



Институт космических исследований и аэронавтики
им. Ю.Г.Шафера СО РАН
(ИКФИА СО РАН)

ФИЦ Якутский научный центр СО РАН



Уникальная научная установка
**Якутская Комплексная Установка
Широких Атмосферных Ливней.
Статус и перспективы.**

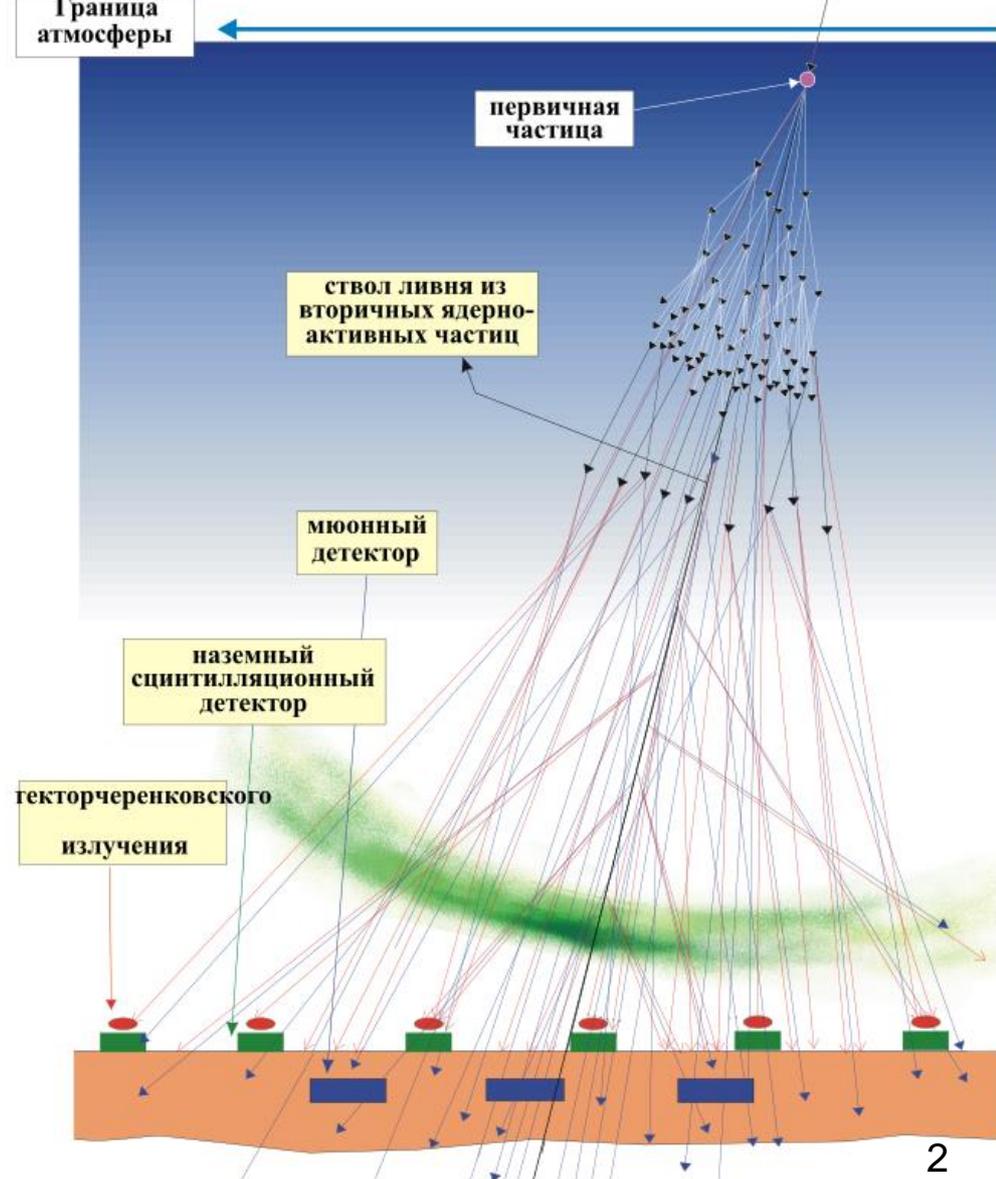
Леонид КСЕНОФОНТОВ,

*А.Ф. Боякинов, А.В. Глушков, А.А. Иванов, С.П. Кнуренко, А.Д. Красильников,
К.Г. Лебедев, С.В. Матаркин, В.П. Мохначевская, Н.Я. Муксунов, И.С. Петров,
А.В. Сабуров, И.Е. Слепцов*

38 Всероссийская конференция по космическим лучам, 1–5 июля 2024 г., г. Москва, ФИАН

Назначение и область применения установки

- 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.

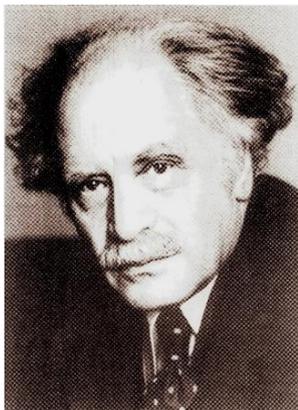


Основатели установки

Вдохновителем и сторонником строительства установки в Якутске был председатель Научного совета АН СССР **Сергей Николаевич Вернов**. Он на протяжении всего периода её создания неоднократно выезжал в Якутск и Новосибирск для решения неотложных вопросов.

Первым куратором Якутской установки был **Сергей Иванович Никольский** (ФИАН). Позже куратором установки был назначен **Георгий Борисович Христиансен** (НИИЯФ МГУ).

Создателем лаборатории ШАЛ и её руководителем до 1985 г. был **Дмитрий Данилович Красильников**. Руководителем лаборатории астрофизики был назначен **Никодим Николаевич Ефимов**.



Сергей Николаевич
Вернов



Сергей Иванович
Никольский



Георгий Борисович
Христиансен



Дмитрий Данилович
Красильников



Никодим Николаевич
Ефимов

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 площадью 3 км², состоящей из 13 станций. А в 1971 году Д.Д. Красильников представил на 12-й МККЛ в Хобарте (Австралия) первые результаты по регистрации ШАЛ на Якутской установке.

14 апреля 1973 года Якутская комплексная установка ШАЛ была принята в эксплуатацию Госкомиссией и получила статус Всесоюзной экспериментальной базы наблюдений для исследования энергетического спектра и направлений прихода космических лучей в области предельных энергий.

В настоящее время входит в каталог уникальных научных установок Российской Федерации (УНУ) <http://www.ckp-rf.ru/usu/73611/>

Более 50 лет на Якутской установке поддерживается непрерывная работа всех станций. ЯКУ ШАЛ является самым продолжительным экспериментом по регистрации КЛ сверхвысоких энергий в мире.

Признанием роли Якутской установки ШАЛ в изучении космических лучей сверхвысоких энергий явилось присвоение в 1982 году создателям установки звания лауреатов Ленинской премии по науке.



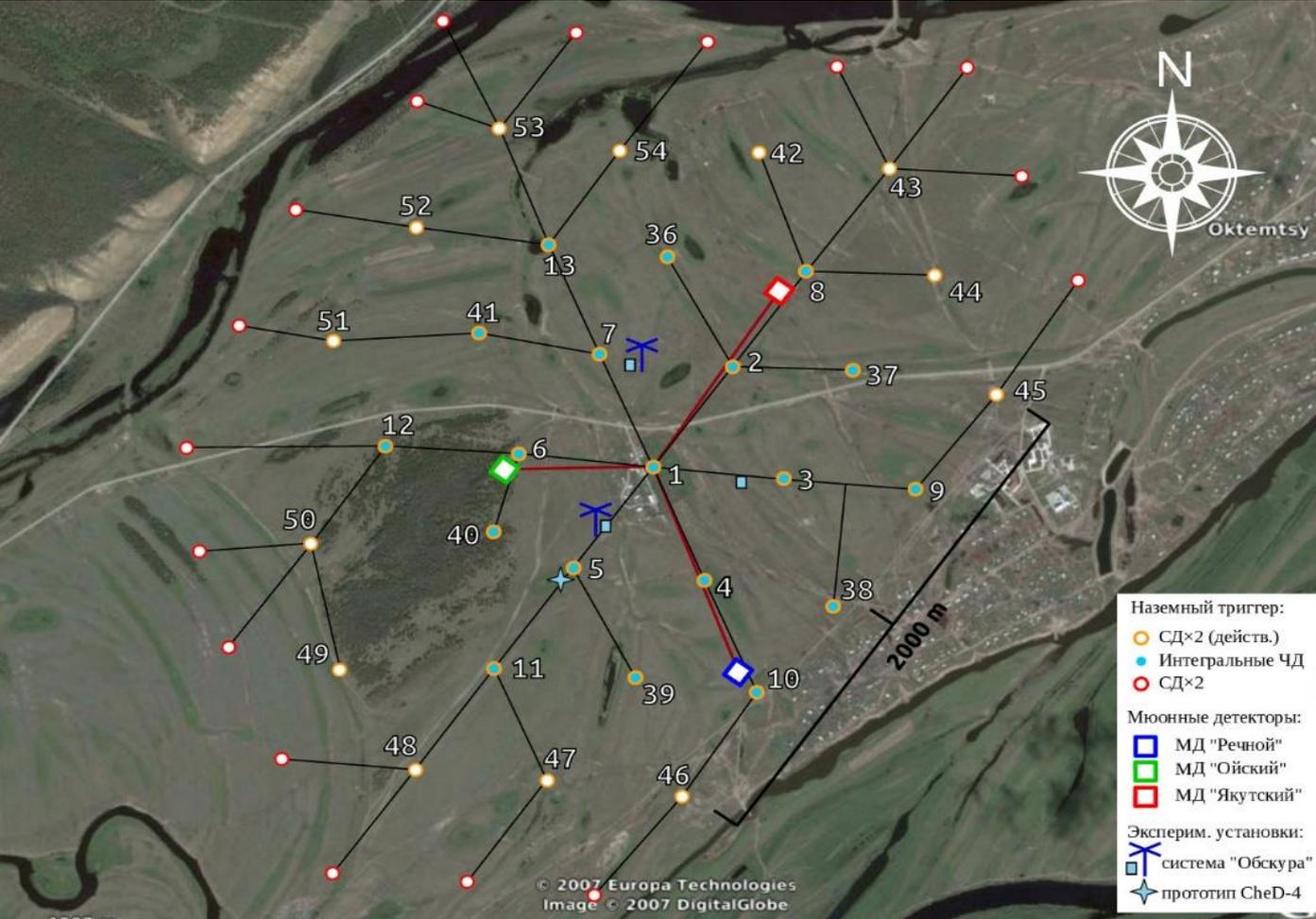
Май 1982 г. Москва, Кремль, Георгиевский зал. Лауреаты Ленинской премии СССР:
Г.Б. Христиансен, Д.Д. Красильников, Д.В. Скобельцын, С.И. Никольский, Н.Н. Ефимов.

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

Установка расположена в долине реки Лены в 55 км к югу от г. Якутска (61.6609° с.ш., 129.3671° в.д., ~100 м над уровнем моря).



Основные параметры установки



Общая площадь размещения детекторов 1973-1991 – 18 кв. км.; 1991-2010 – 12 кв. км; с 2010 — по настоящее время – 8 кв. км.

