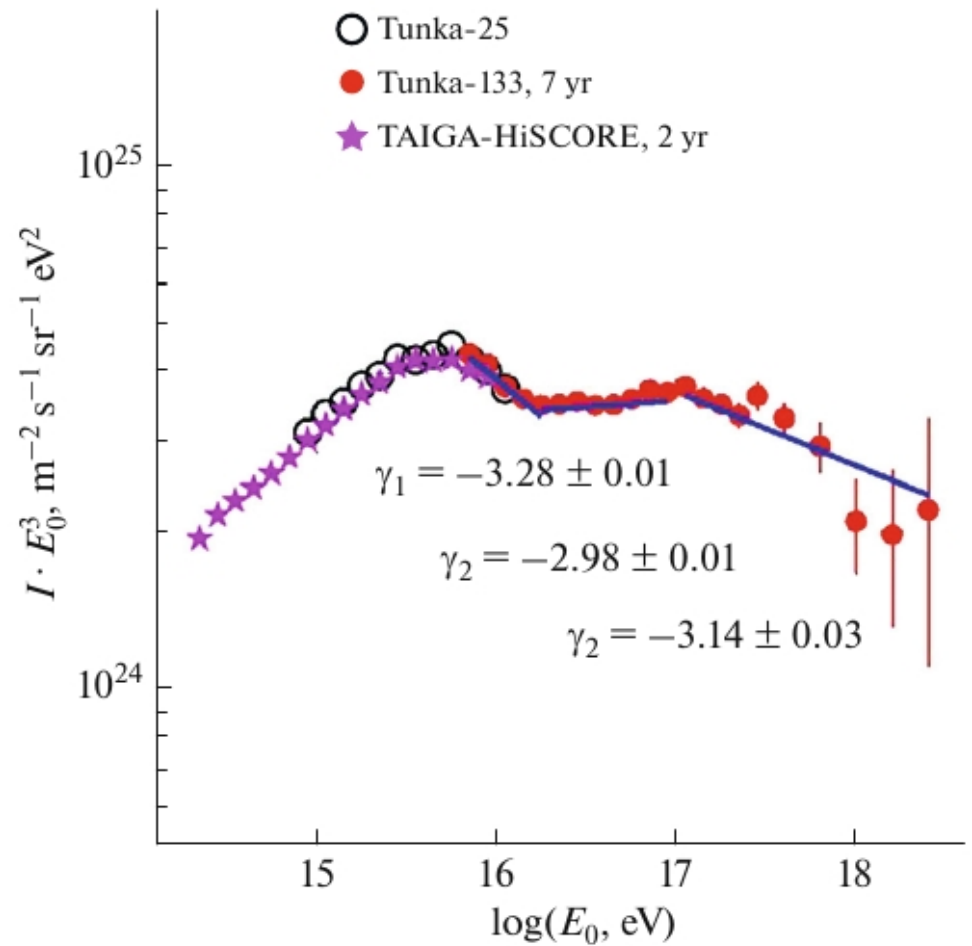
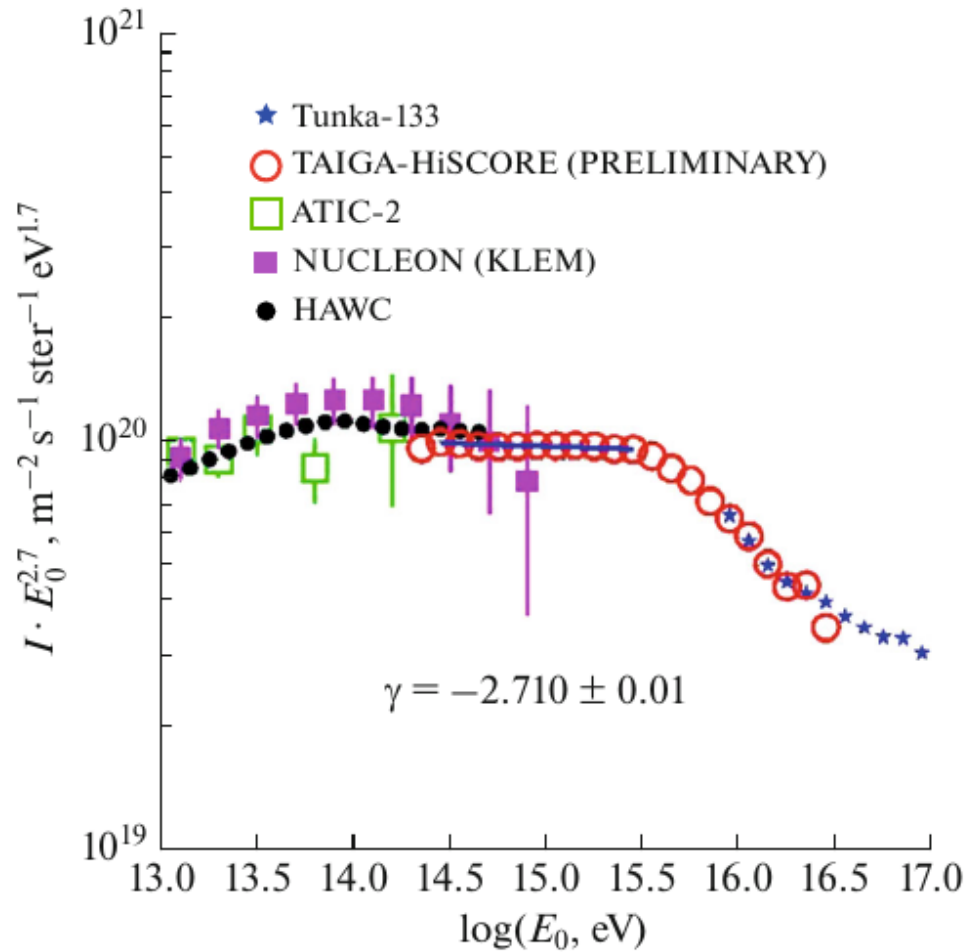


