39 ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ
г. Дубна, Россия, 29.06-03.07.2026
Секция ПКЛ-2: #109

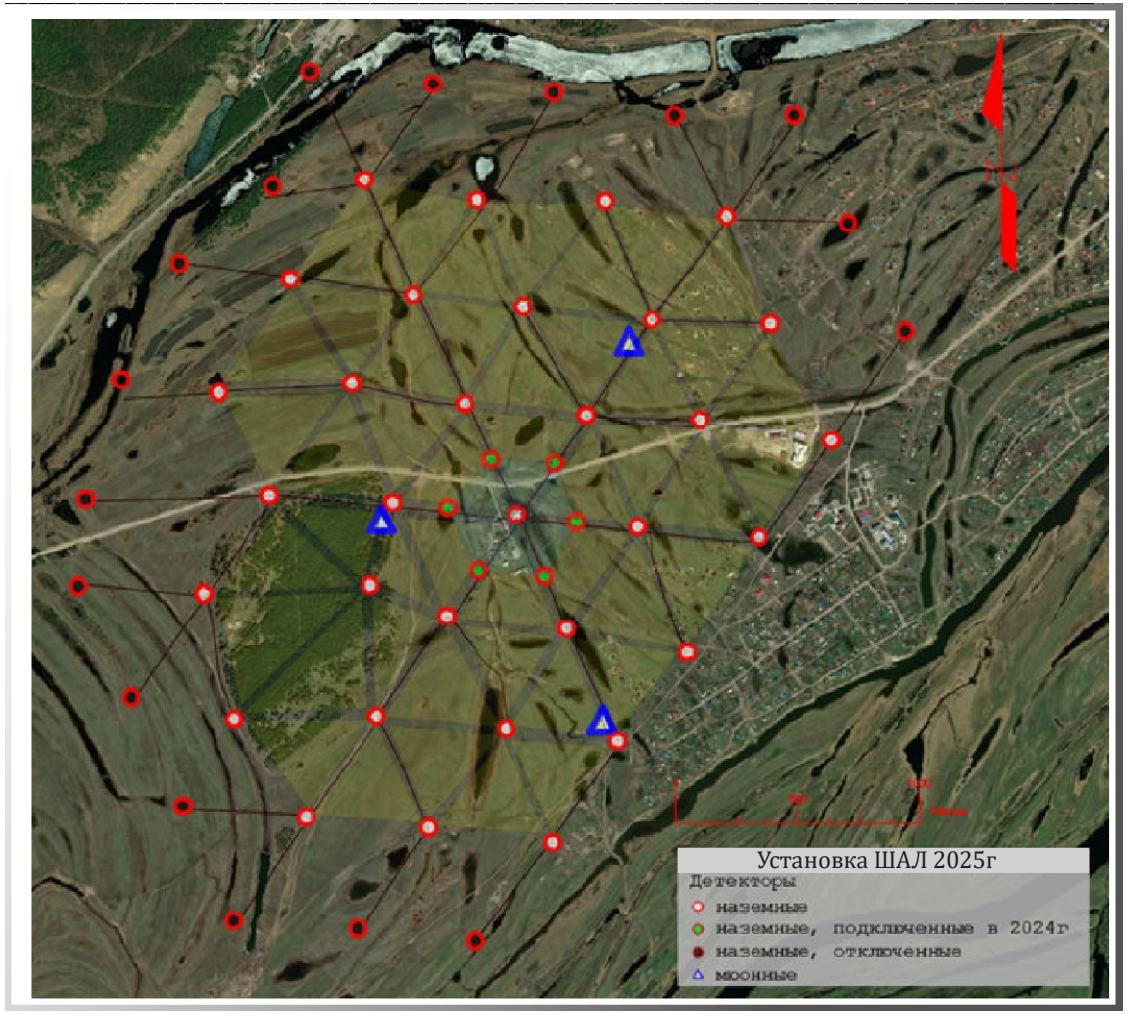
Анализ направлений прихода космических лучей сверхвысоких энергий по данным Якутской установки ШАЛ

А.В. Глушков[1], Л.Т. Ксенофонтов[1], К.Г. Лебедев[1], С.В. Матаркин[1], А.В. Сабуров[2]

[1]Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

[2]Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Россия

Якутская комплексная установка ШАЛ



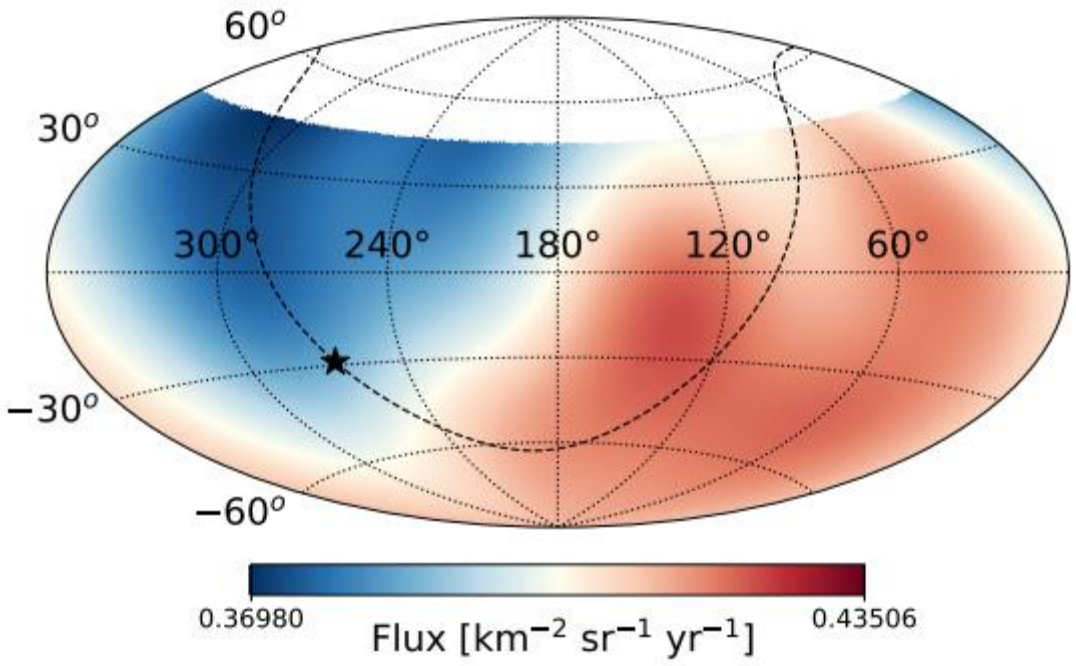
Энергетический диапазон - $10^{17} \div 10^{20}$ эВ;
Площадь — 4.8 кв.км.
Всего детекторов - 106 шт.
38 наземных станций по 4 кв.м. (2 детектора по 2 кв.м)
3 мюонных пункта по 20 кв.м. (10 детекторов по 2 кв.м)
Триггеры - 500м (32 станций), 250м (6 станций)
Сезон регистрации: с 1 сентября по 1 июня

