

УДК 537.591.15

**ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ
ВЫШЕ 10^{15} эВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
КАМЕРОЙ-ОБСКУРА НА ЯКУТСКОЙ КОМПЛЕКСНОЙ УСТАНОВКЕ**

В.П. Прохорова, С.П. Кнуренко, И.Е. Слепцов, А.В. Сабуров

**LONGITUDINAL DEVELOPMENT OF EXTENSIVE AIR SHOWERS IN THE ENERGY RANGE OF
MORE THAN 10^{15} eV ACCORDING TO CHERENKOV RADIATION DATA OBTAINED WITH
CAMERA
OBSKURA AT THE YAKUTSK COMPLEX ARRAY**

V.P. Prokhorova, S.P. Knurenko, I.E. Sleptsov, A.V. Sabourov

В работе представлены предварительные результаты по данным измерений черенковского излучения в ливнях с энергией выше 10^{15} эВ. Были восстановлены индивидуальные каскадные кривые и определена средняя глубина максимума развития широких атмосферных ливней X_{\max} . Экспериментальные данные сравниваются с расчетными значениями X_{\max} , полученными по модели адронных взаимодействий QGSJETII-03. Путем сопоставления расчетов черенковского излучения ливня с экспериментальными данными получена информация о массовом составе первичной частицы.

In the paper, we present preliminary results on Cherenkov radiation measurements in showers with energy of more than 10^{15} eV. Individual cascade curves were reconstructed, and average depths of maximum extensive air shower development (X_{\max}) was determined. Experimental data are compared to model X_{\max} values obtained with hadron interaction model QGSJETII-03. We obtained information on mass composition of primary particles from comparison of simulated Cherenkov radiation with experimental data.

Введение

Свечение, вызываемое в среде заряженной частицей, которая движется со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде, называется черенковским излучением. Черенковское излучение испускается ливнем на всех этапах его развития, отражая, таким образом, картину продольного развития каскада по глубине. Известно, что продольное развитие в равной мере чувствительно как к параметрам взаимодействия, так и к массе первичной частицы, поэтому измерение черенковского света широкого атмосферного ливня (ШАЛ) дает возможность непосредственно из измерений восстанавливать параметры каскадной кривой и атомный вес первичного ядра.

Прямые измерения каскадной кривой развития ШАЛ возможны только по измерениям ионизационного излучения от релятивистских частиц через атмосферу и черенковского излучения, генерируемого электронами ШАЛ. На Якутской установке ШАЛ для этих целей используется метод [1] и дифференциальный черенковский детектор [2]. Измерения каскадной кривой проводятся синхронно с измерениями других компонент ШАЛ (электронов, мюонов), которые дополняют каскадную кривую на глубинах $X \geq X_0$, где $X_0 = 1020$ г/см² для уровня Якутской установки.

Экспериментальная установка

В настоящее время в состав Якутской установки входит 59 сцинтилляционных, 7 мюонных, 36 интегральных черенковских детекторов и дифференциальный детектор черенковского света на основе камеры-обскуры (трековый детектор).

Измерение характеристик черенковского излучения проводится трековым детектором, состоящим из камеры с узкой прямой и длинной щелью, под которой перпендикулярно ее направлению расположена мозаика из 10 фотоумножителей. Трековый детектор обозревает отдельные участки неба и, в отличие

от типичного черенковского интегрального детектора, позволяет получать информацию о дифференциальном потоке черенковского света ШАЛ. Данный детектор регистрирует свет, рождаемый энергичными частицами ливня. Поскольку солнечный и лунный свет намного интенсивнее черенковского, трековый детектор чувствителен только в безоблачные безлунные ночи.

Особенность работы детектора состоит в том, что засвечиваемая площадь фотокатода фотоумножителя меняется в процессе измерения потока черенковского излучения. При движении ливня от верхней границы участка к нижней эта площадь плавно меняется от нуля до некоторого максимального значения, когда ливень достигает примерно середины обозреваемого участка атмосферы. Линейную развертку импульса черенковского излучения можно получить при условии, что детектор находится на значительном расстоянии от его оси.