Работающий телескоп

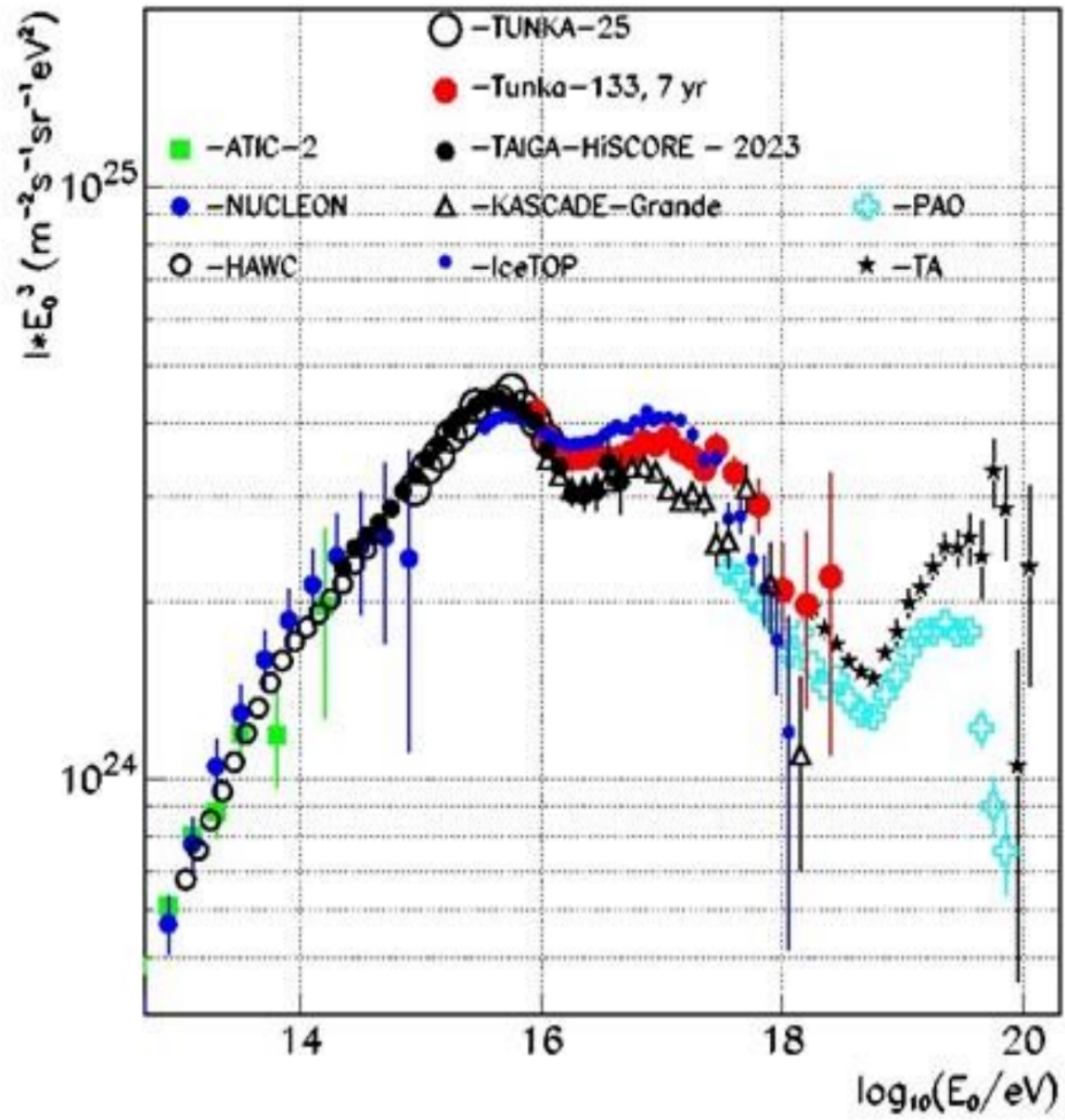


Телескоп без камеры

# Спектр всех частиц — черенковская методика. Новые данные TAIGA-HiSCORE

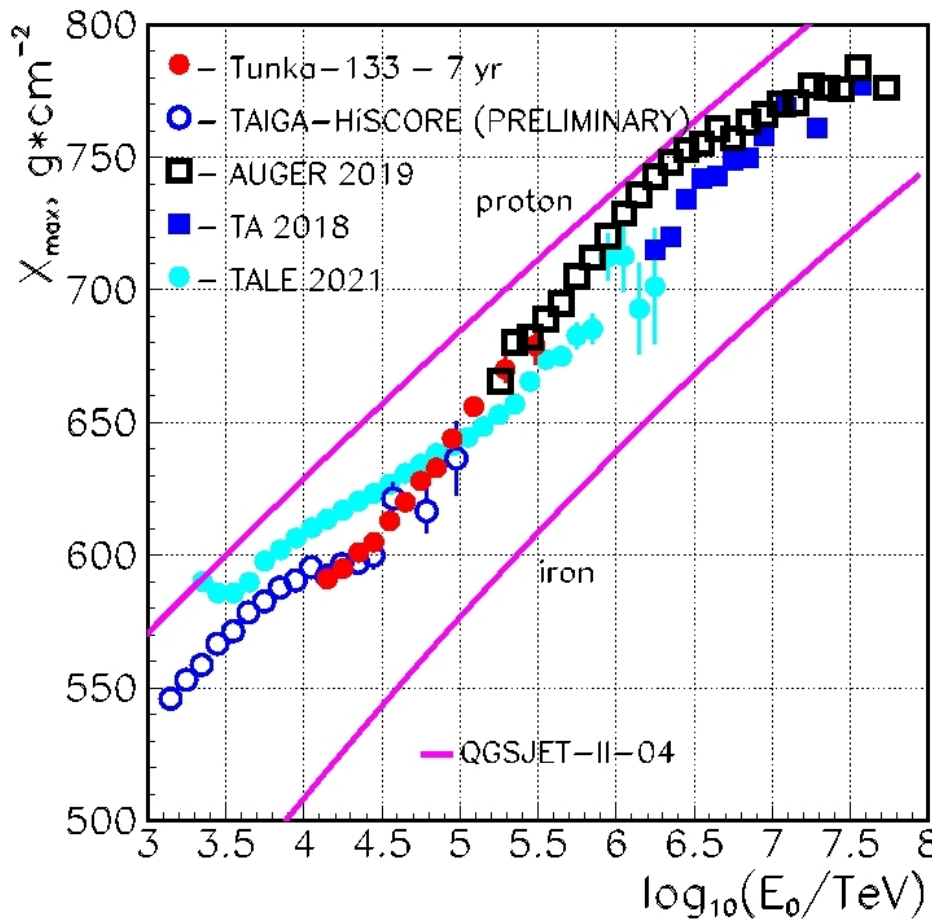