Порог по энергии основного триггера - $5 \cdot 10^{16}$ эВ, МЧУ – 10^{15} эВ

Динамический диапазон измерения плотности частиц – 10^4

Точность измерения времени прихода частиц ливня - 10 нс

Сцинтилляционный детектор 2 м²

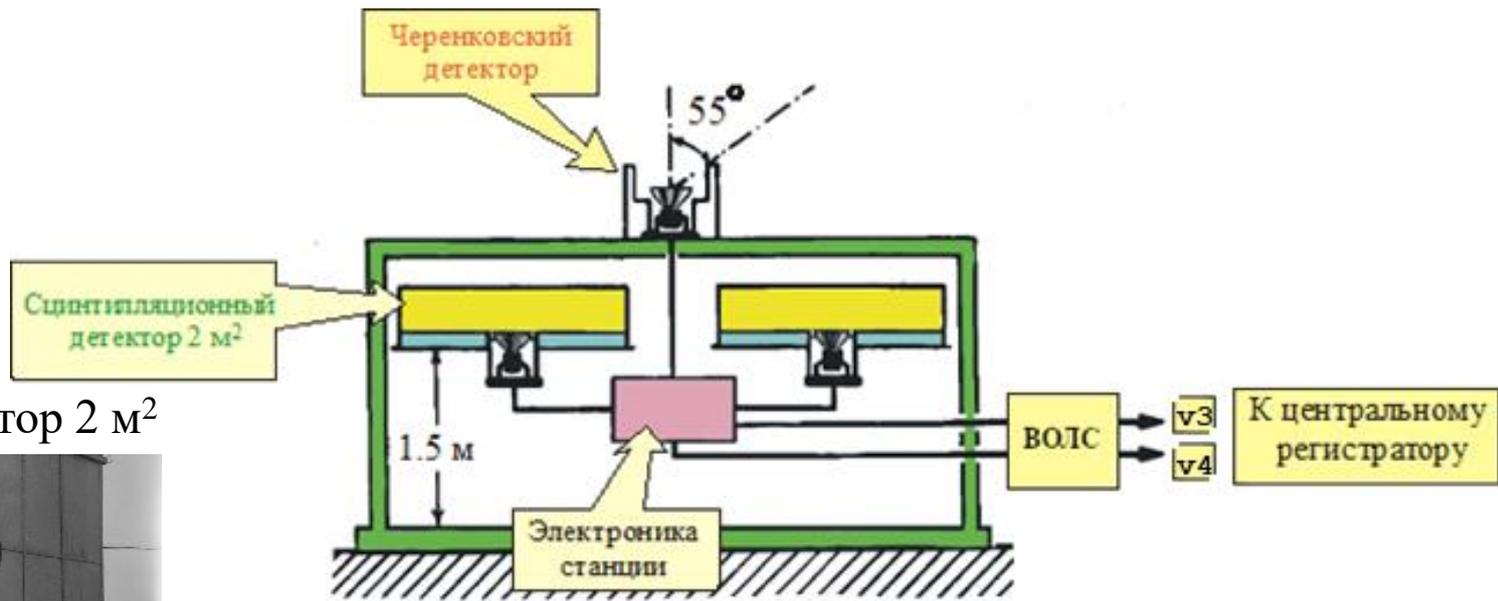
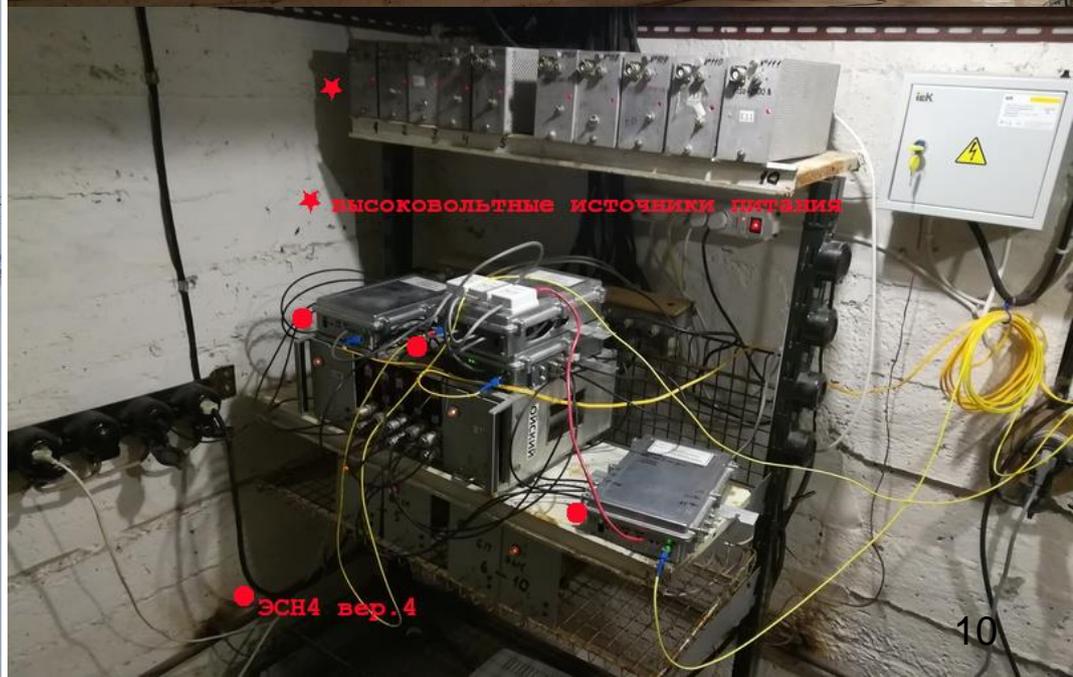


Схема расположения детекторов и электроники в станции наблюдения

Мюонные детекторы

3 подземных пункта для регистрации мюонов с энергией выше 1 ГэВ, суммарная площадь детекторов 20 м² в каждом пункте





19 станций наблюдения оснащены интегральными черенковскими детекторами



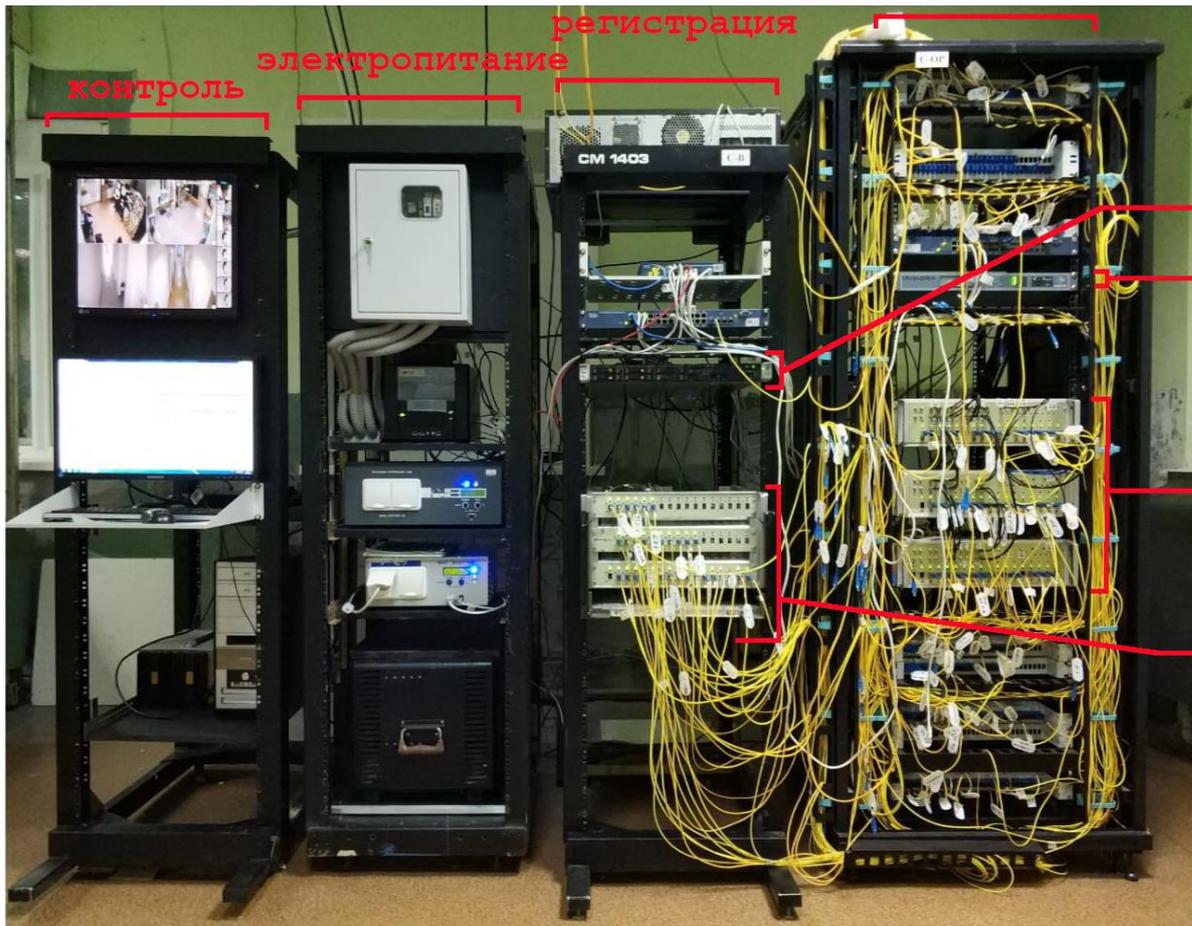
Антенна регистрации радиоизлучения ШАЛ



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.



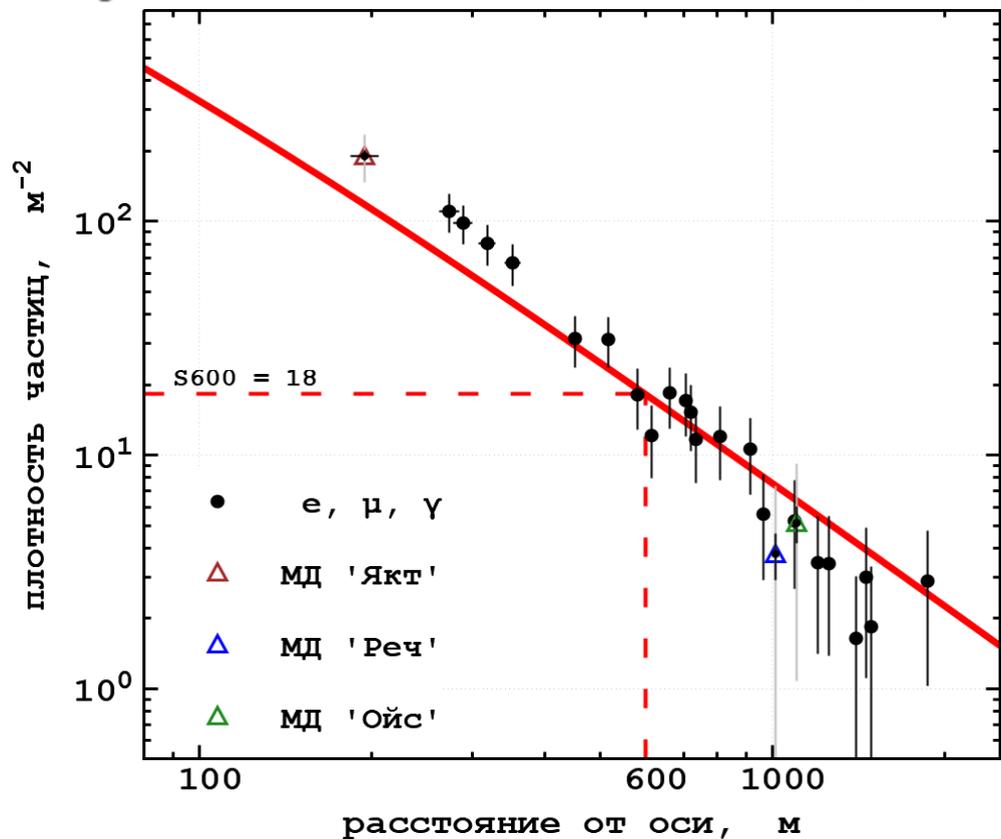
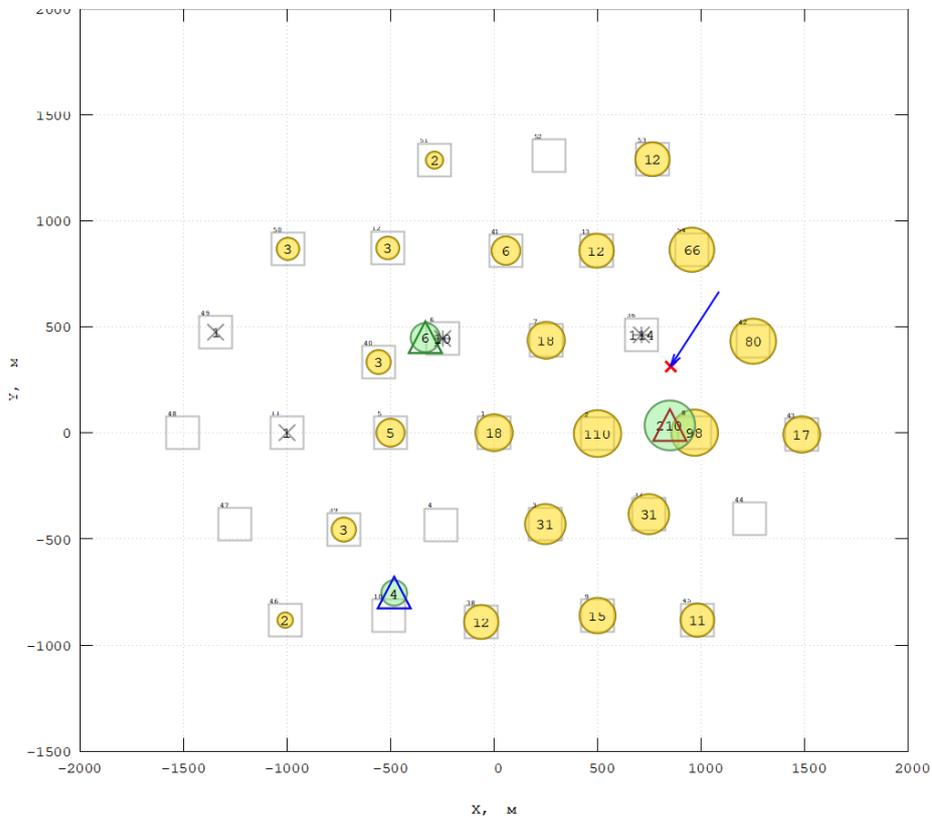
Переход на новую систему регистрации повысил временное разрешение до 10 нс, что позволяет повысить точность определения углов прихода ПКИ – не менее чем в 5 раз до 0.2°

