Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г.Шафера СО РАН
(ИКФИА СО РАН)

ФИЦ Якутский научный центр СО РАН

https://yakutsk-array.ru/

Якутская комплексная установка Широких Атмосферных Ливней.

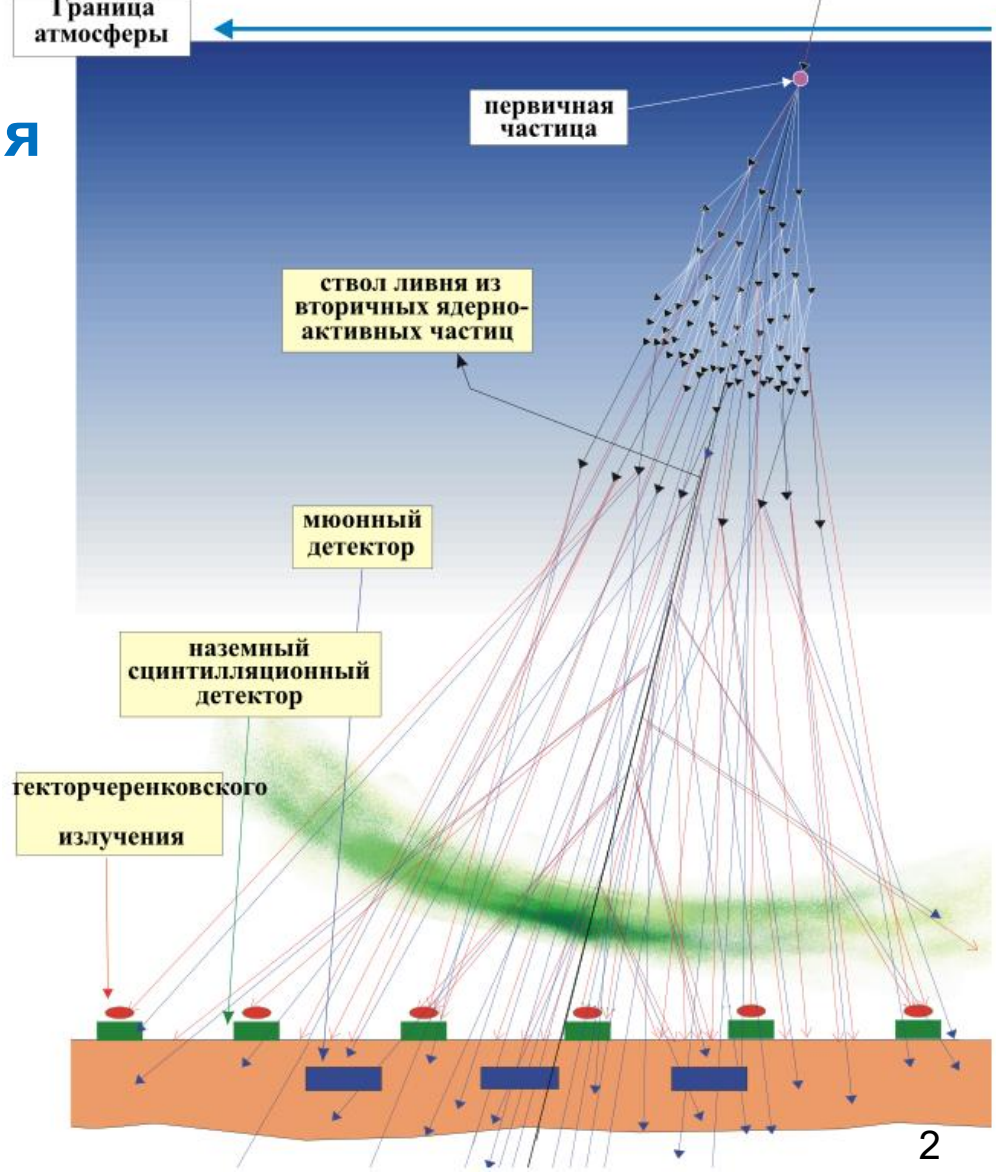
Текущее состояние и перспективы.

Леонид КСЕНОФОНТОВ

39 Всероссийская конференция по космическим лучам, 29 июня – 3 июля 2026 г., Дубна

Назначение и область применения Якутской установки ШАЛ

- Установка предназначена для исследования космического излучения сверхвысоких энергий, достигающего атмосферы Земли. Изучаются развитие каскадных процессов в атмосфере Земли, а также характеристики первичного излучения: интенсивность, энергетический спектр, состав, источники.



Якутская комплексная установка ШАЛ - это стационарный исследовательский полигон Института космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, ФИЦ ЯНЦ СО РАН

Установка создана ИКФИА СО РАН при активном участии Физического института академии наук СССР (ФИАН) и Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) Московского государственного университета им. Ломоносова.

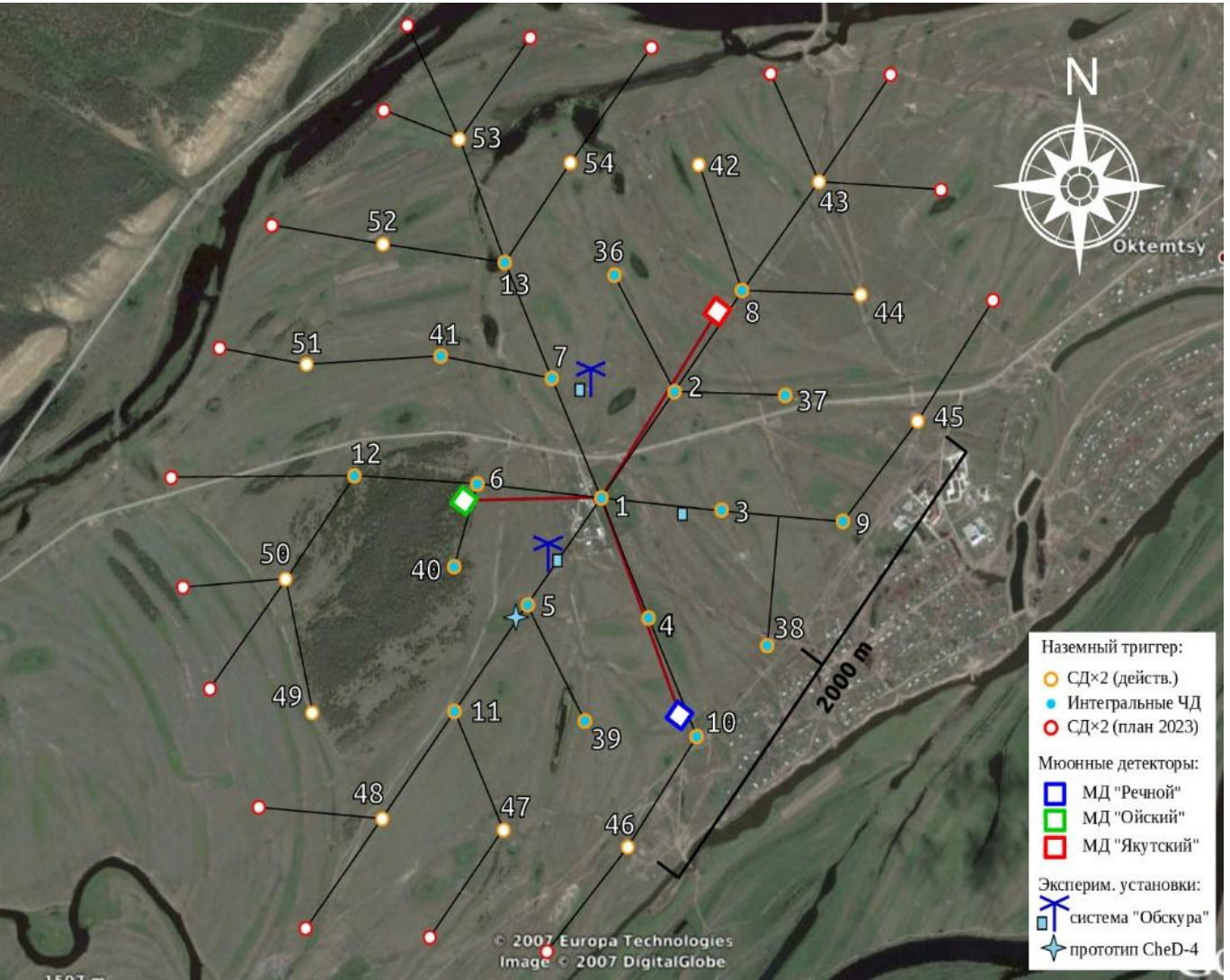
В декабре 1970 года началась непрерывная регистрация на центральной части установки. Более 55 лет на Якутской установке поддерживается непрерывная работа.