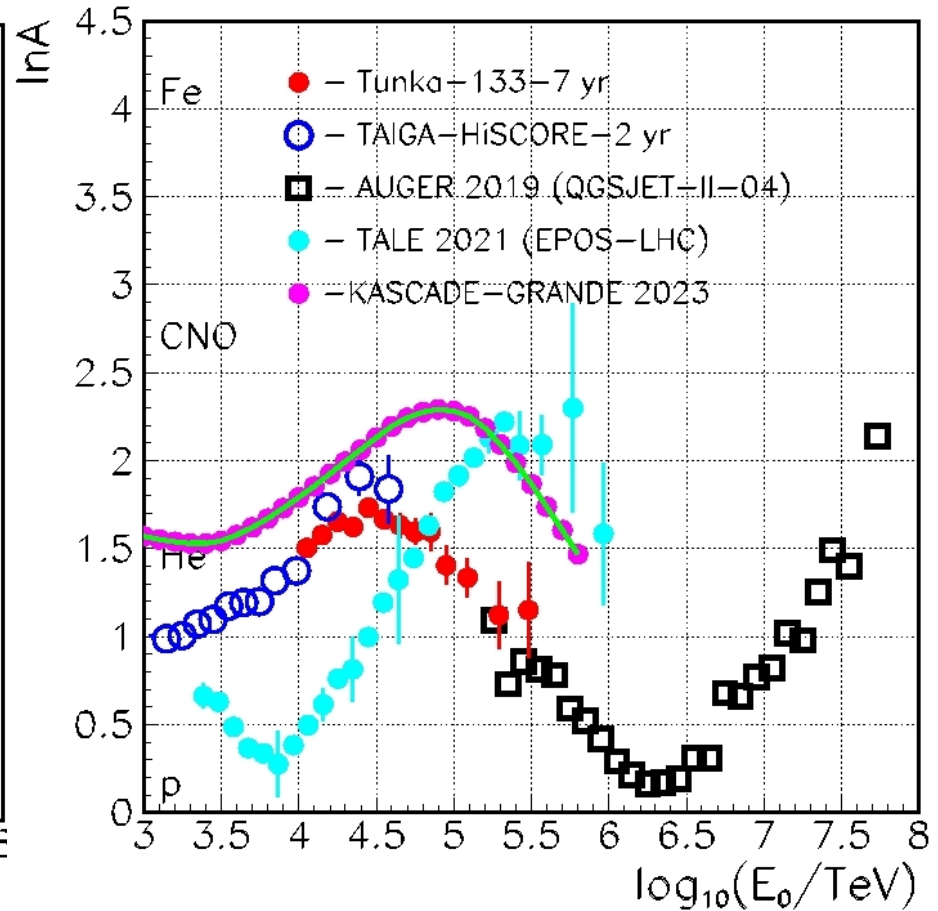


# Массовый состав космических лучей

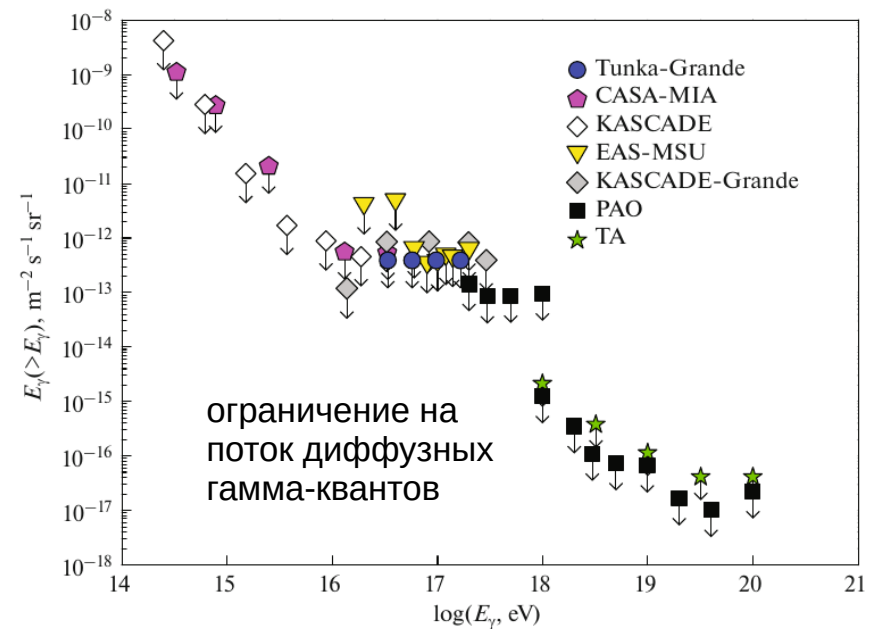
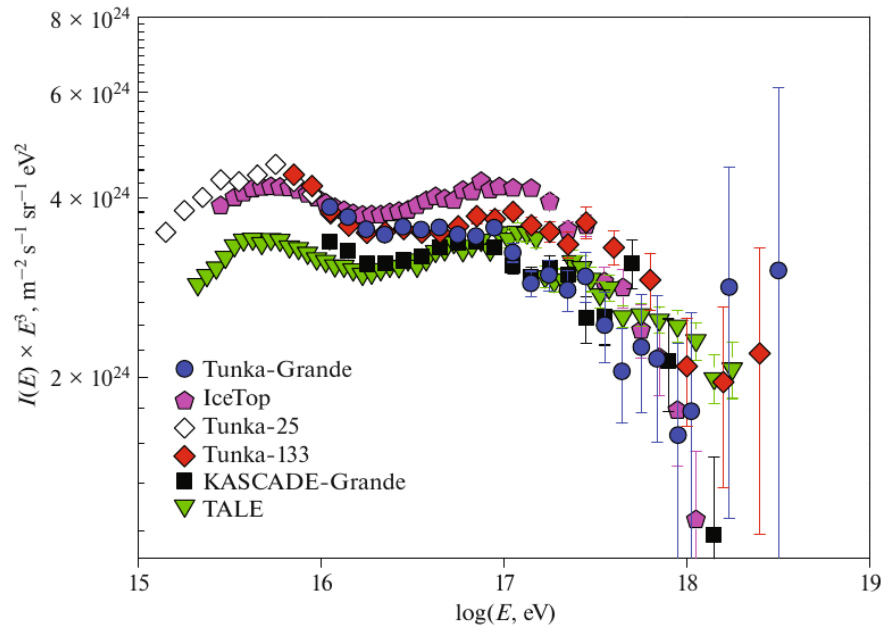
