

ИРКУТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Определение глубины максимума по длительности импульса для установки TAIGA-HiSCORE

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

Марк Терновой¹, В.В. Просин², Э.А. Осипова²

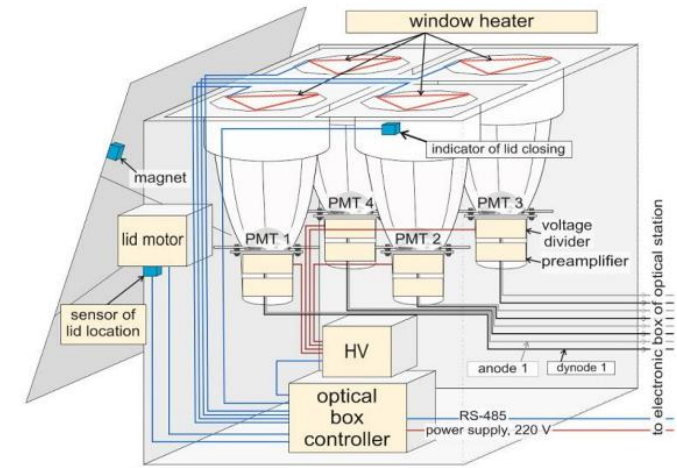
¹Научно-исследовательский институт прикладной физики ИГУ

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д. В. Скобельцына Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова

Москва, Президиум РАН, 17 февраля 2025

Станция TAIGA-HiSCORE

- Станция TAIGA-HiSCORE состоит из нескольких ключевых компонентов, обеспечивающих её функциональность:
 - **Оптические модули:** Каждая станция оснащена четырьмя ФЭУ диаметром 20 и 25 см, расположенными рядом друг с другом и оснащёнными световодами в форме конуса Винстона. Эти световоды увеличивают эффективную площадь сбора света в четыре раза, что повышает чувствительность детектора;
 - **Электронная система:** Выходные сигналы от ФЭУ суммируются и оцифровываются с помощью системы записи формы импульсов. Время точности измерений составляет менее одной наносекунды, что позволяет точно фиксировать моменты прихода фотонов;
 - **Синхронизация:** Высокая точность синхронизации между станциями позволяет точно определять время прихода фотонов, что критически важно для восстановления параметров широких атмосферных ливней;
 - **Расположение:** Станции размещены на расстоянии 150–200 метров друг от друга, покрывая площадь около 1 км².



Способы измерения глубины максимума ШАЛ

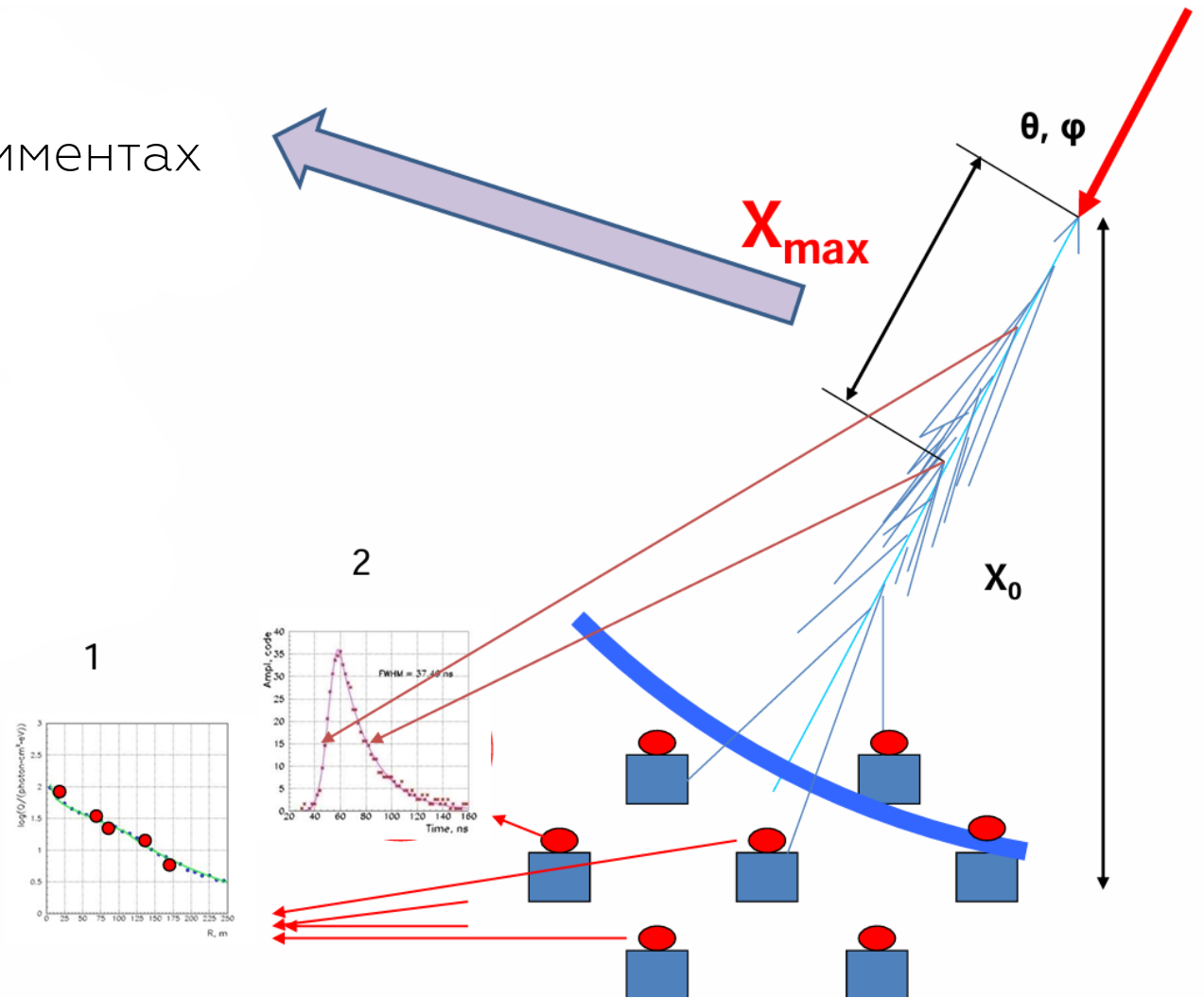
- $10^{18} - 10^{20}$ эВ

Прямое наблюдение X_{\max} через ионизационный свет, как в экспериментах Pierre Auger и Telescope Array.

- $10^{15} - 10^{18}$ эВ

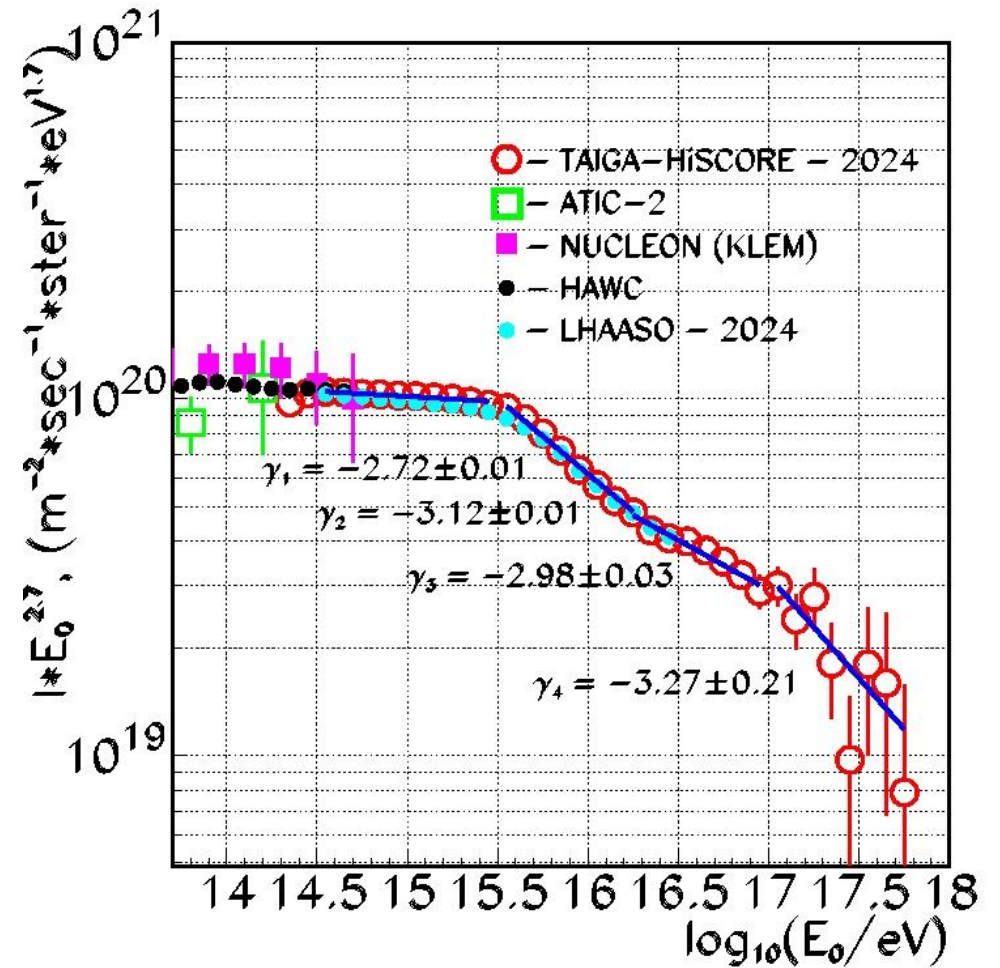
Два метода оценки X_{\max} :

