

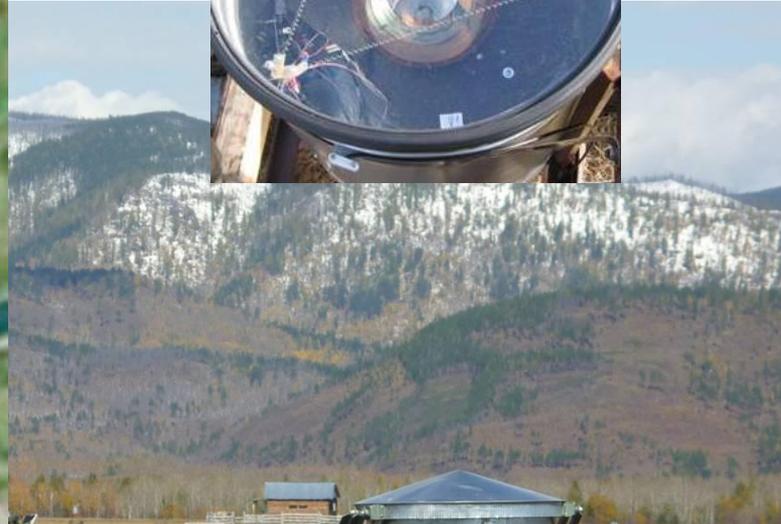
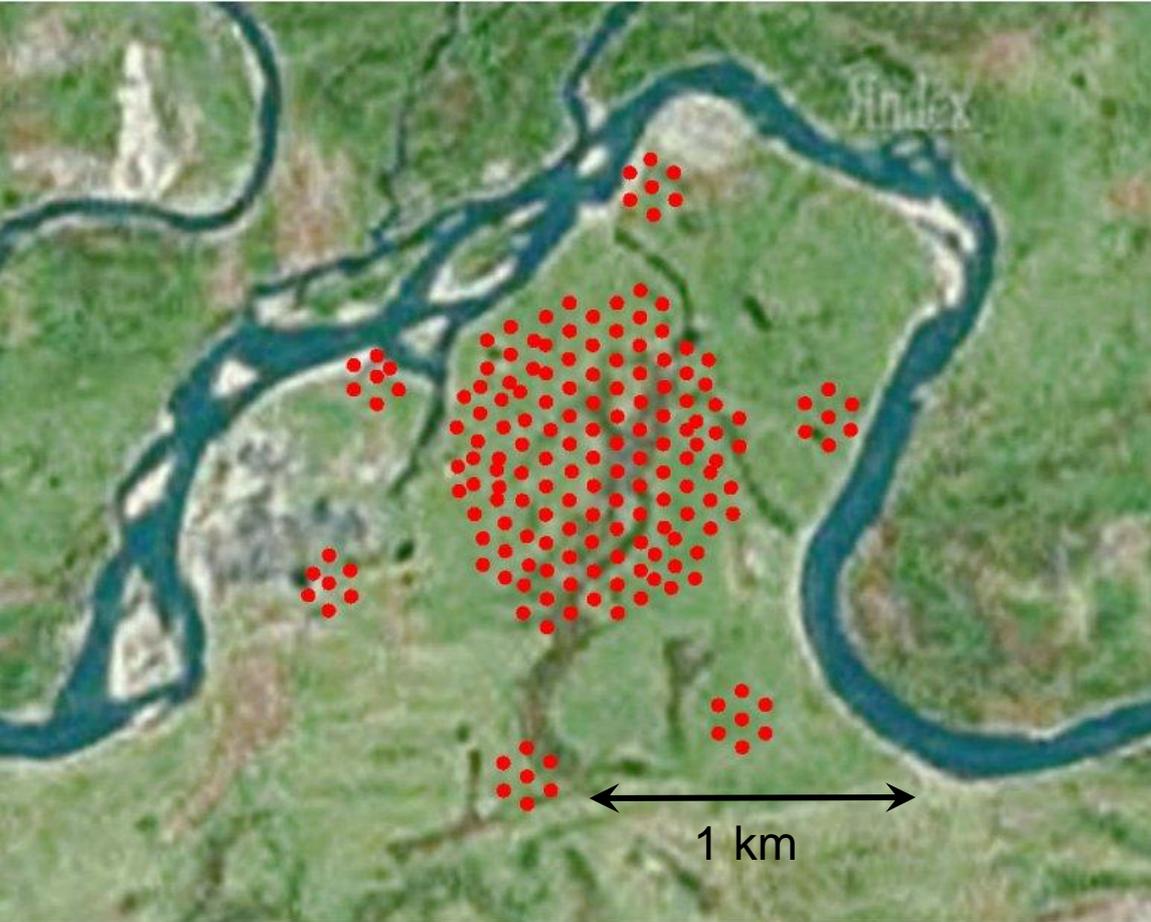
**Глубина максимума ШАЛ и средний
состав первичных космических лучей в
широком диапазоне энергий $10^{15} - 10^{18}$ эВ
по данным установок для регистрации
черенковского света ШАЛ в
Тункинской долине
Тунка-133 и TAIGA-NiSCORE.**

В.В. Просин (НИИЯФ МГУ)

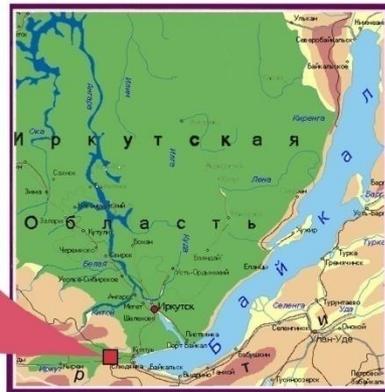
От имени коллаборации TAIGA

36-я ВККЛ, 28.09.2020

175 оптических детекторов
EMI 9350 и HAMAMATSU \varnothing 20 cm



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



The TAIGA experiment - a hybrid detector for very High energy gamma-ray astronomy and cosmic ray physics in the Tunka valley

