

УДК 537.591.15

ИЗУЧЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ С ПОМОЩЬЮ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

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

STUDY OF LONGITUDINAL DEVELOPMENT OF EXTENSIVE AIR SHOWERS THROUGH RE-CORDING THE VAVILOV–CHERENKOV RADIATION

V.P. Prokhorova, S.P. Knurenko, Z.E. Petrov, I.E. Sleptsov

Рассмотрены методики измерения и восстановления продольного развития широких атмосферных ливней (ШАЛ), а именно, формы каскадной кривой и глубины максимума развития ШАЛ. Представлены результаты исследования разными методами.

Methods of measurement and reconstruction of longitudinal development of extensive air showers (EAS) are considered, namely, forms of a cascade curve and depth of the maximum of EAS development. The results of research with different methods are presented.

Введение

Космические частицы сверхвысоких энергий (10^{14} – 10^{20} эВ) в земной атмосфере вызывают ядерно-каскадный процесс, генерирующий мощные потоки элементарных частиц и электромагнитного излучения. Данные потоки охватывают большие площади на поверхности Земли и называются широким атмосферным ливнем (ШАЛ) [1]. Исследование свойств ШАЛ служит базой, с одной стороны, для изучения параметров ядерных взаимодействий в области экстремальных энергий, которые не достигнуты еще на современных ускорителях; с другой, для получения характеристик первичных космических лучей (ПКЛ): энергетического спектра, распределения направлений прихода на небесной сфере, массового состава и природы первичных частиц. Метод ШАЛ сегодня является одним из основных и светосильных в области 10^{14} эВ, а при $E_0 > 10^{15}$ эВ из-за очень низкой интенсивности космических лучей является единственно возможным способом исследования первичного излучения.

В методе ШАЛ наряду с измерением заряженных частиц на уровне наблюдения можно регистрировать излучение в оптическом диапазоне длин волн.

Излучение Вавилова–Черенкова возникает в воздухе от релятивистских заряженных частиц ШАЛ. Черенковское излучение ШАЛ генерируется на всем пути движения релятивистских частиц, слабо поглощается в чистой атмосфере и тем самым отражает продольное развитие ливня. Первые наблюдения вспышек черенковского излучения от ШАЛ на фоне ночного неба были сделаны Голбрайтом и Джелли [2] в 1953 г., Нестеровой и Чудаковым [3] в 1955 г.

В 1994 г. Гариповым и Хреновым [4] впервые была заявлена возможность использования камеры-обскуры для наблюдения изображения ШАЛ в черенковском излучении. В 1995 г. [5] они обосновали изучение продольного и поперечного развития ливней посредством сети черенковских детекторов на основе камеры-обскуры, обзоревающих отдельные участки неба.

В этих работах особенно подчеркивалось, что в отличие от типичного интегрального черенковского детектора в камере Обскура значительно подавлен шум света ночного неба и таким образом увеличено время наблюдения, включая сумерки и лунные ночи. Использование фотомозаики в детекторе позволяет

получать информацию о дифференциальном потоке черенковского света ШАЛ, т. е. обеспечивает непосредственное измерение продольного развития ШАЛ.

Целью настоящей работы является изучение продольного развития ШАЛ в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{19} эВ путем регистрации импульсов от черенковского излучения ШАЛ.

Трековый детектор

Черенковский дифференциальный детектор на основе камеры-обскуры (трековый детектор) [6] используется для наблюдения черенковского света ШАЛ с целью детального изучения продольного развития ливня в атмосфере. Разработка нового оптического метода исследования ШАЛ позволила прямо измерять глубину максимума развития ливня и на этой основе получать информацию о массовом составе первичных частиц, рождающих ШАЛ.

В настоящее время в состав Якутской установки входит один дифференциальный детектор черенковского света и 33 интегральных черенковских детектора. Черенковские детекторы работают в ясные безлунные ночи. В период с 2002 по 2007 г. были проведены пробные эксперименты с трековым детектором. Были апробированы различные конфигурации щелей и фотомозаики приемников черенковского света ШАЛ. Как показал анализ первых данных проведенного эксперимента, для прямого измерения продольного развития ШАЛ необходима высокая точность пространственной локализации оси, и зенитного и азимутального углов прихода ливня. На рис. 1 показаны оси ливней, зарегистрированных в период с ноября 2006 по апрель 2007 г.

Данные обработки

В работе представлены предварительные результаты по изучению продольного развития ШАЛ в области энергий выше 10^{15} эВ.

Разработана программа на языке Fortran Power Station, позволяющая по откликам в 10 ФЭУ, восстанавливать каскадную кривую развития ливня в атмосфере.