Исследования анизотропии КЛСВЭ

Pierre Auger Observatory

Обнаружена крупномасштабная дипольная анизотропия при энергиях выше 8 ЭэВ со значимостью 6.8σ

A. Halim et al. (Pierre Auger), Astrophys. J. 976, 1, 48 (2024), [arXiv:2408.05292]



Обнаружен избыток событий с энергией выше 20 ЭэВ на уровне 5.2σ в области с угловым радиусом ≃ 27°, центрированной на радиогалактике Центавр A (CenA)

L.Apollonio et al. (Pierre Auger), PoS ICRC2025, 177 (2025), [arXiv:2507.08544v1]

Analysis	E_{th} [EeV]	Ψ [°]	N_{obs}	N_{exp}
Overdensity	38	27	245	172.0
Cen A	38	27	237	169.0

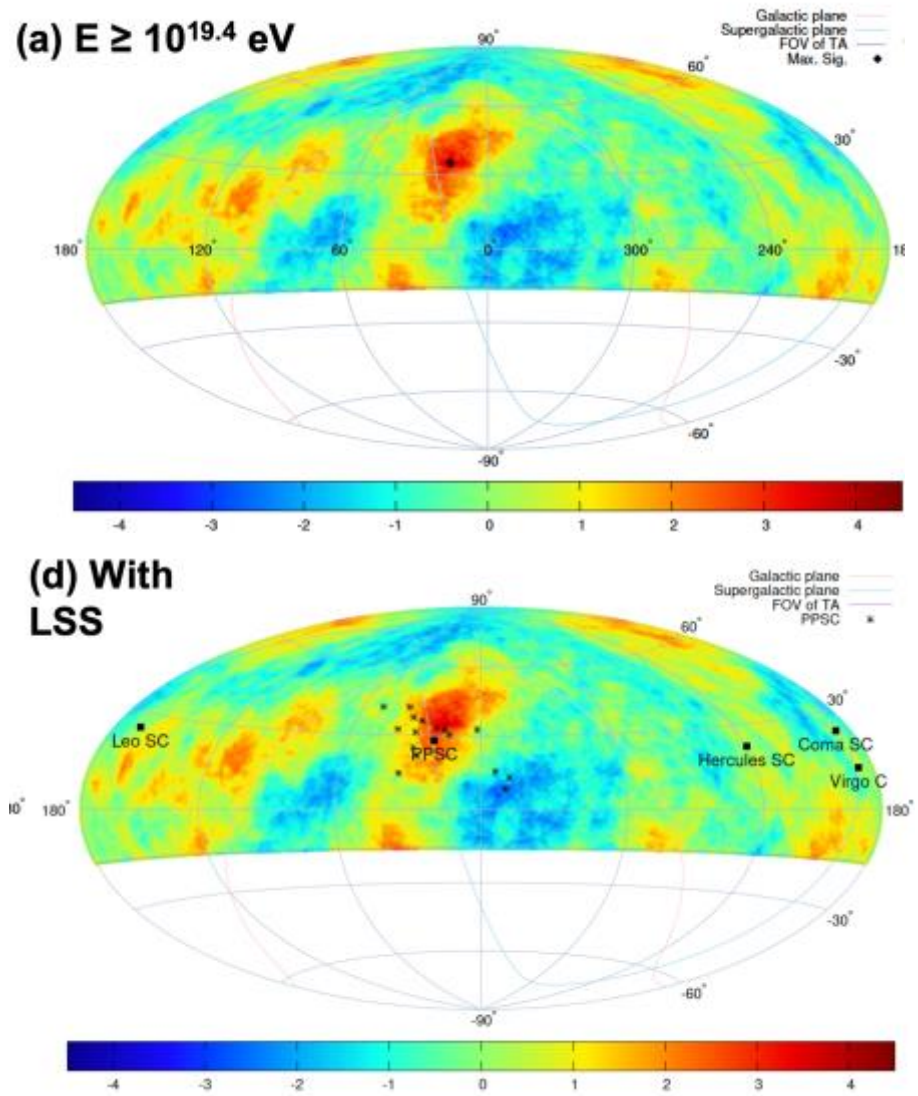
Исследования анизотропии КЛСВЭ

Telescope Array

Обнаружен избыток событий с энергией выше 57 ЭэВ (hot spot) в направлении R.A. = 144.0°, Dec. = 40.5°, со значимостью 2,8σ и в угловом окне 25°

Обнаружен избыток событий с $E \geq 10^{19.4}$ эВ, немного ниже hot spot, в направлении сверхскопления Персей-Рыбы

J. Kim et al. (Telescope Array), PoS ICRC2023, 244 (2023). https://doi.org/10.22323/1.444.0244



Типы первичных частиц в индивидуальных ливнях

Мюонная компонента ШАЛ:

- связана с адронными взаимодействиями высоких энергий (мюонная загадка)
- один из методов выявления фотоноподобных событий
- выход на направления источников (исследование анизотропии КЛСВЭ)