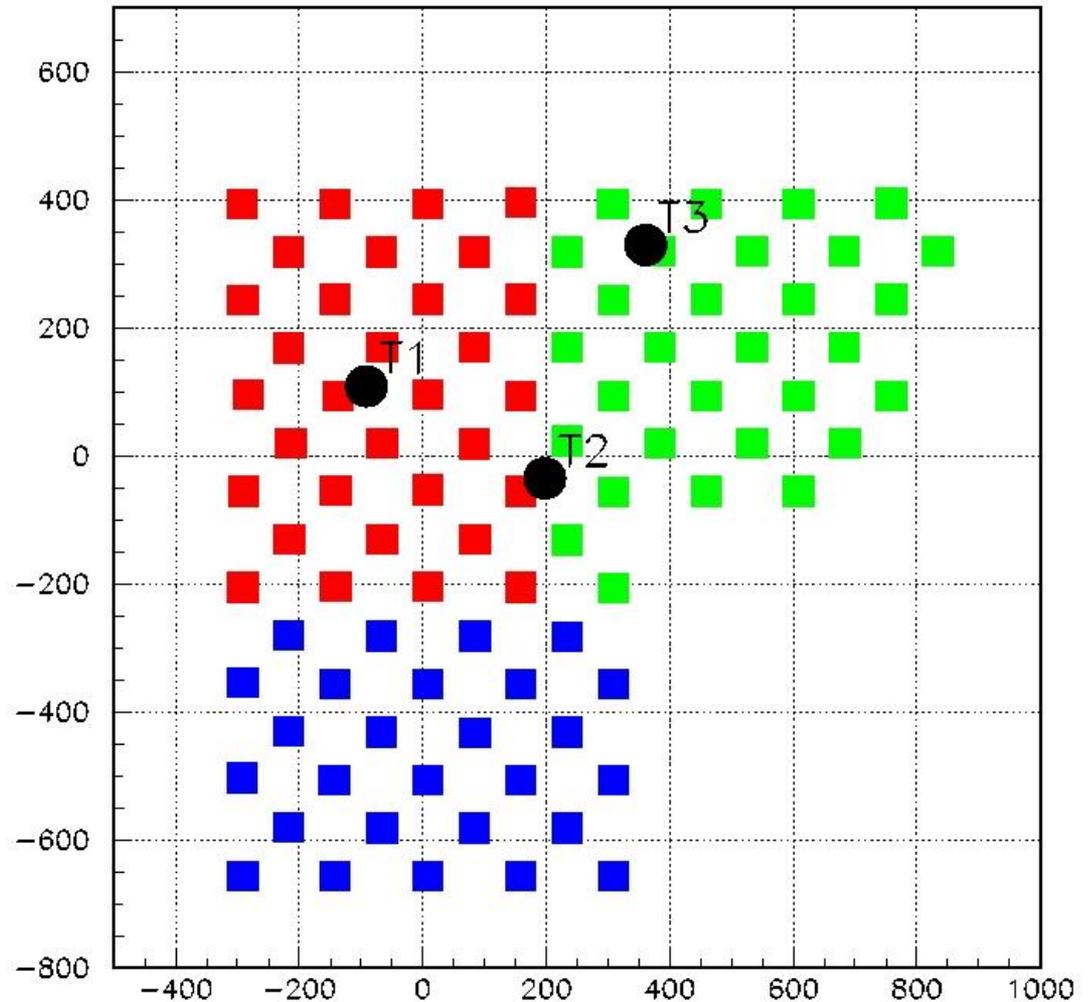


TAIGA-HISCORE 2019-2020

Площадь ~ 1 km²

3 кластера

3 телескопа



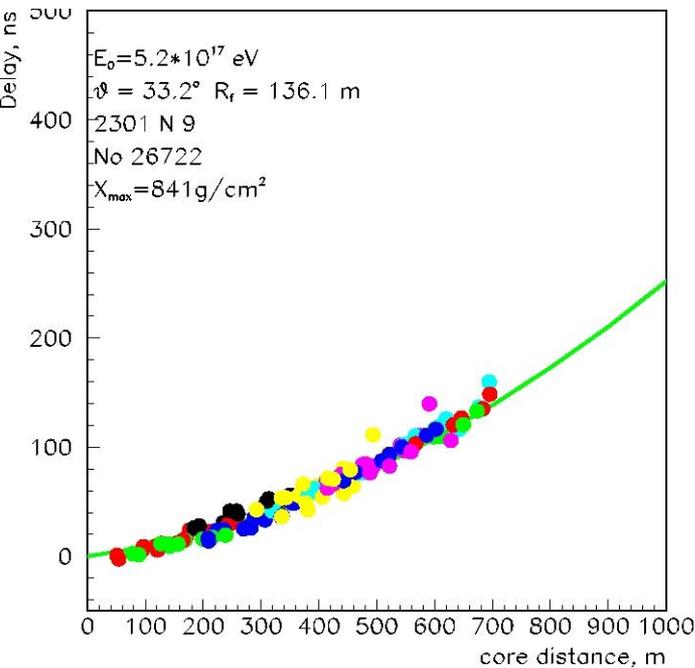
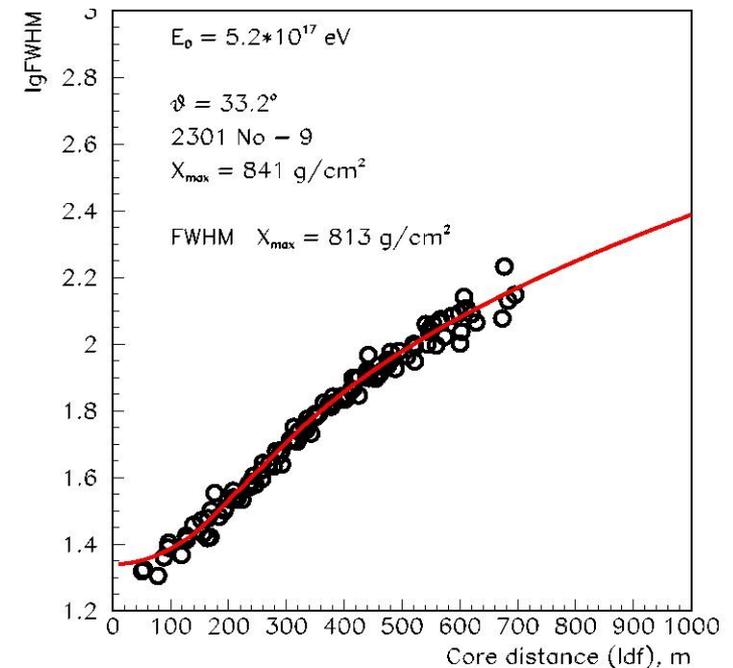
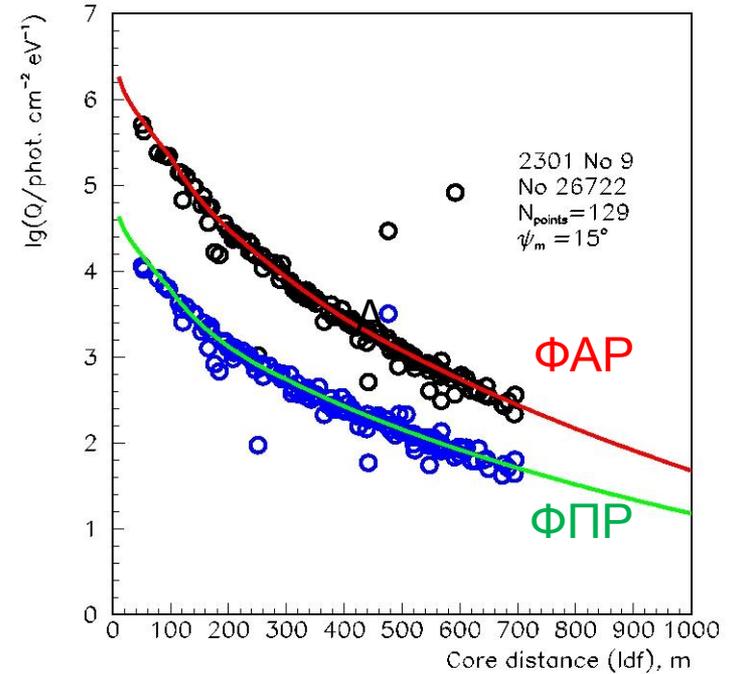
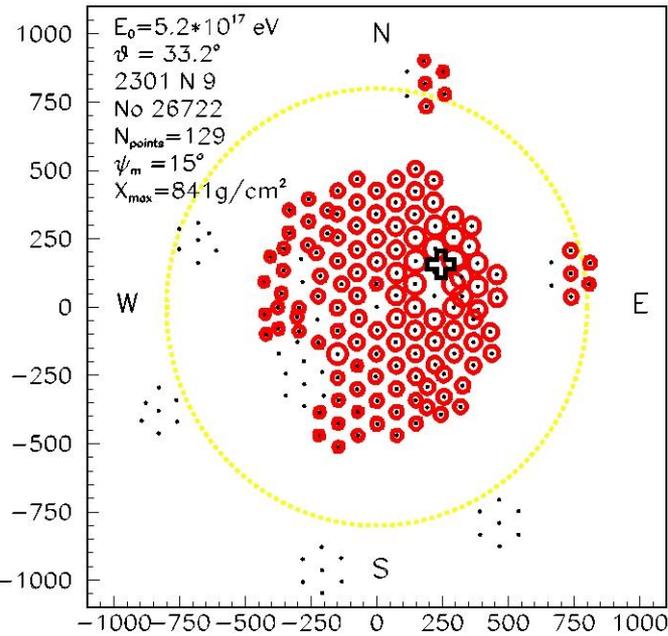
Тунка-133

План

ФАР
и
ФПР

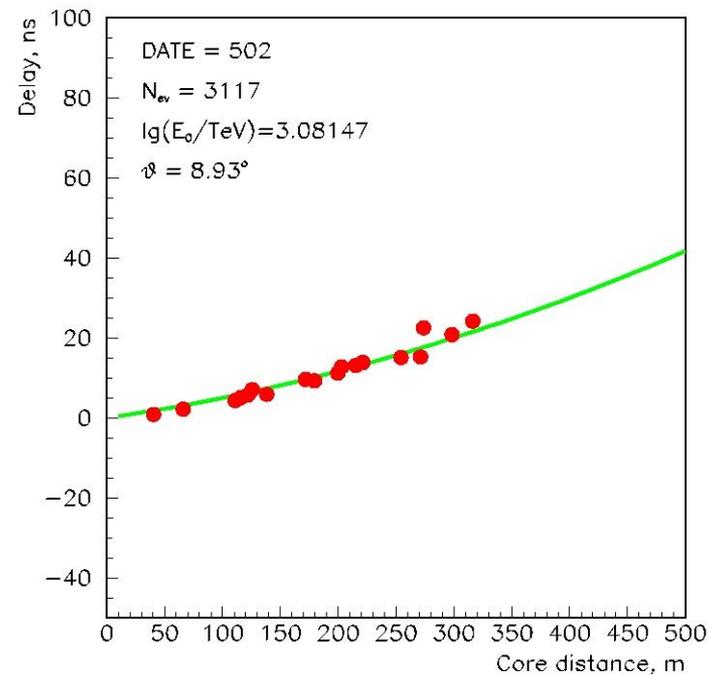
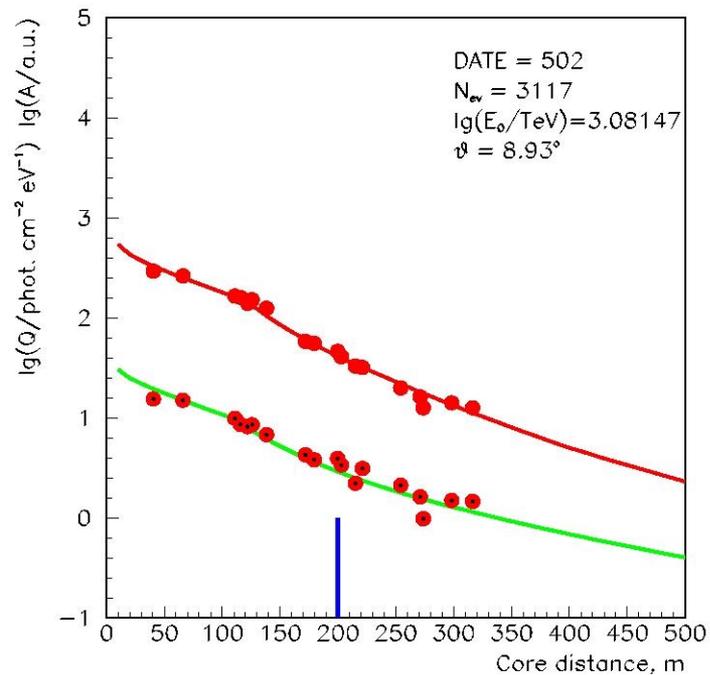
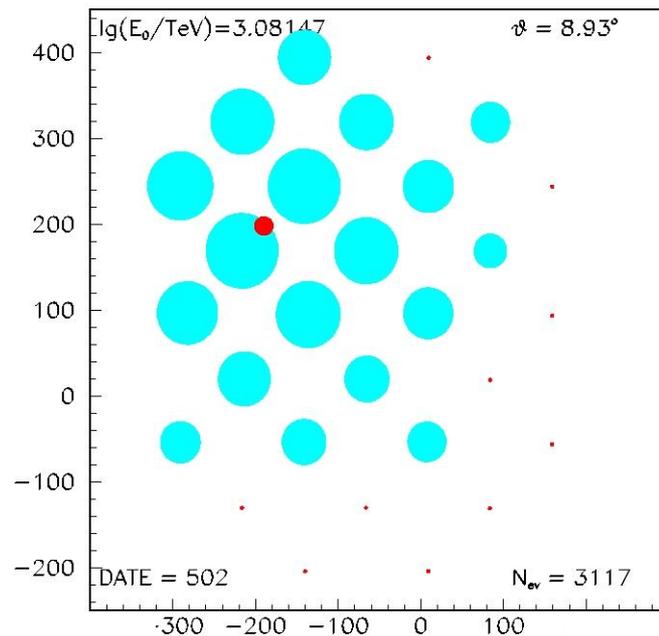
Пример
события

