

Моделирование и анализ данных установки ШАЛ-МГУ для изучения космических лучей с энергией порядка 10^{17} эВ

Ю. А. Фомин, Н.Н. Калмыков, , Г.В. Куликов, В.П. Сулаков (НИИЯФ МГУ);
И.С. Карпиков, М.Ю. Кузнецов, Г.И. Рубцов, , С.В. Троицкий (ИЯИ РАН).

ИЯИ РАН

«ЛОМОНОСОВ» 2017

Задачи и проблемы затрагиваемые в данной работе

- Проверка моделей адронных взаимодействий на энергиях не доступных на LHC, изучение проблемы избытка наблюдаемой плотности мюонов в ШАЛ (РАО, ЯКУШАЛ, HiRes-MIA)
- Поиск фотонов сверх высоких энергий ($E_{\text{gamma}} \gg 50 \text{ ТэВ}$)

Для данных исследований требуется полное моделирование установки ШАЛ-МГУ современными методами Монте-Карло

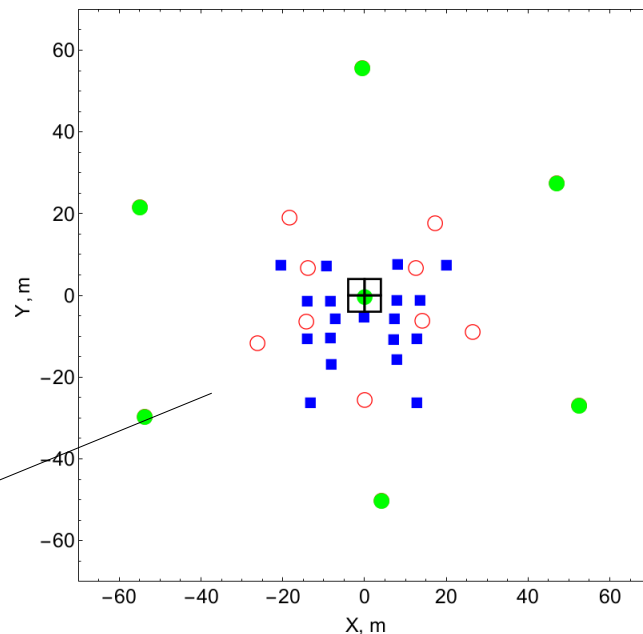
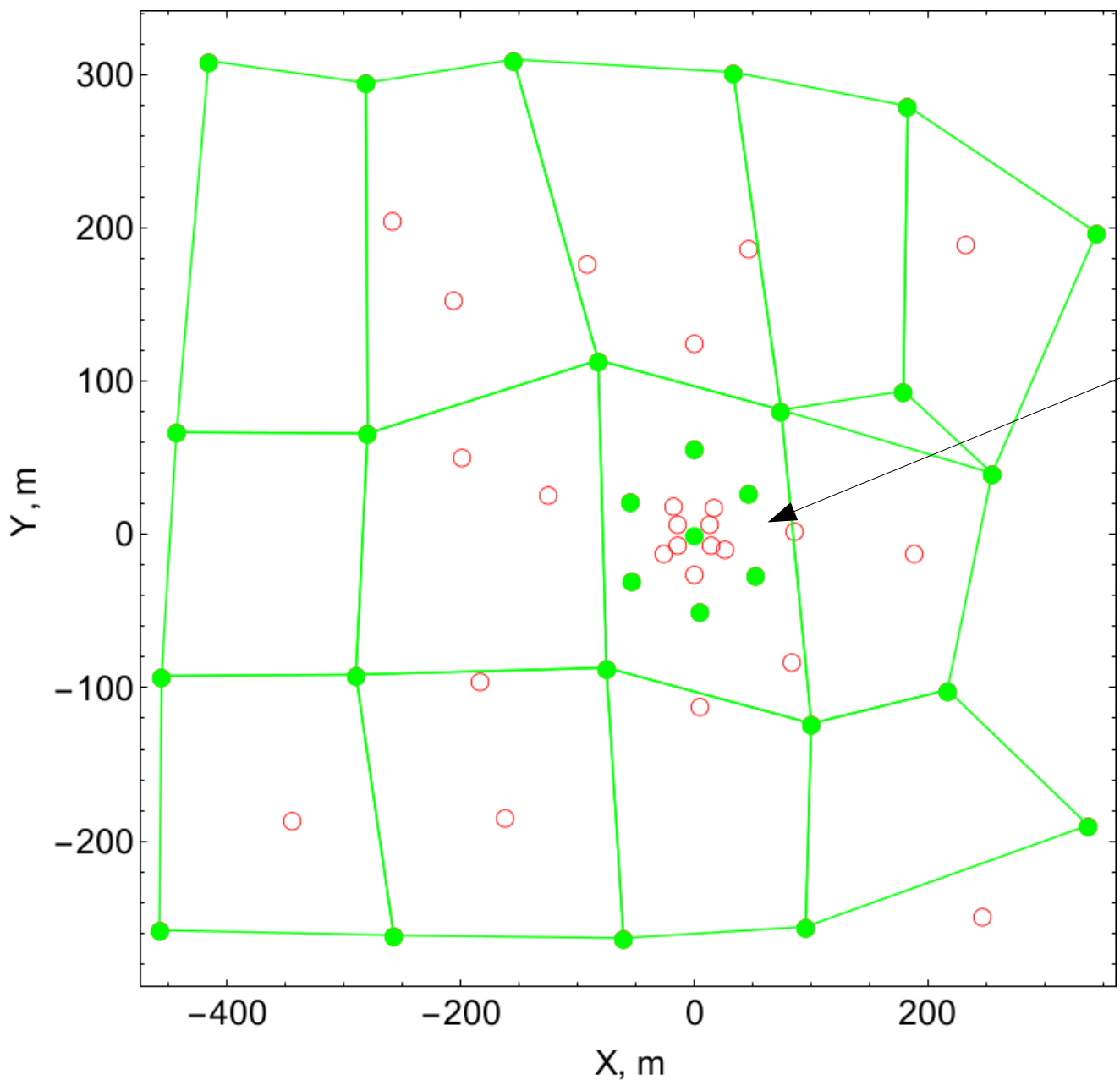
Эксперимент ШАЛ-МГУ подходит для этих данных задач так как:

- 1) Обширная наземная решетка регистрационных пунктов
- 2) Мюонный детектор

Общие характеристики установки ШАЛ-МГУ

- Расположение — кампус МГУ
- площадь установки 0.5 km²
- 77 регистрационных пунктов с счетчиками Гейгера-Мюллера, 29 сцинтилляторов для определения направления прихода.
- ~10000 счетчиков Гейгера-Мюллера с общей площадью ~ 250 m²
- подземный мюонный детектор (1104 счетчика Гейгера-Мюллера, площадь ~ 36.4 м², 40 м в.эк. $E_{\mu} \geq 10$ GeV)
- ~ 1200 дней работы (1984-1990)
- ~ 10⁶ события

Схема расположения регистрационных пунктов



Красные пустые круги - рег. пункты без сцинтиллятора («фургоны»)
Зеленые круги - рег. пункты с сцинтиллятором («фургоны» и рабочие помещения)
Голубые квадраты - боксы
Черный пустой квадрат это центральное помещение и **мюонный детектор**

Полное моделирование установки методом Монте-Карло

CORSIKA + EGS4 + Fluka + **QGSJET-II-04**

$10^{16.5} \leq E \text{ primary} \leq 10^{17.75} \text{ eV}$, $dN/dE \sim E^{-3.1}$, $\theta < 35^\circ$



Код на C++ создает случайные координаты ливня (X, Y), моделированы отклик детекторов (счетчиков Гейгера и сцинтилляторов)

и записывает событие в формат аналогичны формату реальных данных



Реконструкция данных и МК выполняется одной программой (за исключением небольшого различия в вариации геометрии установки)

⇒ **885 протонных** и **622 железных** ливней создано в программе CORSIKA

Результаты моделирования установки

Критерии отбора событий :

- Реконструкция прошла успешно

- $N_e > 2 \cdot 10^7$ ($E_{mc} > 3 \cdot 10^{16}$ eV)

