

УДК 524.1

ГЛУБИНА МАКСИМУМА РАЗВИТИЯ ШАЛ С ЭНЕРГИЯМИ ВЫШЕ 10^{16} ЭВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СОБЫТИЯХ ТРЕКОВЫМИ ЧЕРЕНКОВСКИМИ ДЕТЕКТОРАМИ

© 2019 г. В. П. Мохначевская¹ *, И. Е. Слепцов¹, С. П. Кнуренко¹,
А. В. Сабуров¹, Ю. А. Егоров¹, З. Е. Петров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт космических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера” Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

*E-mail: valyatomkh@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

В работе приводятся результаты регистрации черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ), выполненных с помощью системы оптических трековых детекторов на основе камеры-обскуры в составе Якутской установки ШАЛ. Эти детекторы позволяют определить количество фотонов, приходящих с определенной высоты в атмосфере, и, таким образом, восстановить продольное развитие ливня. Хорошее согласие наблюдается между параметрами каскадных кривых ШАЛ, измеренными с помощью этого метода X_{max} и модельными расчетами. Получены предварительные данные о массовом составе космических лучей для диапазона энергий выше 10^{16} эВ.

DOI: 10.1134/S0367676519080295

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Якутская установка ШАЛ [1] является одной из крупнейших установок в мире, на которых ведутся исследования в области энергий выше 10^{16} эВ. Отличие Якутской установки от зарубежных аналогов — это комплексность измерений характеристик ШАЛ. Только на Якутской установке ШАЛ реализовано одновременное измерение трех главных компонент ливня: потоков мюонов, электронов и черенковского излучения ШАЛ в атмосфере. В настоящее время черенковское излучение [2] регистрируется на Якутской установке ШАЛ черенковскими интегральными детекторами на 19-ти станциях в круге с радиусом 1 км. Так же на расстоянии 0.5 км от центра установки находятся 3 трековых черенковских детектора [3] на основе камеры-обскуры, которые реализованы для исследования продольного развития ливня.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Трековые черенковские детекторы [4] состоят из камеры, мозаики фотоумножителей, записывающего устройства. Трековые черенковские детекторы № 1 и № 3 имеют узкие прямоугольные щели, трековый черенковский детектор № 2 имеет две узкие круговые щели. Мозаика трекового черенковского детектора № 1 представляет собой цепочку фотоумножителей (ФЭУ-49), расположенных в нижней части плоскости камеры вдоль

линии, перпендикулярной щелям. Мозаика трековых черенковских детекторов № 2 и № 3 имеют крестообразную форму, расположенную также в нижней части плоскости камеры. Особенностью данных детекторов является то, что детектор позволяет получать информацию о дифференциальном потоке черенковского света ШАЛ, идущего с разных высот над уровнем моря. Довольно простая конструкция детектора в виде камеры с узкими щелями имеет узкий угол обзора по вертикали и широкий угол по горизонтали. Освещаемая область фотокатода фотоумножителя и число фотокатодов для этого детектора изменяется, когда ливень перемещается от верхней границы участка к нижней границе. В каждом случае, в зависимости от углов прихода ливня (азимутального и зенитного углов) относительно этого детектора, будут получены сигналы фотоумножителя мозаики, соответствующие различным участкам каскадной кривой развития ШАЛ. Две щели в случае трековых черенковских детекторов № 1 и № 3 обеспечивают обзор участка неба из разных полушарий вдоль азимутального угла. Конструкция трекового черенковского детектора № 2 из-за двух кольцевых круговых разрезов охватывает более широкий диапазон зенитных углов и, благодаря крестообразному расположению фотомозаики, обеспечивает более или менее равномерную эффективность азимутальных наблюдений. Вероятность одновременной записи события ливня всеми тремя трековыми черенковскими детекто-

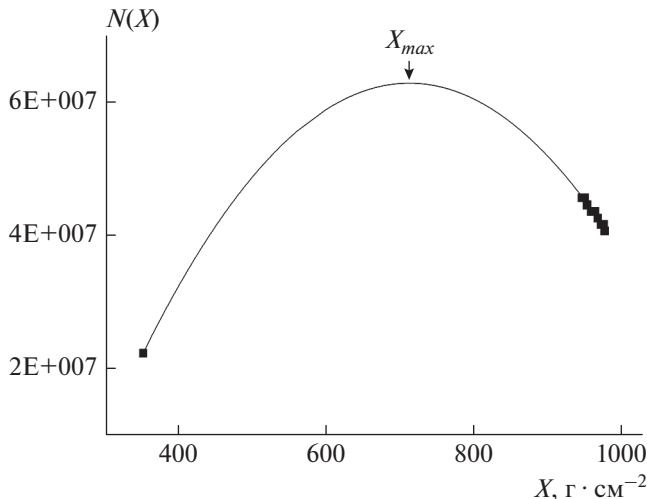


Рис. 1. Показана зависимость числа частиц $N(X)$ от глубины X развития ШАЛ для события с энергией $E_0 = 4.57 \cdot 10^{16}$ эВ, где глубина максимума составляет $X_{max} = 664.23$ г/см².