Зависимость τ_{eff} от
расстояния

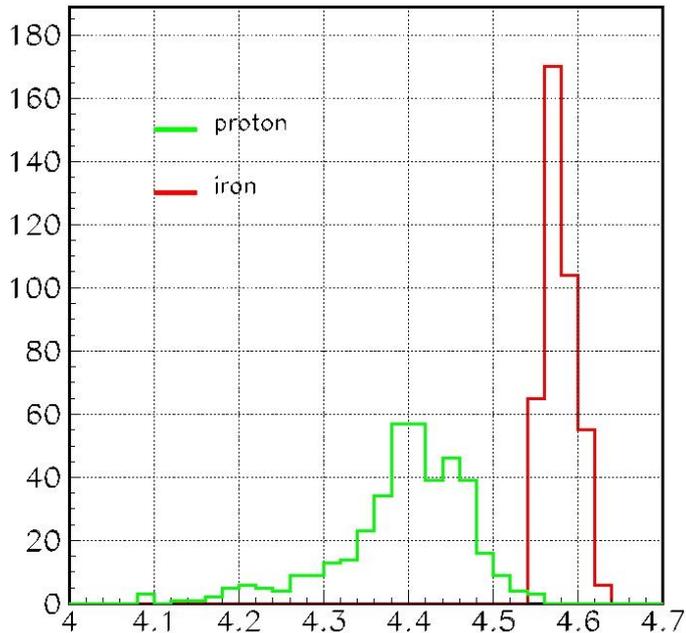


HiSCORE

пример события



Методы оценки массового состава космических лучей.

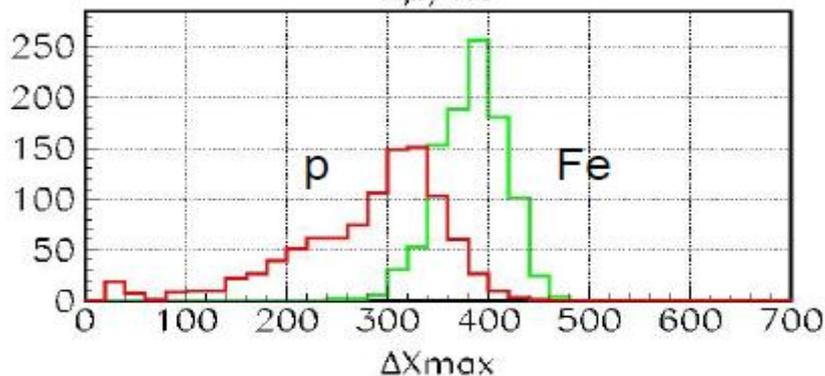


S -distribution

Соотношение числа электронов и мюонов в ливне:

параметр S (N_e, N_μ):

$$S = \lg N_\mu - 0.2 \times \lg N_e$$



Глубина максимума

ШАЛ X_{\max} :

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

Как измерить глубину максимума ШАЛ?

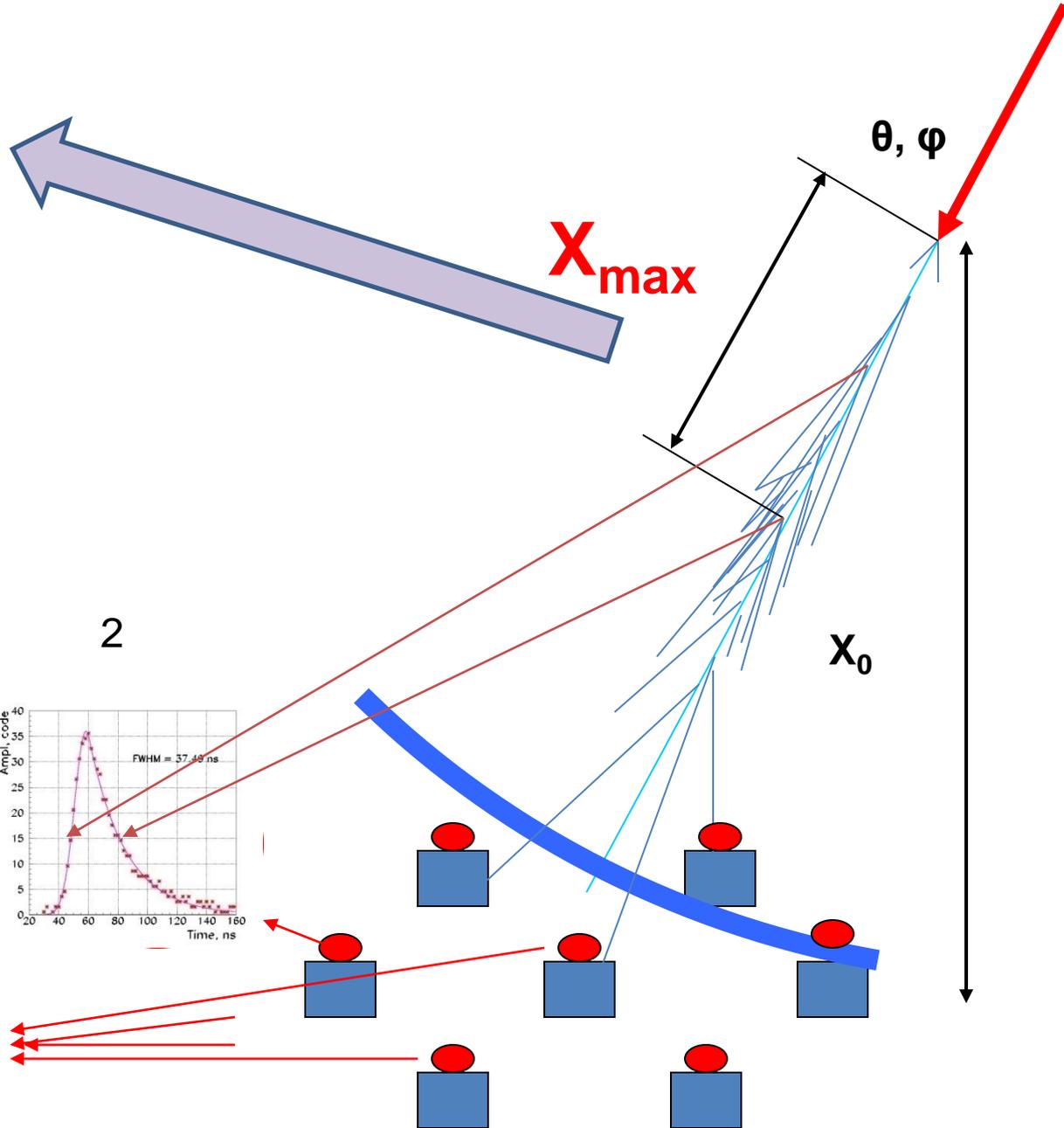
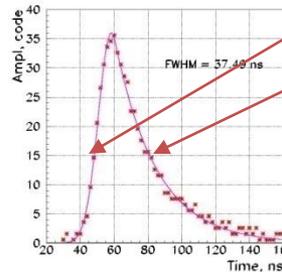
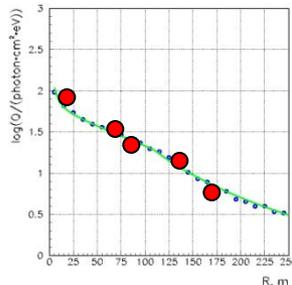
$10^{18} - 10^{20}$ эВ

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

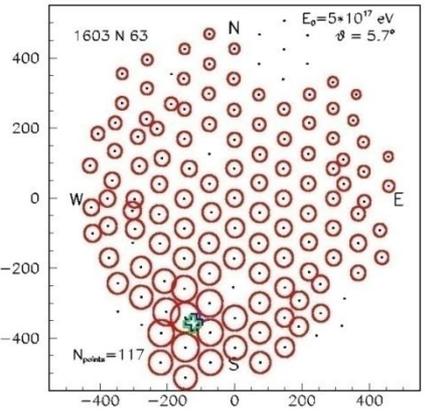
$10^{15} - 10^{18}$ эВ

2 метода оценки X_{max} :

