39 Всероссийская конференция по космическим лучам

Сопоставление электрон-фотонной и адронной компонент ШАЛ в области первого излома спектра космических лучей

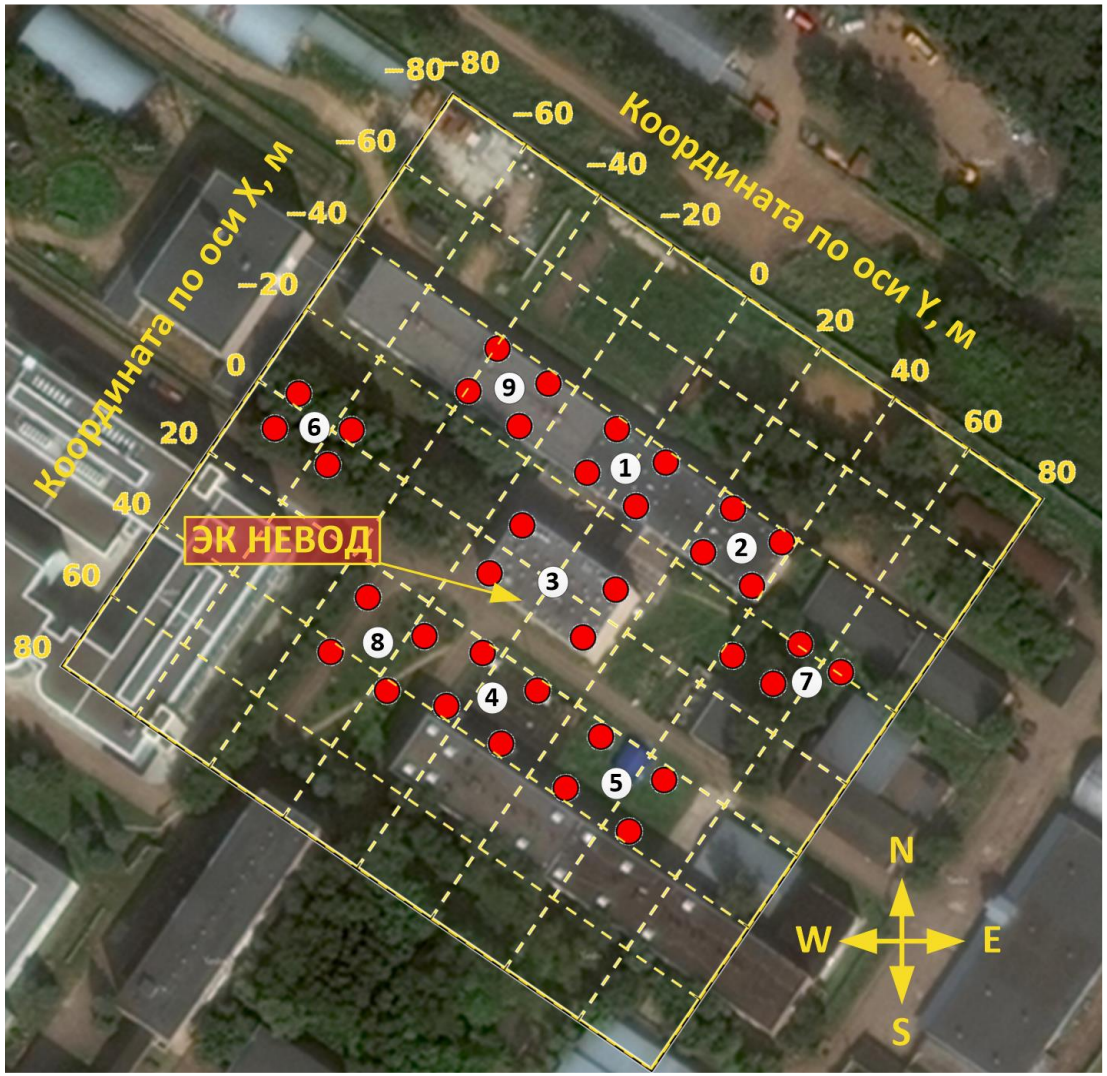
Южакова Е.А., Богданов А.Г., Громушкин Д.М., Коновалова А.Ю., Федоров Д.В., Стенькин Ю.В., Хохлов С.С., Шульженко И.А.

Дубна

29 июня 2026 г.

Установка для регистрации электрон-фотонной компоненты

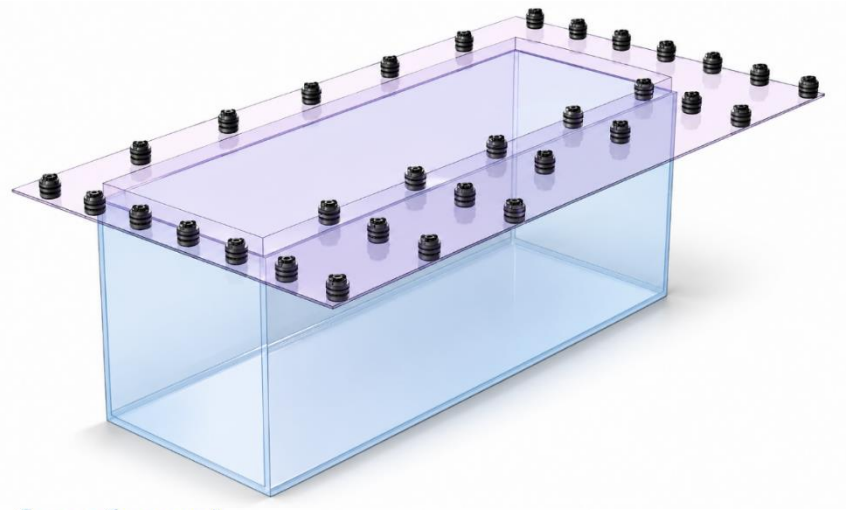
НЕВОД-ШАЛ



- **9** кластеров, **36** детектирующих станций (ДС);
- **144** сцинтилляционных детектора;
- Площадь **10^4** м^2.

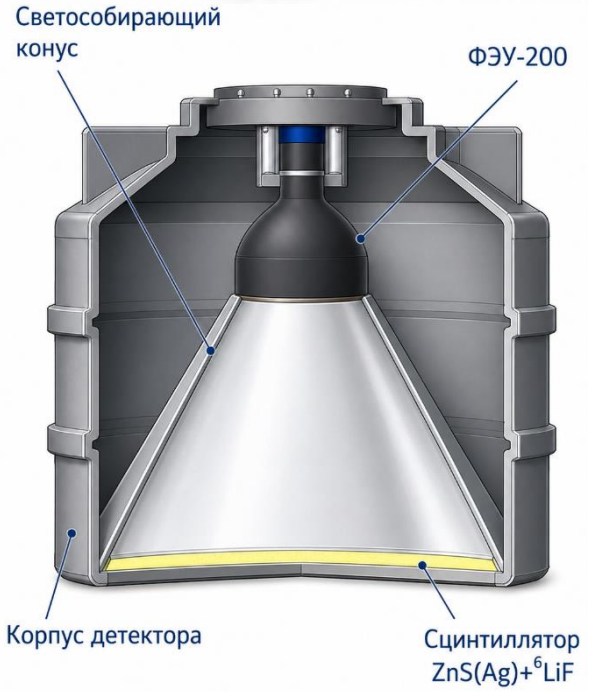
Установка для регистрации нейтронной компоненты

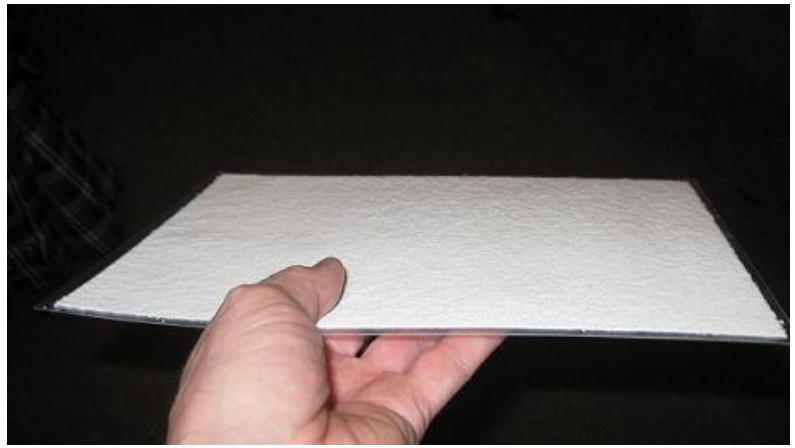
ПРИЗМА-32



Адронная + заряженная компонента

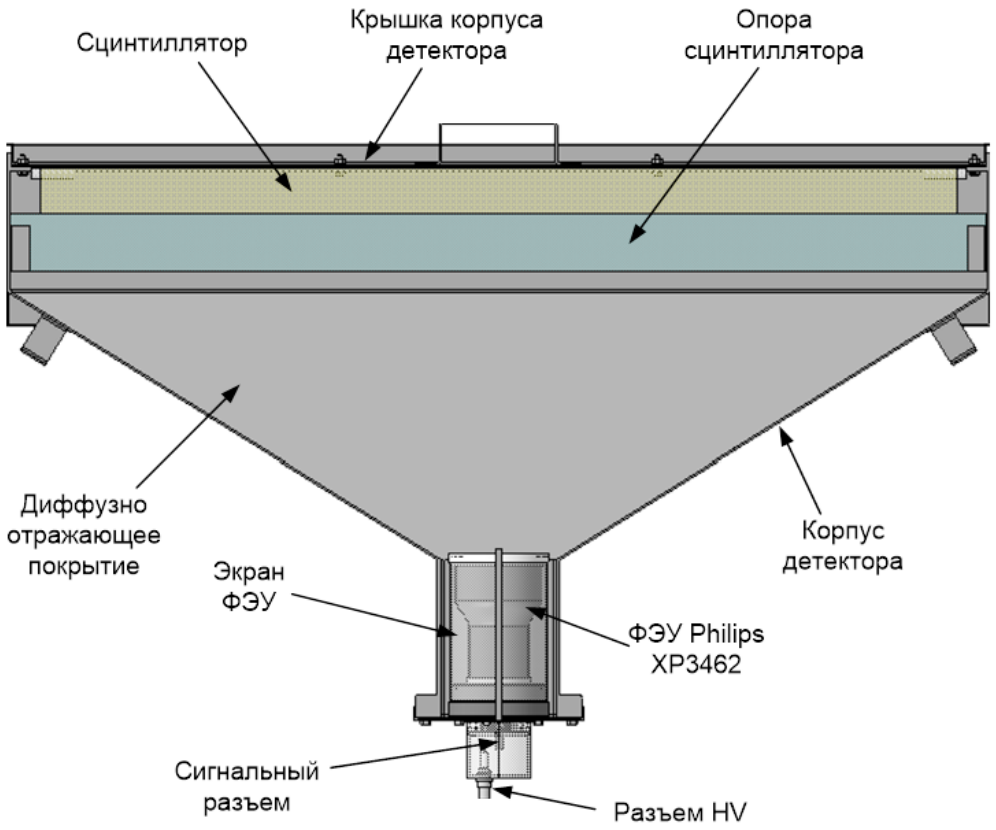
- **32** эн-детектора;
- Площадь эн-детектора: **0.36 м²**;
- Охватываемая площадь: **~ 500 м²**;
- Сцинтиллятор: **ZnS(Ag) + LiF**.





