

# От гамма-обсерватории TAIGA-1 к астрофизическому комплексу TAIGA-100: статус, результаты и планы

Р.Д. Монхоев от имени коллаборации TAIGA

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
Новосибирск, 12 марта 2026

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 23-72-00016)

---

# План доклада

---

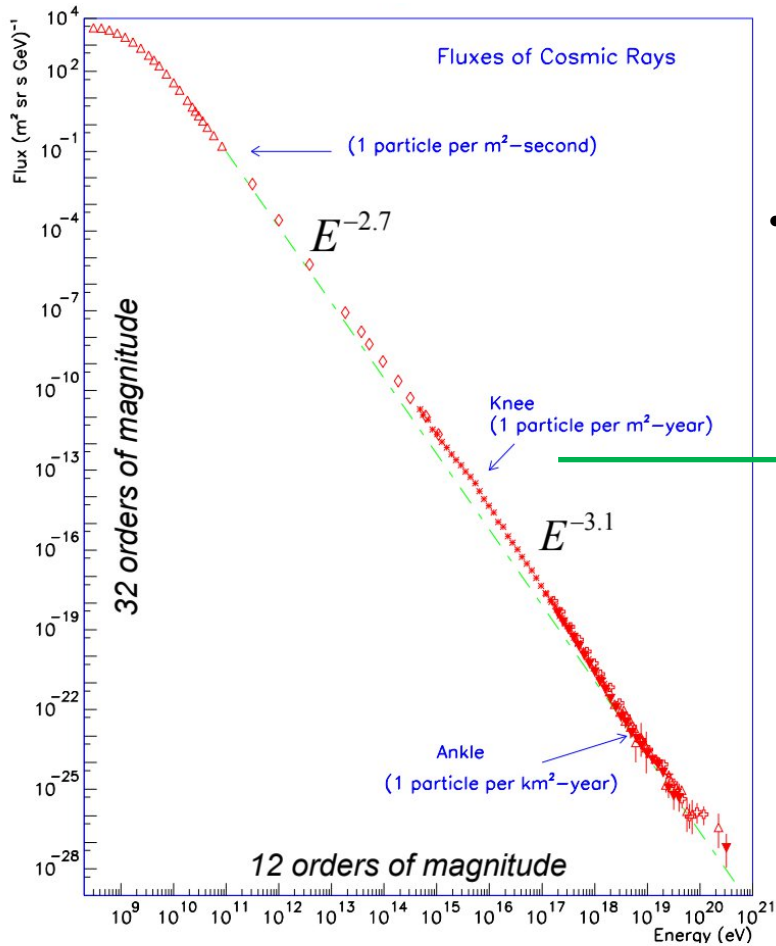
## **1. Гамма-обсерватория TAIGA-1**

- Исторический обзор
- Описание и статус
- Основные результаты

## **2. Проект астрофизического комплекса TAIGA-100**

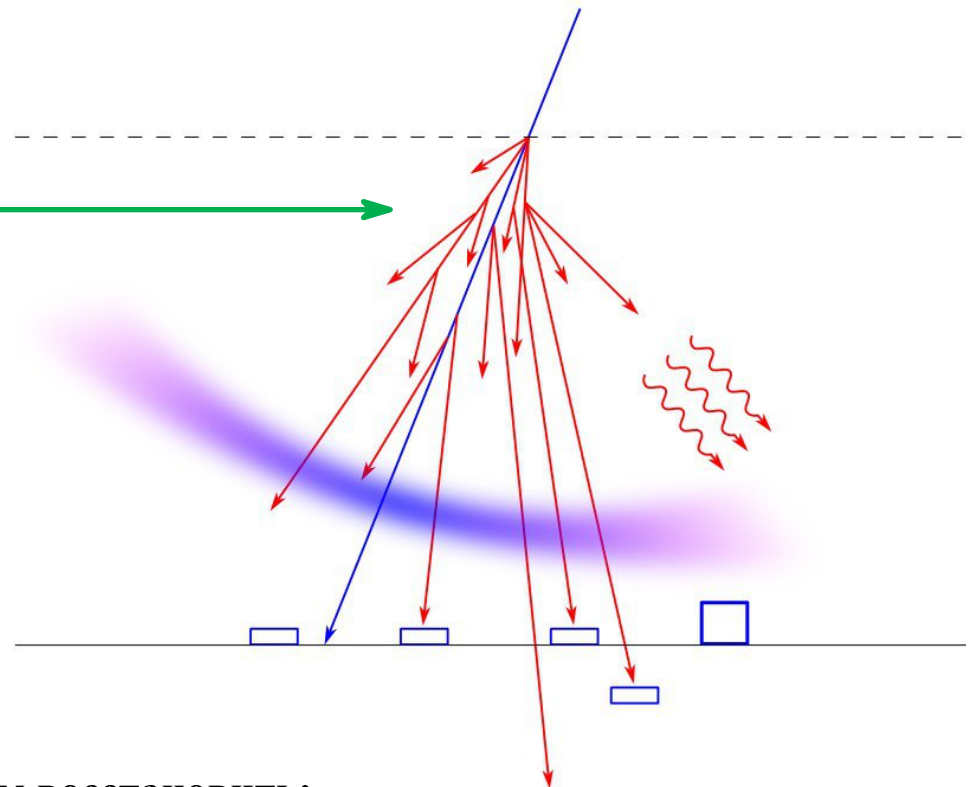
- Описание и статус
- Планы

# Космические лучи и широкие атмосферные ливни



## Что регистрируем:

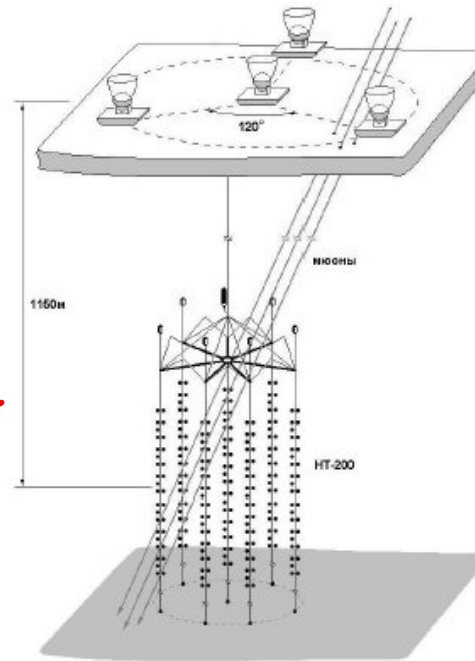
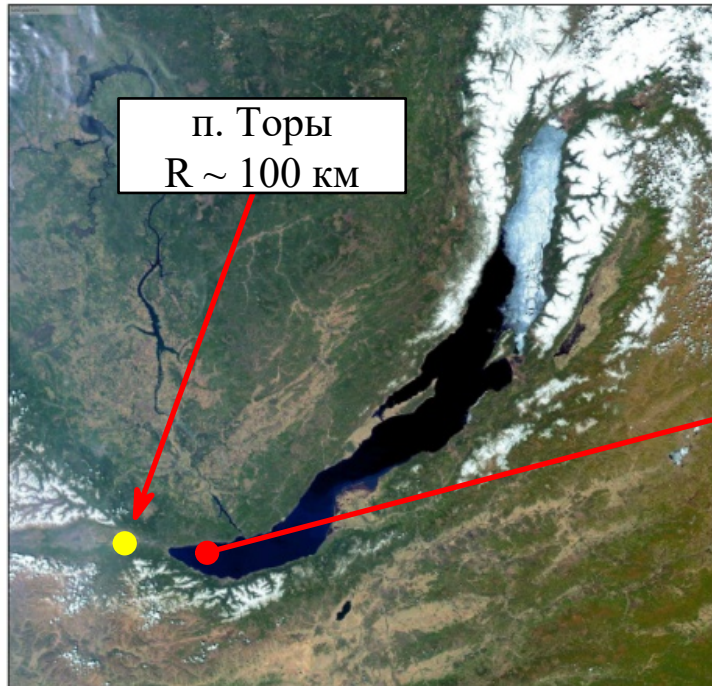
- Электрон-фотонная, мюонная, адронная компоненты
- Флуоресцентное, черенковское, радиочастотное излучения



## Что хотим восстановить:

- Энергию, тип, направление прихода первичной частицы

# От Байкальского нейтринного проекта к гамма-обсерватории TAIGA-1



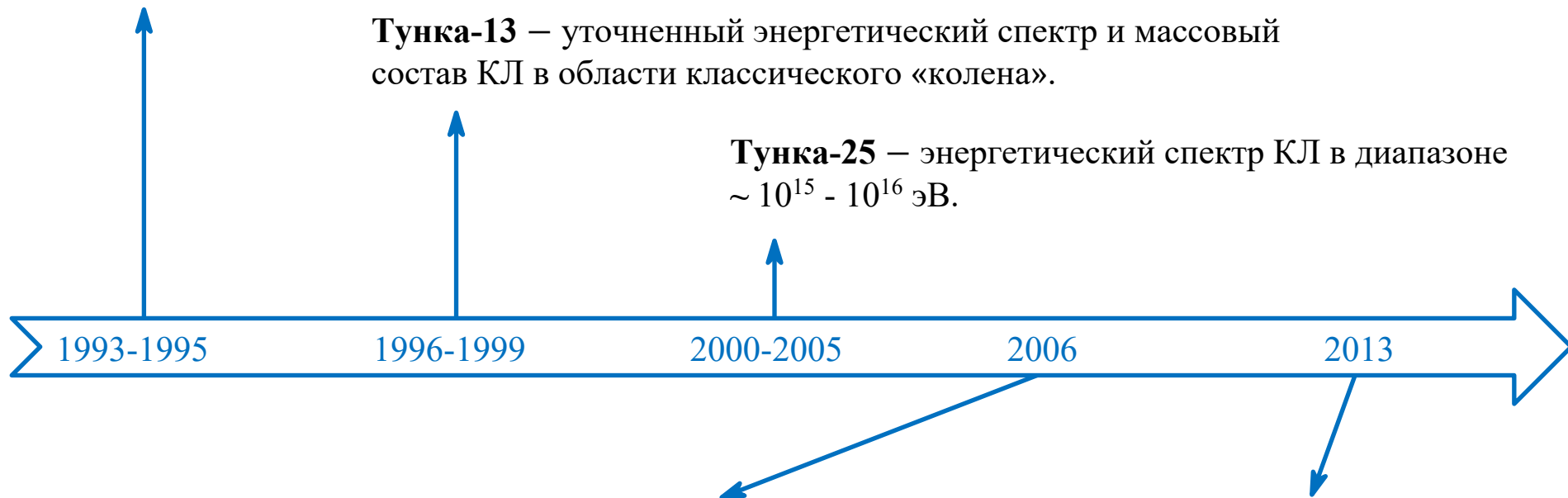
- 1991-1992 – Первые исследования на льду оз. Байкал с фотодетекторами КВАЗАР-370
- 1993 – Установка SMECA (Surface Mobile EAS Cherenkov Array)
- 1993 – Перенос эксперимента в Тункинскую долину (п. Торы, Тункинский район, республика Бурятия)

# От Байкальского нейтринного проекта к гамма-обсерватории TAIGA-1

**Тунка-4** – первый энергетический спектр КЛ в области классического «колена» ( $E \sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ) только по данным черенковского излучения.

**Тунка-13** – уточненный энергетический спектр и массовый состав КЛ в области классического «колена».

**Тунка-25** – энергетический спектр КЛ в диапазоне  $\sim 10^{15} - 10^{16}$  эВ.













**Тунка-133** – энергетический спектр и массовый состав КЛ в диапазоне  $10^{16} - 10^{18}$  эВ, особенности в спектре при энергии  $\sim 2 \cdot 10^{16}$  и  $10^{17}$  эВ.

Создание коллаборации TAIGA и начало строительства гибридной системы детекторов.