- Наклон функции распределения света (ФПР), $Q(R)$;
- Длительность импульса, τ_R .



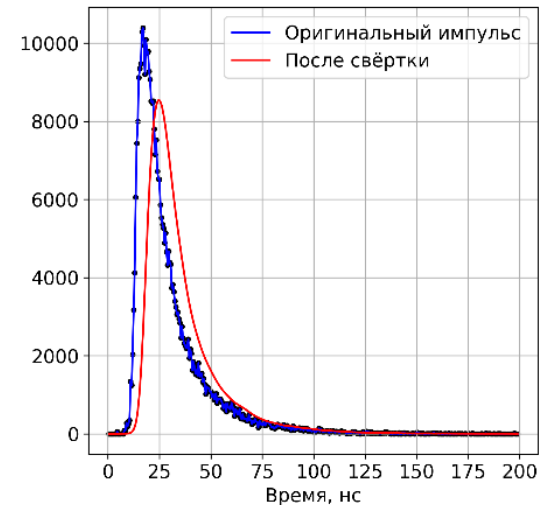
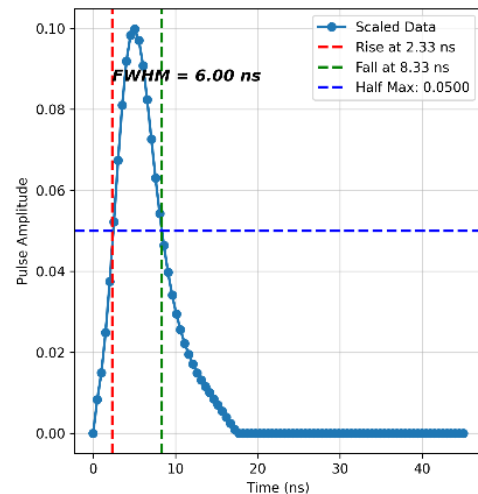
Способы измерения глубины максимума ШАЛ

- Анализ данных TAIGA-HiSCORE (2022-2024) показывает, что метод оценки X_{max} через параметр P (отношение потоков света на разных расстояниях от оси ливня) **неэффективен при энергиях выше $3 \cdot 10^{16}$ эВ (30 ПэВ) из-за насыщения аппаратуры;**
- **Новый подход** – использование длительности импульсов черенковского света на некотором большом расстоянии от оси ливня через динодный канал станций HiSCORE.
- Крутизна: $P = Q(80)/Q(200)$
- Относительное положение максимума:
$$\Delta X_{max} = 929 - 103 \times P, \quad P < 3.9$$
$$\Delta X_{max} = 882 - 91 \times P, \quad P > 3.9$$
(относительно установки наблюдения)



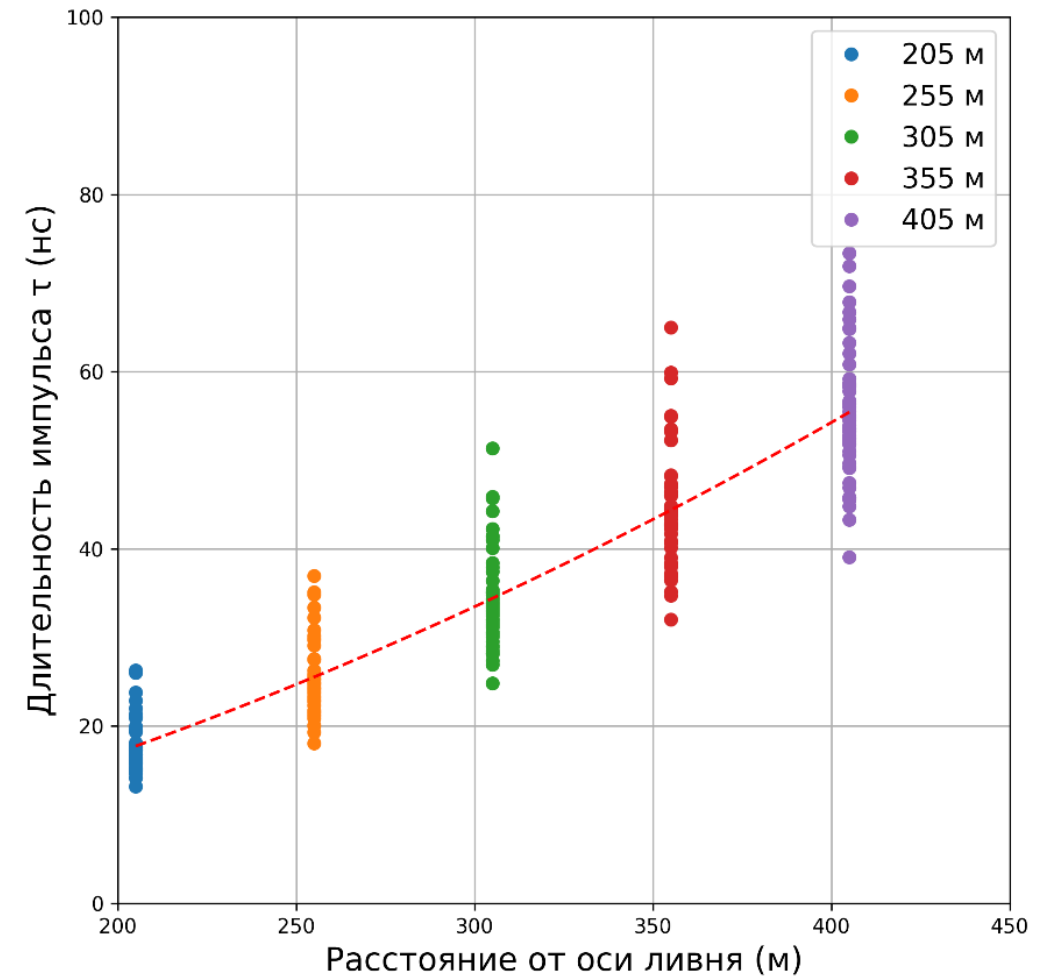
Методика измерения длительности импульса на HiSCORE

- Для оценки длительности импульса в эксперименте используются сигналы, полученные с диодных каналов ФЭУ. Общий алгоритм обработки данных включает несколько этапов:
 - Сигналы от четырёх ФЭУ на одной станции суммируются для получения результирующего импульса;
 - Сигналы сдвигаются во времени на 0.5 наносекунды для повышения точности измерений;
 - После суммирования полученные импульсы свёртываются с аппаратурной функцией станции;
 - Аппаратурная функция характеризуется длительностью 6 наносекунд для диодных каналов и 9 наносекунд для анодных каналов;
 - Для учета влияния аппаратуры импульсы из симуляций (CORSIKA) свёртываются с этими характеристиками, чтобы воспроизвести их поведение в реальном эксперименте.