В работе [6] описан метод нахождения высоты генерации черенковского света ШАЛ с помощью трекового детектора. Это позволяет повысить надежность локализации и точность определения глубины

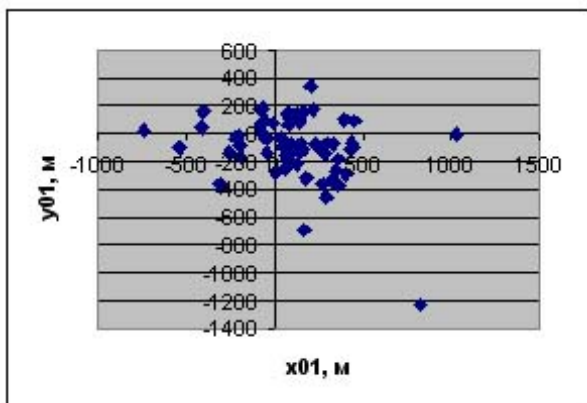


Рис. 1. Оси ливней, зарегистрированных в период 2006–2007 г.г., на плоскости установки с координатами трекового детектора (0; 0).

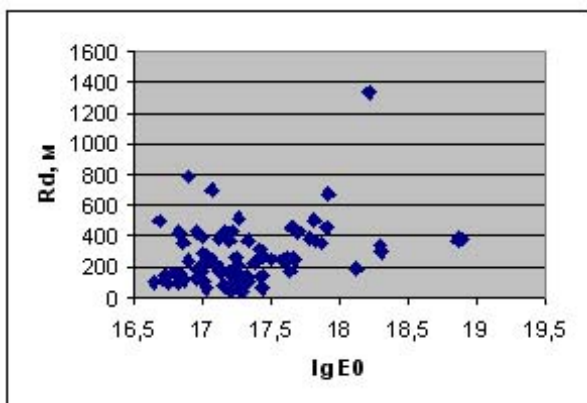


Рис. 2. Расстояния от оси ливня до детектора в зависимости от энергии ливня.

максимума развития ШАЛ. На рис. 2 представлены расстояния от оси ливня до детектора в зависимости от энергии ливня. Рисунок 3 показывает zenith-угловую зависимость зарегистрированных ливней.

Ранее глубина максимума развития ливня X_{\max} на Якутской установке изучалась двумя методами: методом анализа формы импульса черенковского излучения ШАЛ и методом анализа формы пространственного распределения черенковского света ШАЛ [7, 8]. Форма каскадной кривой развития ШАЛ восстанавливалась косвенным путем по пространственному распределению черенковского света ШАЛ с использованием метода решения обратной задачи [9]. С помощью этого метода была установлена следующая зависимость глубины максимума развития ШАЛ от энергии:

$$X_{\max} = (680 \pm 16) + (78 \pm 14) \lg(E_0 / 10^{18}), \text{ г/см}^2.$$

Данная связь справедлива для интервала энергий $10^{18} - 10^{19}$ эВ.

В результате реализации нового метода на установке стало возможным прямо измерять каскадную кривую развития ШАЛ и, в частности, X_{\max} . Ниже приводятся результаты измерений за прошедший сезон (2006–2007 г.г.)

Отбор событий ШАЛ

С использованием созданной автором программы обработки по данным регистрации ШАЛ были восстановлены индивидуальные каскадные кривые

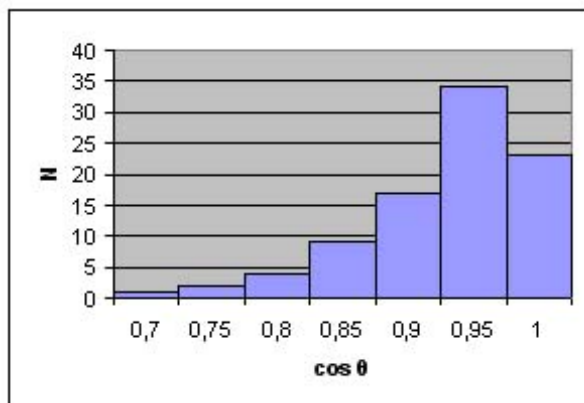


Рис. 3. Зенитно-угловая зависимость зарегистрированных ливней.

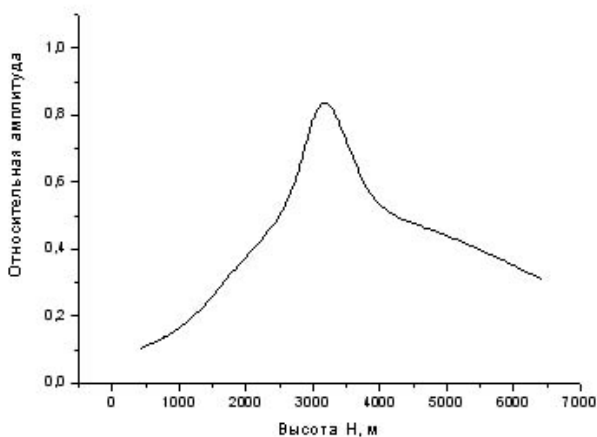


Рис. 4. Средняя каскадная кривая при энергии $E_0 \approx 10^{17}$ эВ.

