

Радиоизлучение широких атмосферных ливней как метод регистрации космических лучей сверхвысоких энергий

Н.Калмыков ¹, А.Константинов ¹ и Р.Энгель ²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобелева Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Москва, 119991, Россия

² Форшунгцентр Карлсруэ, Институт Ядерной Физики, 3640, D-76021 Карлсруэ, Германия

В настоящее время, регистрация широких атмосферных ливней (ШАЛ) проводится как путем непосредственного измерения потока заряженных частиц, так и путем детектирования оптических излучений (черенковский свет и флуоресценция). В 2003 г. начал работу эксперимент CODALEMA, нацеленный на изучение радиоимпульсов от ШАЛ в диапазоне 30–65 МГц [1], а в 2004 г. в составе установки KASCADE заработала система антенн LOPEs [2] – с аналогичной целью в диапазоне 40–80 МГц. По данным [1,2] нижний порог регистрации радиоизлучения ШАЛ составляет $\approx 1\text{--}1.5$ мкВ/м·МГц, что соответствует энергии ливня $E_0 \sim 5 \cdot 10^{16}$ эВ.

Для построения точной теории радиоизлучения ШАЛ необходим целый ряд таких характеристик ливня, которые могут быть воспроизведены лишь методом Монте-Карло (МК). Проведение расчета с целью получения количественных соотношений между параметрами ШАЛ и характеристиками радиоизлучения при $E_0 > 5 \cdot 10^{16}$ эВ представляет сегодня серьезные затруднения. При явном вычислении полей индивидуальных частиц ливня, соответствующий предел не превышает $E_0 \sim 10^{14}\text{--}10^{15}$ эВ. Поэтому особое значение имеет разработка комбинированного метода, позволяющего за разумное время моделировать радиоизлучение от ШАЛ во всем диапазоне энергий космических лучей (до 10^{20} эВ и выше).

В данной работе один из вариантов такого метода разработан и апробирован в интервале $E_0 = 10^{12}\text{--}10^{17}$ эВ. Верификация метода проводилась путем сравнения с результатами прямого МК моделирования радиоизлучения ШАЛ, в ходе которого электрическое поле рассчитывалось от отдельных частиц ливня. Получены такие характеристики радиоизлучения как функция пространственного распределения на расстояниях вплоть до 1 км от оси ливня, частотный спектр и поляризация.

- [1] Ardouin D.A., Belletoile A., Charrier D. et al. Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment. *Nucl. Instrum. Meth.*, A555, 148–163, 2005.
- [2] Apel W.D., Asch T., Badea A.F. et al. Progress in air shower radio measurements: detection of distant events. *Astropart. Phys.*, 26, 332–340, 2006.