Анализ зависимости от расстояния от оси ливня

- По данным симуляций, длительность импульса увеличивается с ростом расстояния.
- Для анализа возможности определить глубины максимума ливня по длительности ливня были проведены симуляции со следующими параметрами:
 - CORSIKA+QGSJetII-04;
 - Первичная энергия: 10 ПэВ;
 - Углы: 0, 30°;
 - Первичные частицы: протон, гелий, железо.
- Далее: относительно распределений точек X_{\max} vs $\log(\tau)$, сгруппированным по расстояниям от оси ливня, строились линейные фиты, по которым можно выбрать оптимальный диапазон расстояний, в котором разброс точек минимален.



Определение глубины максимума ливня

- **Динодный канал:**

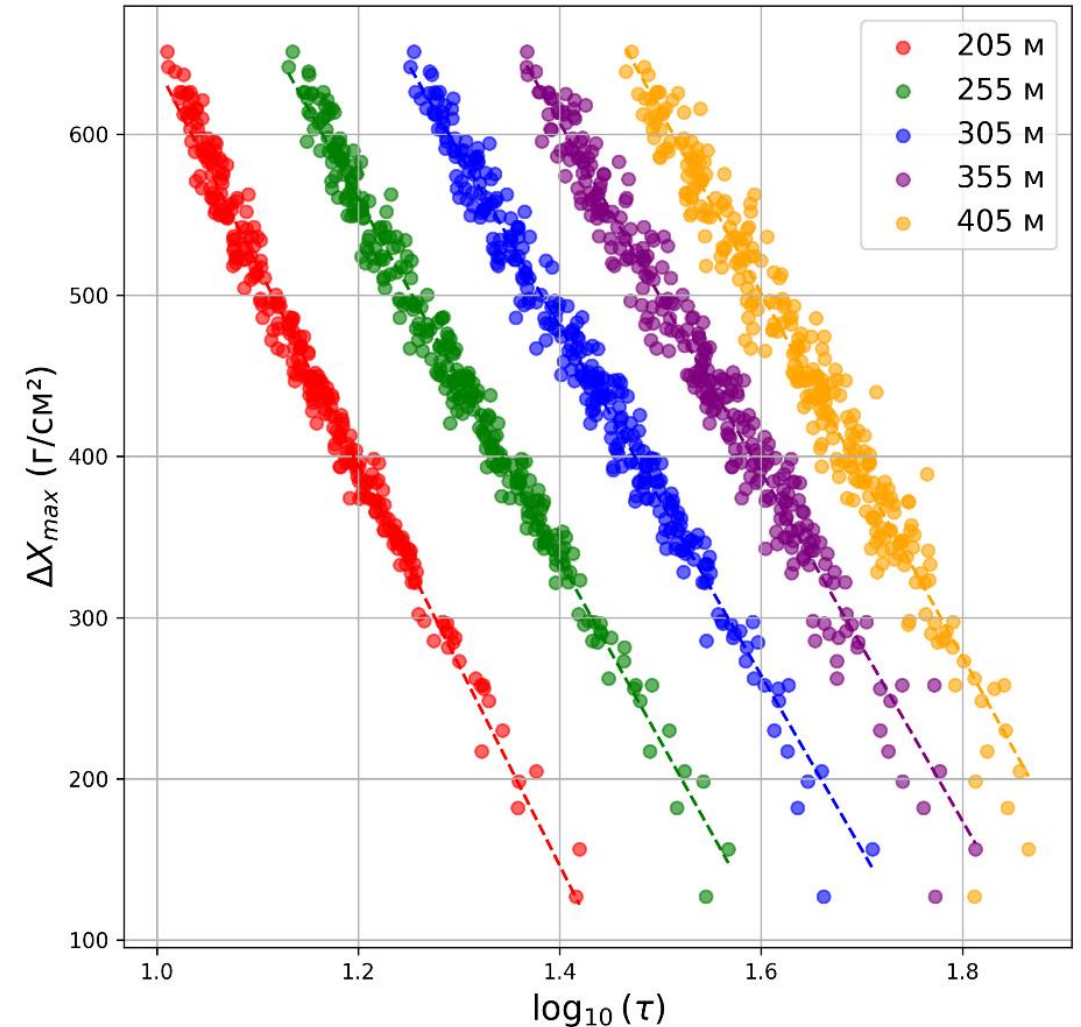
- 205 м: $\Delta X_{max} = -1240.9 \cdot \log \tau + 1883.5$,
 $\sigma = \pm 12.90 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.985$

- 255 м: $\Delta X_{max} = -1122.4 \cdot \log \tau + 1907.0$,
 $\sigma = \pm 13.73 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.983$

- 305 м: $\Delta X_{max} = -1082.7 \cdot \log \tau + 1996.5$,
 $\sigma = \pm 15.28 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.978$

- 355 м: $\Delta X_{max} = -1083.5 \cdot \log \tau + 2123.9$,
 $\sigma = \pm 18.64 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.968$

- 405 м: $\Delta X_{max} = -1129.3 \cdot \log \tau + 2308.2$,
 $\sigma = \pm 21.54 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.957$



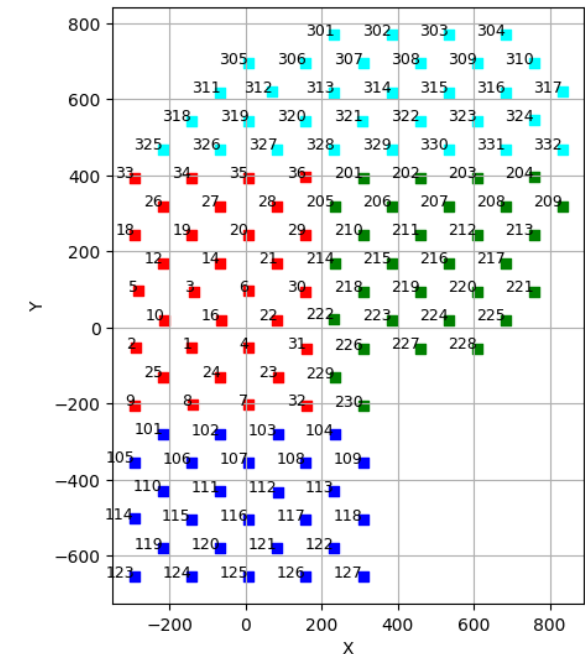
Текущий статус и дальнейшие планы

- **Выбор оптимального расстояния:** анализ показал, что диапазон 250–300 метров является наиболее стабильным для измерений длительности импульса.
- **Корреляция длительности импульса с глубиной максимума:** подтверждена связь между глубиной максимума и длительностью импульса, что делает метод перспективным для определения характеристик ливня.
- **Оценка точности:** погрешность восстановления глубины максимума составляет 12–20 г/см², что является хорошим результатом для данного типа экспериментов.
- Ведется детальное изучение τ -метода:
 - В настоящее время осуществляется дополнительное моделирование атмосферных ливней с использованием CORSIKA, включая процесс черенковского излучения, в том числе для энергий 30 и 100 ПэВ;
 - Метод будет использован для работы с реальными данными.