По результатам работы Якутской установки защищено 8 докторских и 22 кандидатских диссертаций.

Опубликовано 345 статей в рецензируемых журналах и 248 в трудах международных и всероссийских конференций.

Полученные результаты были неоднократно отмечены в качестве важнейших в Сибирском отделении РАН и в РАН.

Основные параметры установки



Общая площадь размещения детекторов 1973-1991 – 18 кв. км.; 1991-2010 – 12 кв. км; с 2010 — по настоящее время – 4.8 км^2

Порог по энергии основного триггера - $5 \cdot 10^{16}$ эВ

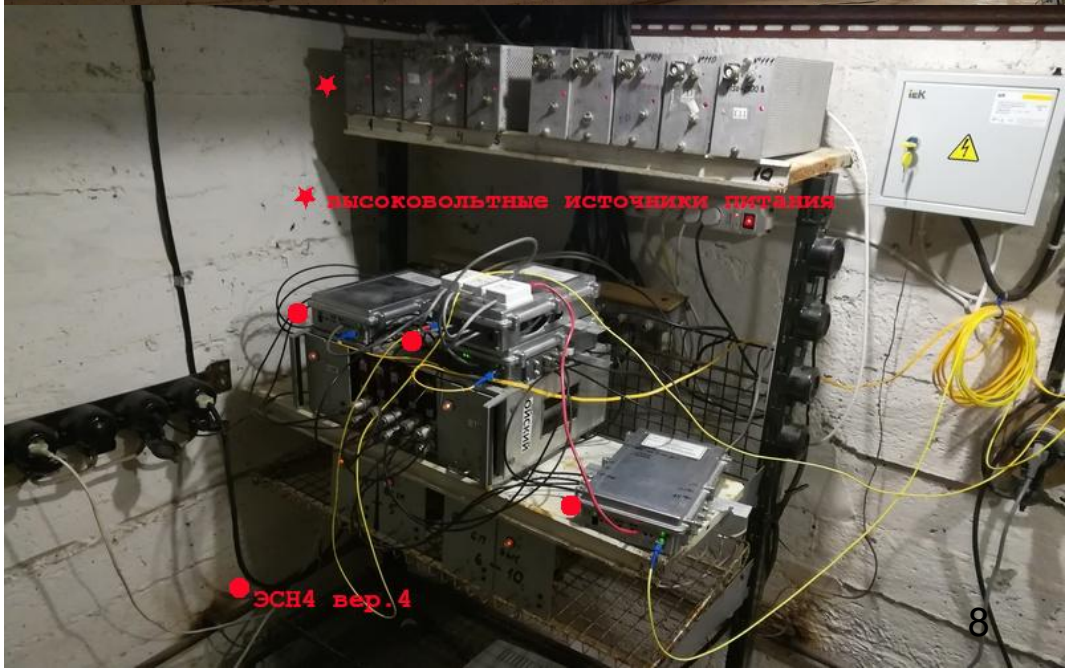
Динамический диапазон измерения плотности частиц – 10^4

Точность измерения времени прихода частиц ливня - 10 нс

59 наземных станций наблюдения.

Мюонные детекторы

3 подземных пункта для регистрации мюонов с энергией выше 1 ГэВ, суммарная площадь детекторов 20 м^2 в каждом пункте