сервер отбора и регистрации
сервер времени

центр синхронизации и приемопередачи

ретранслятор сигналов системы EASv3

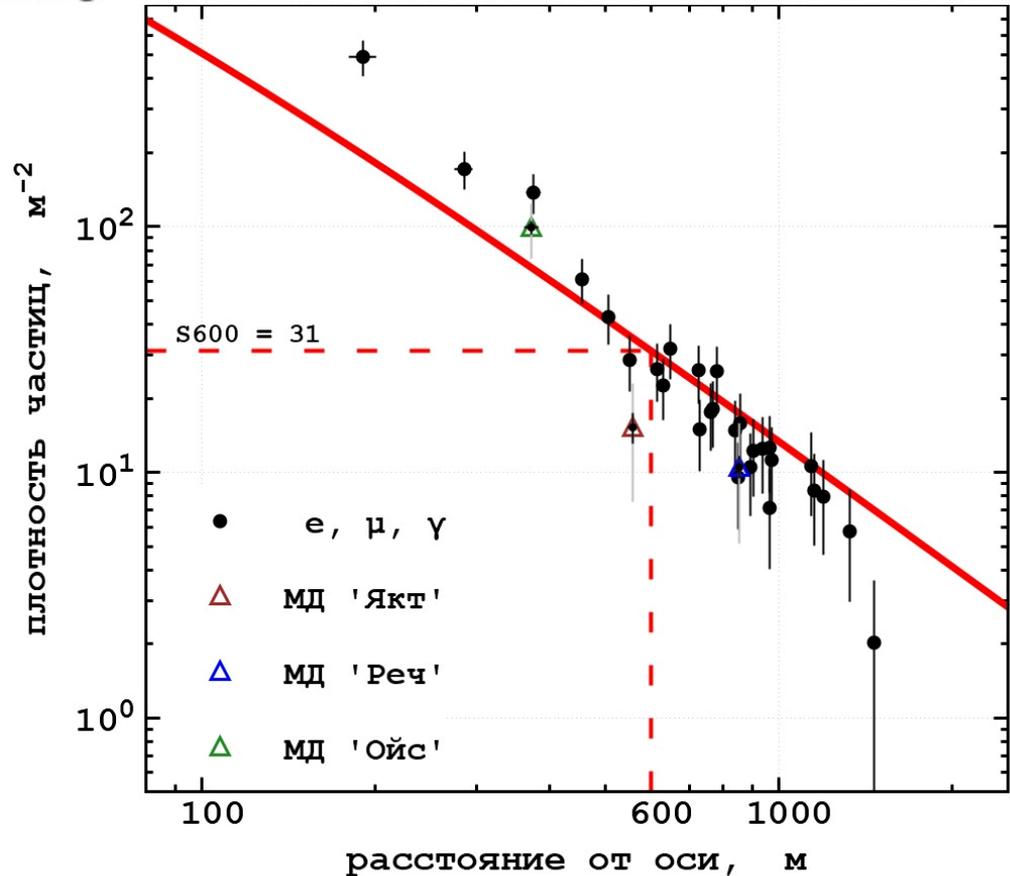
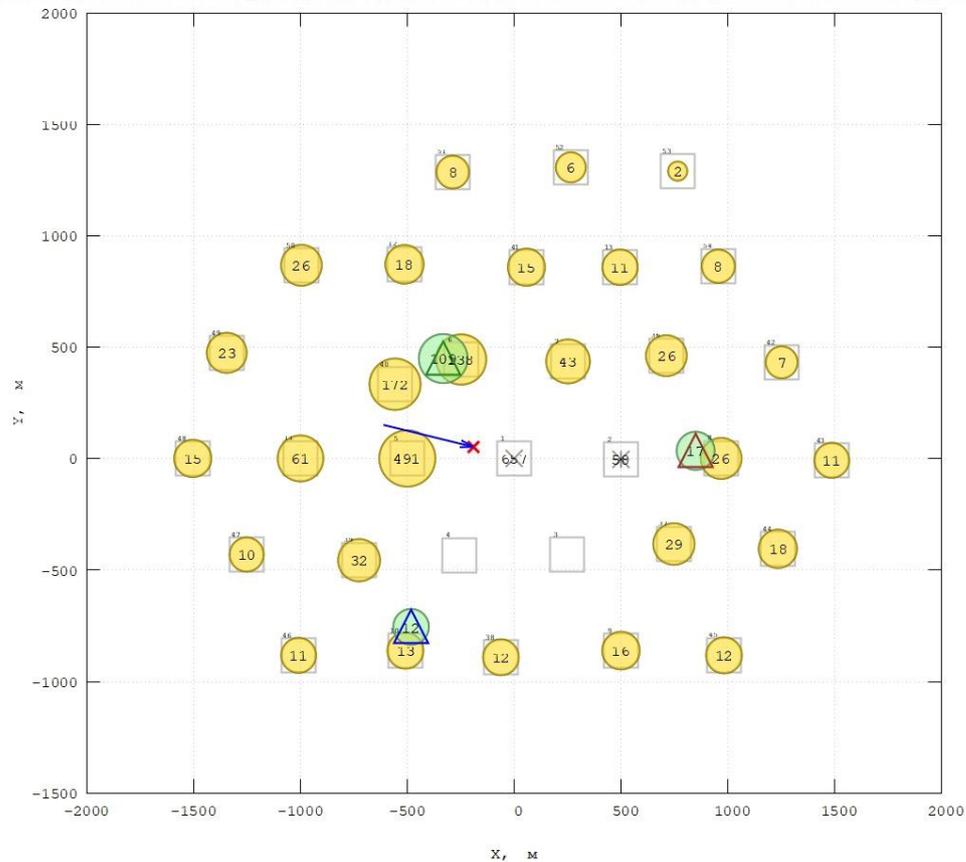
сезон#57 номер #43878 06.02.2023 19:23:27 (ЯКТ); $E_0 = 3.79 \times 10^{19}$ эВ; $\cos\theta=0.5333$ ось: (852; 314)



$$\rho_{s,600}(0^\circ) = \rho_{s,600}(\theta) \exp((\sec\theta - 1) \times 1020/\lambda) [\text{M}^{-2}]$$

$$E_0 = (3.76 \pm 0.3) \times 10^{17} (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02 \pm 0.02} [\text{эВ}]$$

сезон#58 номер #53159 02.04.2024 14:11:17 (ЯКТ); $E_0 = 6.61 \times 10^{19}$ эВ; $\cos\theta=0.5047$ ось: (-192; 53)



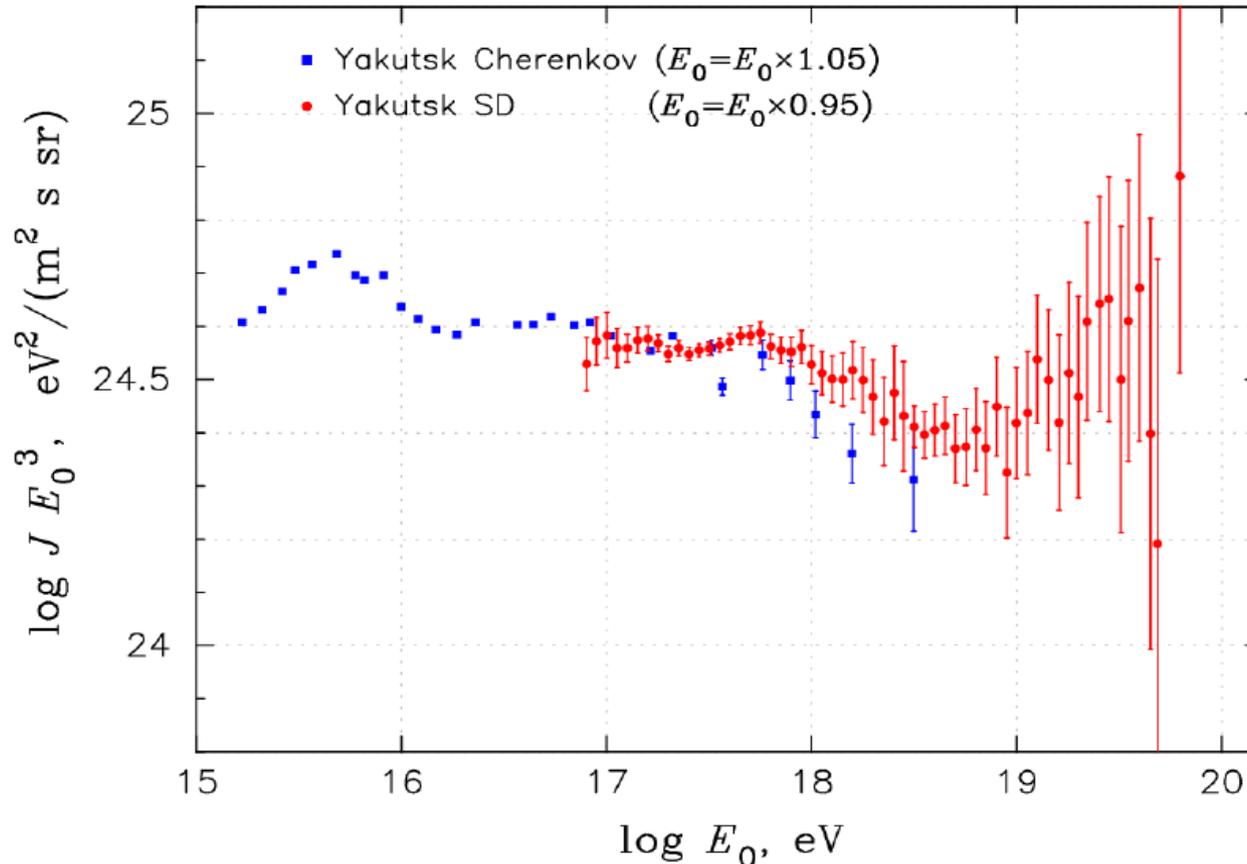
$$\rho_{s,600}(0^\circ) = \rho_{s,600}(\theta) \exp((\sec \theta - 1) \times 1020/\lambda) [\text{M}^{-2}]$$

$$E_0 = (3.76 \pm 0.3) \times 10^{17} (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02 \pm 0.02} [\text{эВ}]$$