# Коллаборация TAIGA

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

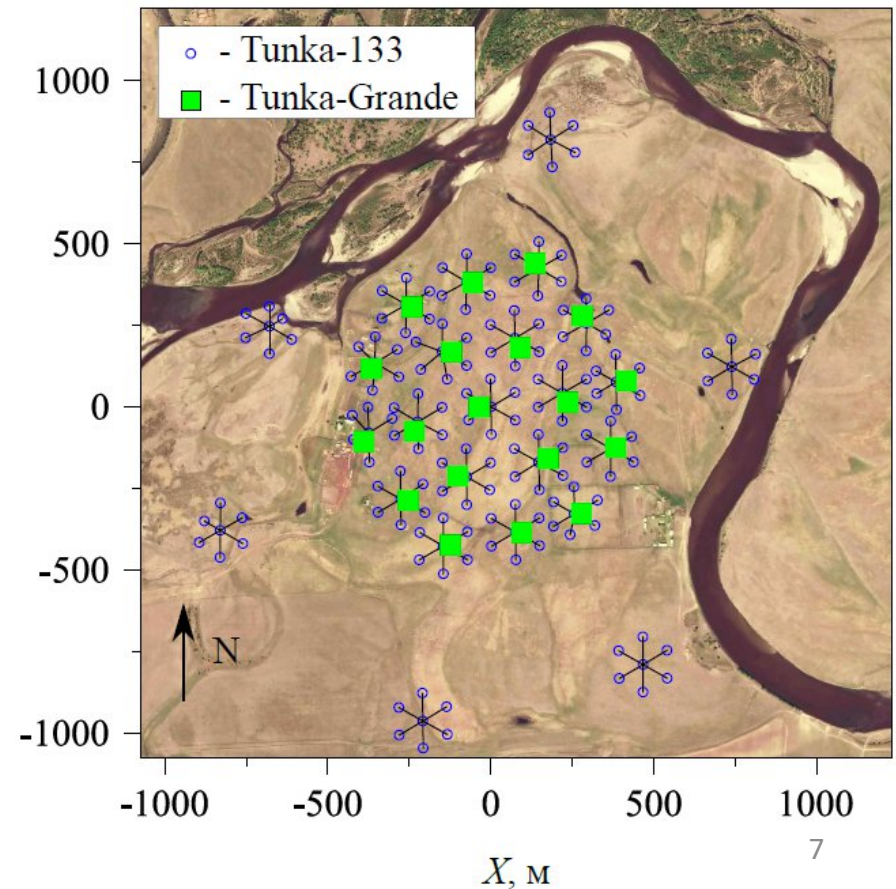
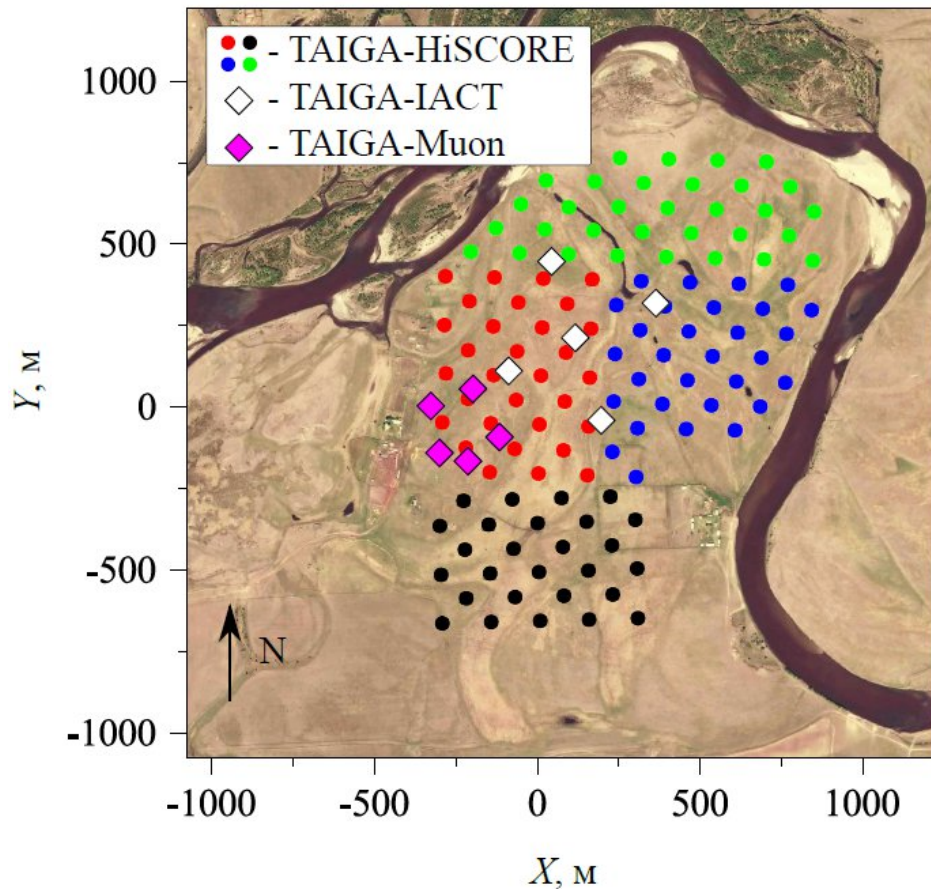
-  Иркутский государственный университет (ИГУ), Иркутск
-  НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ (НИИЯФ МГУ), Москва
-  Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), Москва
-  Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк
-  Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна
-  Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва
-  Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН), Новосибирск
-  Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск
-  Алтайский государственный университет (АлтГУ), Барнаул
-  Национальный институт ядерной физики (INFN), Турин

~ 80 членов коллаборации

# Астрофизический комплекс TAIGA-1

## Области исследования:

- Физика космических лучей в диапазоне энергий  $10^{14}$  -  $10^{18}$  эВ
- Гамма-астрономия при энергии выше  $10^{12}$  эВ



# Широкоугольная черенковская установка Тунка-133

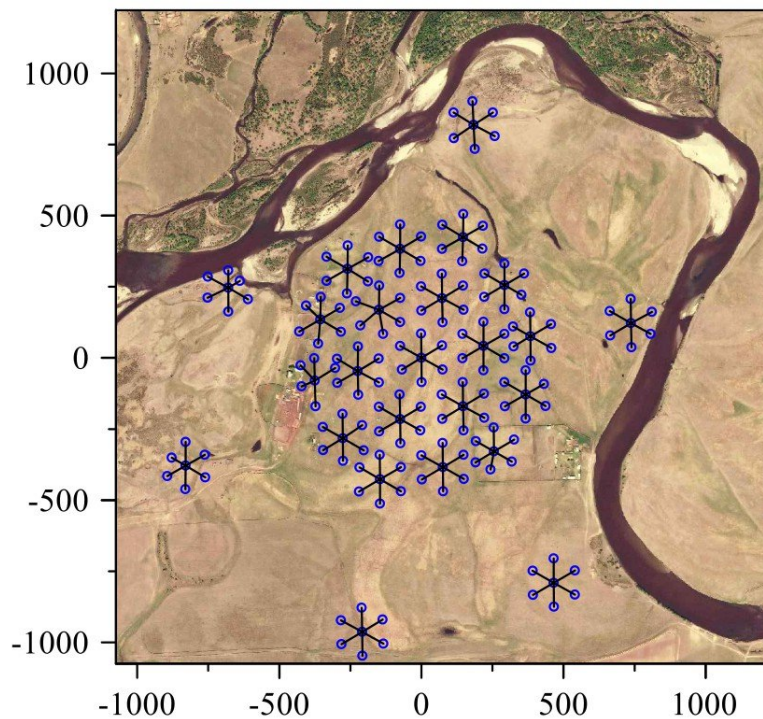
- Диапазон энергий:  $10^{16}$  -  $10^{18}$  эВ
  - С 2011 года 175 детекторов на площади  $\sim 3$  км<sup>2</sup>, расстояние между детекторами  $\sim 80$  м
- Точность восстановления параметров ШАЛ и КЛ:**
- Угловое разрешение  $\sim 0.5^\circ$
  - Точность положение оси  $\sim 10$  м
  - Энергетическое разрешение  $\sim 15\%$
  - Точность определения  $X_{\max} \sim 20 - 25$  г/см<sup>2</sup>



Оптический детектор

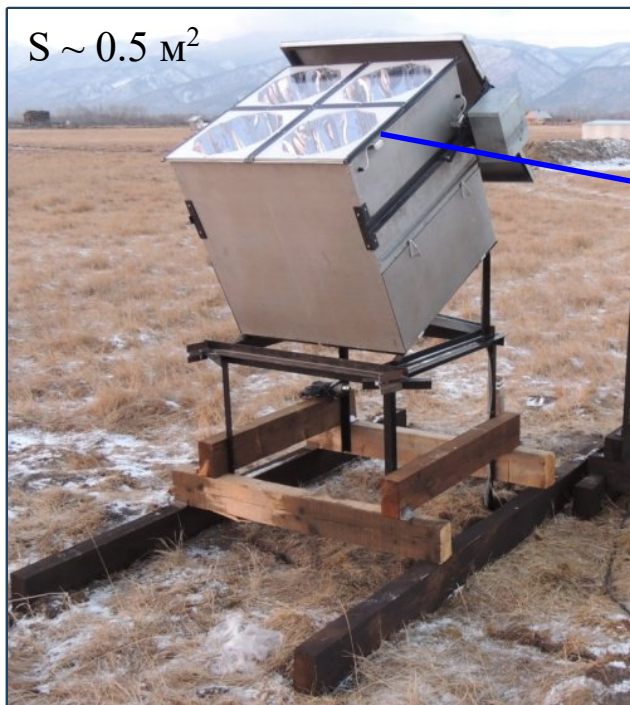


ФЭУ Hamamatsu R1408-01,  
ЕМІ 9350 диаметром  $\sim 20$  см

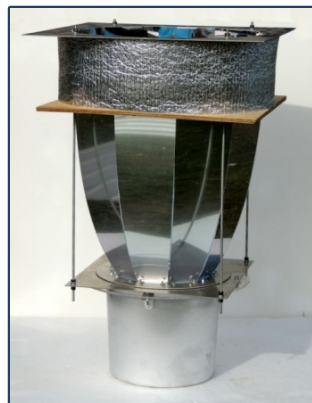


# Широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE High Sensitivity Cosmic Ray Explorer

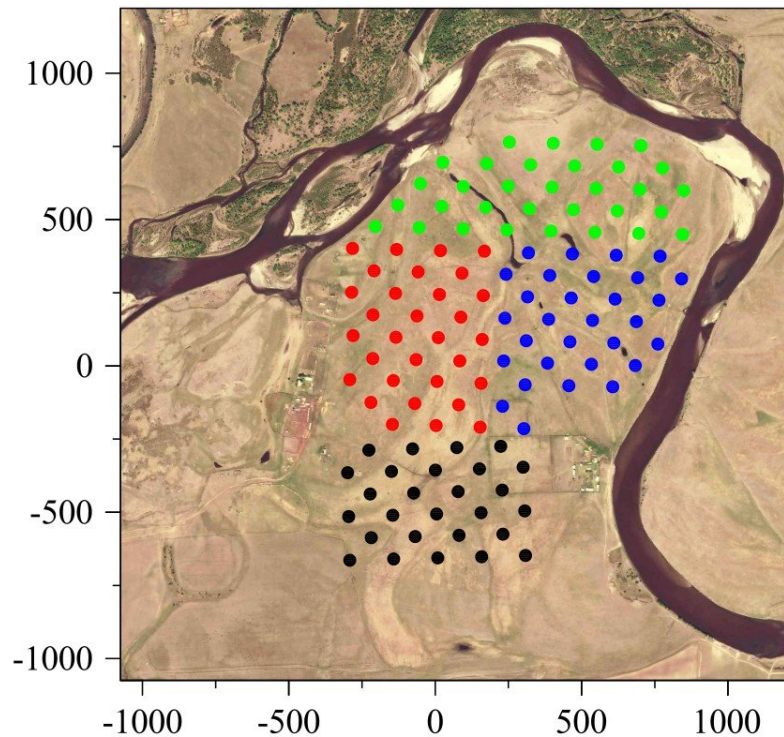
- Диапазон энергий:  $10^{14}$  -  $10^{17}$  эВ
  - С 2019 года 120 станций на площади  $\sim 1 \text{ км}^2$ , расстояние между детекторами  $\sim 106 \text{ м}$
- Точность восстановления параметров ШАЛ и КЛ:**
- Угловое разрешение  $\sim 0.15^\circ$
  - Точность положения оси  $\sim 10 \text{ м}$
  - Энергетическое разрешение  $\sim 15\%$
  - Точность определения  $X_{\text{max}} \sim 20 - 25 \text{ г/см}^2$



