

**СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
ШАЛ ПО ДАННЫМ МГУ И LOPES**

О.В. Веденеев, Н.Н. Калмыков, А.А. Константинов

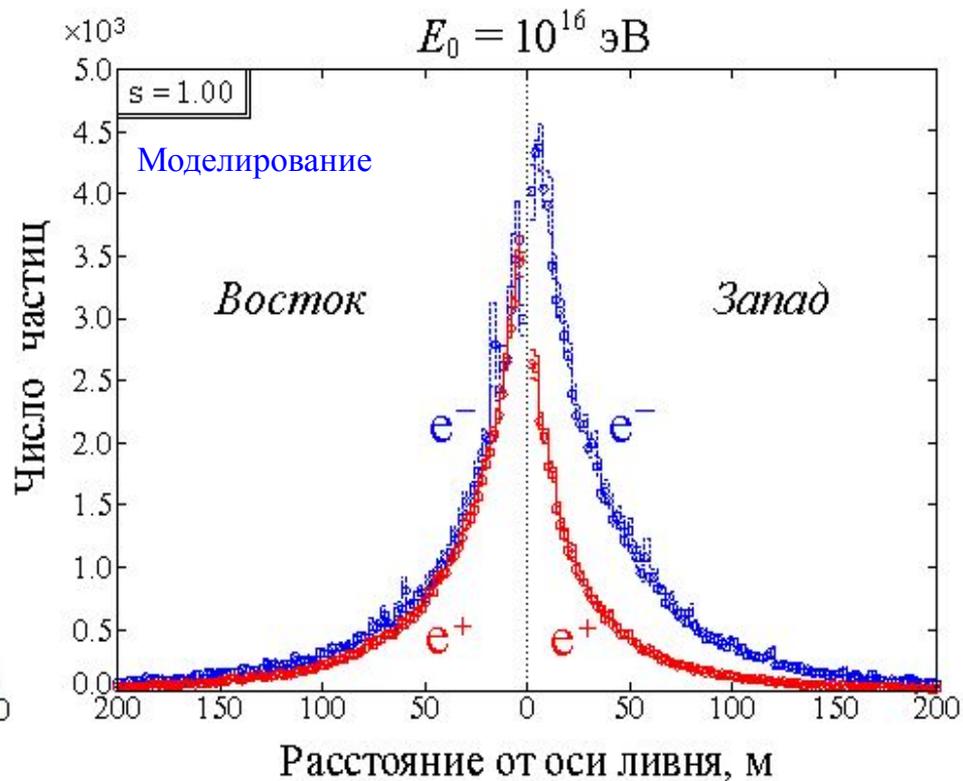
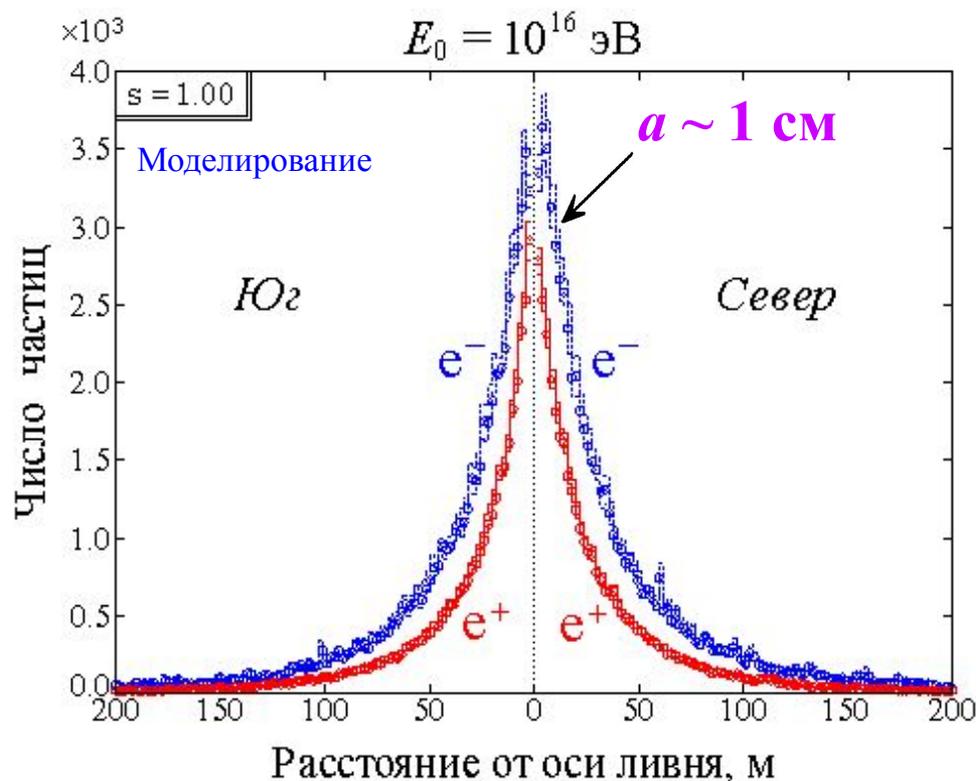
НИИЯФ МГУ

31-я ВККЛ, Москва, 2010

Регистрация КЛ по радиоизлучению ШАЛ

Расстояние a между e^- и e^+ \ll длины волны излучения $\lambda > 1$ м

Откуда берутся нескомпенсированные заряды (токи) в ШАЛ в масштабе λ ?



1. Избыток электронов $\sim 25\%$

(Г.А. Аскарьян)

1961 г.

2. Поляризация ШАЛ в магнитном поле Земли

(В.И. Гольданский)

Преимущества:

дешевизна и простота
эксплуатации радиоантенн,
независимость от погоды и
времени суток

Регистрация радиоизлучения ШАЛ

CODALEMA

$\Delta\nu = 23 - 83$ МГц



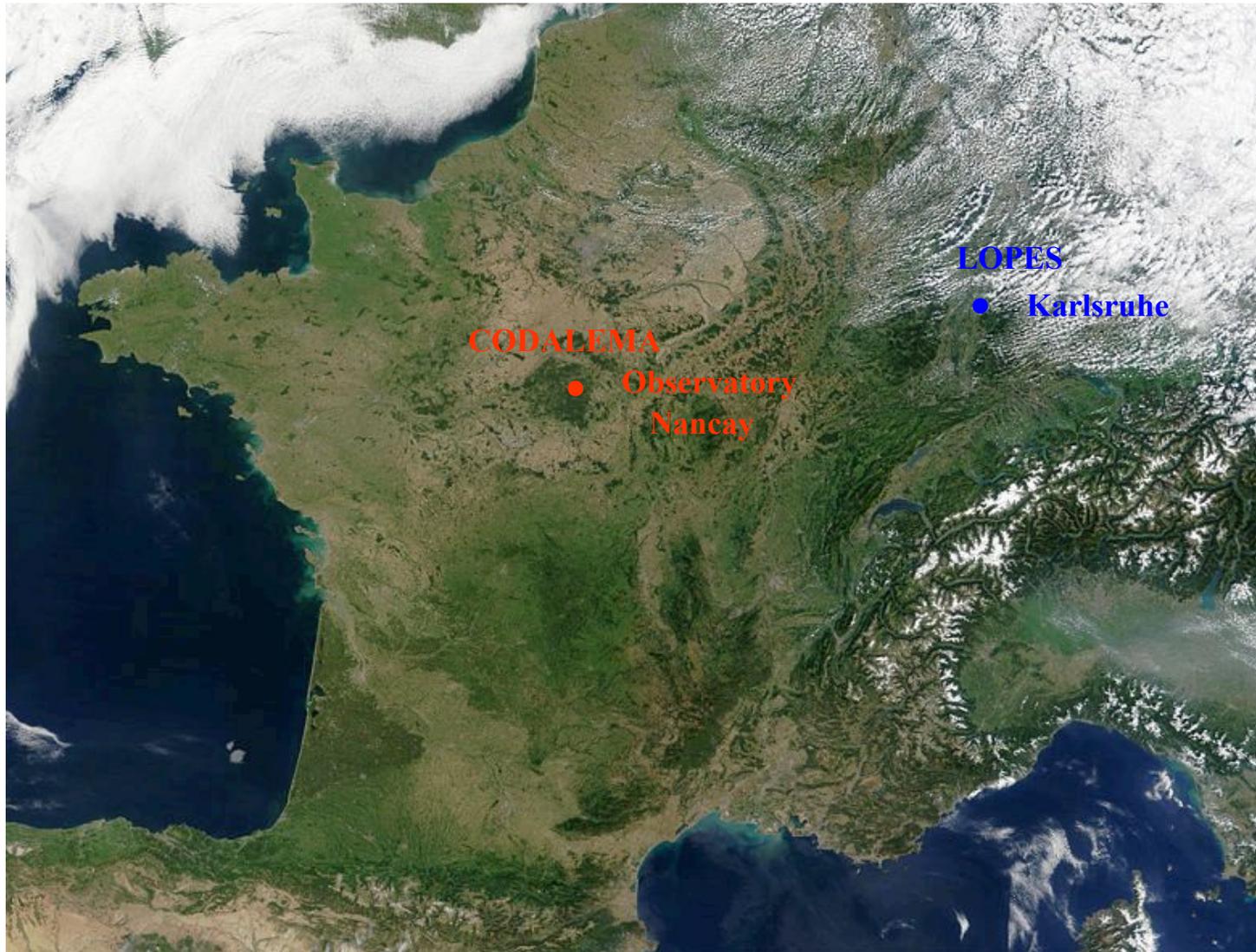
LOPES

$\Delta\nu = 40 - 80$ МГц



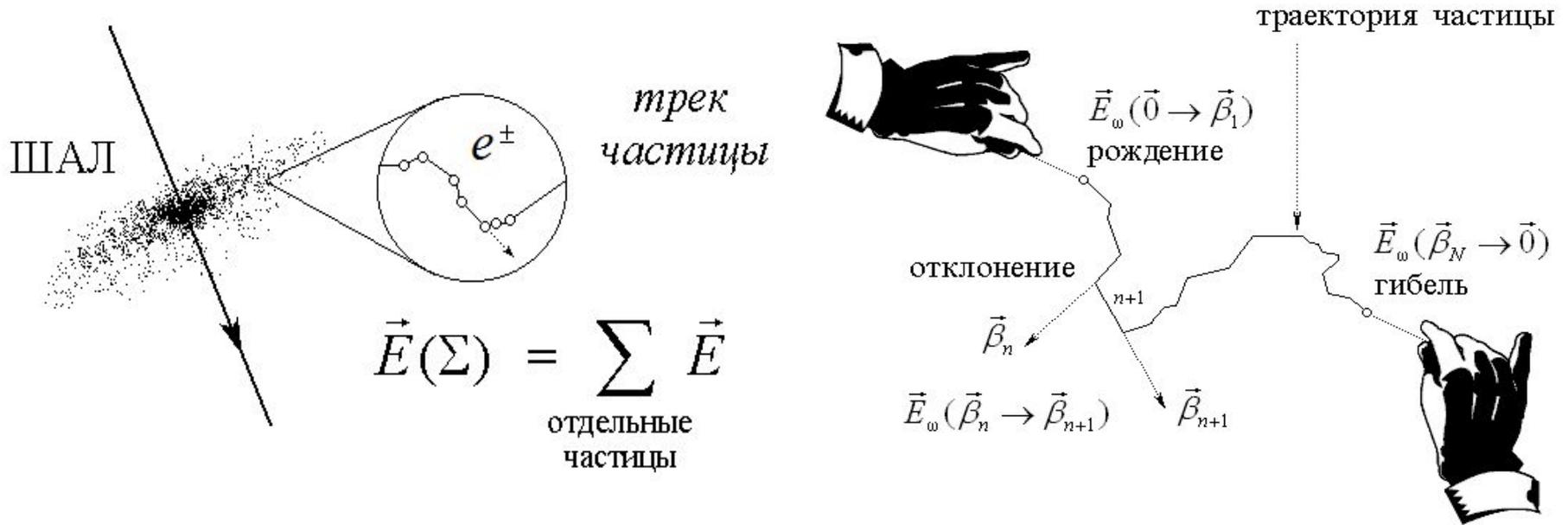
$E_0 \sim 5 \cdot 10^{16}$ эВ – порог регистрации радиоимпульсов от ШАЛ (LOPES, CODALEMA)