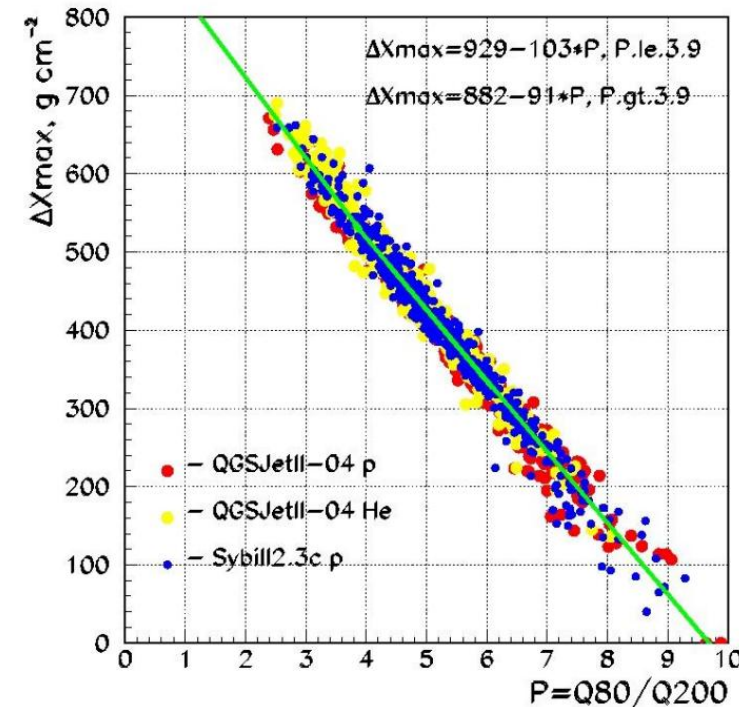
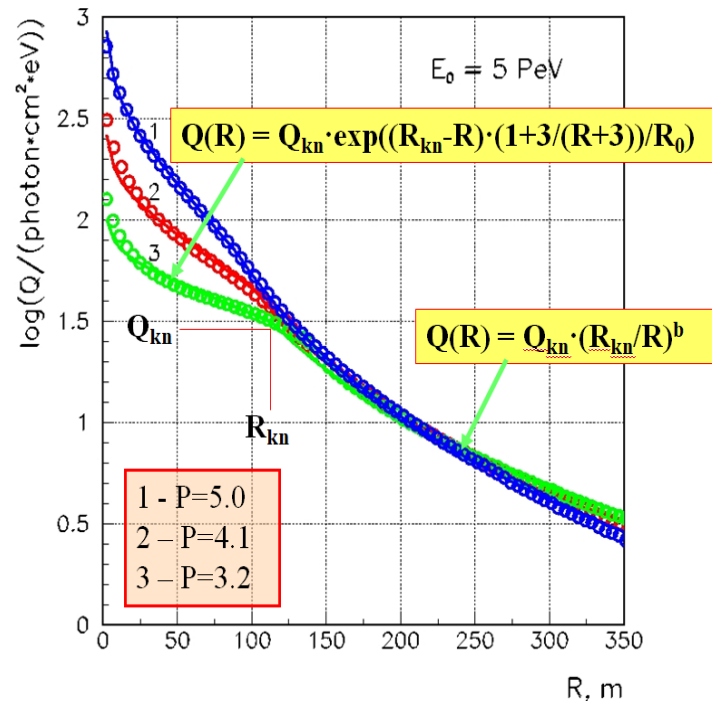
BACKUP

Текущее состояние установки TAIGA-HiSCORE

- Площадь установки до 1 км² с 114 станциями при зенитной (сезон 2022-2023, осень 2024 года) или наклонной ориентации;
- Каждая станция оснащена набором из четырех больших фотоумножителя (ФМТ);
- Энергия воздушного потока определена по потоку черенковского света на расстоянии 200 м от оси для энергий >1 ПэВ и 100 м для более низких энергий;



Корреляция относительного положения X_{max} и крутизны ФПР



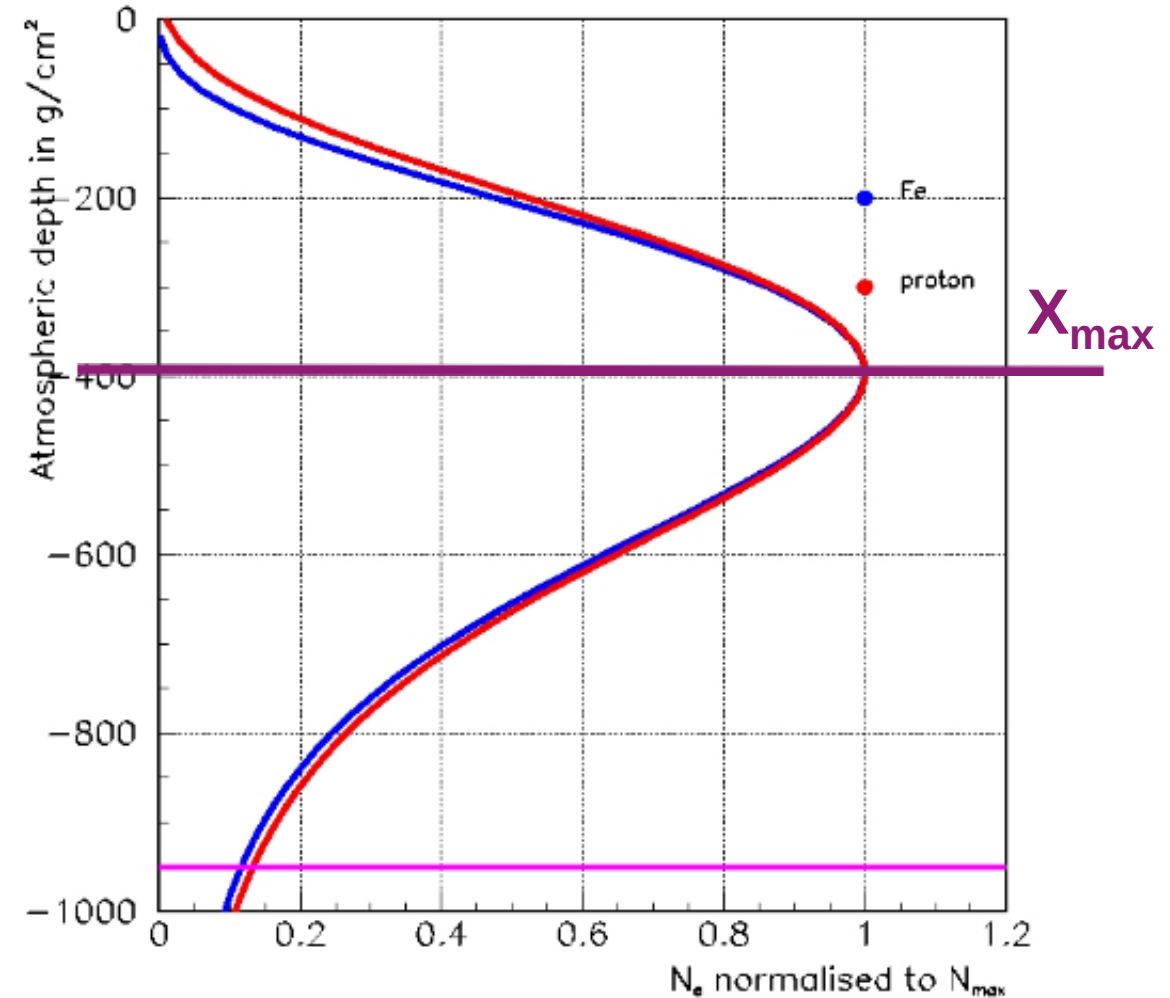
- Крутизна: $P = Q(80)/Q(200)$
(параметр, введенный в 2021 году)
- Относительное положение максимума:
$$\Delta X_{max} = X_0/\cos\theta - X_{max}$$

(относительно установки наблюдения)
- Глубина максимума воздушного потока определяется с использованием отношения светового потока на расстояниях 80 и 200 м от оси

- Экспериментальное распределение крутизны находится в пределах чувствительности P к ΔX_{max} при заданных ограничениях по углу зенита и энергии.
- Преобразование от параметра P к ΔX_{max} независимо от:
 - Энергии ($10^{15} - 10^{18}$ эВ),
 - Угла зенита потока ($0^\circ - 30^\circ$),
 - Модели взаимодействия первичной частицы.

Сходство каскадных кривых

- Важным моментом является тот факт, что формы каскадных кривых, определяющих плотность электронов в ливне в зависимости от атмосферной глубины, практически идентичны для различных типов первичных частиц.
- Моделирование в CORSIKA подтверждает этот факт.
- Следовательно, глубину максимума ливня можно рассматривать как основной параметр для оценки массового состава.



