

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ШАЛ С ПОМОЩЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ

В.П. Мохначевская, С.П. Кнуренко, И.Е. Слепцов, З.Е. Петров

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»,
Якутск, Россия
valyamokh@yandex.ru

RESULTS OF INVESTIGATION INTO LONGITUDINAL DEVELOPMENT OF AIR SHOWERS, USING DIFFERENTIAL CHERENKOV DETECTORS

V.P. Mokhnachevskaya, S.P. Knurenko, I.Ye. Sleptsov, Z.E. Petrov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia
valyamokh@yandex.ru

Аннотация. В данной работе приводятся результаты регистрации черенковского излучения ШАЛ, выполненных с помощью дифференциальных черенковских детекторов на Якутской установке. Анализированы данные по глубине максимума X_{\max} развития ШАЛ, которые сравниваются с разными моделями адронных взаимодействий, выполненными для первичного протона и ядра железа.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, черенковское излучение, Якутская установка.

Abstract. This paper presents the results of the registration of Cherenkov radiation of EAS made using differential Cherenkov detectors at the Yakutsk array. The data on the depth of the maximum of air showers are analyzed, which are compared with different models of hadron interactions performed for the primary proton and the iron nucleus.

Keywords: cosmic rays, air shower, Cherenkov radiation, Yakutsk array.

ВВЕДЕНИЕ

Излучение Вавилова-Черенкова, возникающее при прохождении потока заряженных частиц ШАЛ через атмосферу, отражает все стадии генерации частиц и, таким образом, может служить инструментом в исследовании продольного развития ШАЛ. Известно, что продольное развитие в равной мере чувствительно как к параметрам взаимодействия, так и массе первичной частицы, поэтому измерение черенковского света ШАЛ дает возможность непосредственно из измерений восстанавливать параметры каскадной кривой и атомный вес первичного ядра.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Якутская комплексная установка [Слепцов и др., 1976] широких атмосферных ливней расположена в долине реки Лены (Республика Саха) и представляет собой научно-исследовательский полигон для исследования космических лучей сверхвысоких энергий. Якутская установка (рис. 1) занимает площадь 12 км², на которой детекторы на основе пластиковых сцинтилляторов толщиной 5 см и площадью 2 м² каждый расположены по углам треугольника со сторонами 500, 1000 м. Такое расположение детекторов обусловлено тем, что космические лучи образуют лавинообразный процесс при прохождении атмосферы, сталкиваясь с ядрами атомов воздуха, и на поверхности земли охватывают большие площади. В центре установки имеются аналогичные станции с раздвижениями от 50 до 250 м, которые дополнены приемниками черенковского излучения ШАЛ (черенковские интегральные детекторы). На расстоянии 500 м от центра установки работают 3 мюонных детектора с площадью 20 м² каждый, а в центре установки расположен большой мюонный детектор с

площадью 200 м². А также введены в эксплуатацию три черенковских дифференциальных детектора на основе камеры обскура [Garipov et al, 2001] для исследования продольного развития ШАЛ.

Черенковское излучение [Джелли, 1960] можно наблюдать визуально и регистрировать с помощью фотопленки или фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), преобразующего энергию излучения в электрический сигнал. Эти фотоэлектронные умножители используются в дифференциальных черенковских детекторах в виде мозаики, которые были помещены в темную коробку с узкими щелями и узким углом обзора по вертикали и широким углом по горизонтали. Эта простая конструкция позволяет определить количество фотонов, приходящих с определенной высоты атмосферы, и восстановить продольное развитие ливня. Освещаемая область фотокатода фотоумножителя и их число для этого детектора изменяется, когда

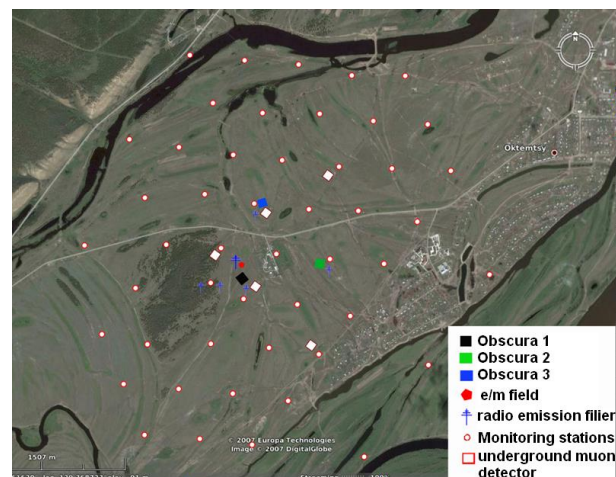


Рис. 1. Якутская установка ШАЛ

ливень перемещается от верхней границы участка к нижней. В каждом случае, в зависимости от углов прихода ливня (азимутального и зенитного углов) относительно этого детектора, получают сигналы фотоумножителя мозаики, соответствующие различным участкам каскадной кривой развития ШАЛ.

