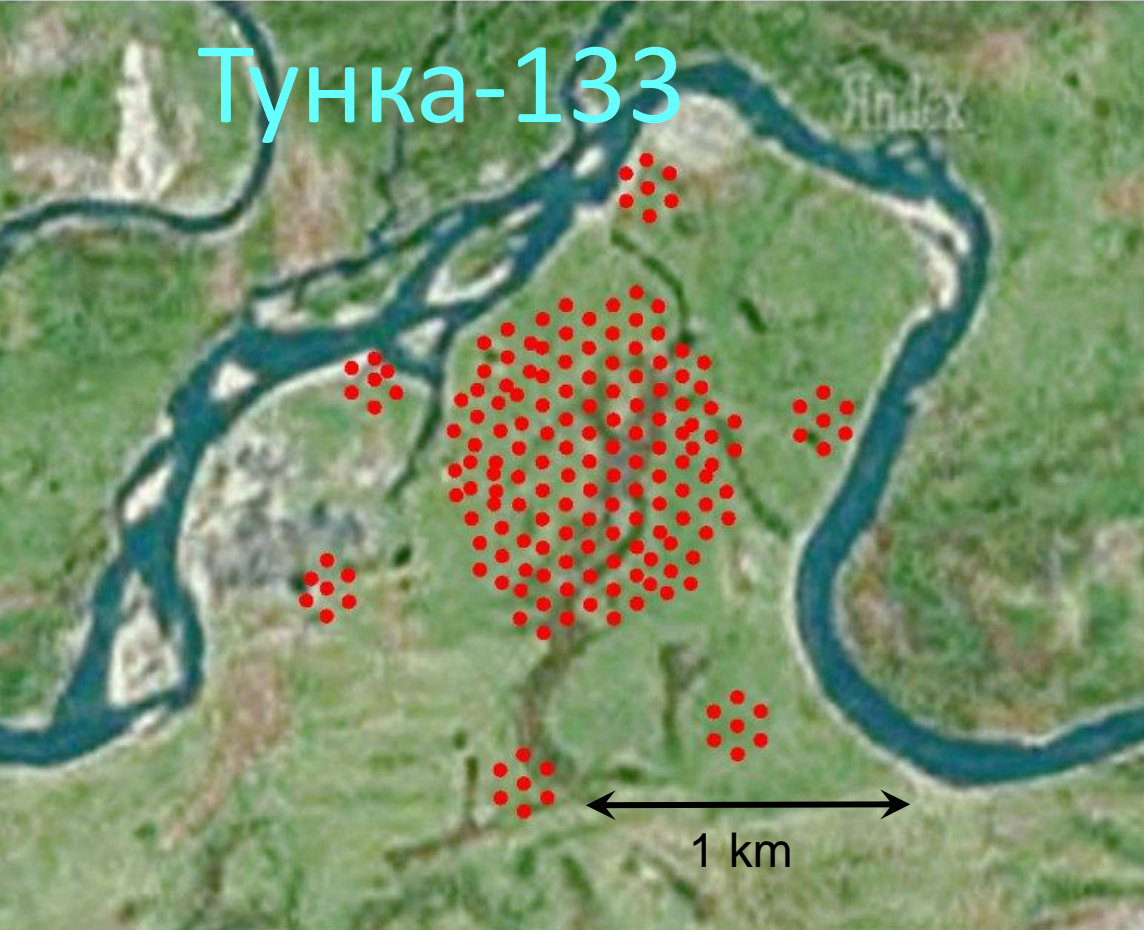


**Энергетический спектр и средний  
массовый состав первичных космических  
лучей по данным астрофизического  
комплекса TAIGA**

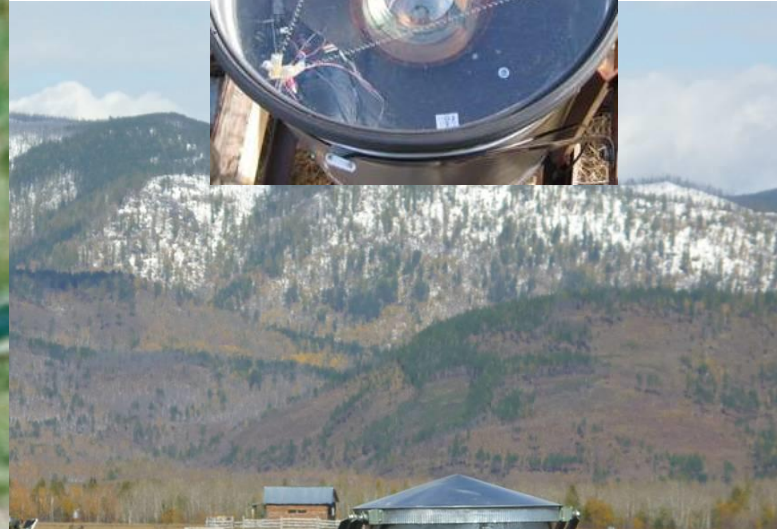
**В.В. Просин (НИИЯФ МГУ)**

**От имени коллаборации TAIGA ,  
29.06.2022, 15:00**

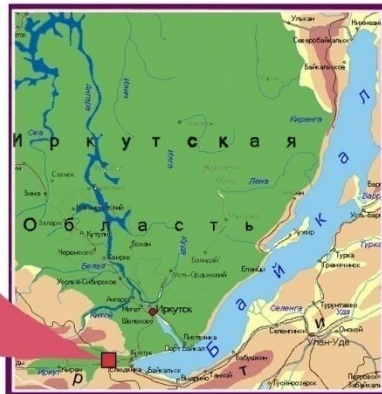
# Тунка-133



175 оптических детекторов  
EMI 9350 и HAMAMATSU  $\varnothing$  20 cm



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

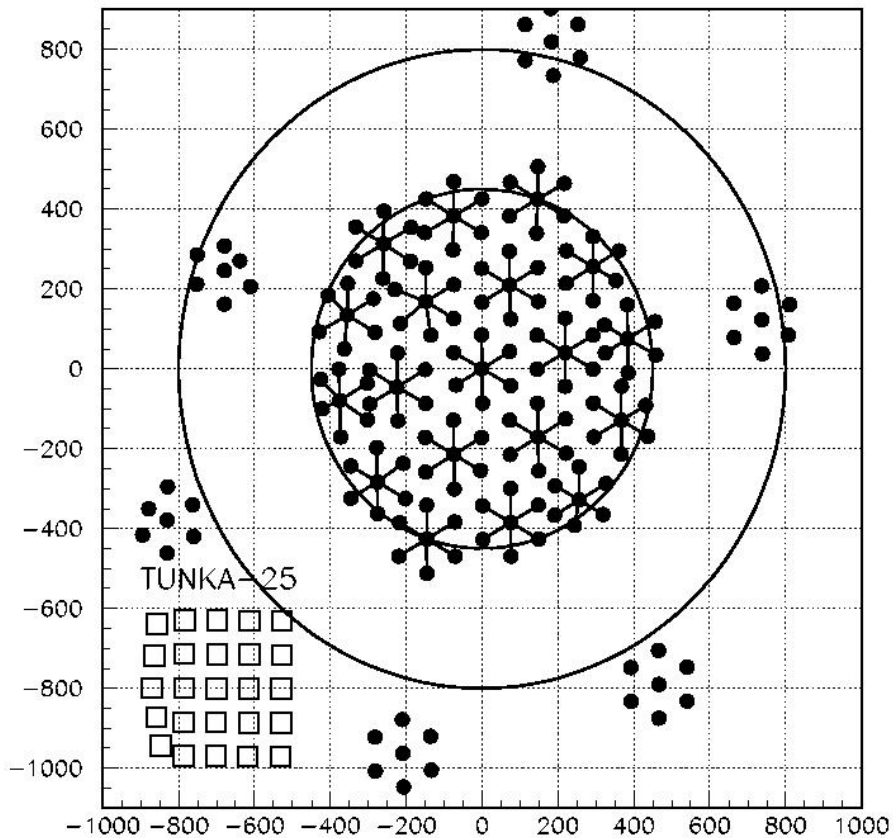


**Эксперимент TAIGA – гибридная установка для  
гамма-астрономии высоких энергий и физики  
космических лучей в Тункинской долине.**

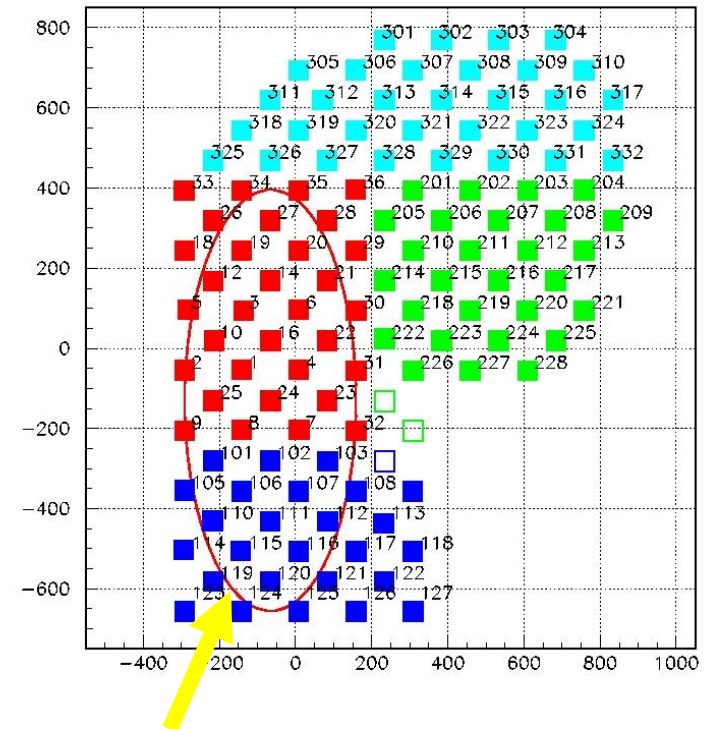


# Планы установок для регистрации ШАЛ по черенковскому свету.

Тунка-25 (2002-2006) и  
Тунка-133 (2009-2017)



