



УДК 524, 539.1

*Г.И. Васильев, Е.Е. Холупенко, Д.А. Байко,
А.М. Быков, А.М. Красильщиков, Г.Г. Павлов*

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧЕРЕНКОВСКИХ ФОТОНОВ В СТВОЛЕ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ, ВЫЗВАННОГО ГАММА-КВАНТОМ С ЭНЕРГИЕЙ 5 ГэВ

В своем развитии черенковская гамма-астрономия прошла несколько этапов. Вслед за первыми экспериментами по регистрации вспышек черенковского излучения от первичных гамма-квантов (генерируемых в удаленных космических объектах и достигающих атмосферы Земли), проведенными в 1960-е годы А.Е. Чудаковым и др. [1] в СССР, а также Дж. Джелли и Н. Портером [2] в США, были созданы относительно простые черенковские гамма-телескопы первого поколения, такие как РЧВ-1 (4 рефлектора диаметром 1,5 м, Крымская астрофизическая обсерватория) (см. например работу [3]), первый гамма-телескоп обсерватории «Маунт Хопкинс», США (5 рефлекторов диаметром 1,5 м) (см. например [4]), и телескоп Дублинской группы (два рефлектора 90 см [5]). Эти инструменты фиксировали факт черенковской вспышки и работали по принципу прохождения источника через поле зрения телескопа вследствие вращения Земли. На следующем этапе были разработаны достаточно сложные и эффективные черенковские гамма-телескопы ГТ-48 в Крымской обсерватории и 10-метровый рефлектор Уиппла в обсерватории «Маунт Хопкинс» (сейчас – Обсерватория им. Фреда Лоуренса Уиппла (F. L. Whipple)). Они давали возможность непрерывно отслеживать положение источника гамма-излучения, а также строить карты вспышек черенковского излучения, что позволило существенно сократить время наблюдения, более эффективно учитывать фон, связанный с космическими лучами, и повысить качество получаемых экспериментальных данных. На этих инструментах было сделано немало важных наблюдений гамма-источников, например микроквара Суг X-1, блазаров Mk 501, BL Lac, 3C66A [6–8]. Несмотря на появление черенковских гамма-телескопов третьего поколения, инструменты

ГТ-48 и Уиппл продолжали активно использоваться до недавнего времени [9, 10].

Телескопы третьего поколения, H.E.S.S. [11], MAGIC [12], VERITAS [13] и CANGAROO III [14], представляют собой сложные стереоскопические системы с большой апертурой (каждая система содержит 2–4 телескопа диаметром 10–17 м). Именно с появлением этих систем связан особенно значительный прогресс в черенковской гамма-астрономии сверхвысоких энергий; за последнее десятилетие открыто около 100 источников в диапазоне нескольких тераэлектрон-вольт.

Одним из путей развития гамма-астрономии на следующем этапе станет создание систем черенковских телескопов с еще большей апертурой (диаметром около 30 м), располагаемых на высотах не менее 4 км над уровнем моря (см. например [15]), а также модификация в этом направлении существующих систем (например вторая стадия системы H.E.S.S.). Подобное улучшение параметров телескопов направлено не только на увеличение чувствительности в традиционном для гамма-астрономии сверхвысоких энергий диапазоне 100 ГэВ – 10 ТэВ, но и на понижение пороговой энергии наблюдения до значения около 5 ГэВ. Этот шаг представляется чрезвычайно важным, поскольку в настоящее время не существует инструментов для уверенного наблюдения источников в диапазоне 5–100 ГэВ. Орбитальные гамма-телескопы не справляются с этой задачей вследствие малой апертуры, а у существующих наземных телескопов не хватает чувствительности для регистрации слишком слабых черенковских вспышек, порождаемых первичными квантами с указанной энергией.

Среди множества проблем, возникающих при планировании черенковских гамма-телескопов нового поколения, важнейшей

является изучение широких атмосферных ливней (ШАЛ) и черенковских вспышек, порождаемых гамма-квантами с низкими энергиями (около 5 ГэВ). Этот вопрос должен быть тщательно изучен для определения параметров разрабатываемых гамма-телескопов (в частности площади собирающей поверхности) и создания методов надежного определения энергии и направления прихода первичных квантов по имеющимся образцам вспышки в разных проекциях. В рамках решения этой задачи в данной статье выявляются особенности статистики пространственного распределения черенковских фотонов в широком атмосферном ливне, вызванном первичным гамма-квантом с энергией 5 ГэВ.