На рис. 2 представлен пример одновременной регистрации ливневого события ШАЛ всеми тремя детекторами. Но в реальности статистика таких ливневых событий очень мала. В работе [Egorov et al, 2017] дается более подробное описание аппаратуры и метода регистрации ШАЛ на Якутской установке.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Используя методику, описанную в работах [Григорьев, 2007; Mokhnachevskaya et al, 2017], для восстановления каскадных кривых ШАЛ отбираются ливни с энергиями выше 10^{16} эВ при одновременной работе более 8 фотоумножителей мозаики с основным мастерным сигналом от большой установки. Все первичные данные определяются по показаниям участвовавших в регистрации ШАЛ станций наблюдения Якутской установки: x_0, y_0 — координаты пересечения оси ливня с плоскостью установки, энергия ливня E_0 , углы прихода ливня θ, ϕ , полное число заряженных частиц N_s на уровне наблюдения. Ошибка определения координат оси ливня $\sim 15\text{--}35$ м, а зенитный угол направления прихода находится с точностью $\sim 3\text{--}5^\circ$. Согласно программе обработки данных регистрации определяются H-высоты в метрах каждым фотоумножителем мозаики соответствующего черенковского дифференциального детектора и пересчитываются на глубину атмосферу X в $\text{г}/\text{см}^2$. Затем находится общее количество заряженных частиц на уровне наблюдения по данным сцинтилляционных детекторов большой установки. В дальнейшем эта характеристика ШАЛ используются для построения хвоста каскадной кривой за максимумом развития ШАЛ (X_{\max}) и восстановления каскадной кривой в широком интервале по глубине атмосферы. По формуле 1 итерация процесса минимизации прекращается при достижении минимального условия, когда достигаются хорошие согла-

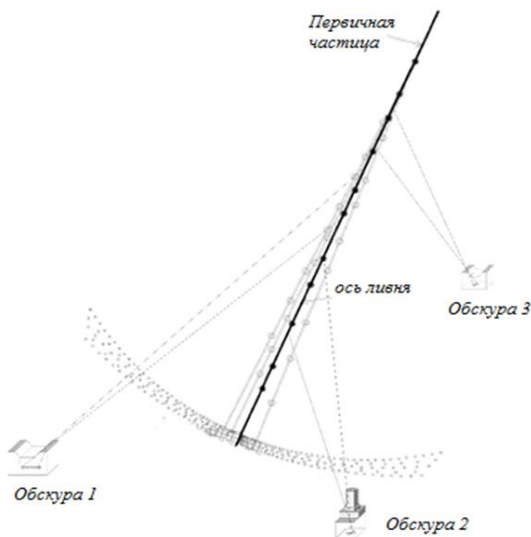


Рис. 2. Пример регистрации ливневого события тремя черенковскими дифференциальными детекторами

сования экспериментальных данных и ожидаемой функции. Таким образом, определяются X_{\max} :

$$N_i = N_{\max} + [0.434(6.5 + 0.021(X_{\max} - 600))] \times (1 - (X_i \div X_{\max}) + \ln(X_i \div X_{\max})). \quad (1)$$

Зная $X_s = 1020 \times \sec\theta$ — глубину на уровне наблюдения в зависимости от зенитного угла θ , N_s — количество частиц на уровне наблюдения, определяются N_{\max} — количество частиц в максимуме ливня по формуле:

$$N_{\max} = N_s + [0.434(6.5 + 0.021(X_{\max} - 600))] \times (1 - (X_s \div X_{\max}) + \ln(X_s \div X_{\max})). \quad (2)$$

Далее эти ливневые события были разделены по энергии на группы и были отмечены черными точками на рис. 3.

Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетами по модели QGSJETII-04, SIBYLL 2.1, EPOS v1.99 выполненными для первичных частиц протона и ядра железа, показали, что космические лучи с энергией $\sim 10^{17}$ эВ (черные точки) сгруппированы ближе к расчетной кривой от ядра железа, а в области энергий $\sim 10^{18}$ эВ — к расчету для протонов. Следовательно, в рамках выбранных моделей можно предположить, что состав космических лучей в энергетическом интервале $\sim 10^{17}$ эВ более тяжелый, чем при энергии $\sim 10^{18}$ эВ.

В настоящее время Якутская установка ШАЛ модернизируется с использованием новых технологий с целью коренного улучшения временных и амплитудных измерений, что позволит улучшить в том числе результаты анализа данных, полученных с помощью дифференциальных черенковских детекторов.

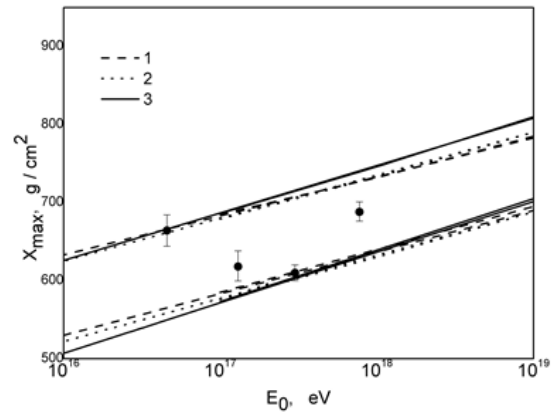


Рис. 3. Показана зависимость $X_{\max}(E_0)$ по сравнению с расчетами по модели 1-QGSJETII-04, 2-SIBYLL 2.1, 3-EPOS v1.99 (первичный протон и ядро железа). Черные точки — измерения дифференциальных черенковских детекторов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьев В.М. Новый метода исследования продольного развития широких атмосферных ливней // Наука и техника в Якутии, Якутск. 2007. С. 28.
- Джелли Дж. Черенковское излучение. 1960. 334 с.
- Слепцов И.Е. и др. Характеристики широких атмосферных ливней космических лучей сверхвысоких энергий. Якутск. 1976. 180 с.
- Egorov Y.A., et al. // Proc. PoS 35th ICRC. Busan. 2017. P. S462.
- Garipov G.K., et al. // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. P. S885.
- Mokhnachevskaya V.P., et al. // Proc. PoS 35th ICRC. Busan. 2017. P. S341.