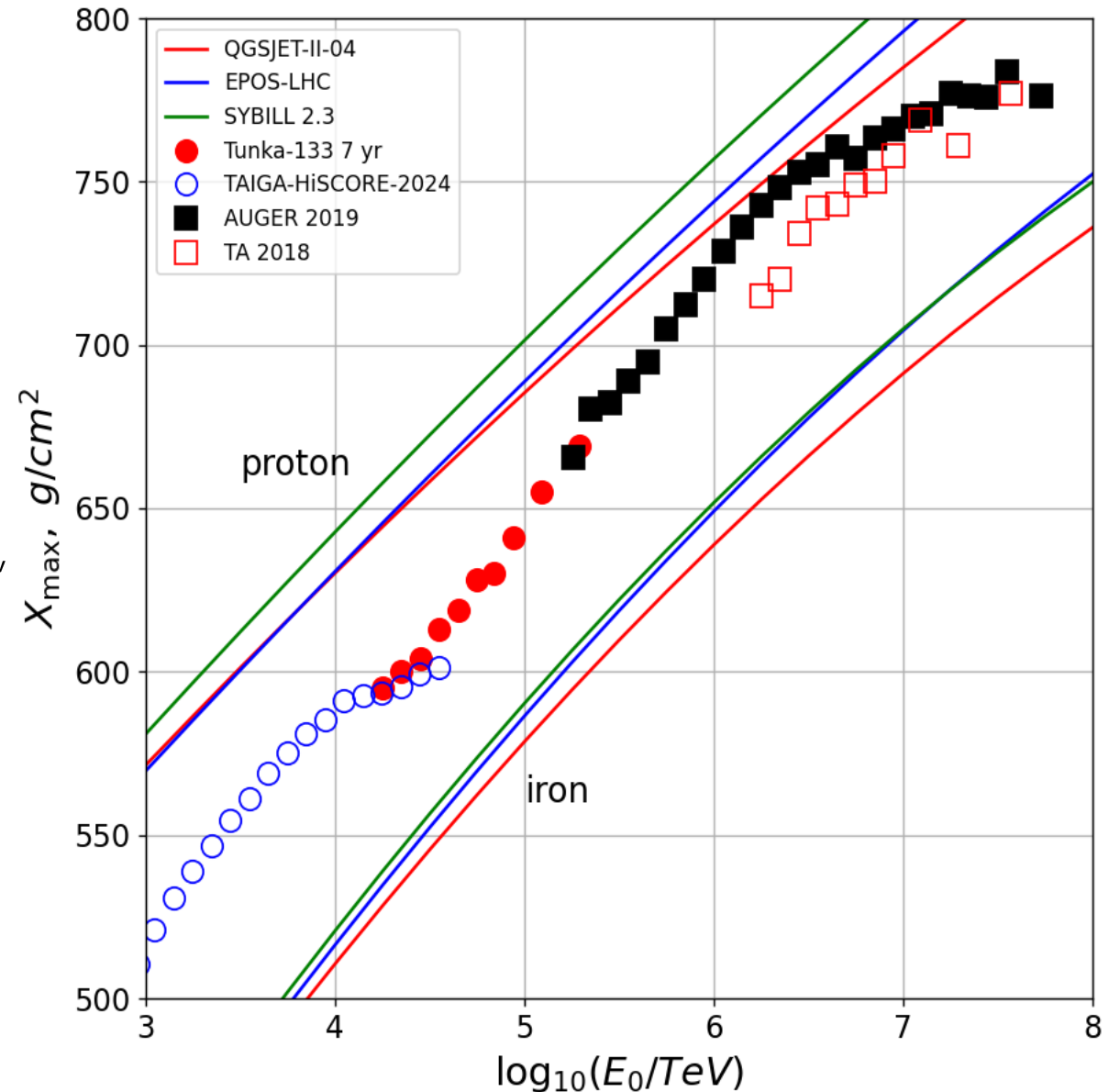
Экспериментальная зависимость X_{\max} от первичной энергии

- **Tunka-133:**

- 7 лет наблюдений, 2010-2017,
- Зенитные углы $\theta \leq 30^\circ$,
- Эффективная площадь 0.64 км^2 ,
- Первичные энергии ливней $\geq 10^{16}$ эВ,
- 69,000 событий.

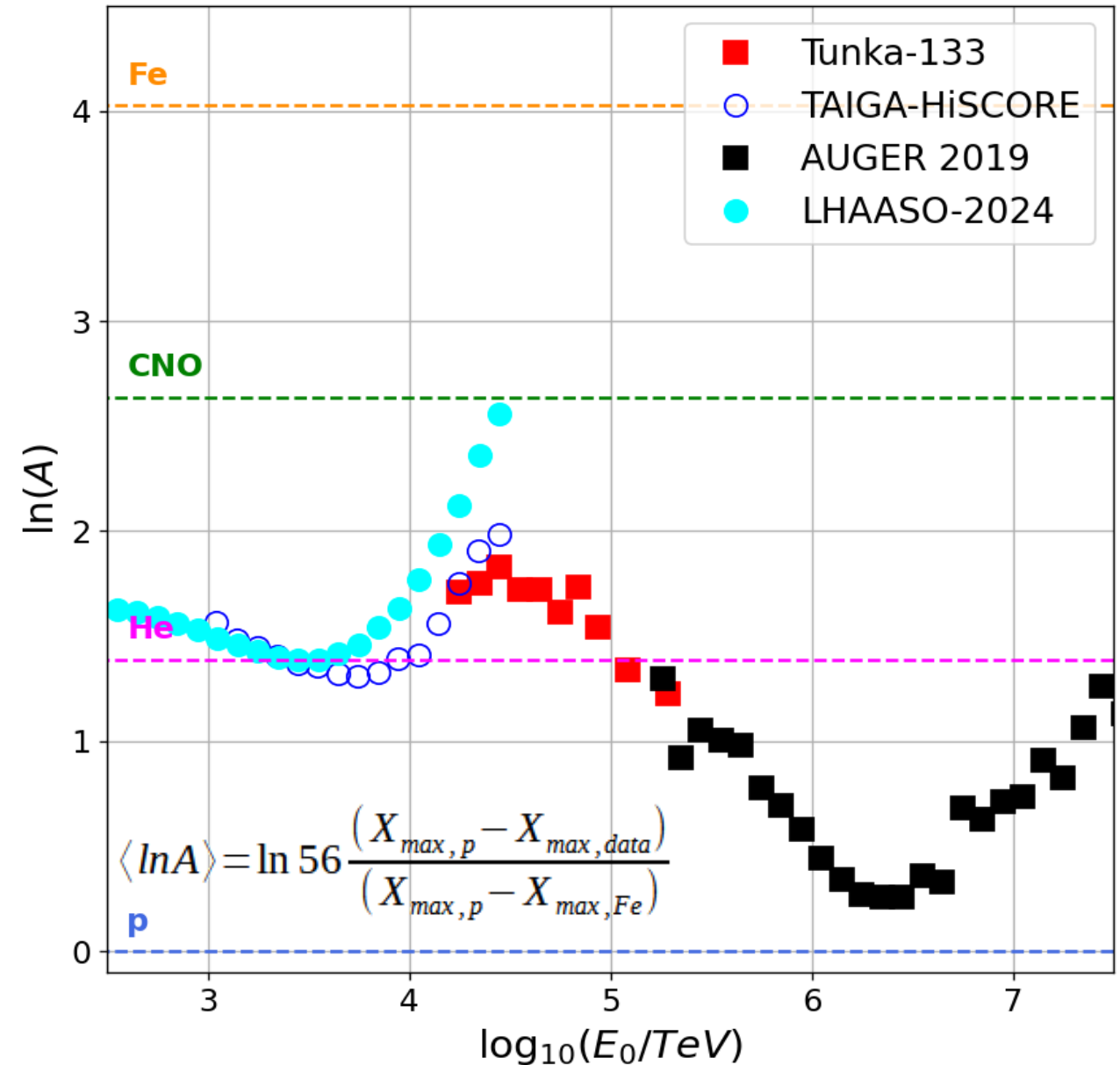
- **TAIGA-HiSCORE:**

- 70 ясных безлунных ночей (2023-2024),
- 4 кластера (114 станций),
- Зенитные углы $\theta \leq 30^\circ$,
- Эффективная площадь 1 км^2 ,
- Первичные энергии ливней $\geq 10^{15}$ эВ,
- 1,980,000 событий,
- Инструментальные ограничения на энергиях выше $3 \cdot 10^{16}$ эВ.