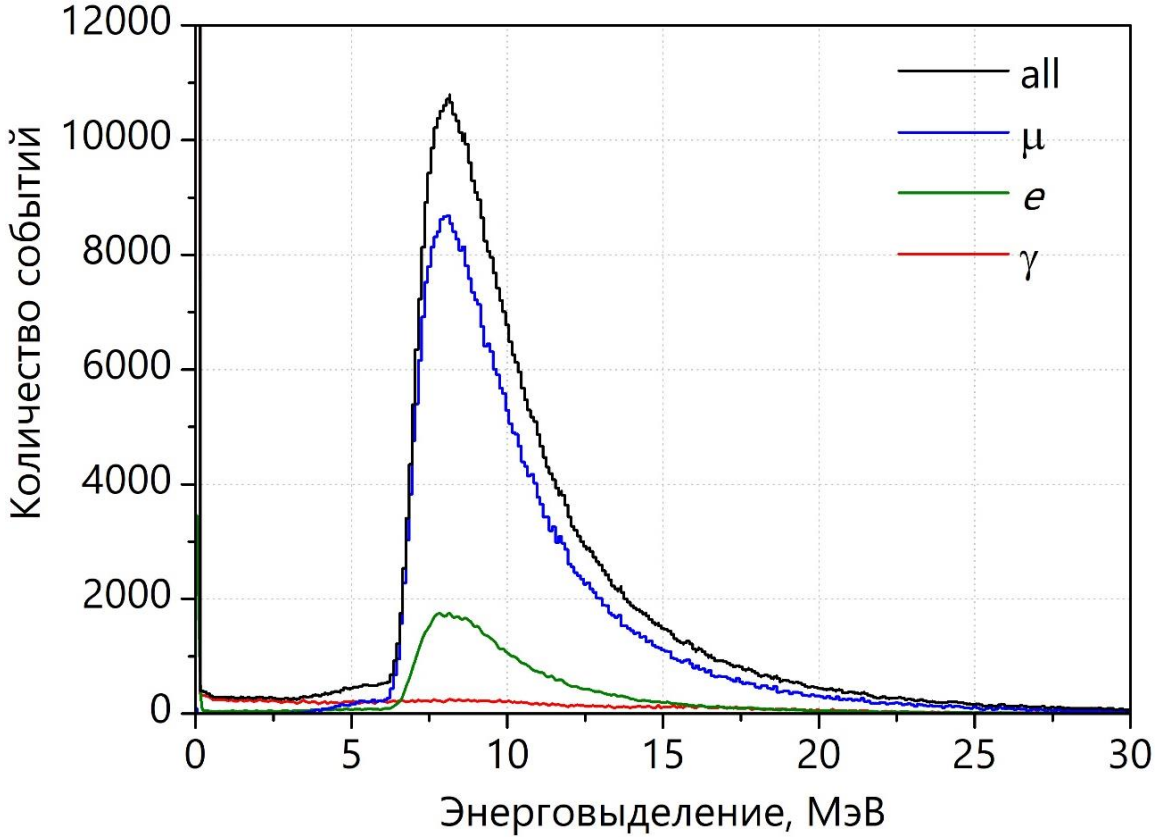
Калибровка сцинтилляционных детекторов

Установка НЕВОД-ШАЛ



Пластиковый сцинтиллятор NE102A

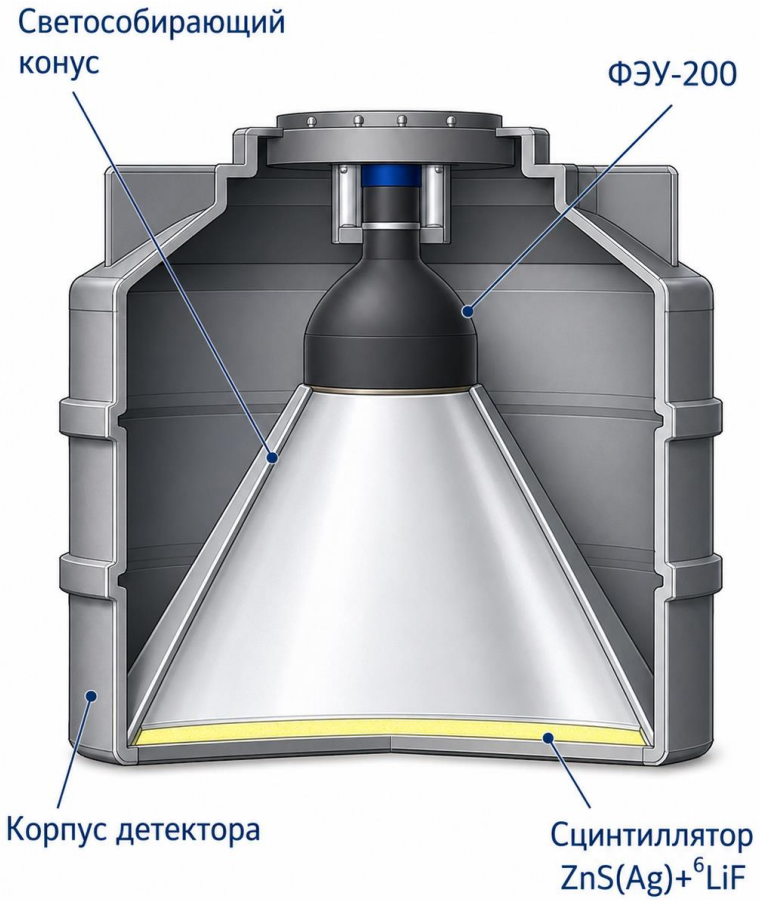
Распределение энерговыделения одиночных частиц в сцинтилляторе (CORSIKA + Geant4)



Мюонный пик в эксперименте (13 пКл) соответствует $E_{пик.}$ = **8.15 МэВ**

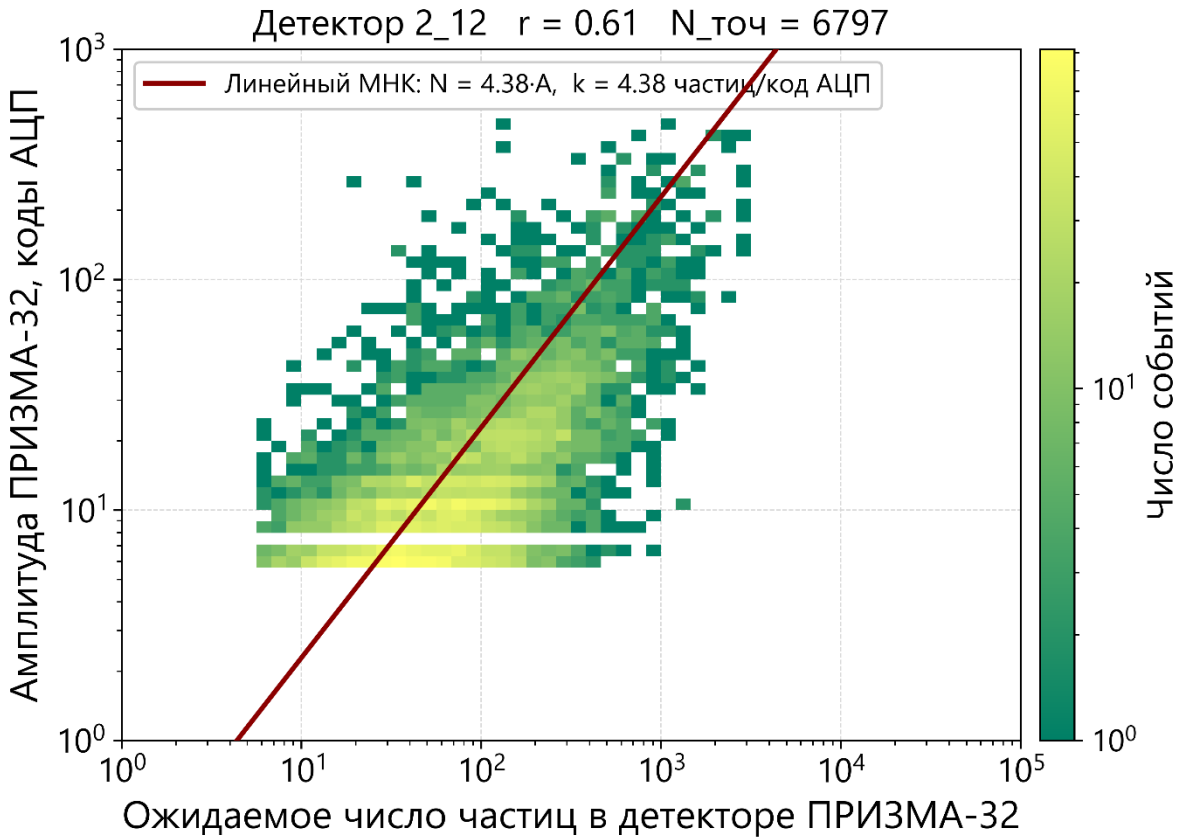
Калибровка электрон-нейтронных детекторов

Установка ПРИЗМА-32



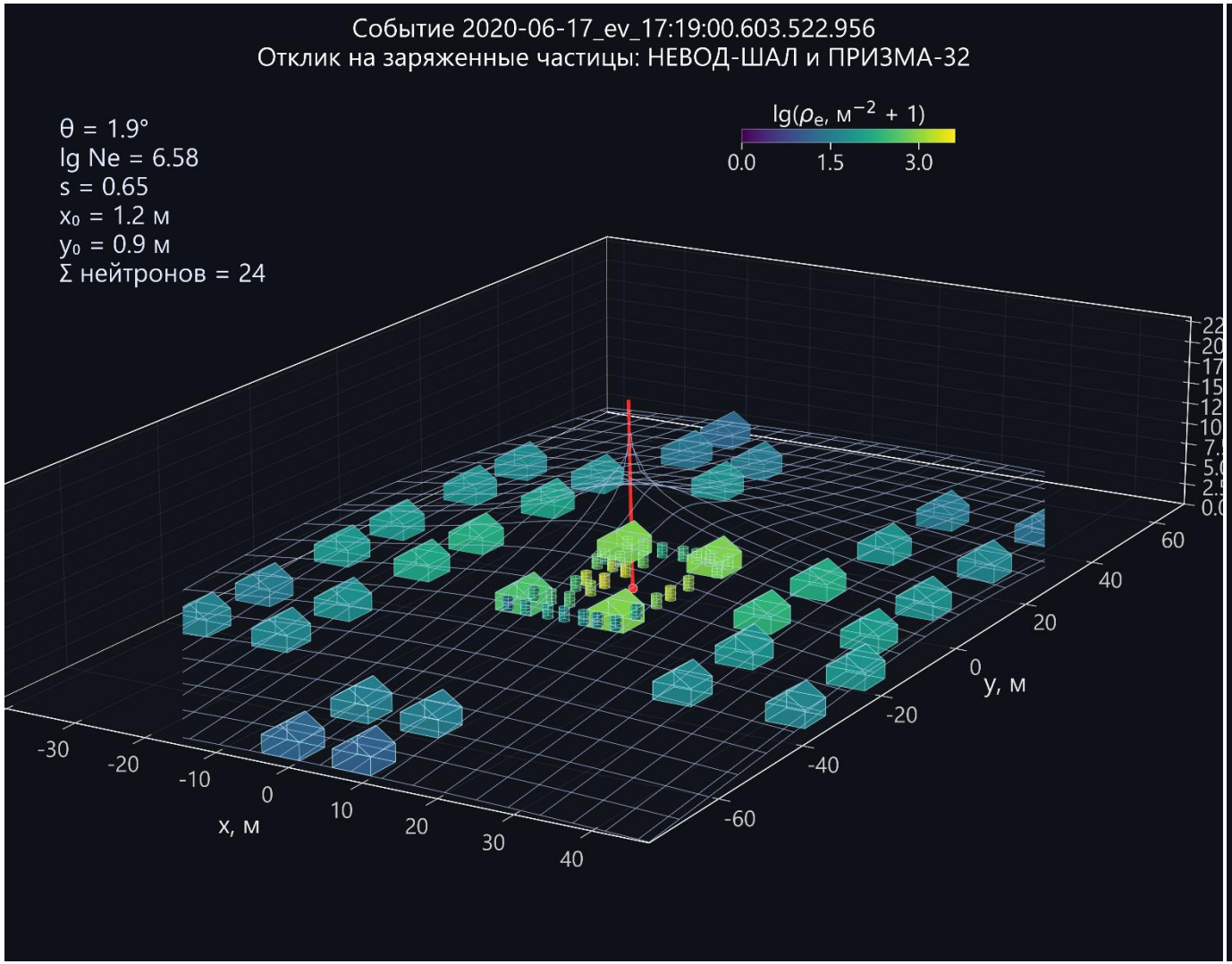
$^6Li + n \rightarrow {}^3H + \alpha + 4.8$ МэВ