TAIGA-HiSCORE 2021 – 2022



Эффективная площадь в сезонах  
2019-2020 и в 2020-2021 гг

# Как измерить глубину максимума ШАЛ?

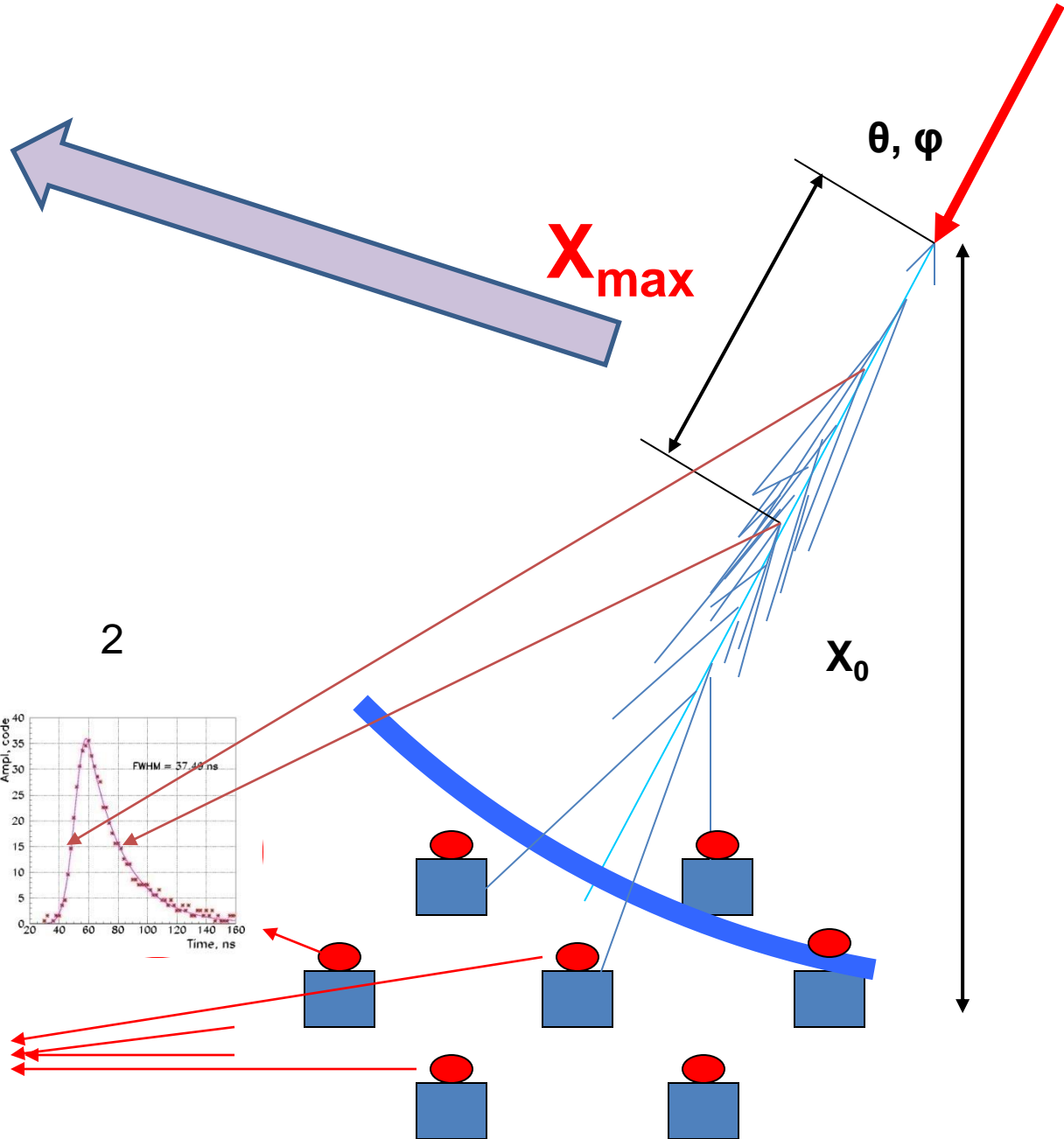
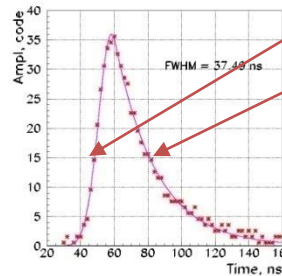
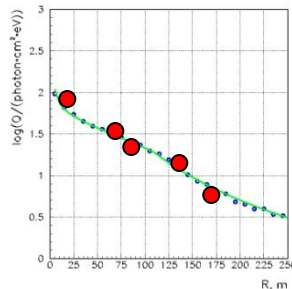
$10^{18} - 10^{20}$  эВ

Прямое наблюдение  $X_{max}$   
Ионизационный свет в  
экспериментах РАО и ТА

$10^{15} - 10^{18}$  эВ

2 метода оценки  $X_{max}$ :

1. Крутизна ФПР
2. Длительность импульса



# CORSIKA:

## Корреляция

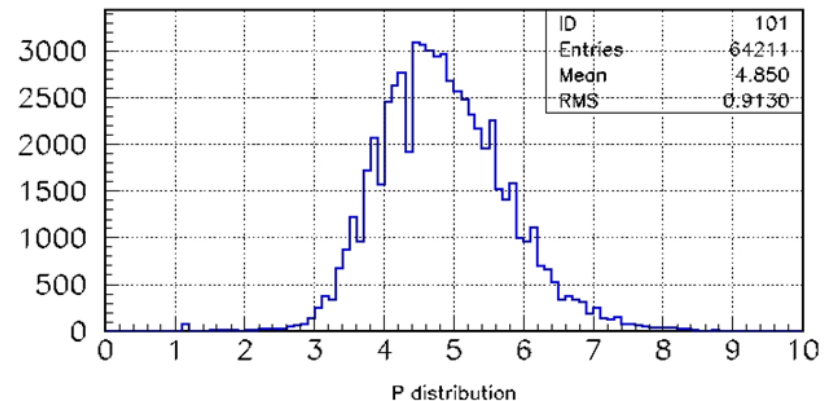
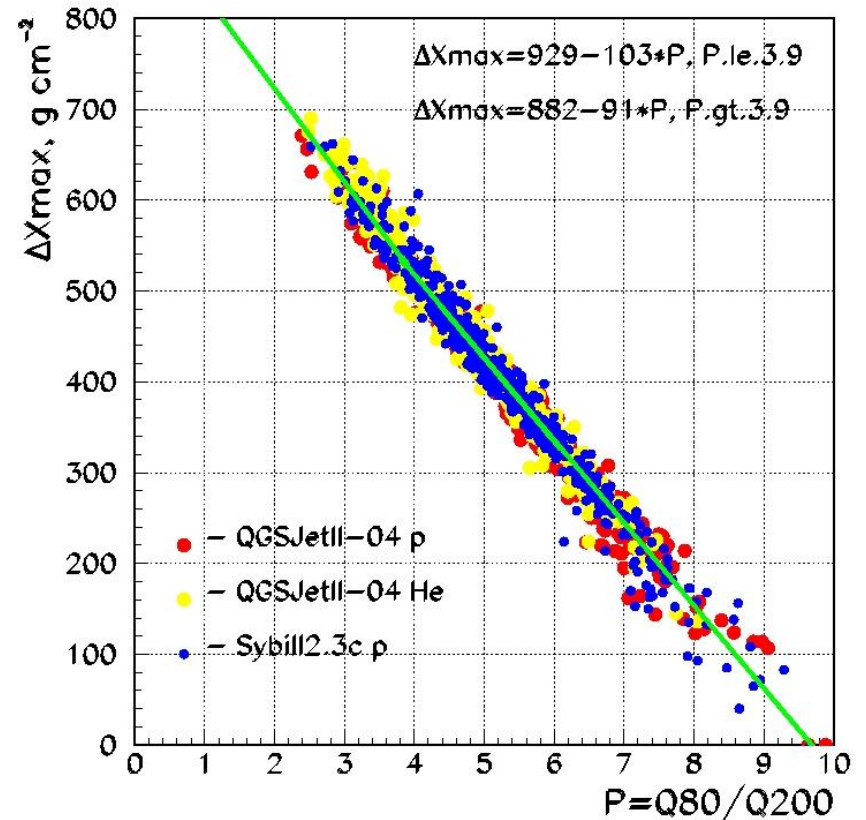
### относительного положения максимума и крутизны ФПР