Размеры станции  $\sim 1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$

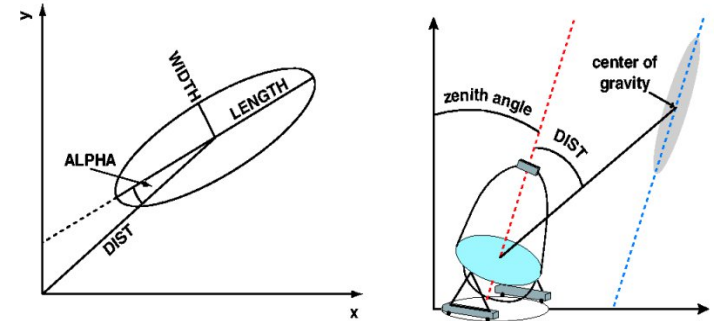


+

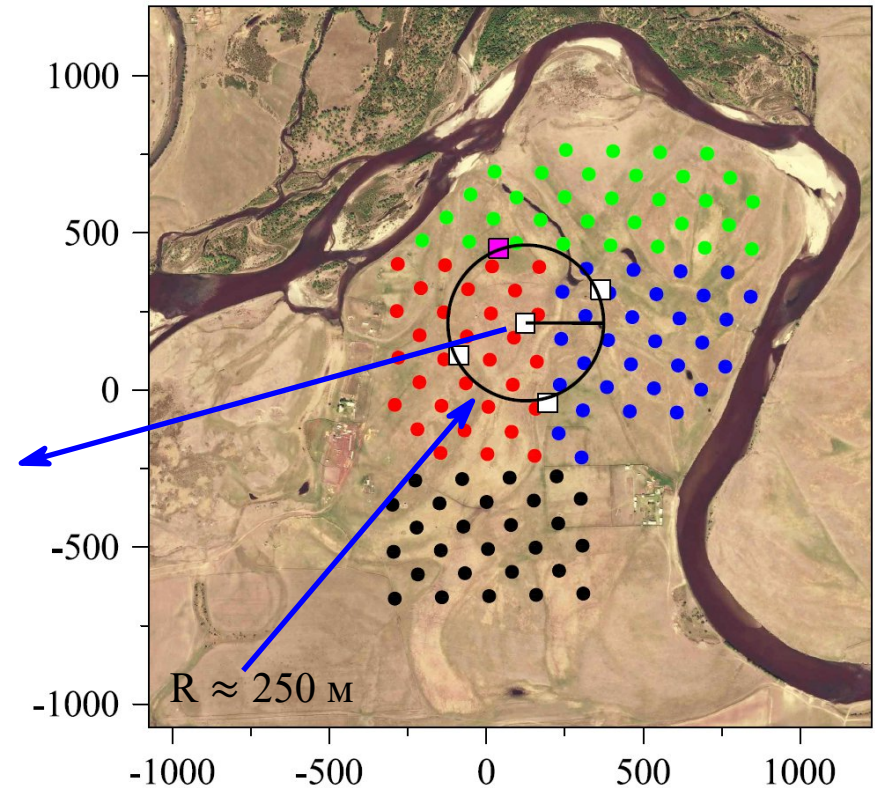


# Атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT Imaging Air Cherenkov Telescope

- Дизайн Дэвиса-Коттона
- 34 сегментированных зеркала  $\sim 10 \text{ м}^2$
- Фокусное расстояние – 4.75 м
- Диаметр камеры  $\sim 110 \text{ см}$
- Камера из  $\sim 600$  пикселей (ФЭУ ХР 1911)
- Угол обзора пикселя и камеры –  $0.36^\circ$  и  $9.72^\circ$
- Порог регистрации гамма-квантов  $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$

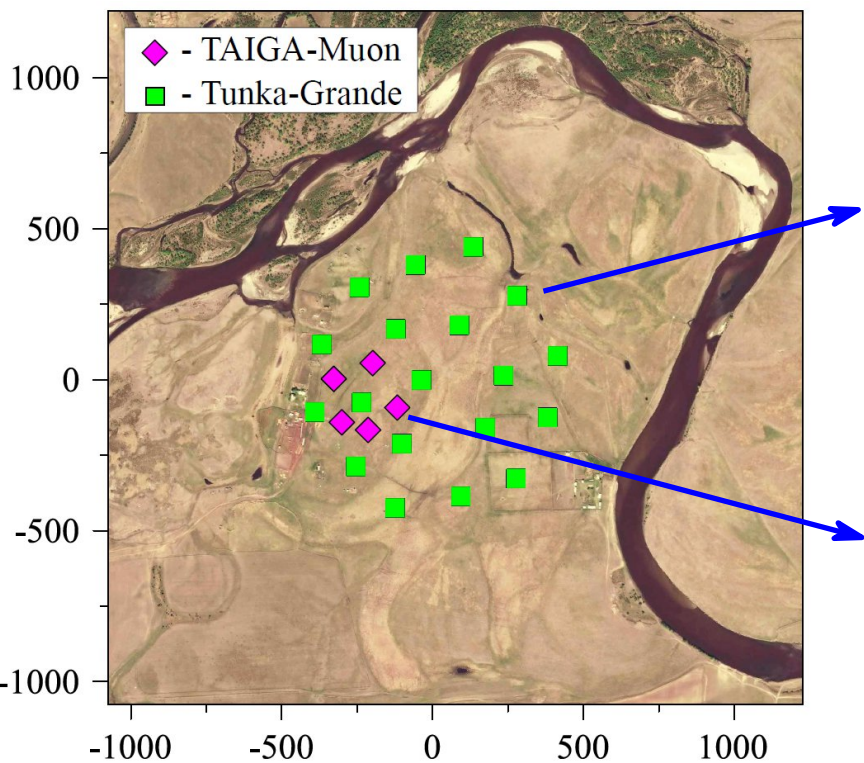


2017 г – первый телескоп  
2025 г – 4 телескопа  
2026 г – 5 телескопов



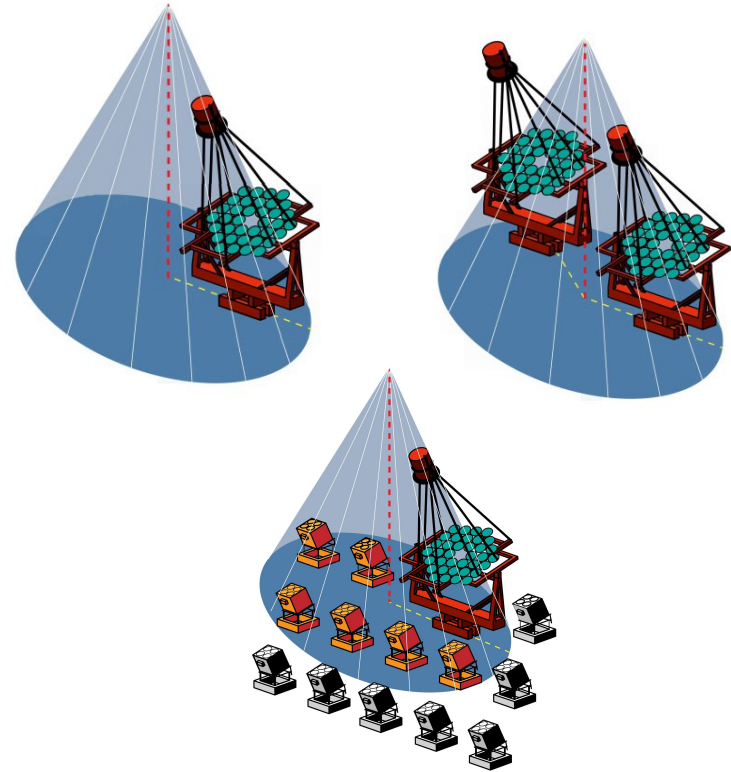
# Сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon

- Диапазон энергий  $10^{16}$  -  $10^{18}$  эВ
  - Регистрация электрон-фотонной и мюонной компоненты ШАЛ
  - С 2016 года 19 станций Tunka-Grande на площади  $\sim 0.5$  км<sup>2</sup> и с 2025 года 5 кластеров TAIGA-Muon
- Точность восстановления параметров ШАЛ и КЛ:**
- Угловое разрешение  $\sim 2^\circ$
  - Точность положения оси  $\sim 20$  м
  - Энергетическое разрешение  $\sim 35\%$



# Три подхода к регистрации ШАЛ на установках TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT

- Монорежим: автономная работа одного телескопа  
 $E > 2$  ТэВ
- Стереоскопический подход при больших расстояний  
между телескопами  $E > 8$  ТэВ
- Гибридный подход – совместная работа  
TAIGA-HiSCORE и телескопов  $E > 40$  ТэВ

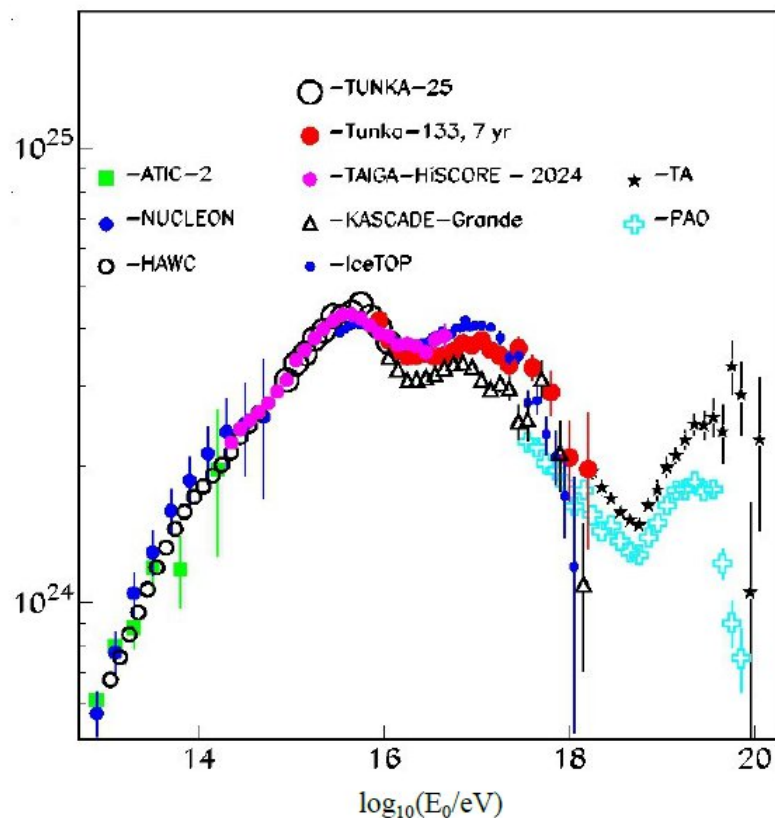
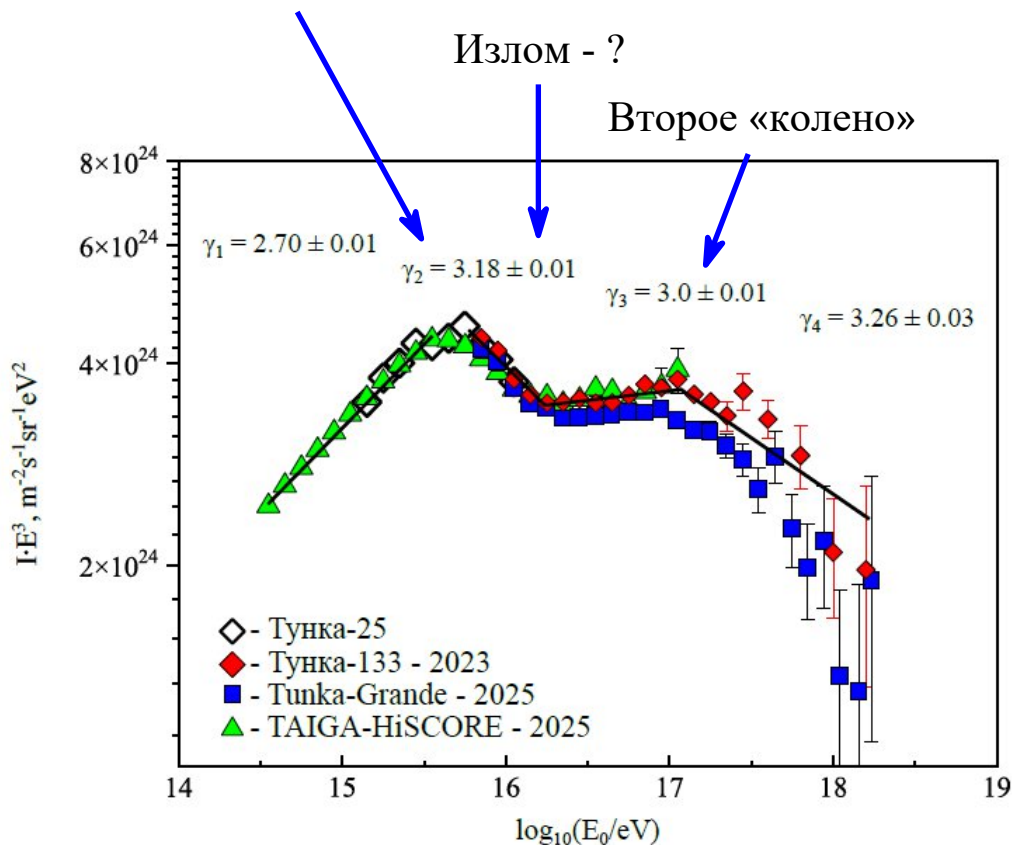