1. Крутизна ФПР
2. Длительность импульса

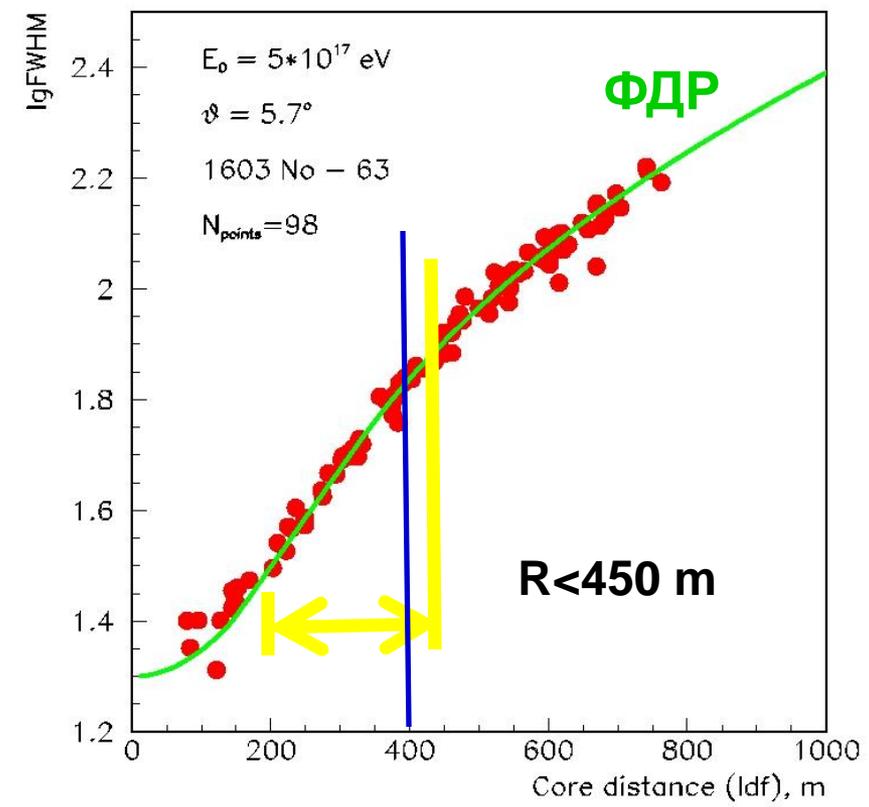
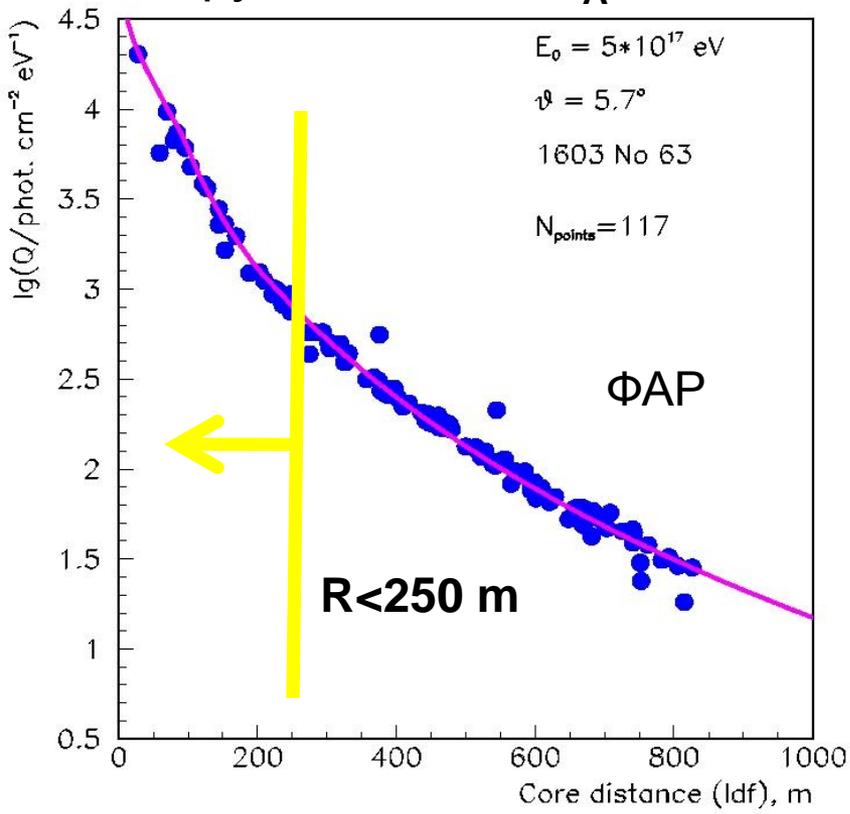


Массовый состав: Два метода определения X_{\max} :

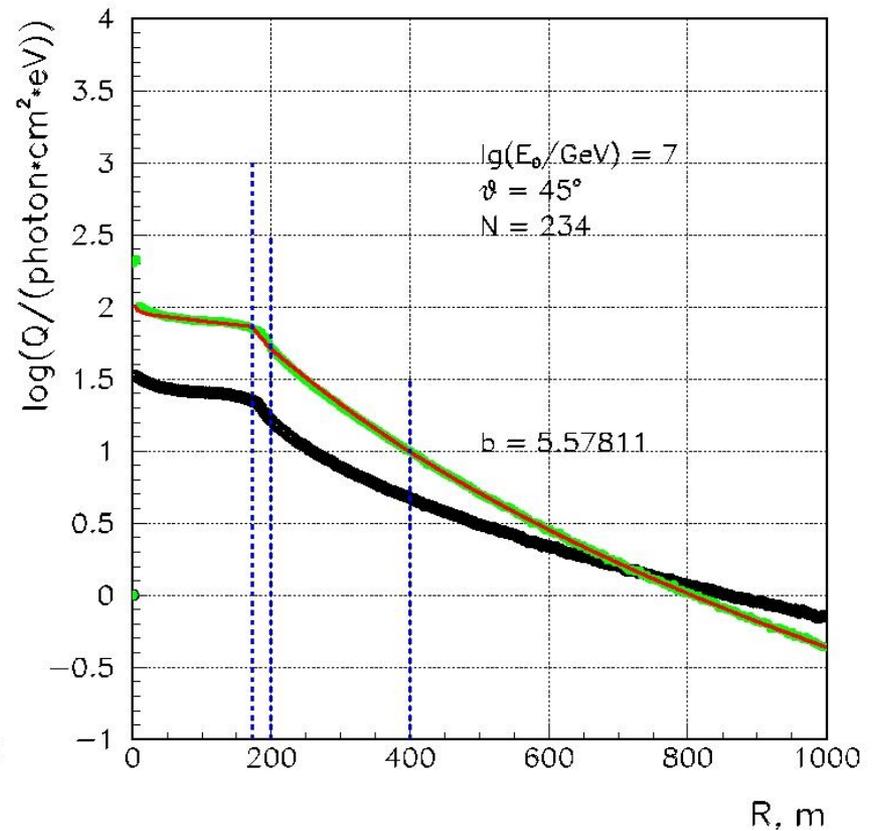
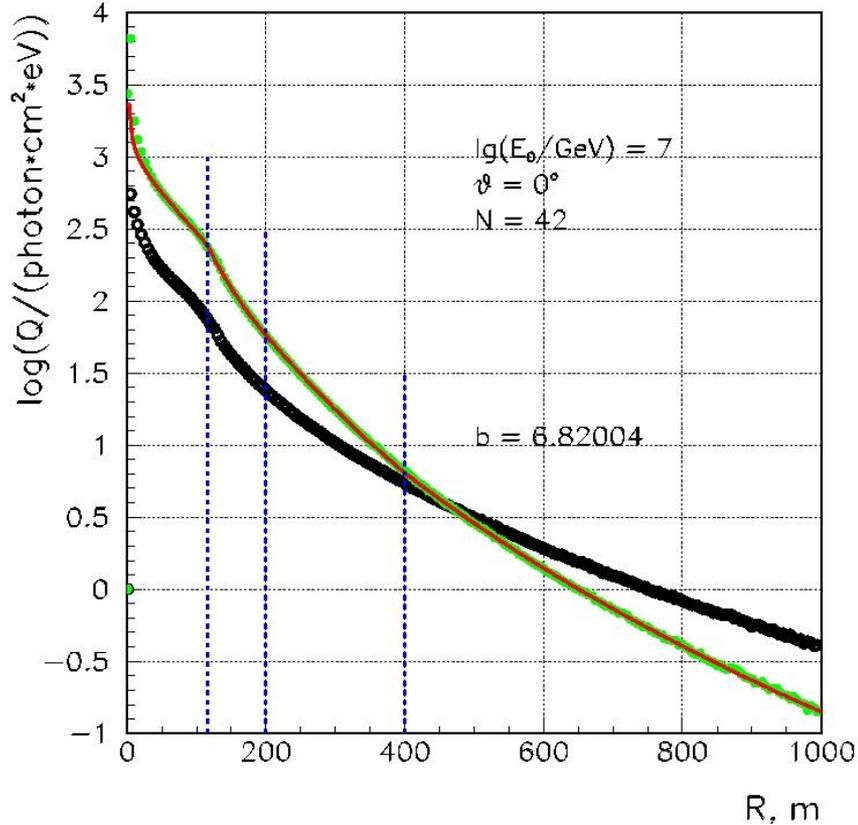