Крутизна:  $P = Q(80)/Q(200)$

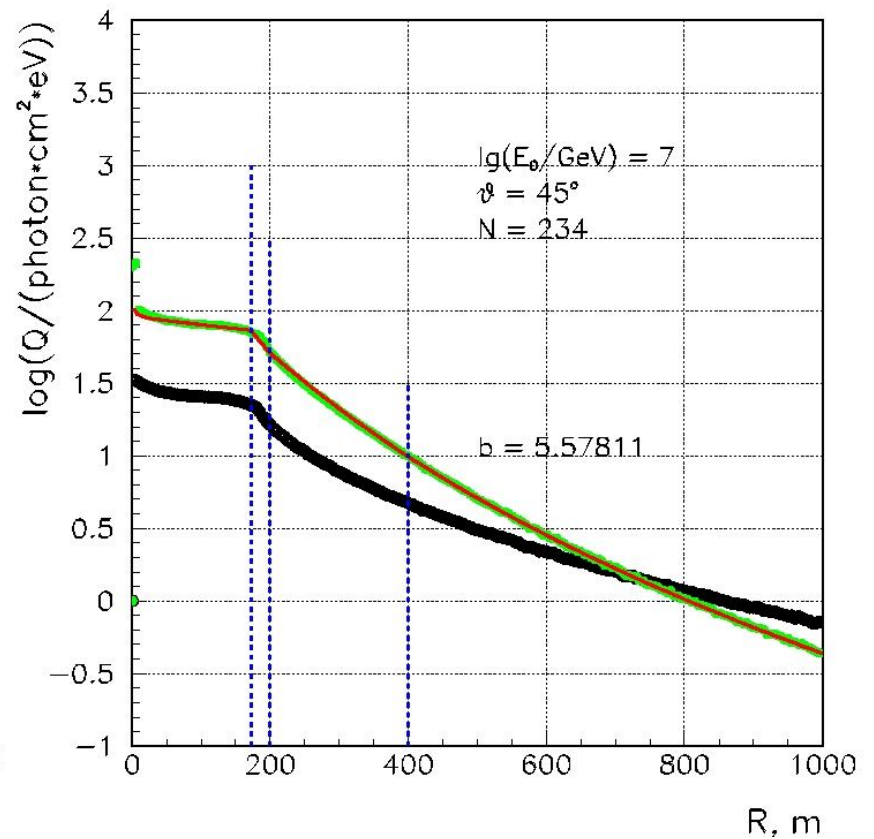
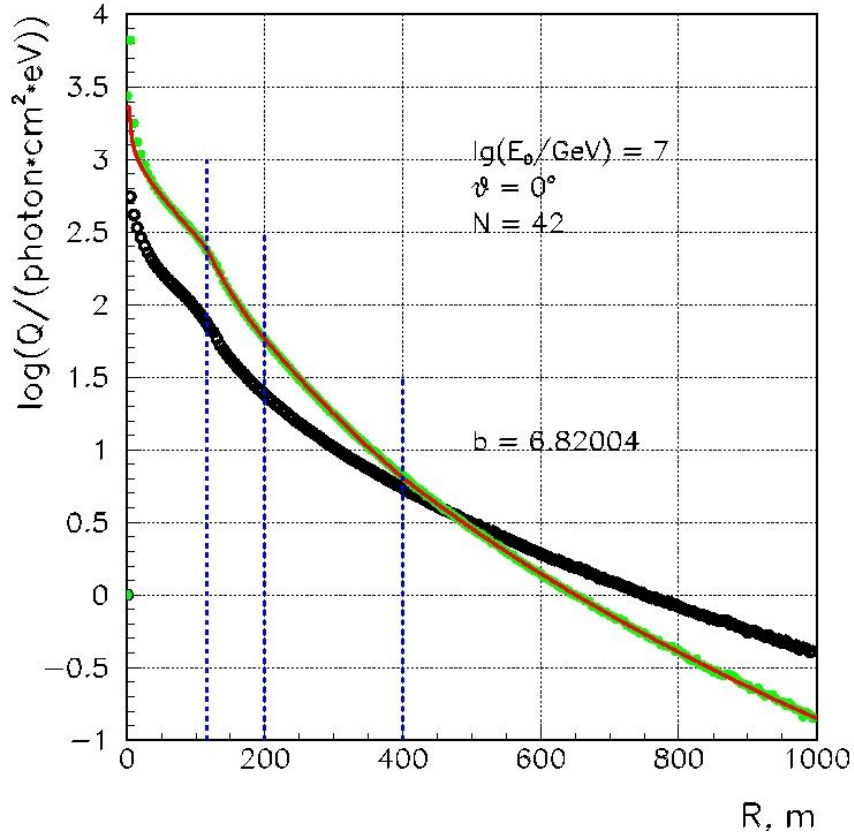
$$\Delta X_{\max} = X_0/\cos\theta - X_{\max}$$

Пересчет от параметра  $P$  к  $\Delta X_{\max}$   
не зависит  
ни от энергии ( $10^{15} - 10^{18}$  эВ),  
ни от зенитного угла ливня ( $0^\circ - 30^\circ$ ),  
ни от модели взаимодействия  
первичной частицы.

Экспериментальное распределение  
по крутизне лежит в пределах  
чувствительности  $P$  к  $\Delta X_{\max}$  при  
указанных выше ограничениях по  
зенитному углу и энергии.



# CORSIKA: Функции – ФПР и ФАР



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:  $b_Q$

$$b_A > b_Q$$

# Экспериментальная зависимость $X_{\max}$ от энергии первичной частицы

## Тунка-133:

7 лет

с 2010 по 2017.

Зенитные углы  $\theta \leq 30^\circ$ ,

Эффективная площадь  $0.64 \text{ км}^2$ ,

Энергии первичных частиц  $\geq 10^{16} \text{ эВ}$

– 69000 событий.

## TAIGA-HiSCORE:

2 сезона 2019-20 и 2020-21

135 ясных безлунных ночей

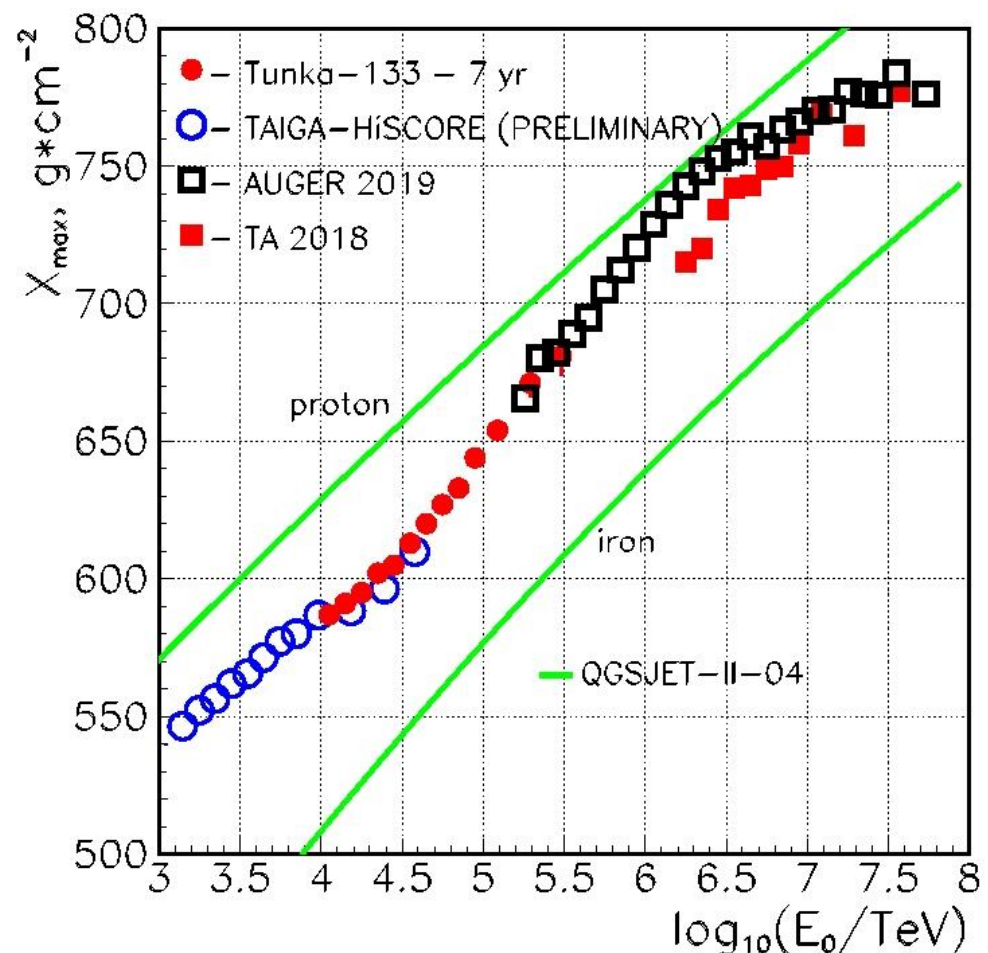
2 кластера (~ 60 станций)