Метод расчета и анализа статистики черенковских фотонов, рождающихся в широких атмосферных ливнях

Расчет потока черенковских фотонов в диапазоне 300–600 нм, генерируемых в ШАЛ от первичного 5 ГэВ-кванта, проводился с помощью оригинального вычислительного кода, использующего пакет библиотек GEANT4 [16]. Созданный код моделирует развитие ШАЛ и позволяет определить состав ливня на заданной высоте над уровнем моря. В результате численных экспериментов была набрана статистика из 56 000 событий.

Для расчетов были приняты следующие условия: стандартная модель атмосферы [17], вертикальное распространение первичного кванта, магнитное поле 0,3 Гс (выбрано значение, примерно соответствующее значению геомагнитного поля в районе пустыни Атакама в Чили, высота и астроклимат которой благоприятны для наблюдения ШАЛ). Следует отметить, что геомагнитное поле оказывает существенное влияние на развитие ШАЛ, так как ларморовские радиусы частиц ШАЛ, рождаемого гамма-квантом с энергией 5 ГэВ, составляют 1 – 300 км в зависимости от поколения вторичных частиц, что сравнимо с длиной распространения ШАЛ. После набора статистики были рассчитаны следующие характеристики потока черенковских фотонов на высоте 5 км над уровнем моря:

число F черенковских фотонов, падающих на единицу поверхности от одного ШАЛ (т. е.

поверхностная плотность черенковских фотонов (ППЧФ));

средняя ППЧФ \bar{F} (м^{-2}) как функция расстояния r до оси ливня;

среднеквадратичное отклонение σ_F как функция расстояния до оси ливня;

плотность вероятности ρ реализации различных значений величины F , параметрически зависящая от расстояния;

показатель γ степенной асимптотики распределения $\rho(F)$ при $F \gg \bar{F}$ для различных расстояний от оси ливня;

среднеквадратичное отклонение показателя степени σ_γ .

Результатом работы вычислительного кода была совокупность декартовых координат точек падения черенковских фотонов от каждого первичного гамма-кванта. Далее подсчитывалось количество фотонов $N^I(r)$ (индекс I означает номер первичного гамма-кванта), попавших в кольцо, ограниченное радиусами $r - \Delta r / 2$ и $r + \Delta r / 2$, где $\Delta r = 10$ м (что соответствует типичным размерам чаш современных наземных гамма-телескопов). ППЧФ вычислялась по формуле

$$F^I(r) = N^I(r) / (2\pi r \Delta r).$$

Средняя ППЧФ и ее среднеквадратичное отклонение определялись как

$$\bar{F}(r) = M^{-1} \sum_{I=1}^M F^I(r); \quad (1)$$

$$\sigma_F(r) = \left(M^{-1} \sum_{I=1}^M (F^I(r) - \bar{F}(r))^2 \right)^{-1/2}, \quad (2)$$

где M – количество смоделированных событий.

Полученные функции $\bar{F}(r)$ и $\sigma_F(r)$ представлены на рис. 1. Для определения плотности вероятности ρ шкала ППЧФ была разделена на интервалы с шагом $\Delta F = 0,2 \text{ м}^{-2}$ и подсчитывалось количество событий M_j , при которых значения ППЧФ попадают в интервал от $j\Delta F$ до $(j+1)\Delta F$ ($j = 0, 1, 2, \dots$). Плотность вероятности в точке $F_j = (j+1/2)\Delta F$ вычислялась по формуле $\rho_j = M_j / (M\Delta F)$. Рассчитанная функция распределения ρ для различных расстояний от оси ливня представлена на рис. 2.