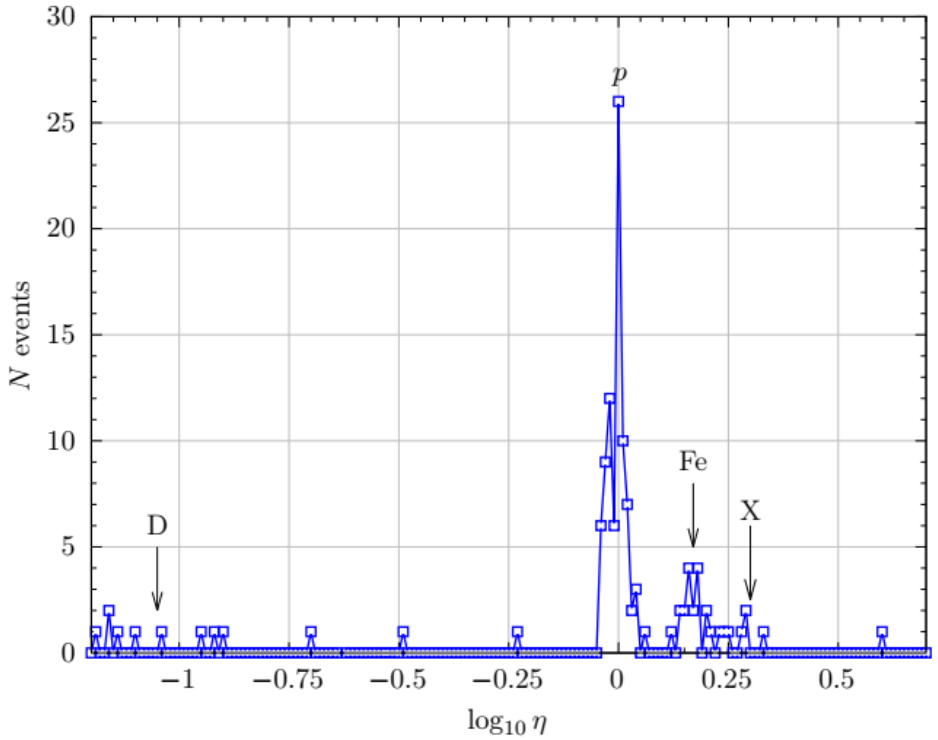
Предложен «метод мюонной корреляции»:

$$\eta = \frac{S_\mu^{exp}(E_0, \theta, r)}{S_\mu^{sim}(p, E_0, \theta, r)}$$

A.V. Glushkov, L.T. Ksenofontov, K.G. Lebedev, A.V. Saburov. JETP Lett., 120, 6 (2024), https://doi.org/10.31857/S0370274X24090152

127 событий с θ ≤ 60° (1978-2018)

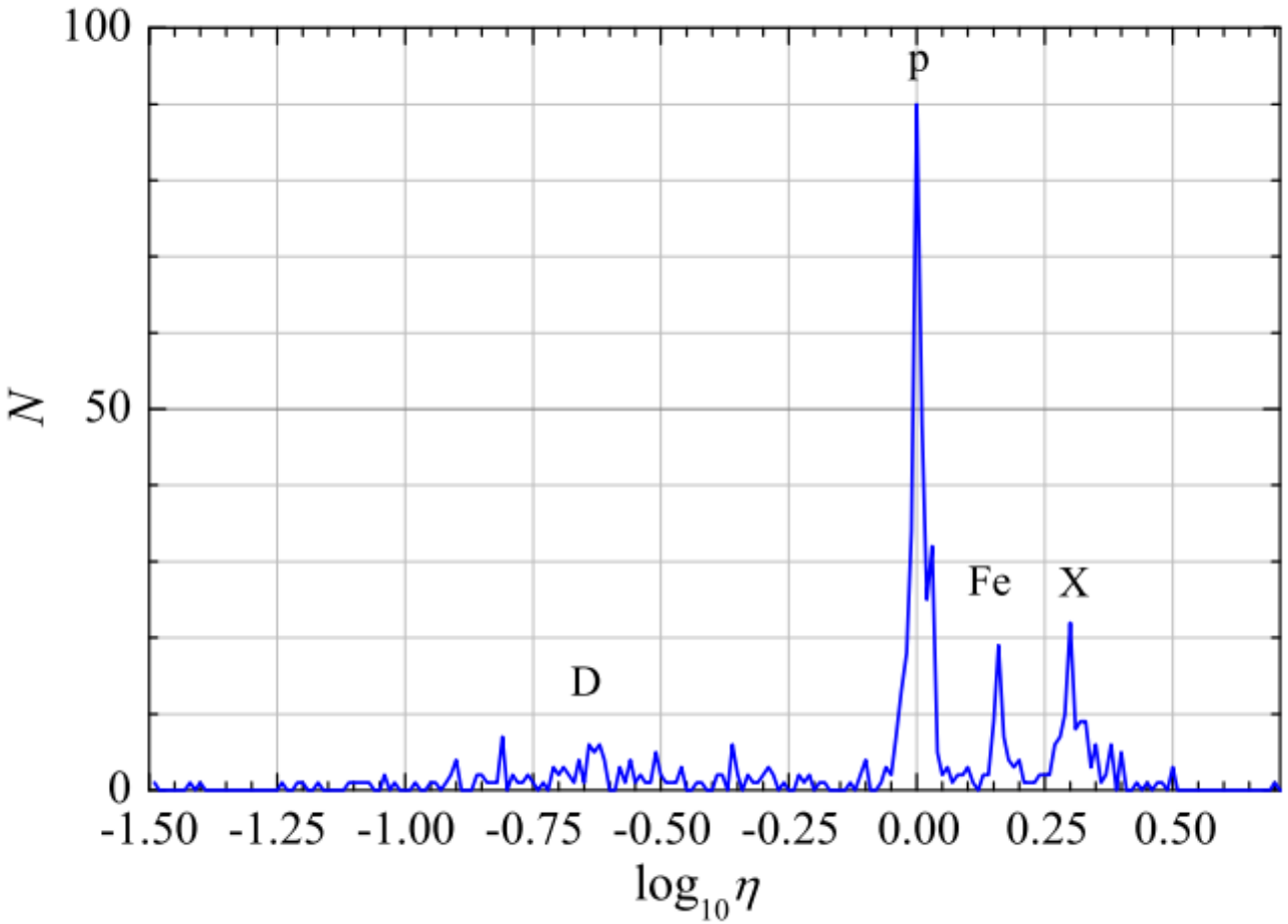
$log_{10}(E_0/\text{эВ}) \geq 19.1$



A.V. Glushkov, L.T. Ksenofontov, K.G. Lebedev, A.V. Saburov. Adv.Space Res. 77 (2026) 8452-8459.
https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.09.005