+



# Энергетический спектр космических лучей

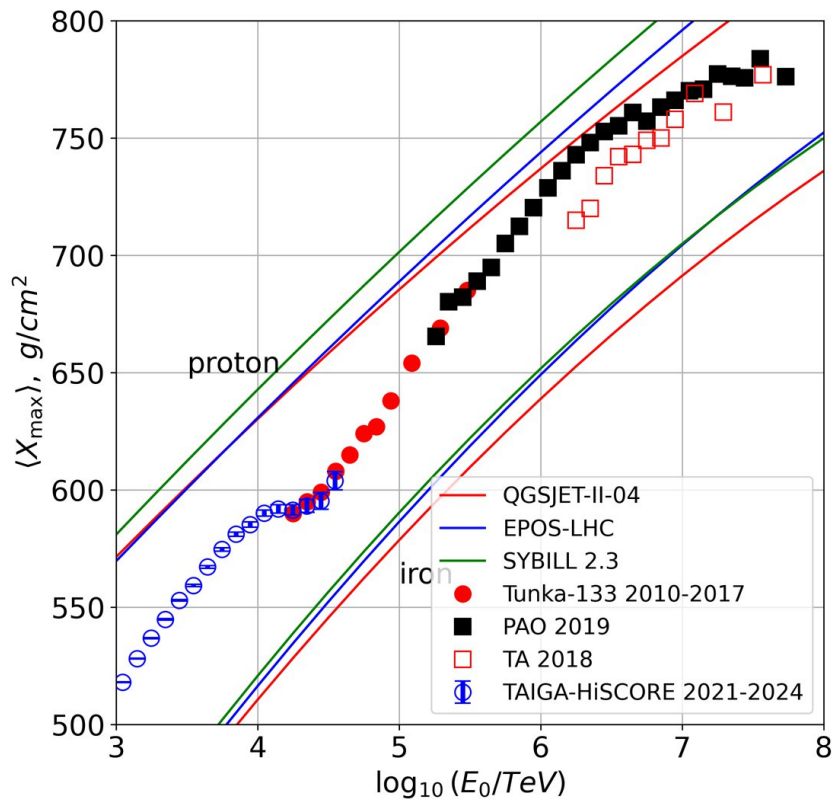
Классическое «колени»



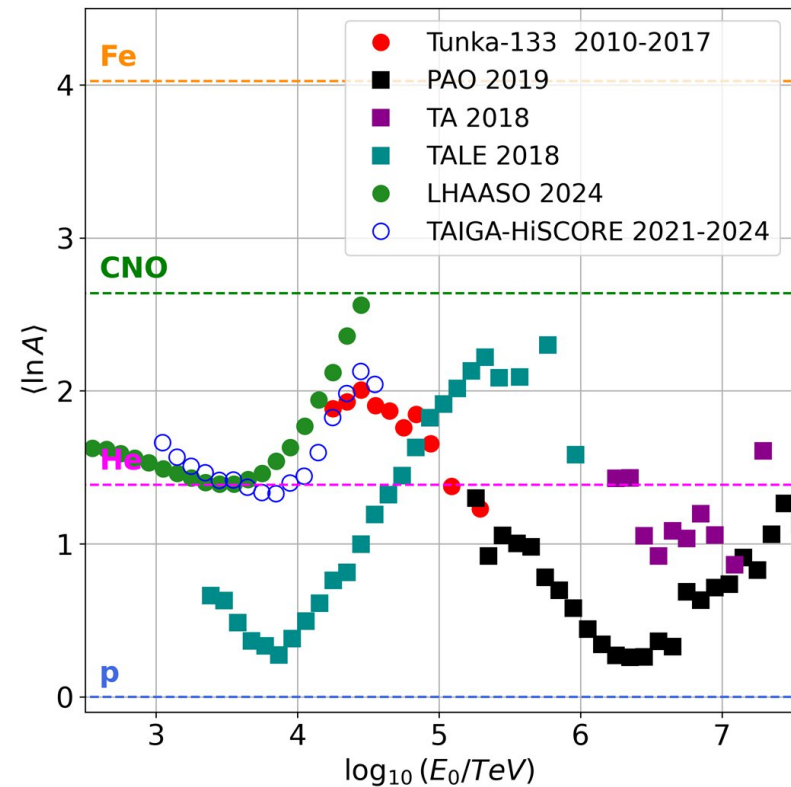
- В диапазоне энергий  $10^{15}$  -  $10^{18}$  эВ наблюдаются 3 статистически обеспеченные особенности при энергиях  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ,  $2 \cdot 10^{16}$  эВ и  $10^{17}$  эВ
- В пределах систематической ошибки измерения энергии КЛ  $\sim 5\%$  все спектры достаточно хорошо согласуются между собой

# Массовый состав космических лучей

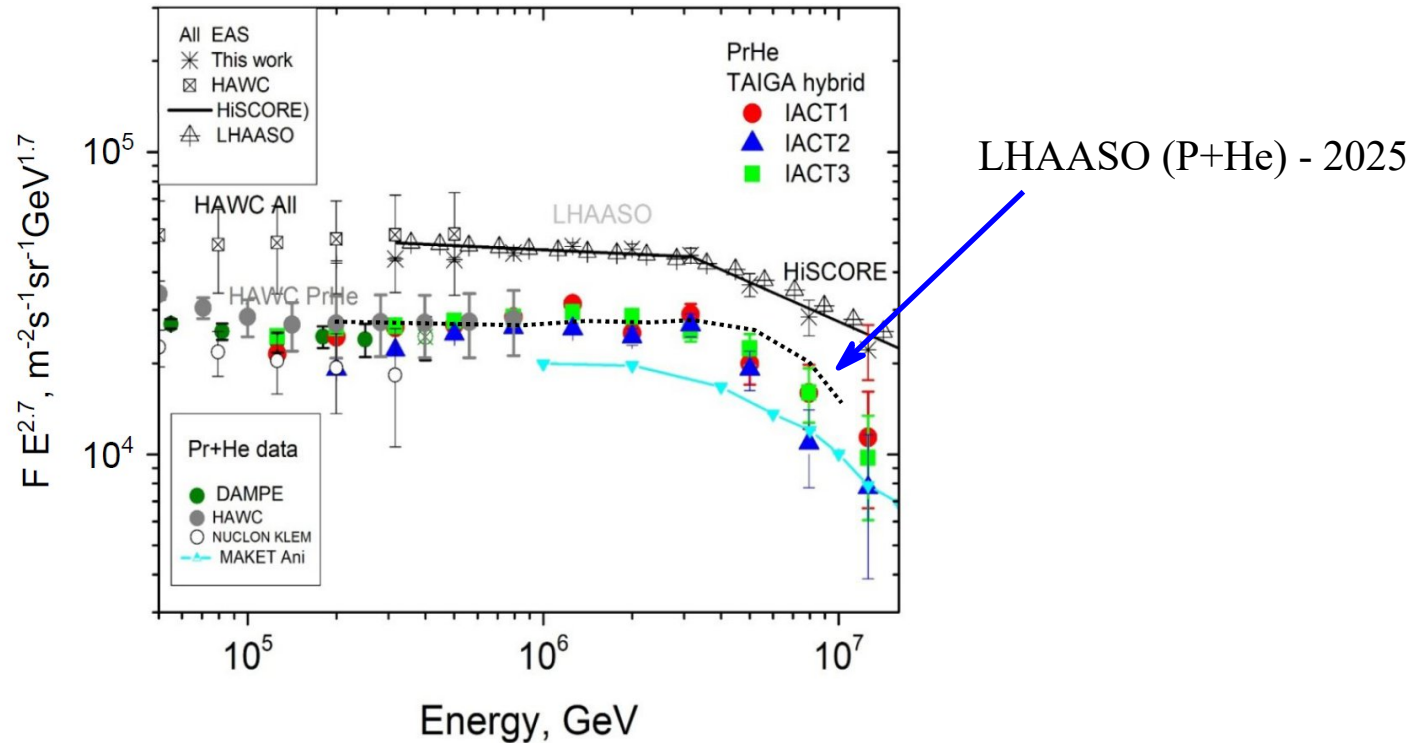
Глубина максимума развития ШАЛ  $\langle X_{\max} \rangle$



Средний логарифм атомной массы  $\langle \ln A \rangle$

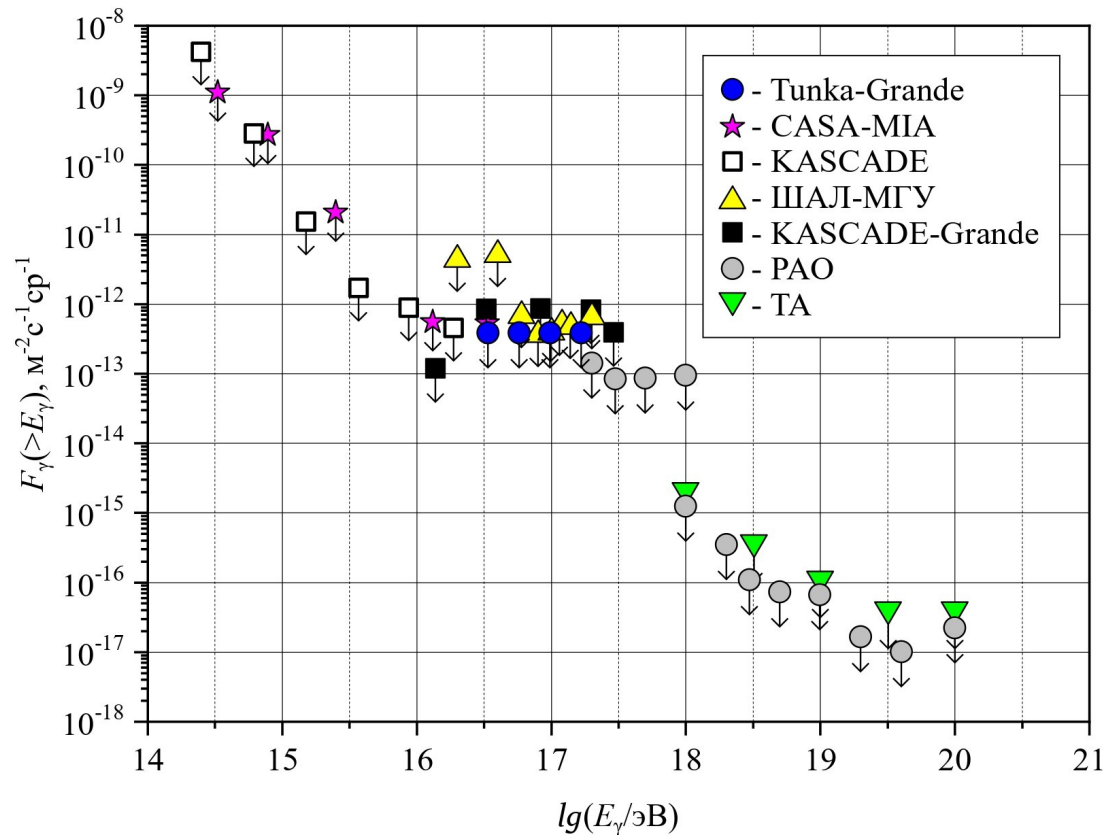


# Энергетический спектр легкой компоненты космических лучей



- В спектре легкой компоненты (P+He) по данным гибридного подхода (TAIGA-HiSCORE + TAIGA-IACT, 55 часов) наблюдается излом при энергии  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ
- Согласие с данными прямых измерений DAMPE и NUCLEON в области  $\sim 2 \cdot 10^{14}$  эВ
- Согласие с данными LHAASO в области  $\sim 2 \cdot 10^{14} - 10^{16}$  эВ