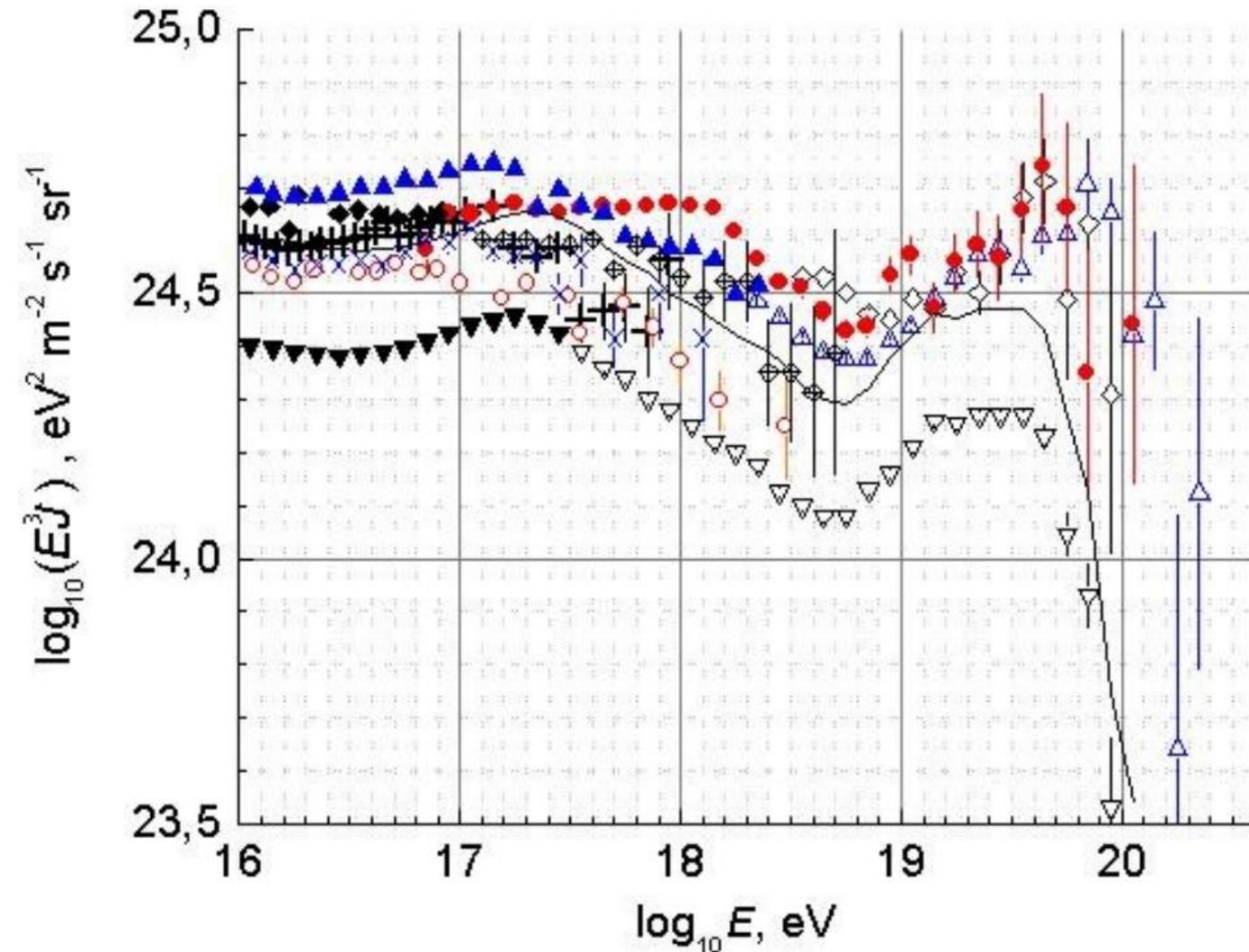
Основные результаты

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

Энергетический спектр космических лучей



Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным мировых установок.



красные кружки – Глушков и др. (2024) (в печати);

открытые красные кружки – Якутск (ЧИ ШАЛ) Кнуренко, Сабуров (2013);

темные, перечеркнутые и светлые ромбы - Акепо (1984, 1992) и AGASA;

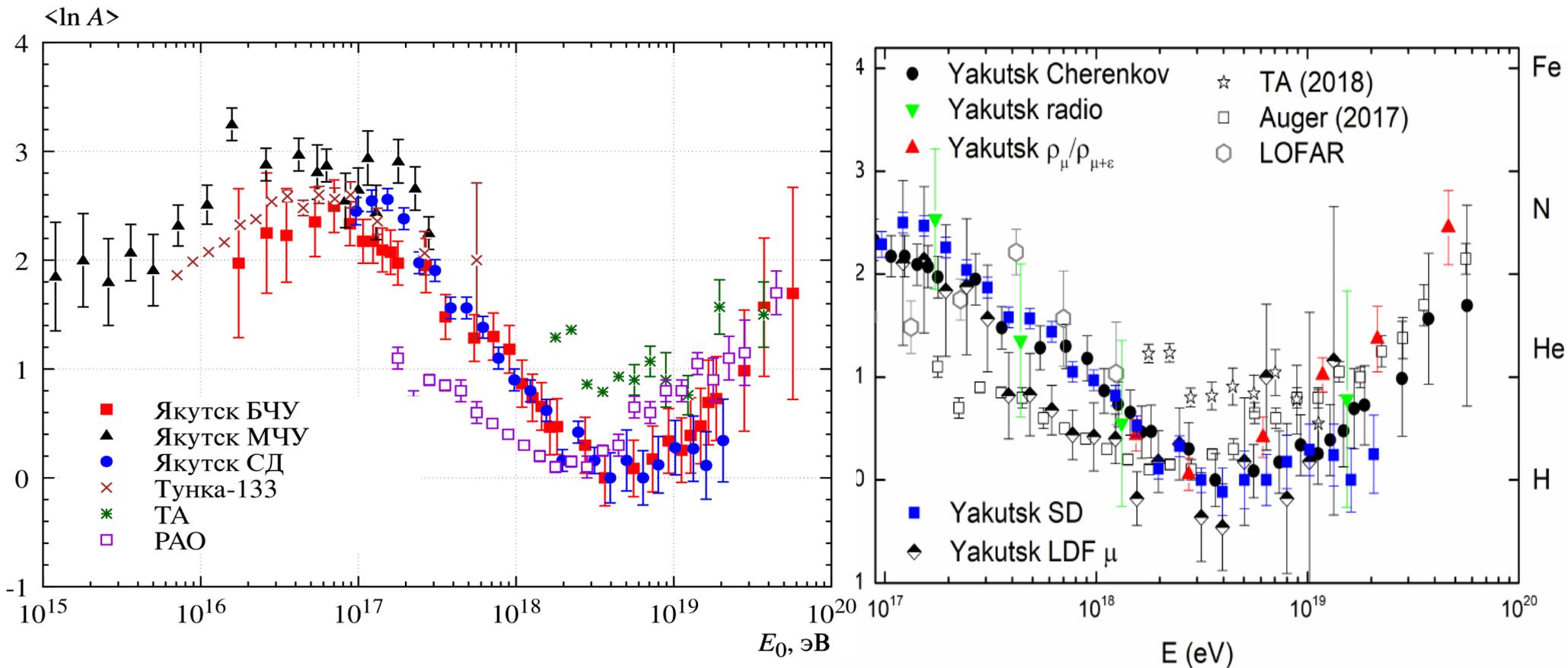
прямые и косые кресты - Ice Top и Тунка-133;

светлые и темные синие треугольники вверх – TA и TALE после увеличения первичной энергии в 1.25 раза;

светлые и темные треугольники вниз – Auger ;

кривая линия – перенормированные спектры Auger после увеличения первичной энергии в 1.25 раза.

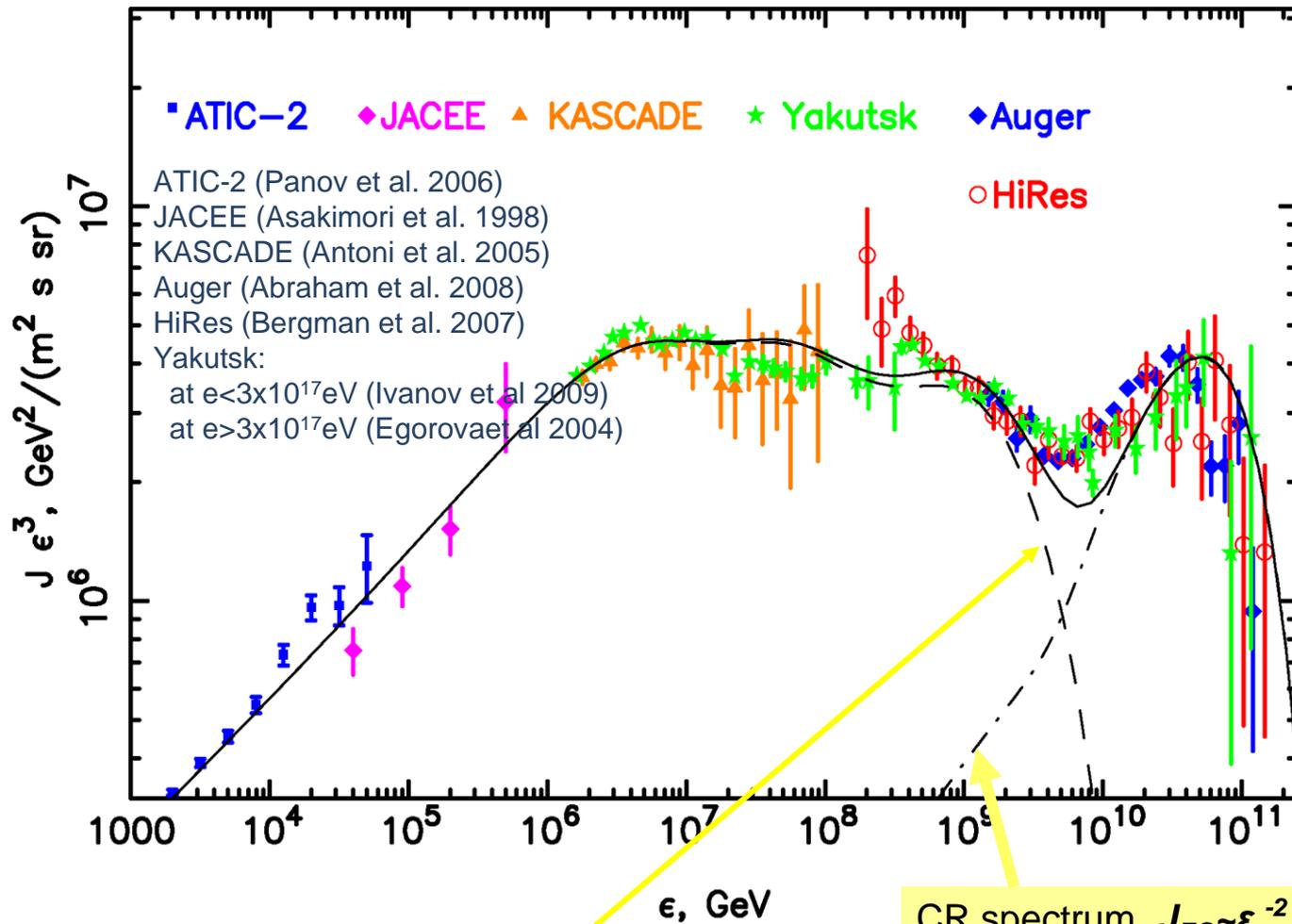
Массовый состав КЛ



$$\langle \ln A \rangle = \frac{X_{max}^{exp} - X_{max}^p}{X_{max}^{Fe} - X_{max}^p} \cdot \ln A_{Fe}$$