690 событий с θ ≤ 60° (1978-2018)

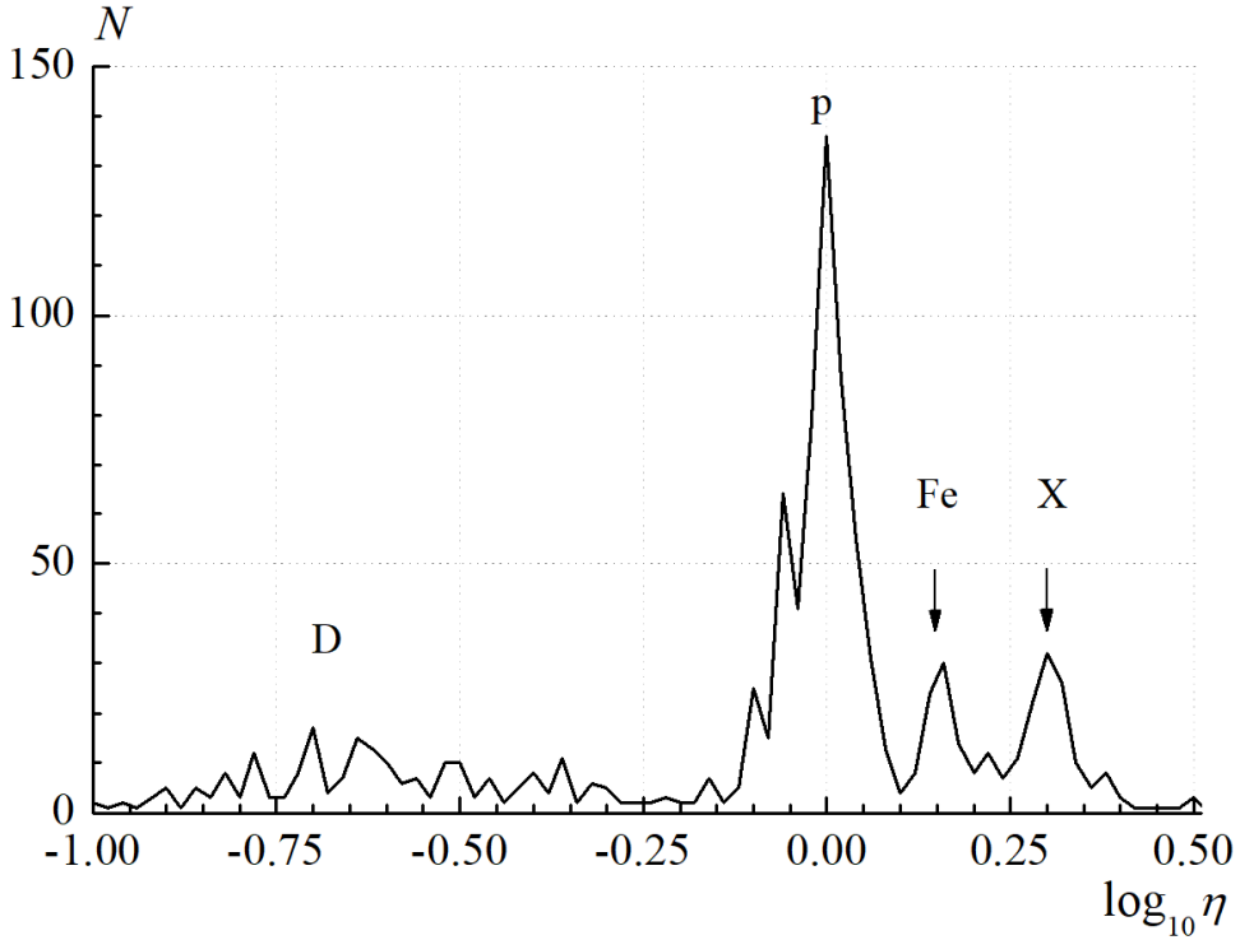
$$18.6 \leq log_{10}(E_0/\text{эВ}) \leq 19.1$$



A.V. Glushkov, L.T. Ksenofontov, K.G. Lebedev, A.V. Sabourov. Phys. Atom. Nucl.. 88, 884 (2025)
doi: 10.1134/S1063778825601660

1887 событий с θ ≤ 60° (1978-2018)