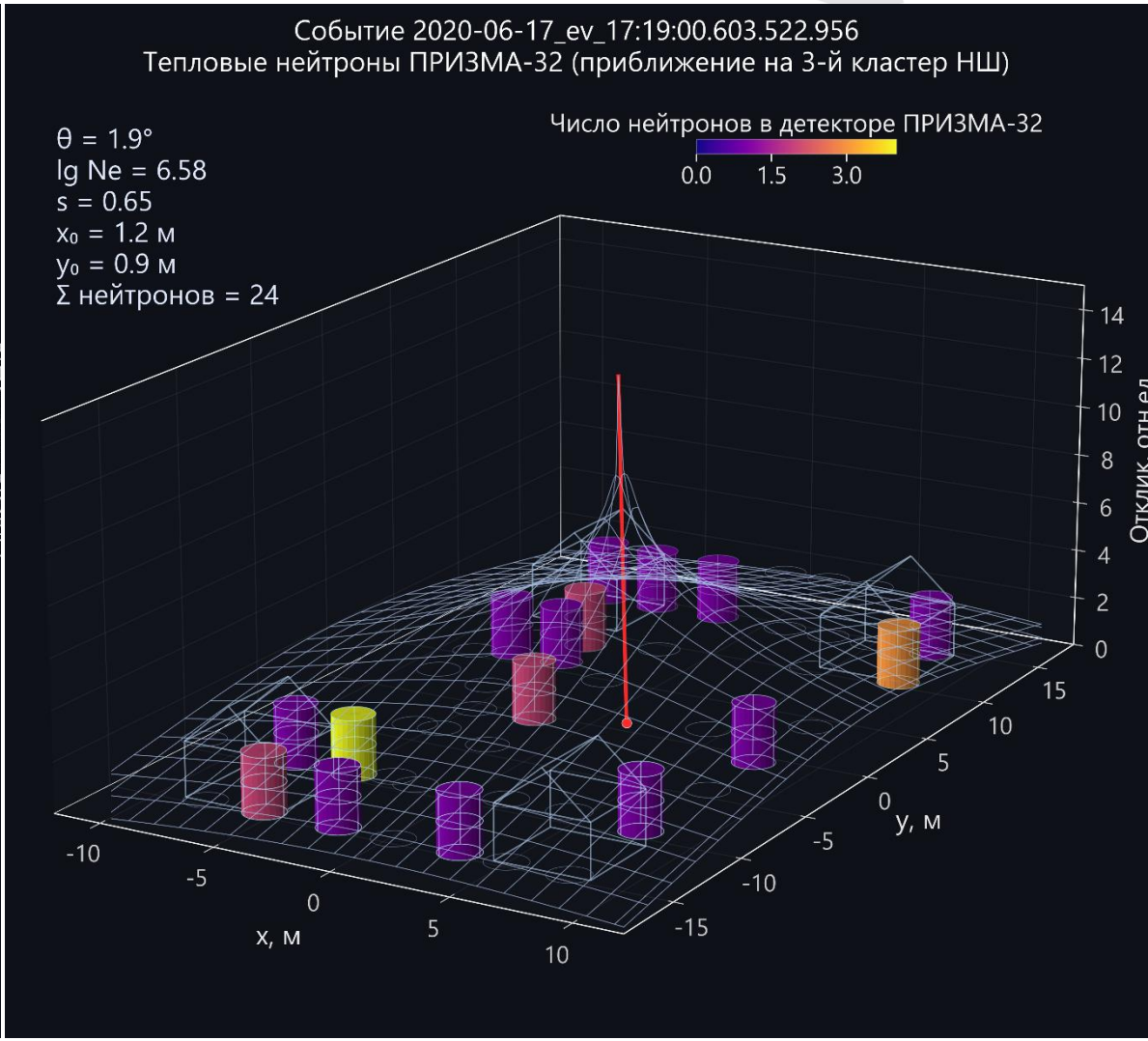
Совместные события с НЕВОД-ШАЛ



#128. Федоров Д.В. Калибровка э-н детекторов с тонким сцинтиллятором установок УРАН и ПРИЗМА-32 по заряженной компоненте ШАЛ

Пример совместного события

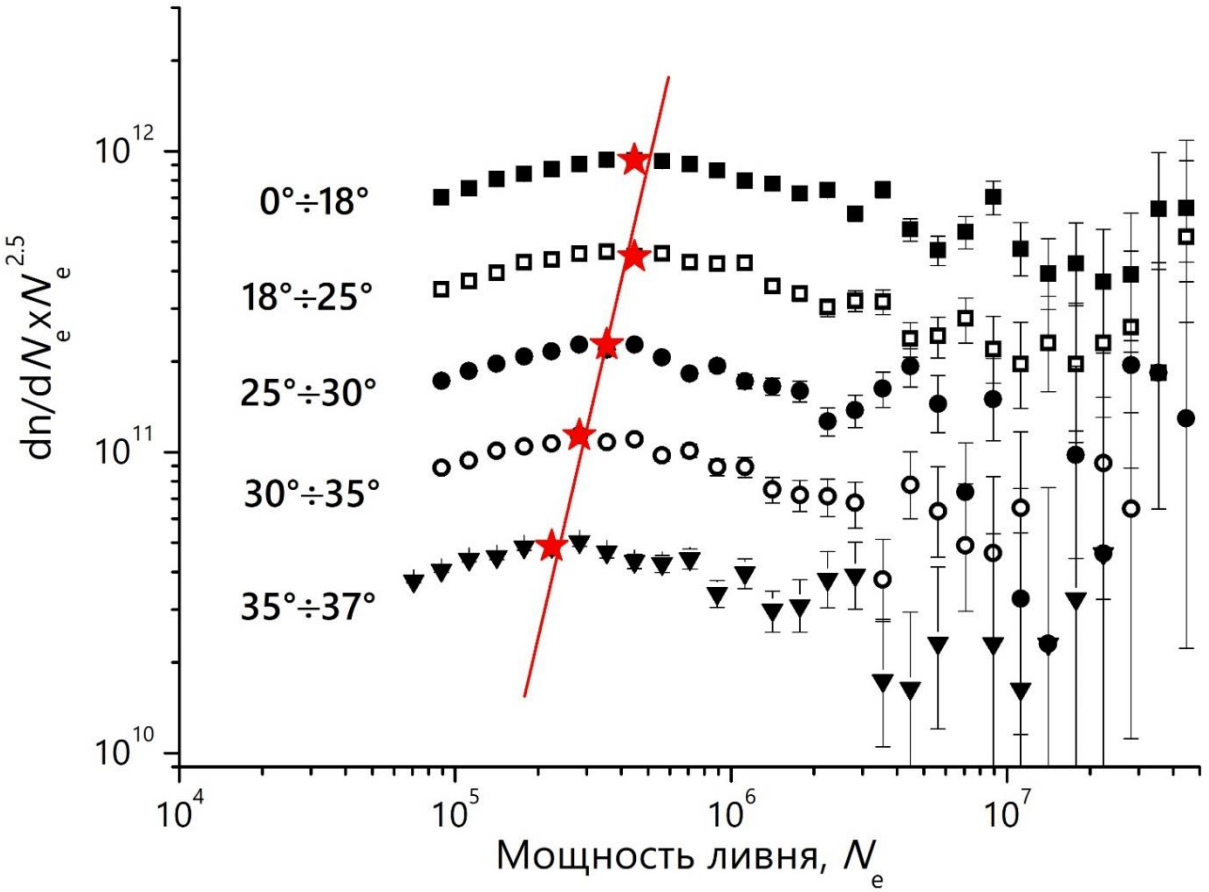




Результаты НЕВОД-ШАЛ

~ 4 года эксперимента

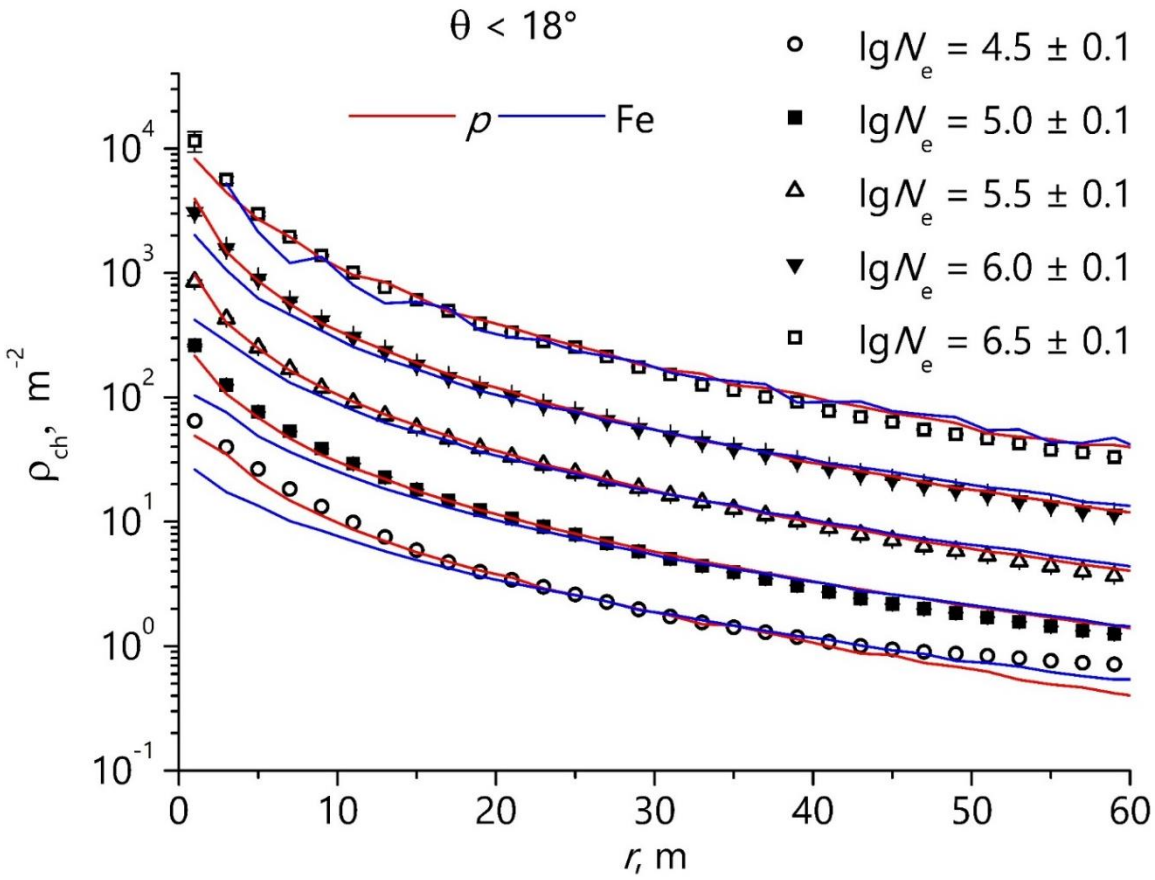
Спектр по числу заряженных частиц



Для θ < 18°

lgN_{ek} = 5.65, Δk = 0.33

ФПР электрон-фотонной компоненты



CORSIKA (QGSJET-II-04 + FLUKA 2020.0.3);

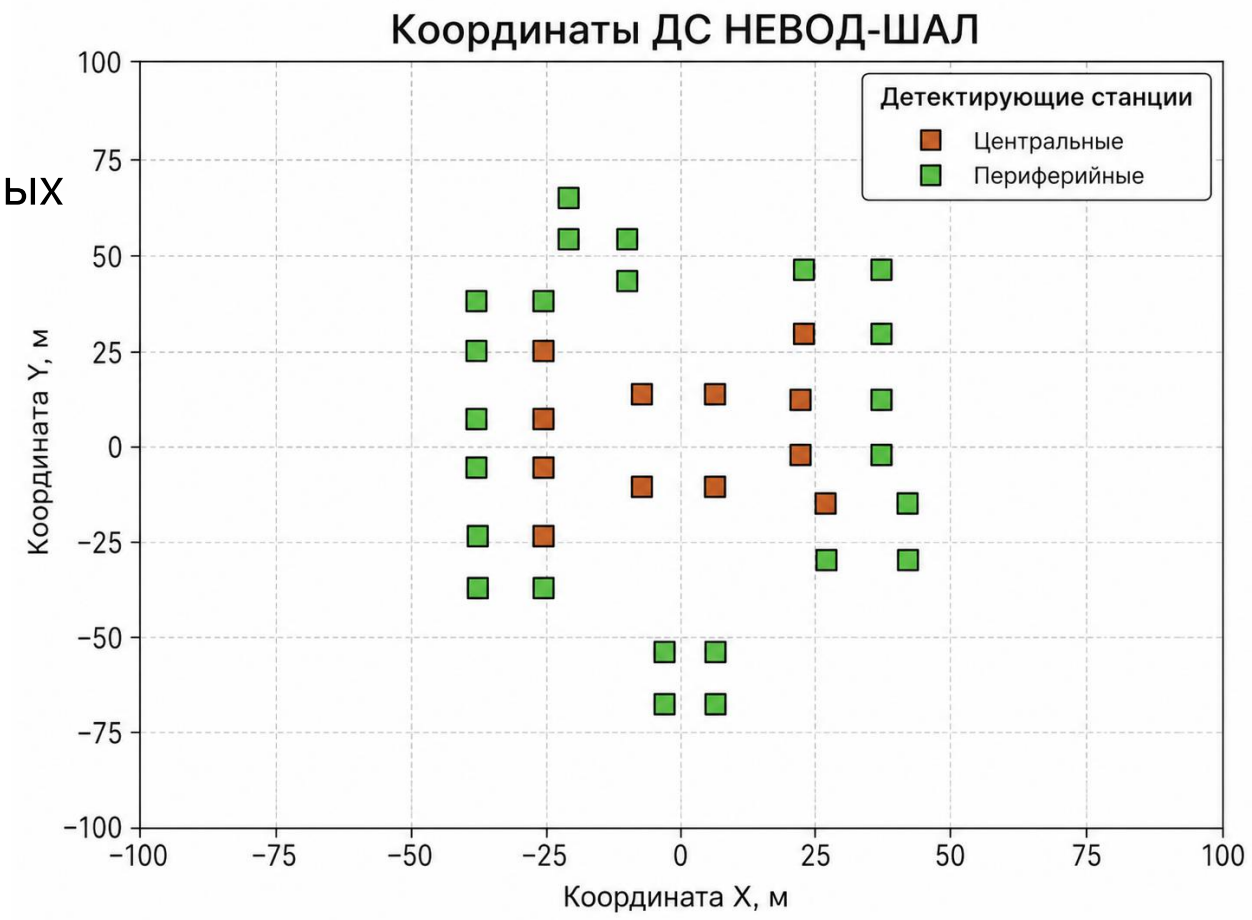
p, Fe, **E = 10^{14} ÷ 10^{17}** эВ, (γ + 1) = 2.7

θ = 0° ÷ 50°, равномерно по cosθ

Отбор совместных событий

Временной интервал совпадения ±300 нс;
За 2018 – 2023 гг. найдено ~ 470 000 совместных событий.