Длительность импульсов на расстоянии 400 м от оси ШАЛ: $\tau_{\text{eff}}(400)$

Крутизна ФАР: b_A



CORSIKA: Функции – ФПР и ФАР



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

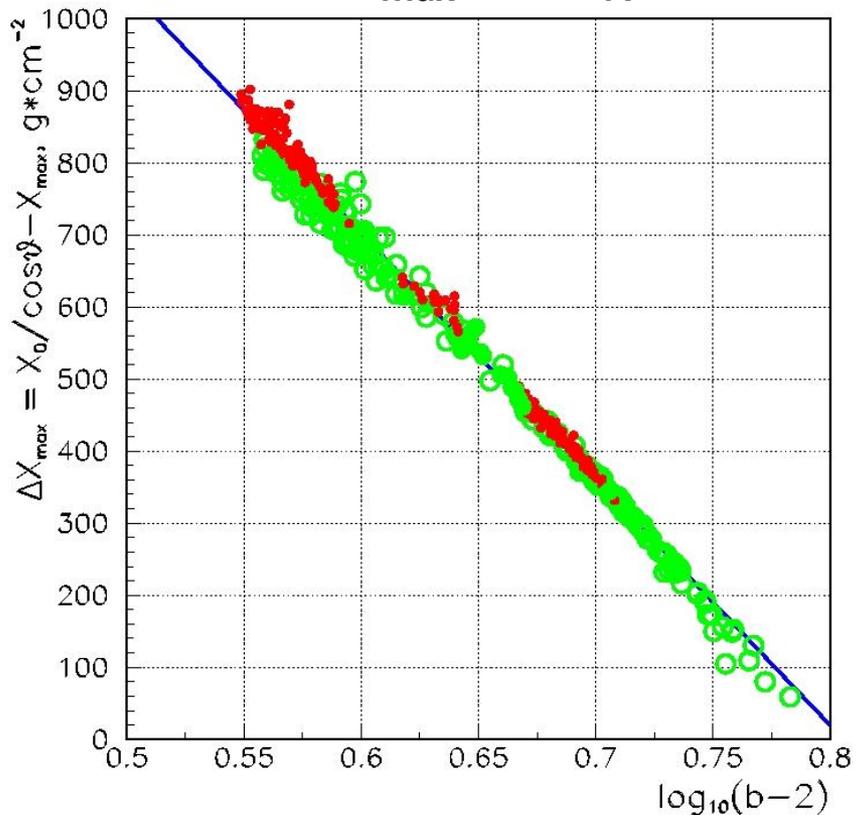
ФПР: $Q(R) = Q(300) \cdot ((R/300 + 1)/2)^{-b_Q}$ крутизна: b_Q

$$b_A > b_Q$$

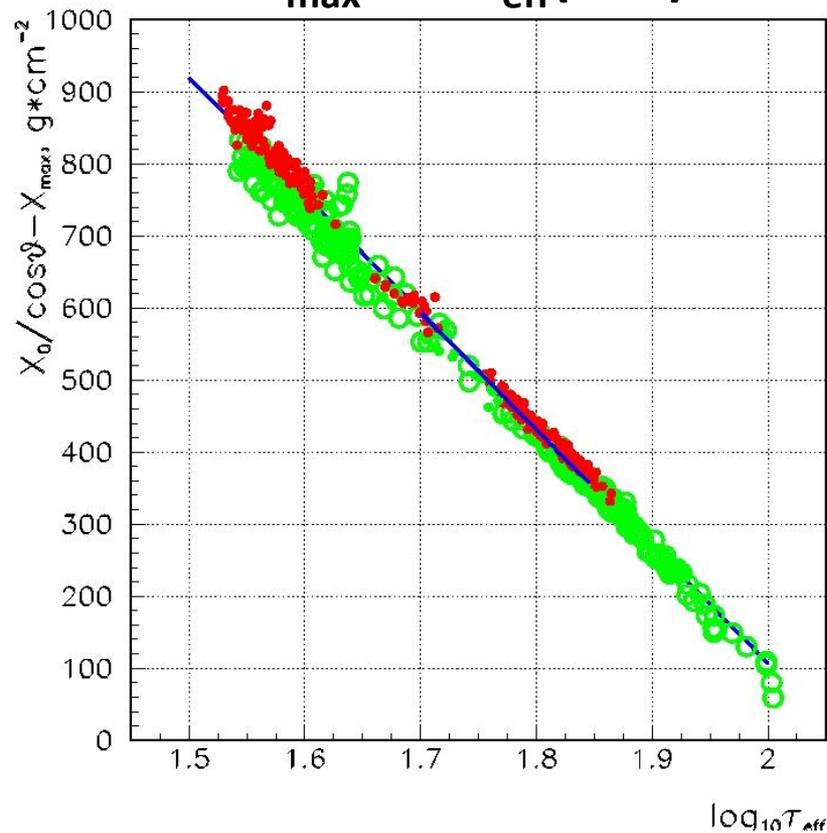
CORSIKA

(Корреляции не зависят ни от модели, ни от энергии, ни от зенитного угла)

ΔX_{\max} ОТ b_A



ΔX_{\max} ОТ $\tau_{\text{eff}}(400)$



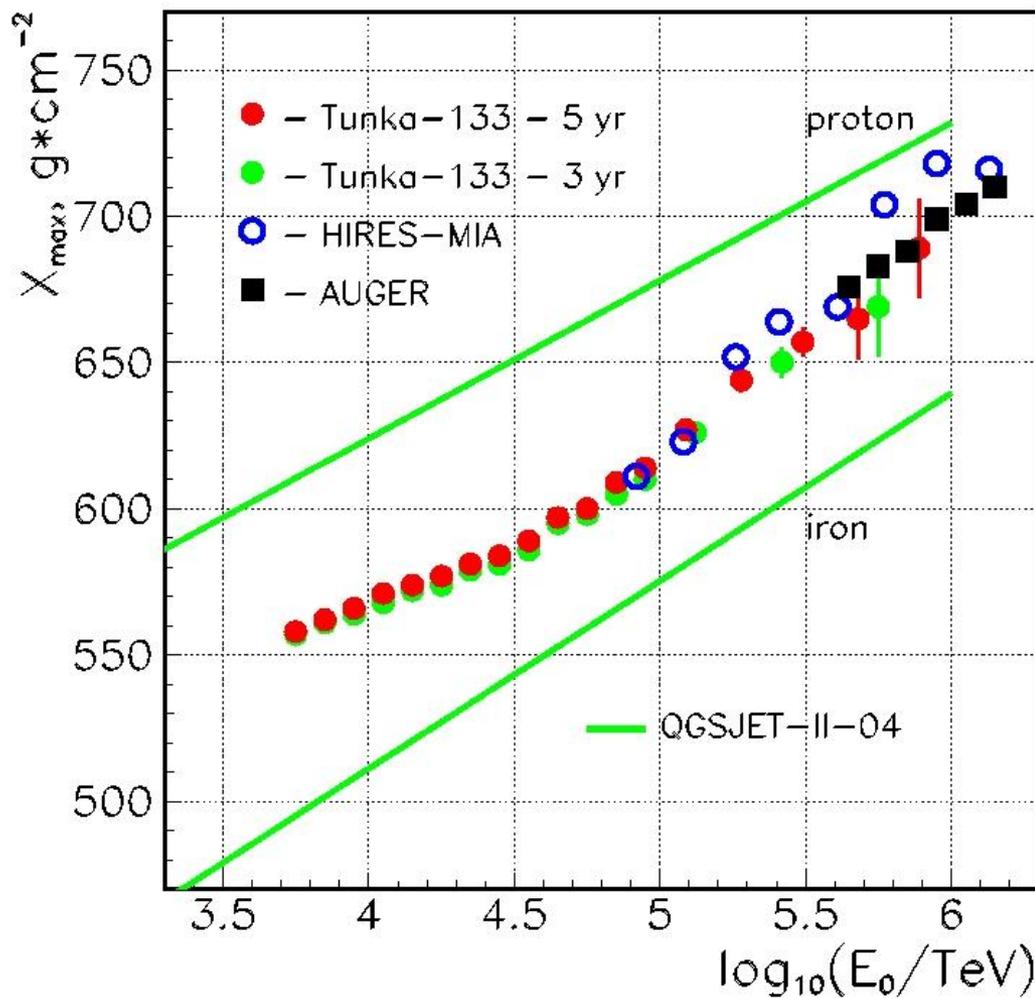
~ 500 событий – $10^7 \text{ GeV} < E_0 < 10^8 \text{ GeV}$, $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
Зеленые точки – p, красные – Fe

Глубины максимумов, определяемые по длительности и по ФПР, несколько отличаются друг от друга.