COsmic ray Detection **A**rray with **L**ogarithmic **E**lectro
Magnetic **A**ntennas: **CODALEMA**
LOFAR Prototyp**E** **S**tation: **LOPES**



Расчет излучения отдельных частиц ШАЛ

(Микроскопический подход)



Излучение с прямолинейного трека траектории :

$$\mathbf{E}_\omega(\Sigma_1) = \frac{e}{8\pi^2 \epsilon_0 c} \frac{e^{ikR}}{R} e^{i\omega(t_0 - n e_R \cdot \xi_0 / c)} \left(\frac{e^{i\omega \Delta t (1 - n e_R \cdot \beta)} - 1}{1 - n e_R \cdot \beta} \right) \beta_\perp$$

Моделирование траекторий по Монте-Карло

+

(параллельно) расчет излучения

МК моделирование:

CORSIKA

прямолин. шаг < 1 м

Моделирование радиоизлучения ШАЛ

МГУ LOPES

ШАЛ → Монте-Карло, CORSIKA

p, Fe $E_0 = 5 \cdot 10^{17}$ эВ

Пороги:

(γ , e^\pm) → 100 кэВ

(μ^\pm , адроны) → 50 МэВ

Опция «прореживания» ШАЛ: $\varepsilon = 10^{-6}$, $w_{\max} = 1000$

Радиоизлучение → расчет от каждой частицы

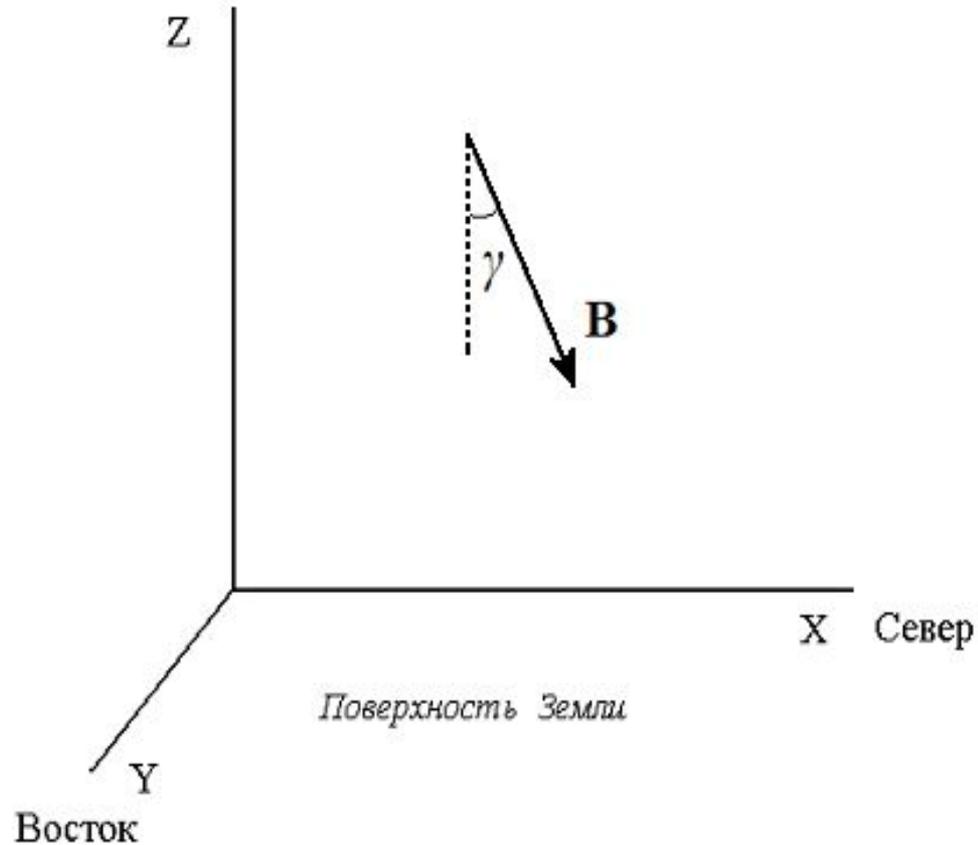
Микроскопический подход:

Калмыков Н.Н., Константинов А.А., Энгель Р. Радиоизлучение широких атмосферных ливней как метод регистрации космических лучей.

Ядерная физика. 2010. **73**. С. 1231–1242.

Магнитное поле Земли в районе

МГУ и LOPES



МГУ

$$\mathbf{B} \approx (0.18, 0.00, -0.48) \text{ Гс}$$

$$\gamma \approx 20^\circ$$

LOPES

$$\mathbf{B} \approx (0.20, 0.00, -0.43) \text{ Гс}$$

$$\gamma \approx 25^\circ$$

Регистрация радиоизлучения ШАЛ: МГУ



1969-1972 гг.

7 антенн

250 м × 350 м

30-34 МГц

43 события

Данные взяты из работы:

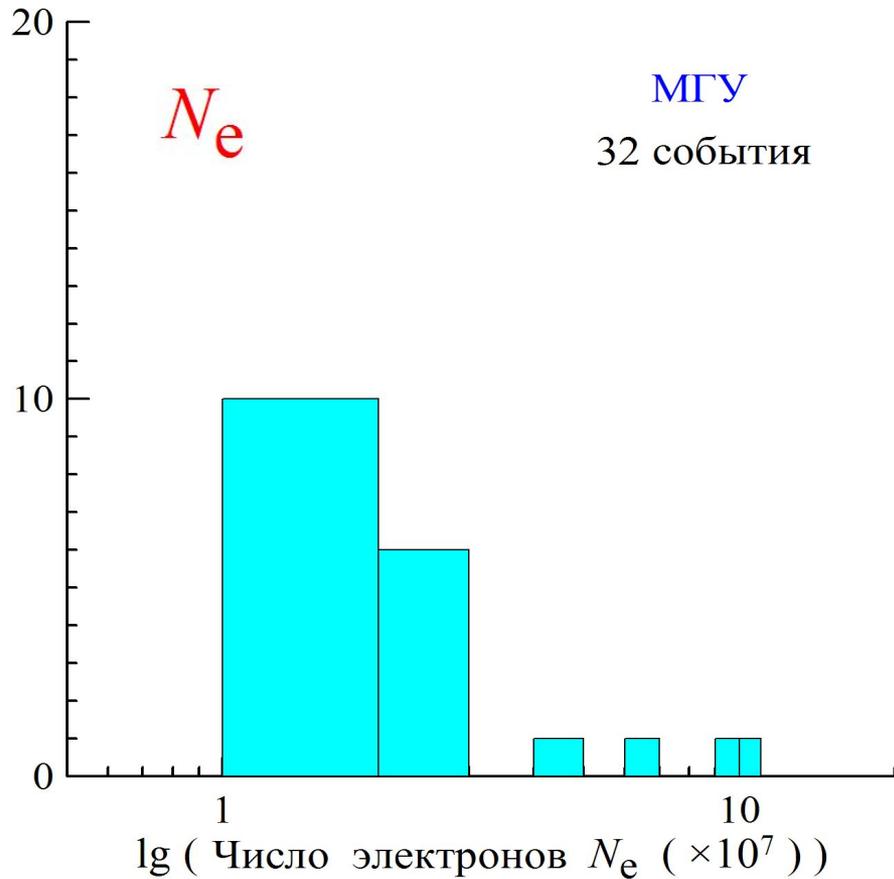
Веденеев О.В. Диссертация. **Исследование пространственного распределения радиоизлучения широких атмосферных ливней.**

НИИЯФ МГУ. 1975. Москва.

