Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 118–120.

УДК 524.1.
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-118
ORCID: 0009-0000-3303-0933

ФЛУКТУАЦИИ ЗАРЯЖЕННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРОГРАММ CORSIKA

Н.Я. Муксунов

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия, muksunov@ikfia.ysn.ru

FLUCTUATIONS OF THE EAS CHARGED COMPONENT BASED ON SIMULATION BY THE CORSIKA SOFTWARE

N.Ya. Muksunov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, muksunov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Исследованы флуктуации плотностей заряженных частиц ШАЛ на расстоянии 300 и 600 м от оси ливня по расчетам с помощью пакета программ CORSIKA 7.74 в рамках модели QGSJet II-04. Рассмотрены ливни, вызванные первичными протонами и гамма-квантами с энергиями $10^{17.0} \leq E_0 \leq 10^{19.5}$ эВ при зенитных углах $0.3 \leq cos(\theta) \leq 1.0$, с опцией прореживания ливня и без. В частности, были исследованы стандартные отклонения в зависимости от количества созданных искусственных событий ШАЛ и от типа первичной частицы.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, заряженные частицы, моделирование, CORSIKA.

Abstract. Fluctuations in densities of charged particles of extensive air showers (EAS) at distances of 300 and 600 m from the shower axis were studied using the CORSIKA 7.74 software package within the framework of the QGSJet II-04 model. Showers induced by primary protons and gamma-ray photons with the energy $10^{17.0} \leq E_0 \leq 10^{19.5}$ eV and zenith angles $0.3 \leq cos(\theta) \leq 1.0$ with and without the thinning option were simulated. In particular, the standard deviations were investigated as functions of the number of generated artificial EAS events, the type of the primary cosmic ray.

Keywords: cosmic rays, extensive air showers, charged particles, CORSIKA simulating.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования данной работы являются космические лучи (КЛ). Энергетический спектр КЛ достигает очень высоких энергий ($E_0 > 10^{20}$ эВ). С ростом энергии интенсивность КЛ сильно уменьшается, что делает невозможным их прямое наблюдение. Поэтому единственным методом исследования космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) является регистрация широких атмосферных ливней (ШАЛ). Изучение ШАЛ позволяет нам получить важные сведения о космическом излучении [Grieder, 2010].

Целью данной работы является оценка флуктуации плотности заряженных частиц ШАЛ с помощью пакета программ CORSIKA [Heck et al., 1988]. Рассматриваемая программа предназначена для моделирования ШАЛ на основе метода Монте Карло. Для электромагнитных взаимодействий использовалась модель EGS4, а для адронных взаимодействий — QGSJet II-04 и EPOS-LHC. Параметры моделирования: тип частиц — протон и гамма-квант, диапазон энергий $17.0 \leq log(\mathrm{E}_0/$ эВ$) \leq 19.5$; зенитные углы от 0° до 70°. В рамках данного исследования мы рассмотрели плотности частиц ШАЛ $S(r)$ на расстояниях 300 м и 600 м от оси ливня, поскольку из-за особенностей геометрии Якутской установки ШАЛ именно эти плотности используются для определения энергии [Glushkov et al., 2026].

Таблица 1.

Число реализаций	50	100	200	500
σ	1.95	1.67	1.85	1.68

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показана оценка флуктуации плотности вторичных частиц, зарегистрированных на поверхности Земли, в зависимости от числа реализаций. Были вычислены также стандартные отклонения σ плотности заряженных частиц в зависимости от числа реализаций (табл. 1). С ростом числа реализаций параметр σ меняется незначительно, что позволяет сократить число расчетов до 100 реализаций каждого набора параметров.

Далее проведена оценка стандартного отклонения плотности заряженных частиц ШАЛ в зависимости от энергии и зенитного угла (рис. 2). В результате получено, что при увеличении энергии КЛ стандартное отклонение плотности заряженных частиц уменьшается на ~3 % (рис. 2, *а*). Это вызвано тем, что в больших ливнях зарождается больше вторичных частиц, что способствует улучшению статистики. Перейдем к результатам, полученным при изменении зенитного угла (рис. 2, *б*). Видно, что при увеличении угла наклона ливня также возрастает стандартное отклонение плотности $S(600)$. Это можно объяснить тем, что частицы распределены неравномерно. В вертикальных ливнях частицы падают одновременно. Если же ливень падает под каким-то углом к вертикали, частицы ливня проходят большее расстояние в атмосфере, перед тем как достичь поверхности Земли, и, соответственно, испытывают большее рассеяние. Стоит отметить также, что отклонение плотности заряженных частиц при увеличении угла наклона ливня увеличивается в ~2 раза.