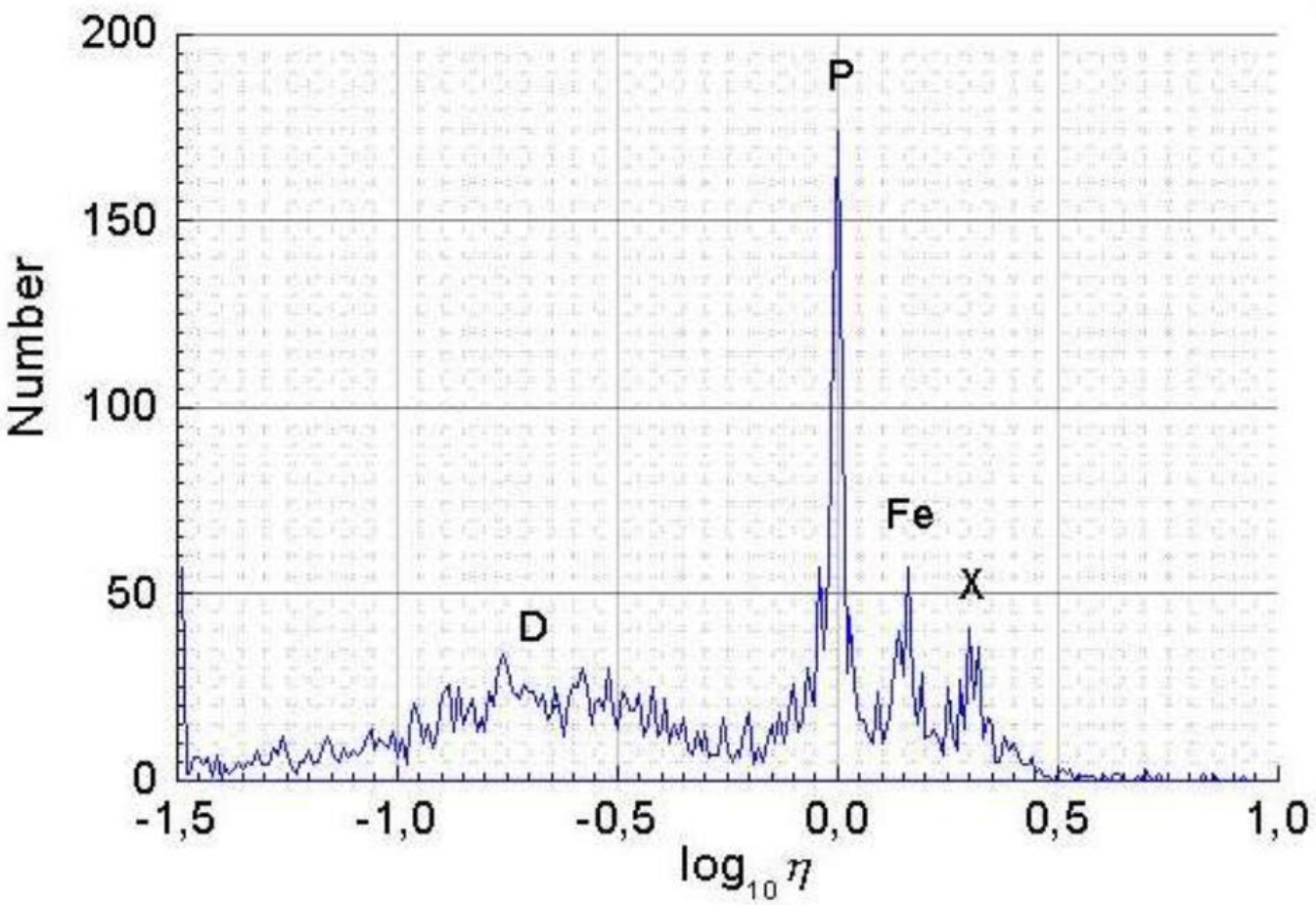
$$18.3 \leq log_{10}(E_0/\text{эВ}) \leq 19.1$$