Energy spectrum of CRs

Ankle scenario



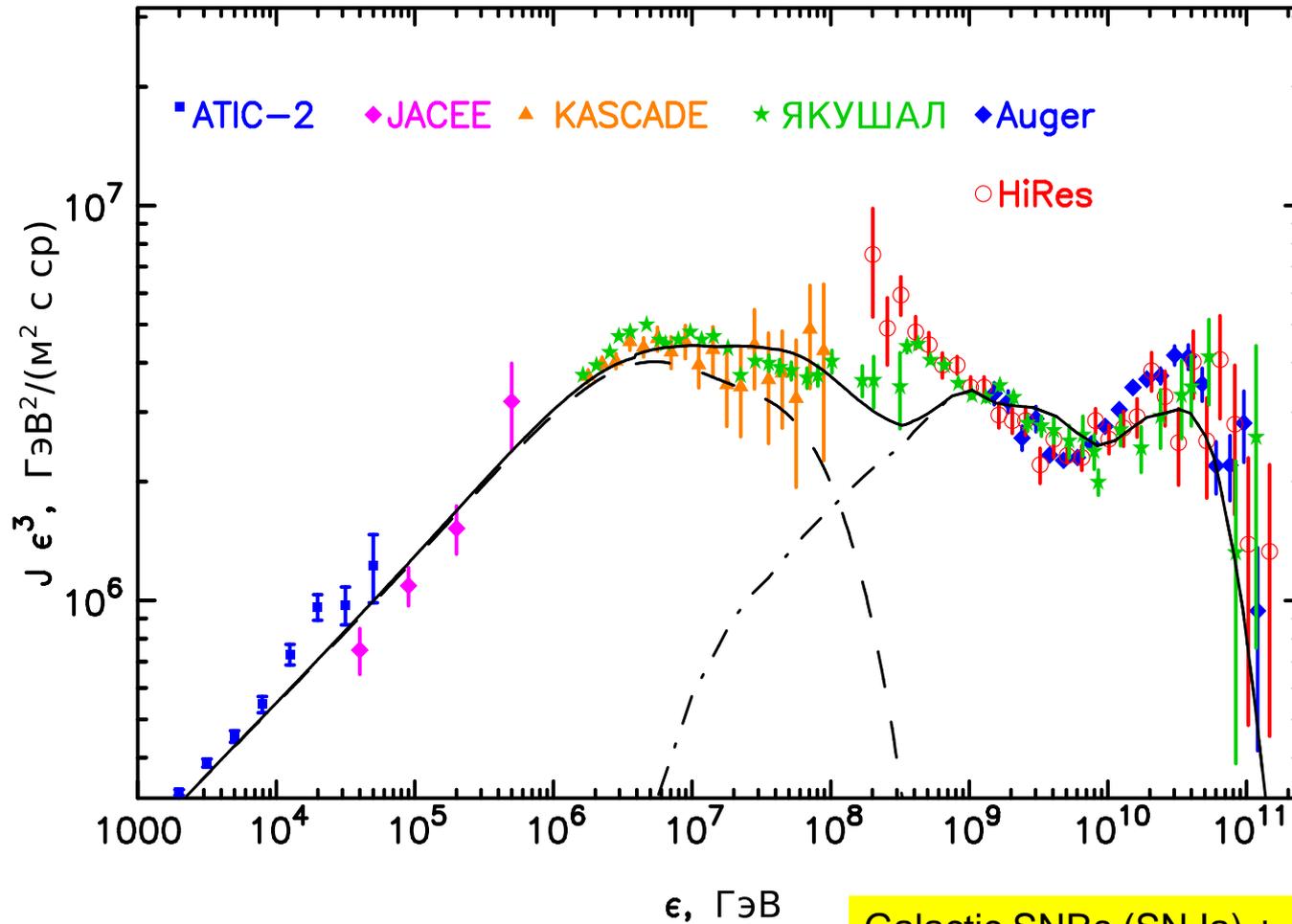
Berezhko, Knurenko, Ksenofontov 2012

CR from SNRs:
SN Ia + SN IIb

CR spectrum $J_{EG} \sim \epsilon^{-2}$
from extragalactic sources
(Berezinsky et al. 2006)

Energy spectrum of CRs

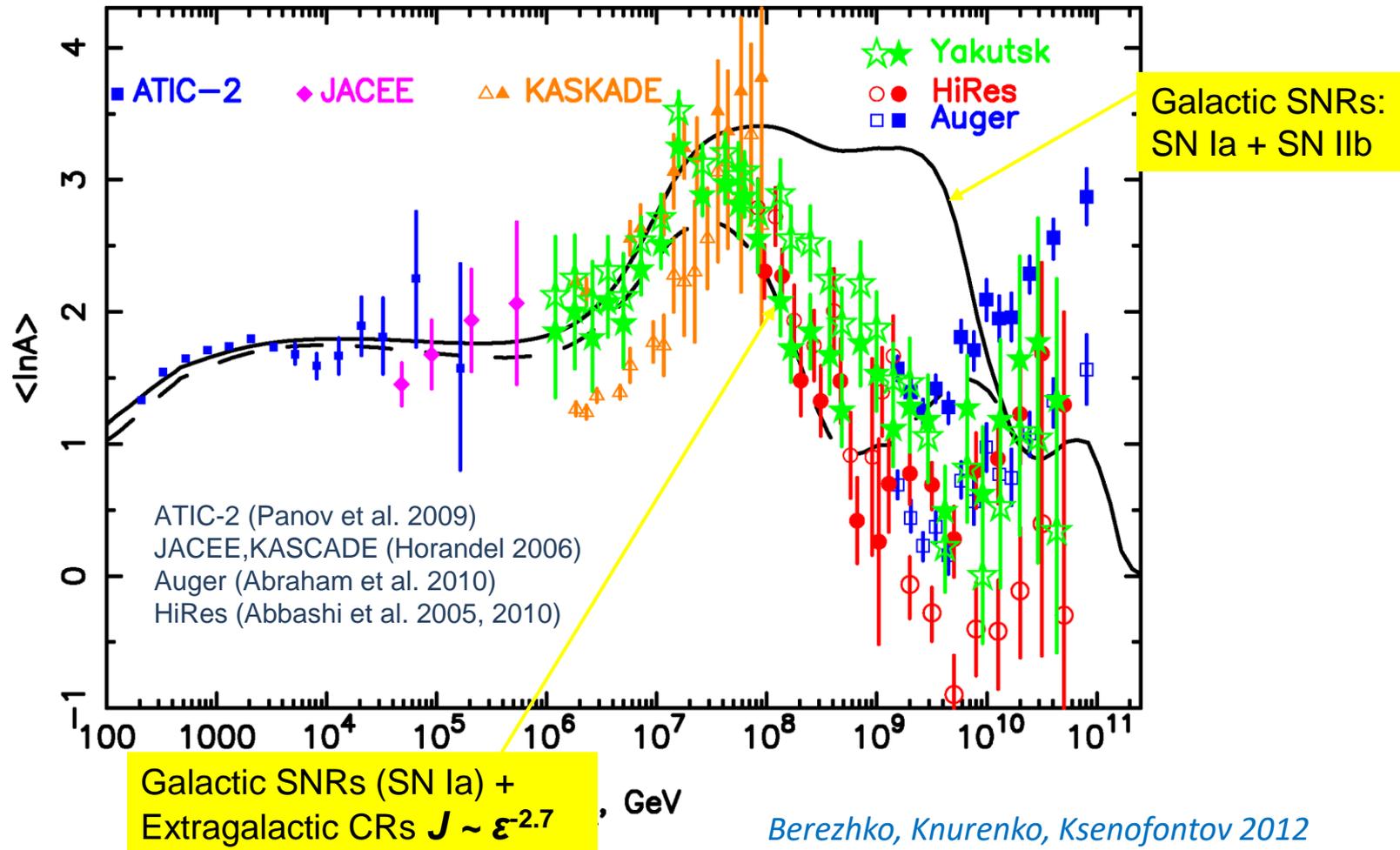
Dip scenario



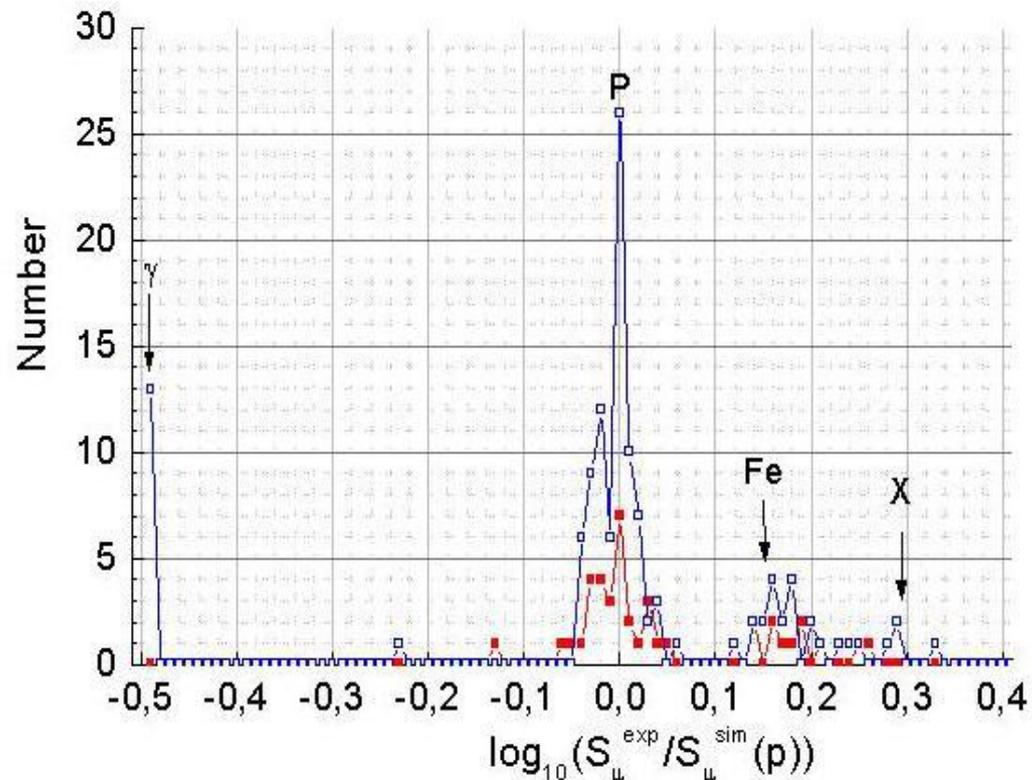
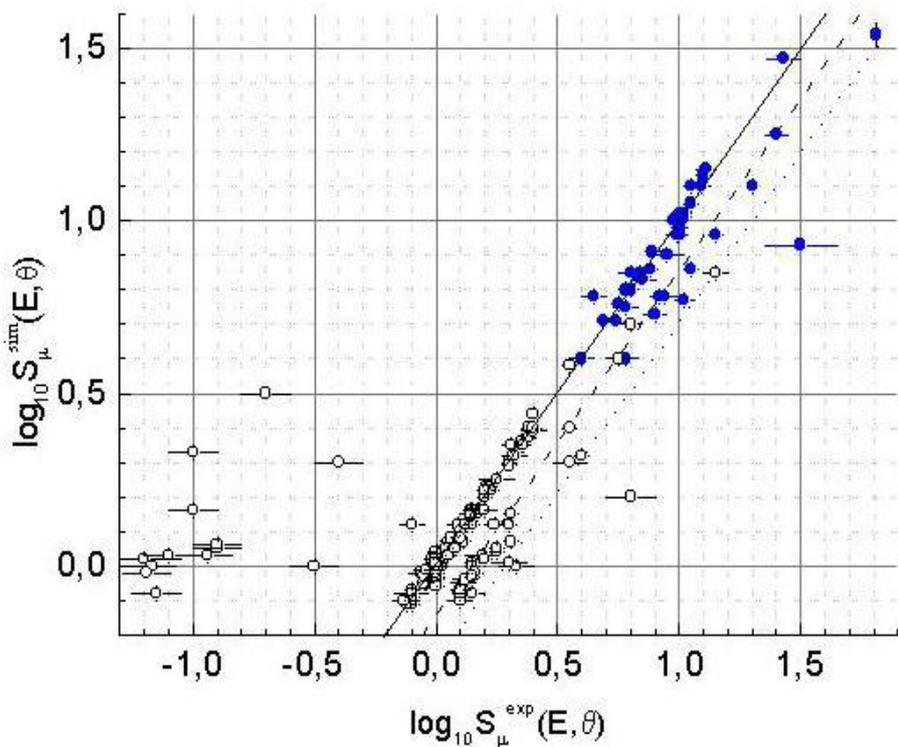
Berezhko, Knurenko, Ksenofontov 2012