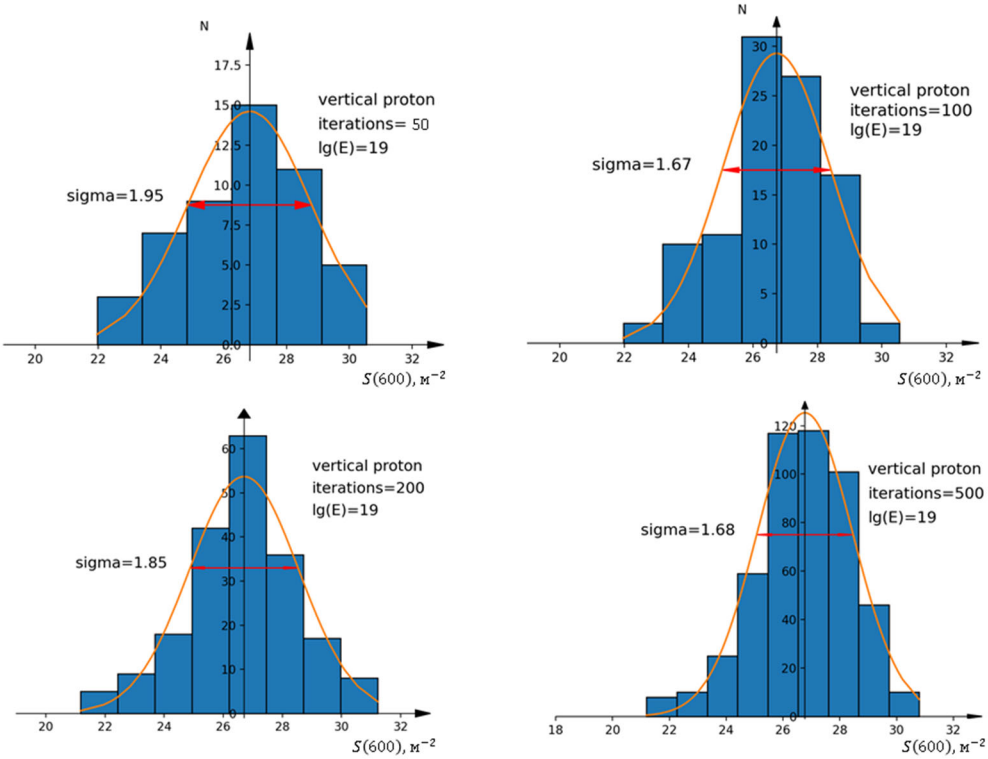

Рис. 1. Гистограмма плотности заряженных частиц в зависимости от числа реализаций (модель — QGSJet II-04, первичная частица — протон, E_0=10^{19} эВ, зенитный угол — 0°, число реализаций — 50, 100, 200, 500)

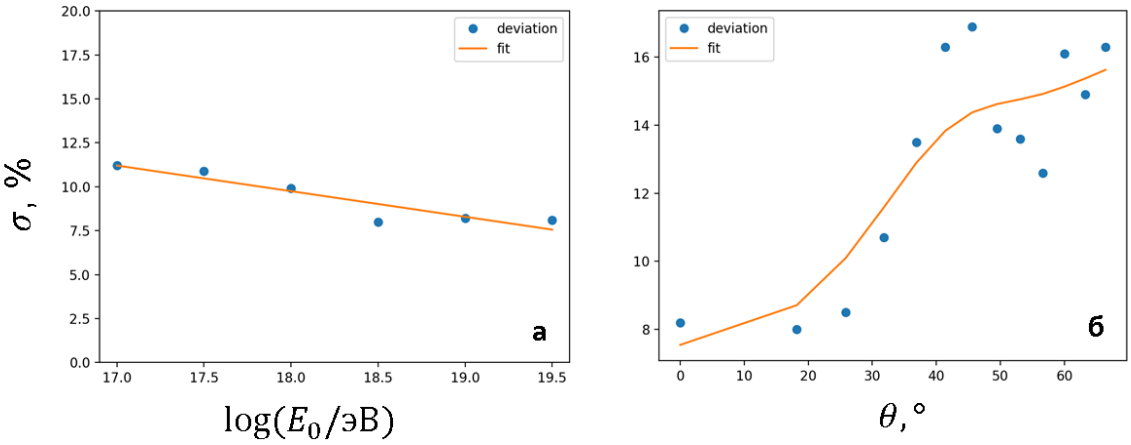

Рис. 2. Стандартное отклонение плотности заряженных частиц ШАЛ в зависимости: *а* —от энергии в диапазоне 17.0 ≤ log(E0/эВ) ≤ 19.5 при cos(θ)=1.0; *б* — от зенитного угла от 0° до 70° при энергии E_0=10^{19} эВ. Общие параметры симуляции: модель — EPOS-LHC, первичная частица — протон, число реализаций одного ливня — 80