Параметры ШАЛ: МГУ

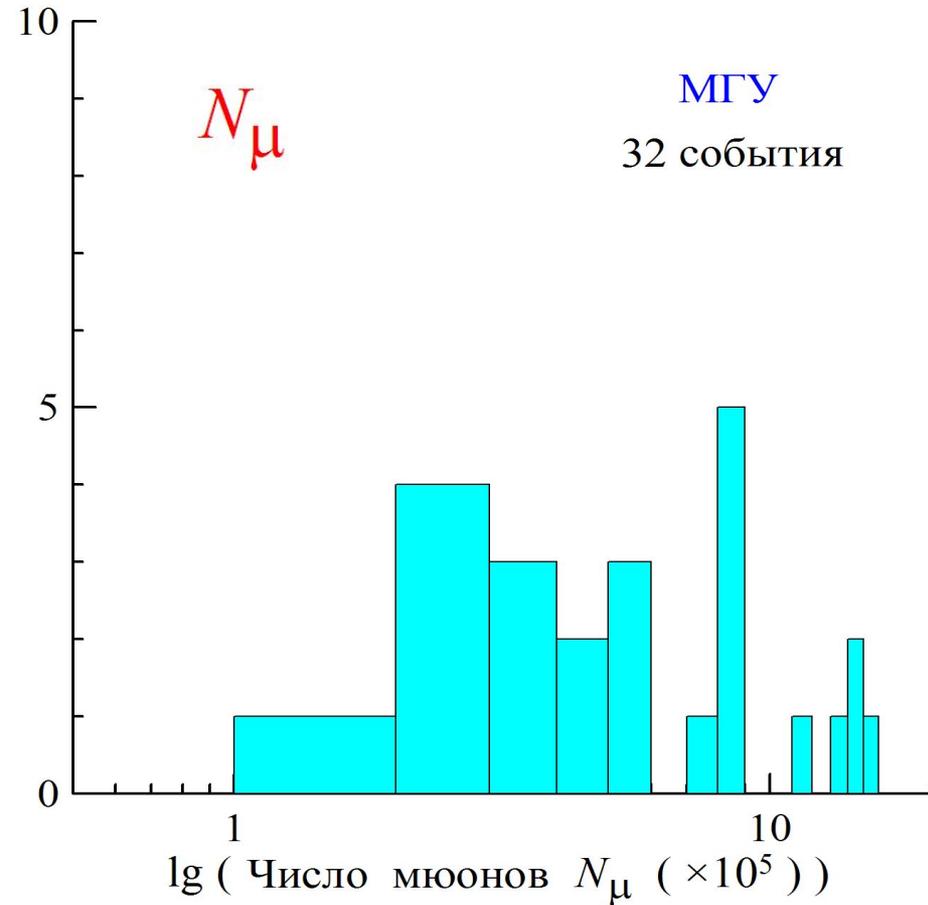
Распределение событий по →

→ числу электронов



$$\langle N_e \rangle = 2.6 \cdot 10^7$$

→ числу мюонов

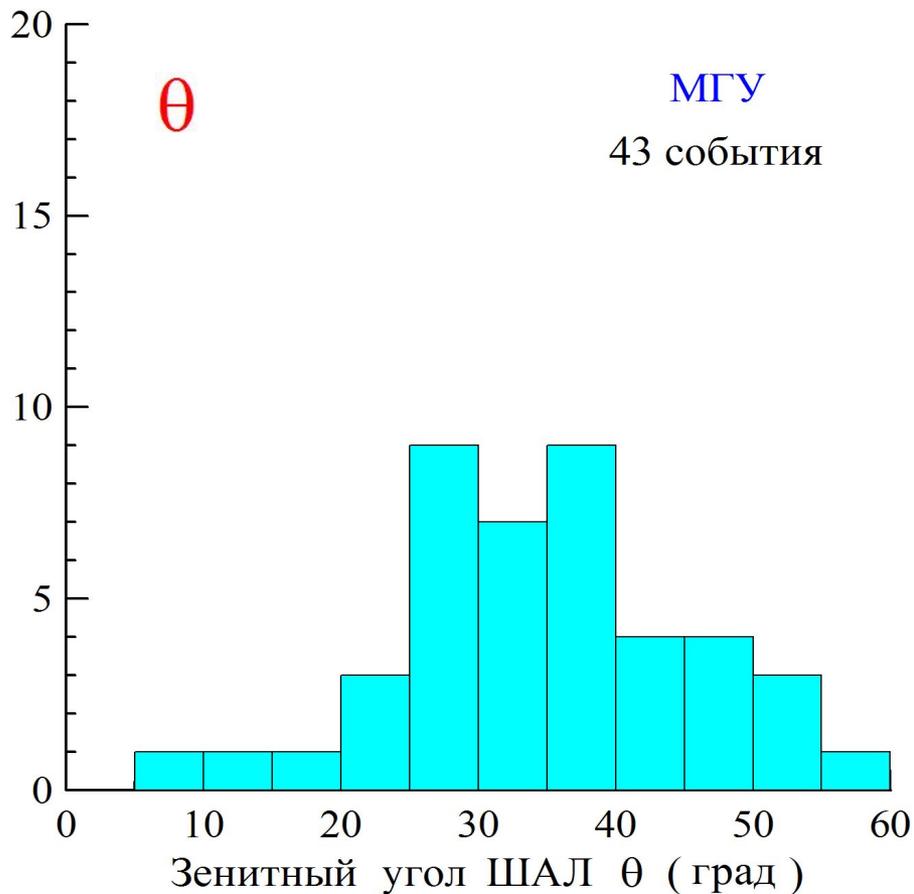


$$\langle N_\mu \rangle = 6.3 \cdot 10^5$$

Параметры ШАЛ: МГУ

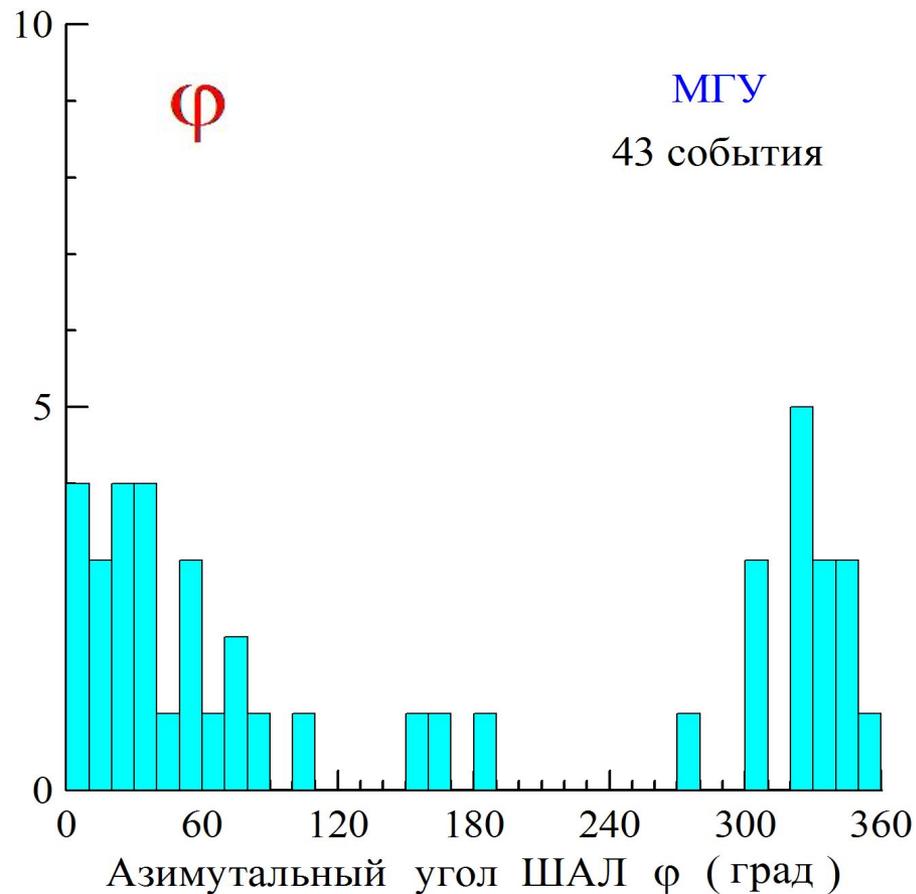
Распределение событий по →

→ зенитному углу ШАЛ



$$\langle \theta \rangle = 35^\circ$$

→ азимутальному углу ШАЛ



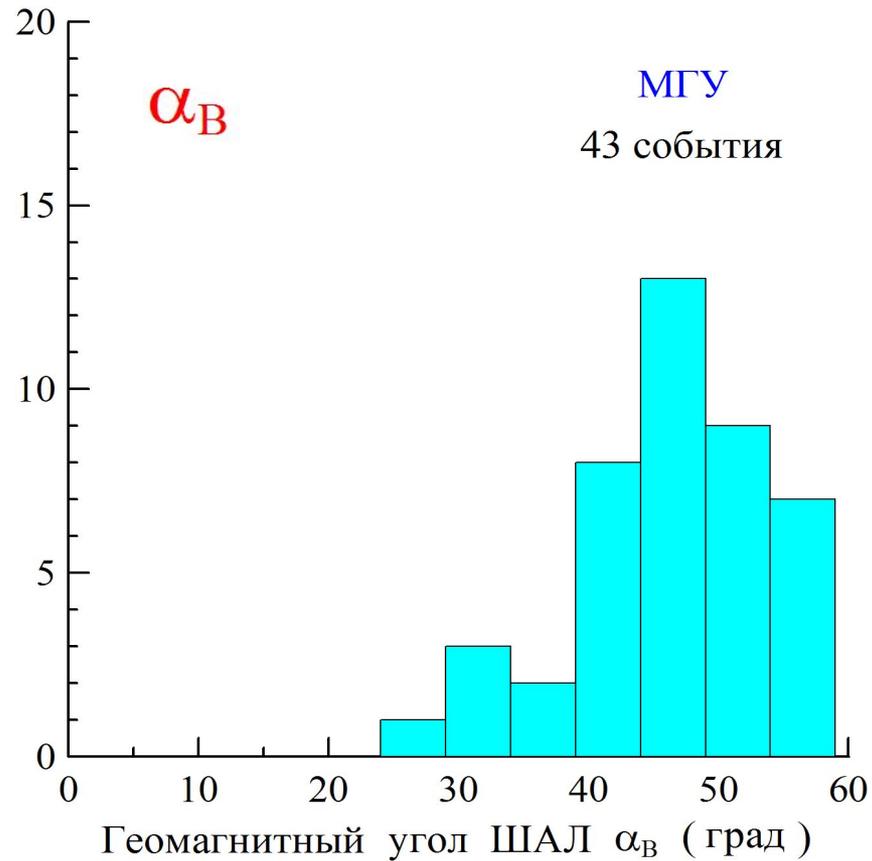
↑
Север

↑
Юг

↑
Север

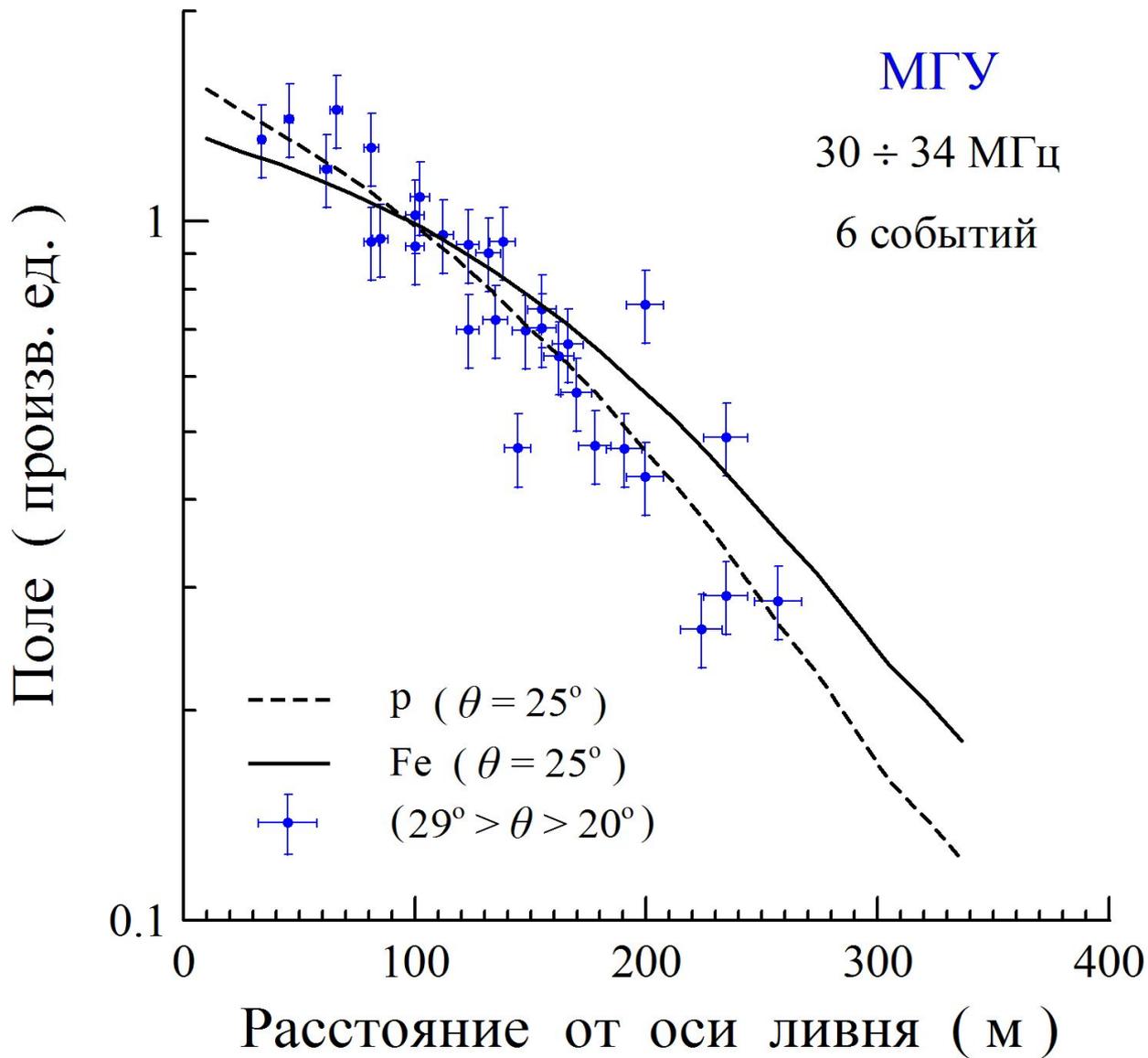
Параметры ШАЛ: МГУ

Распределение событий по геомагнитному углу ШАЛ



$$\langle \alpha_B \rangle = 43^\circ$$

Сравнение теории с данными МГУ



МГУ

30 ÷ 34 МГц

6 событий

Эксперимент:

$\delta E_\nu / E_\nu \approx 12\%$

$\delta R \approx 10 \text{ м}$

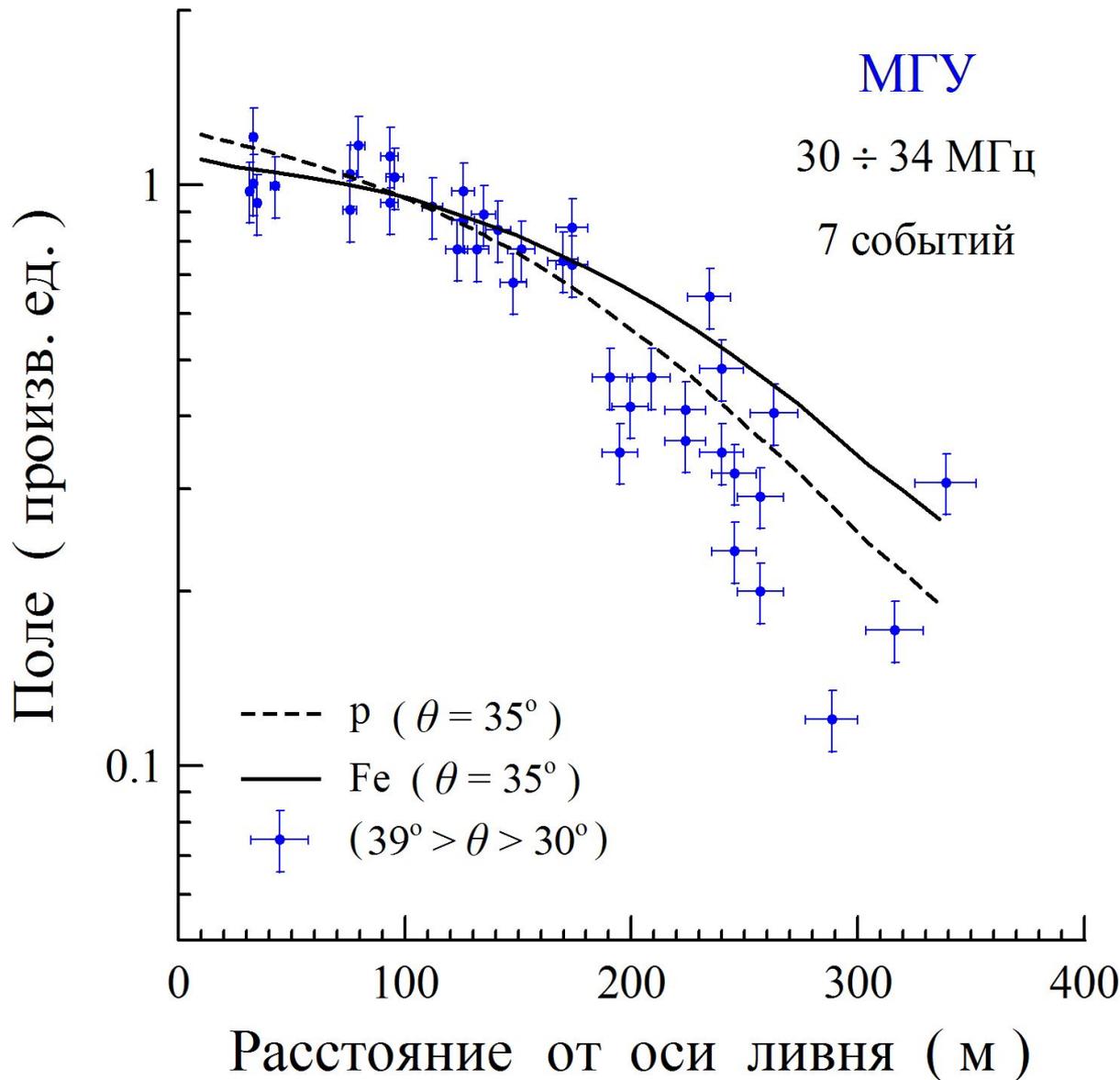
Моделирование:

32 МГц

20 ливней

$E_0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$

Сравнение теории с данными МГУ



Эксперимент:
 $\delta E_\nu / E_\nu \approx 12\%$
 $\delta R \approx 10 \text{ м}$

Моделирование:
32 МГц
20 ливней

$E_0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$

Регистрация радиоизлучения ШАЛ: **LOPES**

<http://www.lopes-project.org>



2006-2008 гг.

30 антенн

200 м × 200 м

$\nu = 40 - 80$ МГц

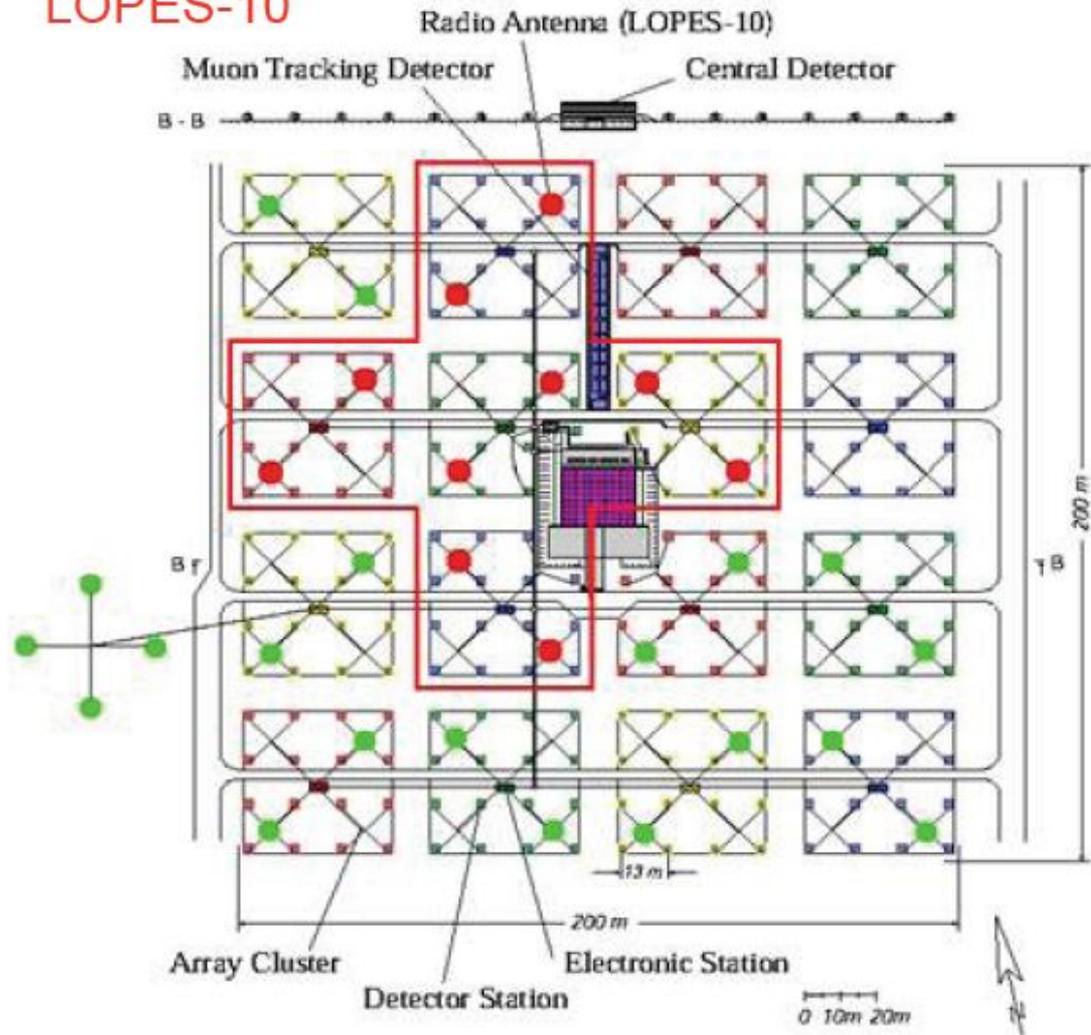
124 события

Данные взяты из работы:

***S. Nehls.* Dissertation. **Calibrated Measurements of the Radio Emission of Cosmic Ray Air Showers.** Karlsruhe, 2008.**

(http://www.astro.ru.nl/lopes/publications/phd_theses)