- $R < 240$ m

- $\Theta < 30^\circ$

- $0.3 < S < 1.8$

Отобранно 4468 протонных ШАЛ,

1093 железных ШАЛ

922 ШАЛ из данных

Точность реконструкции для 1σ

- $\Delta\psi < 1.1^\circ$ — направления прихода

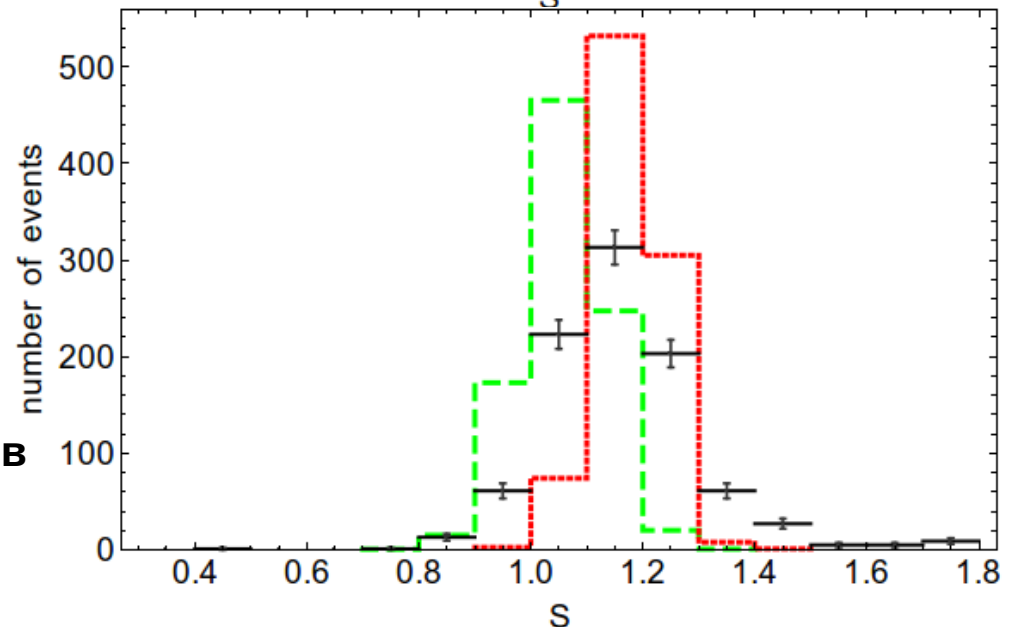
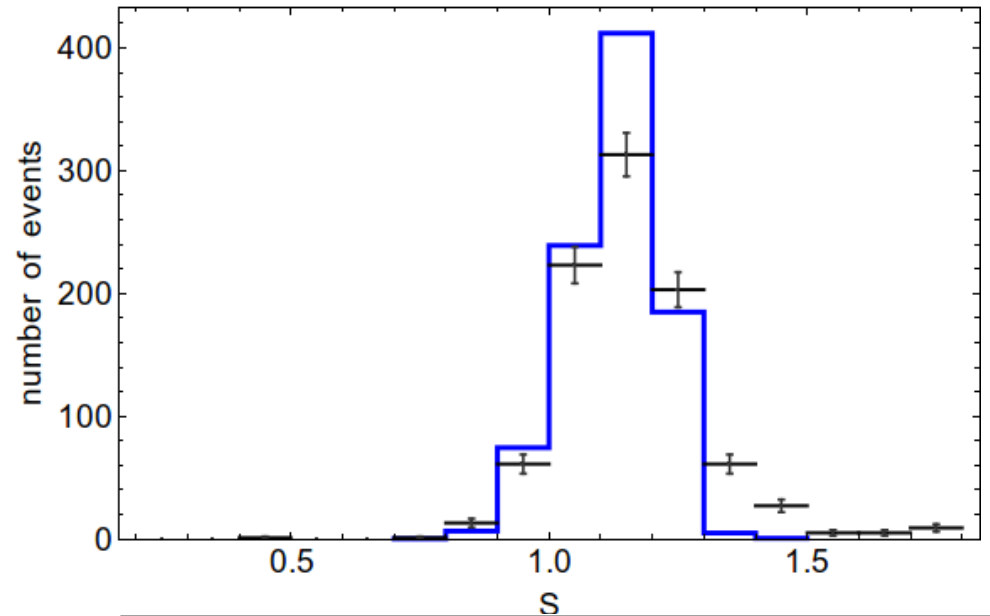
- $\Delta R < 5.4$ m — положения оси