19 станций наблюдения оснащены интегральными черенковскими детекторами

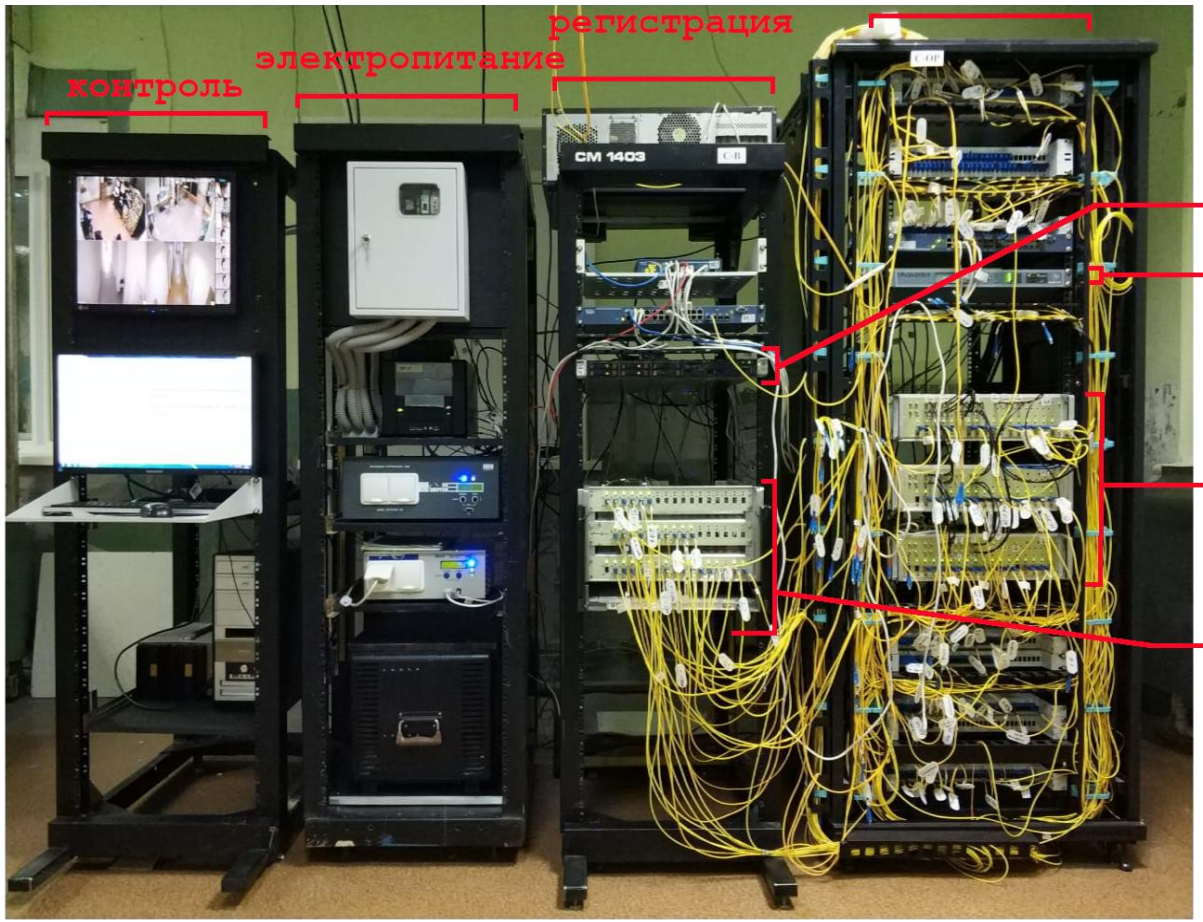
Антенна регистрации радиоизлучения ШАЛ

Быстрый интегральный детектор черенковского излучения ШАЛ

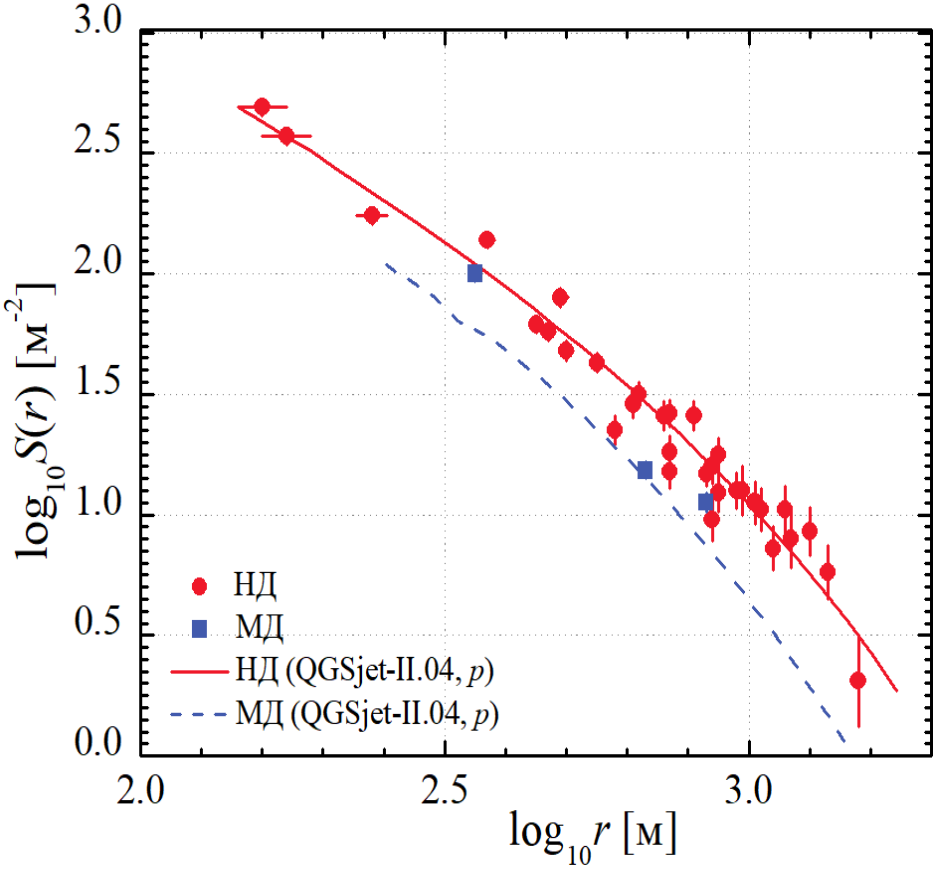
3 пункта дифференциальных детекторов черенковского излучения

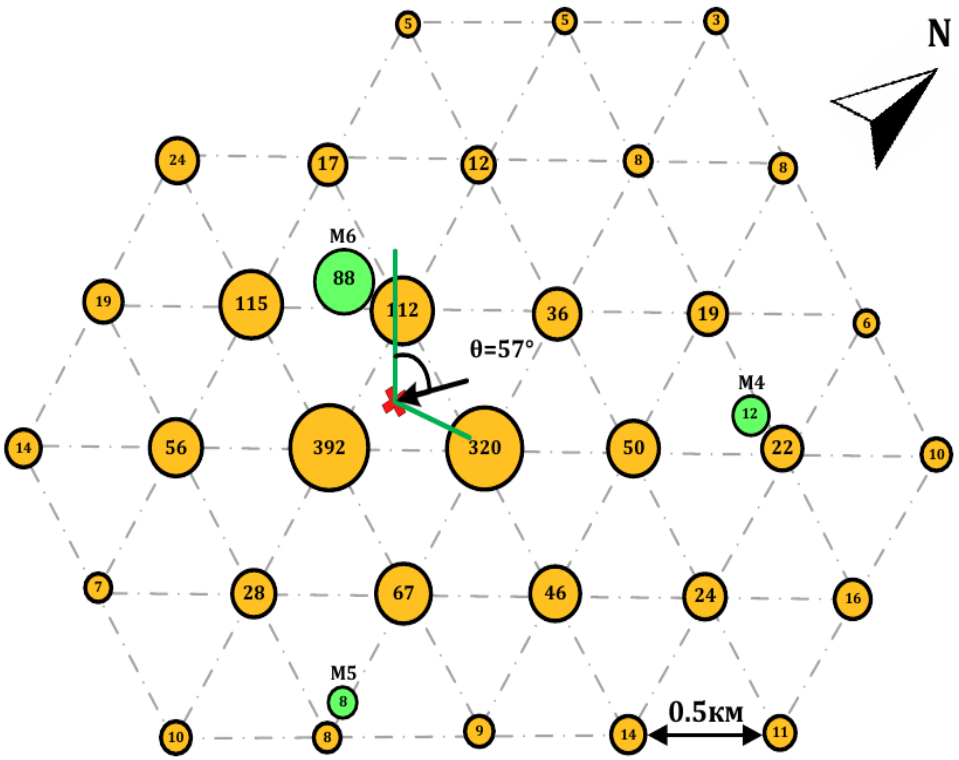
Центральный регистратор. Версия 4. В качестве синхронизатора времени работает с 2020 г., Полный запуск в 2023 г.

Переход на новую систему регистрации повысил временное разрешение до 10 нс, что позволяет повысить точность определения углов прихода ПКИ – не менее чем в 5 раз



сезон#58 номер #53159 02.04.2024 14:11:17 (ЯКТ); E_0 = 6.61x10^{19} эВ; cosθ=0.5047 ось:(-192; 53)





Общее число зарегистрированных ливней в базе данных ШАЛ с 1974 около 3.4 млн., включая более 700 ливней с энергией выше 10^{19}эВ.

Направление прихода ШАЛ определяется по задержкам срабатываний наземных детекторов.

Для локации оси используется функция пространственного распределения (ФПР) вида:

$$S(\theta, r) = S_{600}^{exp}(\theta) \left(\frac{600}{r}\right) \left(\frac{600 + r_M}{r + r_M}\right)^{b_s(\theta)-1}$$

$r_M \approx (7.5 \times 10^4/P) \times (T/273)$ - мольеровский радиус

$$b_s(\theta) = 1.38 + 2.16 \times \cos\theta + 0.15 \times \log_{10}(S_{600}^{exp}(\theta))$$

Направление прихода, координаты оси ливня и $S_{600}^{exp}(\theta)$ определяются путем минимизации соответствующих χ^2

$$E = E_1 \times S_{600}(0^\circ)^B \ \ [\mathrm{eV}] \ ,$$

$$S_{600}(0^\circ) = S_{600}^{exp}(\theta) \times \exp((\sec\theta - 1) \times 1020/\lambda) \ \ [\mathrm{m}^{-2}] \ ,$$

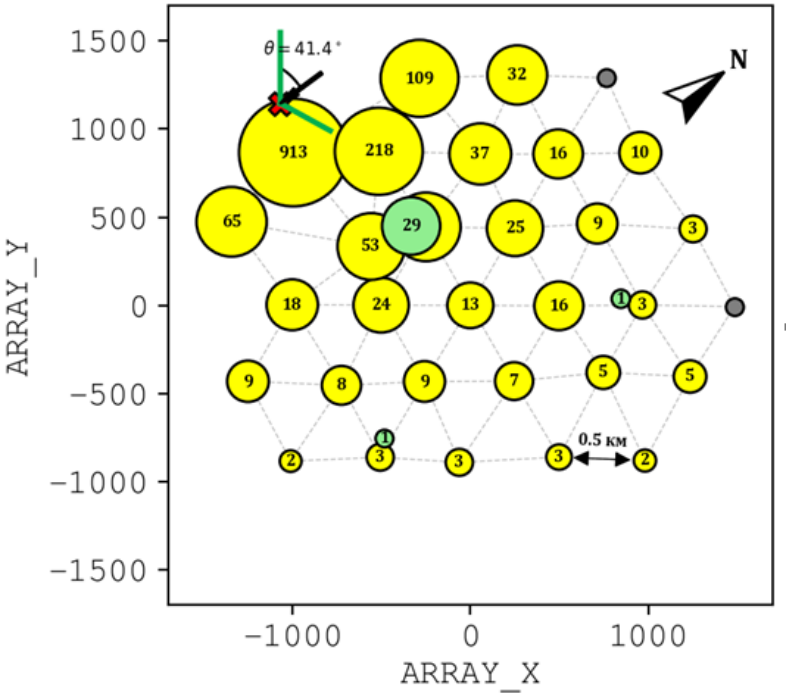
$$\lambda = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \times \log_{10}(S_{600}^{exp}(\theta)) \ \ [\mathrm{g/cm}^2] \ ,$$

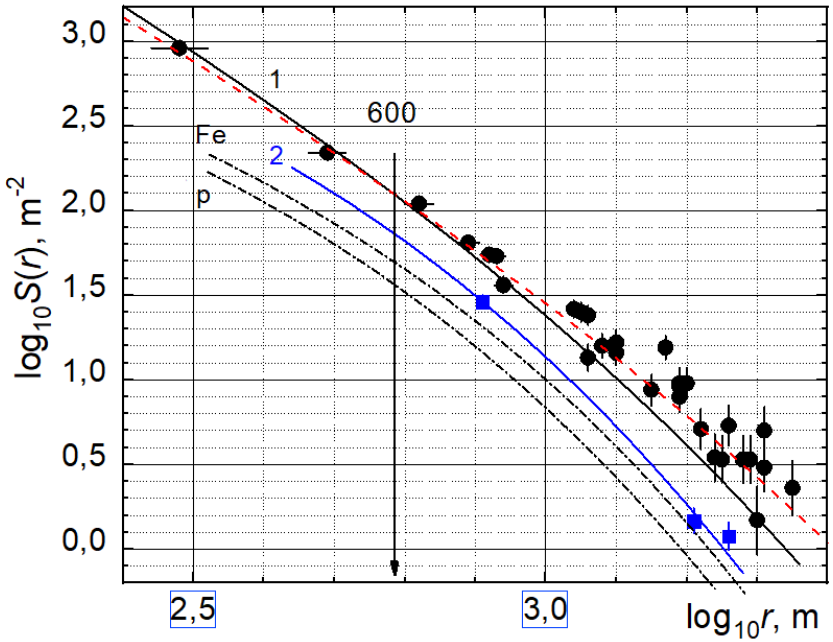
where $E_1 = (3.76 \pm 0.3) \times 10^{17}$ eV and $B = 1.02 \pm 0.02$.