Методика восстановления каскадной кривой

Измеренный в узком телесном угле поток черенковских фотонов $Q_{\text{экс}}(E_0, R, X_0)$ связан с каскадной кривой $N(E_0, X)$ следующим выражением:

$$Q_{\text{экс}} = \delta_Q + \int_{X_1}^{X_2} G(R, X/X_2) N(E_0, X) K(\lambda, X) dX. \quad (1)$$

Здесь $G(R, X/X_2)$ – функция, определяемая в основном пространственно-угловым распределением электронов в парциальных лавинах; δ_Q – уровень «шумов», зависящий от погрешностей измерения, статистической обработки данных, задания функции $G(R, X/X_2)$, интегрирования и т. д.; $K(\lambda, X)$ – коэффициент пропускания атмосферы; X_1 и X_2 – верхняя и нижняя границы участка атмосферы, обозреваемого индивидуальным ФЭУ.

Выражение (1) представляет собой интегральное уравнение Фредгольма I рода, относящееся к классу некорректных задач [3]. Для ее решения необходимо

ввести какую-либо априорную информацию об искомой функции $N(E_0, X)$. Нами предполагалось, что электромагнитные каскадные профили индивидуальных ШАЛ имеют вид

$$N(E_0, X) = N_{\max}(E_0) \exp[(\alpha-1) \times (1 - (X_2 - X_1)/X_{\max} + \ln((X_2 - X_1)/X_{\max}))]. \quad (2)$$

Здесь $N_{\max}(E_0)$ – число частиц в максимуме, а X_{\max} – глубина максимума каскадной кривой. Параметр $(\alpha-1)$ связан с пробегом поглощения электронов в ливне λ и для интервала зенитных углов от 0 до θ определяется по формуле

$$(\alpha-1) = (1020 \cdot X_{\max} (\sec \theta - 1)) / [\lambda \{1020 (\sec \theta - 1) - X_{\max} \ln(\sec \theta)\}]. \quad (3)$$

Введение аппроксимации (2) обосновано расчетами $N(E_0, X)$ для разных моделей развития ШАЛ. Согласно работам [4], более 97 % индивидуальных каскадных кривых хорошо описываются гамма-распределением в области максимума своего развития. Уравнение (1) считается решенным, если будут подобраны параметры аппроксимации (2), удовлетворяющие условию минимума функционала невязки

$$\Omega[N(E_0, X)] = \sum_{j=1}^n w(E_0, X_j) (\lg Q_{\text{эсп}} - \lg Q_{N(E_0, X)})^2, \quad (4)$$

где $w(E_0, X_j)$ – статистический вес потока черенковского света, измеренный в интервале глубин $\Delta X = X_2 - X_1$.

Из-за сложности минимизации функционала по четырем свободным параметрам для восстановления $N(E_0, X)$ индивидуальных ШАЛ предварительно определялись параметры $(\alpha-1)$ по измеренному числу заряженных частиц на уровне наблюдения и X_{\max} по форме функции черенковского излучения ШАЛ [1]. В этом случае процесс минимизации значительно упрощался.

Результаты и выводы

Оси ливней, зарегистрированных в период с ноября 2006 г. по апрель 2009 г., на плоскости установки с координатами трекового детектора (0; 0) были зарегистрированы в радиусе 500 м от черенковского дифференциального детектора. В ливнях регистрировались общая заряженная компонента (сцинтилляционными счетчиками) и черенковский свет ШАЛ (интегральными и дифференциальными детекторами). Основные характеристики ШАЛ: углы прихода ливня θ , φ , ось ливня, энергия ливня, полное число заряженных частиц на уровне наблюдения – определялись по показаниям основных станций наблюдения.