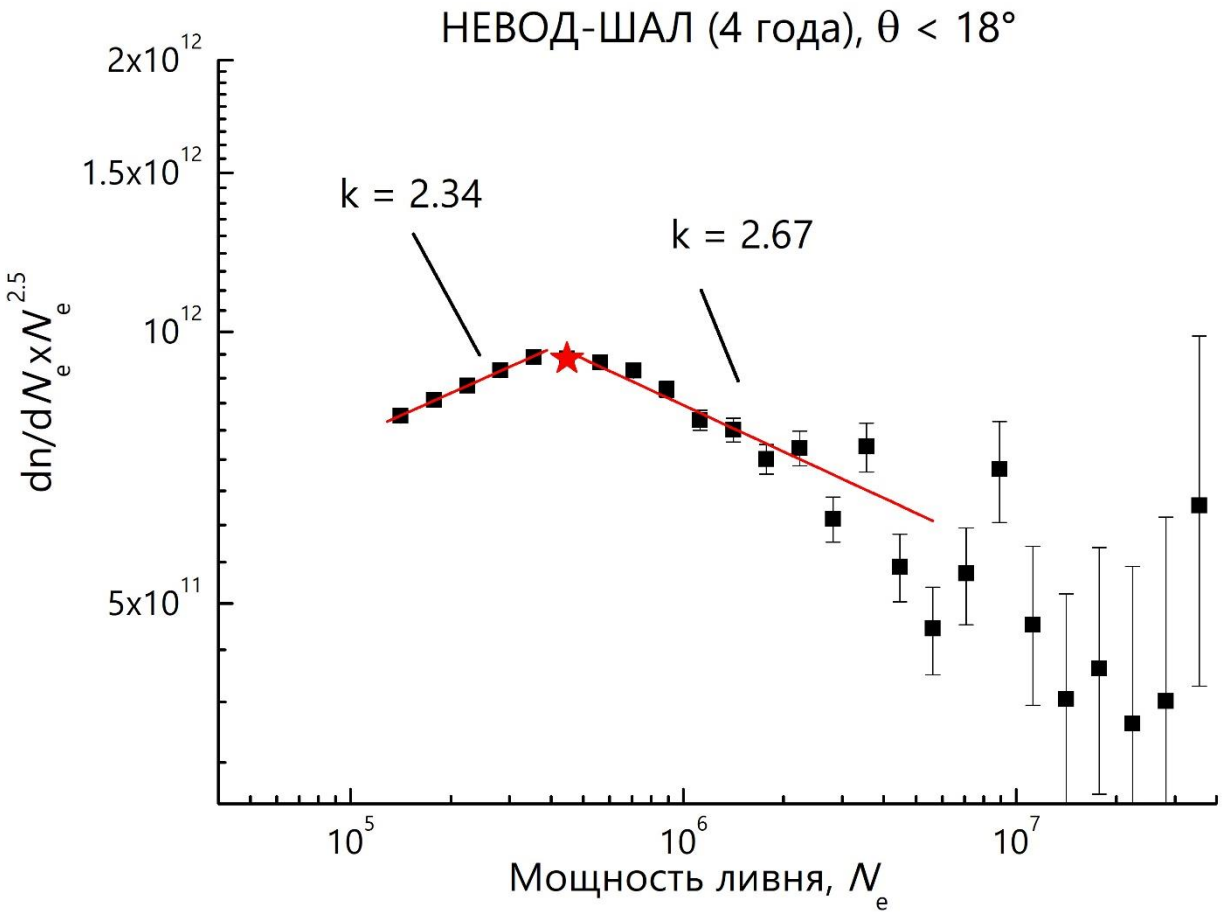
- Максимальная плотность частиц в центральных станциях;
- Сработало 5 и более кластеров;
- Суммарное энерговыделение более 1 ГэВ;
- Зенитный угол θ < 30°.



После отбора: **190 000** совместных событий.

