

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАСКАДНОЙ КРИВОЙ РАЗВИТИЯ ШАЛ ПО ФОРМЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ЭНЕРГИИ $E_0 > 10^{17}$ ЭВ

*В.М. Григорьев, Н.Н. Ефимов, Н.Н. Калмыков,
Ю.А. Нечин, В.В. Просин, Г.Б. Христиансен*

Показана возможность восстановления каскадной кривой развития индивидуальных широких атмосферных ливней (ШАЛ) по форме импульсов черенковского света от ШАЛ при энергиях $E_0 > 10^{17}$ ЭВ. Полученные таким образом каскадные кривые не противоречат общепринятым моделям развития ШАЛ.

В течение последних лет нами проводятся систематические исследования формы черенковского импульса ШАЛ, создаваемого первичными космическими частицами с энергиями $10^{15} + 10^{18}$ ЭВ, по методу, впервые предложенному в 1971 г. в работе [1]. Результаты этих исследований изложены в [2 – 4]. Основным результатом, который следует из указанных работ, является зависимость высоты максимума ливня от мощности ливня $t_m(N_e)$ [3, 4].

Вместе с тем мы считаем, что метод [1] не ограничен только возможностью нахождения положения высоты максимума ШАЛ, но может использоваться также для исследования характера продольного развития ШАЛ в широком диапазоне глубин в атмосфере. Подобная попытка исследования формы каскада ШАЛ была предпринята в работе [5]. Однако в этой работе определялось не число ливневых частиц на различной глубине, а величины, пропорциональные числу излучаемых черенковских фотонов под различными углами на различных глубинах.

Суть метода в нашем случае состоит в воспроизведении формы каскадной кривой по форме экспериментального импульса черенковского излучения ШАЛ с использованием пространственно-временной зависимости [1]:

$$\tau = (\bar{n}(H)/c) \sqrt{H^2 + R_{\perp}^2} - (H/c) \quad (1)$$

и углового распределения ливневых электронов ШАЛ, излучающих черенковский свет [6]. В формуле (1) H – геометрическое расстояние вдоль оси ливня от уровня моря до любой точки на оси в атмосфере (под любым зенитным углом θ). τ – время прихода света с высоты H , R_{\perp} – расстояние от оси ливня до детектора, спроецированное на плоскость, перпендикулярную оси ливня, $\bar{n}(H)$ – эффективный показатель преломления света в воздухе, зависящий от высоты H и полученный с учетом барометрической формулы¹⁾, c – скорость света.

¹⁾ Поскольку наблюдения проводились в окрестностях г. Якутска в зимнее время, использовалась барометрическая формула с учетом средней температуры в период измерений (-30°C): $t = 1020 / \cos \theta e^{(-H \cos \theta / 6,85)}$ (г/см²), где H в км.

Исходным материалом для построения каскадных кривых служили экспериментальные события с импульсами черенковского света ШАЛ, зарегистрированными на фотопленке и отобранными нами таким образом, чтобы соотношение сигнал-шум ночного неба было не менее 15. Как отмечалось в [2, 3], установка для регистрации формы черенковского импульса в Якутске позволяет находить для каждого экспериментального события следующие параметры ливня: R_{\perp} , θ , t_m и N_e , где t_m — положение максимума ливня в атмосфере, N_e — число частиц ШАЛ на уровне моря. Зная ориентацию оси ливня (R_{\perp} , θ), можно с помощью соотношения (1) перейти от временных координат τ к пространственным — H (км) и затем — с использованием барометрической формулы — к координатам t (г/см²). Следует отметить, что на эксперименте импульс регистрируется в относительных временных единицах. Однако, благодаря знанию положения максимума t_m , имеется возможность получить истинное распределение импульсов во времени.

На рис. 1 приведены образцы трех (из шести обработанных нами) экспериментальных импульсов (а) и соответствующие им каскады ШАЛ (б), полученные указанным выше способом и относящиеся к диапазону $N_e \approx 3,5 \cdot 10^7 - 3,5 \cdot 10^8$. Ошибки, указанные на рисунке, носят методический характер и возникают за счет ошибок в определении временных параметров импульсов ($\Delta\tau = \pm 5$ нсек), ошибок измерения амплитуд импульсов ($\Delta A \approx 7\%$), ошибок $\Delta\theta = \pm 5^\circ$, $\Delta R_{\perp} \approx \pm 10$ м и $\Delta t \approx \pm 10$ г/см².