Galactic SNRs (SN Ia) +
Extragalactic CRs $J \sim \epsilon^{-2.7}$

Mean logarithm of CR atomic number



Для оценки массового состава космических лучей предельно высоких энергий в отдельно взятых ШАЛ использован *метод мюонной корреляции*. Он основан на совместном анализе экспериментально измеренных и вычисленных по модели QGSjet-II.04 данных по мюонам. (Глушков и др., 2024, подана печать)

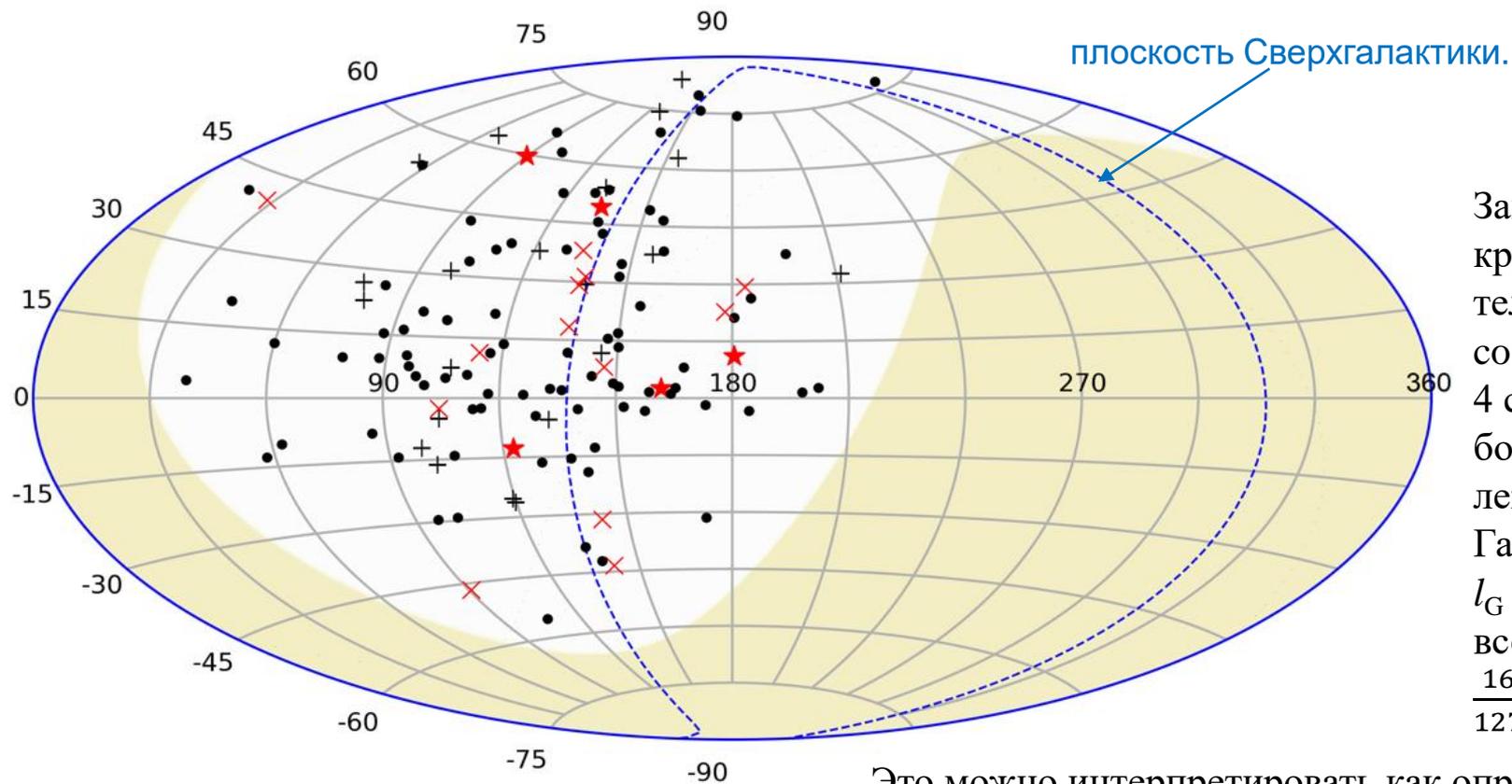


Выборка из 127 ШАЛ с $E \geq 10^{19.1}$ эВ и $\theta \leq 60^\circ$. В нее вошли события с мюонами, измеренными на расстояниях от оси $r = 600$ м (темные кружки) и 1000 м (светлые кружки). Для анализа были отобраны ливни, у которых сработали 2 и больше МД.

Данные о составе КЛ в зависимости от энергии ШАЛ 127 событий

$\text{Log}_{10}E, \text{эВ}$	p	W^p	Fe	W^{Fe}	X	W^X	γ	W^γ	Всего
19.15	20	0.59	8	0.24	2	0.06	4	0.12	34
19.25	27	0.71	7	0.18	0	0.00	4	0.11	38
19.35	16	0.76	3	0.14	0	0.00	2	0.10	21
19.45	11	0.73	1	0.07	2	0.13	1	0.07	15
19.55	9	0.75	1	0.09	0	0.00	2	0.16	12
19.65	4	1.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	4
19.75	1	0.50	1	0.00	1	0.50	0	0.00	2
20.05	0	0.00	0	0.00	1	1.00	0	0.00	1
Всего	88	0.69	21	0.17	6	0.05	13	0.10	127

Направления прихода в галактических координатах 127 событий с $E \geq 1.25 \times 10^{19}$ эВ и $\theta \leq 60$ по данным Якутской установки ШАЛ.

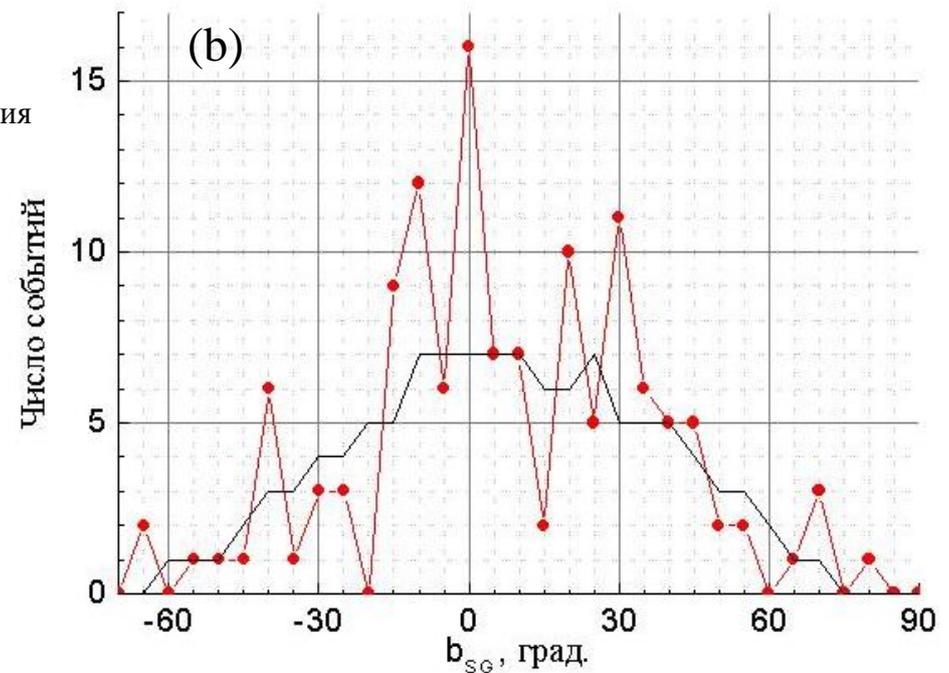
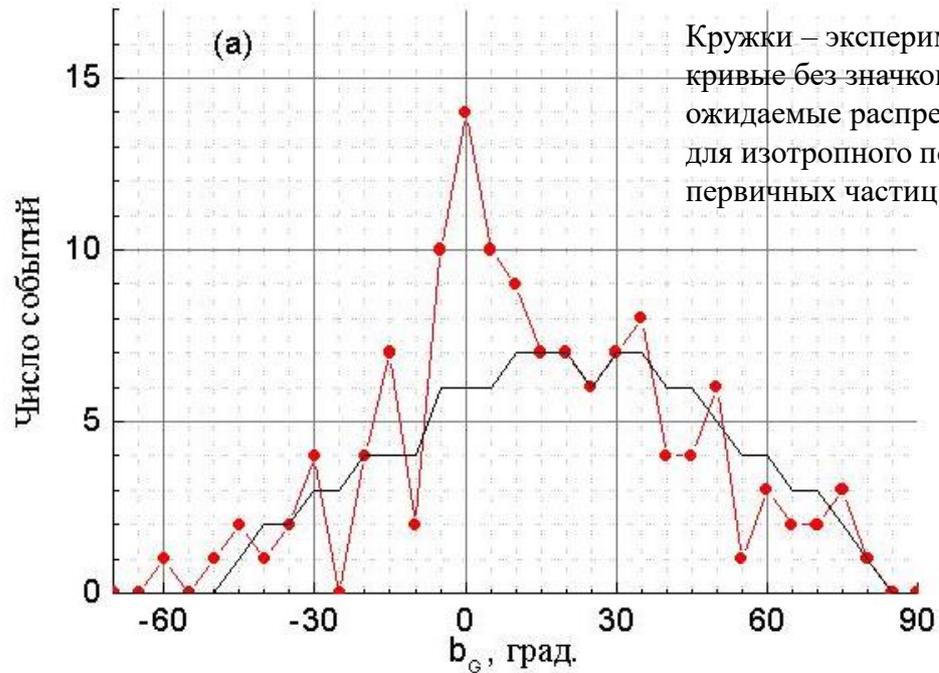


Заметное число пар (и более крупных групп) в локальных телесных углах $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos 3^\circ)$. Одна такая группа из 4 событий (с самым большим ШАЛ в таблице 1) лежит почти в плоскости Галактики, с координатами $l_G \approx 161.6^\circ$ и $b_G \approx 2.6^\circ$. Вне всех групп находятся $\frac{16}{127} \times 100\% \approx 13\%$ событий.