Зенитные углы  $\theta \leq 30^\circ$ ,

Эффективная площадь  $0.37 \text{ км}^2$

Энергии первичных частиц  $\geq 10^{15} \text{ эВ}$

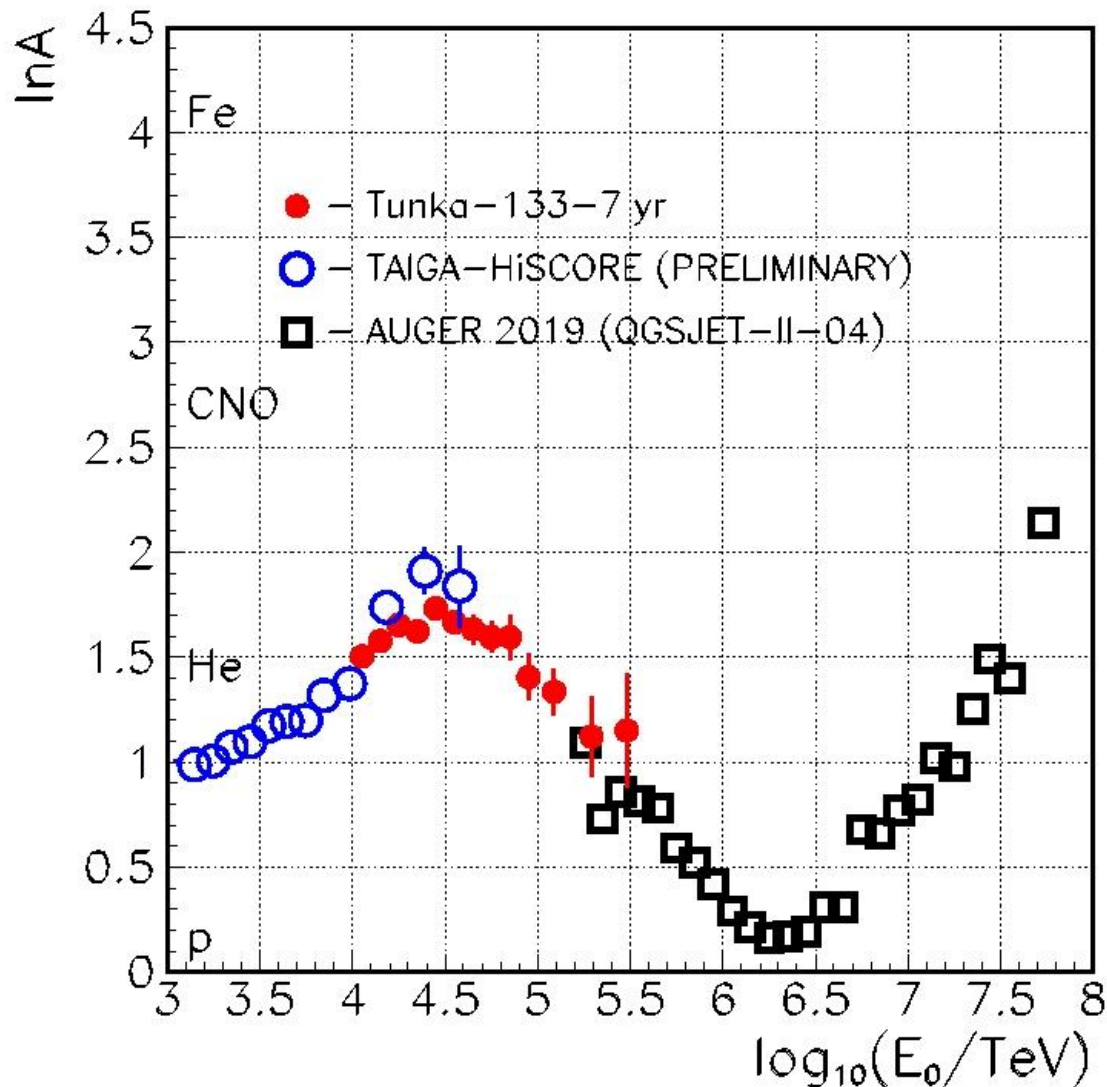
– 380000 событий.





# Средний массовый состав $\langle \ln A \rangle$ , полученный из $X_{\max}$ , в зависимости от первичной энергии

Вывод: Массовый состав во всем диапазоне энергий, в среднем легкий ( $p + \text{He}$ ). Поэтому для восстановления первичной энергии достаточно расчета Монте-Карло для протонов и гелия.

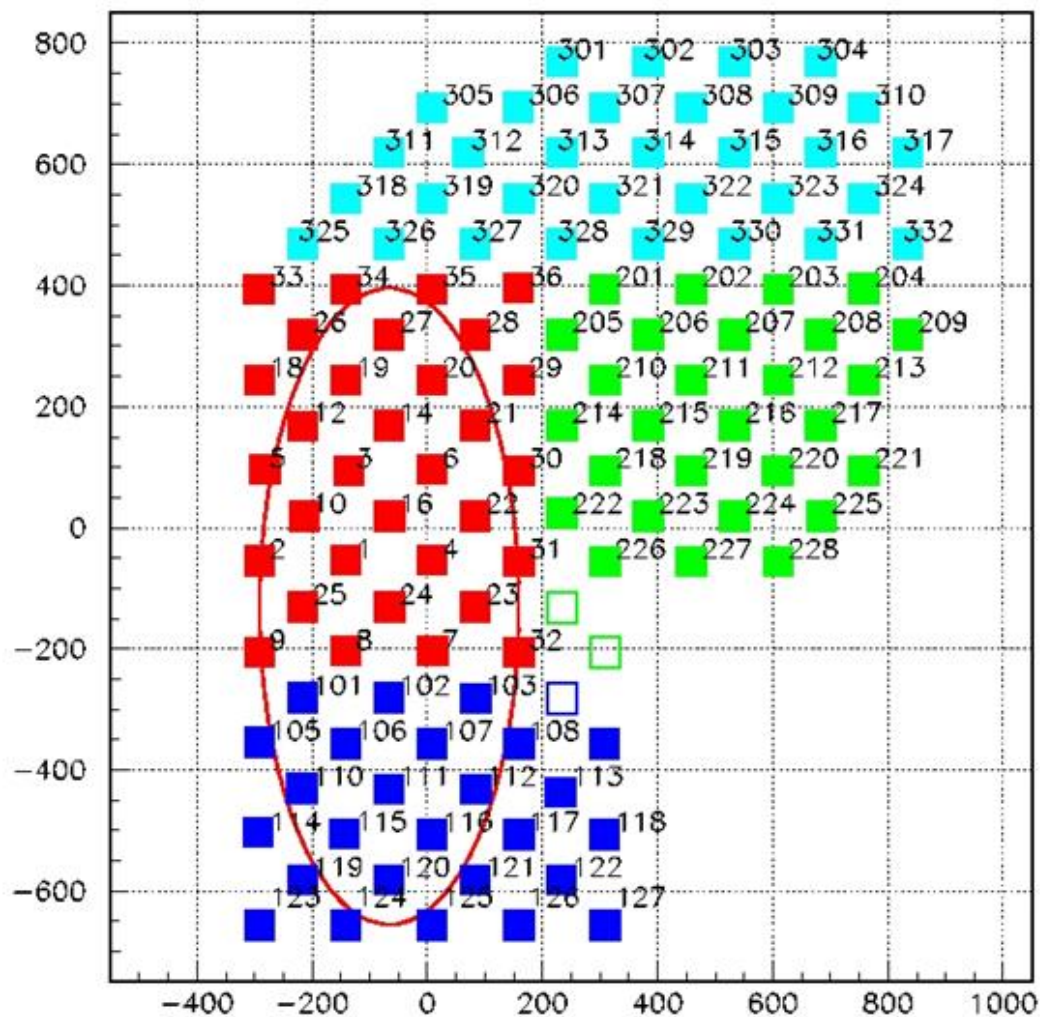


# Основные предположения при построении энергетического спектра

1. Энергия не зависит от зенитного угла.
2. Интенсивность космических лучей не зависит от зенитного угла.
3. Интенсивность не зависит от эффективной площади.
4. Интегральный поток первичных космических лучей с энергией более  $3 \cdot 10^{15}$  эВ:  $I = 2.3 \cdot 10^{-7}$  [ $\text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ].  
Это значение используется для коррекции энергии всех ШАЛ за данную ночь.