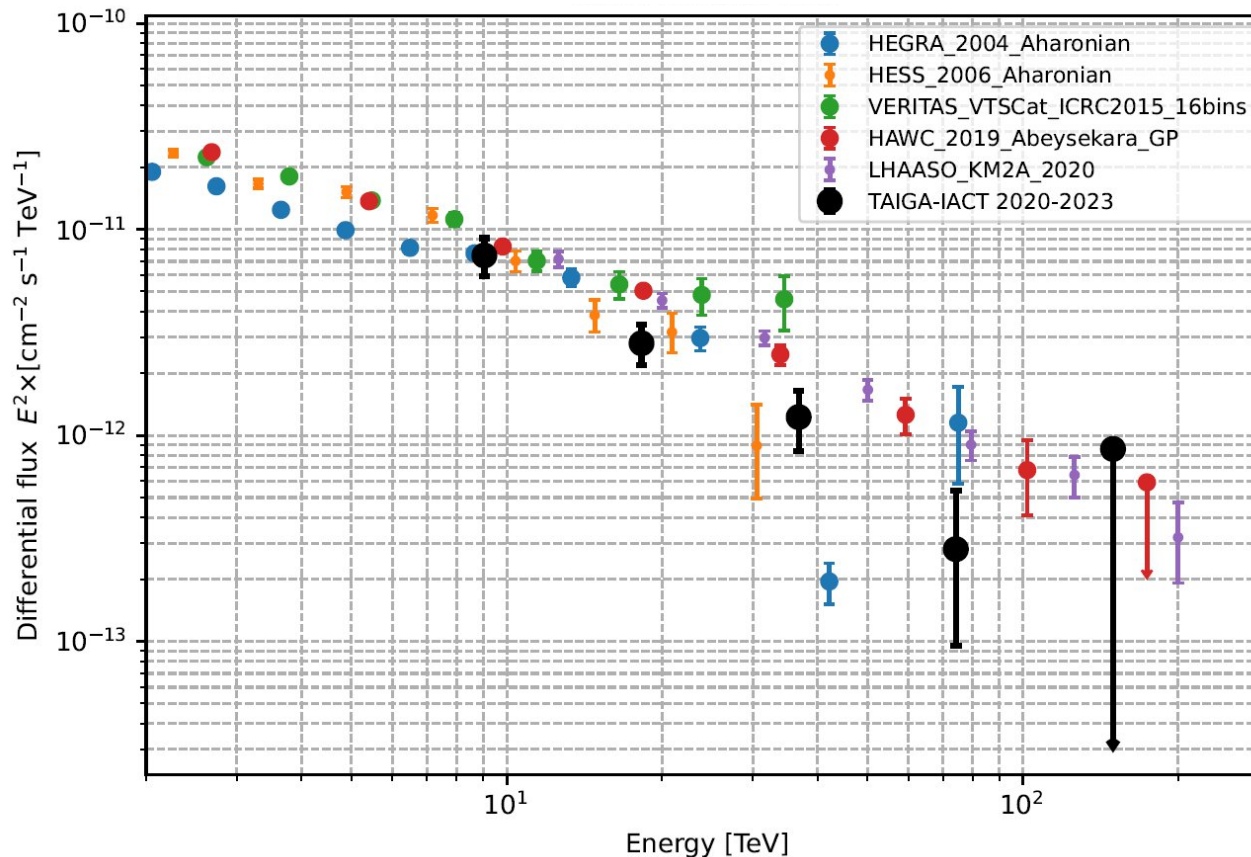
# Ограничения на интегральный поток диффузного гамма-излучения



Верхние пределы по данным установки Tunka-Grande (2023 г) по порядку величины находятся на одном уровне с аналогичными измерениями экспериментов KASCADE-Grande, ШАЛ-МГУ и PAO.

# Энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности

Научная программа TAIGA-1 включает в себя наблюдение следующих источников: Dragonfly Nebula, Boomerang Nebula, Crab Nebula, CTA-1, LHAASO J0341+5258, Mrk 421, Mrk 501



Энергетический спектр по данным TAIGA-IACT (186 часов наблюдений) находится в хорошем согласии с результатами HEGRA, HESS, VERITAS, HAWC, LHAASO.

---

# Астрофизический комплекс TAIGA-100

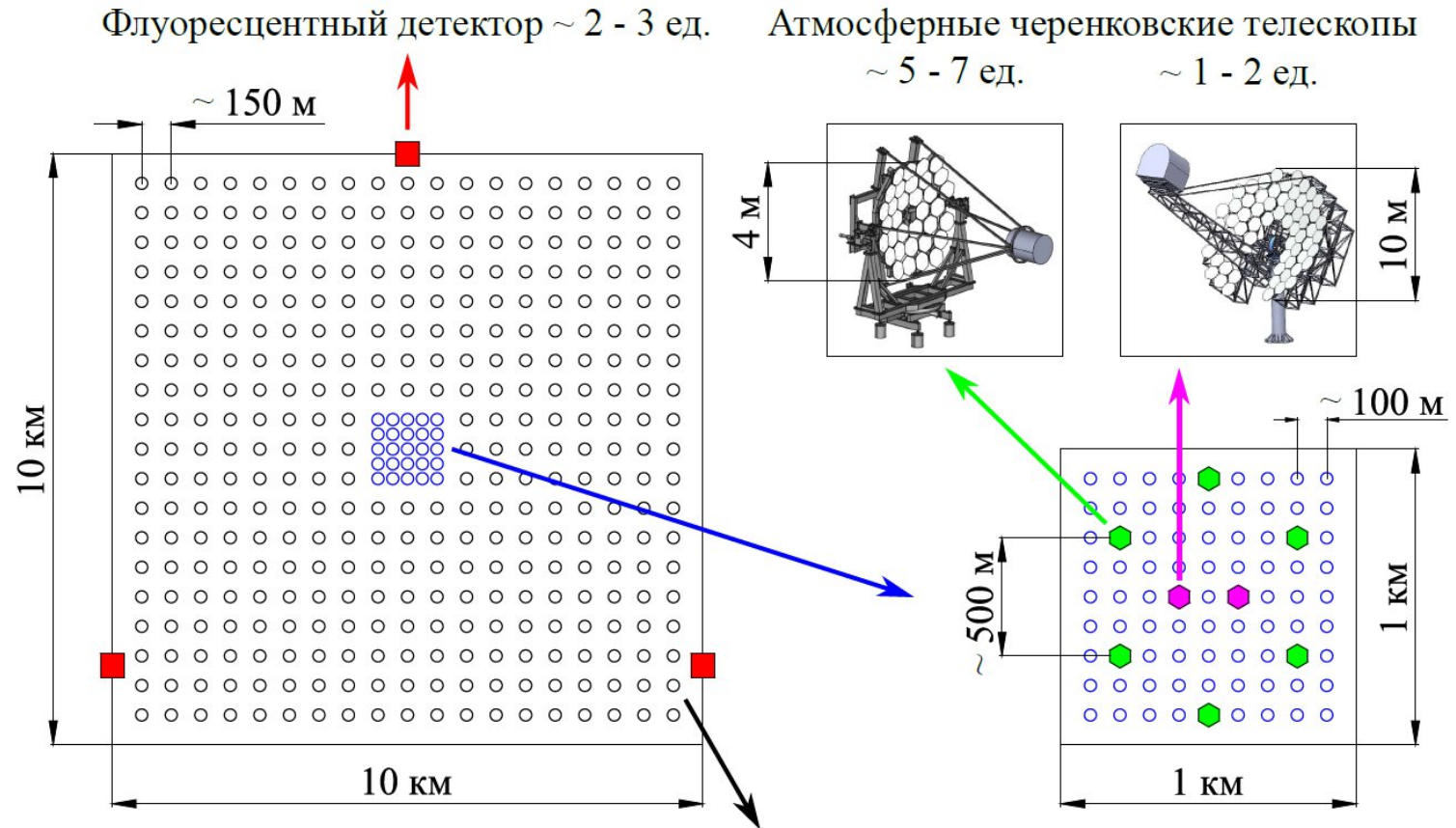
---

TAIGA-100 – проект крупномасштабного экспериментального комплекса следующего поколения с гибридной системой детекторов на площади порядка 100 км<sup>2</sup>.

## Научная программа

1. Исследования в области гамма-астрономии при энергиях  $\geq 10^{14}$  эВ
2. Исследования в области физики космических лучей (КЛ) в диапазоне  $10^{14}$  -  $10^{19}$  эВ
3. Поиск диффузного гамма-излучения в интервале энергий  $10^{14}$  -  $10^{19}$  эВ
4. Поиск гамма-квантов от гамма-всплесков с энергией  $\geq 5 \cdot 10^{12}$  эВ
5. Поиск горизонтальных нейтринных событий с энергией  $\geq 10^{17}$  эВ
6. Исследования в области геофизики
7. Поиск «новой физики»

# Состав комплекса и схематичное расположение детекторов

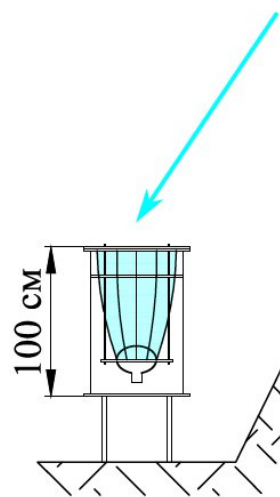


Станция ~ 3000 ед.:

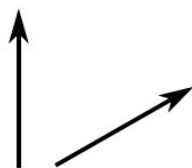
Широкоугольный атмосферный черенковский детектор, водный черенковский детектор, сцинтилляционные счетчики, радиоантенна

# Станция

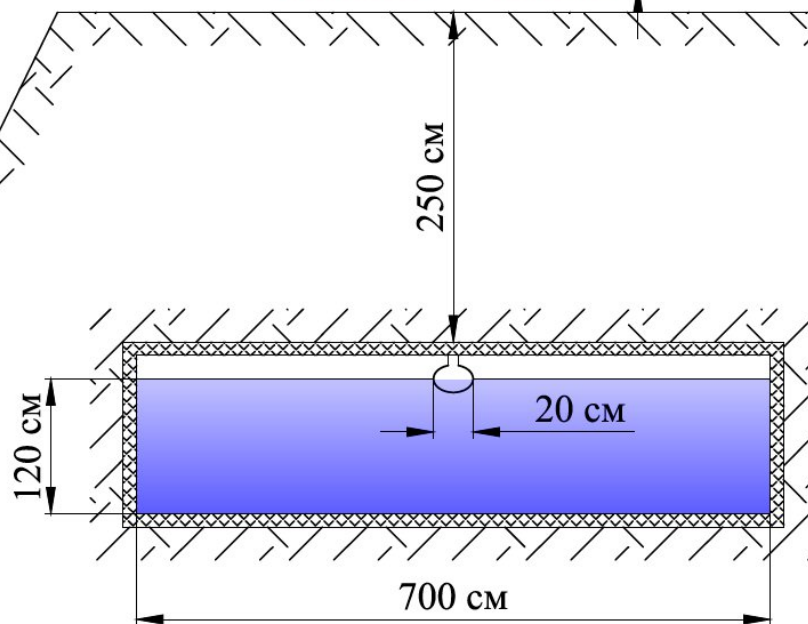
Широкоугольный атмосферный черенковский детектор



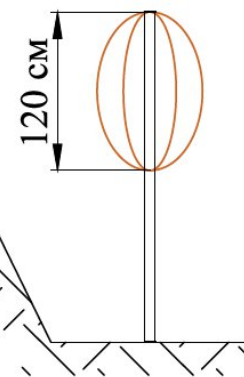
Базовые детекторы  
комплекса TAIGA-100



Сцинтилляционные счетчики



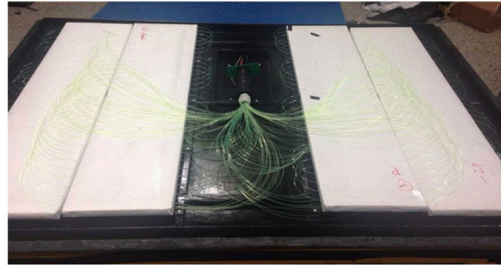
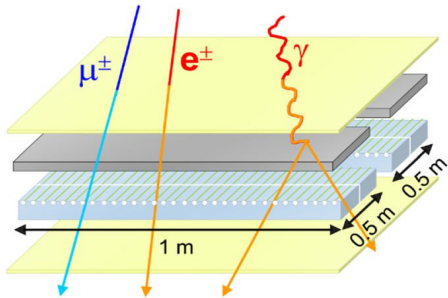
Водный черенковский детектор