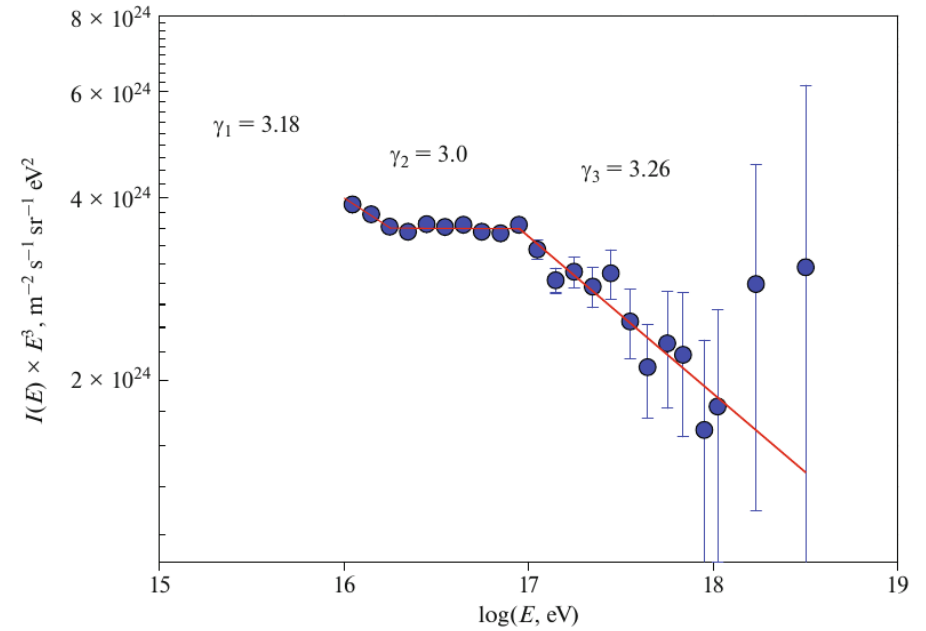
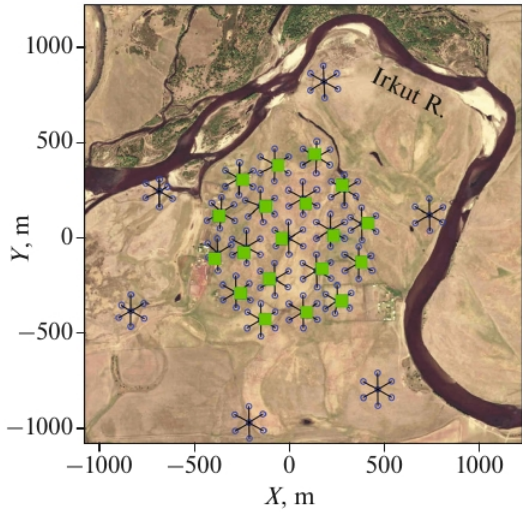
Mean Depth of EAS maximum  
 $X_{\max}$  ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )



Mean logarithm of primary mass.



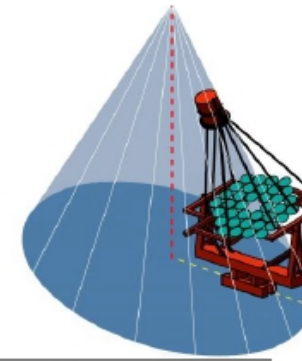
# Тунка-Гранде — сцинтилляционная методика ШАЛ





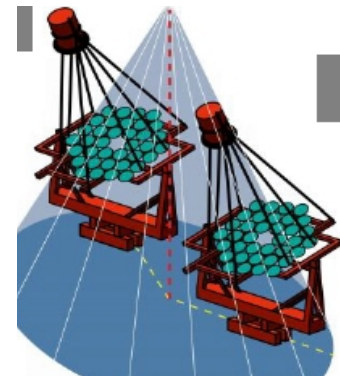
# Три подхода к регистрации гамма-квантов в эксперименте TAIGA

1. Регистрации только одним телескопом (моно-режим)  
 $E > 2 \text{ ТэВ}$

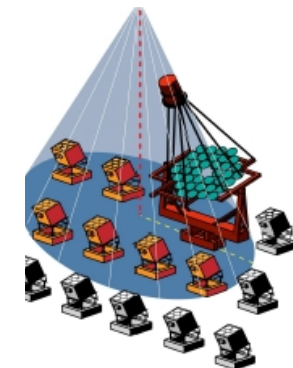


Mono mode  
 $E > 2 \text{ ТэВ}$

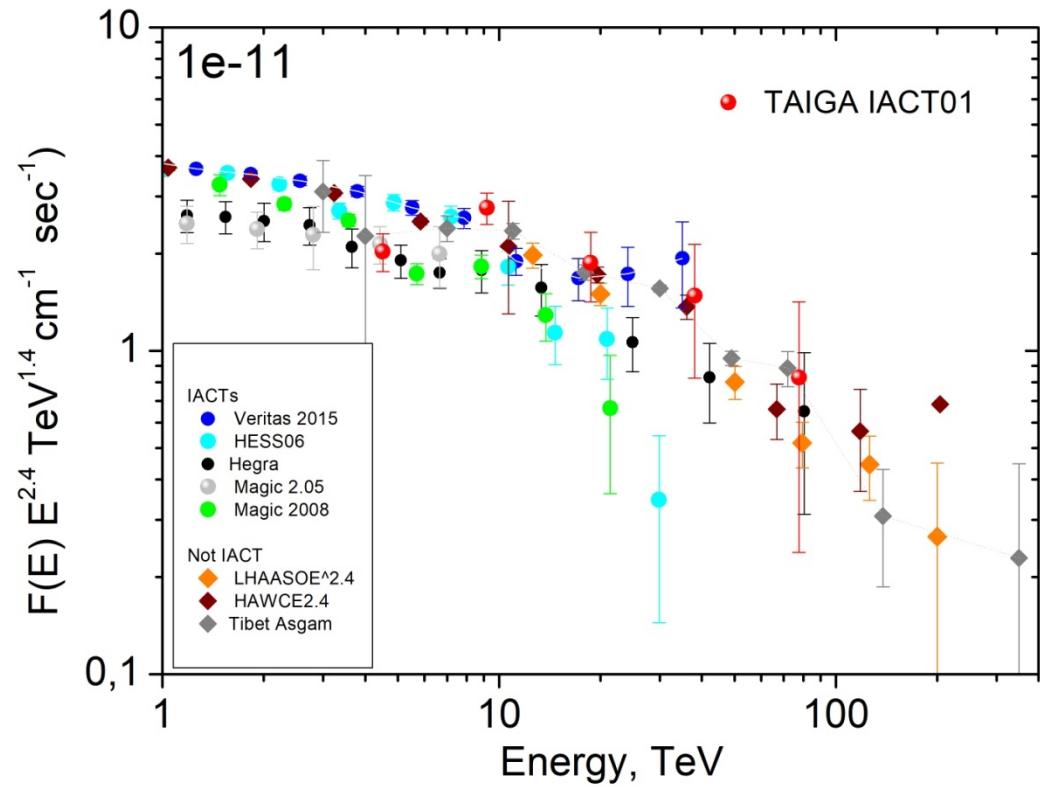
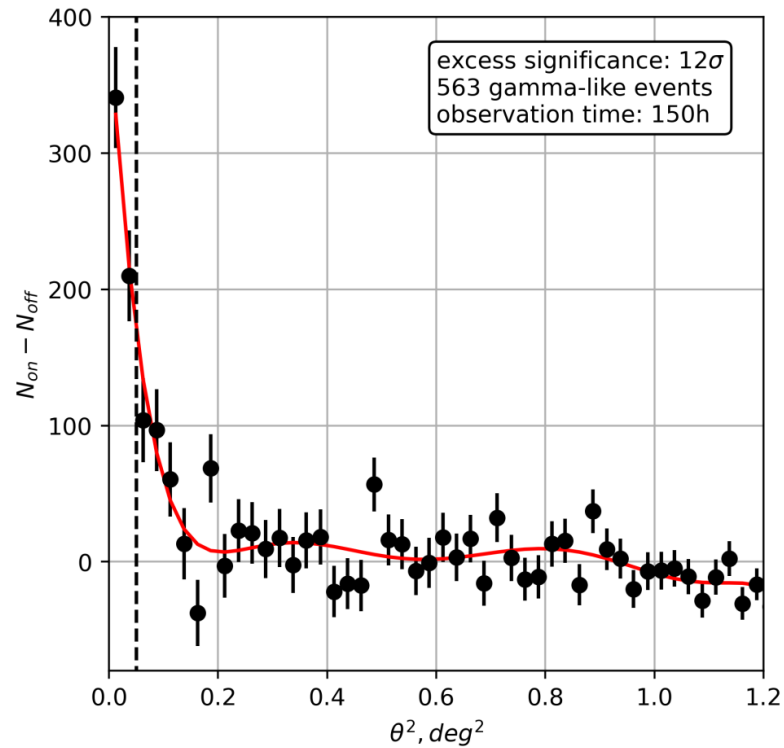
2. Регистрация двумя и большим числом телескопов  
(стерео-режим)  
 $E \geq 8 \text{ ТэВ}$



3. Регистрация событий совместно телескопами и  
установкой HiSCORE  
 $E \geq 50 \text{ ТэВ}$