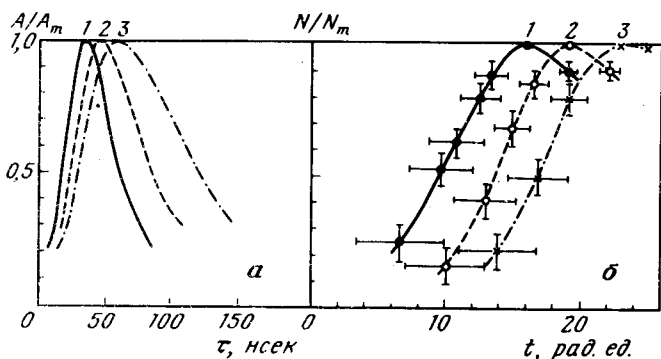


Рис. 1. Черенковские импульсы ШАЛ (а) и соответствующие им каскадные кривые ШАЛ (б) в относительных единицах. 1, 2, 3 — номера импульсов и соответствующих каскадов

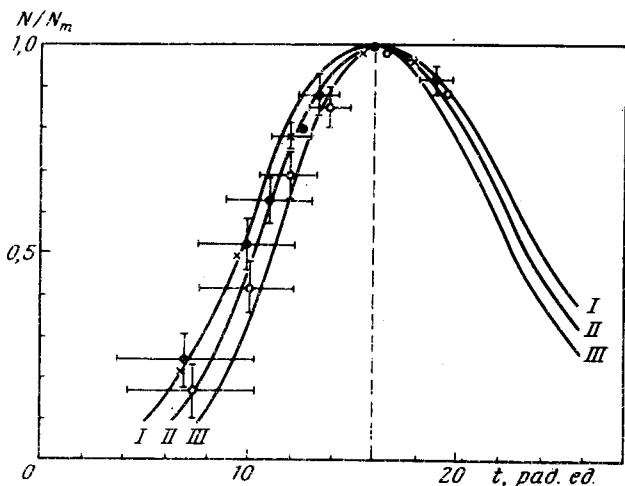


Рис. 2. Каскадные кривые ШАЛ нормированы в точке $t_m = 16$ радиационных единиц. Кривые — каскады ШАЛ для модели скейлинга (I), СКР (II) и МВМ (III)

На рис. 1 и рис. 2 импульсы и каскады приводятся в относительных единицах A/A_m и N/N_m , где A_m и N_m — максимальные значения импульсов и каскадов соответственно. Однако, также имеется возможность абсолютных измерений импульсов и относящихся к ним каскадов на различных высотах в атмосфере t и при различных N_e . Этот вопрос будет рассмотрен нами в дальнейшем. Отметим также, что рассмотренные нами события относятся к диапазону расстояний до оси $R \approx 300 + 450 \text{ м}^{1)}$. Переход к регистрации событий с большими R_{\perp} позволил бы более детально исследовать начальную часть каскада, в том числе и положение точки первого взаимодействия. Однако, переход к регистрации событий с большими R_{\perp} связан с определенными техническими трудностями из-за необходимости использования в этом случае детекторов большой светосилы. С другой стороны, для более детального исследования части каскада за его максимум необходимы исследования при малых $R_{\perp} < 100 \text{ м}$, что сопряжено с техническими трудностями регистрации малых временных интервалов τ .

Отметим, наконец, что в одном из шести рассмотренных нами событий были представлены импульсы на двух расстояниях R_{\perp} при соотношении сигнал-шум ≥ 15 . Каскады, построенные по этим независимым экспериментальным данным, совпали с точностью $\Delta t \approx 0,6 t$ -единиц, что является хорошей проверкой точности используемого нами способа воспроизведения каскадов.

Как видно из рис. 2, на котором каскады, представленные на рис. 1, б, нормированы в точке $t = 16$ рад. ед., суммарная ошибка при определении формы каскада достаточно велика, чтобы установить различие между той или иной из рассматриваемых в настоящее время моделей развития ШАЛ (МВМ, СКР, скейлинг, см., например, [7]). Однако можно, по-видимому, утверждать, что развитие каскада при $E_0 > 10^{17}$ эВ происходит в рамках общепринятых моделей.

Институт ядерной физики
Московского
государственного университета
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
29 октября 1979г.

Литература

- [1] Ю.А.Фомин, Г.Б.Христиансен. ЯФ, 14, 642, 1971.
- [2] В.М.Григорьев и др. ЯФ, 27, 418, 1978.
- [3] И.А.Бережко и др. ЯФ, 30, 415, 1979.
- [4] N.N.Kalmykov et al. Proc. 16-th ICCR, 9, EA4-10, 73 Kyoto, 1979.
- [5] K. J.Orford, K.E.Turver. Nature, 264, December, 23/30, 727, 1976.

¹⁾Ширина при различных значениях A/A_m и взаимное расположение во времени импульсов на рис. 1, а приведены к временному масштабу, соответствующему $R_{\perp} = 400 \text{ м}$ (см., например, [2]).

[6] И.П.Иваненко и др. Препринт № 98, ФИАН, 1976.

[7] N. V. Grishina et al. Proc. 16-th ICSSR, 9, EAS-1, 1, Kyoto, 1979.