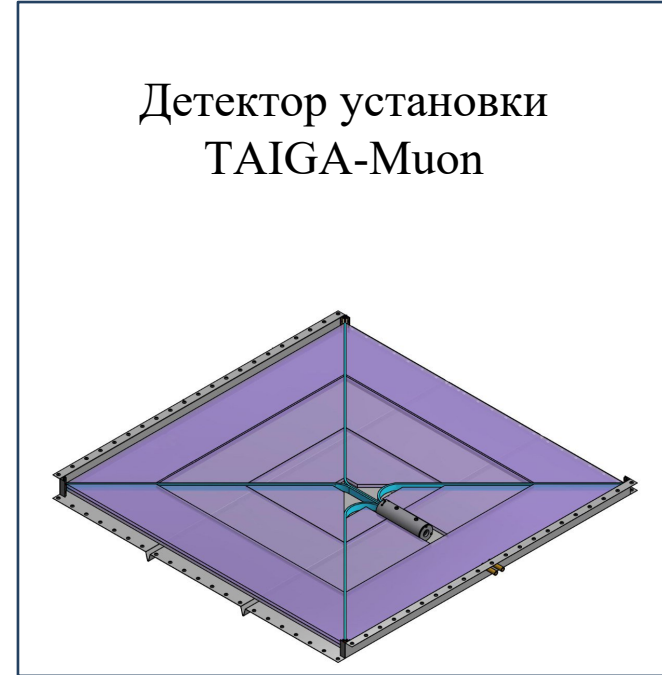
Радиоантенна

# Сцинтилляционные счетчики

Детектор установки KM2A обсерватории LHAASO



Детектор установки  
TAIGA-Muon



← Варианты →

- Эффективная площадь  $\sim 1 \text{ м}^2$
- Толщина сцинтиллятора  $\sim 1 \text{ см}$
- Неоднородность светосбора  $\leq 20\%$
- Динамический диапазон  $\sim 10^4$  частица/м<sup>2</sup>
- Поглотитель для конвертации гамма-квантов
- Порог регистрации ШАЛ  $\sim 10^{14}$  эВ ( $\sim 2000$  м н.у.м) или  $\sim 10^{15}$  эВ (700 м н.у.м).

# Радиоантенна

- Установка Tunka-Rex
- Диапазон частот  $\sim 30 - 80$  МГц



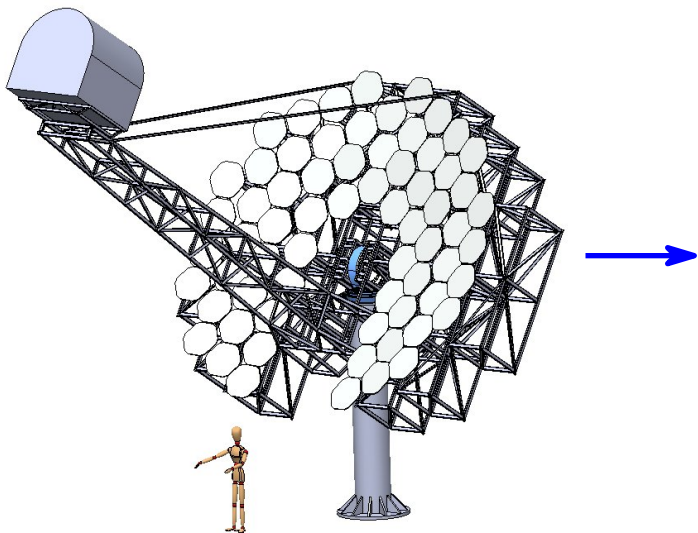
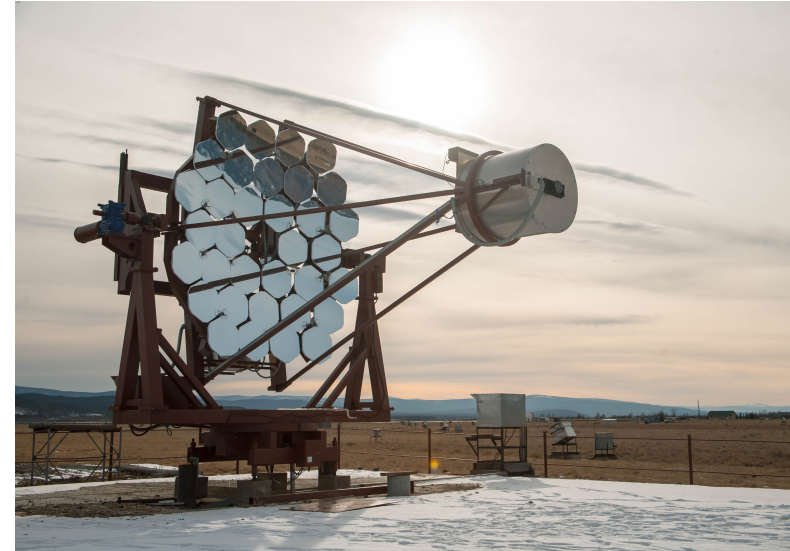
- Установка GrandProto300
- Диапазон частот  $\sim 50 - 200$  МГц



- Энергетический порог регистрации КЛ  $\sim 10^{17}$  эВ
  - Регистрация горизонтальных ШАЛ
  - Автономная работа антенн

# Атмосферные черенковские телескопы

- 5 телескопов в составе комплекса TAIGA-1
- Порог регистрации гамма-квантов  $\sim 3 \cdot 10^{12}$  эВ
  - Замена ФЭУ на SiPM - ?



- Дизайн Дэвиса-Коттона
- Полная площадь отражателя  $\sim 80 \text{ м}^2$
- Камера из  $\sim 2000$  пикселей (SiPM)
- Угол обзора пикселя и камеры —  $0.24^\circ$  и  $\sim 5^\circ$
- Порог регистрации гамма-квантов  $\sim 3 \cdot 10^{11}$  эВ
- Прототип телескопа проекта ALEGRO

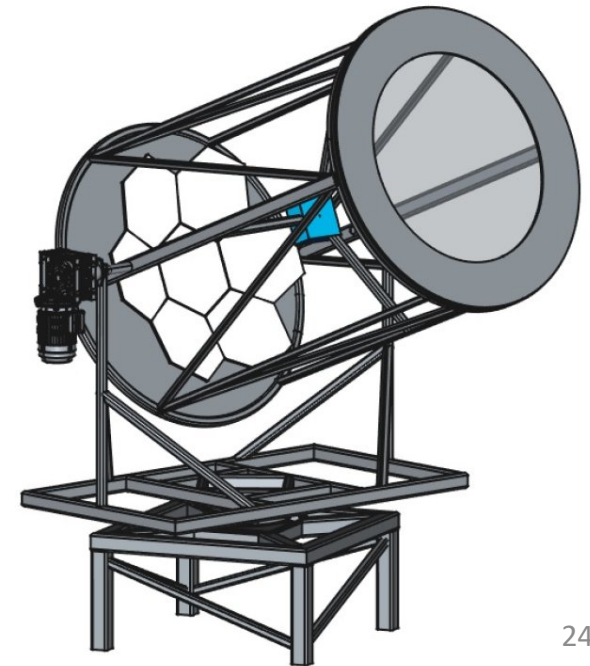
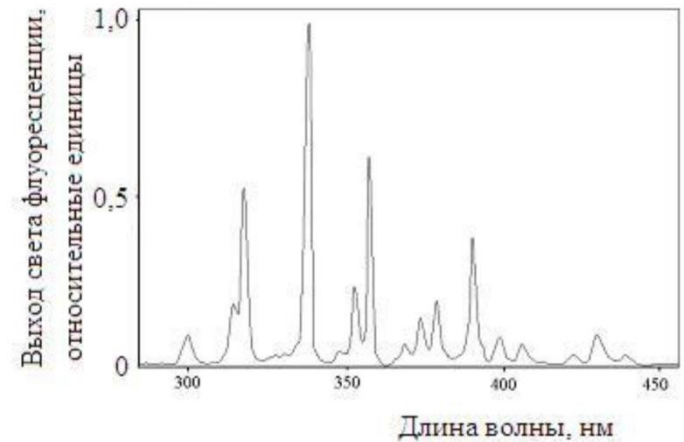
# Флуоресцентный детектор

## Конструкция:

- Телескоп Шмидта
- Диапазон длин волн 300 - 400 нм
- 7 сегментированных зеркал диаметром ~ 60 см
- Фокусное расстояние ~ 1 м
- Угол обзора телескопа ~ 60°

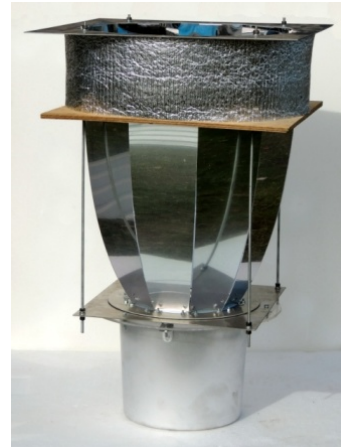
## Задачи:

- Исследования КЛ при энергиях  $\geq 10^{18}$  эВ
- Энергетическая калибровка сцинтилляционной установки

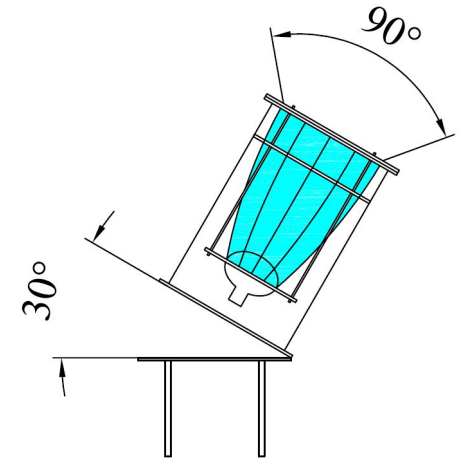


# Широкоугольный атмосферный черенковский детектор

Оптическая станция  
TAIGA-HiSCORE



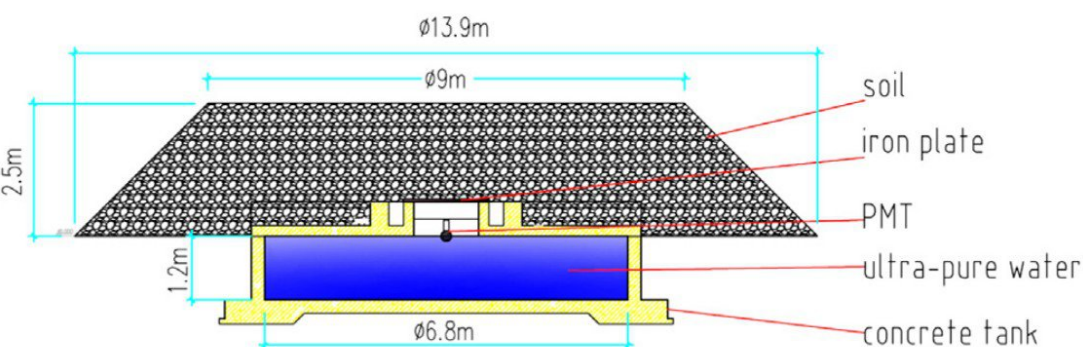
Детектор TAIGA-100



- Конструкция: конус Винстона и ФЭУ диаметром  $\sim 20$  см
- Угол обзора конуса Винстона  $\pm 45^\circ$ , угол наклона детектора  $\sim 10 - 30^\circ$ 
  - Порог регистрации гамма-квантов  $\sim 2 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{14}$  эВ
  - Угловое и энергетическое разрешение установки  $\sim 0.15^\circ$  и 15%
- В 2025 г на одной станции TAIGA-HiSCORE установлены экспериментальные конуса