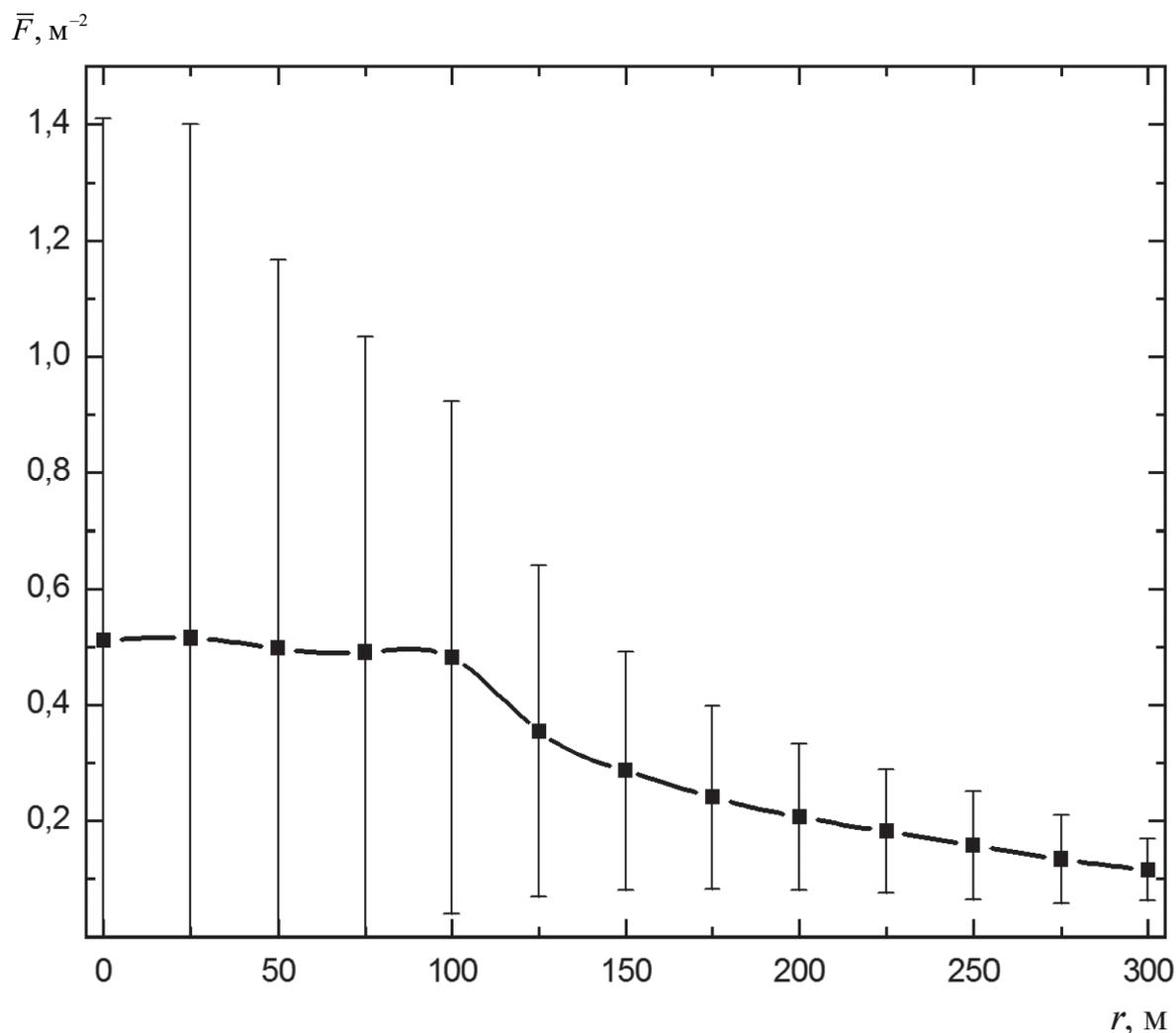


Рис. 1. Зависимость средней поверхностной плотности черенковских фотонов от расстояния до оси ливня на высоте наблюдения 5 км над уровнем моря (рассчитана по 56000 событиям для энергии первичного гамма-кванта 5 ГэВ).

Вертикальные отрезки показывают величину среднеквадратичного отклонения ППЧФ от среднего значения

Оценка показателя степени осуществлялась методом линейной регрессии для логарифмов ППЧФ $f_j = \ln F_j$ и плотности вероятности $p_j = \ln \rho_j$ (т. е. методом наименьших квадратов определялись величины γ и σ_γ в предположении линейной связи $p_j = \gamma f_j + b$ при $F \rightarrow \infty$) в соответствии со следующими соотношениями [18]:

$$Z = N_\rho \sum_{j=j_0}^{j_1} f_j^2 - \left(\sum_{j=j_0}^{j_1} f_j \right)^2; \quad (3)$$

$$b = Z^{-1} \left(\left[\sum_{j=j_0}^{j_1} p_j \right] \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} f_j^2 \right] - \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} p_j f_j \right] \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} f_j \right] \right); \quad (4)$$

$$\gamma = Z^{-1} \left(N_\rho \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} p_j f_j \right] - \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} p_j \right] \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} f_j \right] \right); \quad (5)$$

