

Исследование характеристик космических лучей предельных энергий радиометодом на частоте 30-35 МГц на Якутской установке

И.С. Петров (igor.petrov@ikfia.ysn.ru)

С.П. Кнуренко (knurenko@ikfia.ysn.ru)

ИКФИА СО РАН

poster-id: 20

Введение

В работе обосновывается возможность исследования космических лучей предельных энергий, с $E \geq 10^{18}$ эВ, с помощью измерений отклика радиоантенн в диапазоне 30-35 МГц на прохождение лавины заряженных релятивистских частиц широкого атмосферного ливня в земной атмосфере. Показано, что независимо от других способов изучения физики ШАЛ, метод регистрации радиоизлучения способен определять основные характеристики космических лучей. Например, энергию первичной частицы, генерирующей широкий атмосферный ливень, продольное развитие ливня — что дает возможность определить атомный вес первичной частицы, углы прихода ливня и отсюда, вести поиск источников космических лучей во Вселенной.

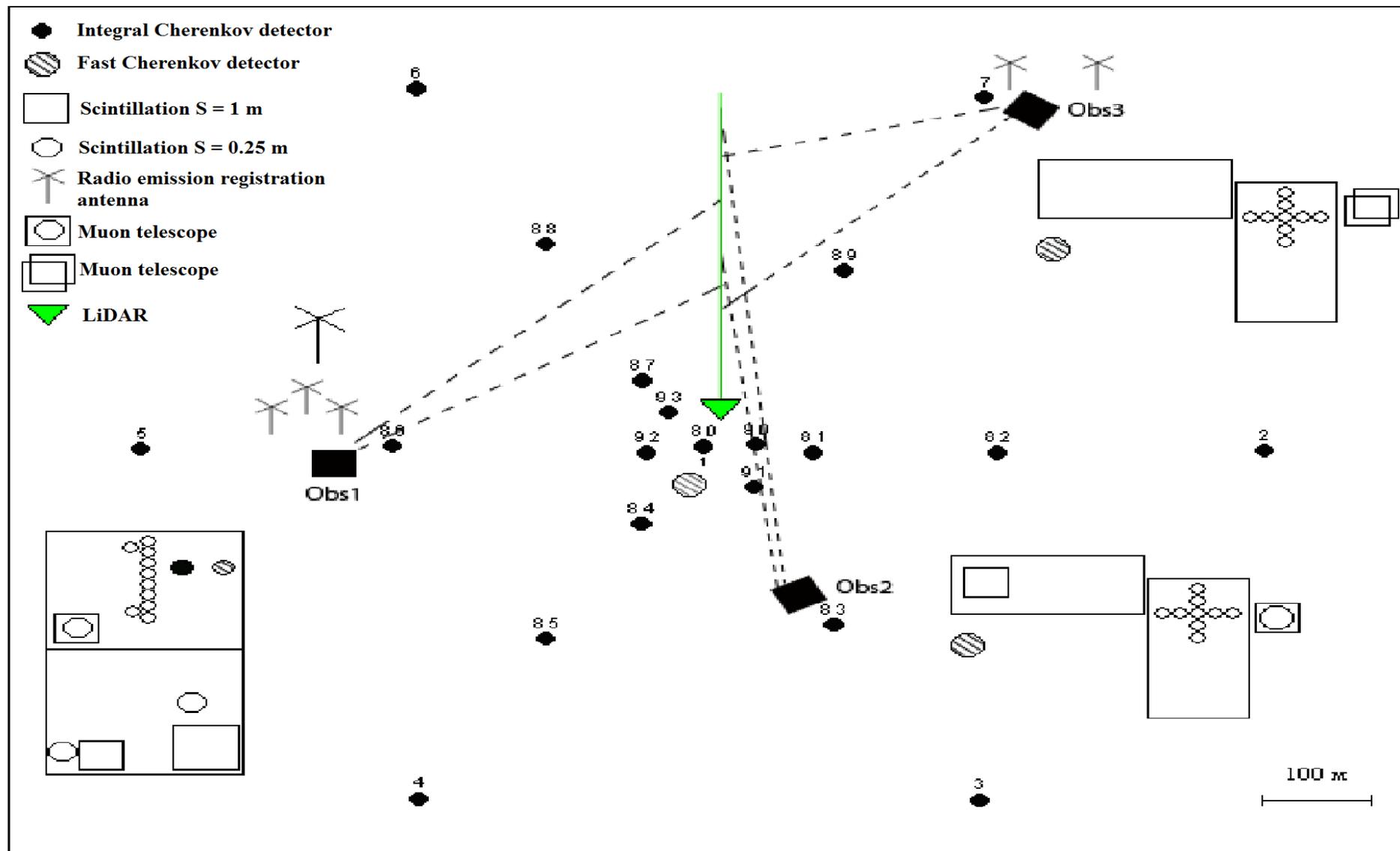
На Якутской установке широких атмосферных ливней впервые в мире, еще в 80 годы прошлого столетия, были зарегистрированы ливни с энергиями 10^{19} эВ и несколько ливней с энергиями $\sim 10^{20}$ эВ. Таким образом, было доказано существование радиоизлучения от частиц широких атмосферных ливней с энергией выше 10^{19} ЭэВ и показана возможность изучать космические лучи предельных энергий методом регистрации радиоизлучения. Этот метод финансово менее затратный, чем, если бы космические лучи изучались с применением больших оптических или сцинтилляционных установок. Он не зависит от состояния атмосферы, как это в случае с установками, работающими в видимом оптическом диапазоне, и способен обеспечить большую статистику ливней с энергией выше 10^{19} ЭэВ, если расположить антенны на спутниках, находящихся на орбитах в околоземном пространстве.