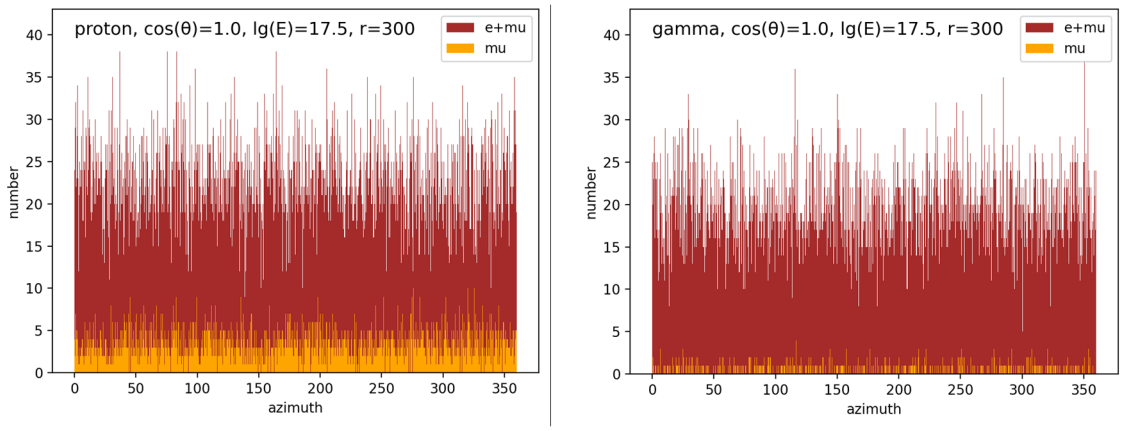

Рис. 3. Азимутальное распределение частиц по кольцу около 300 м от оси ливня, вызванного вертикальным протоном с энергией $10^{17.5}$ эВ (слева) и гамма-квантом той же энергии (справа)

Была проведена оценка пространственных флуктуаций распределения заряженных частиц в отдельных ливнях. Для этого были использованы усеченные сектора площадью 2 м^2, находящиеся на расстоянии 300 м от оси ливня. Сумма секторов по кругу образует полное кольцо. Такой выбор обусловлен тем, что площади детекторов Якутской установки и этих секторов равны.

На рис. 3 показано азимутальное распределение заряженной компоненты ШАЛ. Гистограмма показывает количество частиц в каждом секторе. Красным цветом показаны все заряженные частицы, а желтым — только мюоны. Стоит отметить то, что доля мюонов в ливнях, возникших от первичного гамма-излучения, намного меньше, чем от протона. Это объясняется тем, что по своей природе первичный гамма-квант генерирует меньше мюонов.

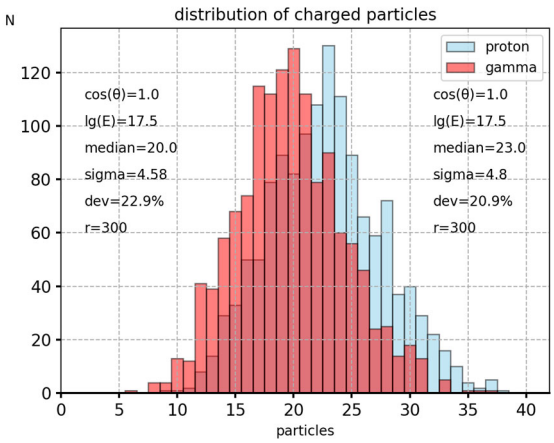

Рис. 4. Распределение заряженных частиц по кольцу около 300 м от оси ливня по наблюдаемым секторам

На рис. 4 представлены гистограммы распределений заряженных частиц, полученные из распределений на рис. 3. На оси абсцисс приведено количество частиц в одном секторе, на оси ординат — количество секторов с таким количеством частиц. Из рис. 4 видно, что разница между медианами распределений небольшая, так же как и между их стандартными отклонениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы флуктуации плотности заряженных частиц ШАЛ на расстояниях 300 и 600 м от оси ливня. Использовались расчеты искусственных ливней для протонов в диапазоне энергий $10^{17.0}$–$10^{19.5}$ эВ и гамма-квантов с той же энергией с помощью пакета программ CORSIKA (по 80 реализаций при разных зенитных углах). В рамках моделей QGSJet II-04 и EPOS-LHC получены плотности частиц ливня на расстоянии 600 м от оси ливня. Рассмотрены пространственные флуктуации в ливнях. Кроме того, нами рассчитаны стандартные отклонения в зависимости от числа реализаций, зенитного угла события и типа первичной частицы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКФИА СО РАН (номер гос. регистрации 126021317307-7). Исследование поддержано Научно-образовательным фондом поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия) НОФМУ https://nofmu.ru.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Glushkov A.V., Ksenofontov L.T., Lebedev K.G., Saburov A.V. Mass composition of cosmic rays with energy (4–12.5) EeV according to muon detectors of the Yakutsk EAS Array // Adv. Space Res. 2026. V. 77, N 8. P. 8452–8459

Grieder P.K.F. Exentsive Air Showers and High Energy Phenomena. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. doi:10.1007/978-3-540-76941-5.

Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., et al. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers [Text] // FZKA 6019. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Karlsruhe, 1988.