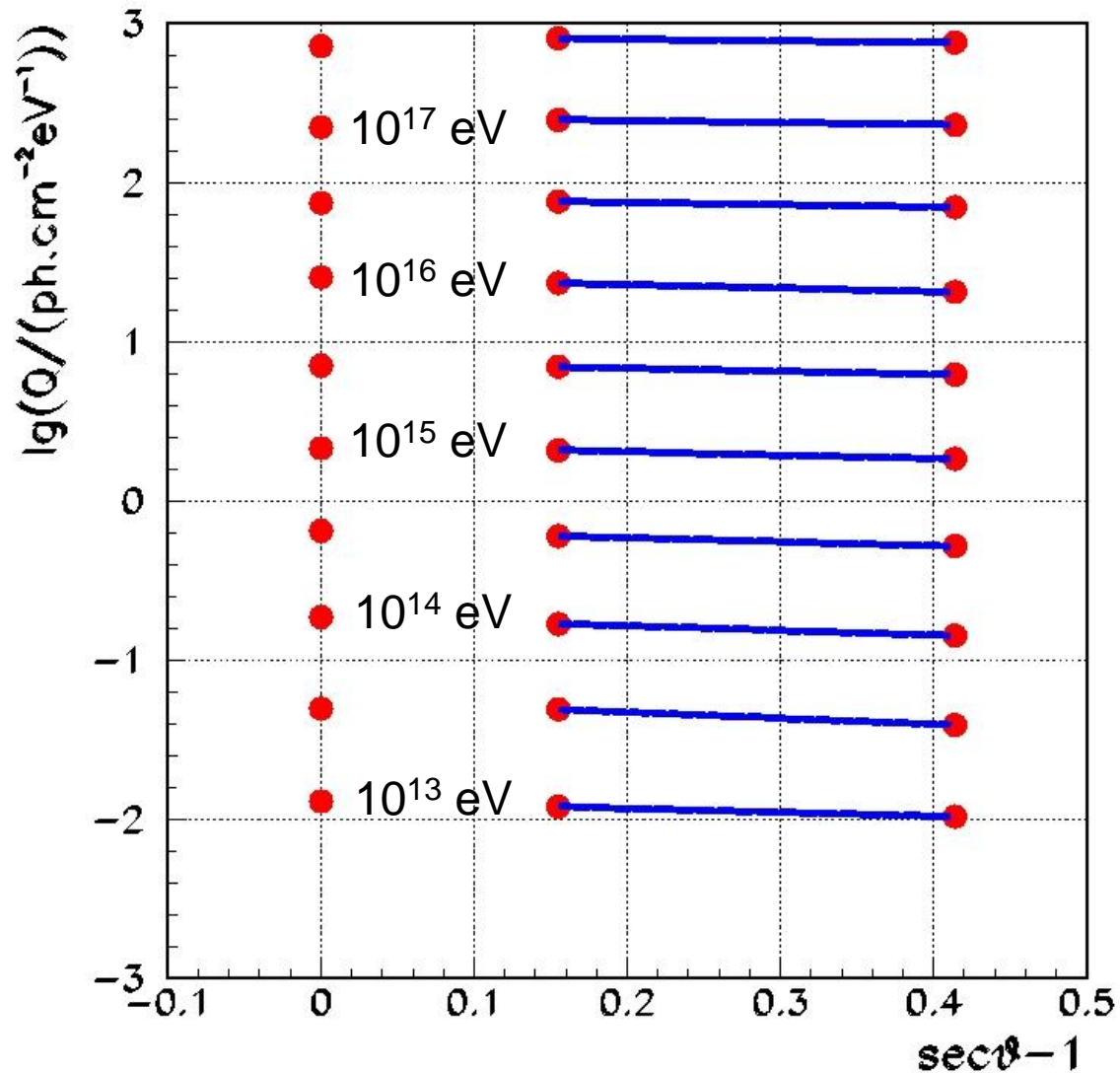
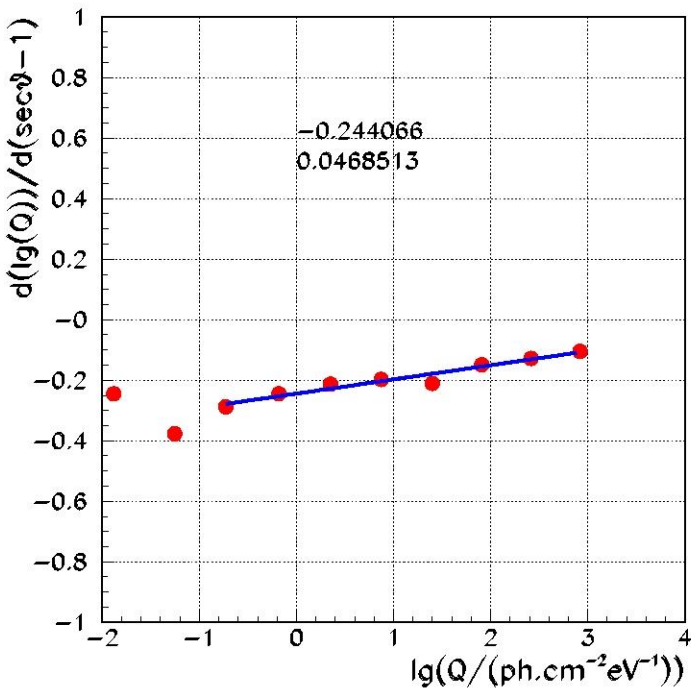
# Эффективная площадь для набора спектра

Сезоны:  
2019 – 2022 гг  
2020 – 2021 гг



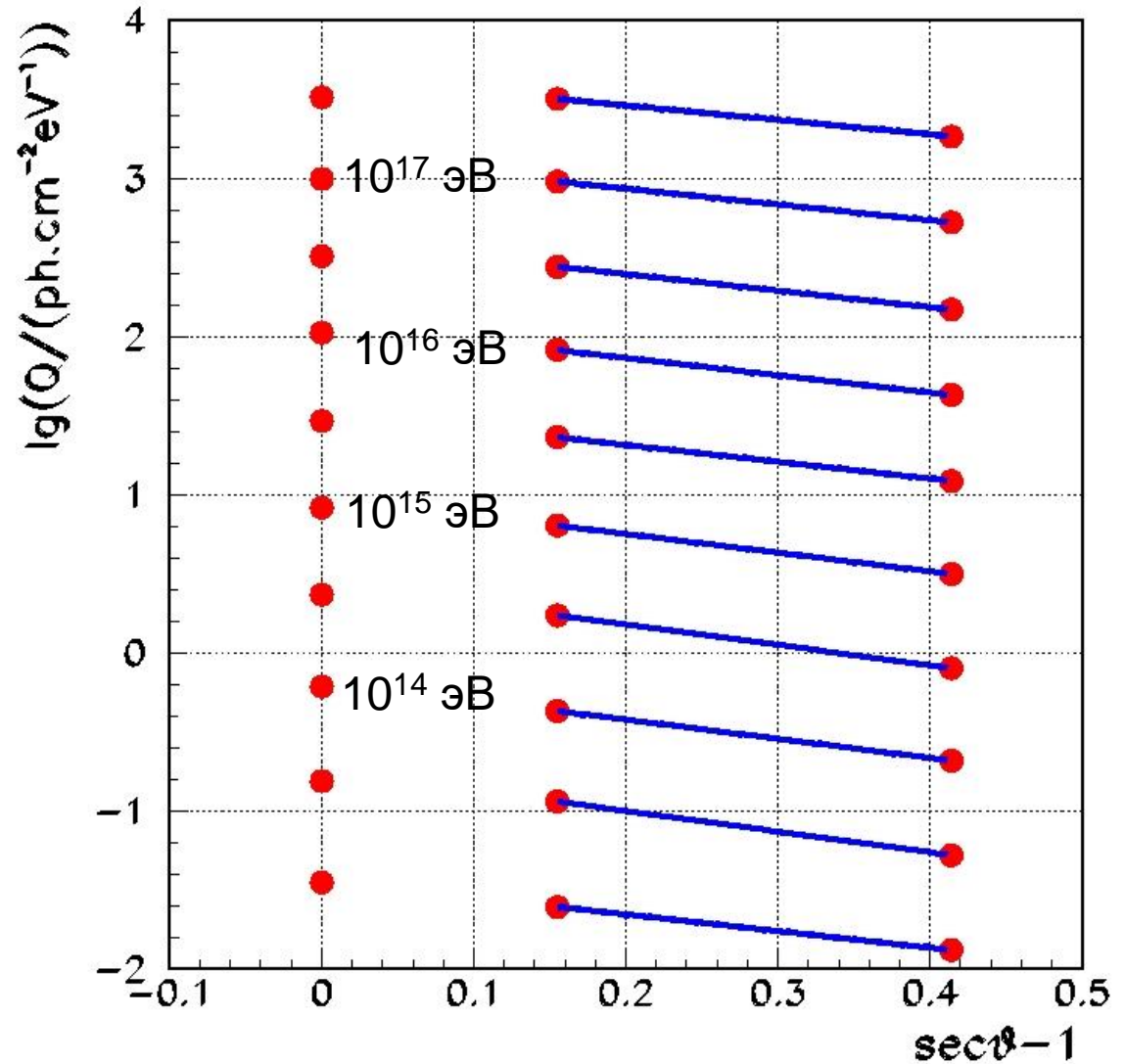
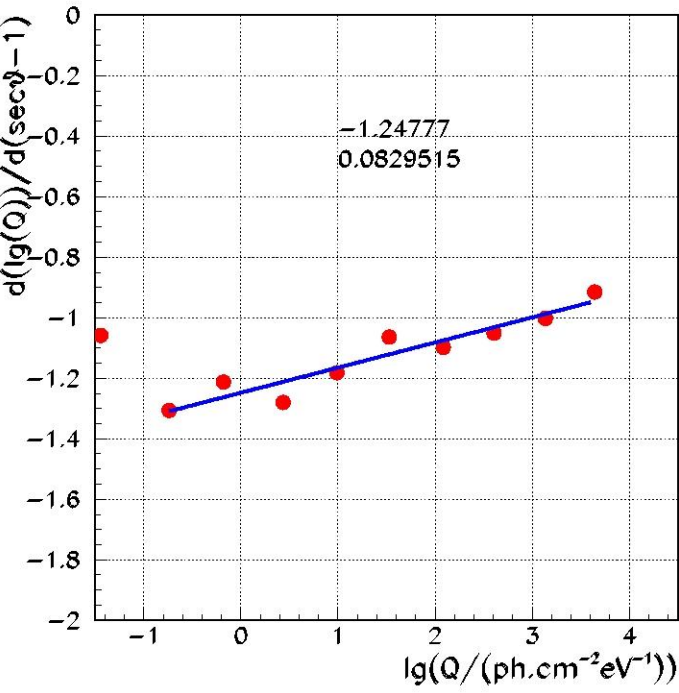
# Зависимость плотности потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси ШАЛ Q200 от зенитного угла

Расчет по программе  
CORSIKA для равного  
количества протонов и  
гелия.