Антенны радиоизлучения на Якутской установке

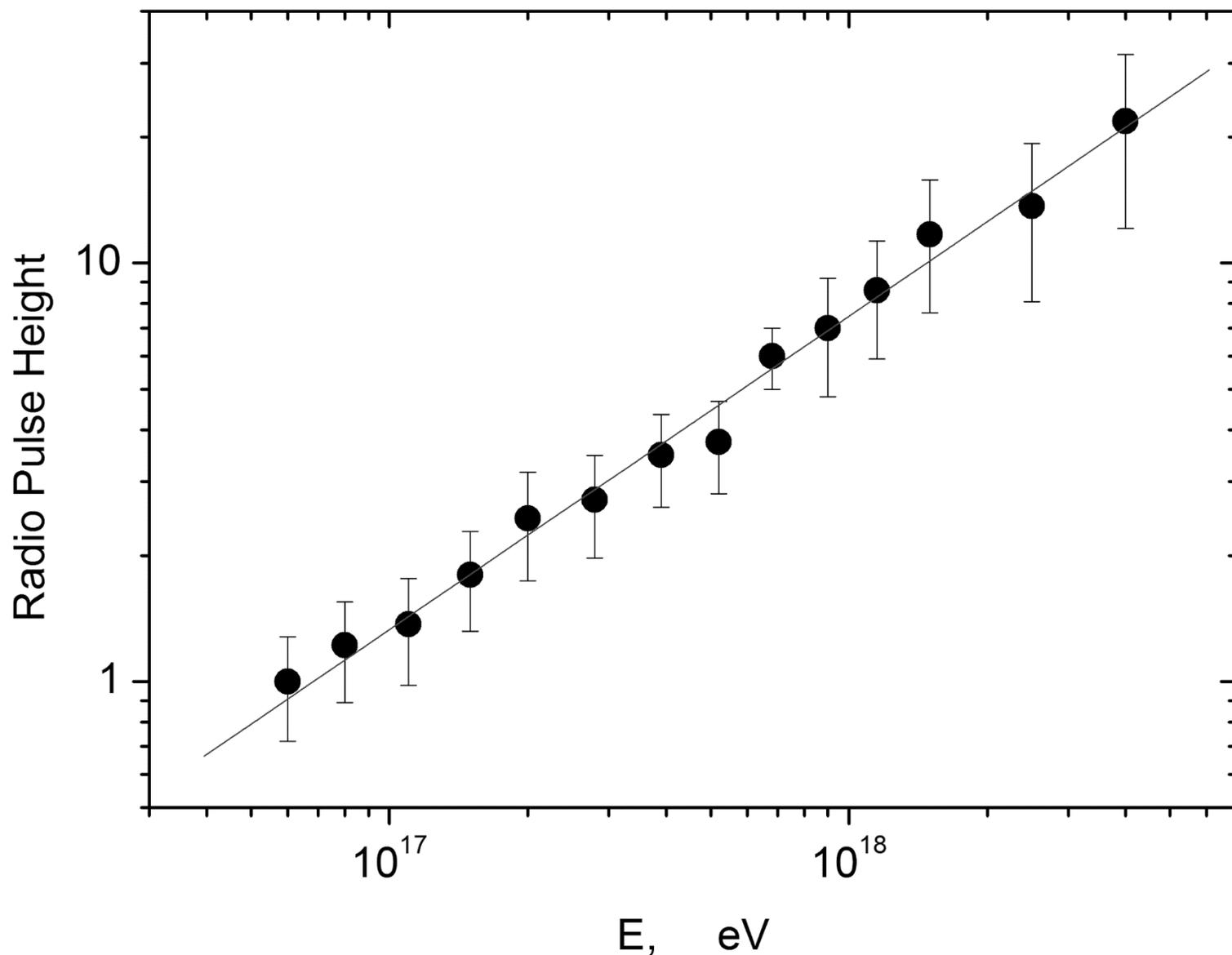


На Якутской установке
измеряются:

- Заряженная компонента
- Черенковское излучение ШАЛ
- Мюонная компонента
- Радиоизлучение ШАЛ