- $\Delta N_e / N_e < 0.18$

Первичный состав найден при помощи наилучшей подгонки МК под распределения S в данных

Доля протонов ~ 43%

Доля железа ~ 57%



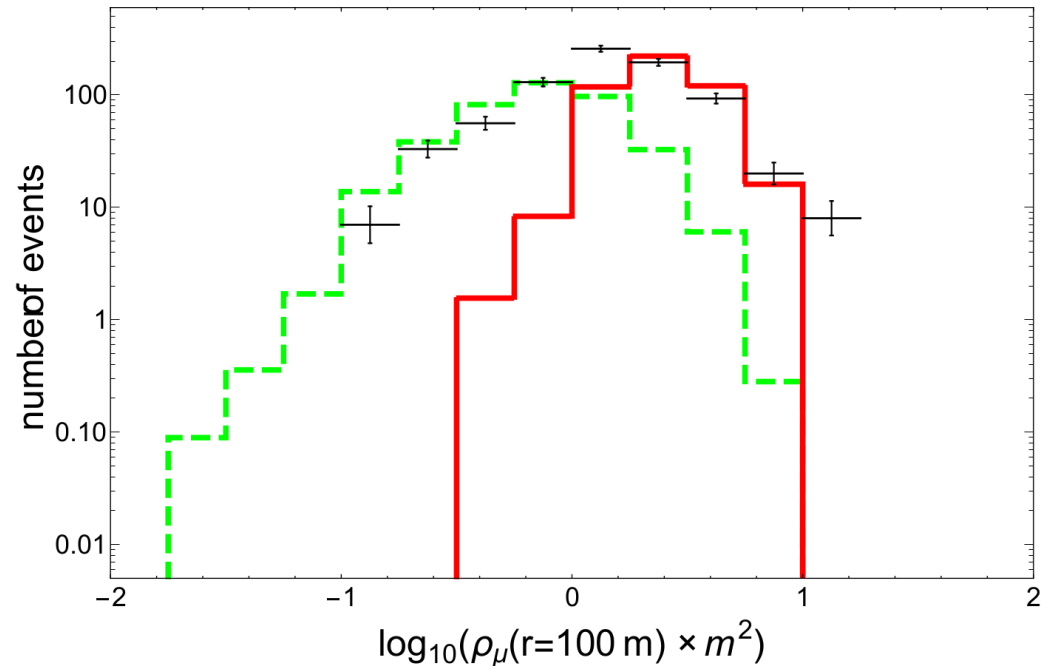
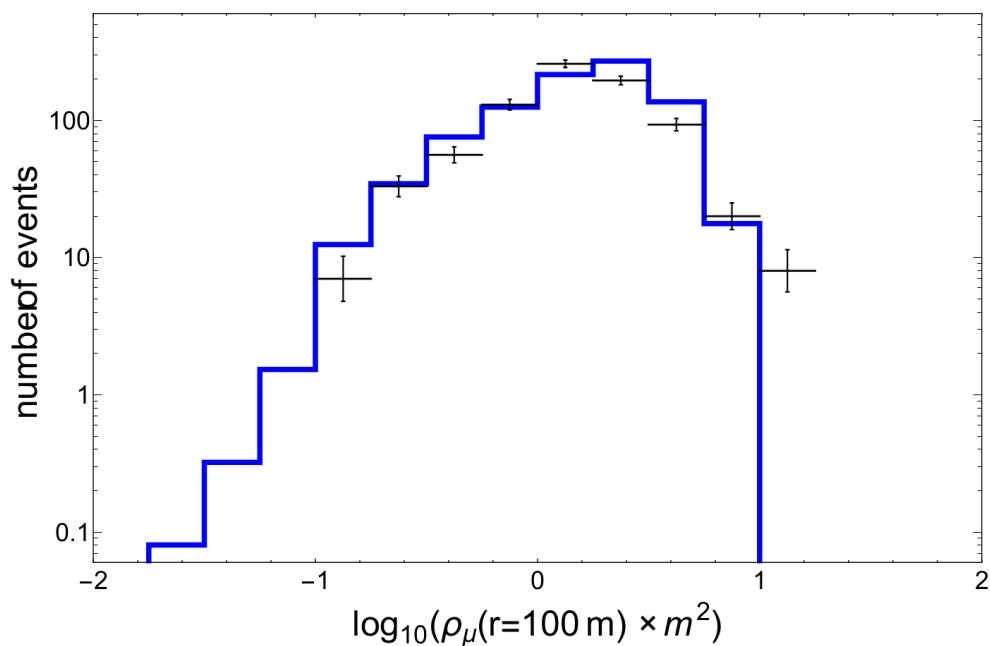
Точки с ошибками: данные