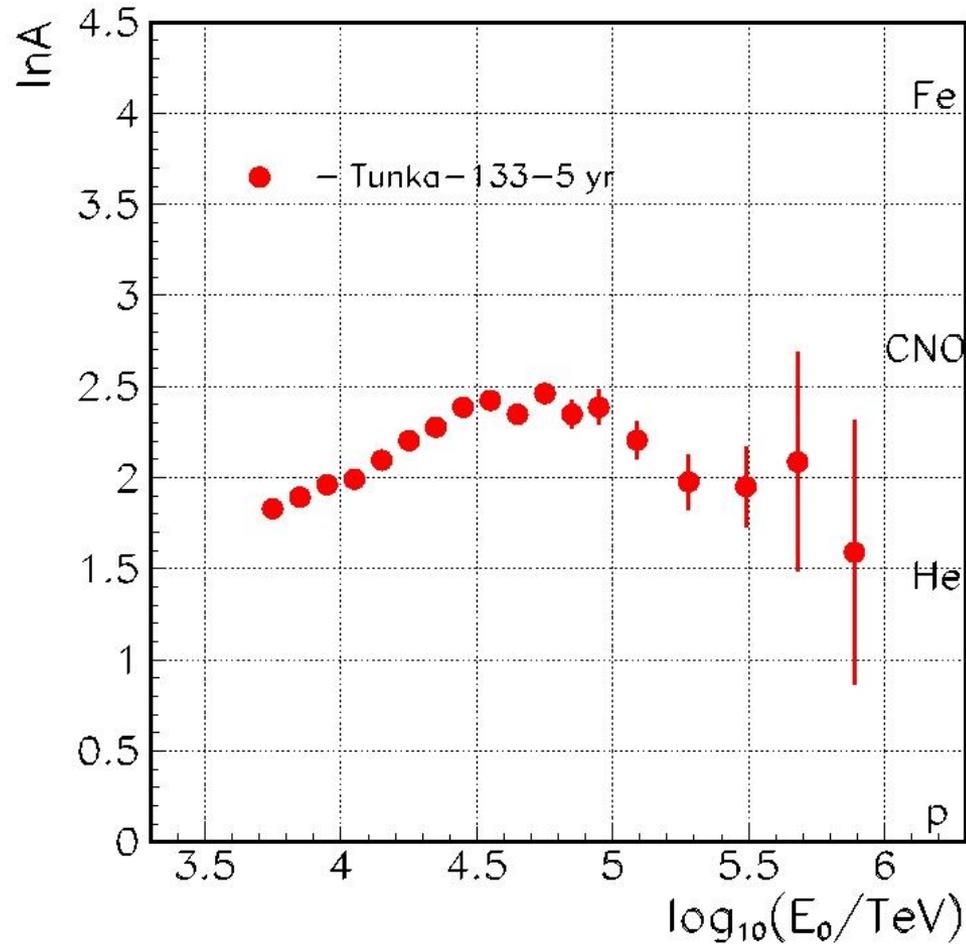
В 2013 – 2015 гг сложилось впечатление, что искажение длительности импульса на фиксированном расстоянии от оси ШАЛ 400 м относительно меньше, чем искажение крутизны ФПР. Поэтому за основу была принята средняя глубина максимума, определенная по длительностям, а зависимость крутизны ФАР от относительной глубины была нормирована на среднюю глубину, полученную по длительности.

Убеждала в правильности результата хорошая стыковка с результатами прямого измерения X_{\max} в РАО при энергиях $3-5 \cdot 10^{17}$ эВ.

ГЛУБИНА МАКСИМУМА ШАЛ 2013 – 2015 гг



EXPERIMENT: MEAN $\langle \ln A \rangle$ vs. E_0 2013 – 2015 гг



Коррекции методики

1. Появилась установка HiSCORE, позволившая понизить порог тщательных измерений пространственно-временной структуры ШАЛ, по крайней мере, на порядок.
2. В 2013 – 2015 гг экспериментальные оценки глубины максимума ШАЛ в прямых измерениях в Pier Auger Observatory, были увеличены на 25-30 г·см⁻², приведя к рассогласованию с результатами установки Тунка-133.

Коррекции методики

1. Новое моделирование по программе CORSIKA для большего диапазона энергий подтвердило, что крутизна ФПР (функции пространственного распределения) однозначно определяется только толщиной атмосферы между экспериментальной установкой и глубиной максимума ШАЛ независимо от энергии, зенитного угла ливня и сорта первичного ядра.
2. Искажения длительности импульсов при энергиях 10^{15} – 10^{16} эВ оказались больше, чем представлялось ранее, за счет малых потоков света и несколько разных характеристик различных станций. Точный учет этих искажений по модельным импульсам пока не закончен.
3. Чувствительность измеряемых параметров к положению максимума существенно ухудшается для зенитных углов более 30 градусов.
4. Выбор параметра ФПР, с одной стороны, чувствительного к глубине, а с другой стороны, измеряемого в эксперименте на наших установках в широком диапазоне энергий, привел к параметру **$P = Q(80)/Q(200)$** .

Коррекции методики

Использованы результаты расчетов для энергий от 10^{15} до 10^{18} эВ с зенитными углами 0 и 30 градусов.

Ливни от протонов и железа.

Прямая – фит по всем точкам:

$$P_0 = Q(80)/Q(200)$$

$$P = P_0 \quad \text{для} \quad P_0 > 3.724$$

$$P = P_0 - 0.506 \times (3.724 - P_0) \quad \text{для} \quad P_0 \leq 3.724$$

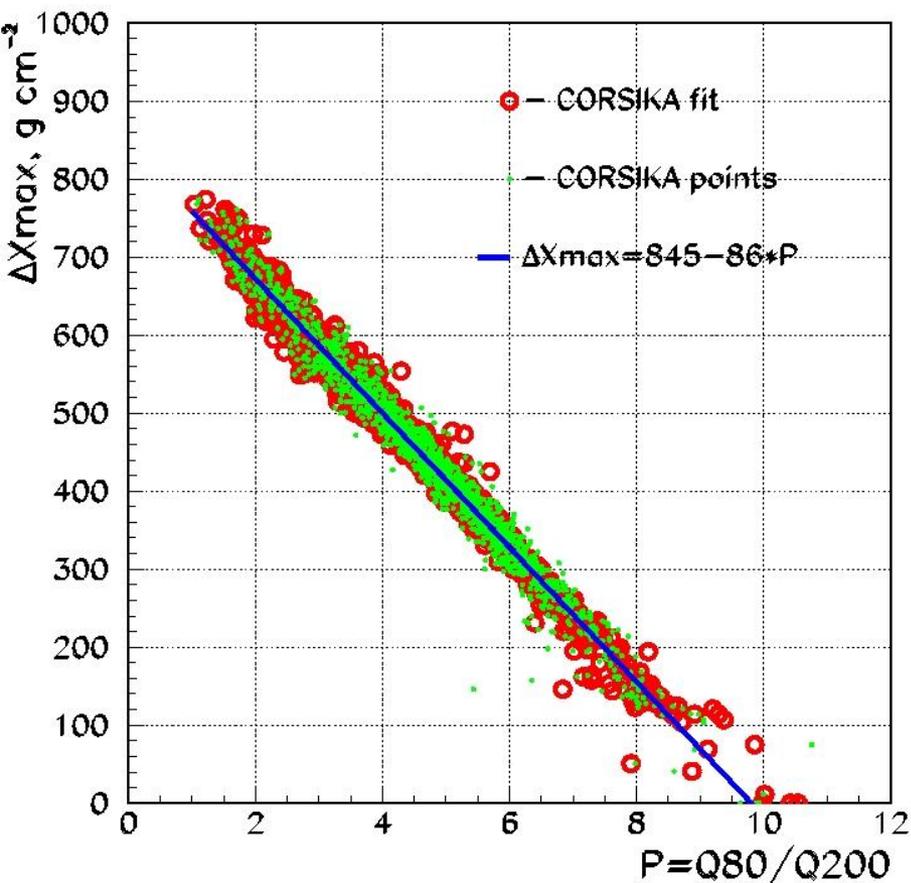
$$\Delta X_{\max} = 845 - 86 \times P, \quad [\text{г/см}^2]$$

$$X_{\max} = 965 / \cos\theta - \Delta X_{\max}, \quad [\text{г/см}^2]$$

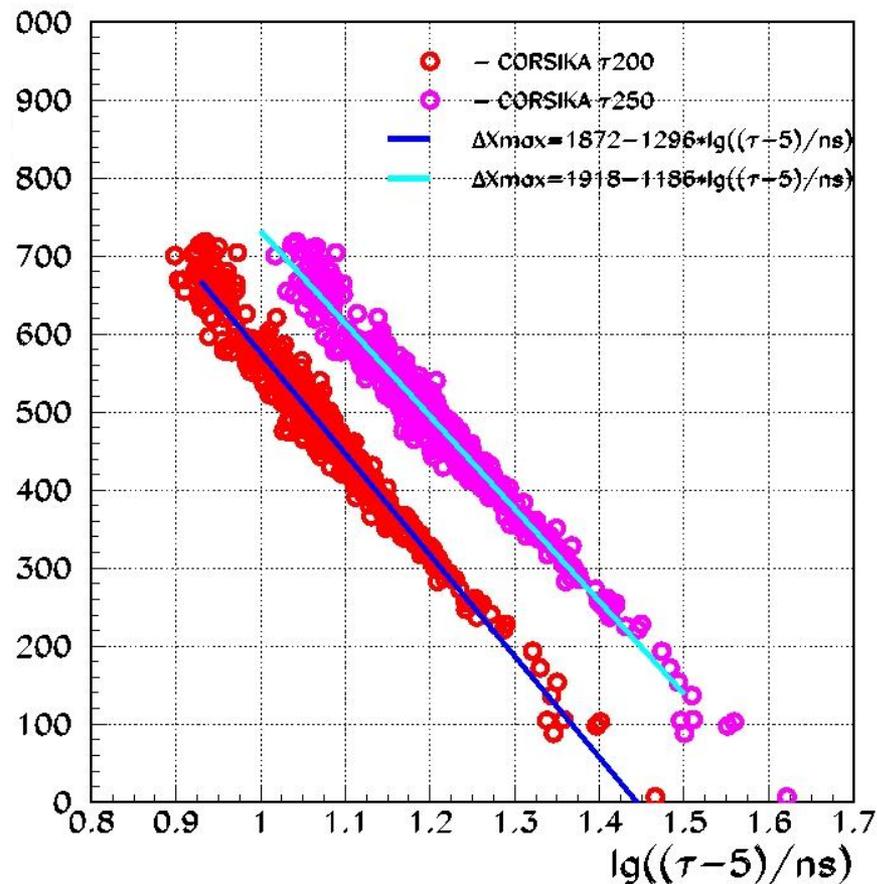
Новый параметр крутизны ФПР применен для анализа данных обеих установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE.