Зависимость амплитуды радиоизлучения от энергии ливня

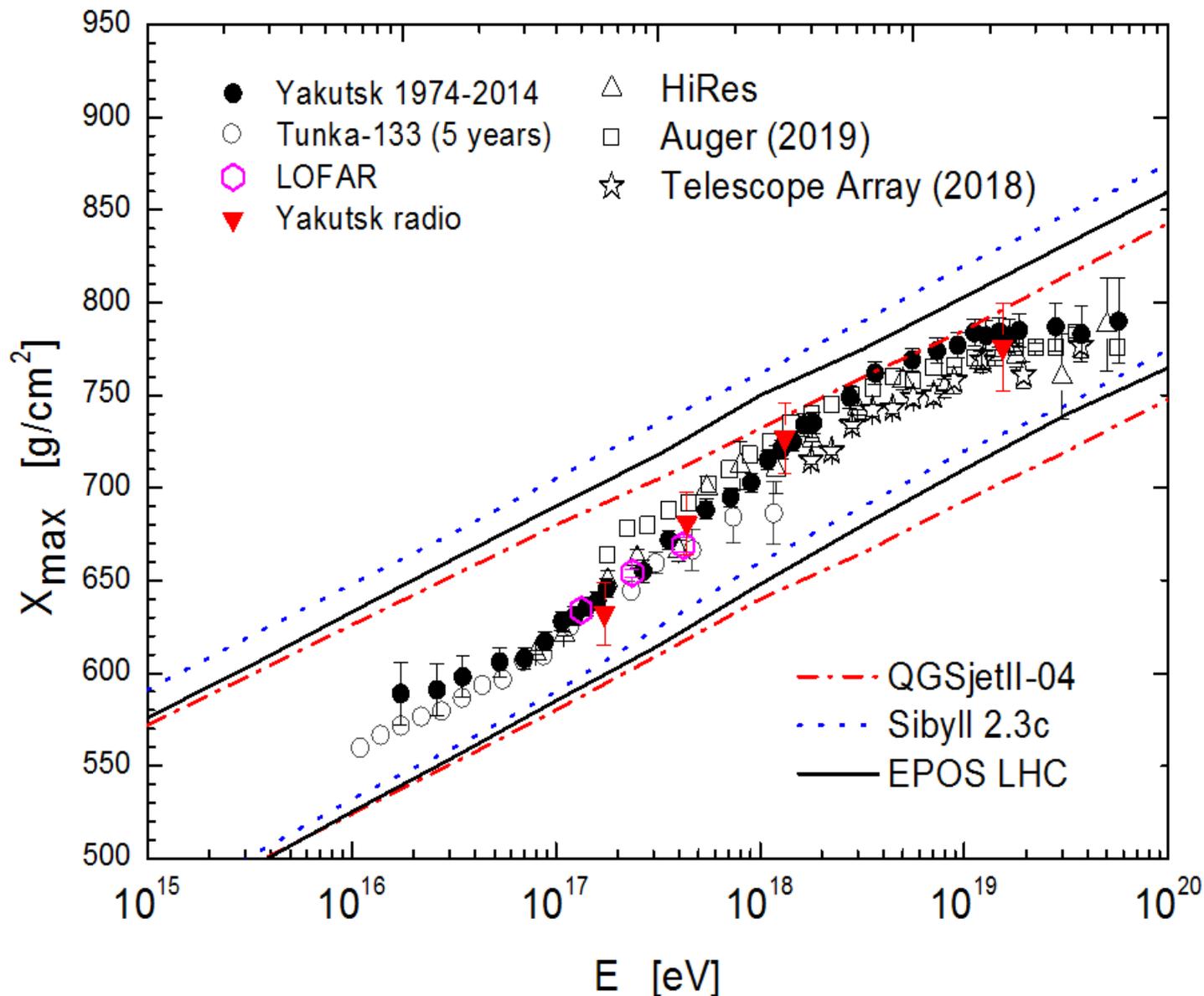


$$\varepsilon_{EW} = (1.3 \pm 0.3) \left(\frac{E_0}{10^{17} \text{ eV}} \right)^{0.99 \pm 0.04}$$

Точки – это средние амплитуды радиосигнала разделенные по бинам. Линия – это аппроксимирующая линия рассчитанная по формуле, приведенной выше.

Данная формула позволяет оценить энергию ливня по радиоизлучению независимо от других методов изучения ШАЛ.