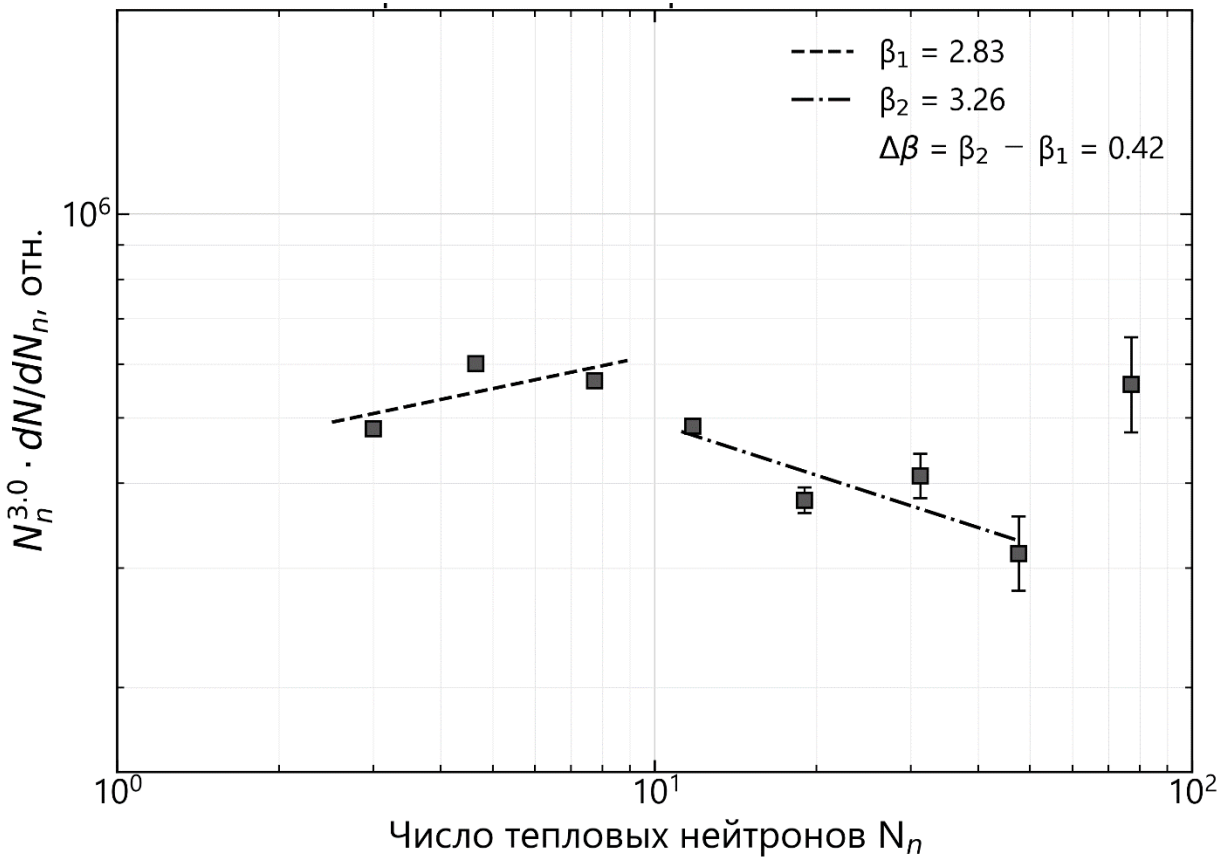
Спектры по различным компонентам ШАЛ

Спектр по числу электронов НЕВОД-ШАЛ



$\lg N_{ek} = 5.65$
$\Delta k = 0.33$

Спектр по числу тепловых нейтронов ПРИЗМА-32

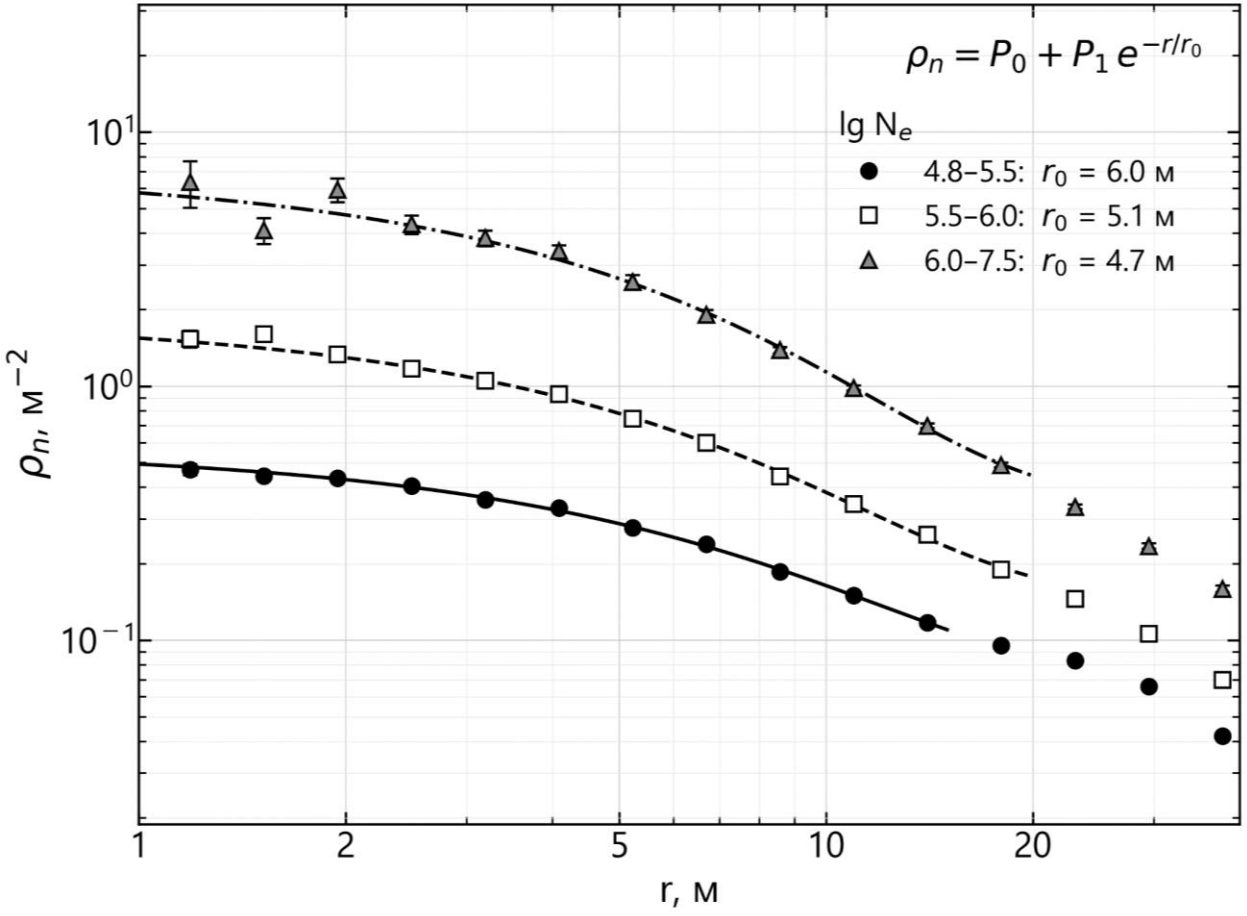


$\lg N_{nk} = 1.02$
$\Delta\beta = 0.42$

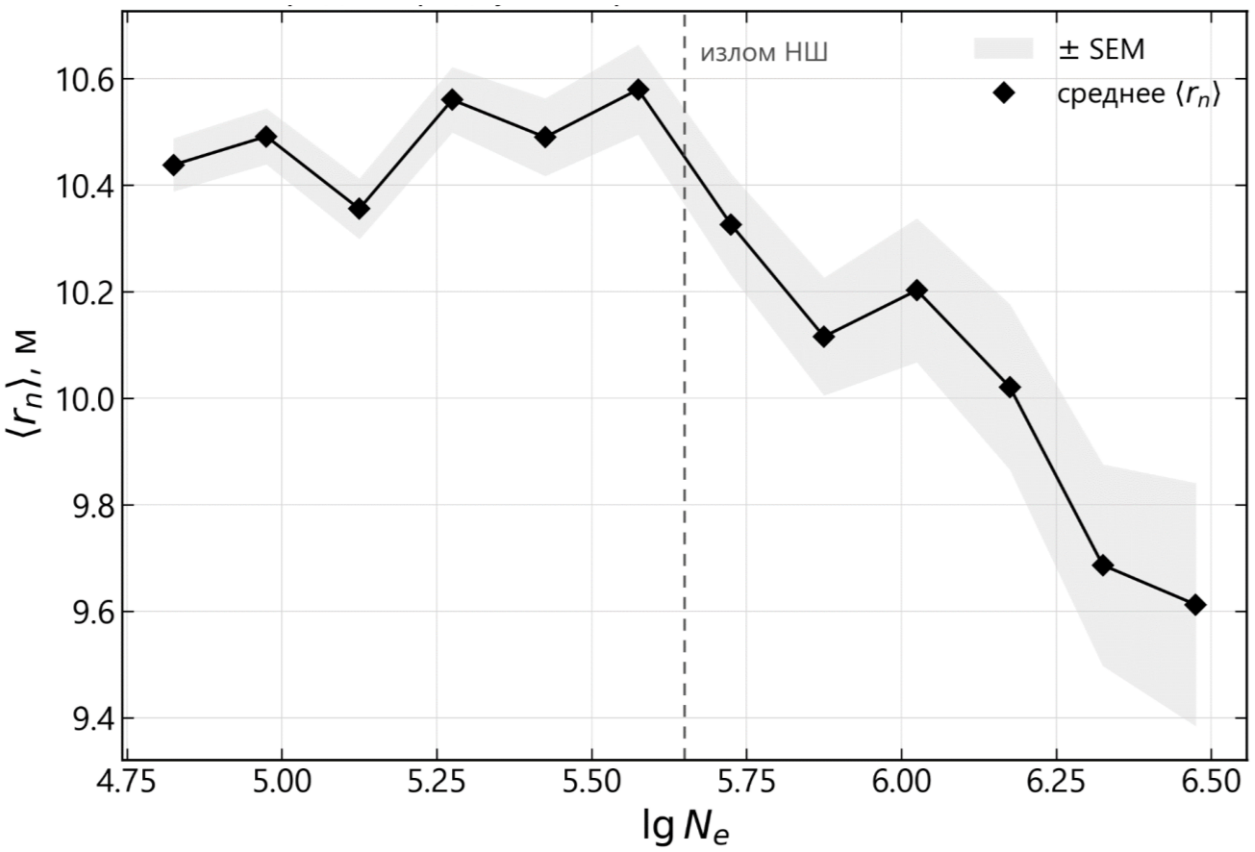
Предварительный результат

Результаты ПРИЗМА-32

Средняя ФПР тепловых нейтронов



Средний радиус регистрации тепловых нейтронов относительно оси ШАЛ



$r_n = \frac{\sum_i n_i \cdot r_i}{\sum_i n_i}$, n_i - число нейтронов, r_i - расстояние до оси ливня

На каком характерном расстоянии от оси ливня в среднем появляется нейтронный сигнал?

Предварительный результат

Заключение

1. Установка НЕВОД-ШАЛ позволяет проводить калибровку установок с электрон-нейтронными детекторами ПРИЗМА-32, ПРИЗМА-36 и УРАН.

2. В данных НЕВОД-ШАЛ наблюдается излом в спектре мощности **предварительно** в районе $\mathbf{lg}\boldsymbol{N}_{\mathbf{e}}$ **~ 5.65** на величину **0.33.**

3. В данных ПРИЗМА-32 наблюдается излом в спектре тепловых нейтронов **предварительно** в районе $\mathbf{lg}\boldsymbol{N}_{\mathbf{n}}$ **= 1.02** на величину **0.42.**

4. По данным ПРИЗМА-32 для N_e до излома $\langle \mathbf{r_n} \rangle$ составляет ~ 10.5 м, после излома уменьшается до 9.6 м.

Спасибо за внимание!

PRISMA-YBJ

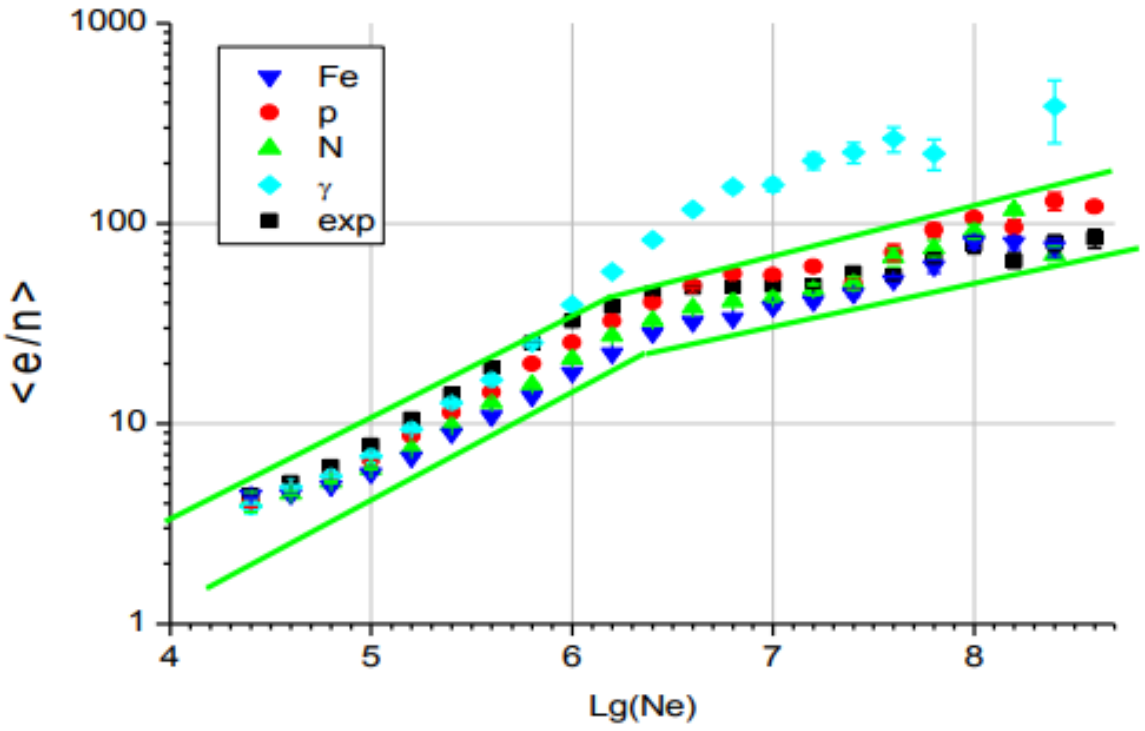
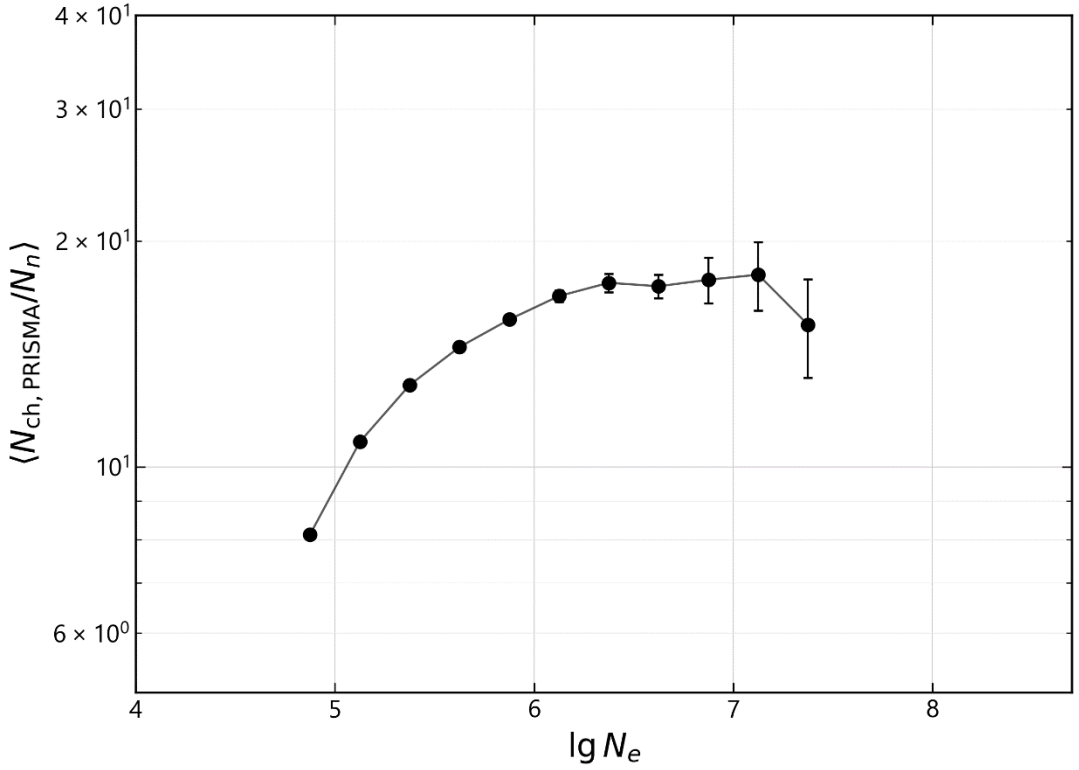


Figure 2: The e/n ratio as a function of Ne: measured and calculated for different A. Green lines indicate a corridor of possible statistical and systematic errors.