Синяя гистограмма: МК (наилучший состав)

Красная гистограмма точкой: МК(железо)

Зеленая пунктирная гистограмма: МК (протоны)

Сравнение распределения плотности мюонов на 100 м в данных и МК



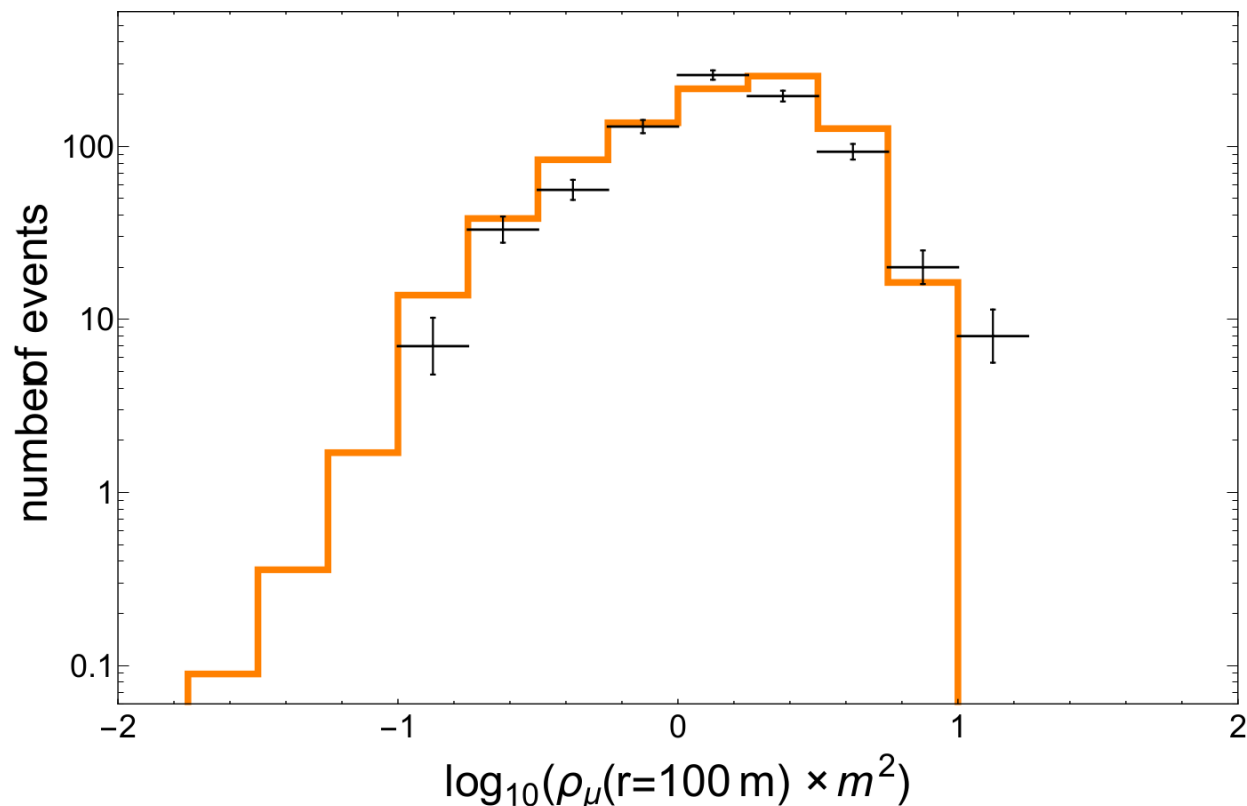
$$\text{ФПР мюонов: } \rho_{\mu}(r) \sim N_{\mu} (r/R_0)^{-a} \text{Exp}(-r/R_0), \quad R_0=80\text{m}, a=0.7$$

Сравнение распределения плотности мюонов на 100 м в данных и МК. Точки с ошибками: **данные**.