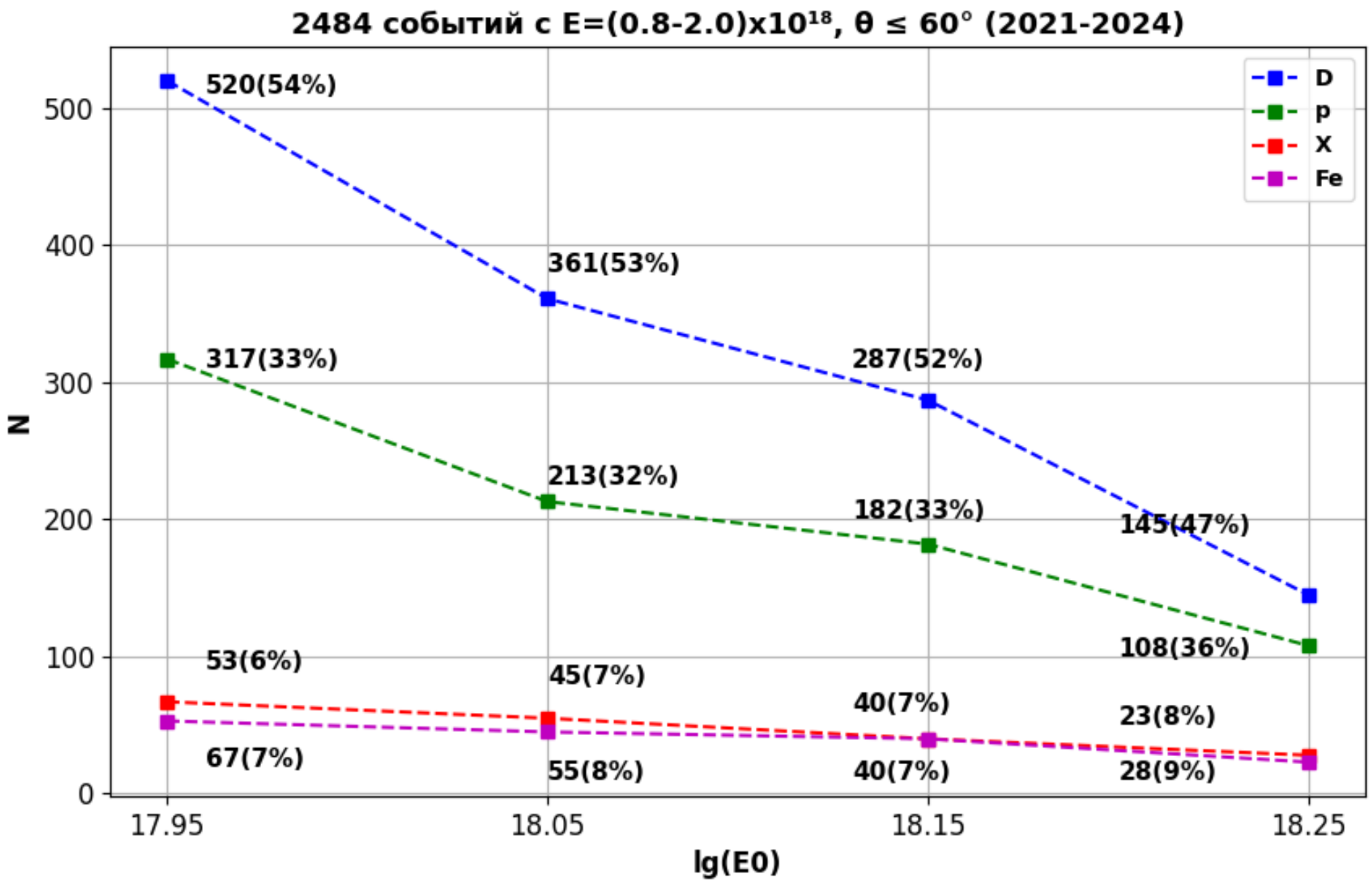


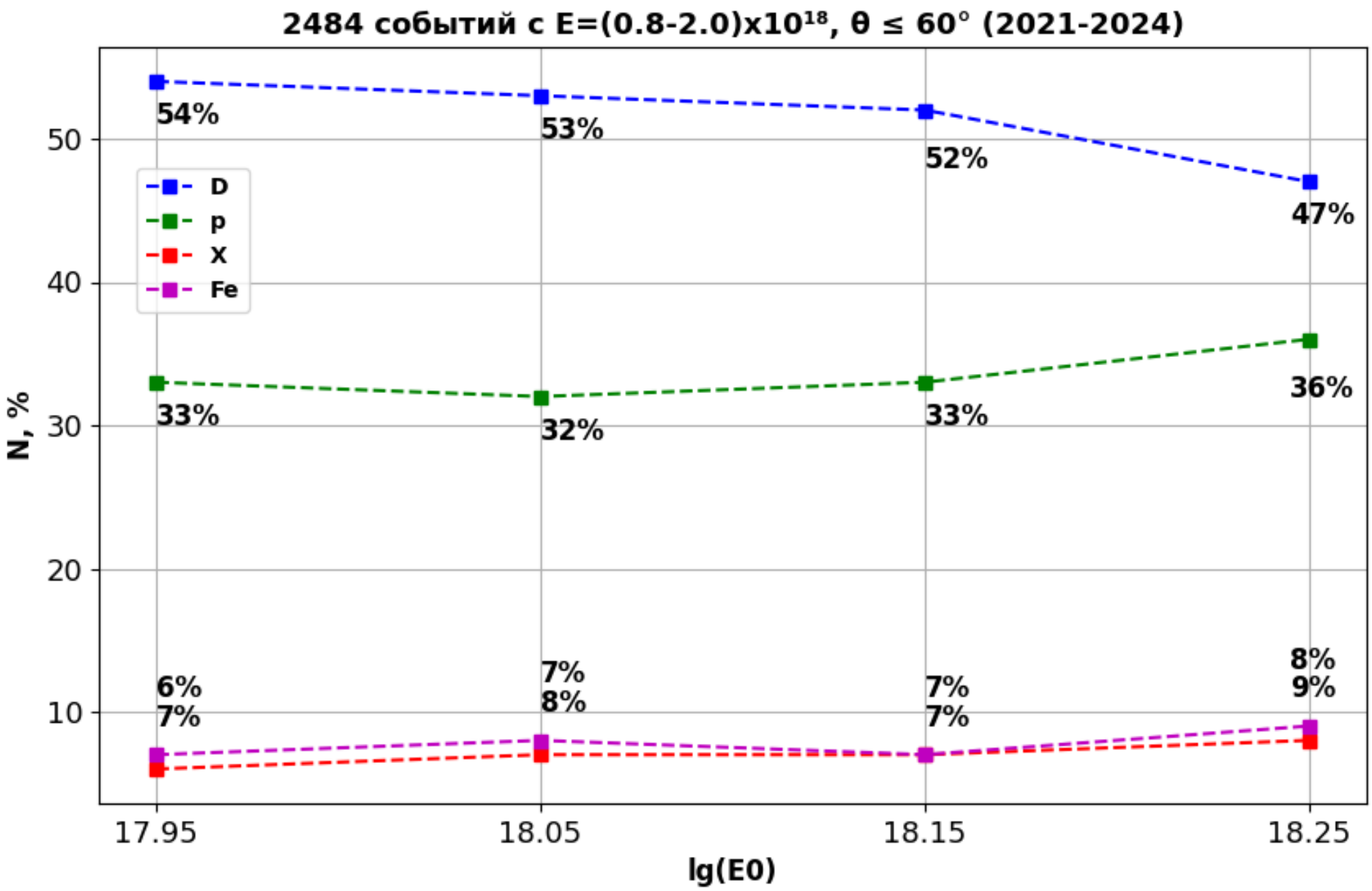
A.V. Glushkov, L.T. Ksenofontov, K.G. Lebedev, A.V. Sabourov. Phys. Atom. Nucl.. 88, 884 (2025)
doi: 10.1134/S1063778825601660

2484 событий с θ ≤ 60° (2021-2024)