развития ШАЛ. На рис. 4 показана средняя каскадная кривая, полученная усреднением всех ливней. Здесь по оси ординат отложена относительная амплитуда, а по оси абсцисс – высота над уровнем моря. Видно, что максимум развития ШАЛ с $E_0 \approx 10^{17}$ эВ находится на высоте $H = 3200$ м. Отметим, что достигнутая в настоящее время точность определения углов прихода оси ливня не достаточна для полной реализации метода измерения продольного развития ШАЛ по данным одного трекового черенковского детектора.

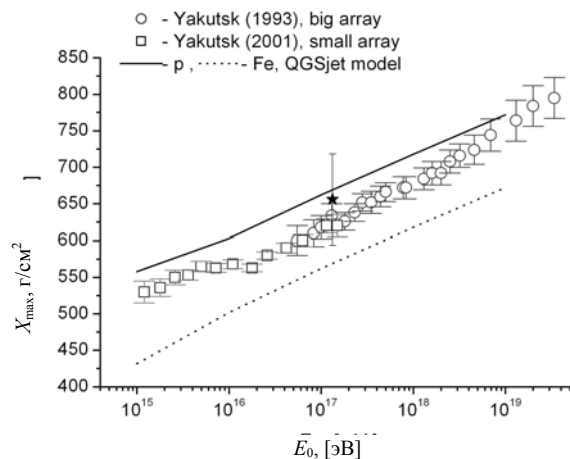


Рис. 5. Зависимость X_{\max} от энергии первичной частицы. Обозначения: \square , \circ – данные косвенных измерений, \star – прямые измерения (настоящая работа).

На рис. 5 показана зависимость глубины максимума развития ШАЛ, полученная косвенным путем по анализу формы пространственного распределения черенковского света ШАЛ. Здесь по оси ординат отложена величина X_{\max} , а по оси абсцисс энергия ливня E_0 . Видно, что максимум развития ШАЛ, найденный прямым измерением каскадной кривой, для ливней с $\langle E_0 \rangle \approx 10^{17}$ эВ находится на глубине $\langle X_{\max} \rangle = 656 \pm 62$ г/см². Это не противоречит результатам, полученным нами в работе [10]. Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетами по модели QGSJET, выполненными для первичных частиц – протона и ядра железа – показали, что вероятнее всего, космические лучи с энергией 10^{17} – 10^{18} эВ являются смесью различных ядер с массовым числом от $A=1$ (протон) до $A=56$ (железо).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росси Б. Космические лучи. М.: Атомиздат, 1966. 236 с.
2. Джелли Дж. Черенковское излучение и его применение. М.: Изд-во иностранная литература, 1960. 334 с.
3. Нестерова Н.М., Чудаков А.Е. О наблюдении черенковского излучения, сопровождающего широкие атмосферные ливни космических лучей // ЖЭТФ. 1955. Т. 28. С. 384.
4. Garipov G.K., Khrenov B.A. Camera Obscura for observation of EAS images in Cherenkov light // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1994. V. 20. P. 1981–1988.
5. Garipov G.K., Khrenov B.A. Camera Obscura Network: an Array for registration of EAS Cherenkov radiation in the presence of high-intensity sky noise // J. Phys. G: 2 Nucl. Part. Phys. 1995. V. 21. P. 879–887.
6. Garipov G.K., Grigoryev V.M., Efremov N.N., et al. The Cherenkov track detector consisting of the Yakutsk complex EAS array // Proc. 27th ICRC, Hamburg, 2001. V. 2. P. 885–887.
7. Христиансен Г.Б., Куликов Г.В., Фомин Ю.А. Космическое излучение сверхвысокой энергии. М.: Атомиздат, 1975. 256 с.
8. Dyakonov M.N., Knurenko S.P., Sleptsov I.E., et al. Cherenkov light of EAS and longitudinal-lateral development of shower at highest energies // Proc. 23rd ICRC, Calgary, 1993. V. 4. P. 303.
9. Knurenko S.P., Kolosov V.A., Petrov Z.E., et al. Lateral distribution Cherenkov light of EAS in the energy region of 10^{15} – 10^{17} eV // Proc. 27th ICRC, Hamburg, 2001. V. 1. P. 157–160.
10. Knurenko S.P., Kolosov V.A., Petrov Z.E., et al. Longitudinal development of showers in the energy region of 10^{15} – 10^{17} eV // Ibid. P. 177.

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