# Зависимость Q100 от зенитного угла $\theta$

CORSIKA для расстояния  
от оси ШАЛ 100 м

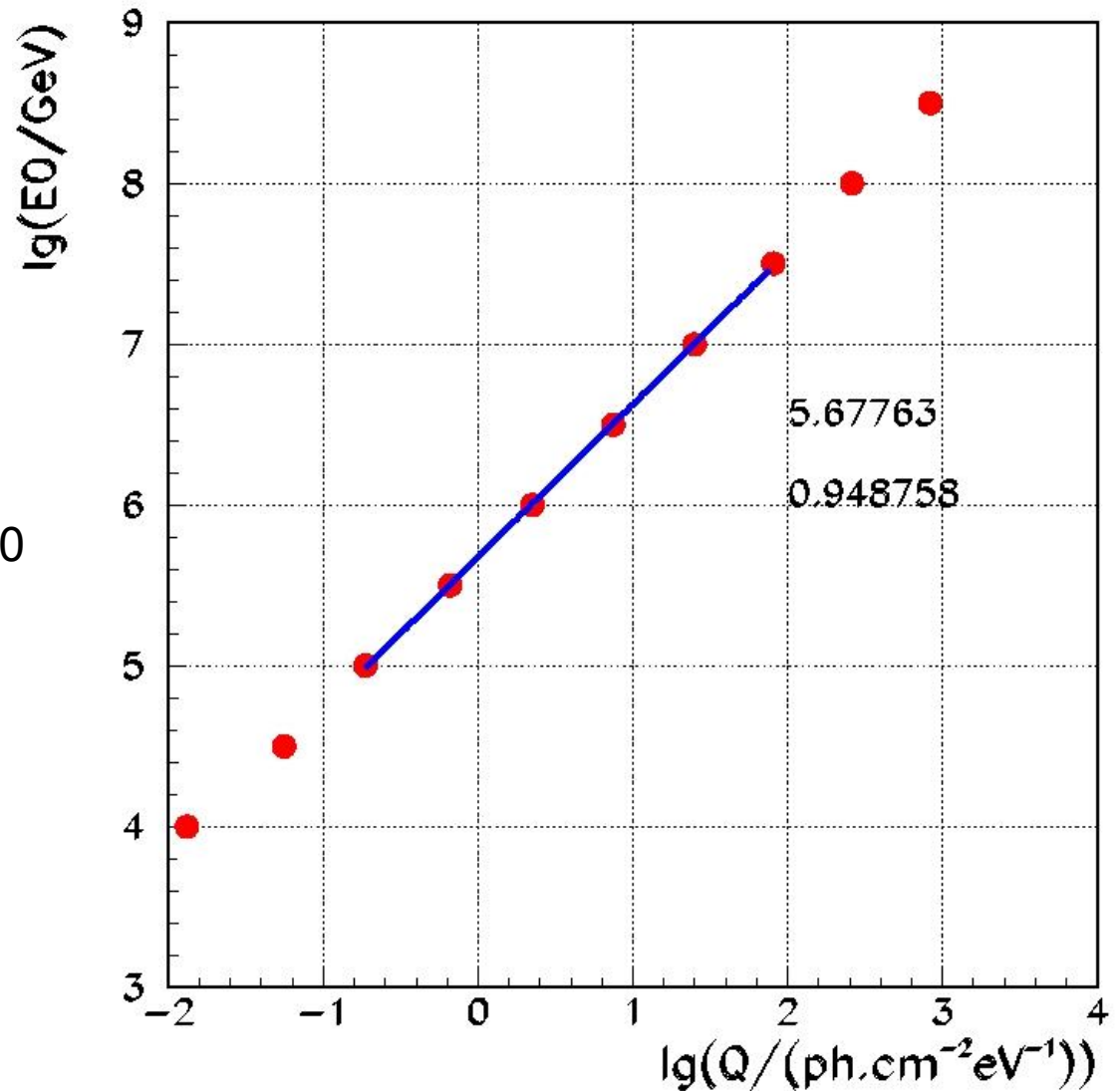


## Выбор измеряемого параметра для пересчета к первичной энергии.

Анализ гибридных событий, регистрируемых одновременно установкой TAIGA-HiSCORE и телескопом TAIGA-IACT требует максимально понизить порог установки TAIGA-HiSCORE. По этой причине параметр Q200, использовавшийся ранее для восстановления энергии по данным установки Тунка-133 заменен на параметр Q100.

# Пересчет от Q200 к энергии

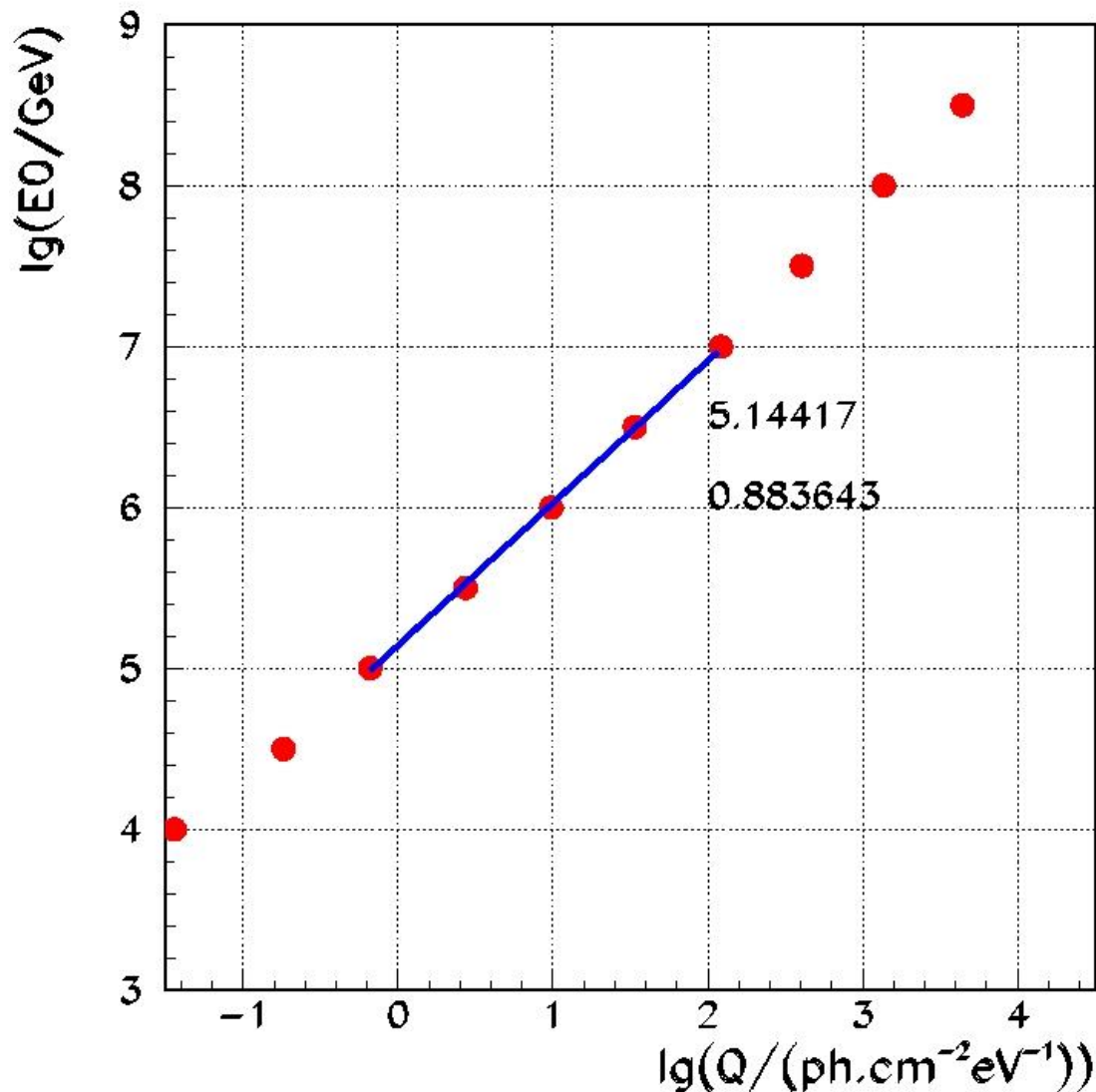
$$\lg(E_0/\text{GeV}) = C2 + 0.95 \cdot \lg Q200$$



# Пересчет от Q100 к первичной энергии

$$\lg(E_0/\text{GeV}) = C1 + 0.88 \cdot Q100$$

Константа C1 в этом выражении корректируется в зависимости от погодных условий каждую ночь. Среднее экспериментальное отклонение от расчетного по программе CORSIKA (5.14) составляет 0.03, т.е. среднее экспериментальное ослабление света на 7% больше предполагаемого в пакете CORSIKA.