Зеленая пунктирная гистограмма: МК (протоны); **красная гистограмма точками:** МК(железо); **синяя гистограмма:** МК (наилучший состав). Моделирование хорошо описывает мюонные данные. В данном случае нет избытка числа мюоны.

Best fit $w_{\text{Fe}} = 57\%$ (первичный состав по S)

Определение первичного состава по ПЛОТНОСТИ МЮОНОВ



Доля протонов ~46%

Доля железа ~ 54%

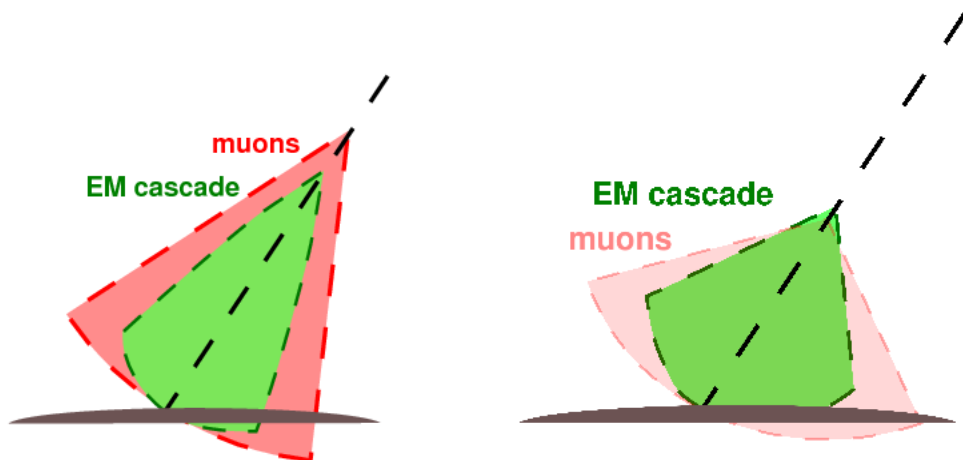
Первичный состав найденный с помощью подгонки МК под распределения $\rho_{\mu}(100\text{m})$ в данных

Первичный состав из $\rho_{\mu}(100\text{m})$ не сильно отличается от первичного состава, который найден через распределение S