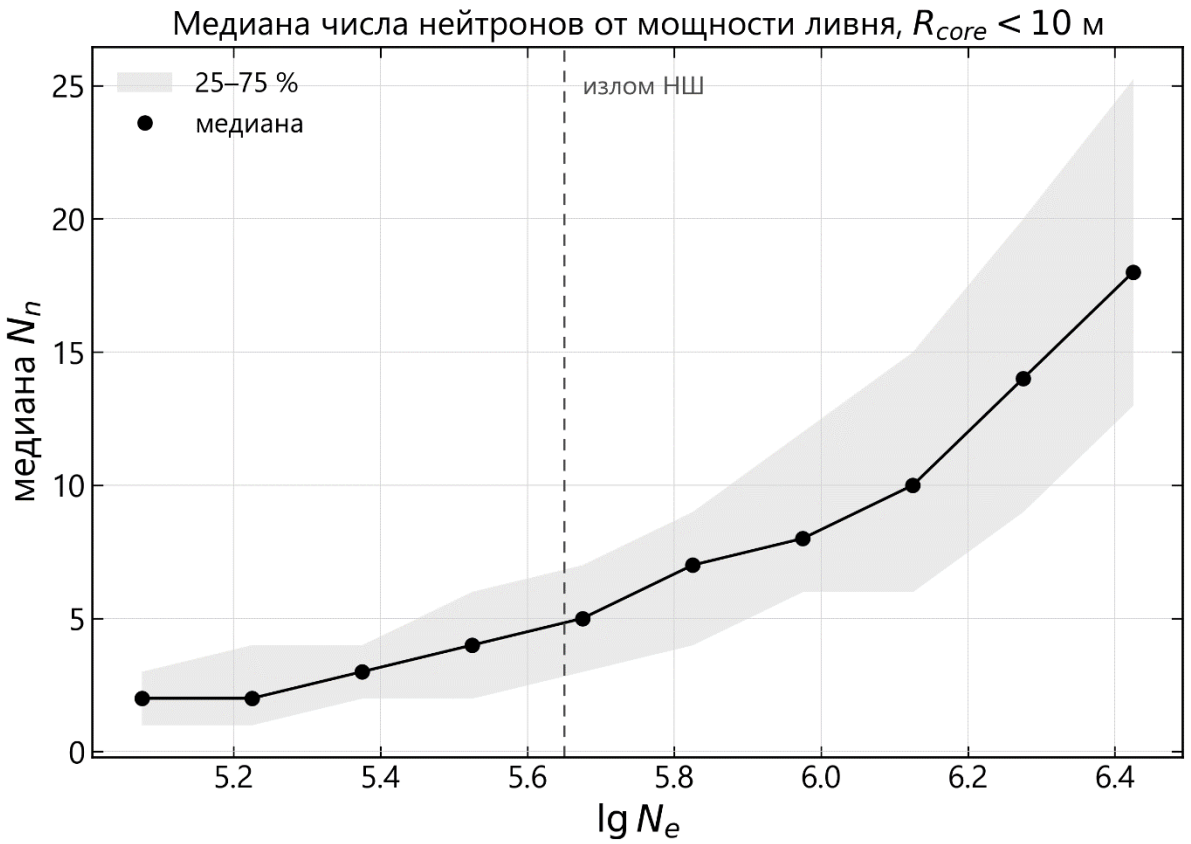
Установка ПРИЗМА-32

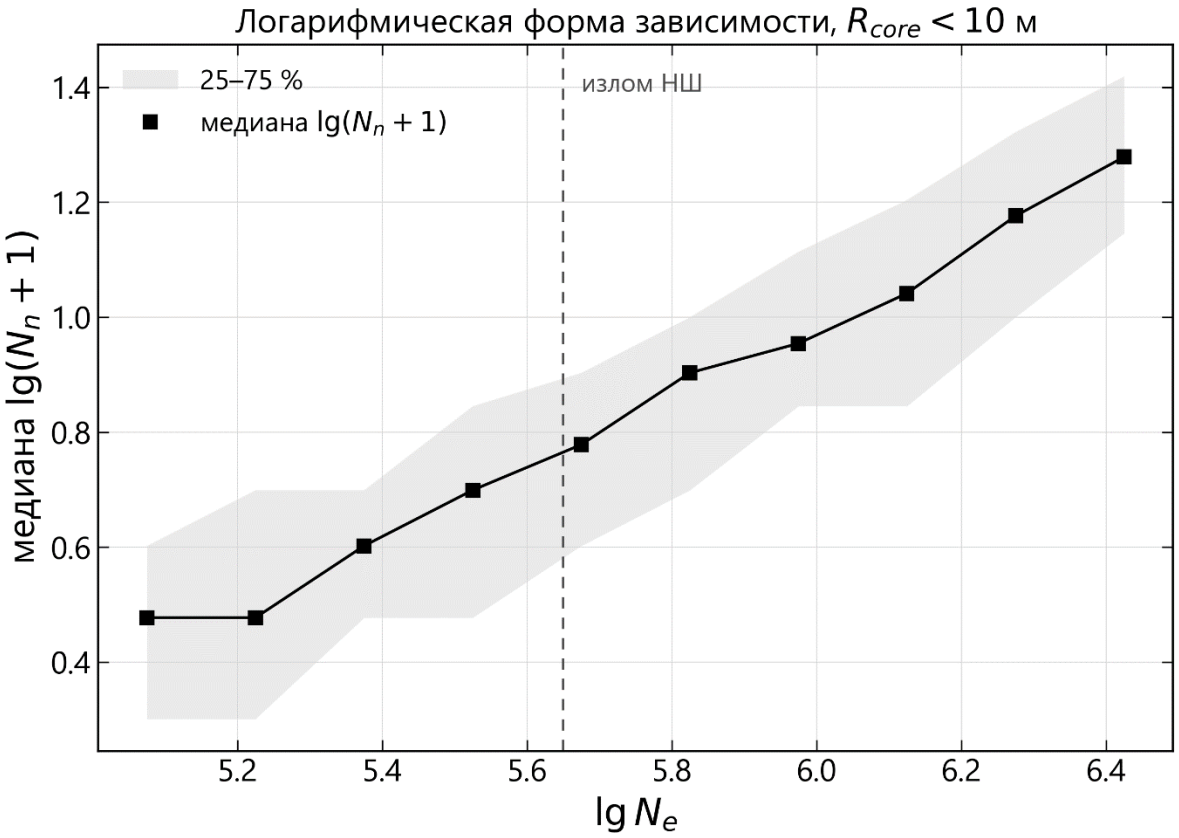


Stenkin Yu.V. et. al. Primary cosmic ray mass composition above 1 PeV as measured by the PRISMA-YBJ array. 35th International Cosmic Ray Conference – ICRC (2017).

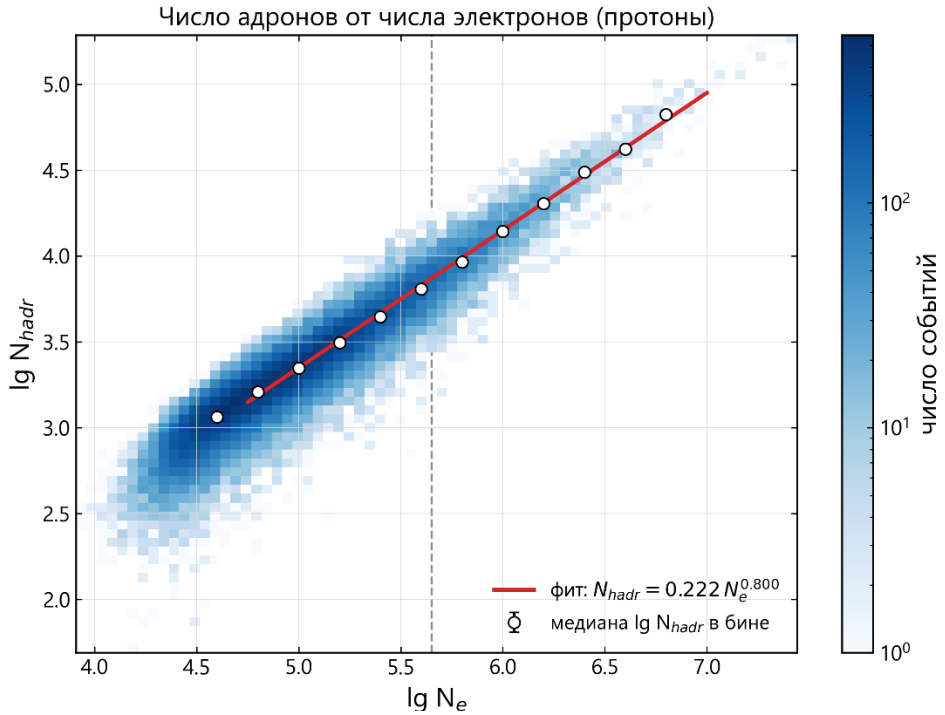
Предварительный результат

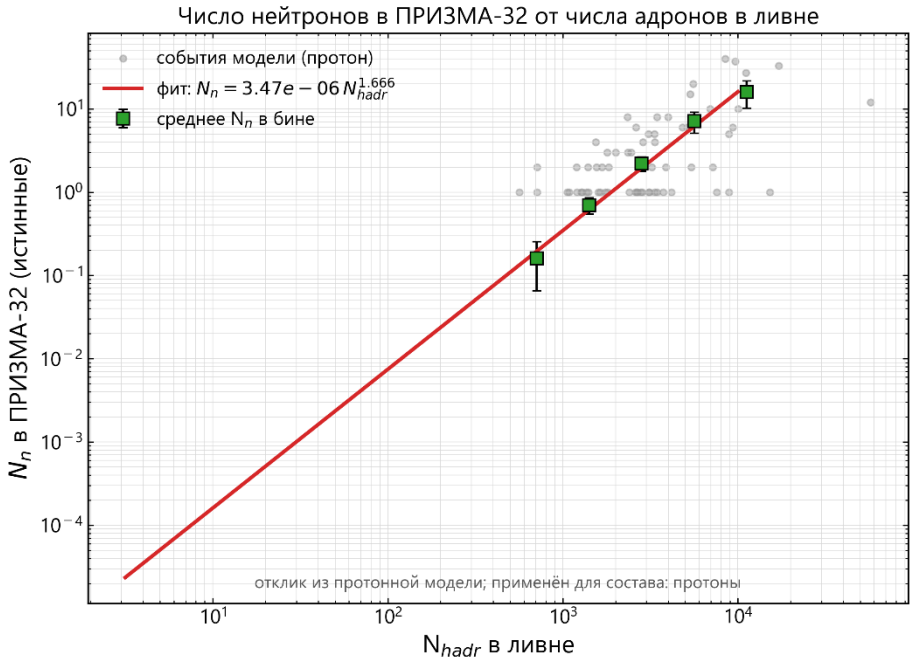
Зависимость числа нейтронов от мощности ливня

