

**ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ № 39442
ОТ 29 НОЯБРЯ 2013 г.**

В.П. Мохначевская, С.П. Кнуренко

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
valyamokh@yandex.ru

LONGITUDINAL DEVELOPMENT OF EXTENSIVE AIR SHOWER 39442 OF NOVEMBER 29, 2013

V.P. Mokhnachevskaya, S.P. Knurenko

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia
valyamokh@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты обработки и анализа ливневого события № 39442 от 29 ноября 2013 г., зарегистрированного одновременно тремя черенковскими дифференциальными детекторами на основе камеры-обскура. Это позволило определить количество фотонов, приходящих с определенной высоты в атмосфере, и таким образом восстановить продольное развитие ливня — каскадную кривую ливня и ее параметры, включая X_{\max} .

Ключевые слова: космические лучи, черенковское излучение, черенковский дифференциальный детектор.

Abstract. We present the results of processing and analysis of the shower event 39442 of November 29, 2013 recorded simultaneously by three differential Cherenkov detectors based on the pinhole camera. This allowed us to determine the number of photons from a certain height in the atmosphere and to reconstruct the longitudinal development of the shower, the shower cascade curve and its parameters, including X_{\max} .

Keywords: cosmic rays, Cherenkov radiation, differential Cherenkov detector.

Изучение космических лучей сверхвысоких энергий является актуальной задачей в исследовании процессов, имеющих место в космическом пространстве, а также в физике элементарных частиц. В частности, в результате взаимодействия первичных ядер с атмосферой образуется большое число вторичных элементарных частиц, покрывающих большую площадь на уровне моря. В физике потоки релятивистских частиц называются широкими атмосферными ливнями (ШАЛ). На Якутской установке ШАЛ реализовано одновременное измерение почти всех основных главных компонент ливня: мюонов, электронов, фотонов, черенковского и радиоизлучения ШАЛ. Черенковское излучение на Якутской установке регистрируется вот уже более пятидесяти лет. Для этого используются интегральные и дифференциальные черенковские детекторы. Интегральные детекторы установлены на 19-ти станциях наблюдения и равномерно распределены в круге радиусом 1 км.

На расстоянии 0.5 км от центра установки находятся три черенковских дифференциальных детектора на основе камеры-обскура [Григорьев, 2007]. Эти детекторы предназначены для изучения продольного развития ливня. Черенковские дифференциальные детекторы состоят из темной камеры, линейки фотоумножителей (ФЭУ), чувствительных в области длин волн 350–750 нм, и электронной системы согласования всех приемных устройств с центральным регистратором, принимающим сигналы от трех пунктов наблюдения. Центральный регистратор имеет специальное программное обеспечение, которое считывает сигналы каждого ФЭУ, преобразовывает их в цифровую форму и отображает в виде графической информации на дисплее компьютера. Все пункты наблюдения и центральный регистратор большой установки синхронизованы по времени с помощью GPS-методики, поэтому характеристики ливня, определенные по данным большой установки, привязаны к оптическим событиям ШАЛ.

Вся первичная и вторичная (обработанная) информация в табличном и графическом виде записывалась в базу данных устройства. Аппаратная и программная части регистратора, предназначенные для предварительного просмотра и регистрации сигналов от черенковских детекторов, были подробно описаны в работах [Егоров и др., 2017, Мохначевская и др., 2017, 2019].

Для демонстрации методики обработки и анализа данных эксперимента было отобрано индивидуальное событие № 39442, которое было зарегистрировано в темную ясную ночь 29 ноября 2013 г. в 01:11:23 UT. В первом пункте наблюдения сработало шесть ФЭУ мозаики, во втором — восемь, в третьем — семь.

На рис. 1. показано графическое отображение сигналов с трех пунктов наблюдения. Основные сигналы локализуются в левой части развертки, справа расположен сигнал от «мастера» большой установки. Передний фронт сигнала от мастера большой установки служит репером для определения временных задержек между сигналами от приемников света.