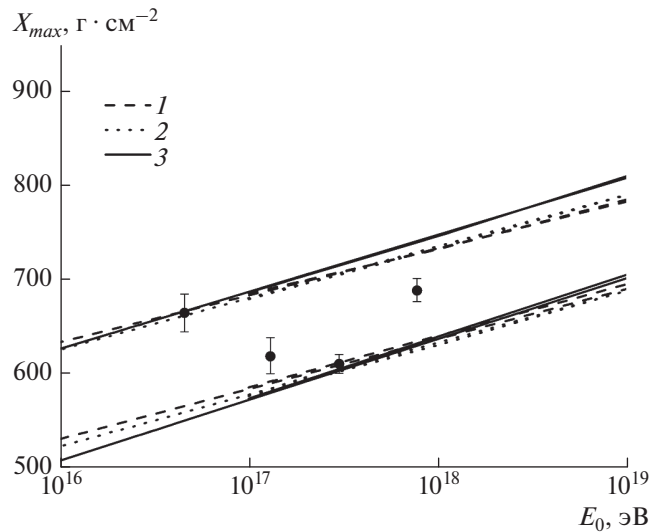


Рис. 2. Показана зависимость $X_{max}(E_0)$ по сравнению с расчетами по модели 1-QGSJETII-04, 2-SIBYLL 2.1, 3-EPOS v1.99 (первичный протон и ядро железа). Черные точки – измерения трековых черенковских детекторов.

рами в реальности очень мала, но статистика одновременного срабатывания двух черенковских детекторов на порядок выше.

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАСКАДНОЙ КРИВОЙ

Используя методику, описанную в работах [5, 6], для восстановления каскадных кривых ШАЛ отбираются ливни с энергиями выше 10^{16} эВ. 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 $\sim 3^\circ\text{--}5^\circ$. Согласно программе обработки данных регистрации определяются H – высоты в метрах – каждым фотоумножителем мозаики соответствующего трекового черенковского детектора и пересчитываются на глубину атмосферу X в г · 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 восстановлению каскадной кривой в широком интервале по глубине атмосферы. По формуле (1) итерация процесса минимизации прекращается при достижении минимального условия, когда достигаются хорошие со-

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

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

Зная $X_s = 1020 \sec \theta$ – 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:

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

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все ливневые события были отобраны в трековых черенковских детекторах при одновременной работе более 8 фотоумножителей мозаики с основным мастерным сигналом от большой установки. С помощью метода, описанного выше, была рассчитана глубина максимума и число частиц в каждом ливневой событии. На рис. 1 показано, что максимальное развитие ШАЛ, найденное путем прямого измерения каскадной кривой ливня с энергией $E_0 = 4.57 \cdot 10^{16}$ эВ, находится на глубине максимума $X_{max} = 664.23$ г · см⁻².

Таким образом, эти ливневые события были разделены по энергии на группы и были отмечены черными точками на рис. 2. Сравнение полу-

ченных 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная конструкция трековых черенковских детекторов на базе камеры-обскуры проста в изготовлении и эксплуатации. Однако, как показал опыт первых экспериментов, требуется высокая точность измерения всех параметров регистрируемых установкой ливней для минимизации погрешностей восстановления каскадной кривой по данным трековых черенковских детекторов. 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 трековых черенковских

детекторов. В результате реализации в составе Якутской установки ШАЛ нового метода регистрации черенковского света показана возможность прямого измерения каскадной кривой развития ШАЛ. По данным первых экспериментов 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.

Работа поддержана программой Президиума РАН “Физика высоких энергий и нейтринная астрономия” и грантом РФФИ 16-29-13019 офи-м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слепцов И.Е.* Характеристики широких атмосферных ливней космических лучей сверхвысоких энергий. Якутск: Издание Якутского филиала СО АН СССР, 1976. 180 с.
2. *Джелли Дж.* Черенковское излучение. М.: ИЛ, 1960. 334 с.
3. *Garipov G.K., Grigoryev V.M., Efremov N.N. et al.* // Proc. 27th ICRC. (Hamburg, 2001). P. S885.
4. *Egorov Y.A., Petrov Z.E., Knurenko S.P.* // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. S462.
5. *Григорьев В.М.* // Наука и техн. в Якутии. Якутск, 2007. С. 28.
6. *Mokhnachevskaya V.P., Egorov Yu.A., Knurenko S.P. et al.* // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. S341.