Глубина максимума развития ливня X_{\max}



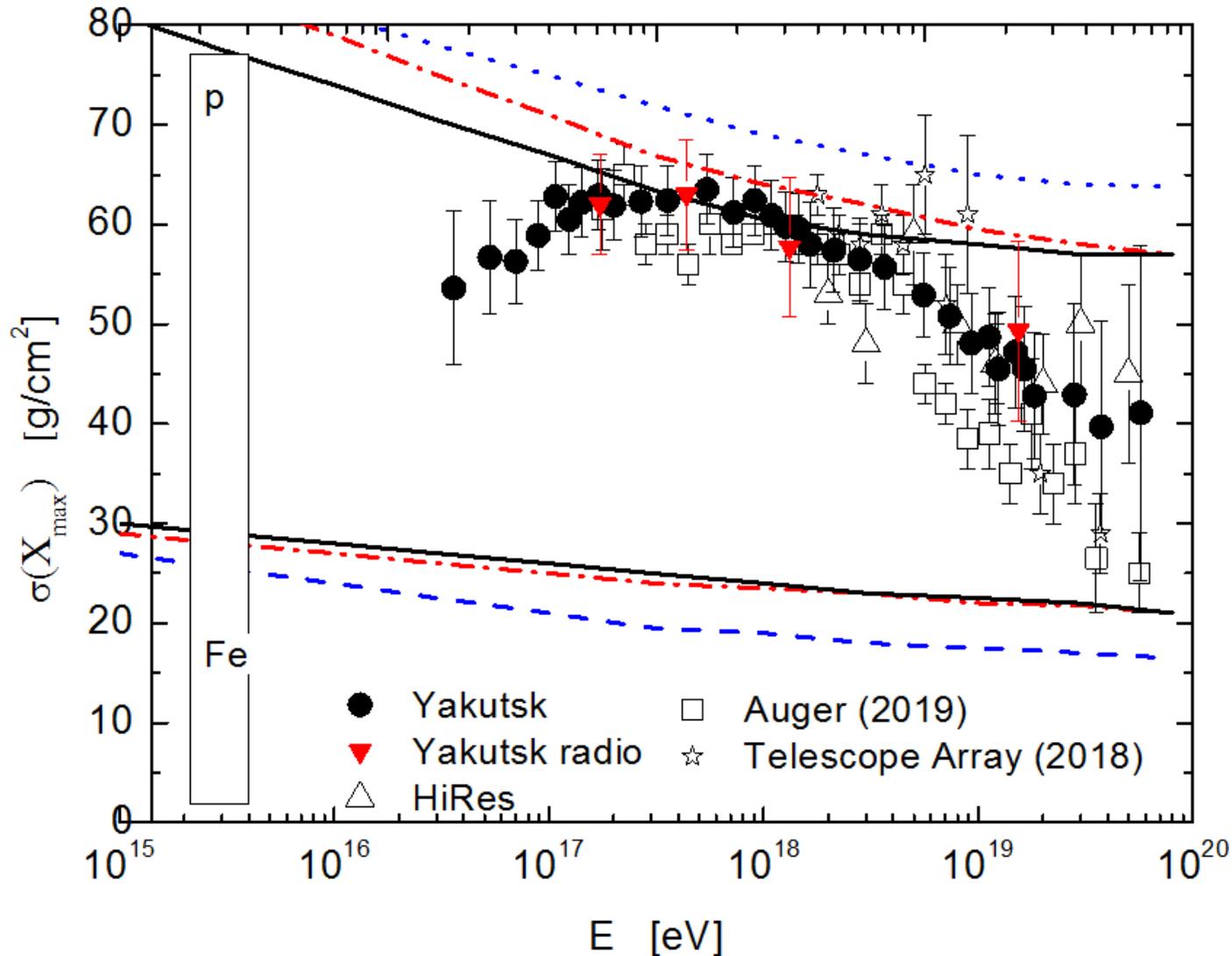
$$X_{\max} = (655 \pm 10) + (100 \pm 5) \left(\frac{P_1 - 3.01}{0.46} \right) \quad (1)$$

$$X_{\max} = (660 \pm 15) + (100 \pm 5) \left(\frac{P_2 - 11.5}{3} \right) \quad (2)$$

Согласно расчетам ФПР радиоизлучения отражает продольное развитие ливня, что позволяет определить глубину максимума развития X_{\max} , для этого используются формулы (1) и (2).

Где P – это отношение амплитуд на разных расстояниях от ливня.