Поскольку сигналы черенковских дифференциальных детекторов синхронизованы с мастером большой установки, все характеристики ливня, которые определяются по показаниям участвовавших в регистрации ШАЛ станций наблюдения Якутской установки, приписываются оптическому ливню. Это координаты пересечения оси ливня с плоскостью установки $x_0 = -259$ м, $y_0 = 204$ м, энергия ливня $E_0 = 4.26 \cdot 10^{17}$ эВ, зенитный угол прихода ливня $\theta = 20.4^\circ$, азимутальный $\varphi = 110.9^\circ$.

Для обработки временных сигналов от черенковских дифференциальных детекторов была создана специальная программа, которая в трехмерном виде учитывала проекцию движения фронта и ствола ливня. Это было необходимо для определения в обозреваемом интервале средней геометрической высоты

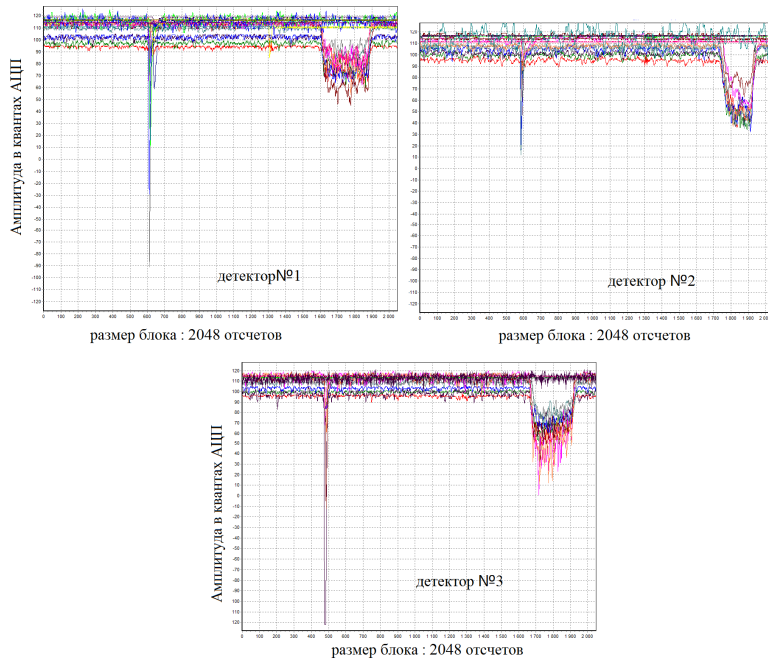


Рис. 1. Ливневое событие, зарегистрированное на черенковских дифференциальных детекторах

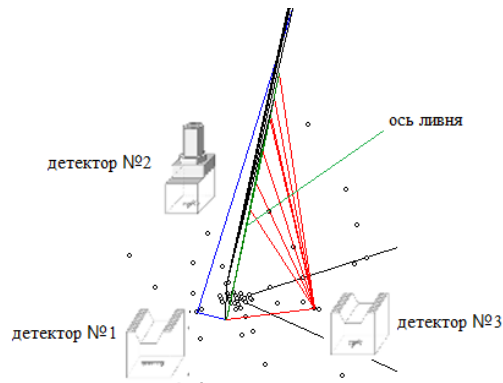


Рис. 2. Оценка высоты H каждого фотоумножителя мозаики для трех черенковских дифференциальных детекторов ливневого события № 39442