Наиболее близко к модели адронных взаимодействий сверхвысоких энергий QGSjet-II.04

30 апреля 2026 г. на Якутской установке зарегистрирован новый, возможно самый мощный широкий атмосферный ливень (ШАЛ) за весь период наблюдений. Его энергия составила **1.12×10^{20} эВ**. Этот ливень содержит аномально высокую долю мюонов, указывающую на сверхтяжелый тип первичного ядра.

Глушков, Лебедев и др. постер ПКЛ-2 № 26





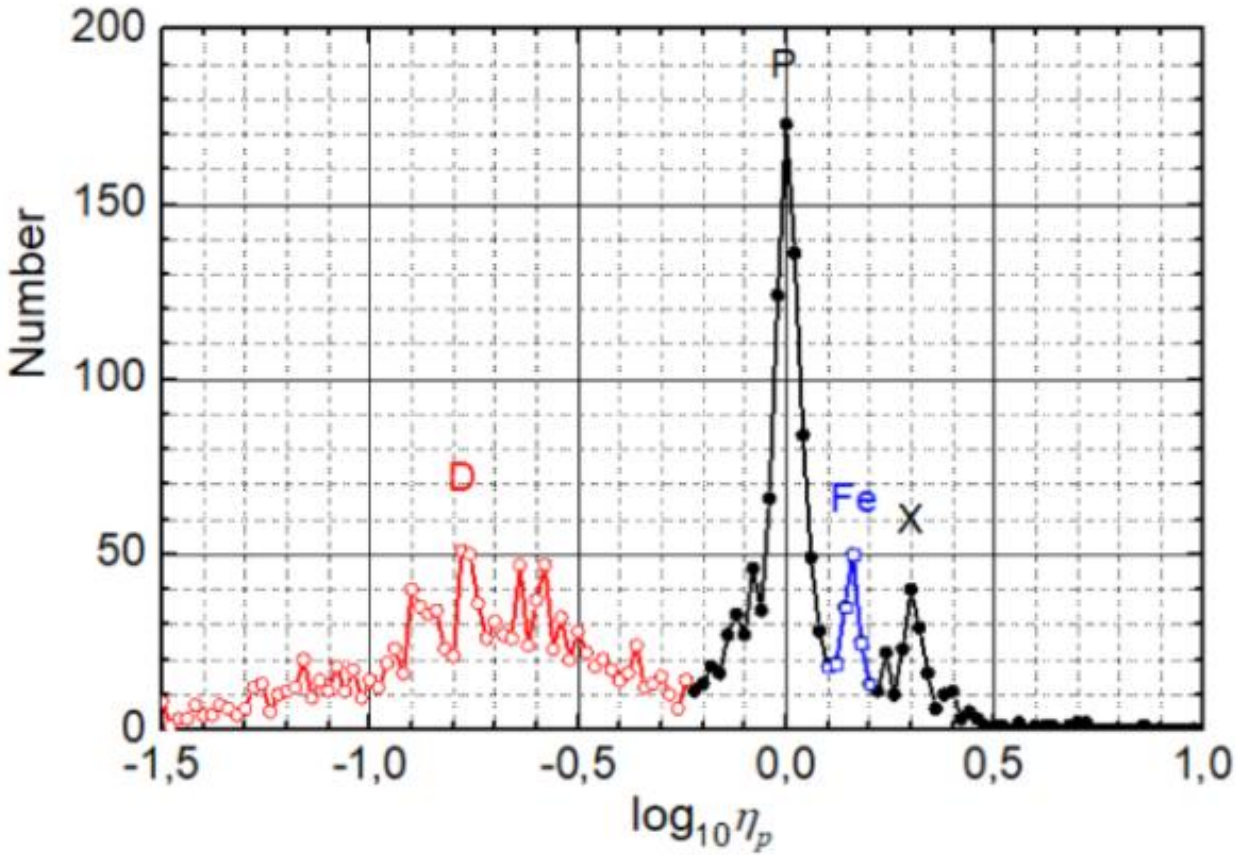
RA = 0h 44m, Dec = +52° 00’

Галактика Андромеды (M31), IC 10

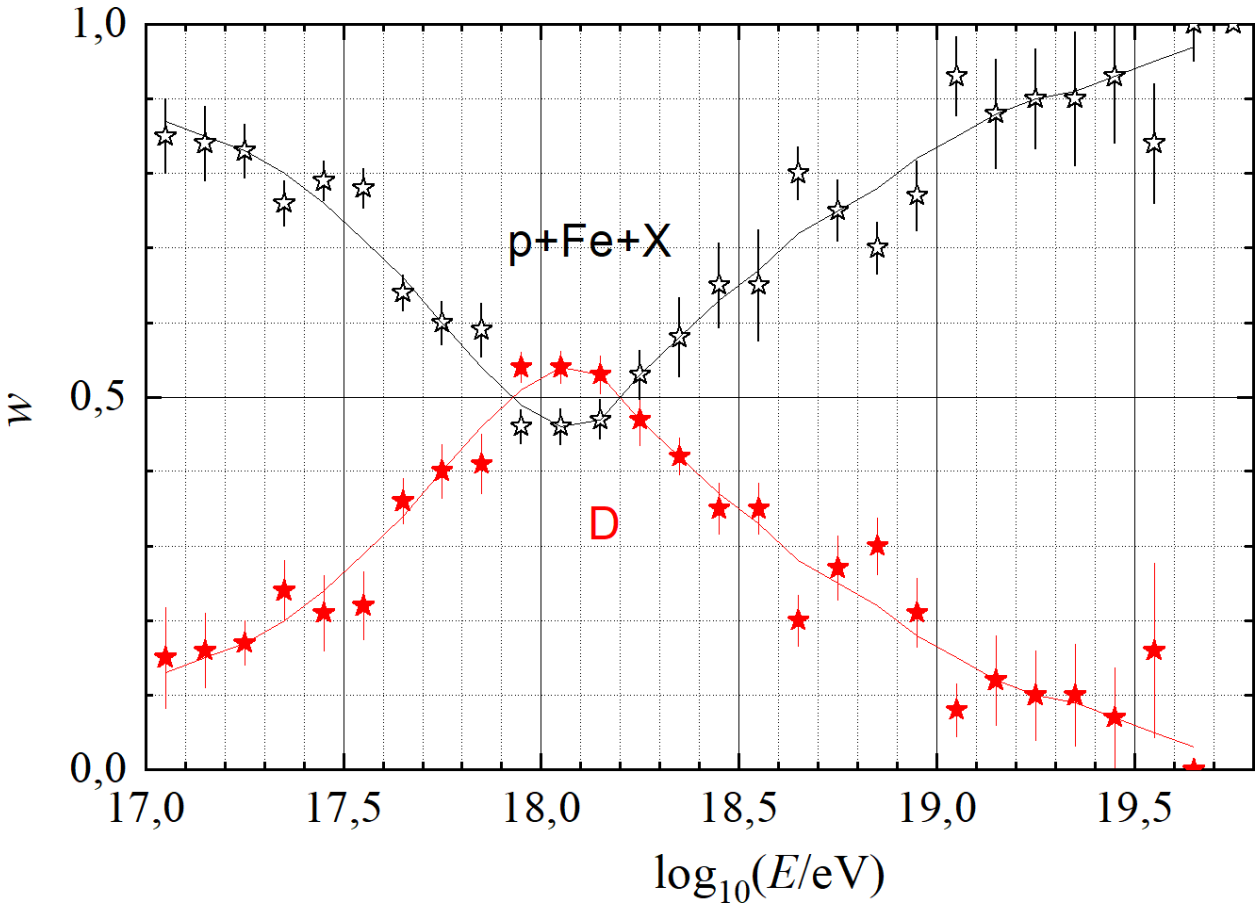
В [*А. В. Глушков, и др.. Письма в ЖЭТФ,* ***120****, 409 (2024)*] был предложен метод определения типа первичной частицы в индивидуальных событиях. В этом методе исследуется корреляционный параметр:

$$\eta = \frac{S_\mu^{exp}(E,\theta,r)}{S_\mu^{sim}(p,E,\theta,r)}$$

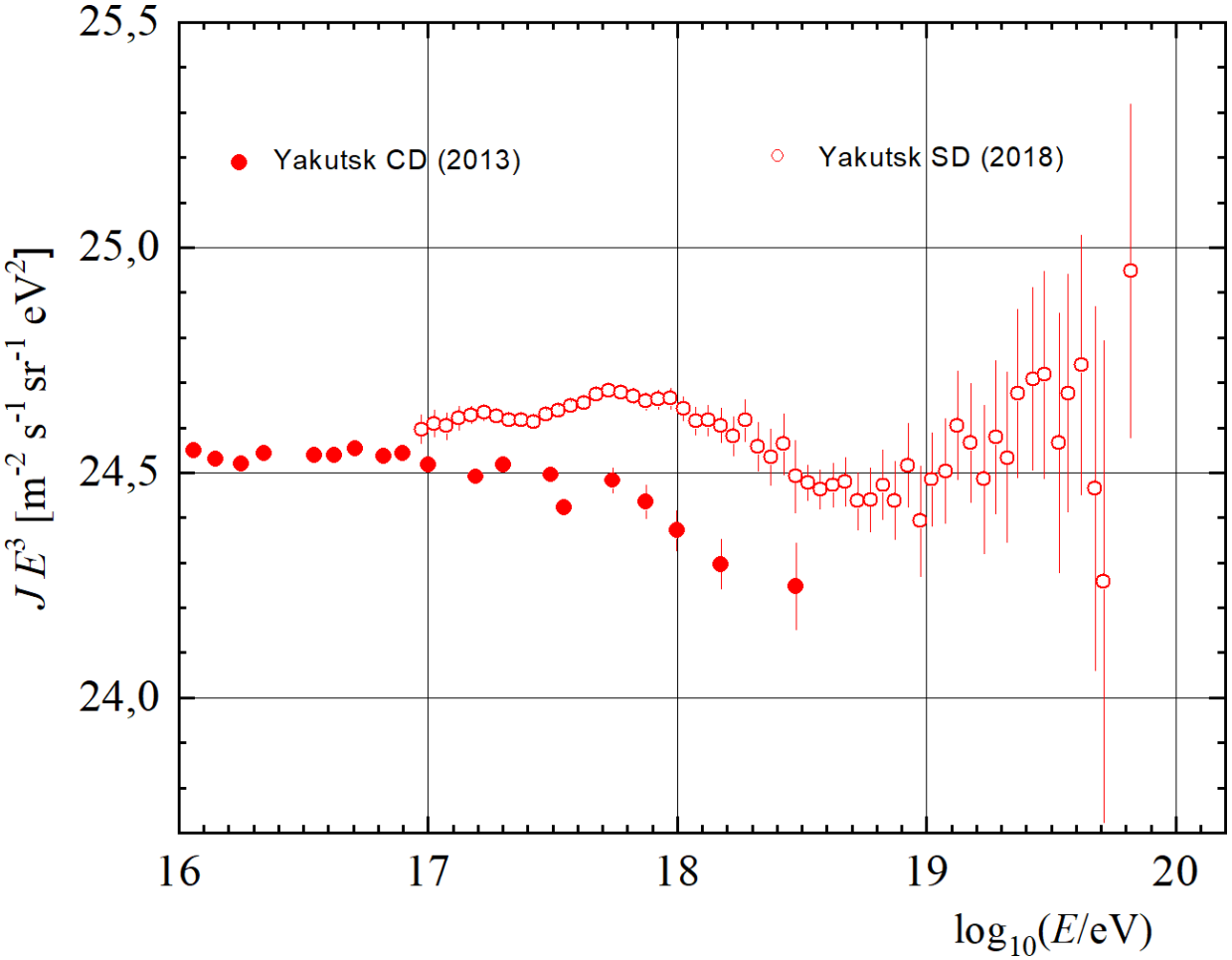
Glushkov et al. (2025, 2026)



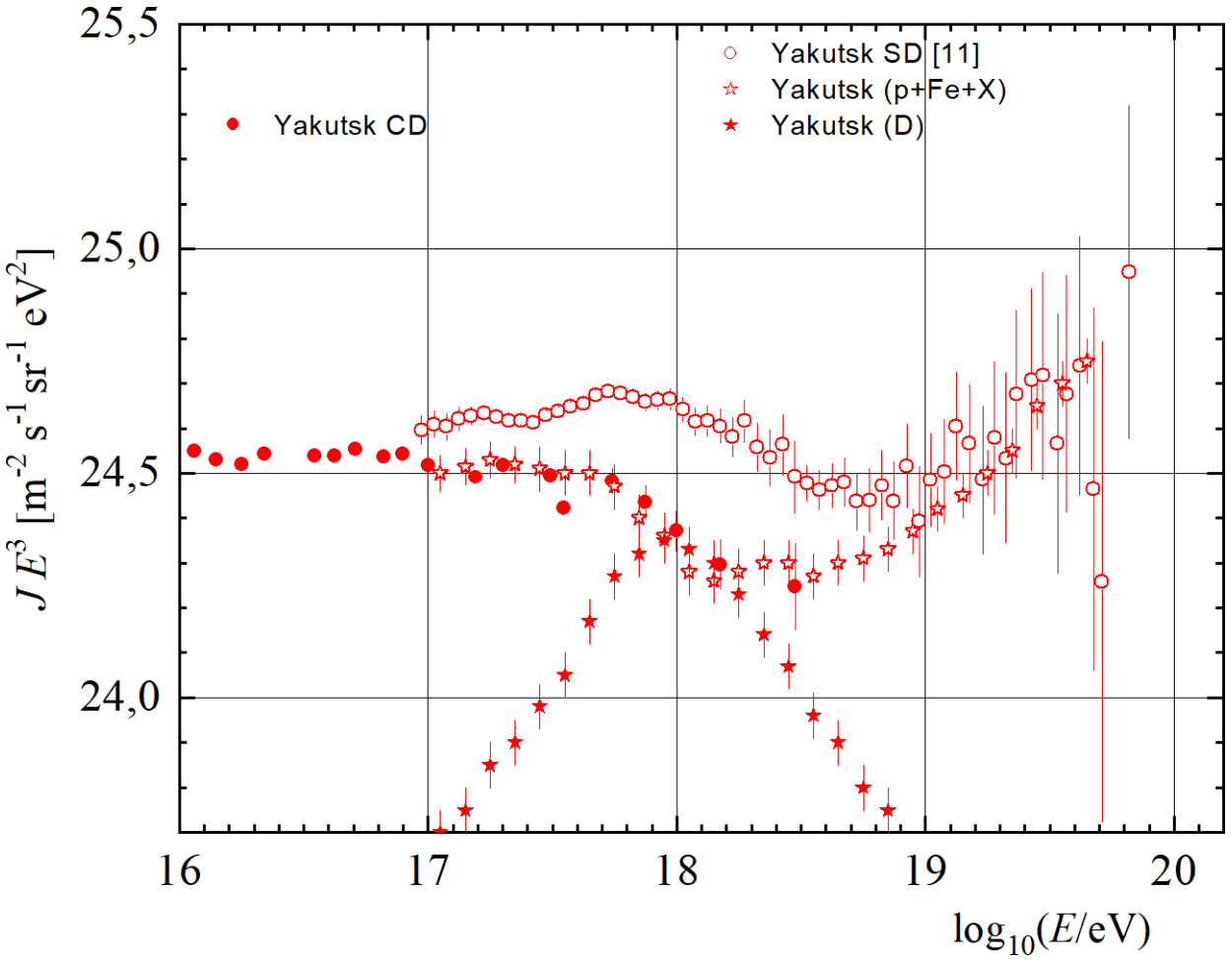
Энергетические зависимости долей различных компонент по данным Якутской установки ШАЛ