кружки – протоны;
кресты – ядра железа;
звездочки – частицы X;
косые кресты – гамма-кванты.

Это можно интерпретировать как определенную связь по направлениям прихода КЛПВЭ предельно высоких энергий с источниками своего образования.

Распределения 127 ливней из таблицы 1 в зависимости от широты их прихода в галактических (a) и сверхгалактических (b) координатах.

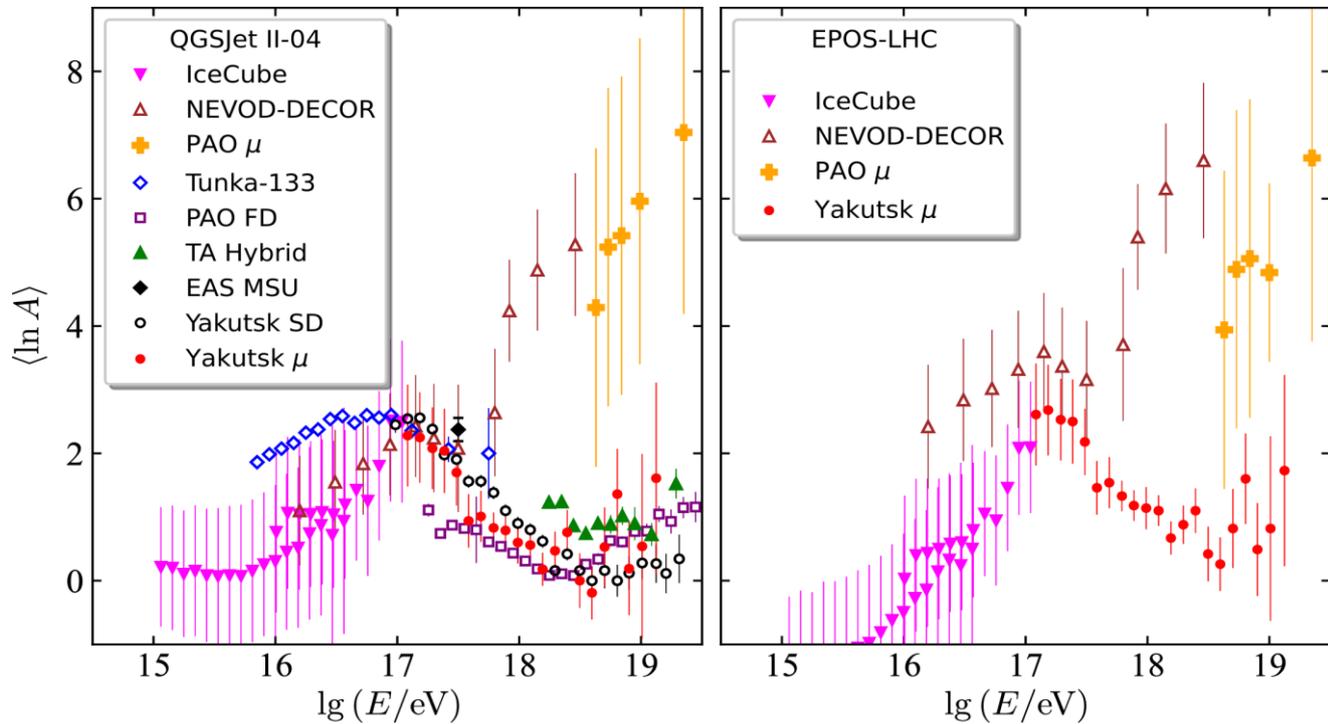
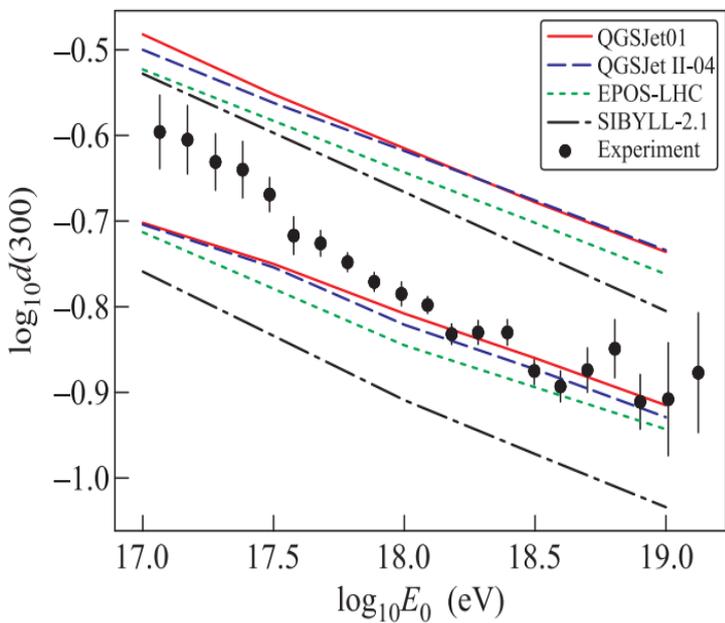


В полосе склонений от -5° до 15° в плоскости Галактики наблюдается ярко выраженный пик из 43 событий (33% от всей выборки) над ожидаемыми 25 для изотропного потока, с превышением на $(43 - 25)/\sqrt{25} \approx 3.6\sigma$.

В полосе склонений от -15° до 5° в плоскости сверхгалактики из 43 событий над ожидаемыми 26, с превышением на $(43 - 26)/\sqrt{26} \approx 3.33\sigma$.

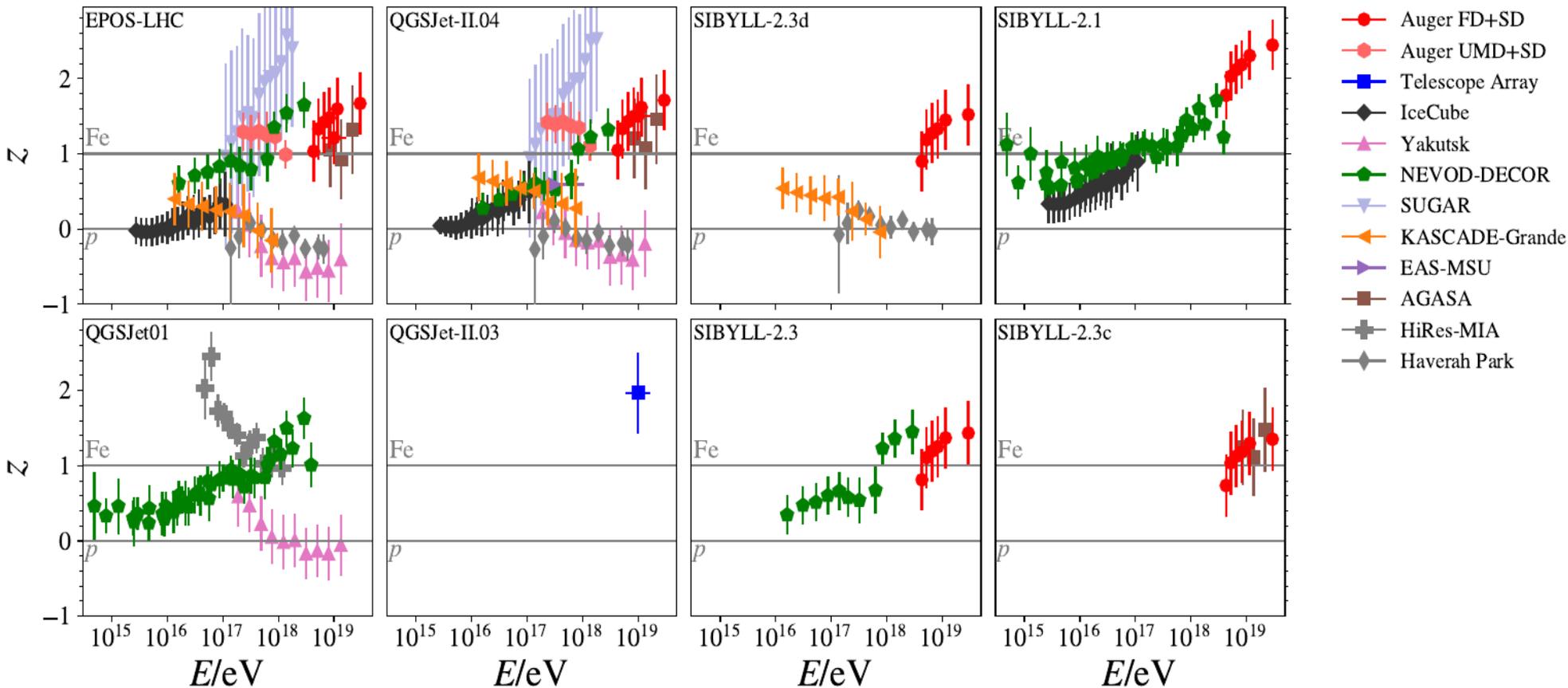
Суммарно в этих двух областях обзораемой Якутской установкой северной части неба находятся 86 ливней. При изотропном потоке ожидаются 51. Превышение составляет $(86 - 51)/\sqrt{51} \approx 4.9\sigma$.

«Мюонная загадка»

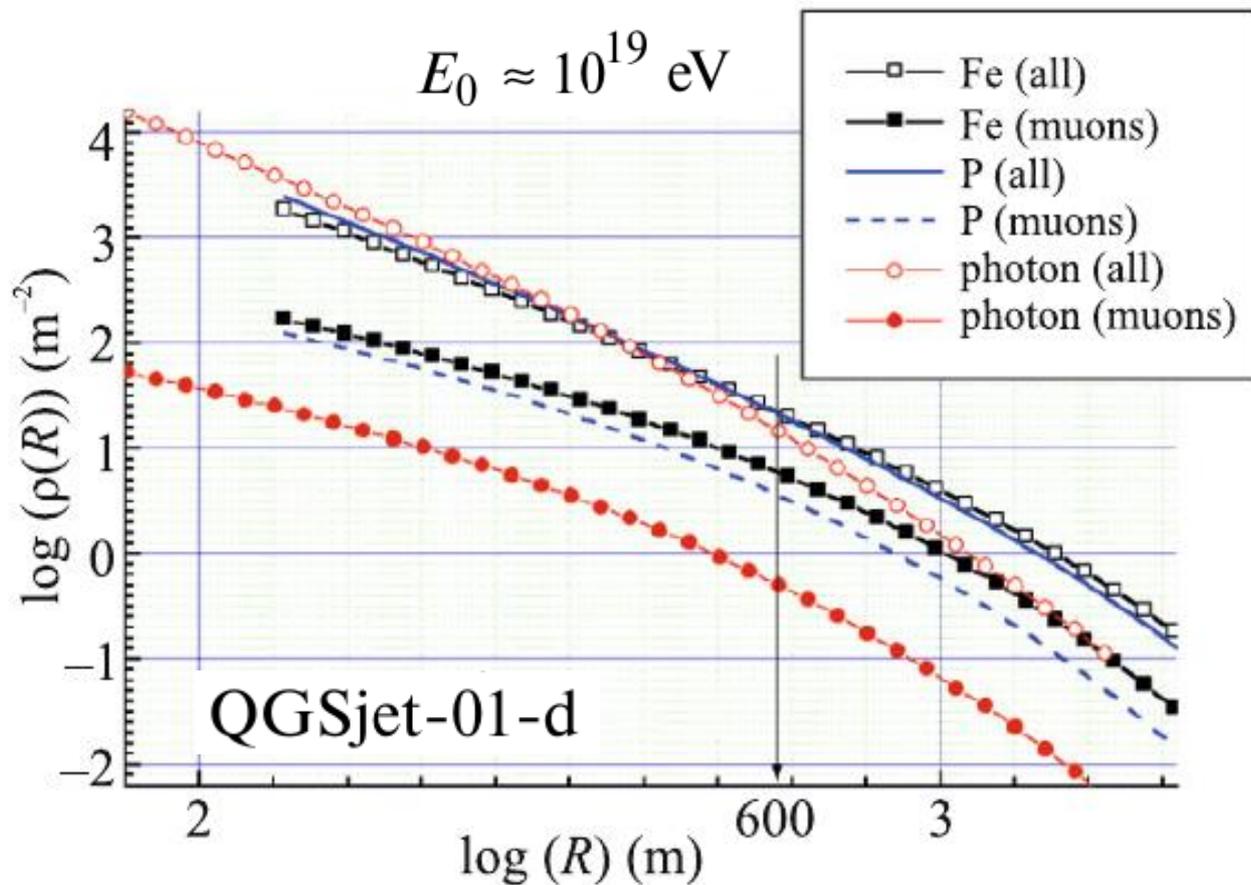


«Мюонная загадка»