# Экспериментальный энергетический спектр по Q200

2019-2020 + 2020-2021

$E_0$  по Q200

Эффективная площадь

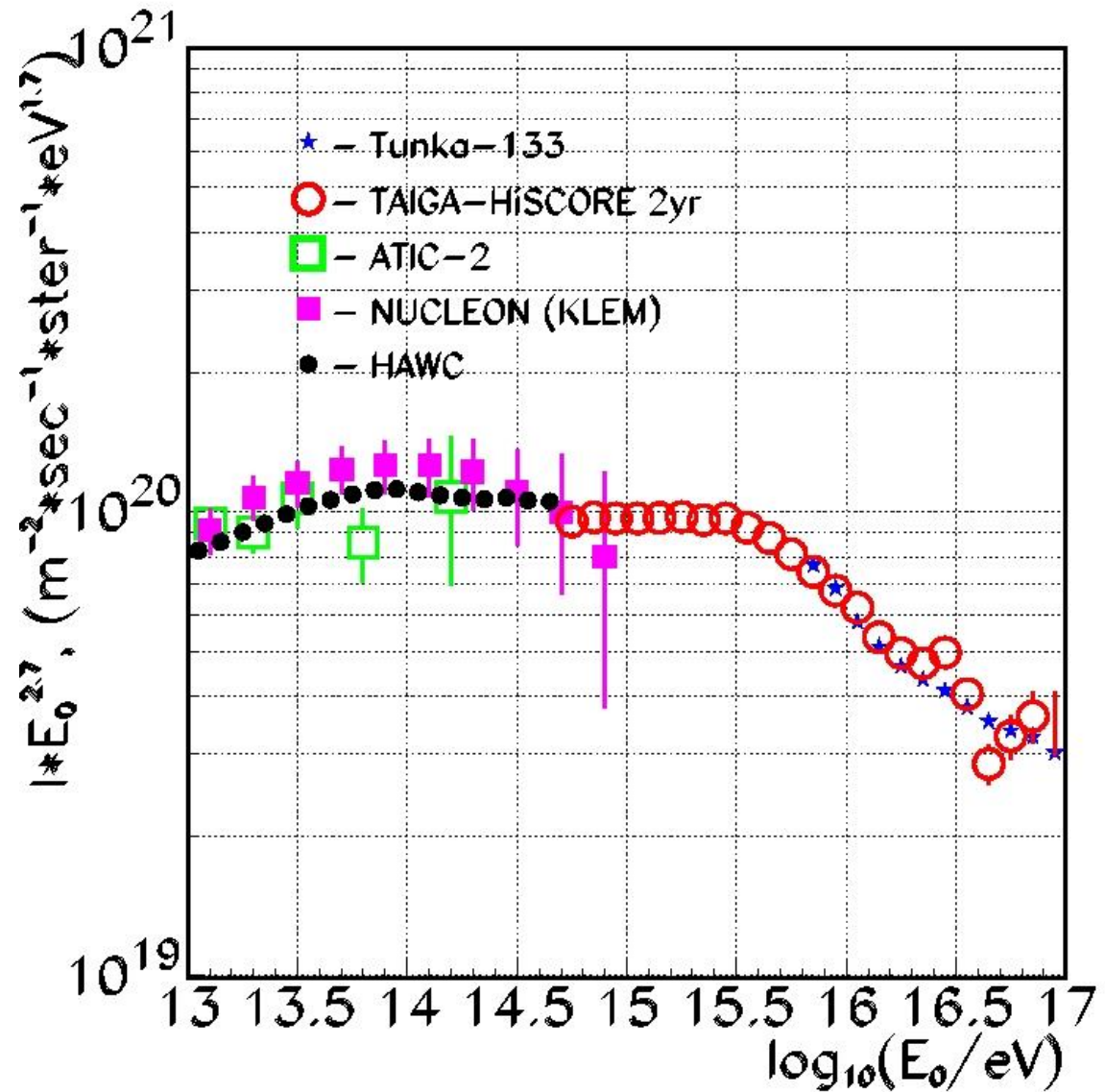
$0.31 \text{ км}^2$

Зенитные углы  $\theta \leq 45^\circ$

570 часов за 135 ясных  
безлунных ночей

$E_0 > 5 \cdot 10^{14} \text{ eV}$  –  
 $1.7 \cdot 10^6 \text{ events}$

(Точки для энергий, при  
которых эффективность  
регистрации событий  
менее 95%, удалены.)



# Экспериментальный энергетический спектр по Q100

2019-2020 + 2020-2021

$E_0$  по Q100

Эффективная площадь

0.31 км<sup>2</sup>

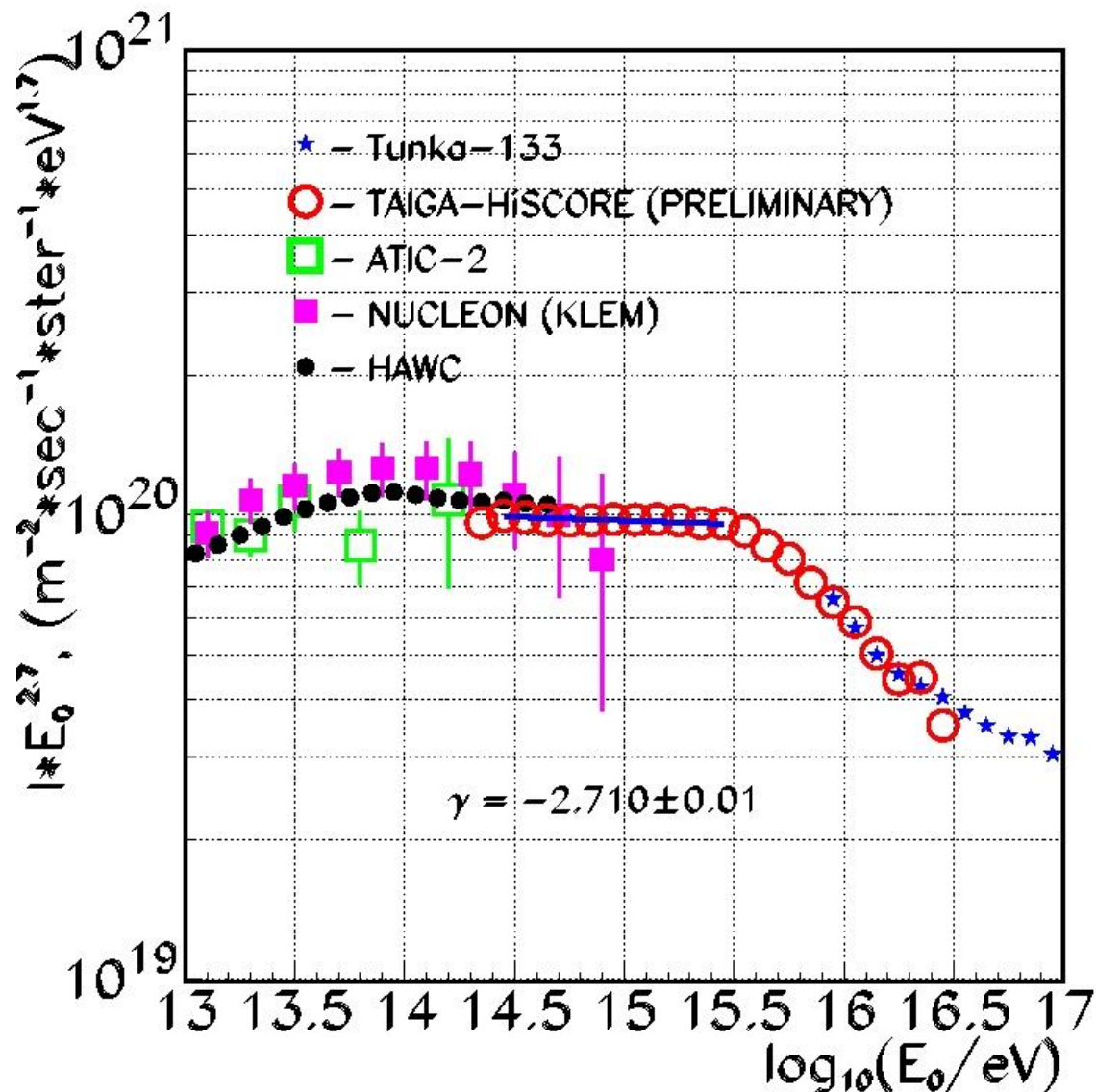
Зенитные углы  $\theta \leq 45^\circ$

570 часов за 135 ясных  
безлунных ночей.