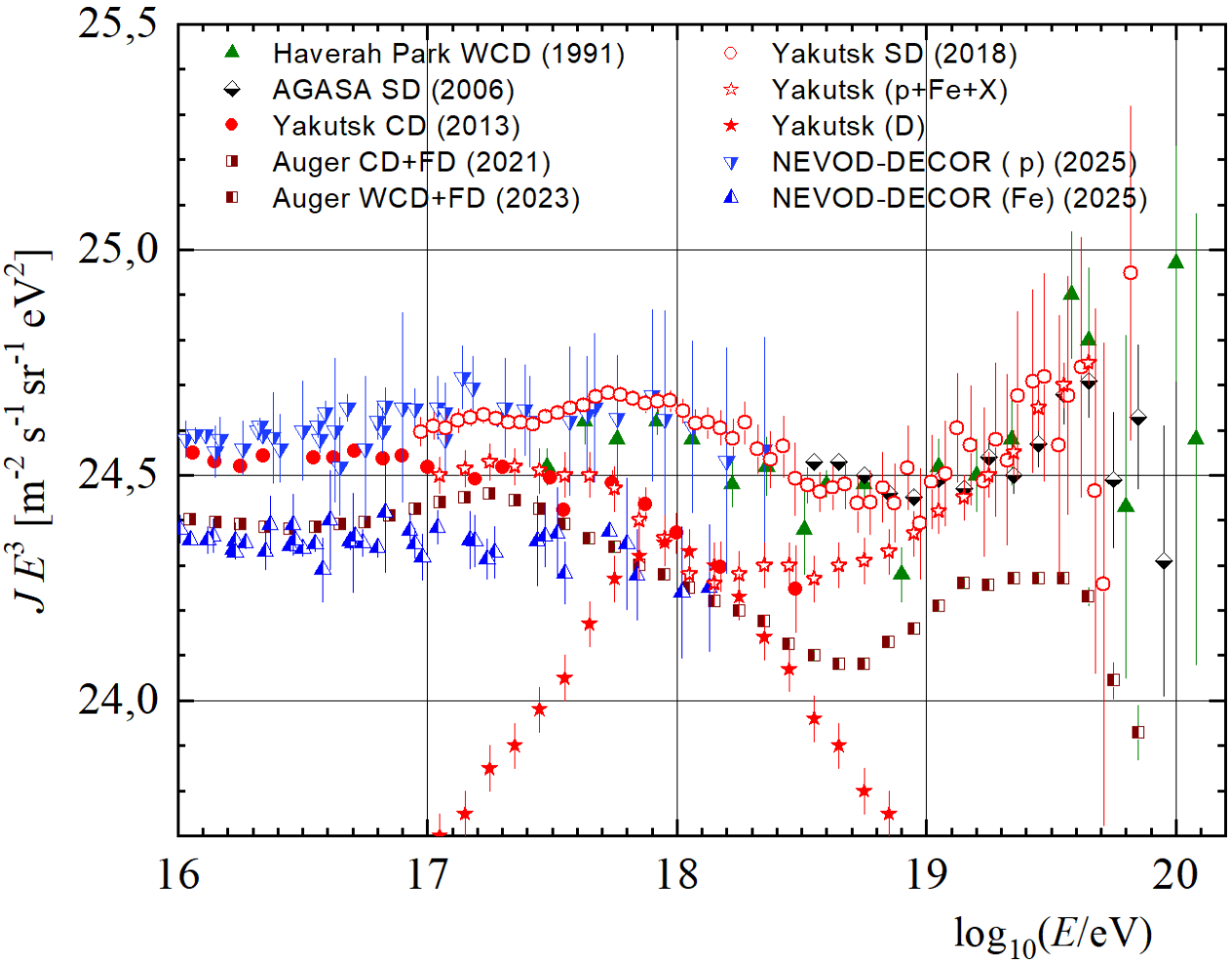
Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным Якутской установки ШАЛ



Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным Якутской установки ШАЛ



Дифференциальный энергетический спектр КЛ

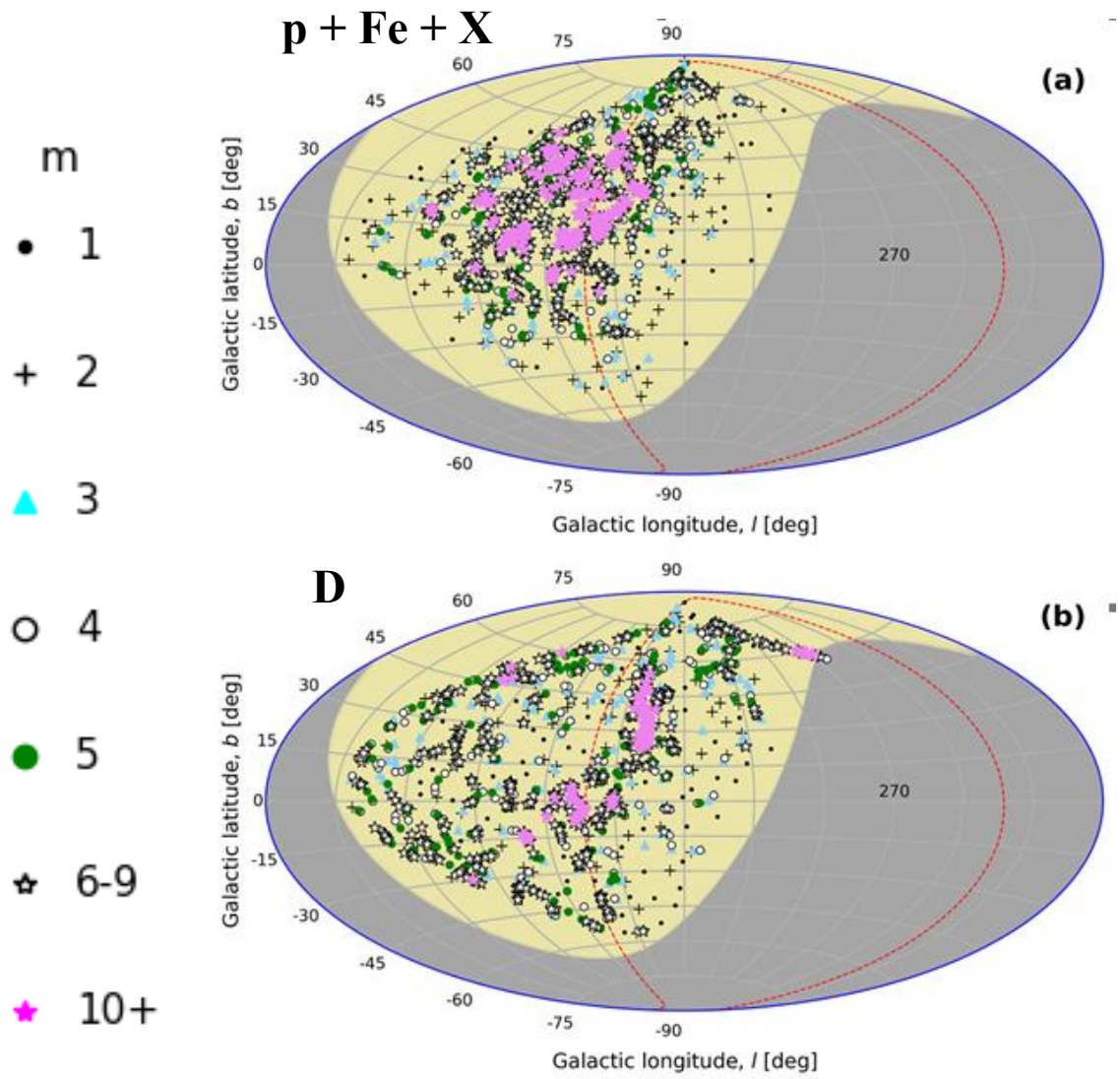


Направления прихода

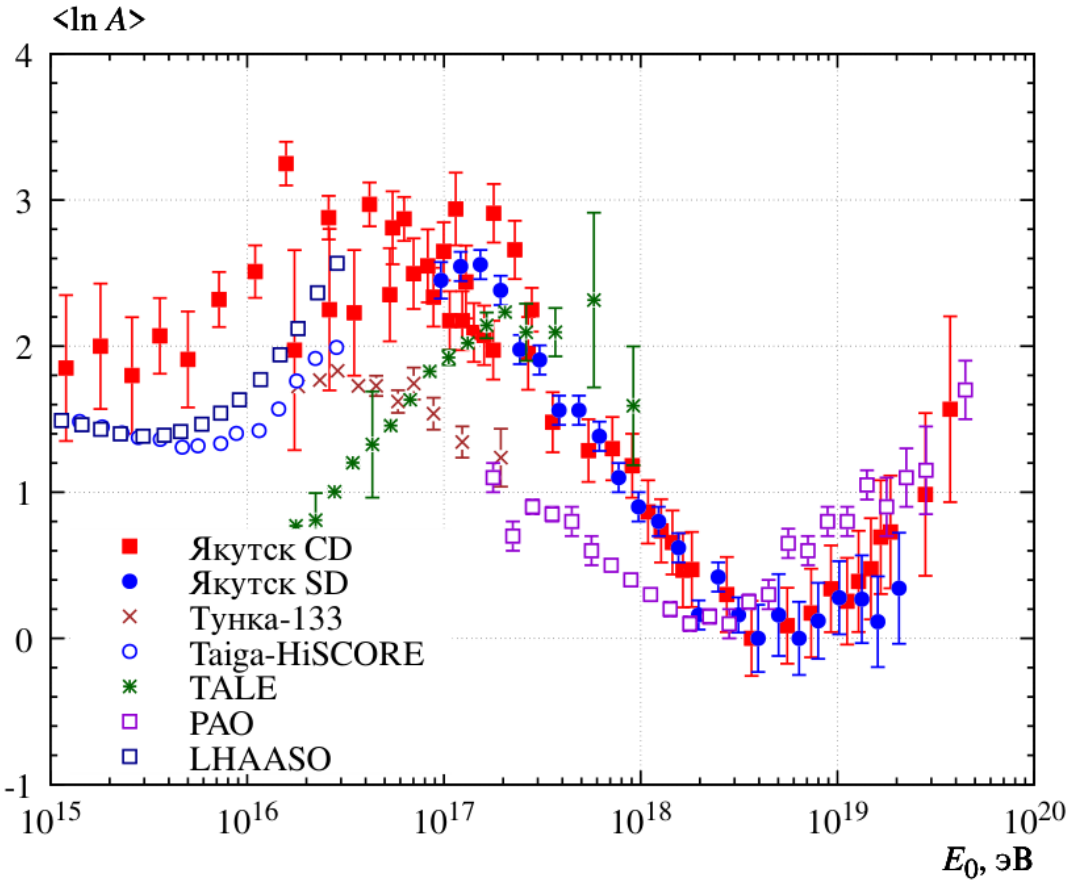
2484 событий с E = (0.8-2.0)x10^{18} эВ, $\theta \leq 60°$

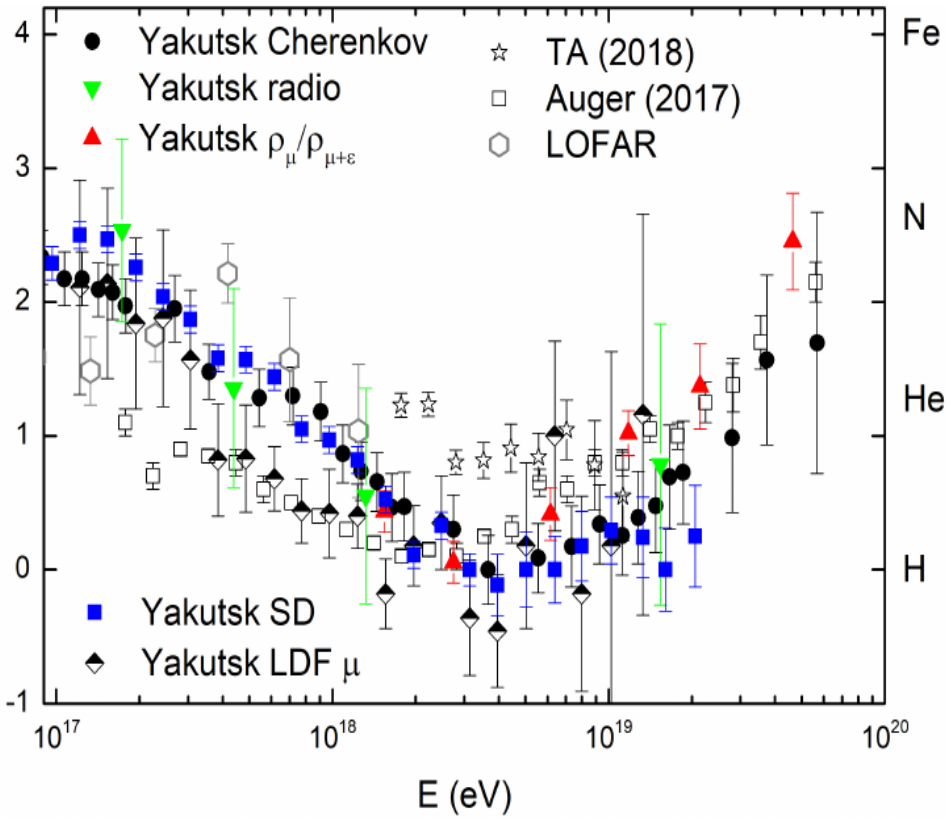
Распределение на локальные группы из m ливней в телесных углах