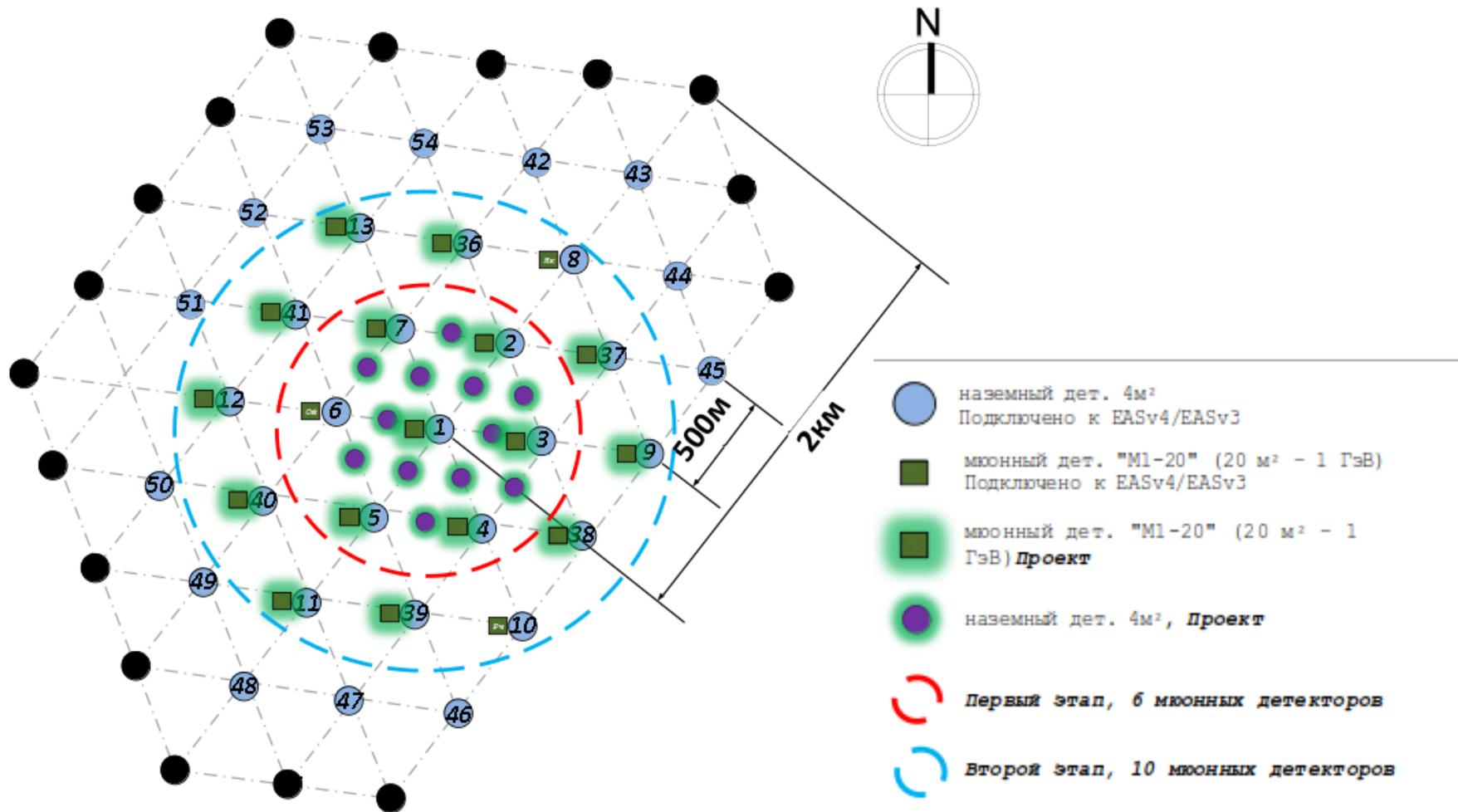
$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{exp}} - \ln N_{\mu}^{\text{P}}}{\ln N_{\mu}^{\text{Fe}} - \ln N_{\mu}^{\text{P}}}$$



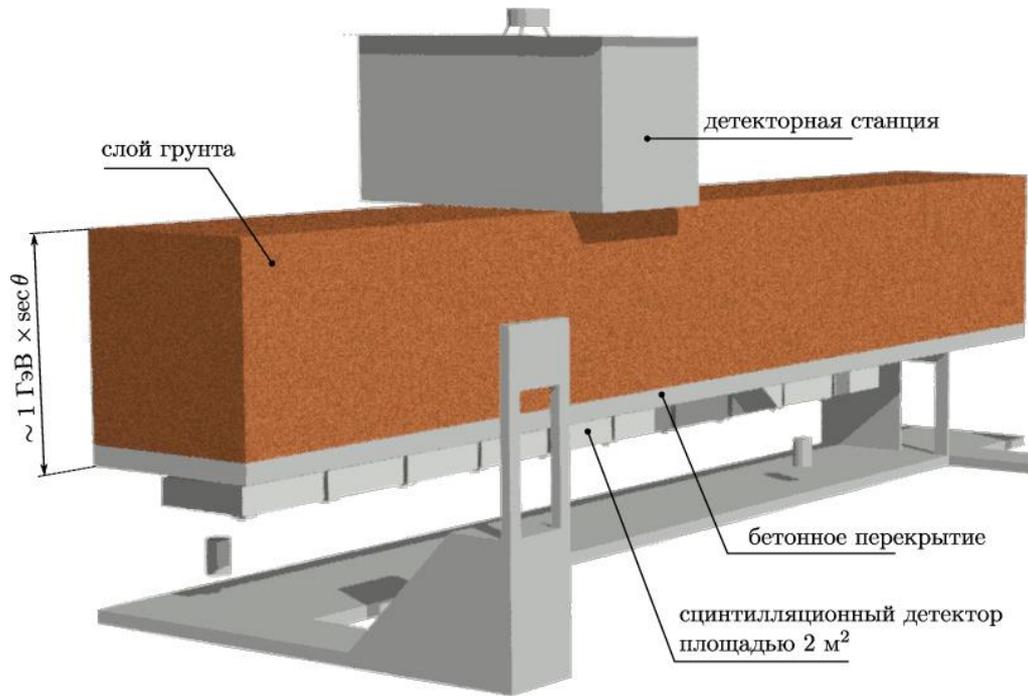
Поиск фотонов сверхвысоких энергий



Действующее и планируемое расположения детекторов установки



Мюонные станции

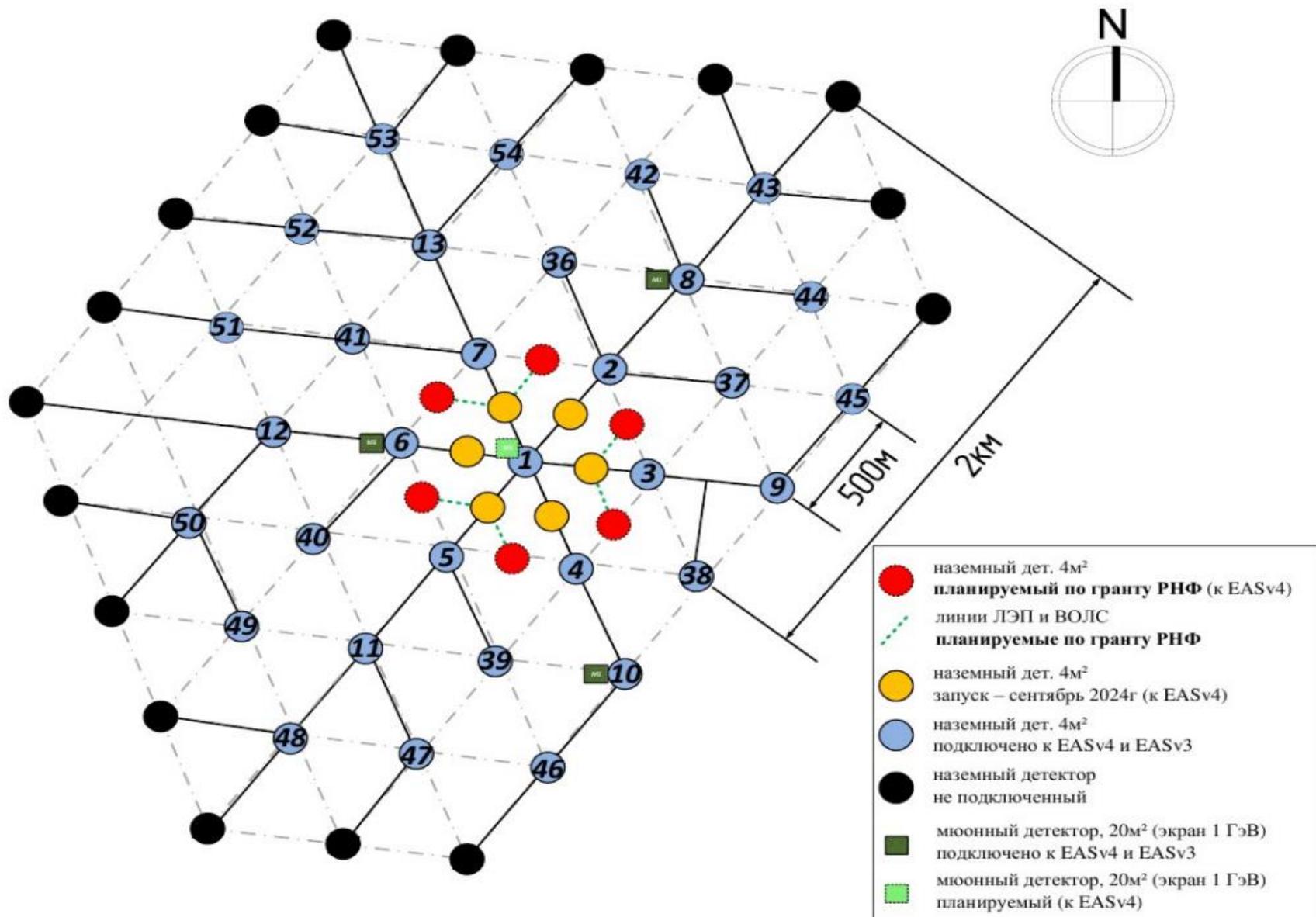


Пороговая энергия выше 1 ГэВ,

суммарная площадь детекторов
20 м² в каждом пункте

Планируется 16 станций





Заключение

- Якутская комплексная установка широких атмосферных ливней работает непрерывно уже более 50 лет.
- В настоящее время площадь установки составляет около 8.2 км².
- Поток космических лучей, полученный по данным наземной установки, согласуется с полученным черенковскими детекторами при незначительной коррекции энергии.
- Различные методы измерения состава КЛ дают хорошо согласующиеся результаты.
- Измерение мюонной компоненты ШАЛ играет ключевую роль в определении сорта первичной частицы и выделении компоненты гамма-излучения сверхвысокой энергии
- Продолжается масштабная модернизация установки.