CORSIKA: Корреляции измеряемых параметров с положением максимума ШАЛ

ΔX_{\max} & $Q(80)/Q(200)$



ΔX_{\max} & FWHM



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Тунка-133: Результаты обработки за 7 лет с 2010 по 2017 гг.

Зенитный угол $\theta \leq 30^\circ$,

Площадь 0.64 км^2 ,

Энергия $\geq 10^{16}$ эВ – 69000 событий.

Чтобы при всех энергиях иметь один и тот же диапазон расстояний от оси ШАЛ, на заключительном этапе обработке диапазон ограничивается до 250 м.

TAIGA-HiSCORE: Результаты обработки данных сезона 2019-20 г за 69 ночей с отличной погодой и одновременной работой 2-х кластеров.

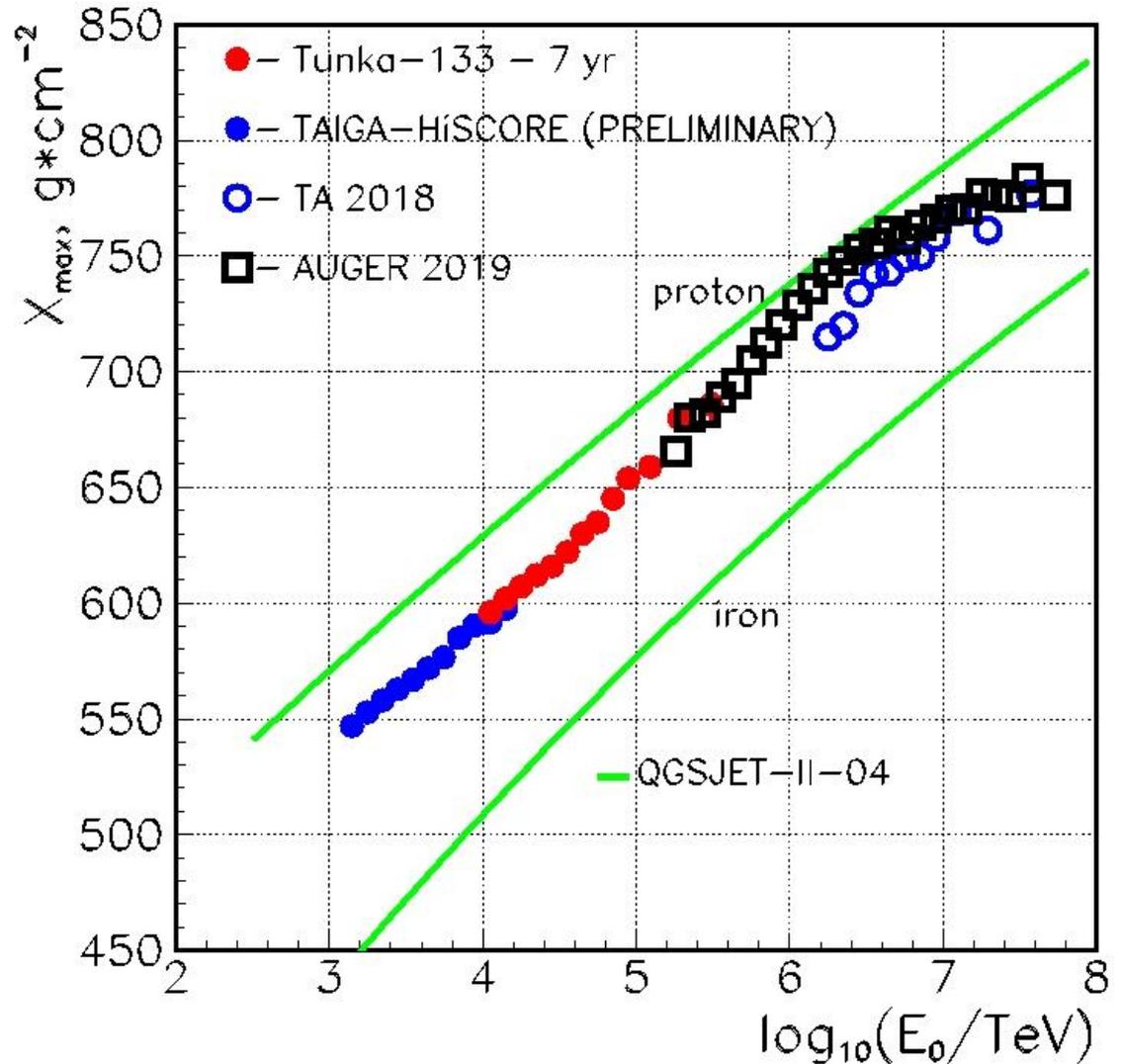
Зенитный угол $\theta \leq 30^\circ$,

Площадь 0.44 км^2

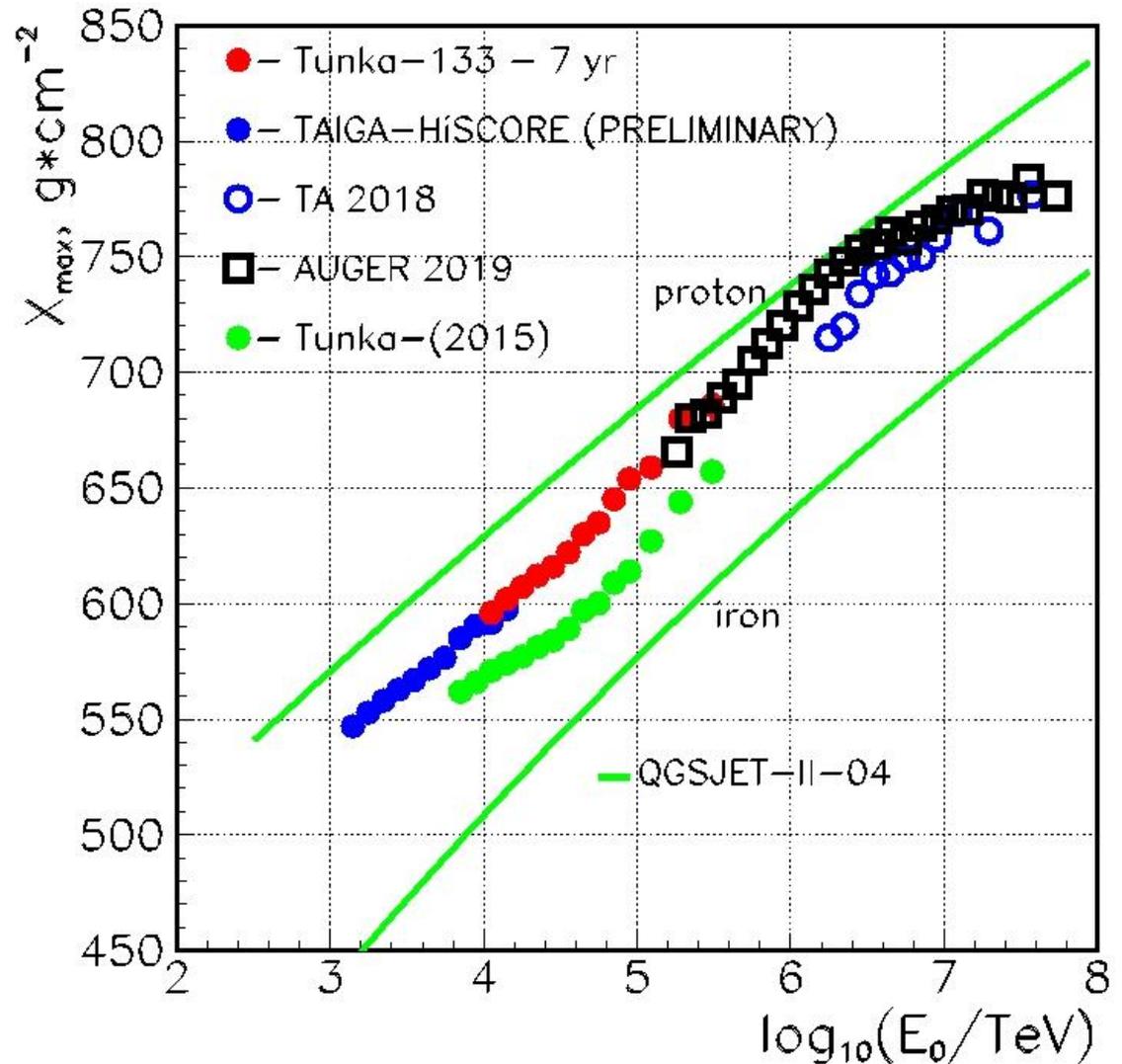
Энергия $\geq 10^{15}$ эВ – 280000 событий.

Чтобы при всех энергиях иметь один и тот же диапазон расстояний от оси ШАЛ, на заключительном этапе обработке диапазон ограничивается до 250 м.