LOPES-10

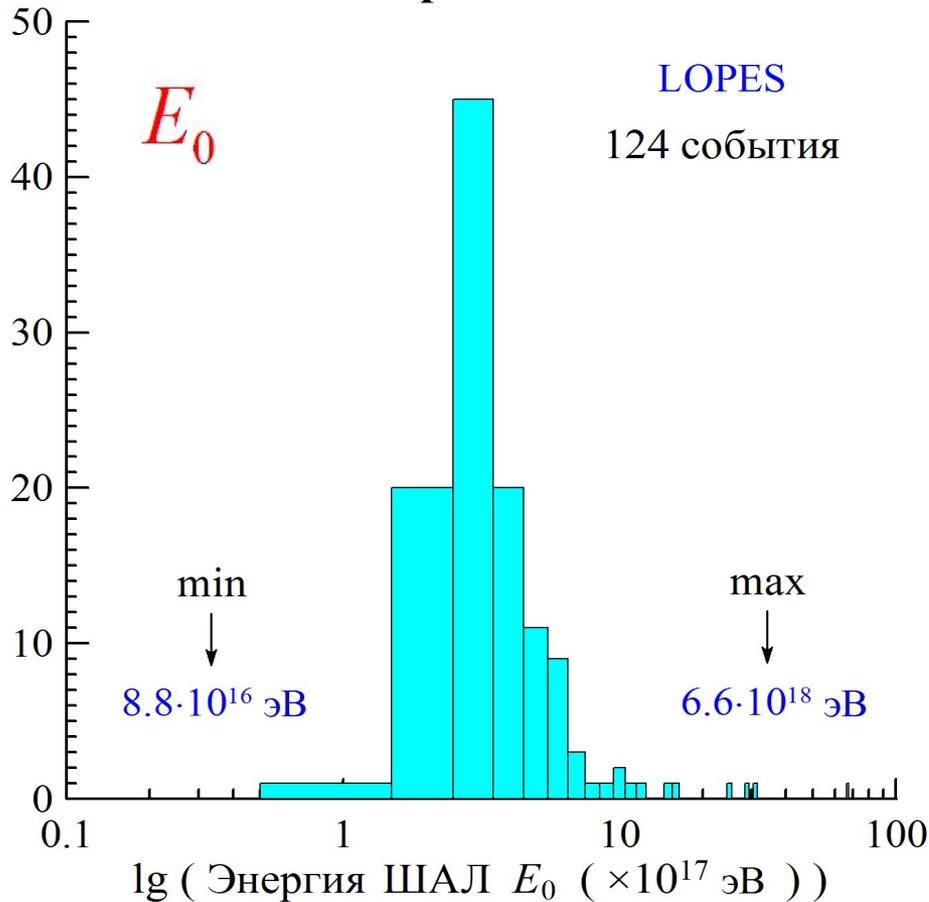


LOPES-30

Параметры ШАЛ: LOPES

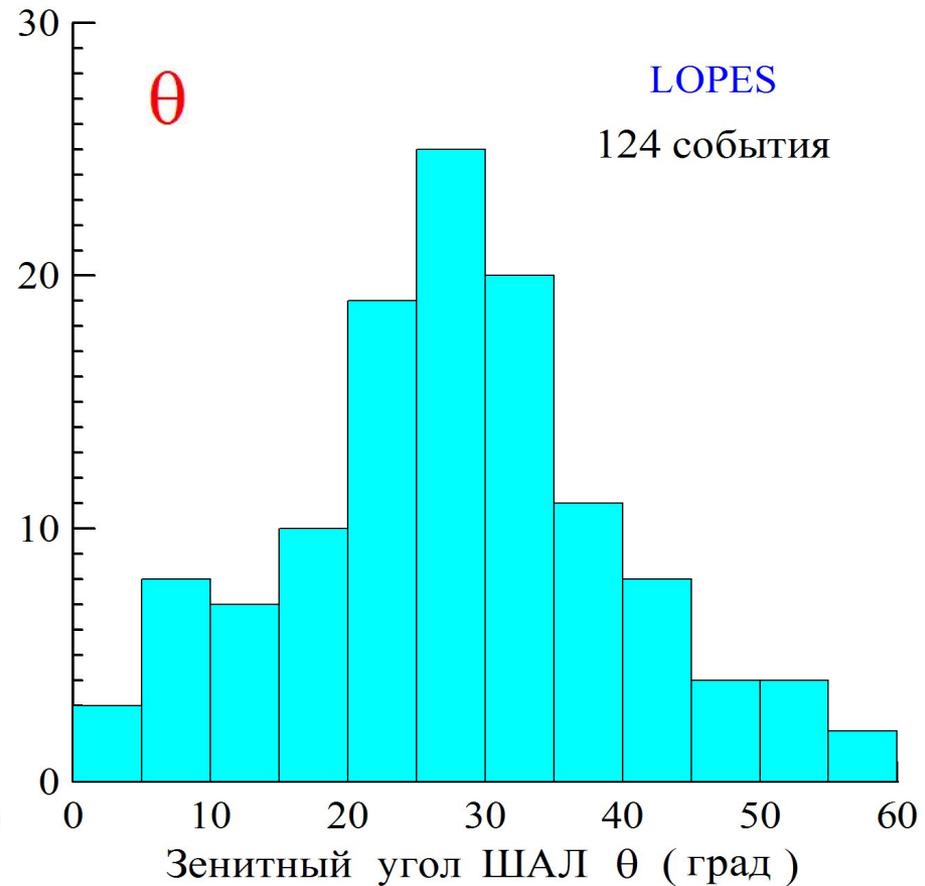
Распределение событий по →

→ энергии ШАЛ



$$\langle E_0 \rangle = 4.7 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$$