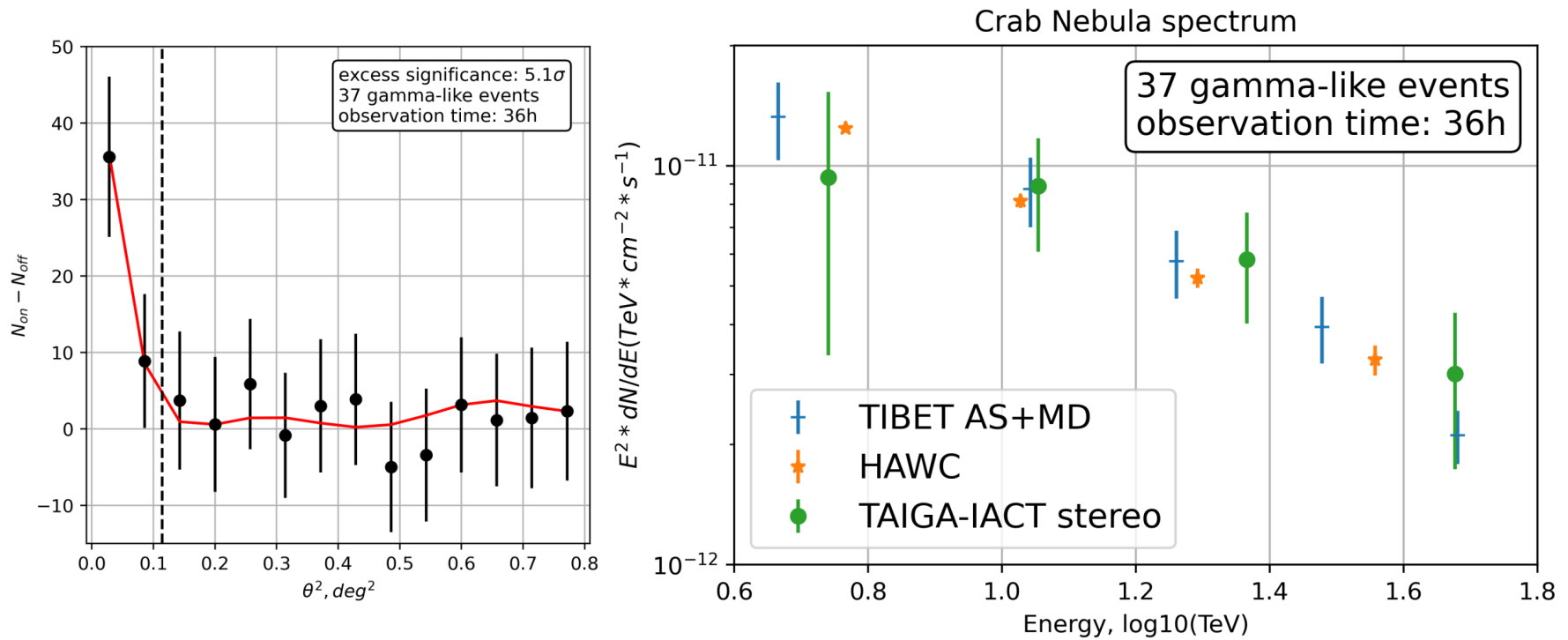


# Спектр Крабовидной туманности в моно-режиме 563 гамма-квантов, $12\sigma$ , 4-80 ТэВ

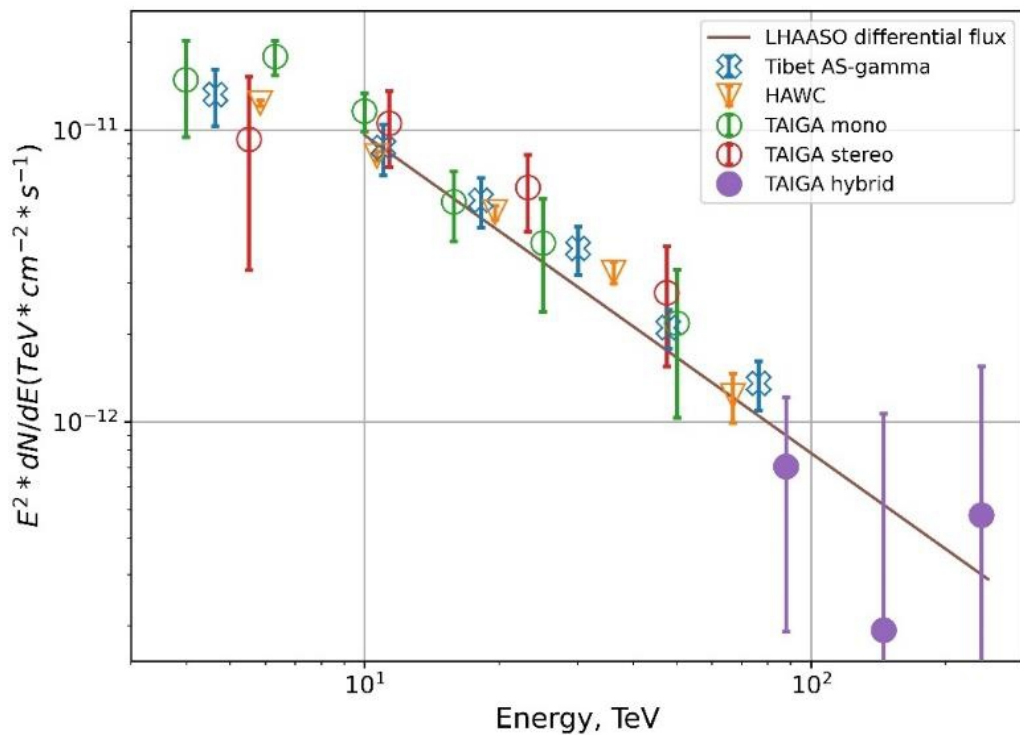


# Спектр Крабовидной туманности в стерео-режиме, два телескопа

## 37 гамма-квантов, $5.1\sigma$ , 5-50 ТэВ



# Объединенный энергетический спектр: моно, стерео и гибридные события

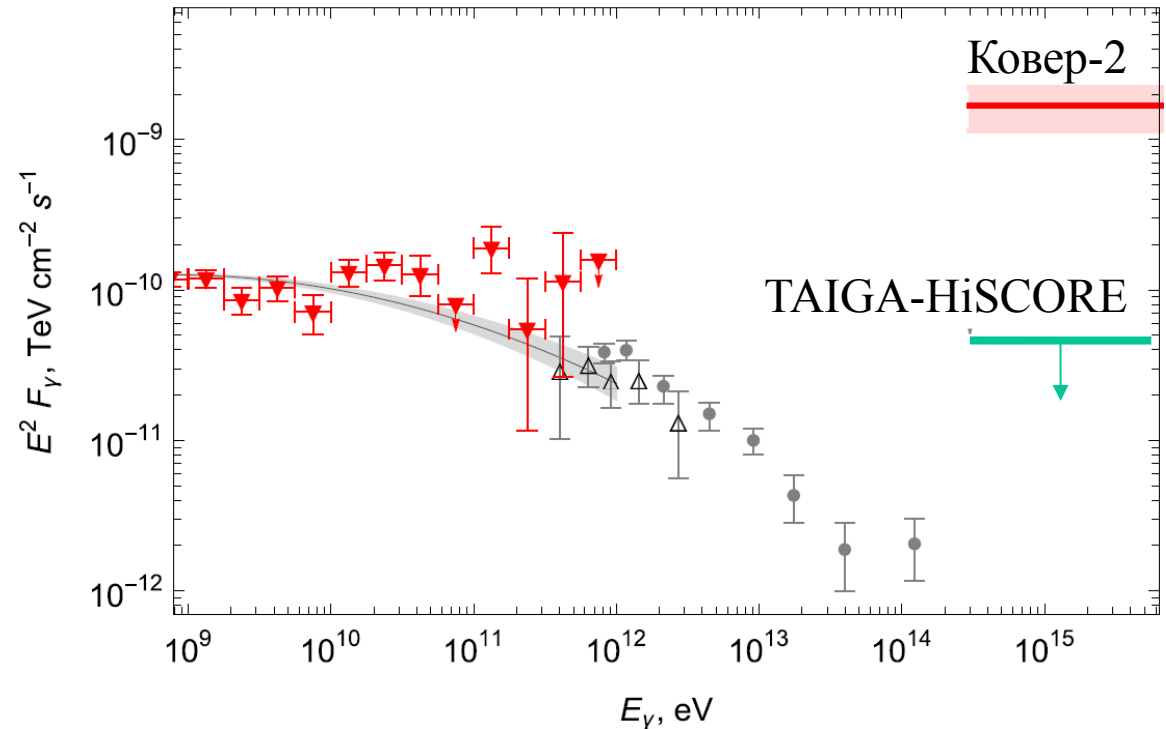
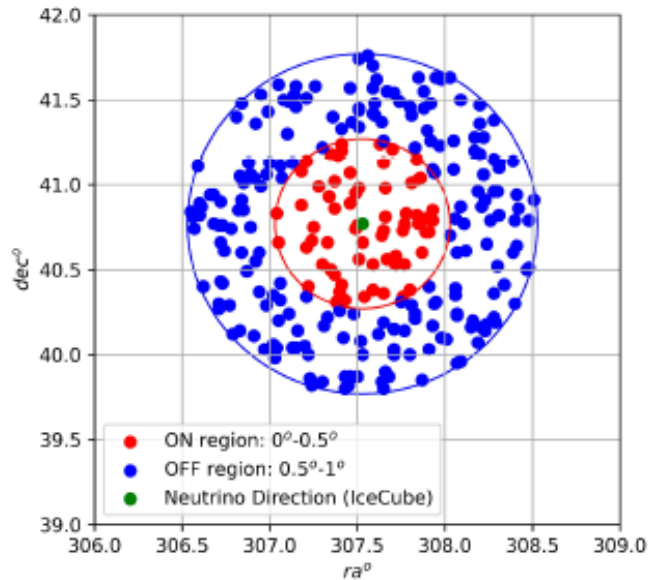


TAIGA –mono 12 sigma, 150 hours

TAIGA –stereo 5 sigma, 37 hours (2IACTS)

TAIGA- hybrid 2 sigma , 250 hours  
( 1 IACTs and 50 HiSCORE stations  
0.45 km<sup>2</sup>)

# Предел на поток гамма-квантов от туманности Sygnus-Cooper за октябрь-ноябрь 2020 года



20/11 2020 нейтрино с энергией  
150 ТэВ, в направлении  
Sygnus-Cooper (IceCube)

$$F(E)E^2 < 6 * 10^{-11} \frac{\text{ТэВ}}{\text{см}^2 * \text{с}}$$

на 90% уровне достоверности