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\psi), \qquad \psi = 4.5°$$



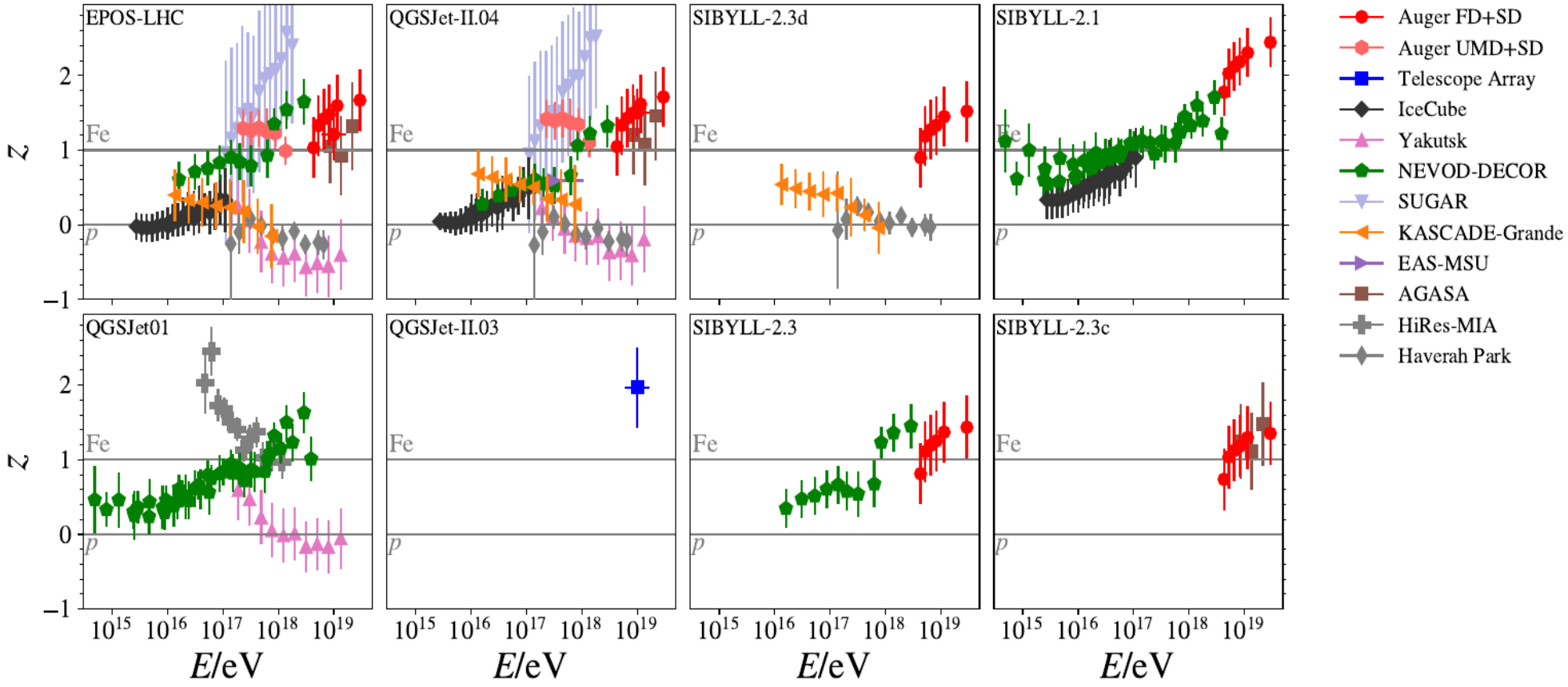
Массовый состав КЛ





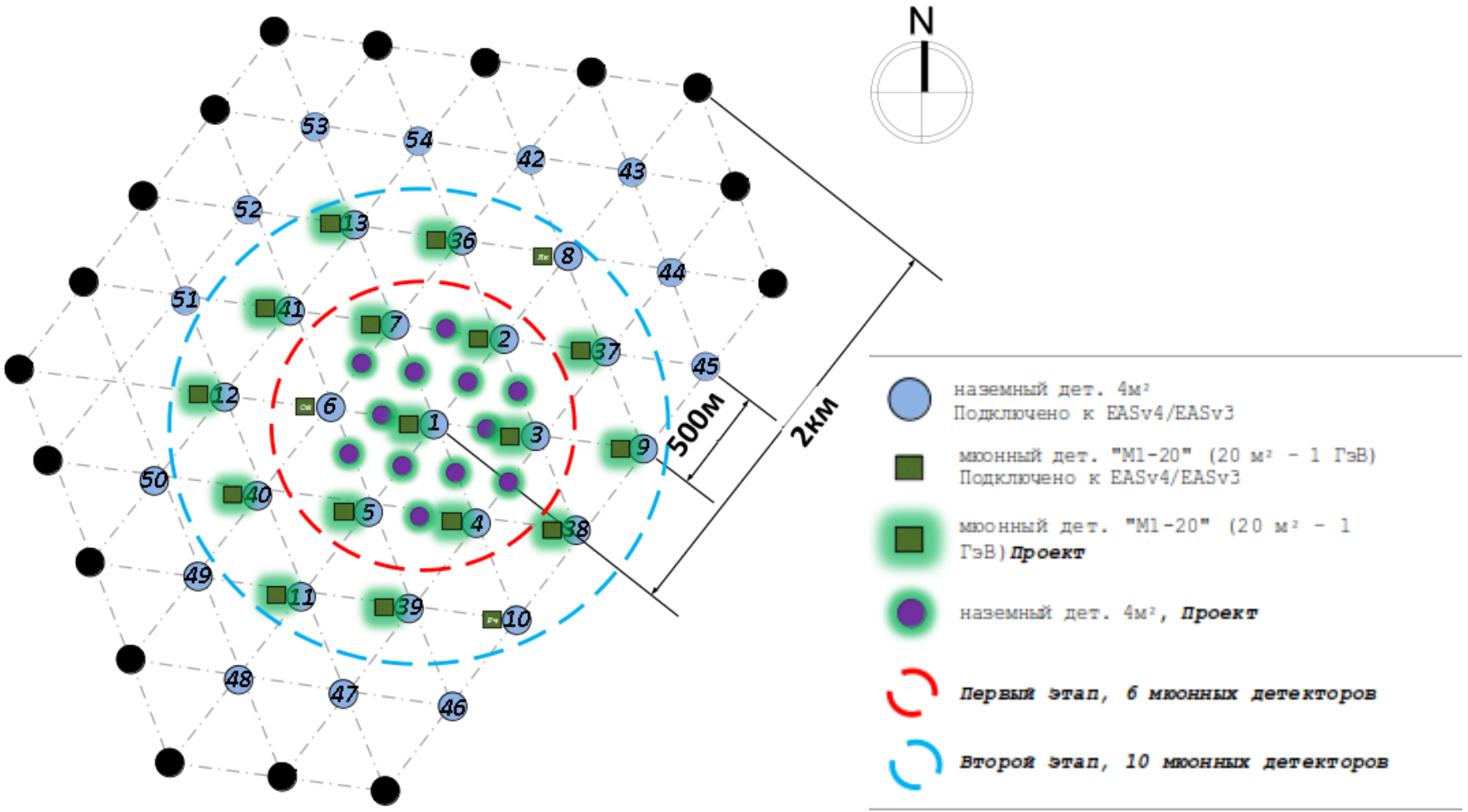
«Мюонная загадка»

$$z = \frac{\ln N_\mu^{\mathrm{exp}} - \ln N_\mu^{\mathrm{p}}}{\ln N_\mu^{\mathrm{Fe}} - \ln N_\mu^{\mathrm{p}}},$$

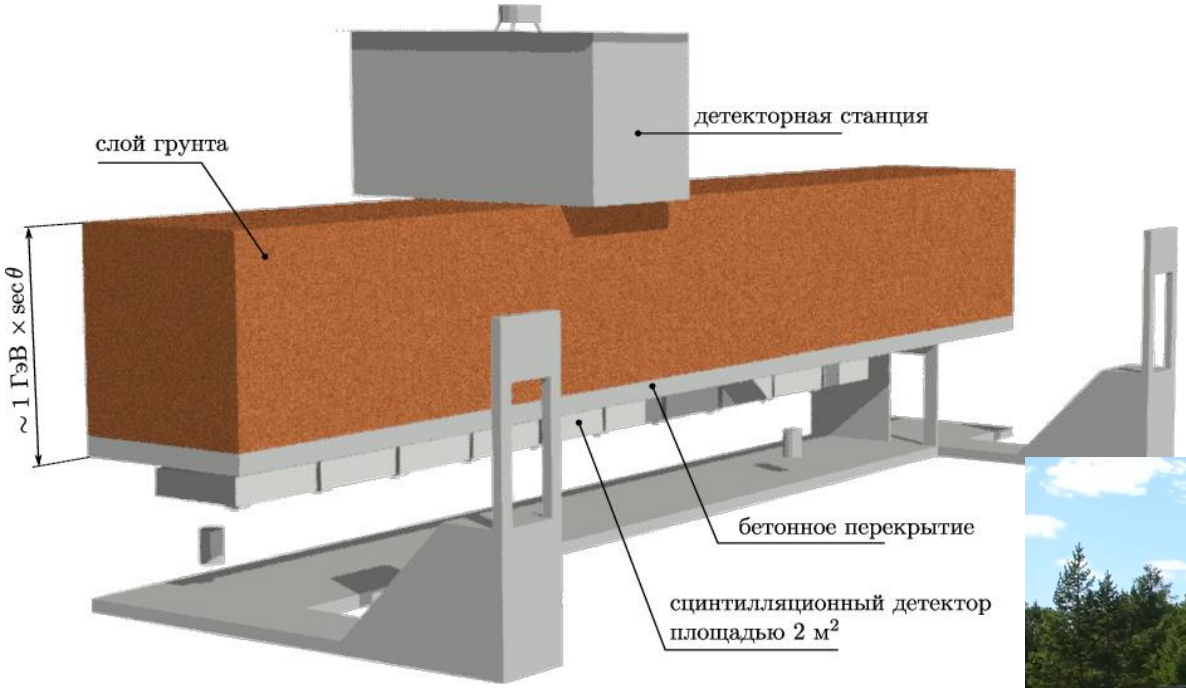


J.C. Arteaga Velazquezi PoS(ICRC2023)466

Действующее и планируемое расположения детекторов установки



Мюонные станции



Пороговая энергия выше 1 ГэВ,

суммарная площадь детекторов 20 м^2 в каждом пункте

Планируется 16 станций

План работ по модернизации установки:

- **Ввести в эксплуатацию 16 подземных станций** с порогом 1 ГэВ , оснащенных десятью сцинтилляционными детекторами 2 м^2 суммарной площадью 20 м^2 на каждой станции.
- Продолжить работу по созданию и установке станций сгущения, обеспечив при этом раздвижение детекторов на 250 м в радиусе 500 м от центра установки.
- Разработать и отладить алгоритмы мониторинга качества работы мюонных детекторов, исключения случайных попаданий фоновых срабатываний в события и методов построения ФПР мюонов с порогом ~1 ГэВ в индивидуальных событиях ШАЛ.
- Выполнить полную переобработку событий ШАЛ за все время наблюдений с 1973 г..
- Разработать систему автоматизированного контроля и тестирования установки.
- Обеспечить свободный доступ к данным всем заинтересованным исследователям.
- Снизить эксплуатационные затраты на содержание установки за счет уменьшения потерь тепла на станциях в отопительный период.

Заключение

- Якутская комплексная установка широких атмосферных ливней непрерывно работает уже более 55 лет.
- Получены важные, во многом пионерские результаты по спектру космических лучей, по их составу и анизотропии.
- Измерение мюонной компоненты ШАЛ играет ключевую роль в определении типа первичной частицы
- Продолжается масштабная модернизация установки.