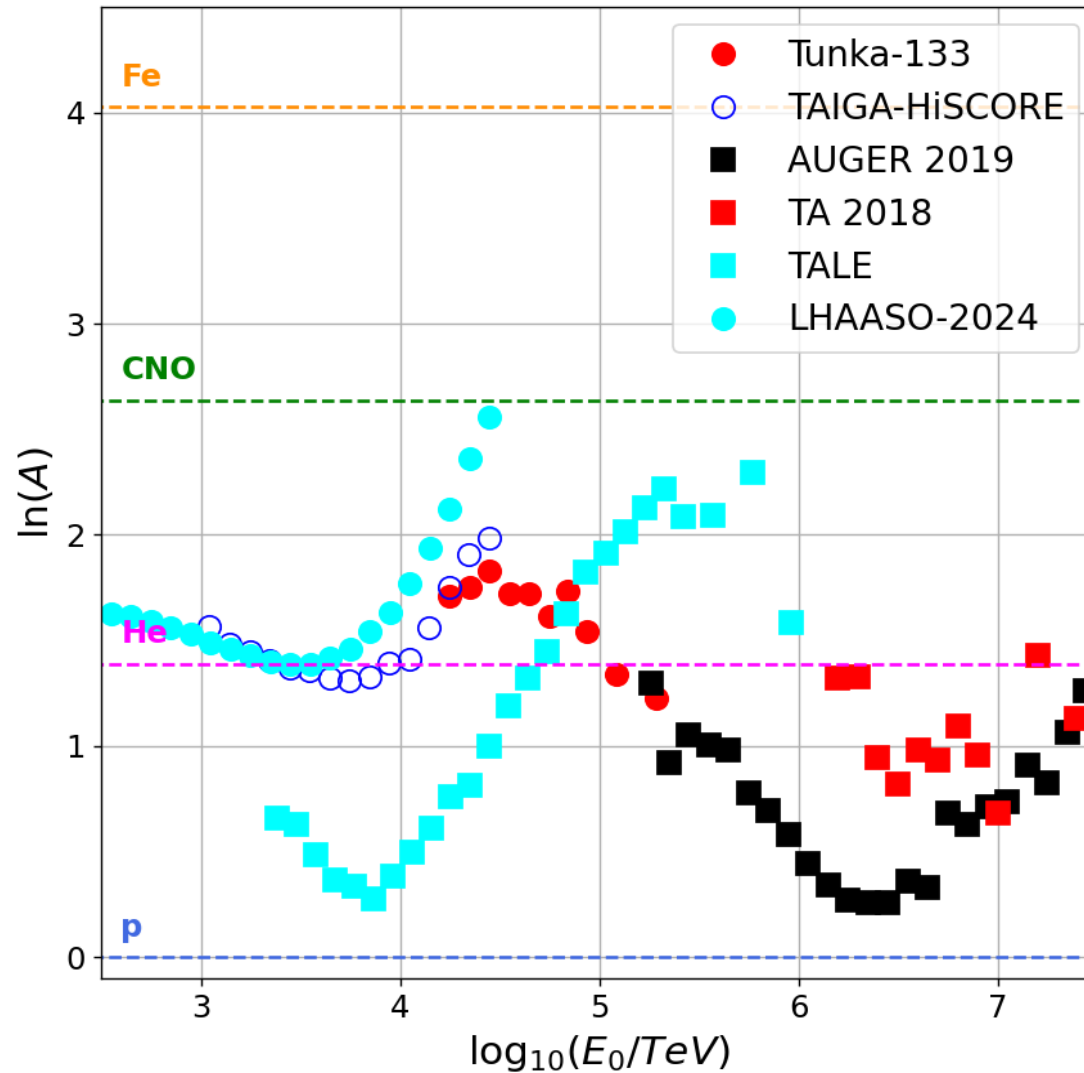


Средний массовый состав $\langle \ln A \rangle$ от первичной энергии

- Существует прямая зависимость $\langle \ln A \rangle \sim \langle X_{\max} \rangle$ (по линейной интерполяции).
- Для расчета $\langle \ln A \rangle$ использовалась модель QGSJet-II-04. Во всем диапазоне энергий наблюдается несколько более легкий состав (p + He).
- Поведение вблизи «колена» совпадает с результатами эксперимента LHAASO, несмотря на различие в методологии (Черенковское излучение/заряженные частицы).



Дополнительные данные $\langle \ln A \rangle$ с ТА и TALE



Определение глубины максимума ливня

- **Анодный канал:**

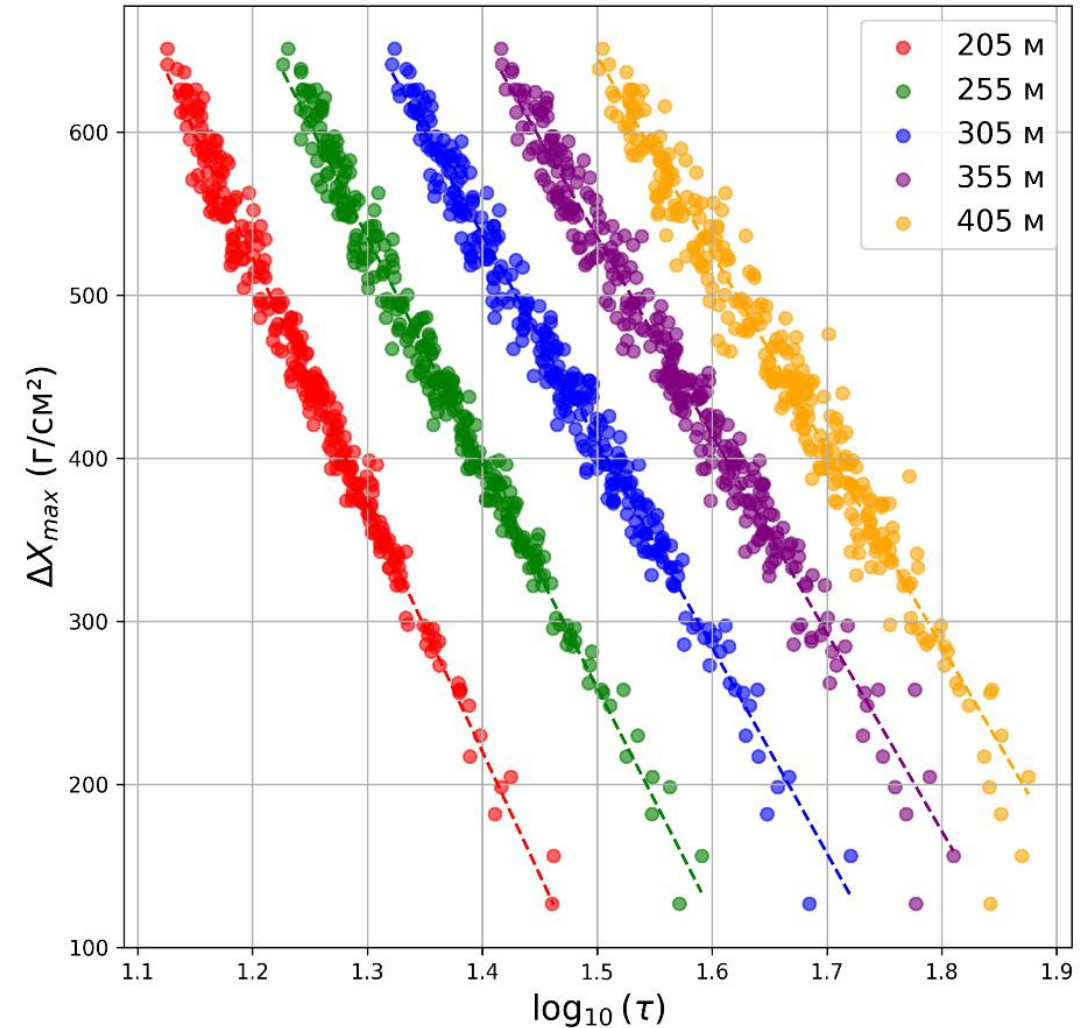
- 205 м: $\Delta X_{max} = -1514.9 \cdot \log \tau + 2341.2$,
 $\sigma = \pm 13.46 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.983$