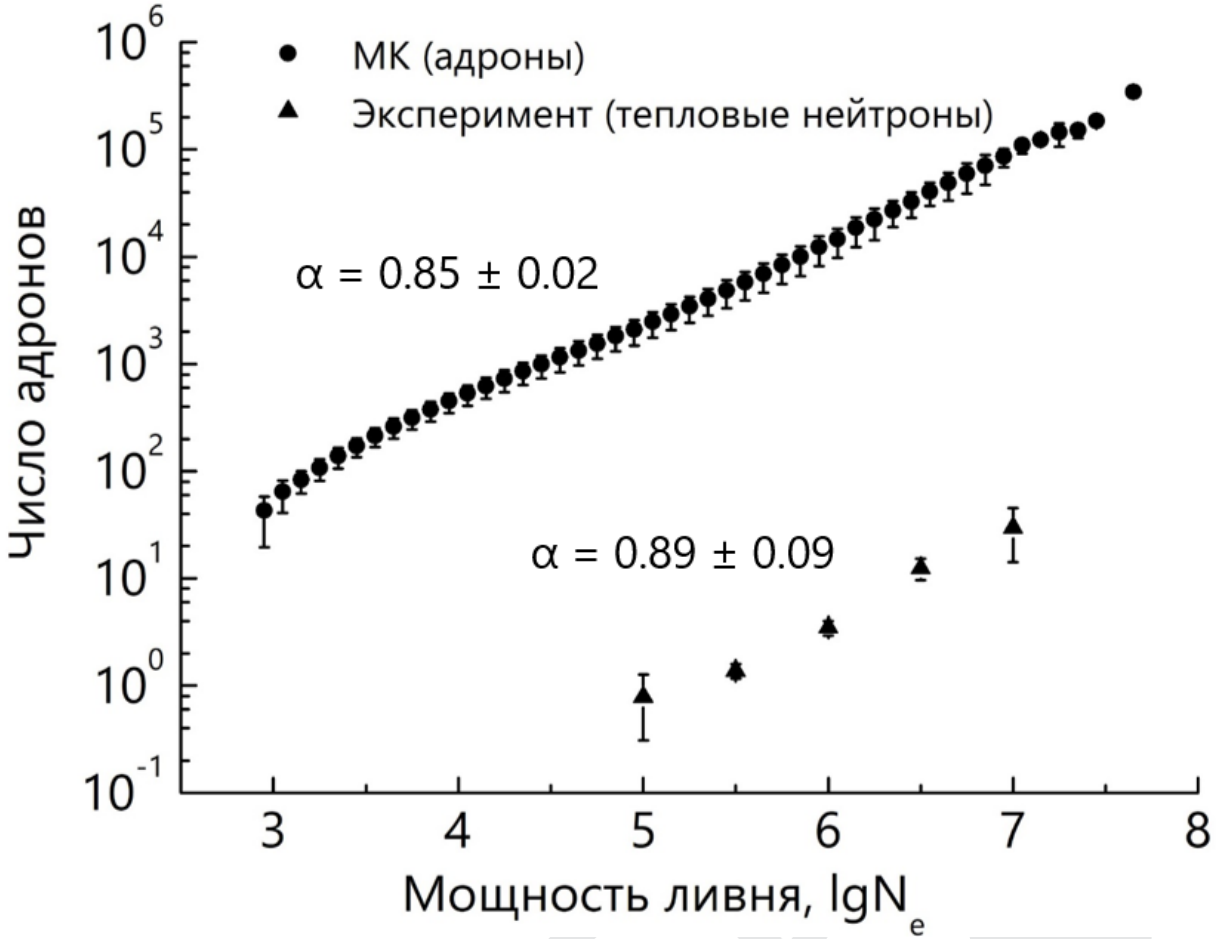




Моделирование

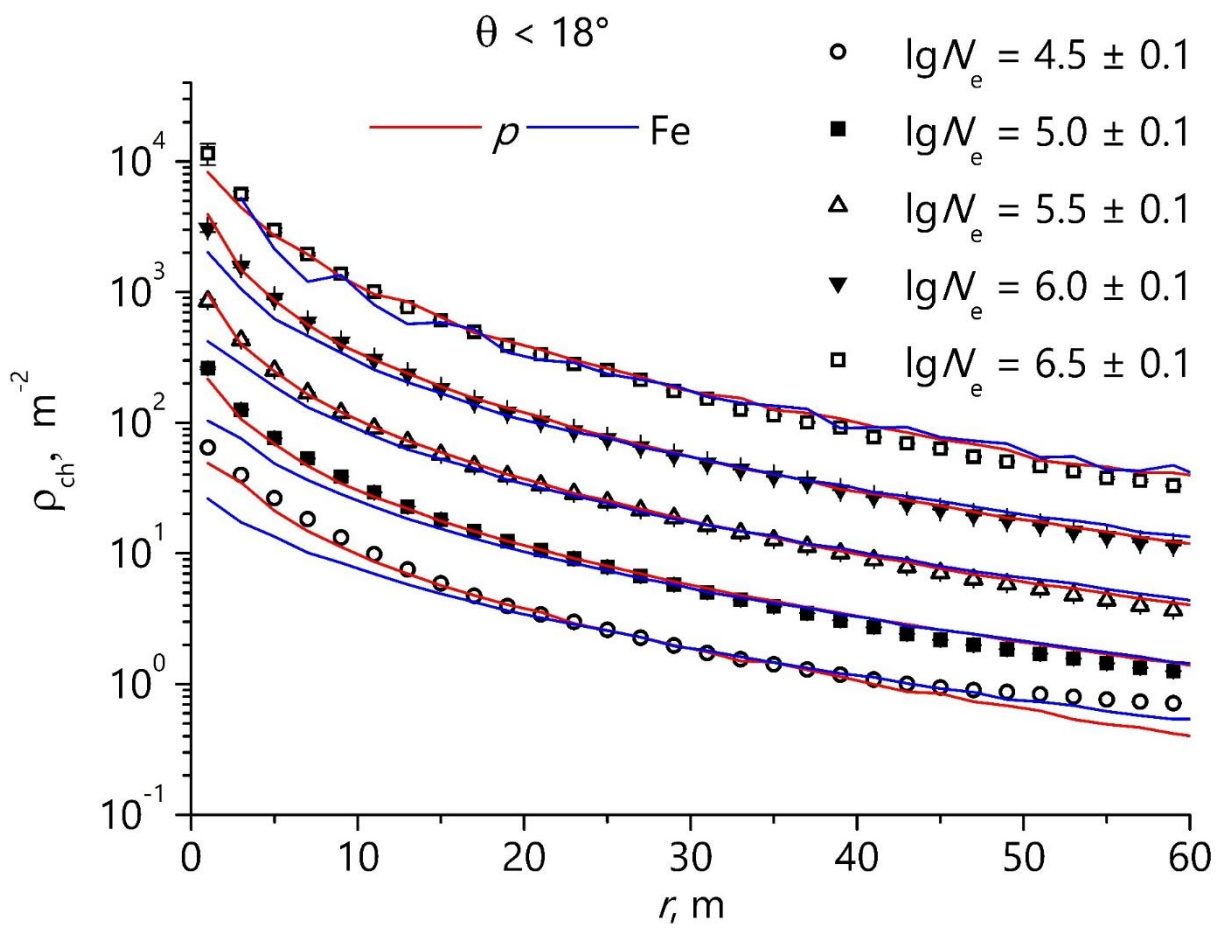




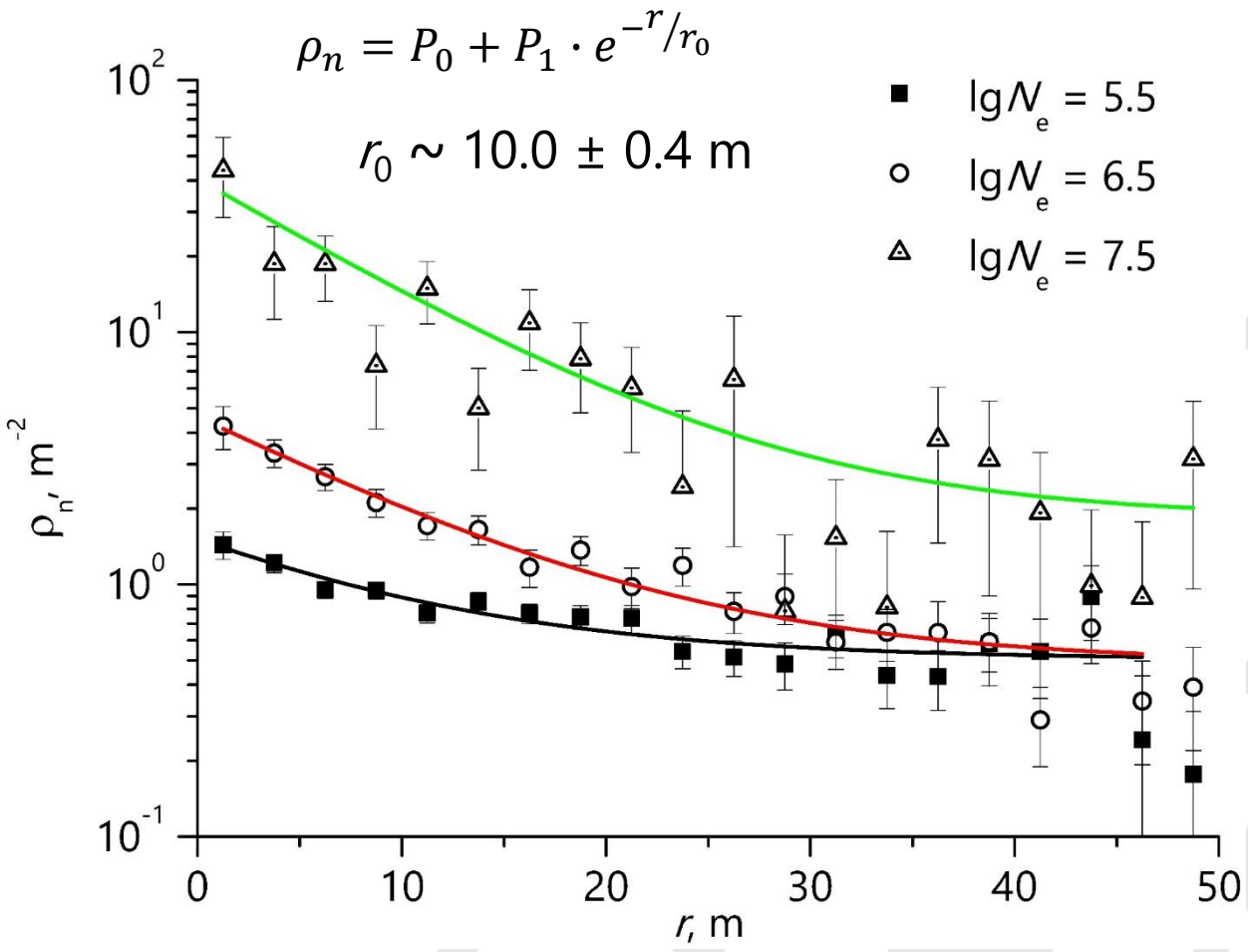


Average LDF

LDF of the electron-photon component
NEVOD-EAS



Thermal neutron LDF
URAN

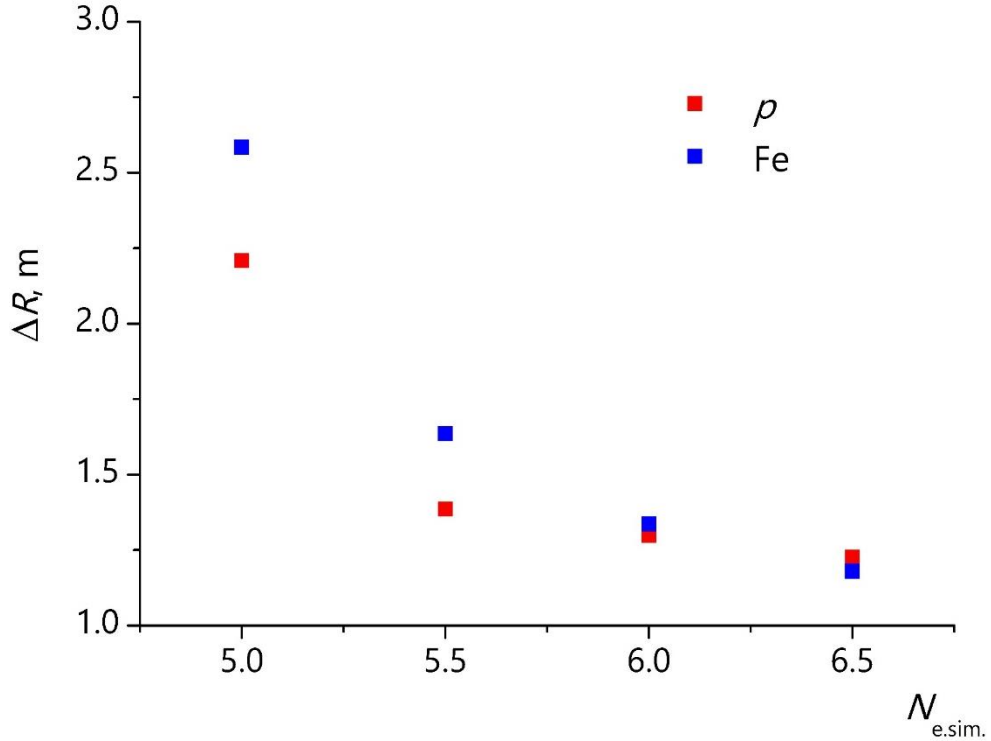


Simulation

CORSIKA (QGSJET-II-04 + FLUKA 2020.0.3); *p*, Fe : ***E*** **=10^{14} – 10^{17}** eV, (γ + 1) = 2.7 (3 million events).

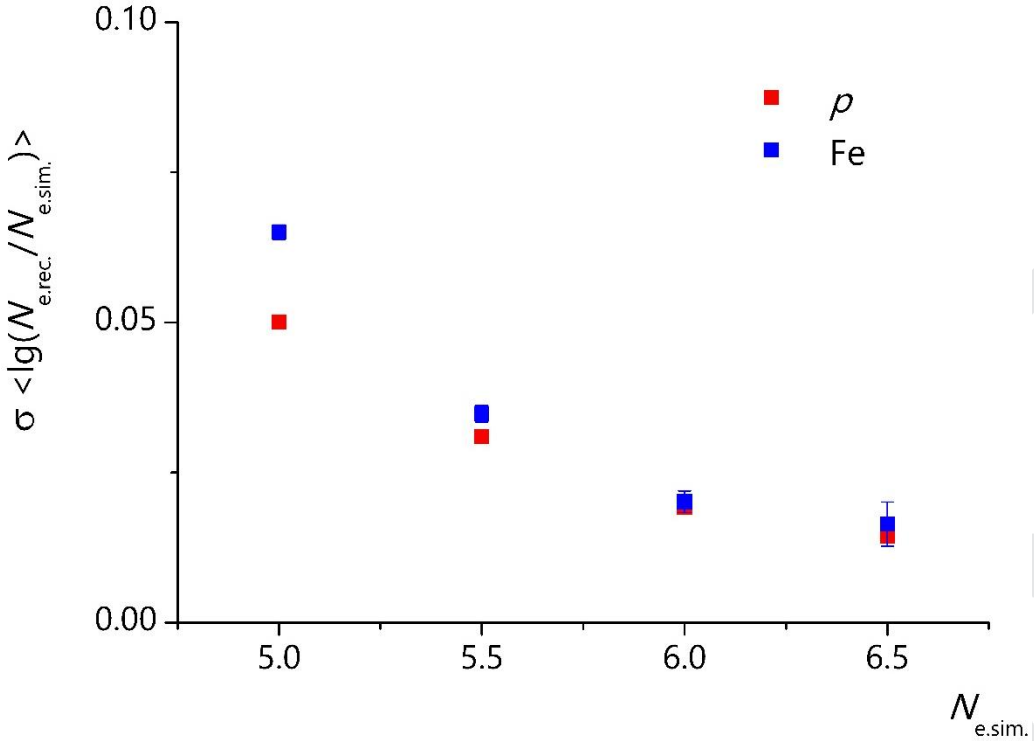
Direction reconstruction accuracy: *p* ~ **2.6°**, Fe ~ **2.2°**

Axis reconstruction accuracy



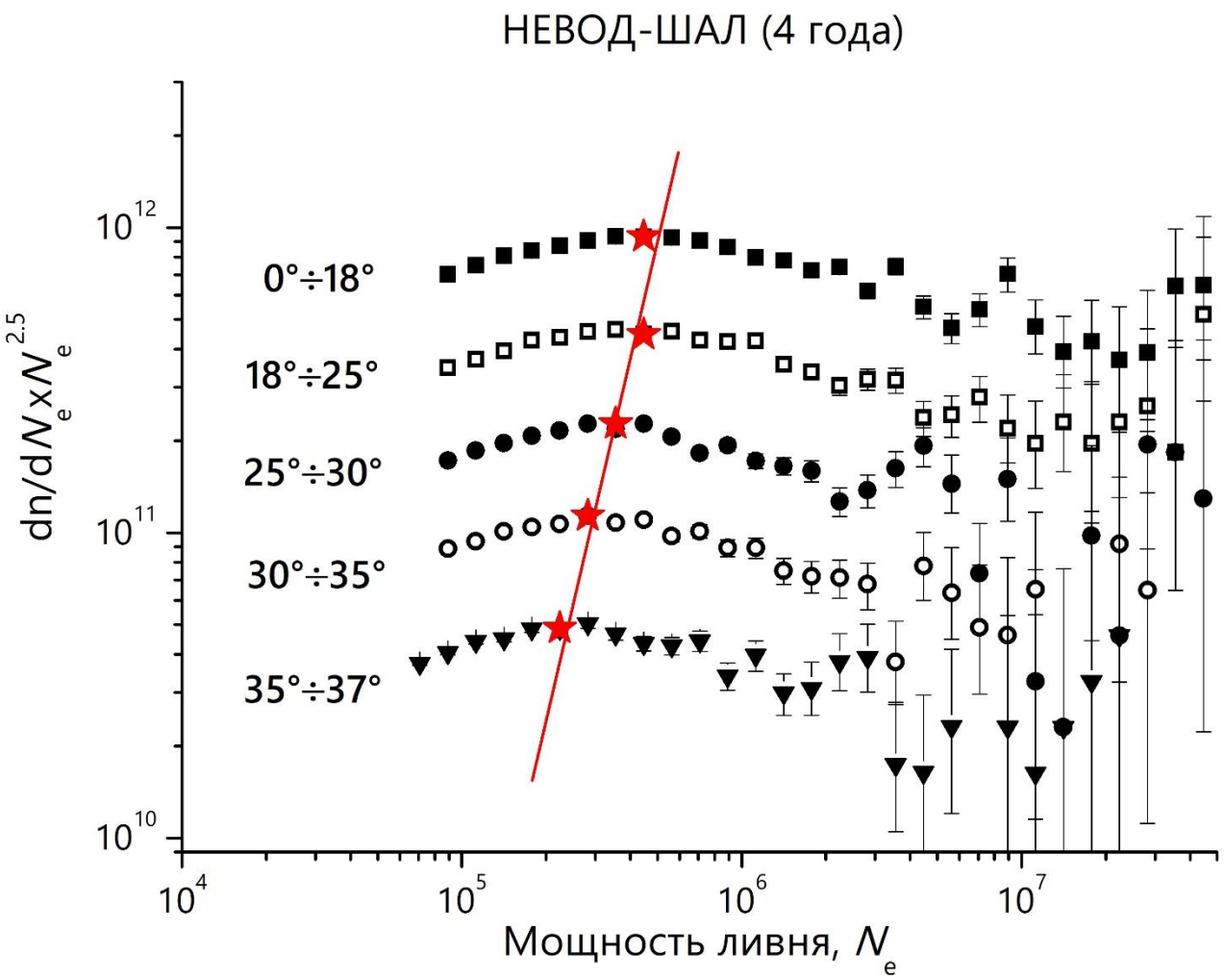
For lg$N_{e(sim.)}$ = 5±0.1: ΔR (*p*) ~ **2.2 m**
ΔR (Fe) ~ **2.6 m**