$$17.9 \leq log_{10}(E_0/\text{эВ}) \leq 18.3$$

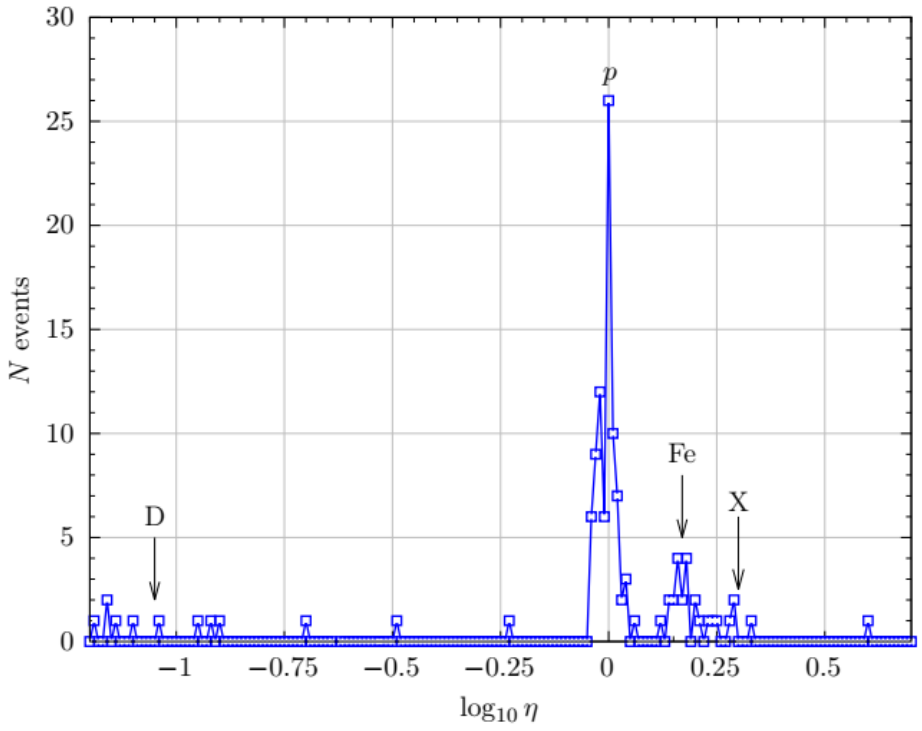


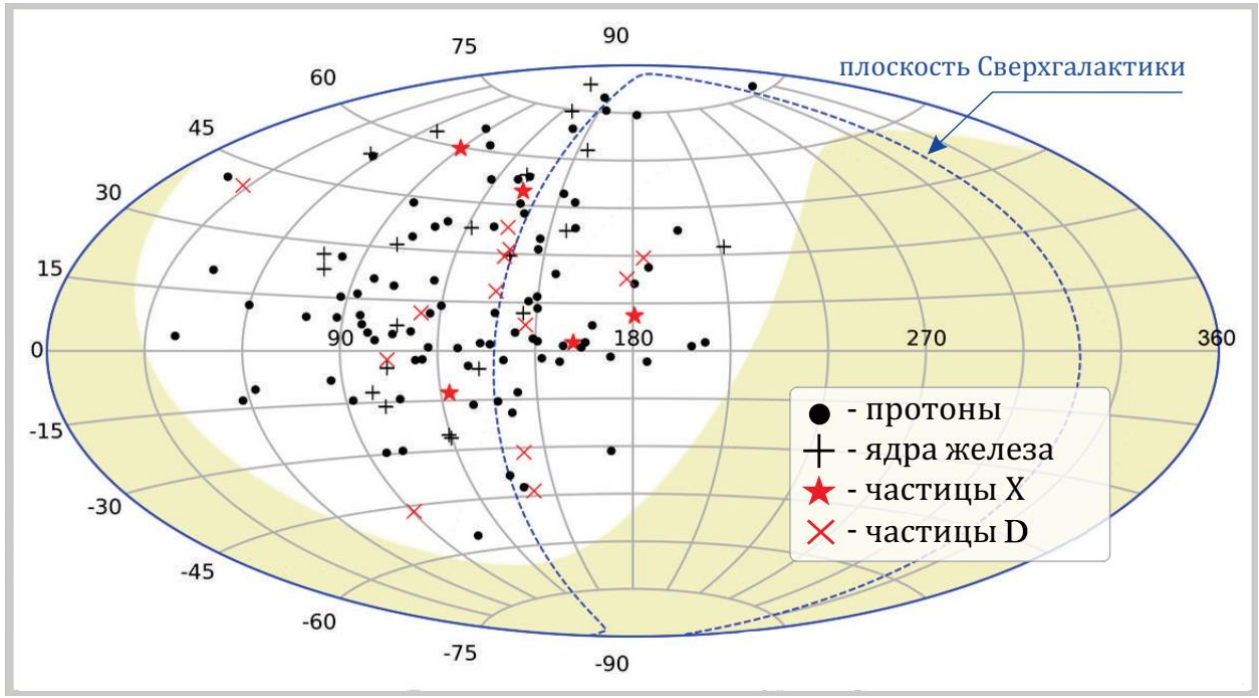

2484 событий с E=(0.8-2.0)x10¹⁸, θ ≤ 60° (2021-2024)
D
p
X
Fe
520(54%)
361(53%)
287(52%)
145(47%)
317(33%)
213(32%)
182(33%)
108(36%)
53(6%)
45(7%)
40(7%)
23(8%)
67(7%)
55(8%)
40(7%)
28(9%)
N
lg(E0)
0
100
200
300
400
500
17.95
18.05
18.15
18.25


2484 событий с E=(0.8-2.0)x10¹⁸, θ ≤ 60° (2021-2024)
D
p
X
Fe
54%
53%
52%
47%
33%
32%
33%
36%
6%
7%
7%
8%
7%
7%
8%
9%
N, %
lg(E0)
17.95
18.05
18.15
18.25
10
20
30
40
50

Пример направлений прихода

127 событий
$E \geq 1.25 \times 10^{19}$ эВ
$\theta \leq 60°$
по данным Якутской установки ШАЛ





Направления прихода

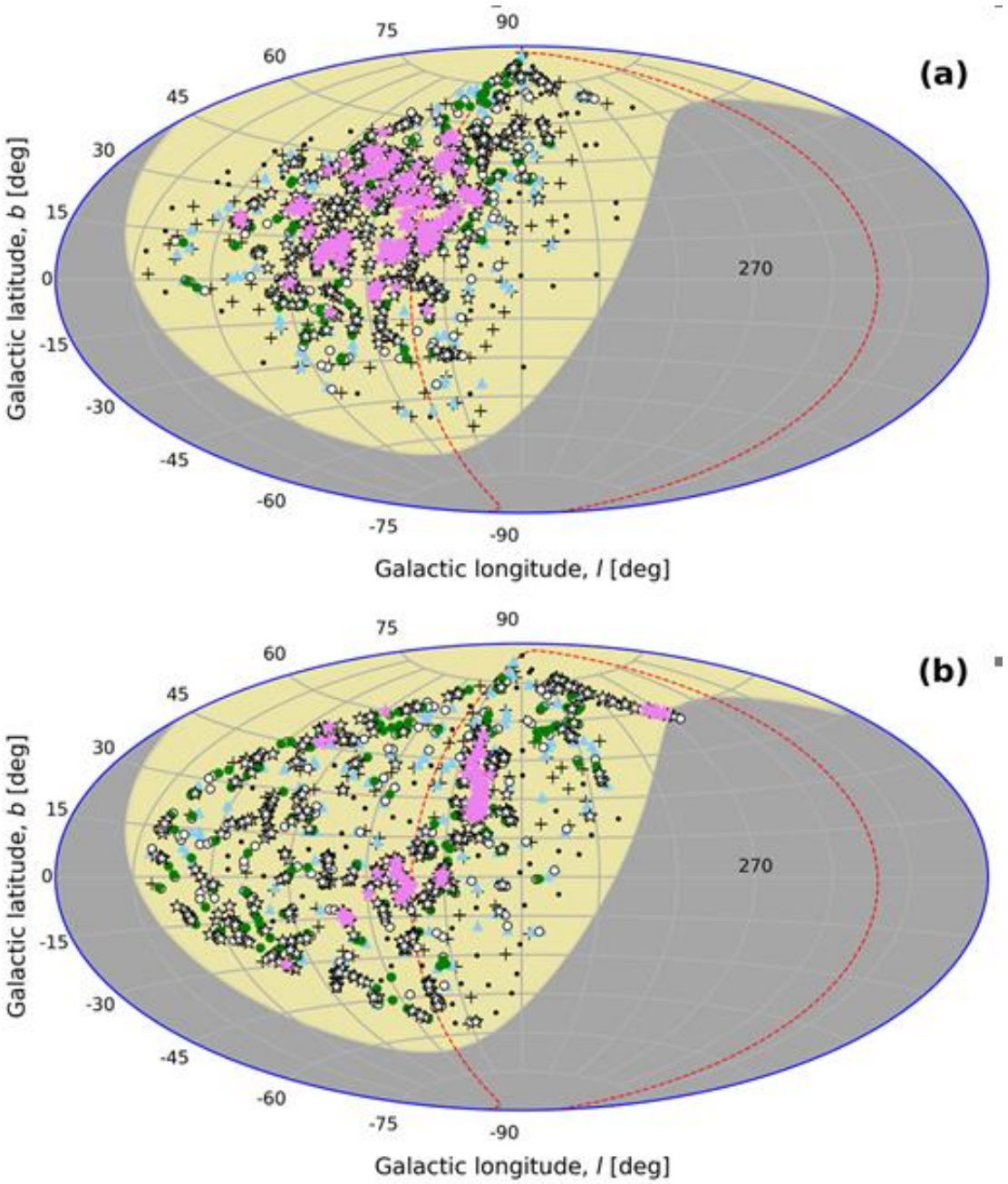
2484 событий с E = (0.8-2.0)x10^{18} эВ, $\theta \leq 60°$