# Водный черенковский детектор

1188 детекторов установки KM2A  
обсерватория LHAASO

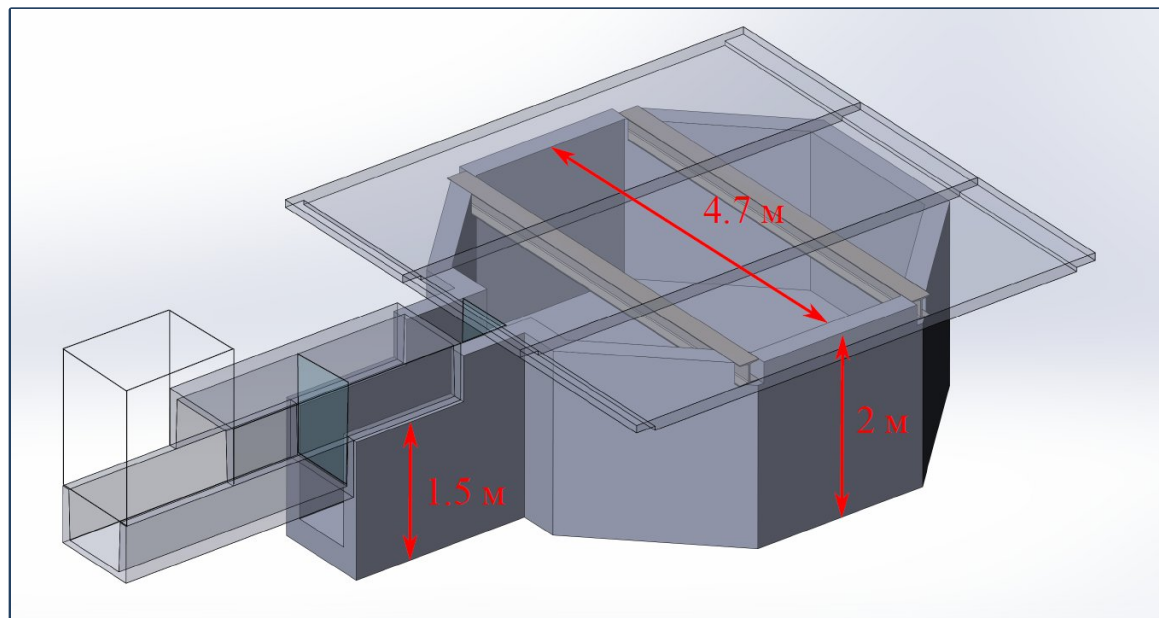


## Параметры детектора TAIGA-100:

- ФЭУ диаметром  $\sim 20\text{ см}$
- Площадь детектора  $\sim 40\text{ м}^2$
- Динамический диапазон  $\sim 10^4$  частиц
- Прозрачность воды (длина поглощения)  $\geq 30\text{ м}$
- Коэффициент диффузного отражения поверхности  $\geq 95\%$
- Отсутствие подогрева и системы очистки воды

# Прототип водного черенковского детектора

Лето-осень 2024 года →



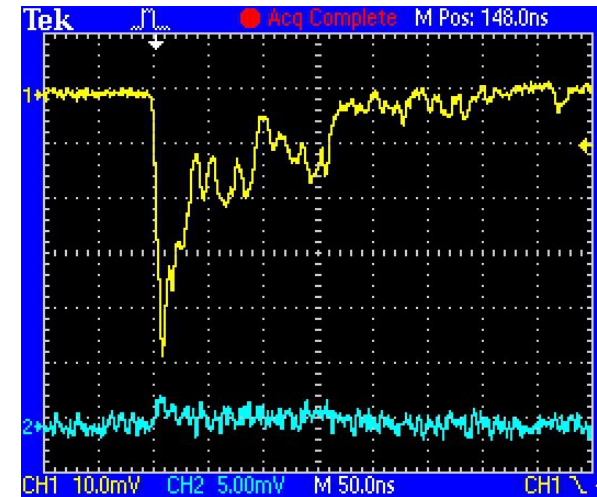
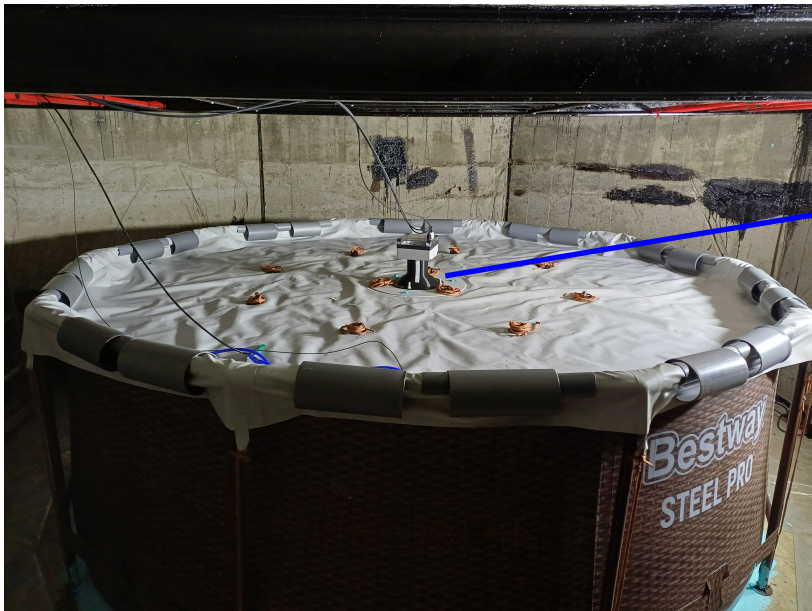
**Мониторинг температуры воды:**

$T_{\min}$  в июне 2025 года + 1 °С

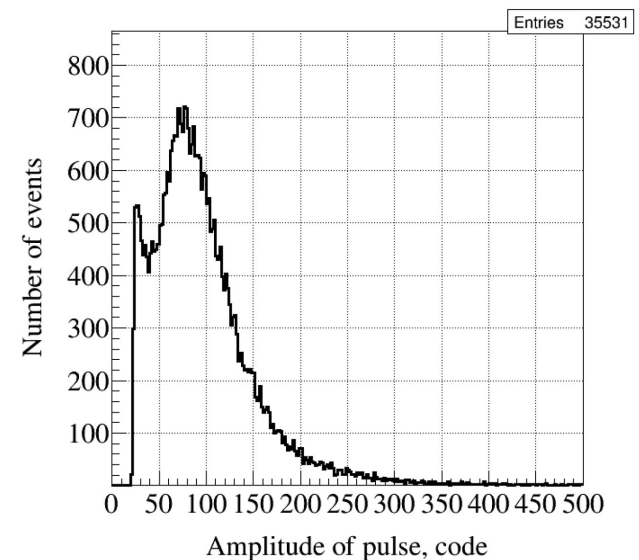
$T_{\max}$  в октябре 2025 года + 8 °С

# Прототип водного черенковского детектора

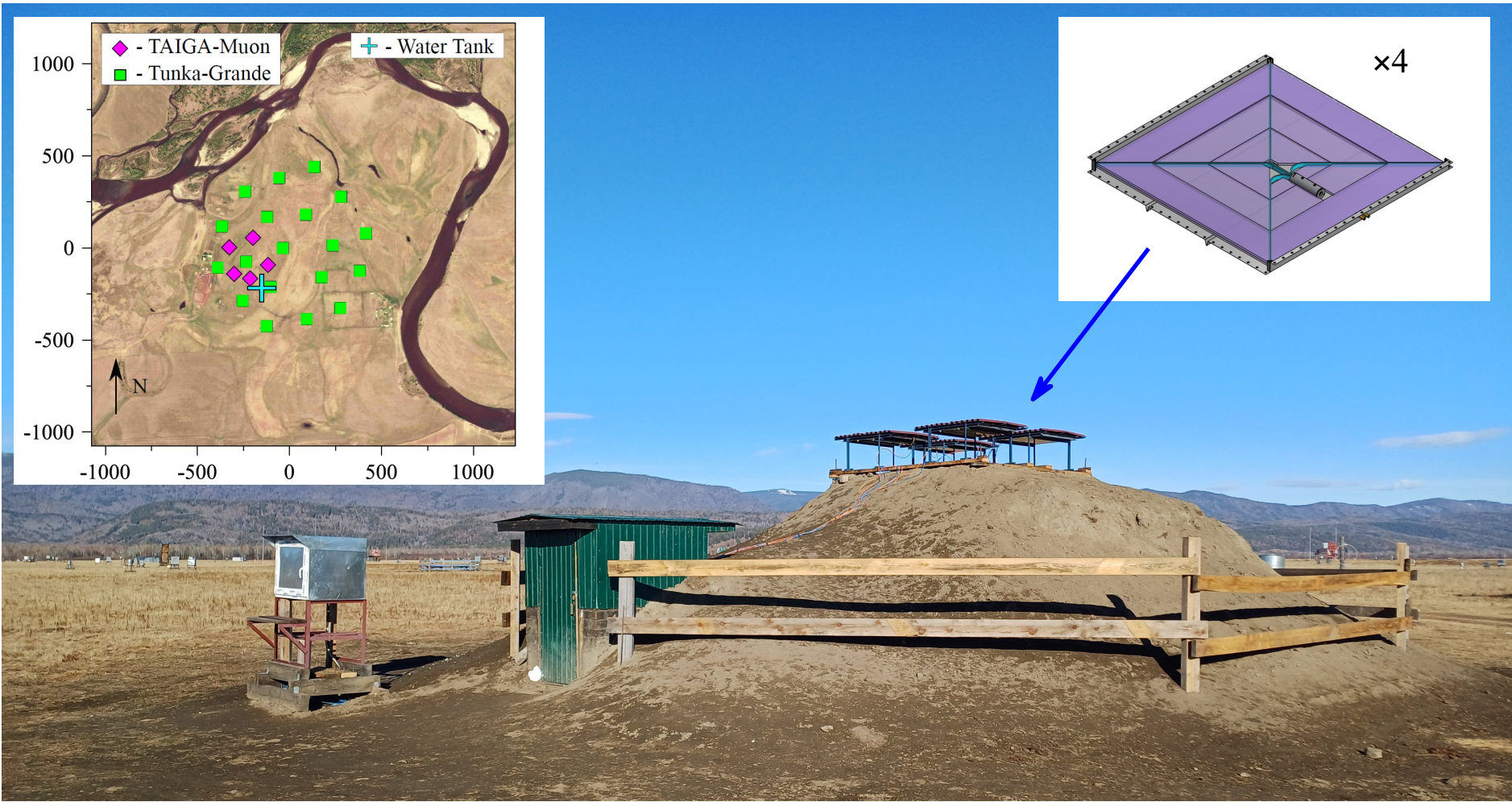
Развертывание детектора осенью 2025 года



- ФЭУ Hamamtsu R5912
- Отражатель Tyvek 1082D
- Объем залитой воды  $\sim 6.5 \text{ м}^3$  ( $R = 1.5 \text{ м}$ ,  $H = 90 \text{ см}$ )
- Электрическая проводимость воды  $\sim 5 \text{ мкСм/см}$



# Прототип водного черенковского детектора



28 ноября 2025 года станция запущена в набор данных совместно с установками Tunka-Grande и TAIGA-Muon.



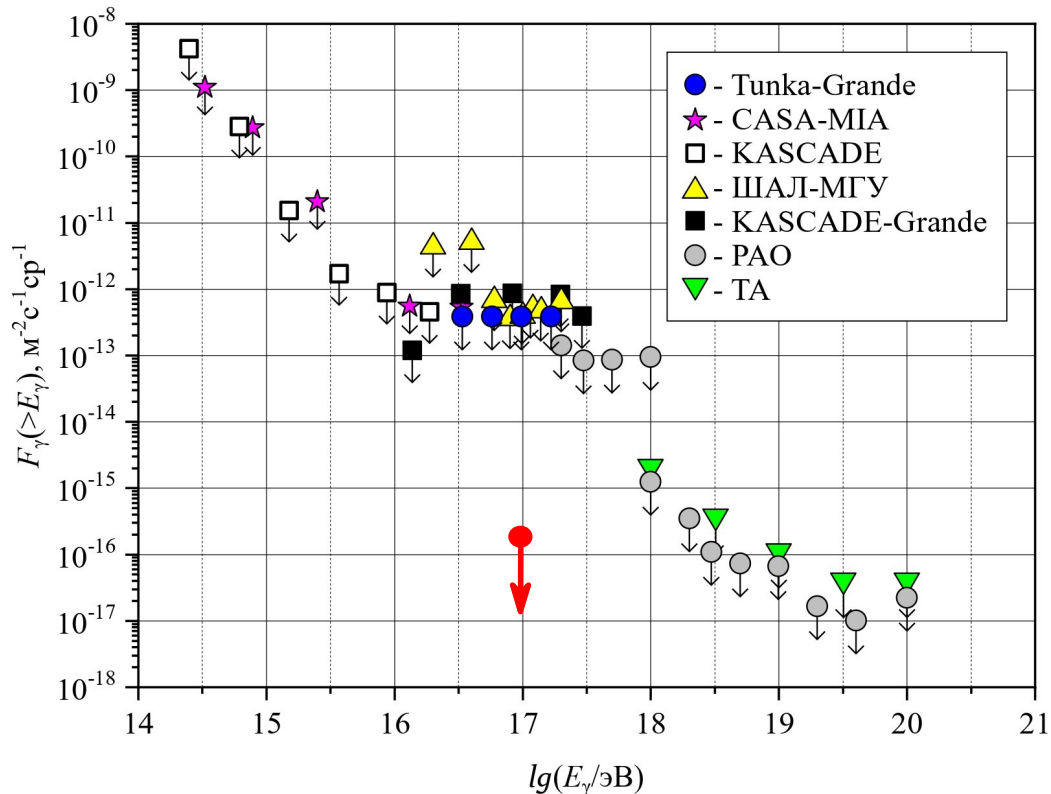
# Ожидаемые результаты TAIGA-100

## Космические лучи:

- Выше 100 ПэВ и 10 ЭэВ ожидается  $\sim 10^6$  и  $10^2$  событий за календарный год
- Тунка-133 и Tunka-Grande по  $\sim 600$  событий с энергией выше 100 ПэВ за календарный год