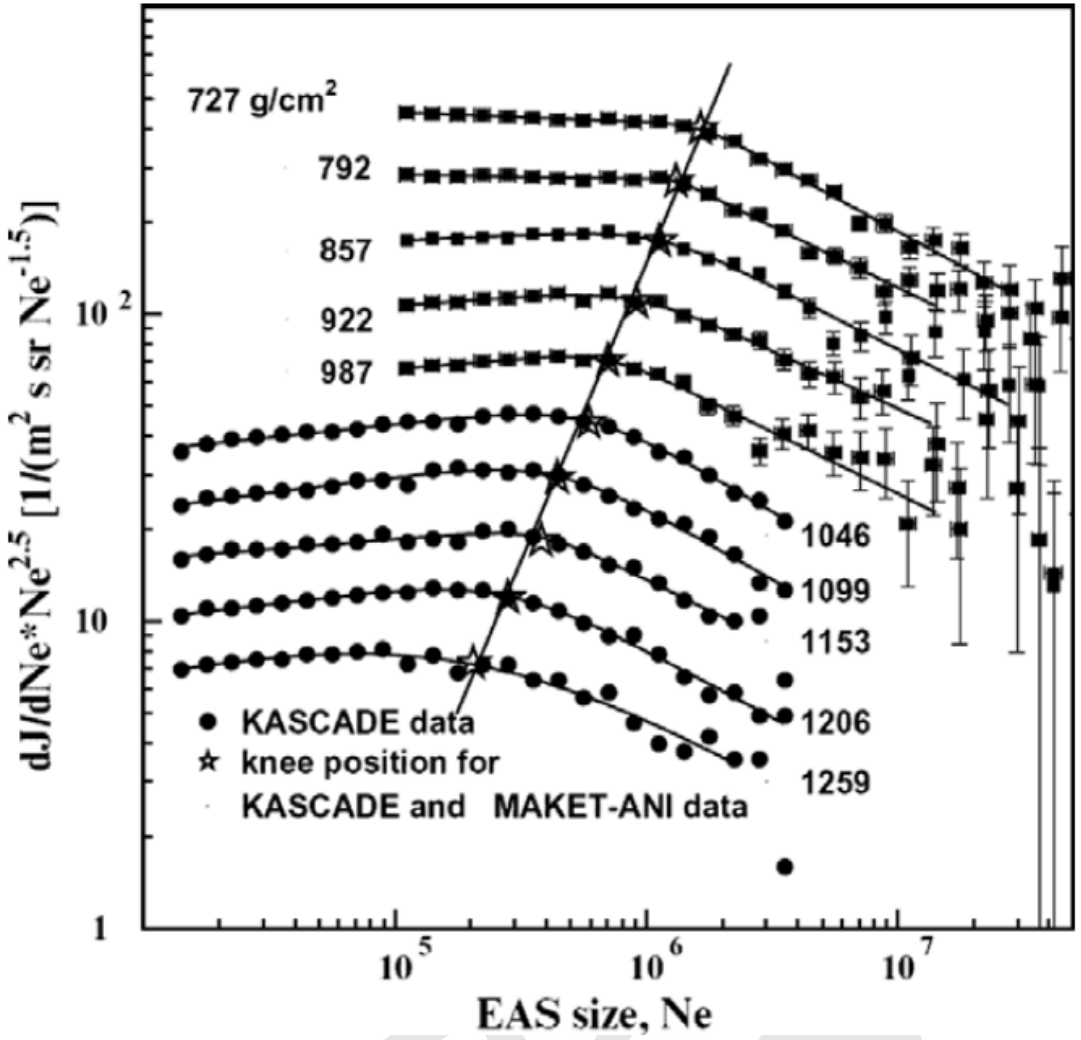
Size reconstruction accuracy



For lg$N_{e(sim.)}$ = 5±0.1 : ΔN_e (*p*) ~ **0.05**
ΔN_e (Fe) ~ **0.06**

Спектры мощности ШАЛ

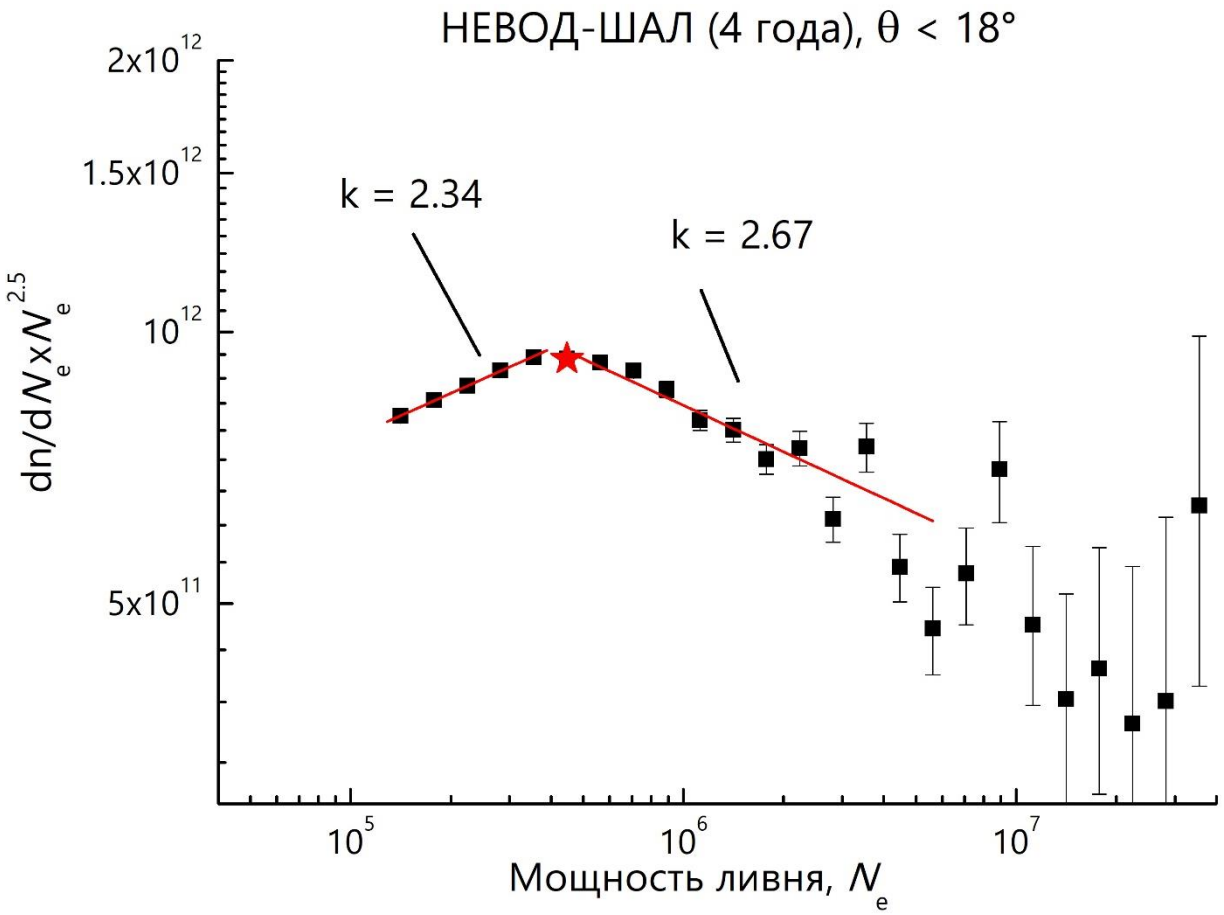


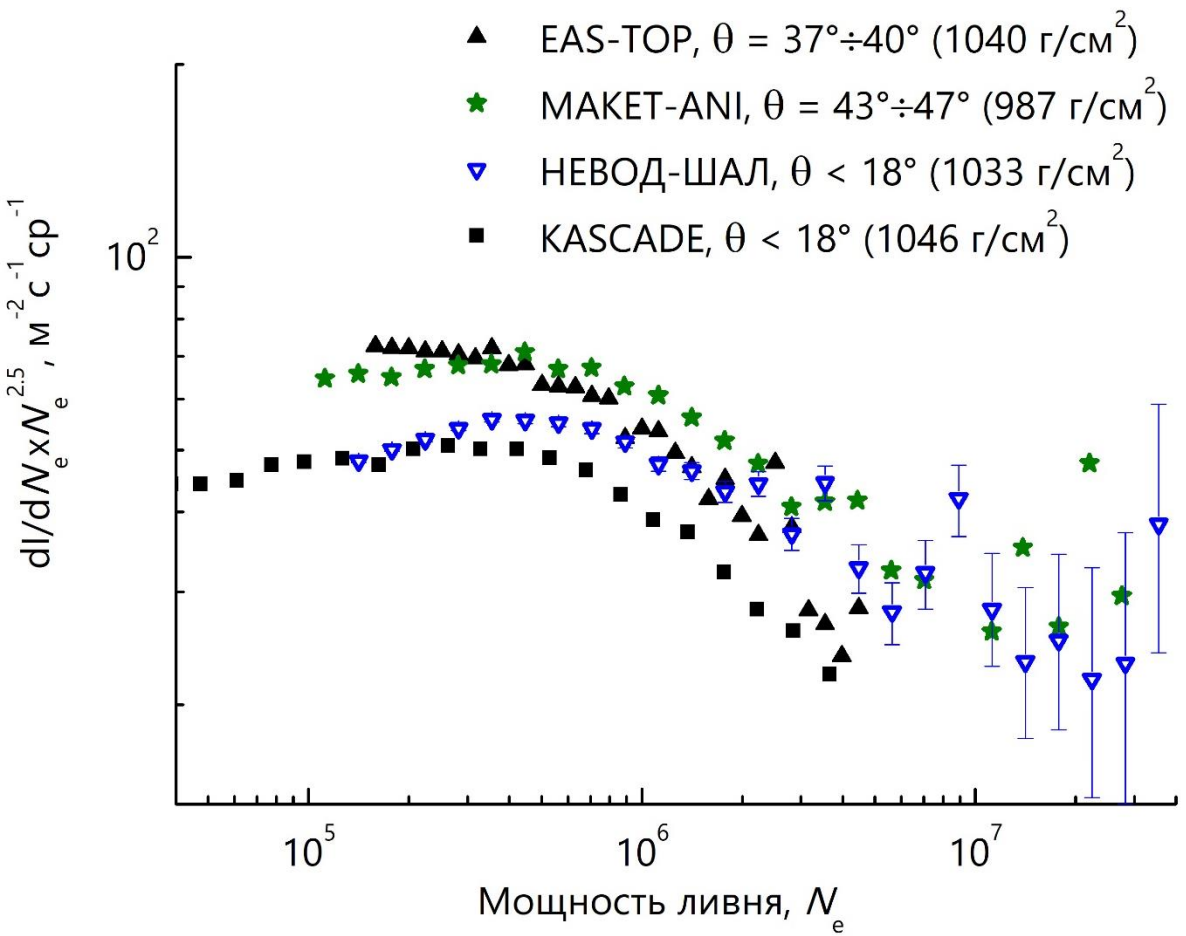


Положение излома меняется:
от N_e (35°÷37°) = **2.2×10⁵** до N_e (0°÷18°) = **4.5×10⁵**.

A. Chilingarian et al. Astroparticle Physics 28 (2007) 58–71.

Спектр мощности ШАЛ





НЕВОД-ШАЛ
$\lg N_{ek} = 5.65$
$\Delta k = 0.33$

EAS-TOP
(M. Aglietta, 1999):
$\lg N_{ek} = 5.63 \pm 0.07$
$\Delta k = 0.25 \pm 0.07$

MAKET-ANI
(A.Chilingarian, 2007):
$\lg N_{ek} = 5.84 \pm 0.07$
$\Delta k = 0.48 \pm 0.04$

KASCADE
(K.-H. Kampert, 1998):
$\lg N_{ek} = 5.70 \pm 0.07$