→ зенитному углу ШАЛ

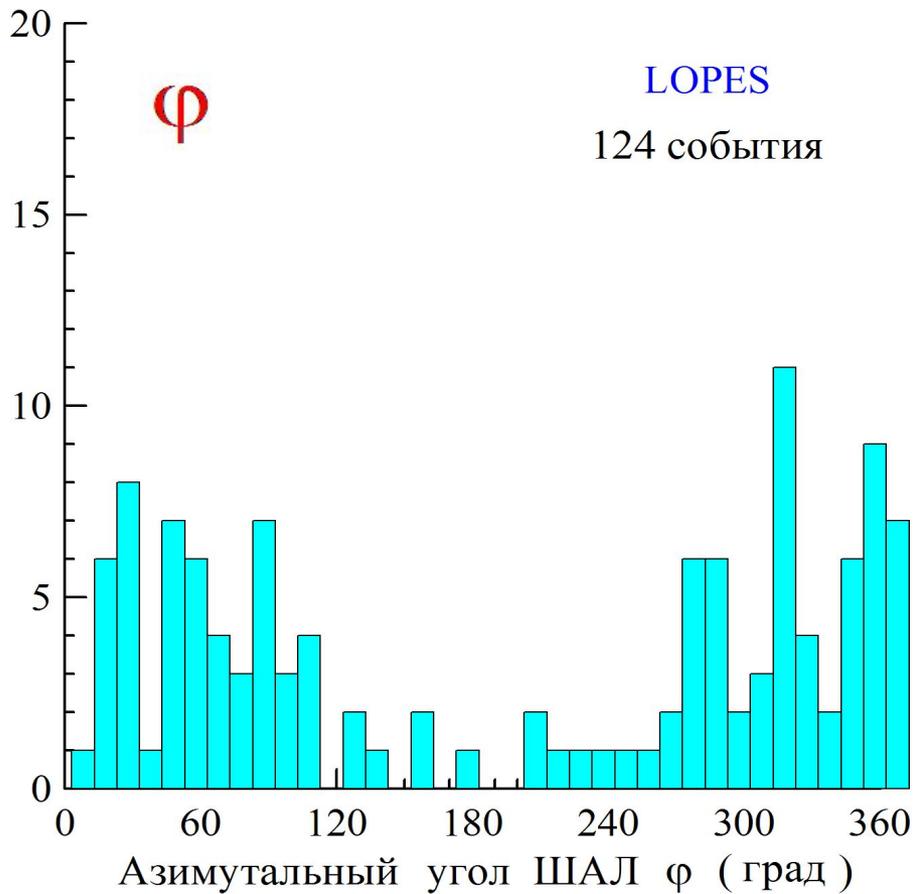


$$\langle \theta \rangle = 28^\circ$$

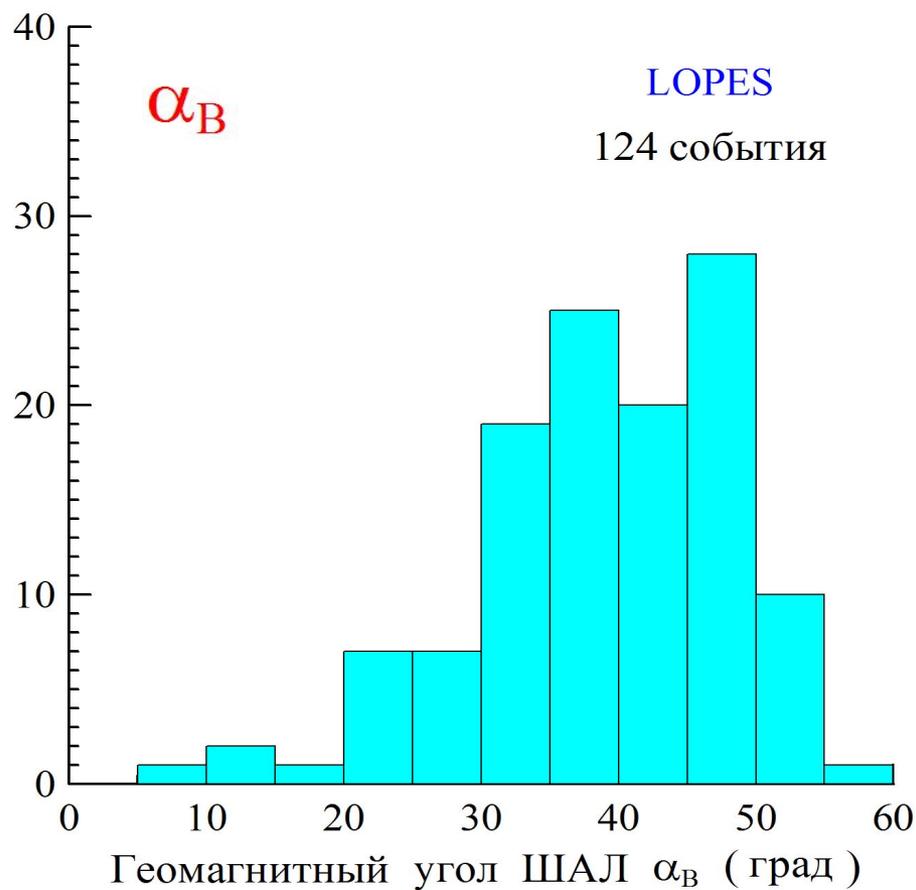
Параметры ШАЛ: LOPES

Распределение событий по →

→ азимутальному углу ШАЛ



→ геомагнитному углу ШАЛ



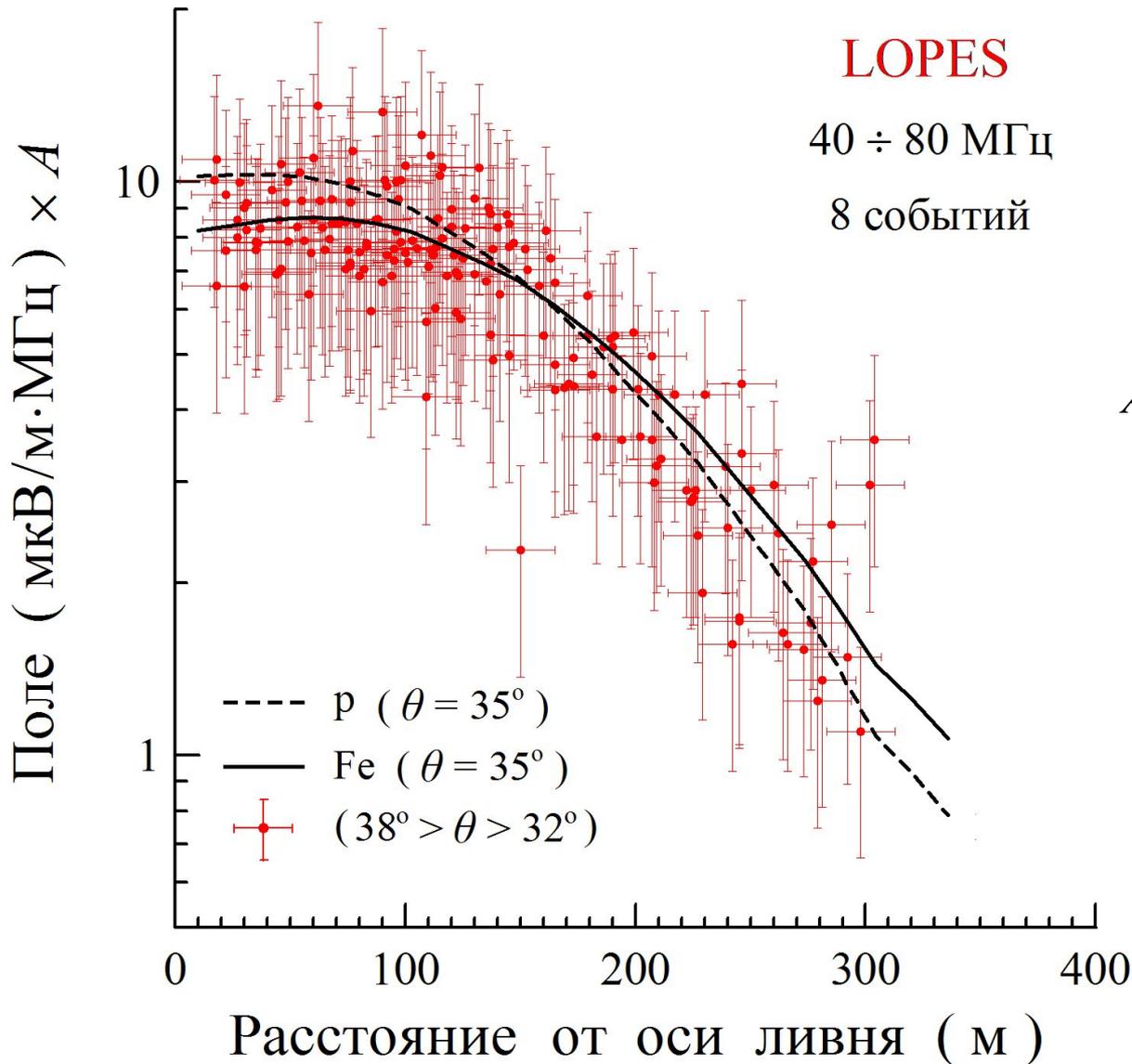
$$\langle \alpha_B \rangle = 39^\circ$$

↑
Север

↑
Юг

↑
Север

Сравнение теории с данными LOPES



Эксперимент:
 $\delta E_\nu / E_\nu \sim 40\%$
 $\delta R \approx 15 \text{ м}$

$$A = A_0 / (\sin \alpha_B \cdot E_0 / (10^{17} \text{ эВ}))$$

LOPES: $A_0 = 1$

Расчет: $A_0 = 2\pi$

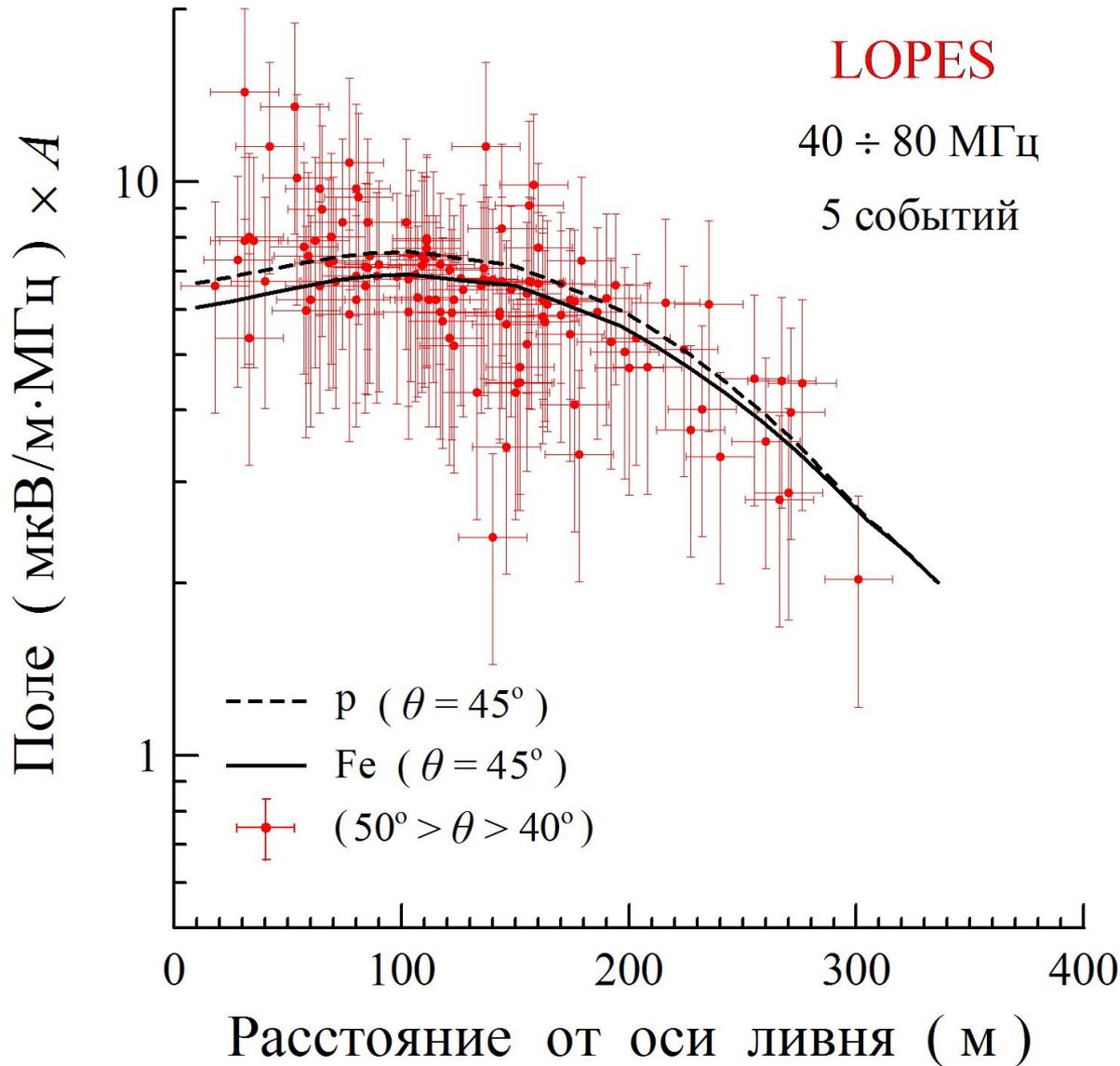
Моделирование:

60 МГц

20 ливней

$$E_0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$$

Сравнение теории с данными LOPES



Эксперимент:
 $\delta E_\nu / E_\nu \sim 40\%$
 $\delta R \approx 15 \text{ м}$

$$A = A_0 / (\sin \alpha_B \cdot E_0 / (10^{17} \text{ эВ}))$$

LOPES: $A_0 = 1$

Расчет: $A_0 = 1/2\pi$

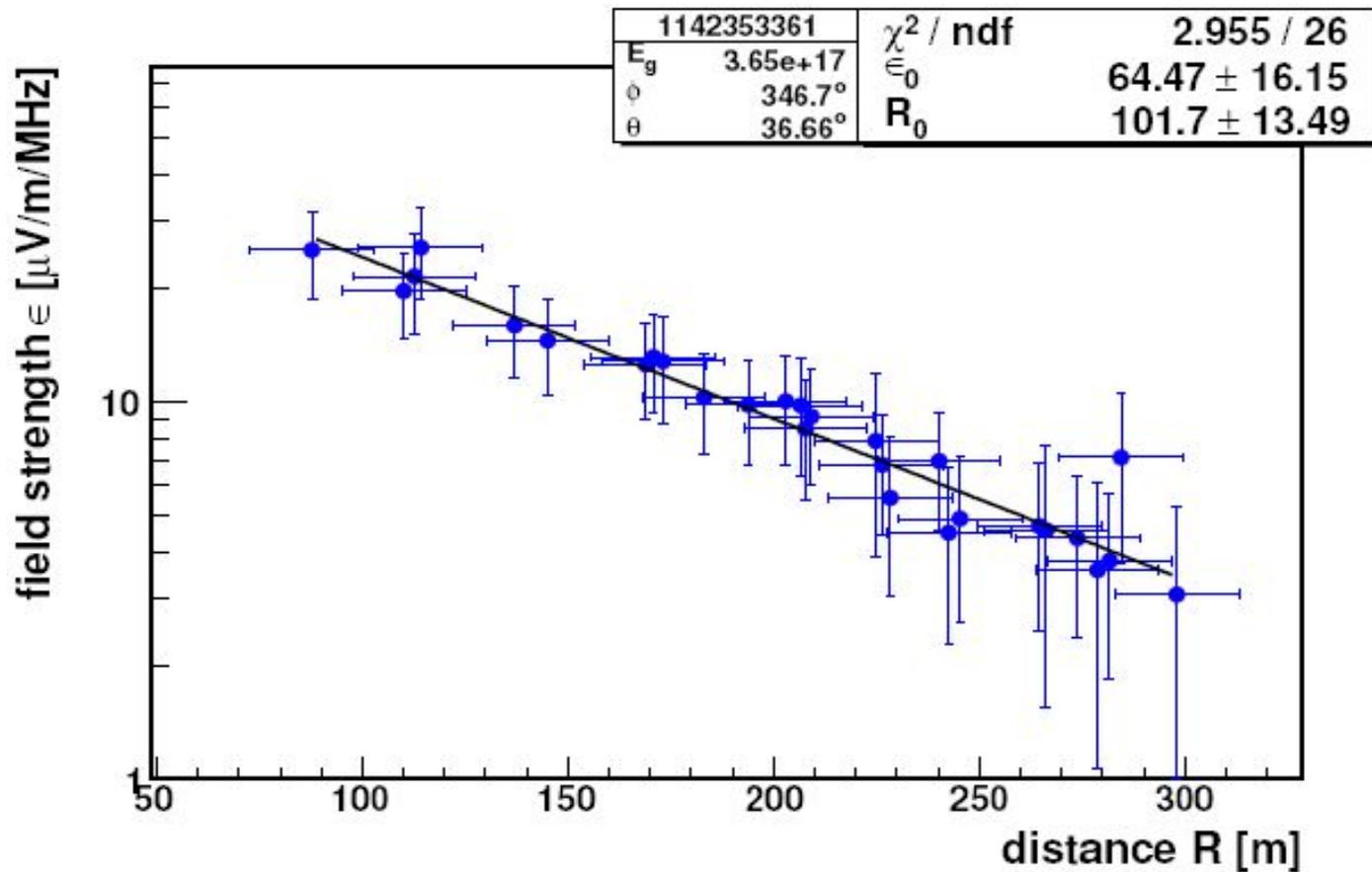
Моделирование:

60 МГц

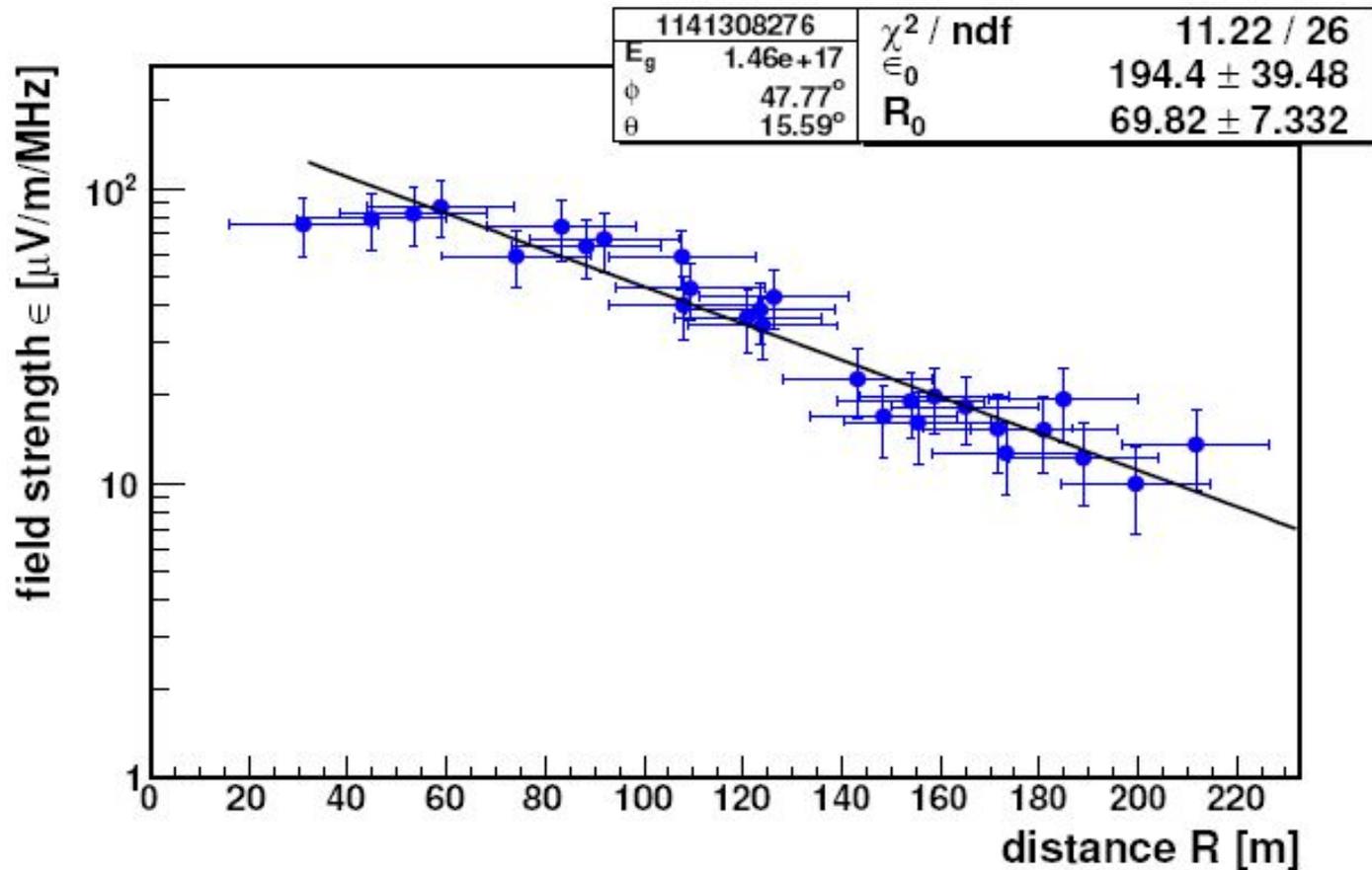
20 ливней

$$E_0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$$

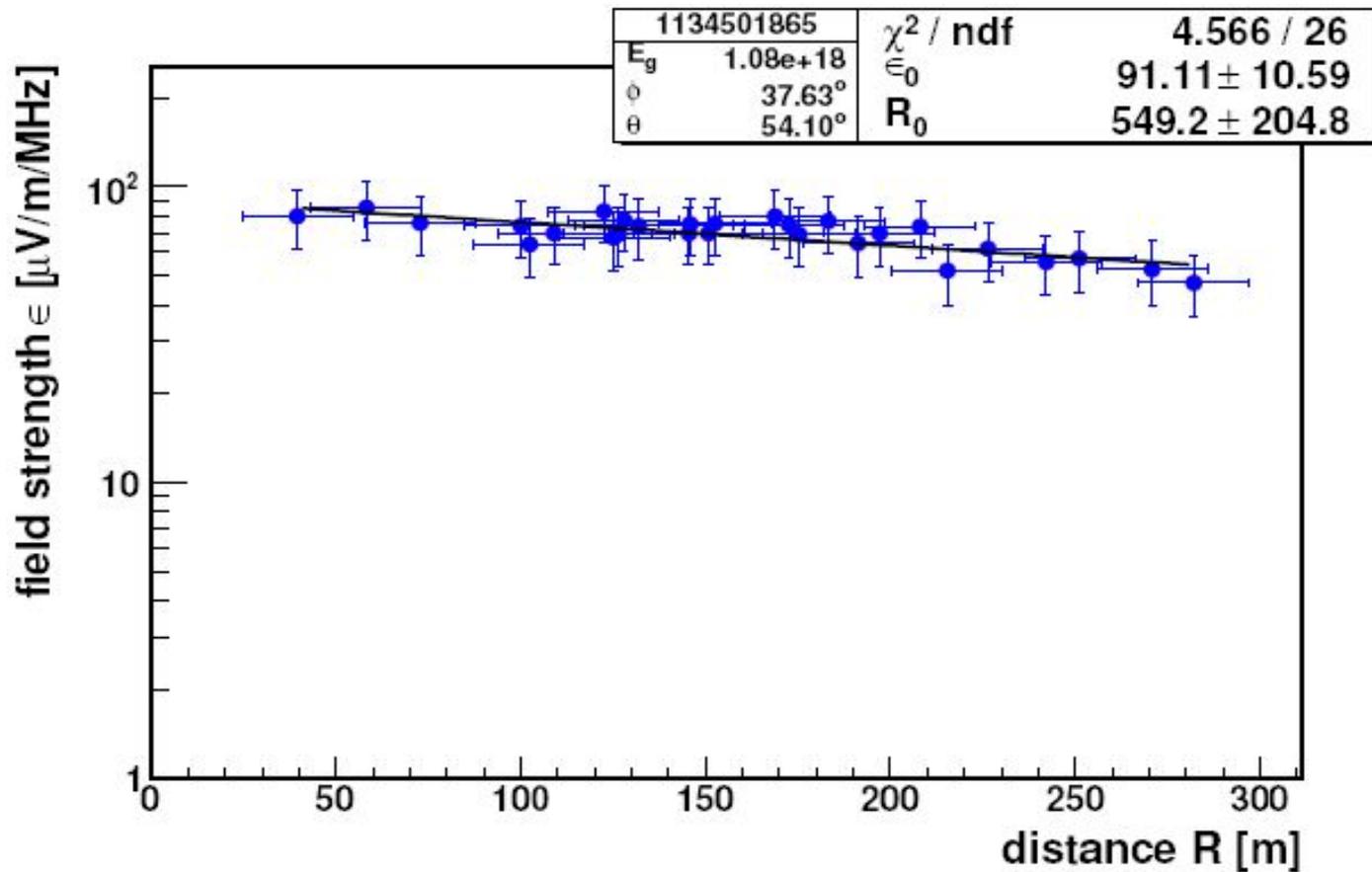
Индивидуальные ФПР: LOPES



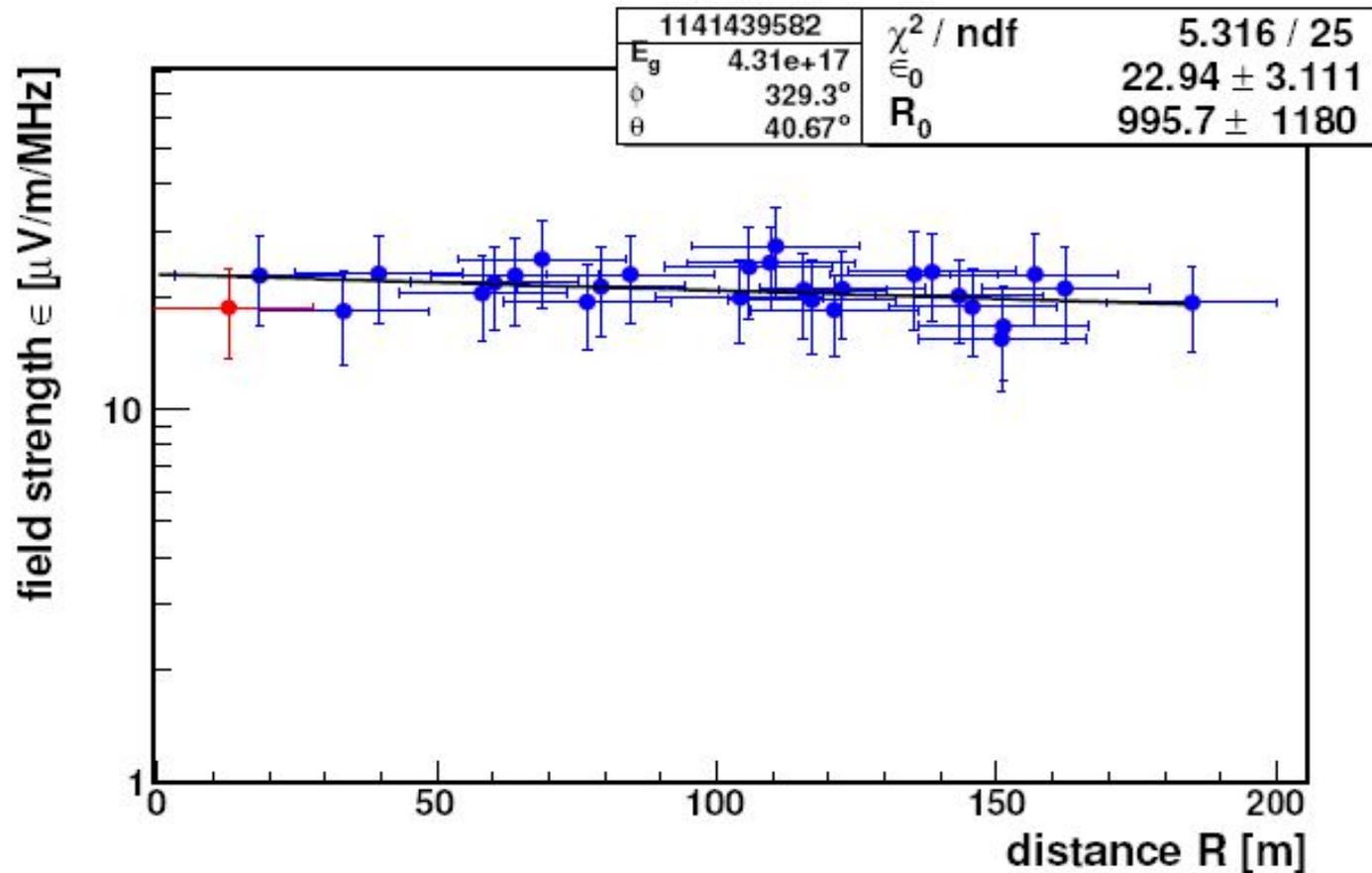
Индивидуальные ФПР: LOPES



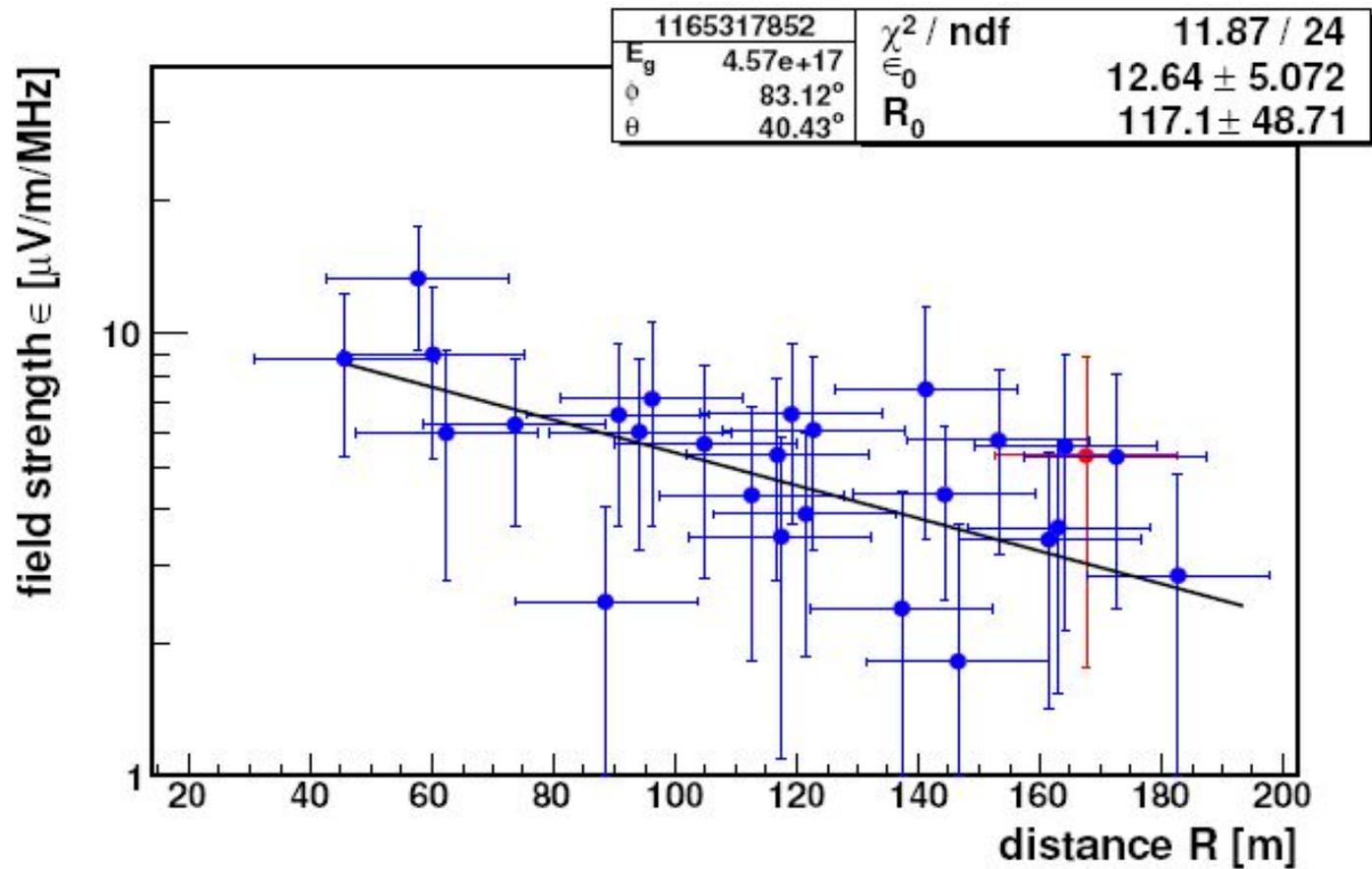
Индивидуальные ФПР: LOPES



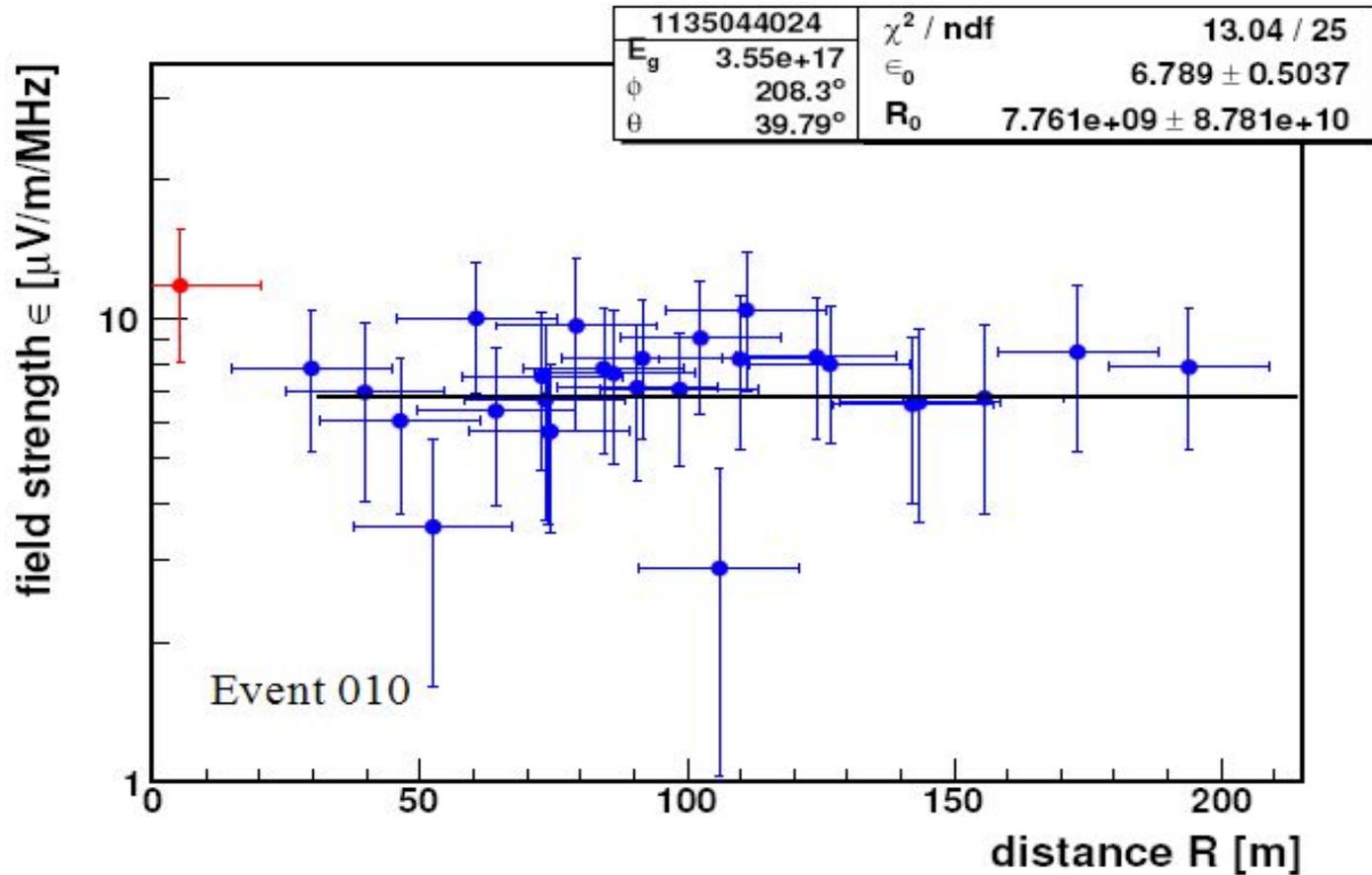