Распределение на локальные группы из *m* ливней в телесных углах

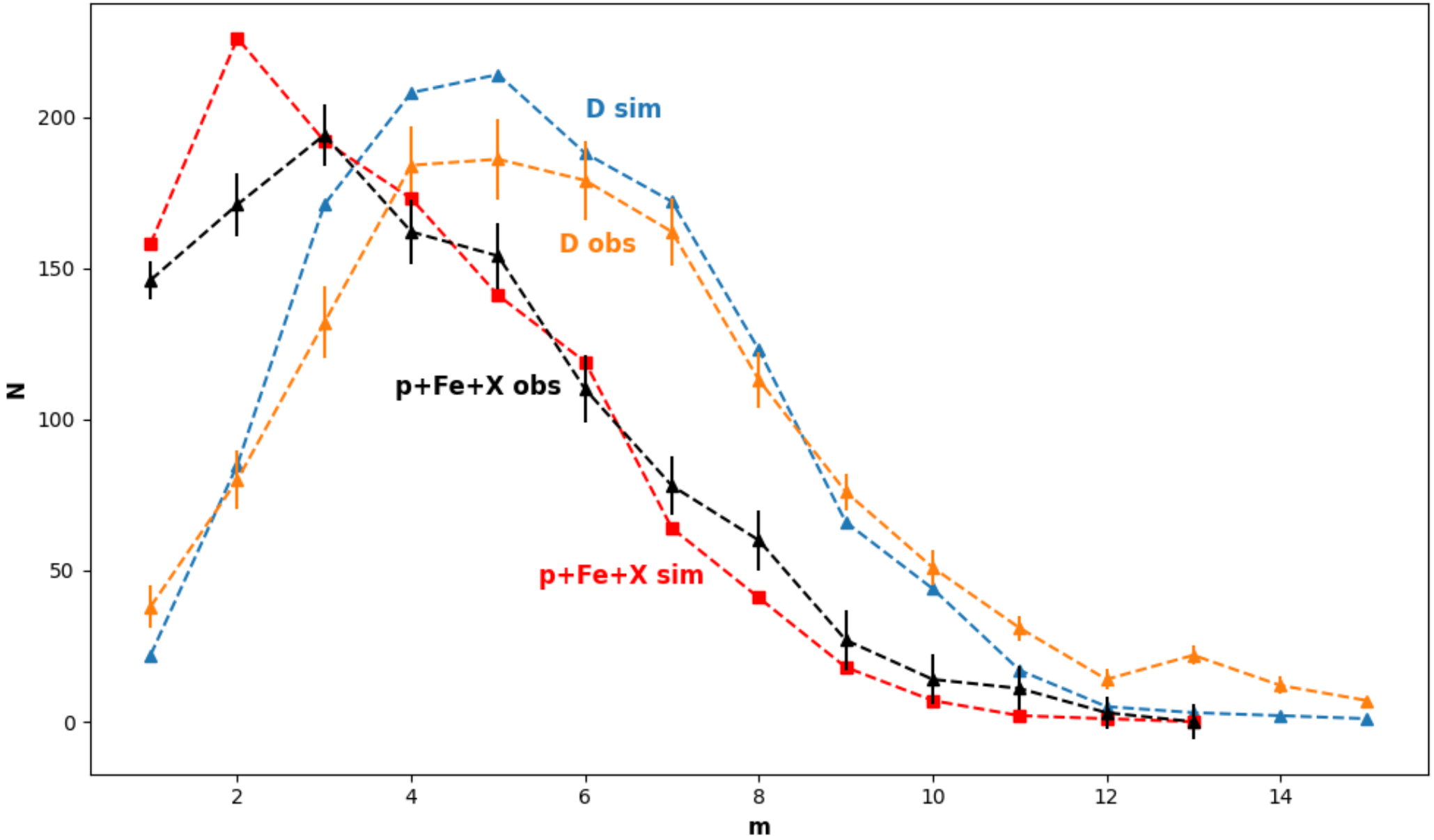
$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\psi), \qquad \psi = 4.5°$$

(a). p + Fe + X

(b). D



Сравнение распределений наблюдаемых направлений прихода с изотропными по размеру кластеров



Заключение

- Проанализированы направления прихода 2484 ШАЛ с энергией (0.8 - 2.0)x10^{18} эВ и зенитными углами $\theta \leq 60°$, зарегистрированных на модернизированной Якутской установке за период наблюдений 2021-2024 гг.

- Для этих событий с помощью метода мюонной корреляции были выделены четыре группы с разным содержанием мюонов.

- Данные демонстрируют определенную тенденцию к образованию мелкомасштабных кластеров. Наблюдаются отдельные крупные кластеры, которые, возможно, указывают на астрофизические источники.

- Мы продолжаем исследования в этом направлении.

Спасибо за внимание