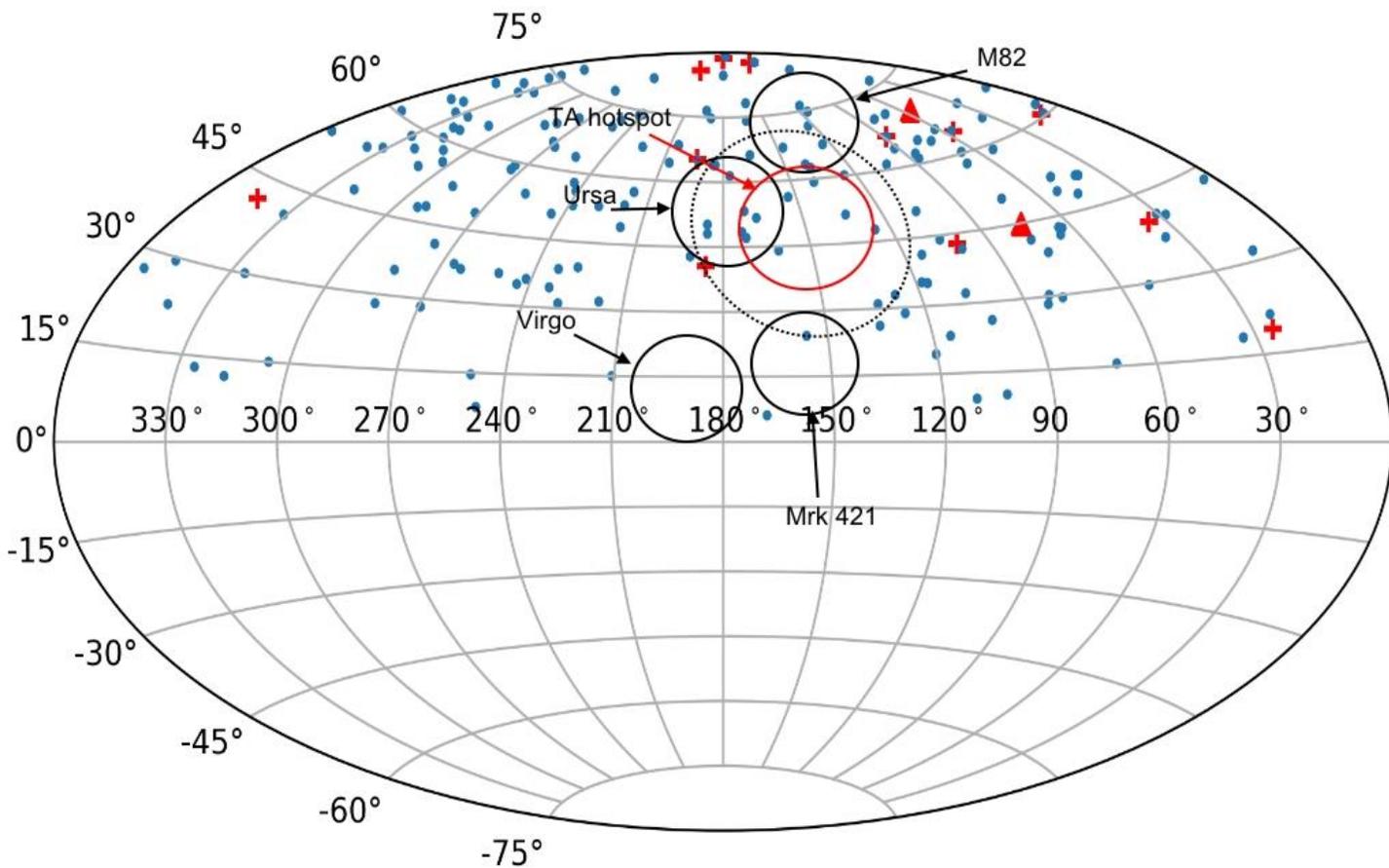
Флуктуации X_{\max} от энергии ШАЛ



Флуктуации глубины максимума развития ШАЛ в области энергии $3 \cdot 10^{16}$ - $5.7 \cdot 10^{19}$ эВ. Черными точками показаны результаты, полученные из анализа черенковского света ШАЛ, красными точками – результаты, полученные из измерений радиоизлучения. Линии – это модели QGSJetII-04, Sibyll 2.3c и EPOS-LHC для p и Fe.

Как видно из рисунка, флуктуации в области энергии 10^{16} - 10^{17} эВ растут, в области 10^{17} - 10^{18} эВ постоянны, а выше энергий $> 5 \cdot 10^{18}$ эВ начинают уменьшаться и при $3 \cdot 10^{19}$ эВ состав КЛ состоит из средних и тяжелых ядер.

ШАЛ с энергией выше $5 \cdot 10^{18}$ эВ



Красным цветом обозначены ливни зарегистрированные радиоантеннами

кресты - $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ,

треугольники – $E \sim 10^{20}$ эВ.

Точками обозначены ливни с энергией выше $5 \cdot 10^{18}$ эВ,

Окружностями выделены границы источников активных в области радио, гамма и рентгеновского излучения.

На слайде, показана область “hotspot”, установленная по данным установки Telescope Array.

Предположительно эти источники могут являться генераторами космических лучей предельных энергий

Заключение

Якутская комплексная установка ШАЛ непрерывно работает 50 лет, измеряя электронно-фотонную, мюонную компоненты, черенковское и радиоизлучения. За это время изучено радиальное распределение компонент, сделана оценка энергии ШАЛ (методом баланса энергий) и изучена зависимость характеристик ливней от энергии и зенитного угла.