Поиск первичных фотонов в эксперименте ШАЛ-МГУ

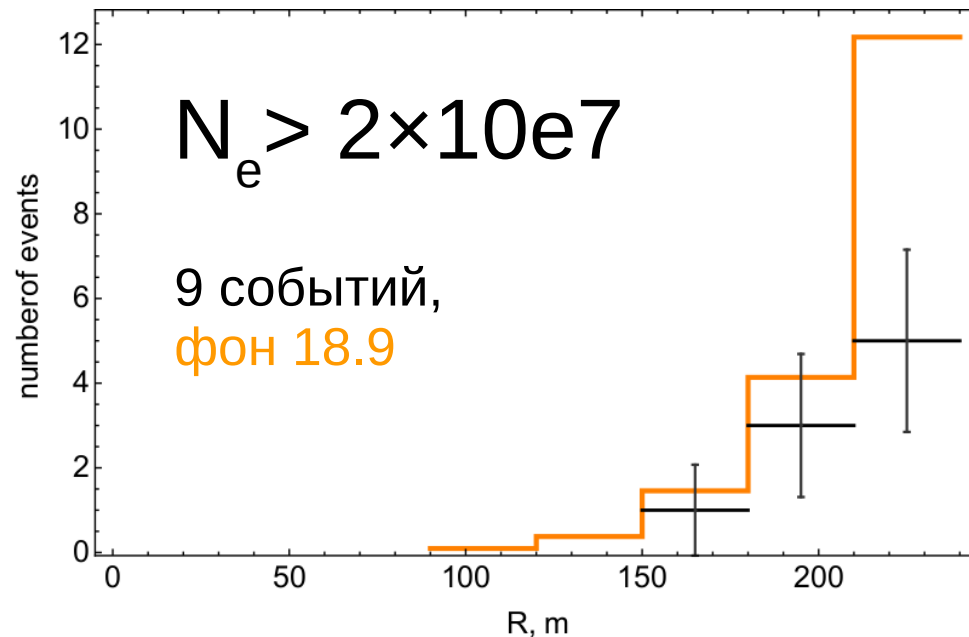
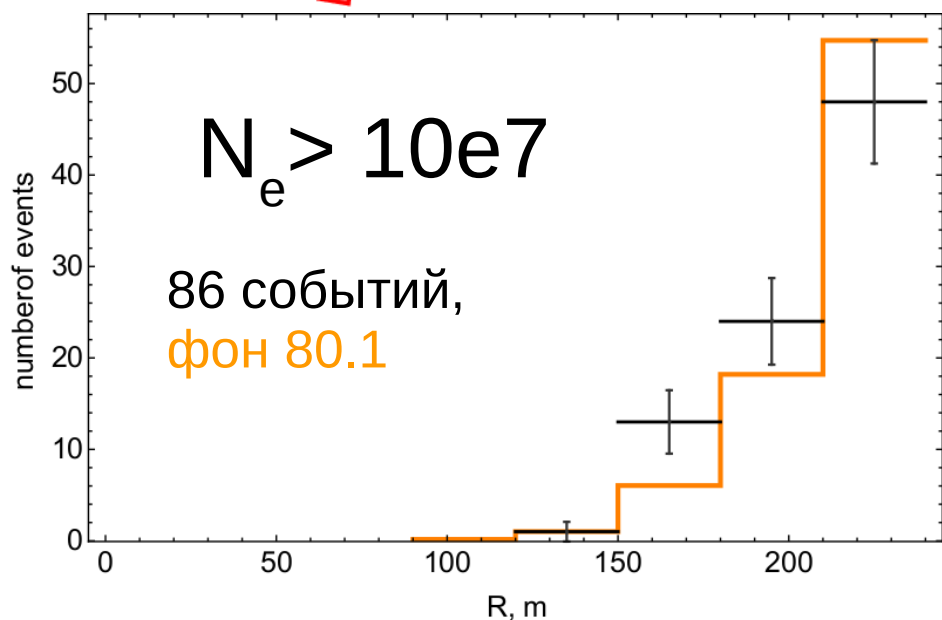
hadron-induced EAS