Индивидуальные ФПР: LOPES



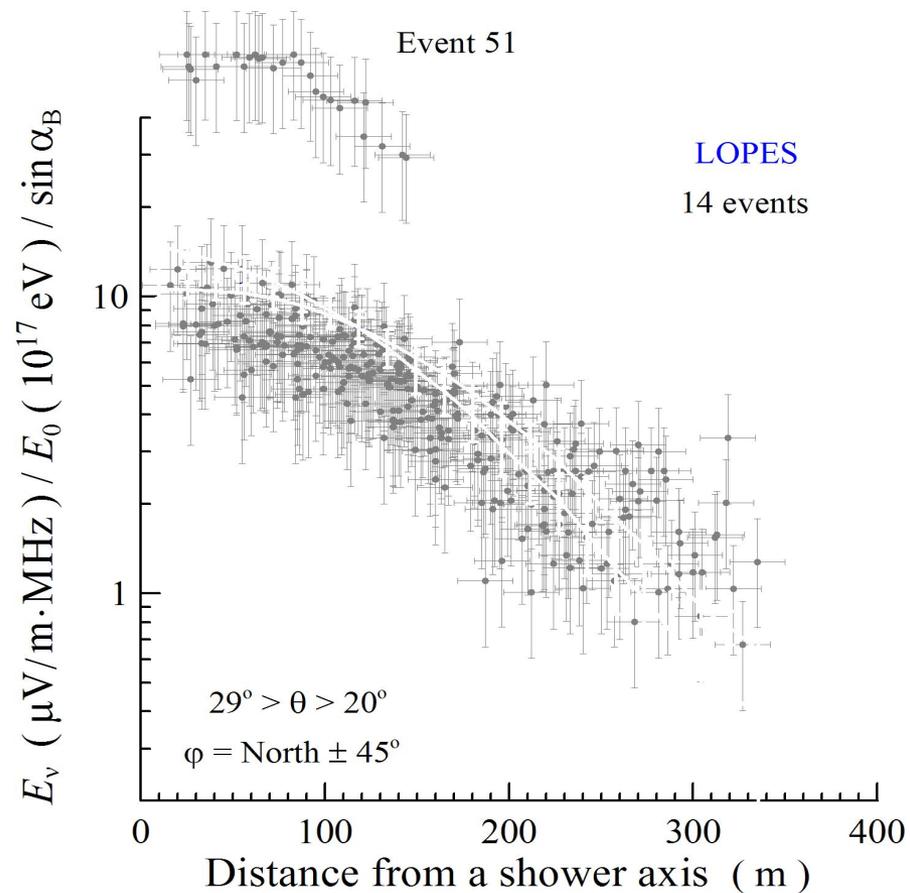
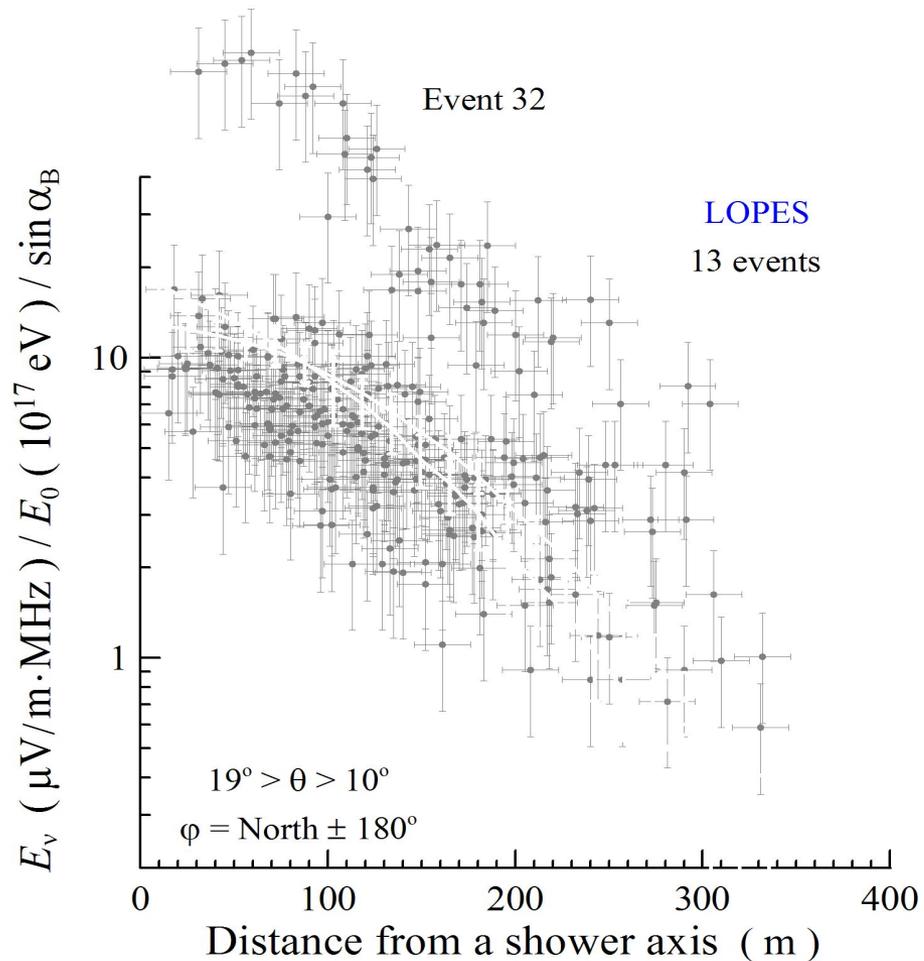
Индивидуальные ФПР: LOPES



Индивидуальные ФПР: LOPES



Исключенные события LOPES



Заключение

- 1. Согласие по форме расчетных и экспериментальных ФПР радиоизлучения ШАЛ**
- 2. Размер установки - не меньше 300 × 300 м**