С использованием методики, описанной выше, для восстановления каскадных кривых были отобраны ШАЛ с энергиями $\sim 10^{15} - 10^{18}$ эВ и зенитными углами от 10 до 30° от вертикали. Ливни были сгруппированы по энергии в три группы:

$$16.80 \leq \lg E_1 < 17.30, \\ 17.30 \leq \lg E_2 < 17.60 \text{ и } 17.60 \leq \lg E_3 < 18.20.$$

На рис. 1 показана зависимость глубины максимума X_{\max} от первичной энергии E_0 . Полученная зависимость $X_{\max}(E_0)$ приведена в сравнении с мировыми данными. Черными точками обозначены ре-

зультаты, полученные черенковским дифференциальным детектором. Белыми точками отмечена форма пространственного распределения черенковского света ШАЛ на Якутской установке. Кривыми показаны расчеты по модели QGSJETII-03 для первичного протона и ядра железа. В области энергии $\sim 10^{17}$ эВ точки группируются ближе к кривой для ядра железа, а выше $7 \cdot 10^{17}$ эВ – ближе к расчету для протона. Следовательно, в рамках выбранной модели можно предположить, что состав космических лучей в интервале энергий $\sim 10^{17}$ эВ более тяжелый, чем при $\sim 10^{18}$ эВ.

На рис. 2 показаны каскадные кривые с первичной энергией $E_0 = 7.7 \cdot 10^{17}$ эВ. Синими кружочками отмечены результаты, полученные черенковский дифференциальным детектором, красными – интегральными детекторами Якутской установки ШАЛ. Там же приведены расчеты по модели QGSJETII-03 для случая, если каскад частиц генерируется первичным протоном и первичным ядром железа.

Из рис. 1 и 2 видно, что данные X_{\max} лежат между расчетными кривыми для протона и ядра железа и скорее соответствуют смешанному составу космических лучей.

Для того чтобы сделать более однозначный вывод, необходима большая статистика ливней с энергиями выше 10^{17} эВ, а это означает, что необходимо проводить дальнейшие наблюдения ШАЛ с помощью дифференциального черенковского детектора. В настоящее время проводятся работы по модернизации установки с целью улучшения точности измерений, в том числе измерений углов прихода ливня.

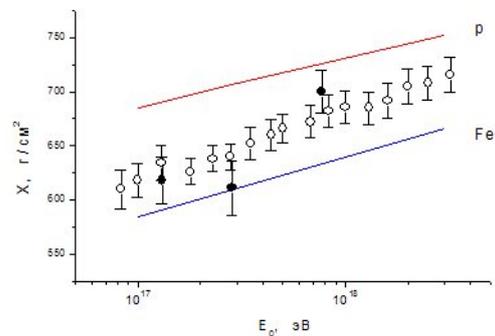


Рис. 1. Глубина максимума X_{\max} развития ШАЛ как функция от первичной энергии E_0 .

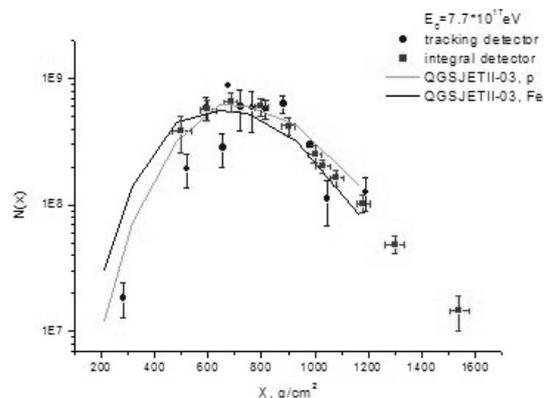


Рис. 2. Каскадная кривая развития ШАЛ, восстановленная по откликам ФЭУ дифференциального черенковского детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов М.Н., Иванов А.А., Кнуренко С.П. и др. Электромагнитные каскадные профили и флуктуации продольного развития ШАЛ // Космические лучи с энергией выше 10^{17} эВ. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. С. 34–47.
2. Прохорова В.П., Кнуренко С.П., Петров З.Е. и др. Изучение продольного развития широких атмосферных ливней с помощью регистрации излучения Вавилова–Черенкова // Труды X Конференции молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы». Иркутск, 2007. С. 181–183.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 286 с.
4. Иванов А.А. и др. Зависимость средней каскадной кривой ШАЛ от распределения по скоростям в процессах множественной генерации частиц // Бюлл. НТИ. Проблемы космофизики и аэронауки. Якутск: ЯФ СО АН СССР, декабрь 1979. С. 7–9.

*Институт космофизических исследований и аэронауки СО РАН
им. Ю.Г. Шафера, Якутск*