## Диффузное гамма-излучение:

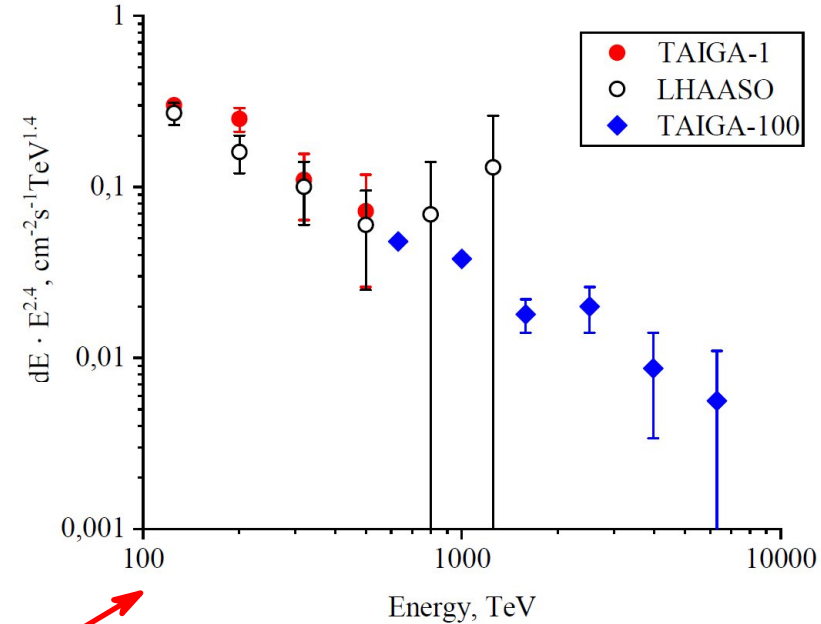
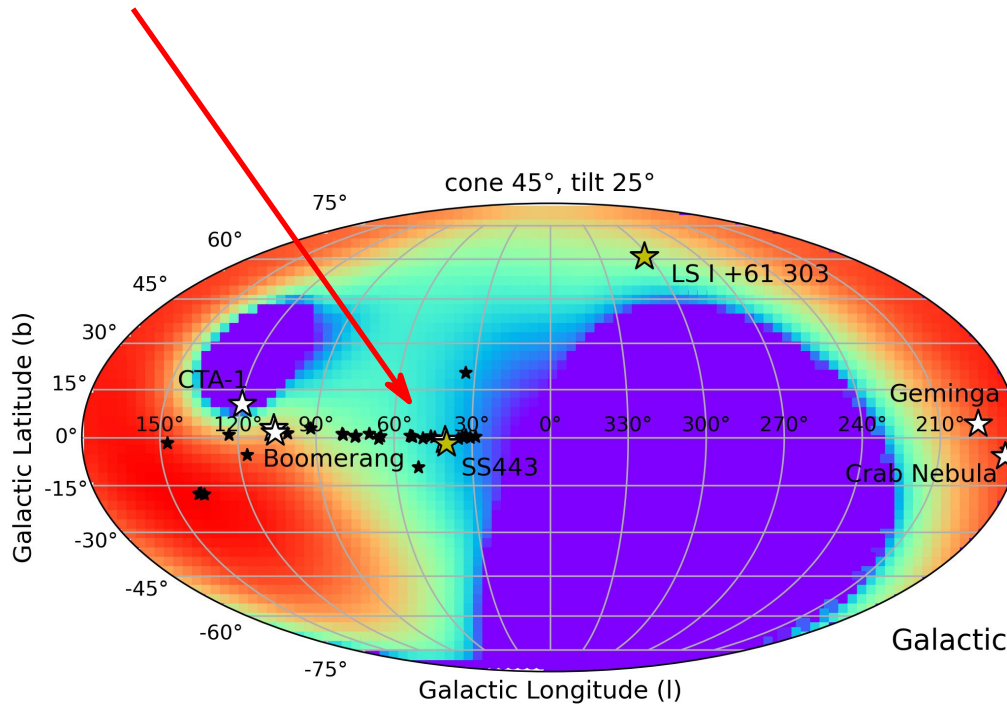
- Ограничение на уровне  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  км<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>ср<sup>-1</sup> за 10 лет набора данных



# Ожидаемые результаты TAIGA-100

## Гамма-астрономия

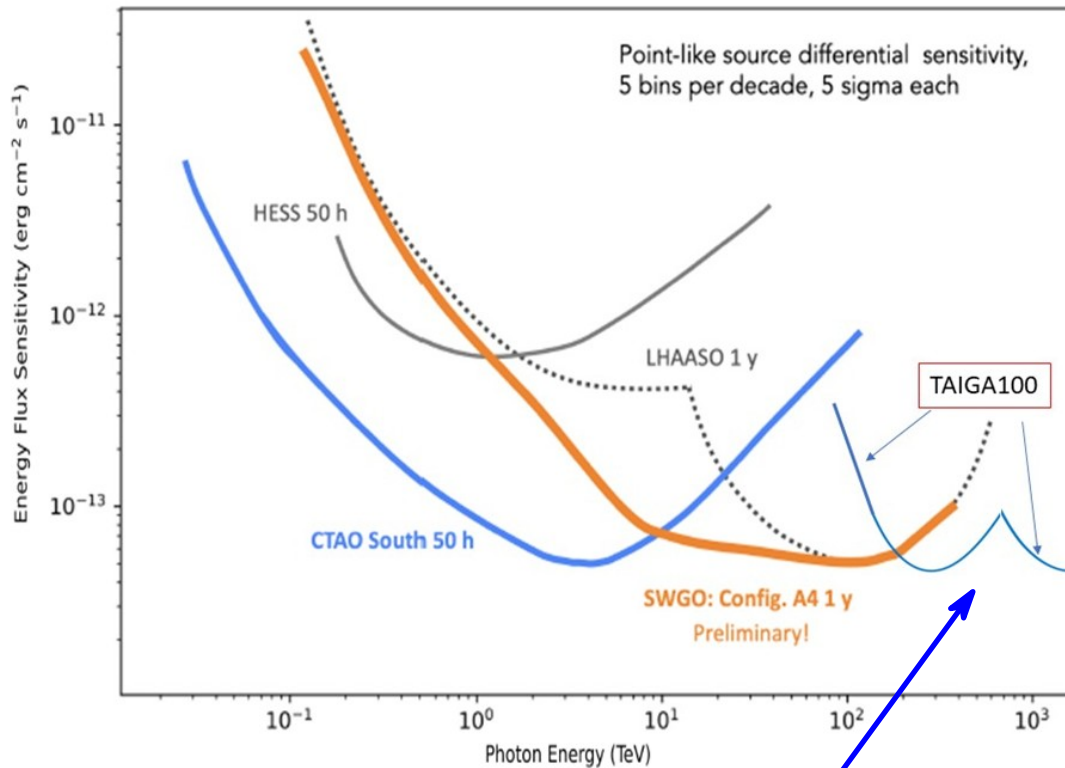
Источники LHAASO с энергией выше 40 ТэВ



Ожидаемый спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности за 1 календарный год (~ 500 часов)

# Ожидаемые результаты TAIGA-100

## Дифференциальная чувствительность

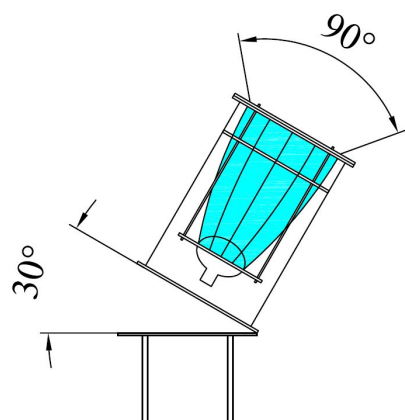
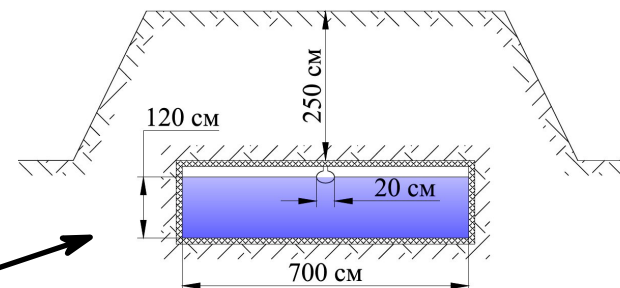
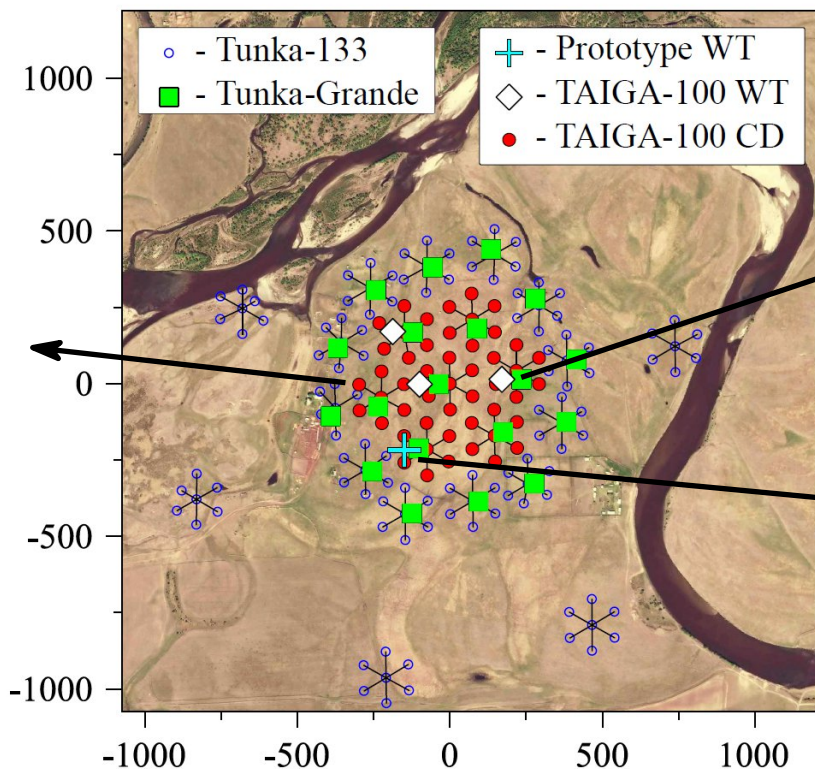


Чувствительность TAIGA-100 за один календарный год

# Планы

Лето - осень 2026 года:

- Развертывание 3 полноценных водных детектора площадью  $\sim 40 \text{ м}^2$
- Модернизация 49 оптических детекторов установки Тунка-133



2030 год:

- Развертывание  $\sim 20$  станций на полигоне TAIGA-1
- Выбор площадки
- Подготовка проекта TAIGA-100

---

## Заключение

---

- На сегодняшний день гамма-обсерватория TAIGA-1 является полноценным научным инструментом для получения значимых результатов в физике космических лучей в диапазоне энергий  $10^{14}$ - $10^{18}$  эВ и гамма-астрономии в области выше  $10^{12}$  эВ.
- Началась подготовка проекта астрофизического комплекса TAIGA-100.
- Планируется создать прототипы, развернуть и протестировать детекторы и систему сбора данных будущей установки на полигоне действующего комплекса TAIGA-1 до момента выбора площадки и создания полноценного проекта.