ГЛУБИНА МАКСИМУМА ШАЛ



ГЛУБИНА МАКСИМУМА ШАЛ



Средний состав космических лучей $\langle \ln A \rangle$

Пересчет к среднему составу для всех установок, включая AUGER, произведен методом интерполяции между расчетами глубины максимума для протонов и железа по модели QGSJET II-04.

Модель EPOS-LHC дает увеличение $\langle \ln A \rangle$ при $8 \cdot 10^{16}$ эВ на 0.35

Модель Sibill2.3c дает увеличение $\langle \ln A \rangle$ при $8 \cdot 10^{16}$ эВ на 0.60

Средний состав космических лучей $\ln A$

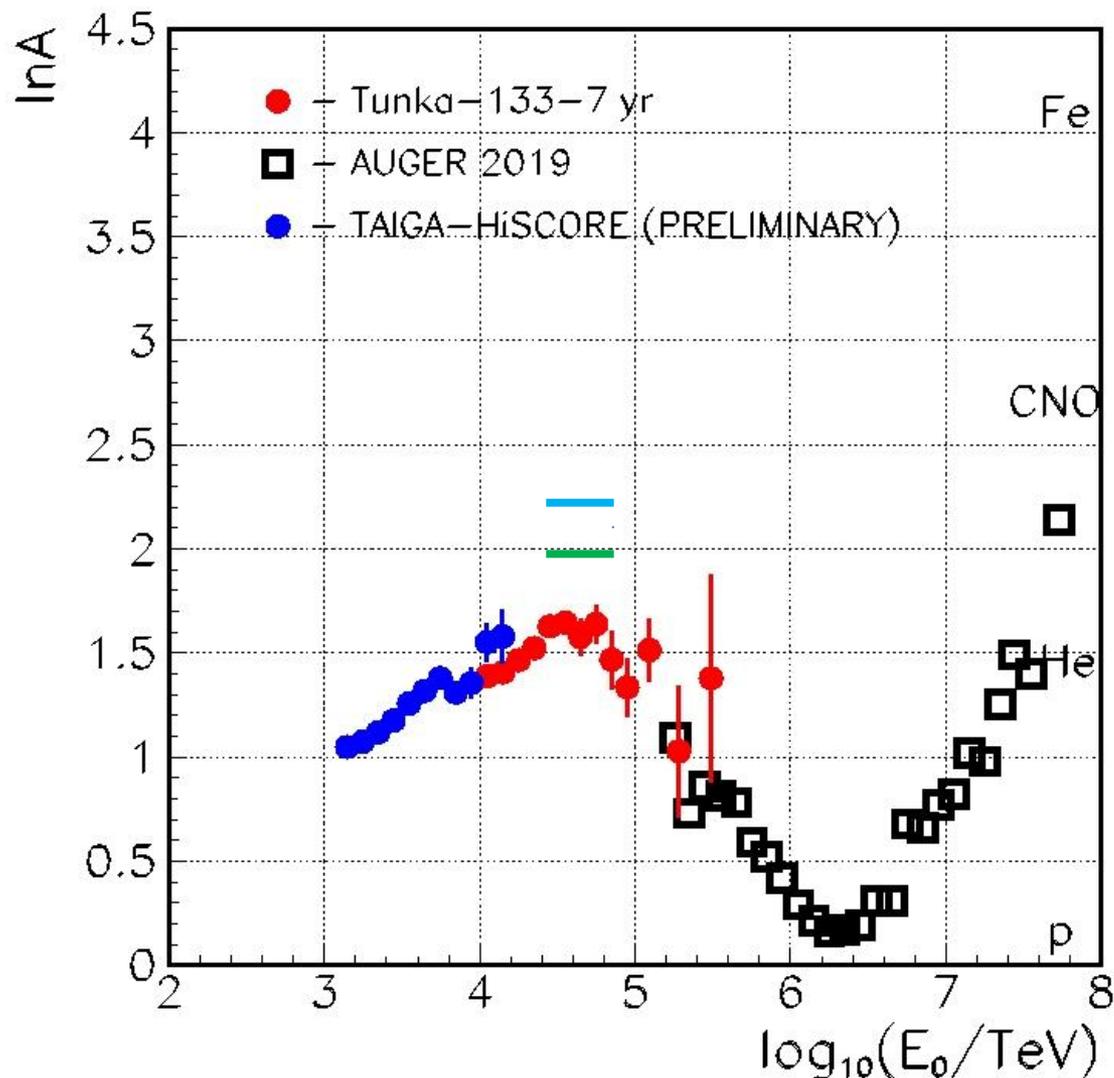
Пересчет

по модели: [QJSJetII-04](#)

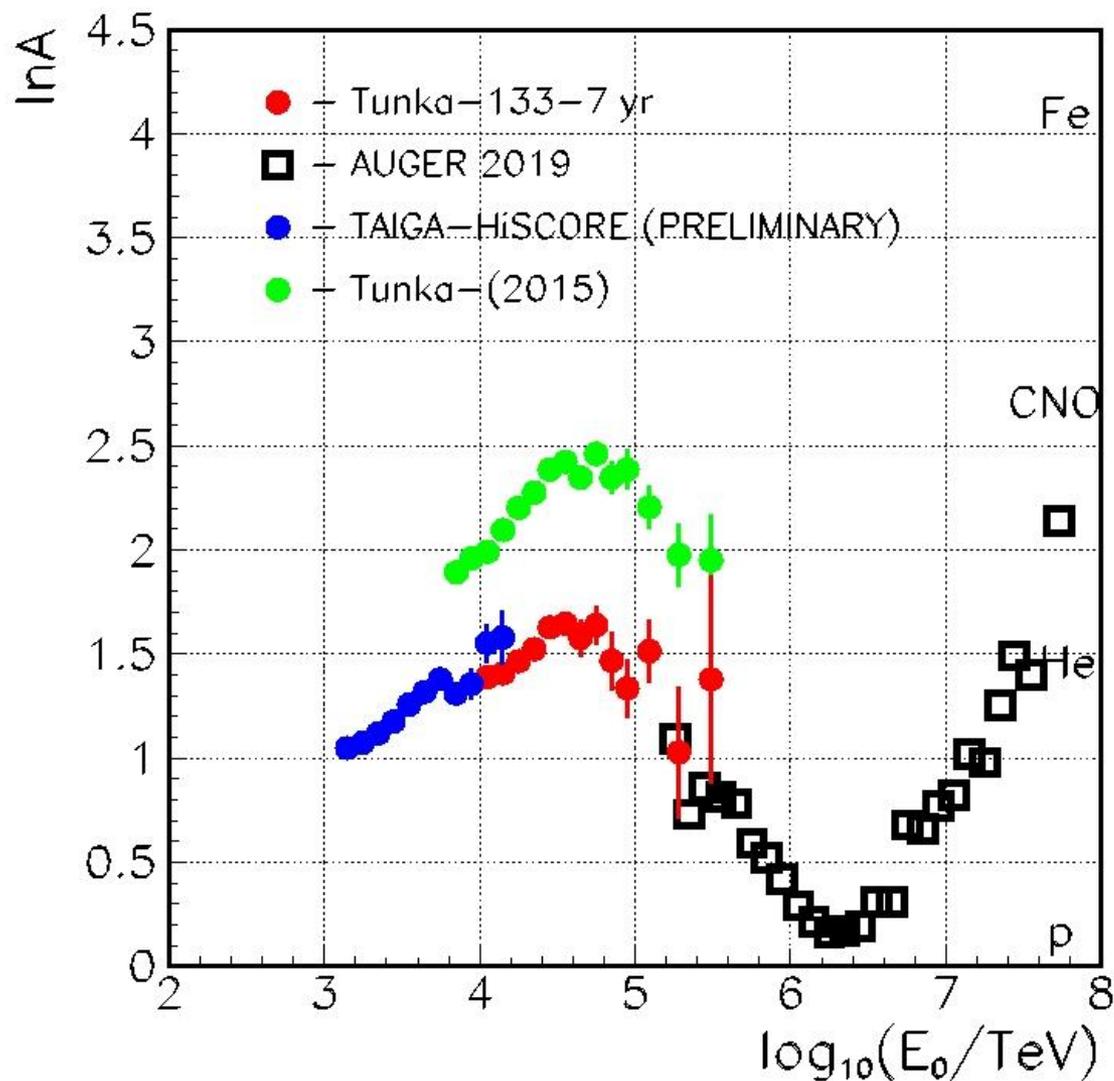
При $8 \cdot 10^4$ ТэВ:

+0.35 – EPOS-LHC

+0.60 – Sibill2.3c



Средний состав космических лучей $\ln A$



ВЫВОДЫ

- 1) В диапазоне 4 – 6 ($\lg(E/\text{TeV})$) точки установки Тунка-133 повторяют результат ранее опубликованной работы, но со сдвигом на ~ 0.8 в сторону более легкого состава (в среднем первичного гелия).
- 2) На предельно высоких для наших экспериментов энергий наблюдается отличная стыковка с последними результатами Pier Auger Observatory (PAO).
- 3) Результаты работы предварительные.
 - а) Планируется более полное моделирование эксперимента для выявления возможных систематических искажений.
 - б) Планируется более полный анализ искажений формы импульсов черенковского света для получения согласия двух методов оценки глубины максимума.
 - в) Требуется анализ экспериментальных распределений по глубине максимума для всего диапазона энергий.

Спасибо за внимание!