- 255 м: $\Delta X_{max} = -1382.0 \cdot \log \tau + 2332.3$,
 $\sigma = \pm 13.82 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.982$

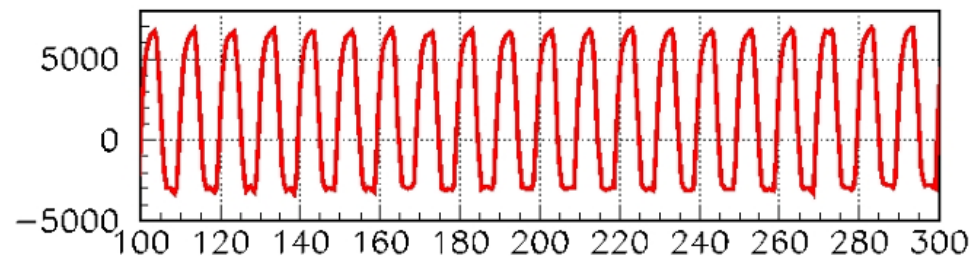
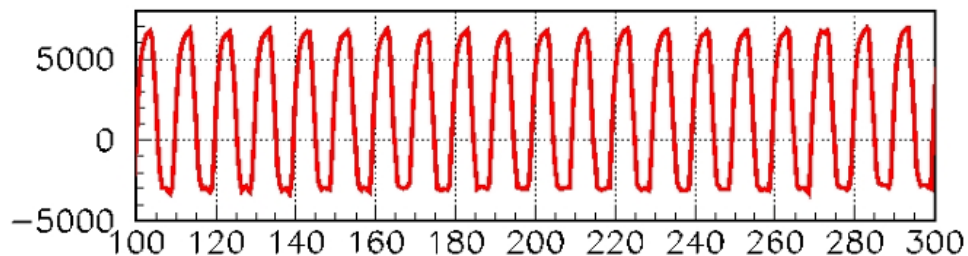
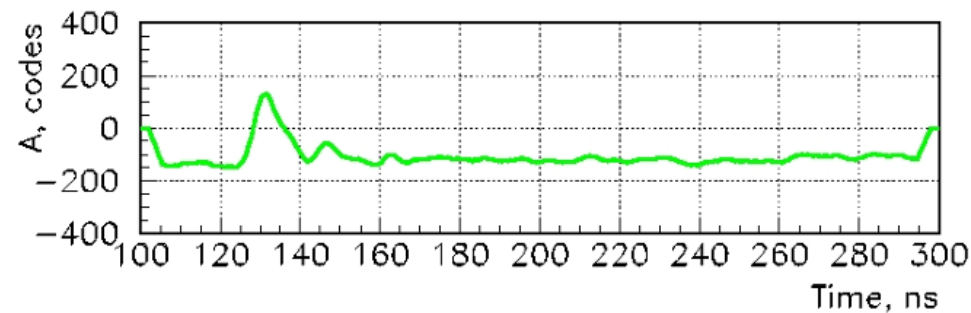
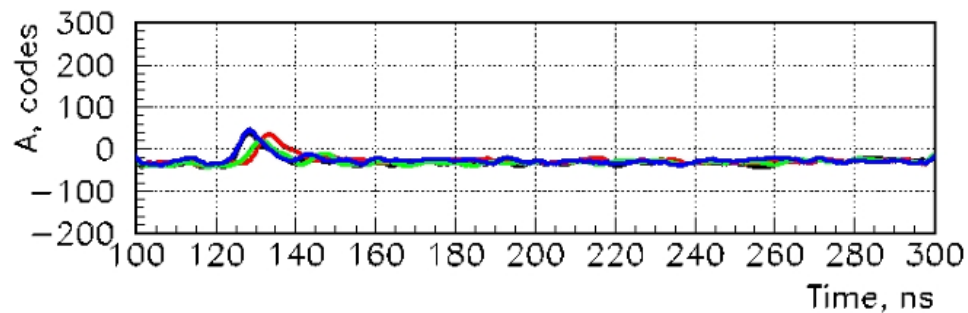
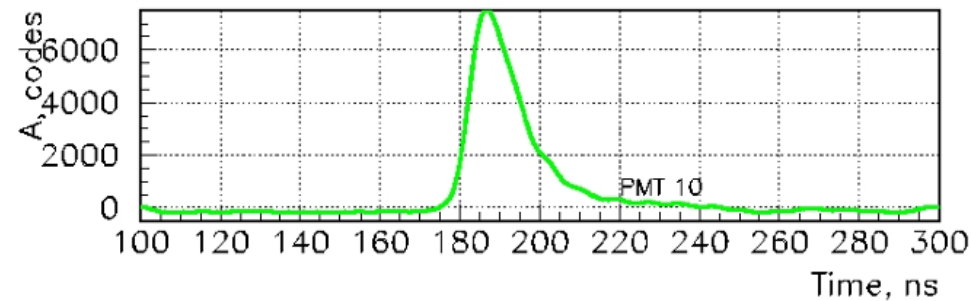
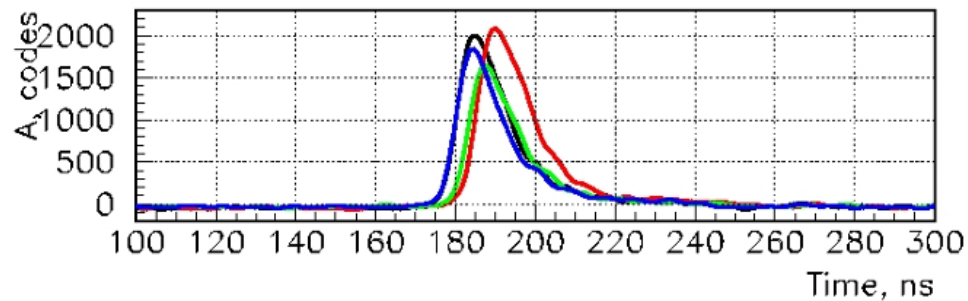
- 305 м: $\Delta X_{max} = -1265.2 \cdot \log \tau + 2308.6$,
 $\sigma = \pm 15.02 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.979$

- 355 м: $\Delta X_{max} = -1214.8 \cdot \log \tau + 2357.9$,
 $\sigma = \pm 17.25 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.972$

- 405 м: $\Delta X_{max} = -1205.2 \cdot \log \tau + 2454.3$,
 $\sigma = \pm 19.86 \text{ г/см}^2$, $R^2 = 0.963$