$E_0 > 2 \cdot 10^{14}$  эВ –

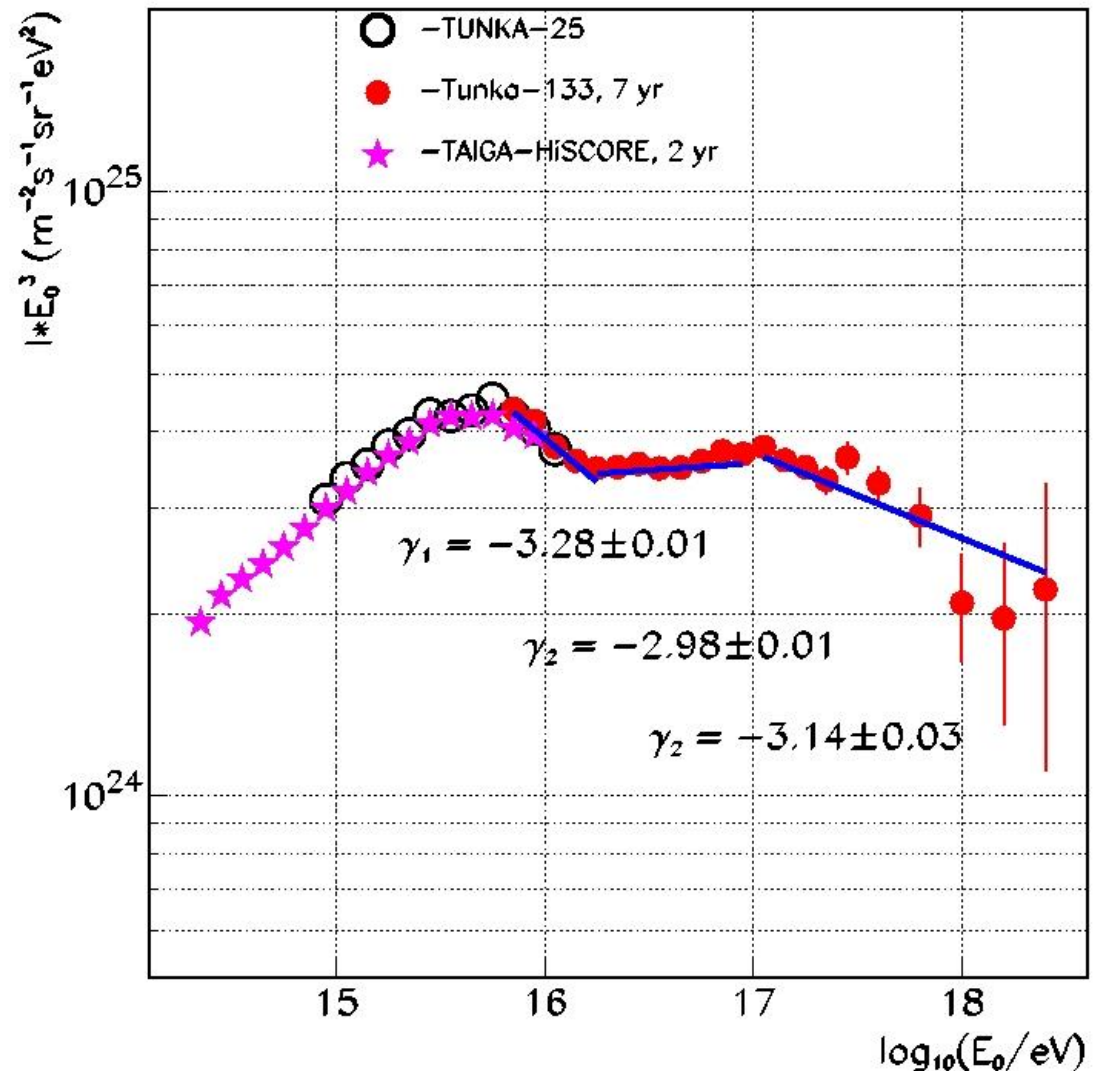
$8.5 \cdot 10^6$  ШАЛ

(Точки для энергий, при которых эффективность регистрации событий менее 95%, удалены)



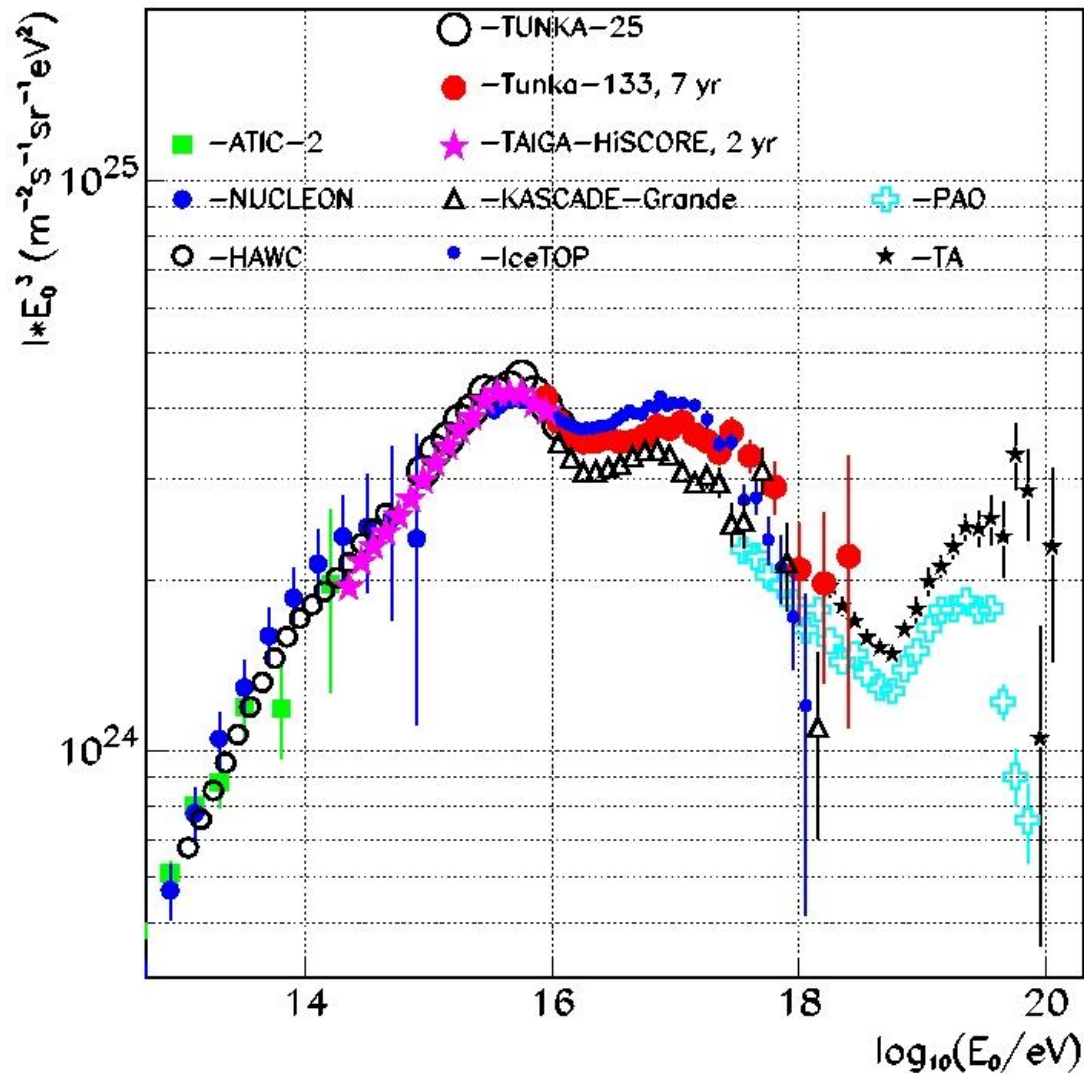
# Энергетические спектры для 3х установок, работавших в Тункинской долине.

Объединение результатов, полученных на всех установках, работавших в Тункинской долине, позволяет единой методикой получить первичный энергетический спектр на 4х порядках по энергии.



# Сравнение с некоторыми работами в

максимально широком энергетическом диапазоне



# ВЫВОДЫ

1. Оценка энергии первичной частицы по плотности потока черенковского света на расстоянии 100 м от оси ШАЛ Q100 обеспечивает уменьшение порога эффективной регистрации событий в 2.5 раза по сравнению с 200 м.
2. Спектр всех частиц в диапазоне  $2 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$  эВ не имеет существенных отклонений от чисто степенного закона с показателем  $2.71 \pm 0.01$ .
3. Применение более простого параметра для оценки крутизны функции пространственного распределения черенковского света ШАЛ и более строгий отбор ШАЛ, чувствительных к положению максимума, обеспечили хорошее согласие как между результатами наших установок Tunka-133 и TAIGA-NiSCORE, так и между результатами установки Tunka-133 и результатами прямых измерений глубины максимума в обсерватории Пьера Оже (ПАО).
4. Массовый состав первичных частиц оказался легче, чем казалось в наших предыдущих публикациях.
5. Наблюдаемое увеличение  $\langle \ln A \rangle$  в диапазоне энергий  $10^{16} - 10^{17}$  эВ, как и поведение энергетического спектра при более высоких энергиях требуют нового теоретического объяснения.

**Спасибо за внимание!**