gamma-induced EAS



Фотонный ливень содержит намного меньше мюонов чем адронный

Но низкоэнергичный адронный ливень может индуцировать маломюонное событие



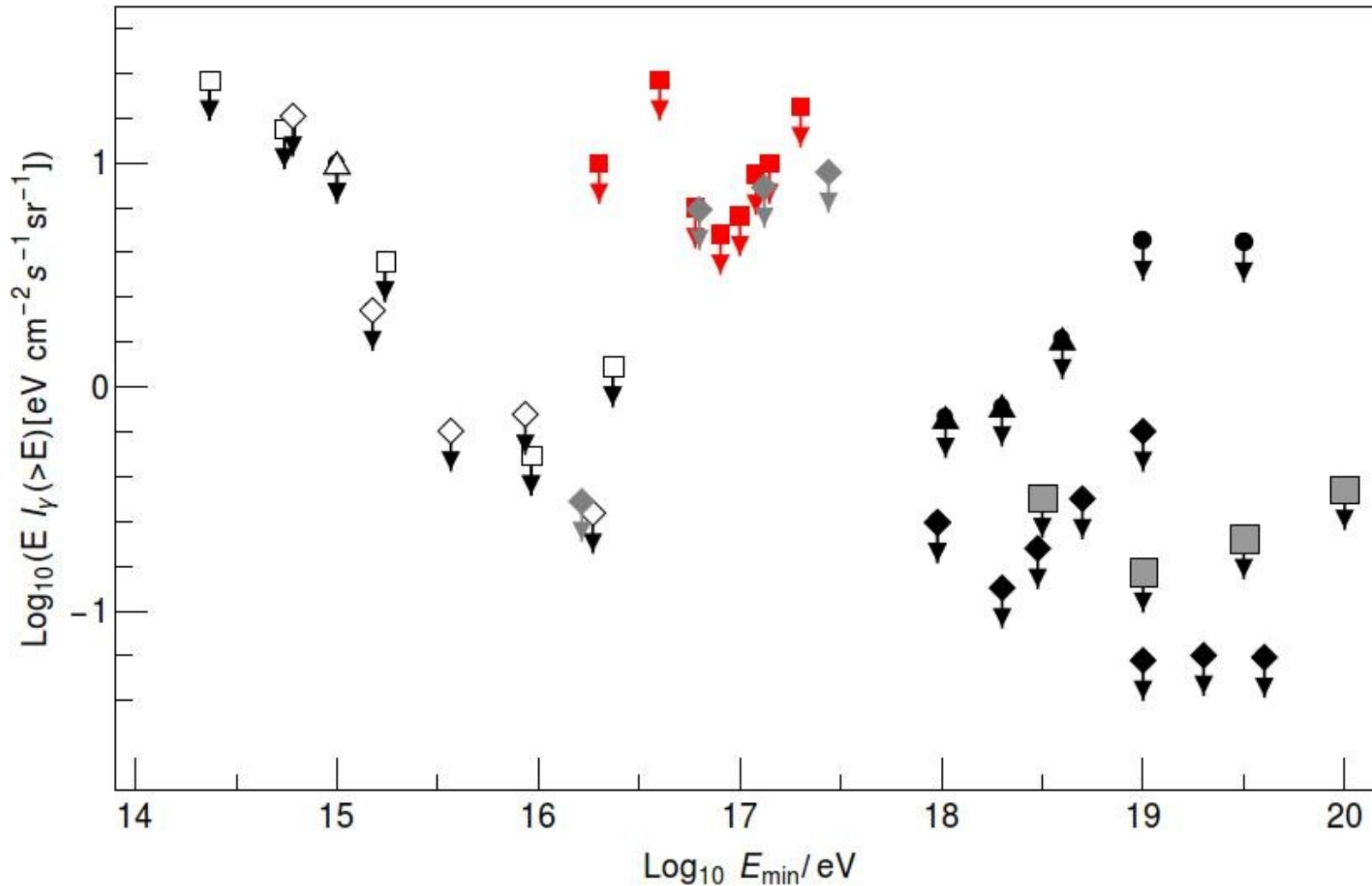
Первичный состав по мюонам 54% железа

Ограничения сверху на интегральный поток фотонов I_{gamma}

$$I_{\text{gamma}} = n_{\text{FC}} / A_{\text{eff}}$$

E_{γ}^{min} , eV	N_e^{min} , 10^7	n_{obs}	n_{b}	n_{γ}^{FC}		$10^{16} \times A_{\text{eff}}$, (s·m ² ·sr)	$I_{\gamma} \times 10^{-16}$, (s·cm ² ·sr) ⁻¹	
				(90% CL)	(95% CL)		(90% CL)	(95% CL)
2×10^{16}	1	86	80.1	22.4	25.71	5.16	4.34	4.98
4×10^{16}	1	86	80.1	22.4	25.71	4.39	5.09	5.85
6×10^{16}	1.38	29	42.6	2.48	3.85	3.67	0.68	1.05
8×10^{16}	1.84	9	21.7	1.26	2.13	3.53	0.36	0.6
10^{17}	2.3	5	12.9	1.21	1.84	3.14	0.39	0.58
1.2×10^{17}	2.76	4	8.6	1.66	2.38	3.23	0.51	0.74
1.4×10^{17}	3.22	2	5.6	1.44	2.16	3.05	0.47	0.71
2×10^{17}	4.6	1	2.8	2	2.75	3.08	0.65	0.89

Сравнение с другими экспериментами



Full boxes (red online): this work;

open triangles (EAS-TOP), open boxes (CASA-MIA), open diamonds (KASCADE), gray diamonds (KASCADE-Grande), full triangles (Yakutsk), full diamonds (Pierre Auger), full circles (AGASA), large full boxes (Telescope Array). All limits below 10^{18} eV are 90% CL, all limits above 10^{18} eV are 95% CL

Заключение

- Выполнено моделирование установки ШАЛ-МГУ современными методами Монте-Карло
- Проведен анализ данных мюонного детектора. Модель установки достаточно хорошо описывает наблюдаемое количество мюонов в ШАЛ
- Данные мюонного детектора использовались для поиска фотонов сверх высоких энергий. Был установлен более строгий верхний предел на интегральный поток гамма лучей.