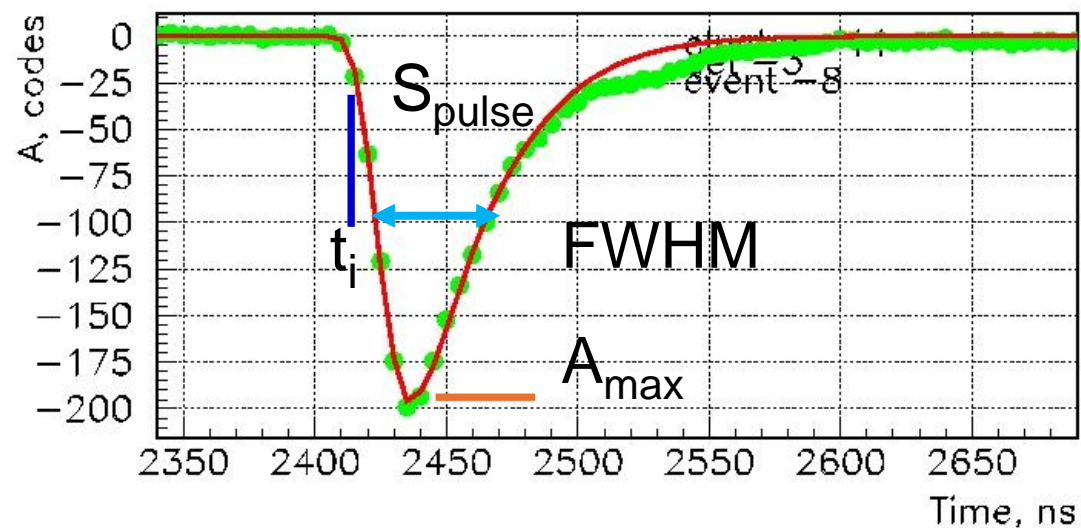
Характеристика аппаратуры



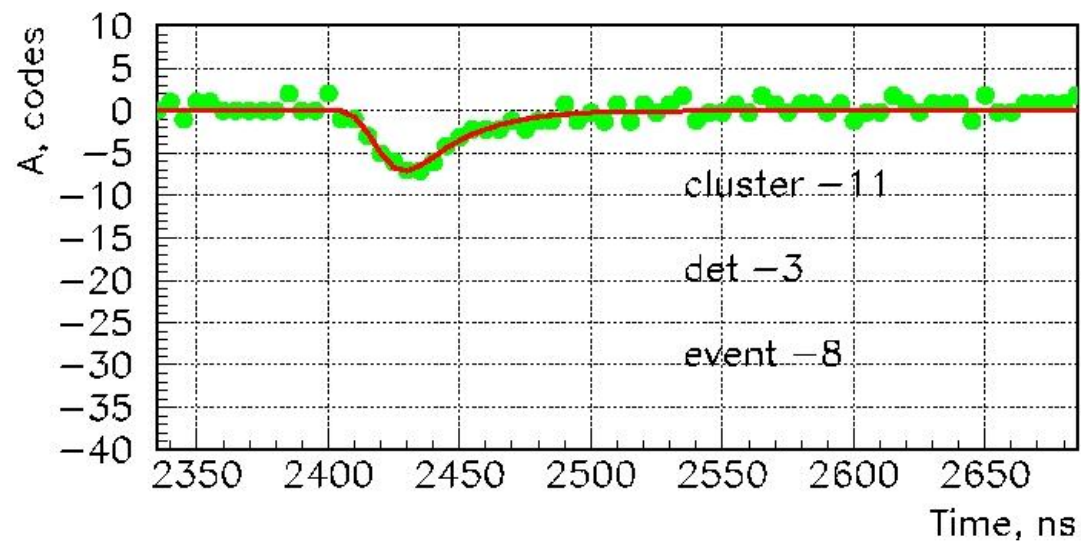
- Сигналы от четырёх ФЭУ на одной станции суммируются для получения результирующего импульса. Аппаратура (ФЭУ + предусилитель) искажает импульс.

Пример записи импульса (при шаге 5 нс)

anode:

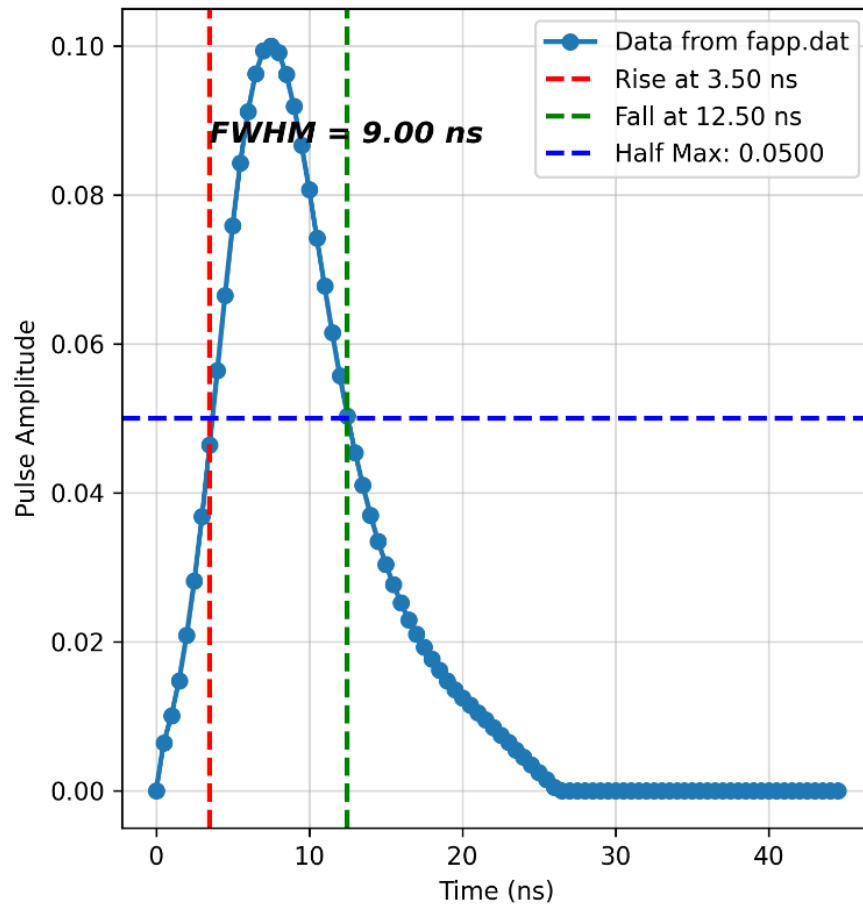


dynode:

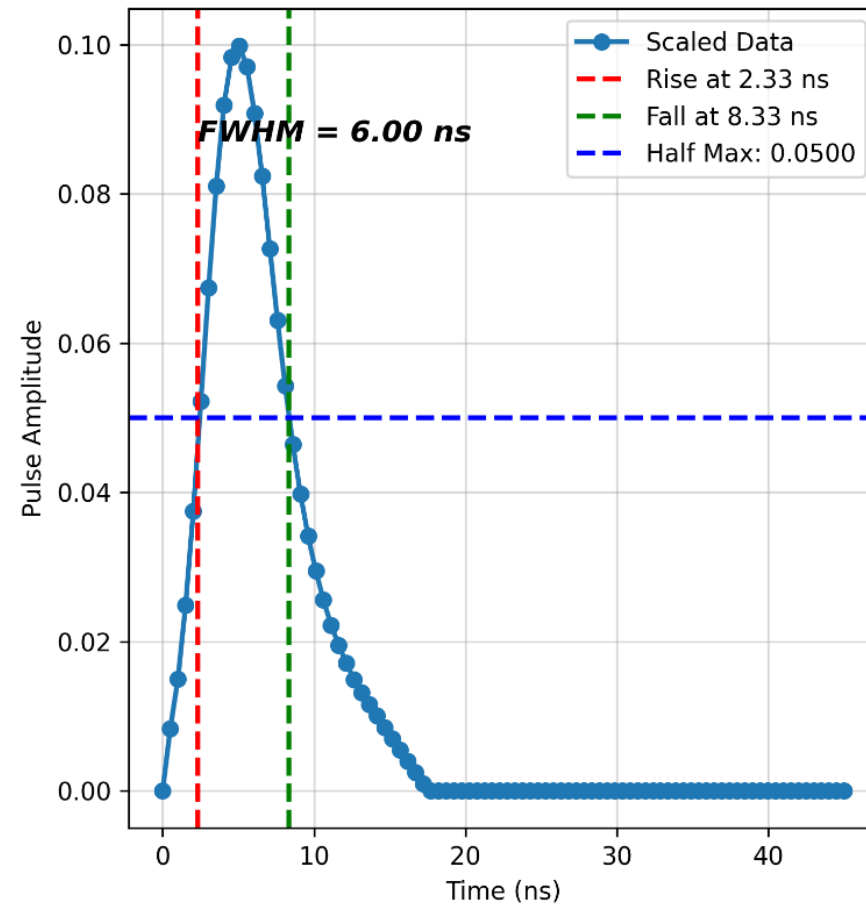


Аппаратурная функция

anode:



dynode:



- Самый короткий импульс в одной из станций (здесь нормализованная форма).