- Используя данные измерений черенковского света и радиоизлучения ШАЛ, независимо было восстановлено продольное развитие X_{\max} и оценены флуктуации $\sigma(X_{\max})$ в области энергией 10^{16} - $5 \cdot 10^{19}$ эВ;
- Оказалось, что X_{\max} неравномерно смещается в глубь атмосферы с ростом энергии. Е.Р. имеет значения 48 ± 6 , 78 ± 5 , 63 ± 6 , 50 ± 7 г/см² на разных интервалах по энергии. Флуктуации $\sigma(X_{\max})$ в зависимости от энергии имеют максимум в распределении приблизительно при 10^{17} - $3 \cdot 10^{17}$ эВ.
- Из данных, приведенных на сл. 5 и сл. 6 можно сказать, что в области энергий $< 10^{17}$ эВ значительно больше ядер с атомным весом 4-56, для области 10^{17} - 10^{18} эВ доля протонов достигает максимума в 60-80%, а затем, с ростом энергии постепенно уменьшается. В области энергий $> 10^{19}$ эВ космические лучи состоят из более тяжелых элементов;
- Используя данные радиоизлучения за 1986-1989 и 2009-2018 гг., были отобраны ливни с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ и нанесены на карту неба. Несмотря на низкую статистику, показано, что радиоизмерениями можно вести поиск источников космических лучей сверхвысоких энергий.

Список литературы

- F. Kahn and I. Lerche, Proc. of R. Soc. A. **289**, 206 (1966).
- H. Falcke and P. Gorham, Astroparticle Physics, **19**, 477 (2003).
- Аскаръян Г.А. ЖЭТФ. 1961. Т. 41, № 2. С. 616-618.
- W.D. Apel, J.C. Arteaga-Velazquez, L. Bähren et al., Phys. Rev. D., **90**, 062001 (2014).
- S. Knurenko and I. Petrov, J. Phys.: Conf. Ser., **632**, 012100 (2015).
- V. Kozlov, S. Knurenko, V. Mullayarov, Z. Petrov and M. Pravdin, Proc. 1st Int. Conf. Electromagnetic Method of Environmental Studies, 215-217 (2012).
- S. Ellingson, J. Simonetti and C. Patterson, IEEE Trans. Antennas and Propag, **55**, 826 (2007).
- S.P. Knurenko, Z.E. Petrov and I.S. Petrov, NIM A, **866**, 230-241 (2017).
- С.П. Кнуренко, И.С. Петров, Известия РАН. Сер. Физ. **79**, № 3, с. 446-448 (2015).
- С.П. Кнуренко, А.А. Иванов, И.Е. Слепцов, А.В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ. **83**, вып. 11, с. 563-567 (2006)
- T. Huege, R. Ulrich and R. Engel, Astropart. Phys., **30**, 96 (2008).
- K.D. de Vries, A.M. van den Berg, O. Scholten and K. Werner, Astropart. Phys. **34**, 267 (2010)
- N.N. Kalmykov and A.A. Konstantinov, J. Cosmol. Astropart. Phys. **12**, 029 (2012)
- P.A. Bezyazeekov, N.M. Budnev, O.A. Gress et al. Astropart. Phys. **01**, 052 (2016).
- R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen et al. ApJ, **865**, 74 (2018)
- Bellido, A. Aab, P. Abreu et al. Proc. of Science **301**, 506 (2018)
- S. Ostapchenko, Phys. Rev. D, **83**, 014018 (2011).
- F. Riehn, R. Engel, A. Fedynitch, T. Gaisser and T. Stanev. Proc. of Science **236**, 558 (2015).
- T. Pierog, I. Karpenko, J. Katzy, E. Yatsenko and K. Werner, Phys. Rev. C **92**, 034906 (2015).
- J.N. Matthews, R. U. Abbasi, M. Abe et al. Proc. of Science, **301**, 1096 (2018).