# Планы на ближайшее будущее (2-3 года)

1. Два IACT с зеркалами диаметром по 4 метра и один с зеркалом 6 метров.
2. 12-15 внешних станций HiSCORE для увеличения эффективной площади до 1.5 – 2 км<sup>2</sup>.
3. Подземный водно-черенковский детектор площадью 40 м<sup>2</sup>.

*Известия РАН. Серия Физическая, 2023, том 87, No 7, с. 966–972*  
**Энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным астрофизического комплекса TAIGA**

*PoS (ICRC2023) 269*

**The TAIGA-1 – a hybrid complex for gamma-ray astronomy, cosmic ray physics and astroparticle physics**

*PoS (ICRC2023) 685*

**Hybrid method for study multi TeV gamma rays in the TAIGA astrophysical complex: methodics and results.**

*PoS (ICRC2023) 686*

**Gamma-hadron separation approach to point-like source observations in the TAIGA-IACT experiment in stereo observation mode**

*Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, Vol. 87, No. 7, pp. 1043–1045*

**Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays According to the Data of the TAIGA Astrophysical Complex**

*Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, Vol. 87, No. 7, pp. 893–899*

**Main Results from the TUNKA-GRANDE Experiment**

*Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, No. 4, pp. 471–477*

**The TAIGA—a Hybrid Detector Complex in Tunka Valley for Astroparticle Physics, Cosmic Ray Physics and Gamma-Ray Astronomy**



*Physics of Atomic Nuclei*, 2023, Vol. 86, No. 4, pp. 483–488

**Detection of TeV Emission from the Crab Nebula Using the First Two IACTs in TAIGA in Stereo Mode of Observation**

*Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 1002–1015

**Tunka-Grande Scintillation Plant: Status, Results, and Plans**

*Доклад на конференции IS CRA-23. Принято к печати в журнал «Ядерная физика».*

**Поиск гамма-квантов высоких энергий от источника Cygnus Cocoon в октябре-ноябре 2020 года**