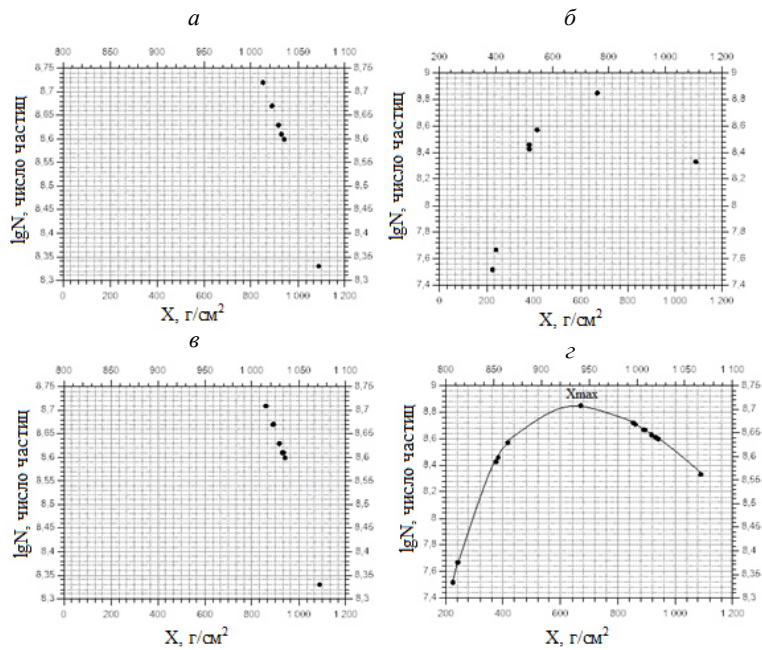


Рис. 3. Зависимость числа фотонов $N(x)$ в каждом фотоумножителе мозаики от глубины X : детектор 1 (а), детектор 2 (б), детектор 3 (в), детекторы 1–3 (г)

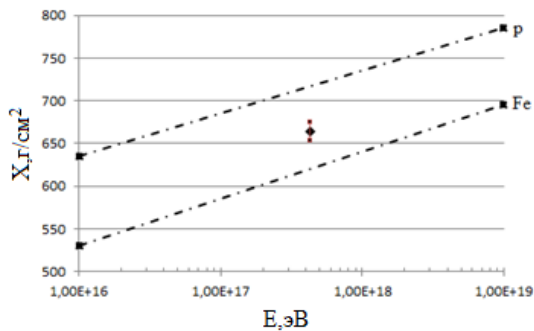


Рис. 4. Зависимость глубины максимума развития ливня от энергии

H [м], с которой пришли черенковские фотоны на каждый ФЭУ соответствующей мозаики. Далее высота пересчитывалась на глубину атмосферы X [г/см²] (рис. 2).

Сигналы от каждого ФЭУ калибровались согласно показаниям полного числа заряженных частиц на уровне наблюдения $\log N_s(x) = 8.09$. Значение $N_s(x)$ было определено интегрированием функции пространственного распределения заряженных частиц настоящего ливня и соответствовала точке на каскадной кривой на уровне наблюдения $X = 1088$ г/см². Таким образом, было рассчитано число частиц $N(x)$ в каждом ФЭУ мозаики для трех черенковских дифференциальных детекторов. Полученные точки далее использовались для восстановления каскадной кривой развития ШАЛ и определения X_{\max} .

На рис. 3 показано, что максимум развития данного ШАЛ, найденный путем прямого измерения каскадной кривой ливня с энергией $E_0 = 4.26 \cdot 10^{17}$ эВ, находится на глубине атмосферы $X_{\max} = 664 \pm 10$ г/см².

Экспериментом на Якутской установке было доказано, что благодаря наблюдениям черенковского света ШАЛ с использованием трех черенковских дифференциальных детекторов можно прямым способом восстановить стереокартину продольного развития события ШАЛ в области сверхвысоких энергий.

Сравнение полученного X_{\max} с расчетами по модели QGSJETII-04, выполненными для первичного протона и ядра железа (рис. 4), показали, что согласно модели, $X_{\max} = 664 \pm 10$ г/см² не противоречит выводу о том, что ливень образован ядром средней массы CNO типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьев В.М. Новый метода исследования продольного развития широких атмосферных ливней. *Наука и техника в Якутии*. Якутск, 2007. С. 28.
- Егоров Ю.А., Петров З.Е., Кнуренко С.П. Прог. PoS 35-я МККК, Пусан, 2017. С. 462.
- Мохначевская В.П., Егоров Ю.А., Кнуренко С.П. и др. Прог. PoS 35-я МККК, Пусан, 2017. С. 341.
- Мохначевская В.П., Слепцов И.Е., Кнуренко С.П. и др. Глубина максимума развития ШАЛ с энергиями выше 10^{16} эВ по измерениям в индивидуальных событиях трековыми черенковскими детекторами. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83, № 8, С. 1134–1136.