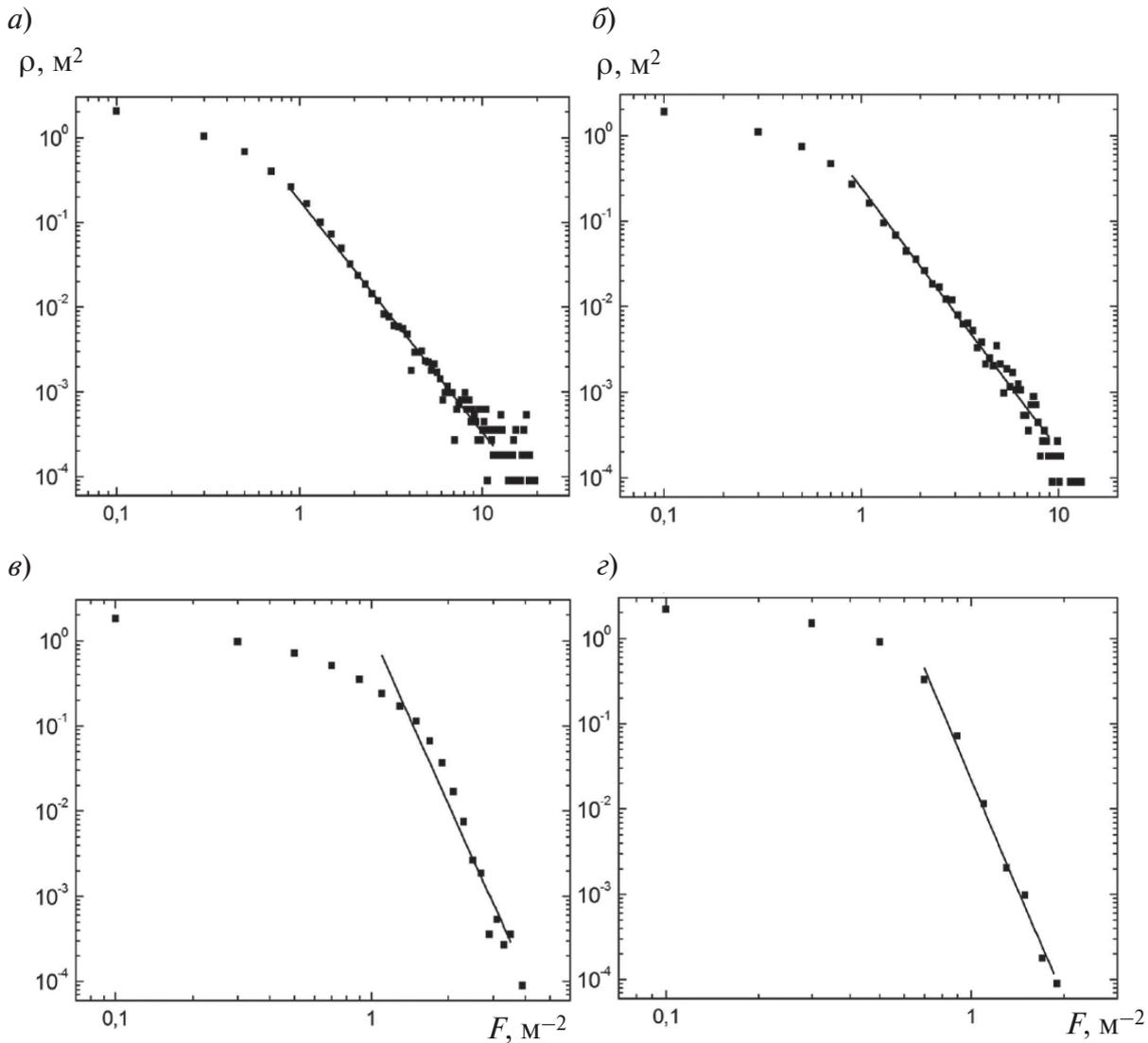


Рис. 2. Расчетная функция плотности вероятности ρ (символы) значений поверхностной плотности черенковских фотонов F для различных расстояний r от оси ливня; r , м: 0 (а), 50 (б), 100 (в), 150 (г), (см. также таблицу).

Сплошная линия – аппроксимация величины ρ для больших значений F

$$\sigma_b = \left(Z^{-1} (N_\rho - 2)^{-1} \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} f_j^2 \right] \times \right. \\ \left. \times \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} \left([\gamma f_j + b] - p_j \right)^2 \right] \right)^{1/2}; \quad (6)$$

$$\sigma_\gamma = \left(\frac{N_\rho}{Z(N_\rho - 2)} \left[\sum_{j=j_0}^{j_1} \left([\gamma f_j + b] - p_j \right)^2 \right] \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где $N_\rho = (j_1 - j_0 + 1)$ – количество точек, по которым производилась оценка.

Значения граничных индексов j_0 и j_1 выбирались на основе следующих условий:

индекс j_0 имеет максимальное значение такое, что выполняется неравенство

$$\sum_{j=0}^{j_0} \rho_j \Delta F \leq 0,8, \quad (8)$$

т. е. показатель степени определялся по области больших значений F , интеграл по которой

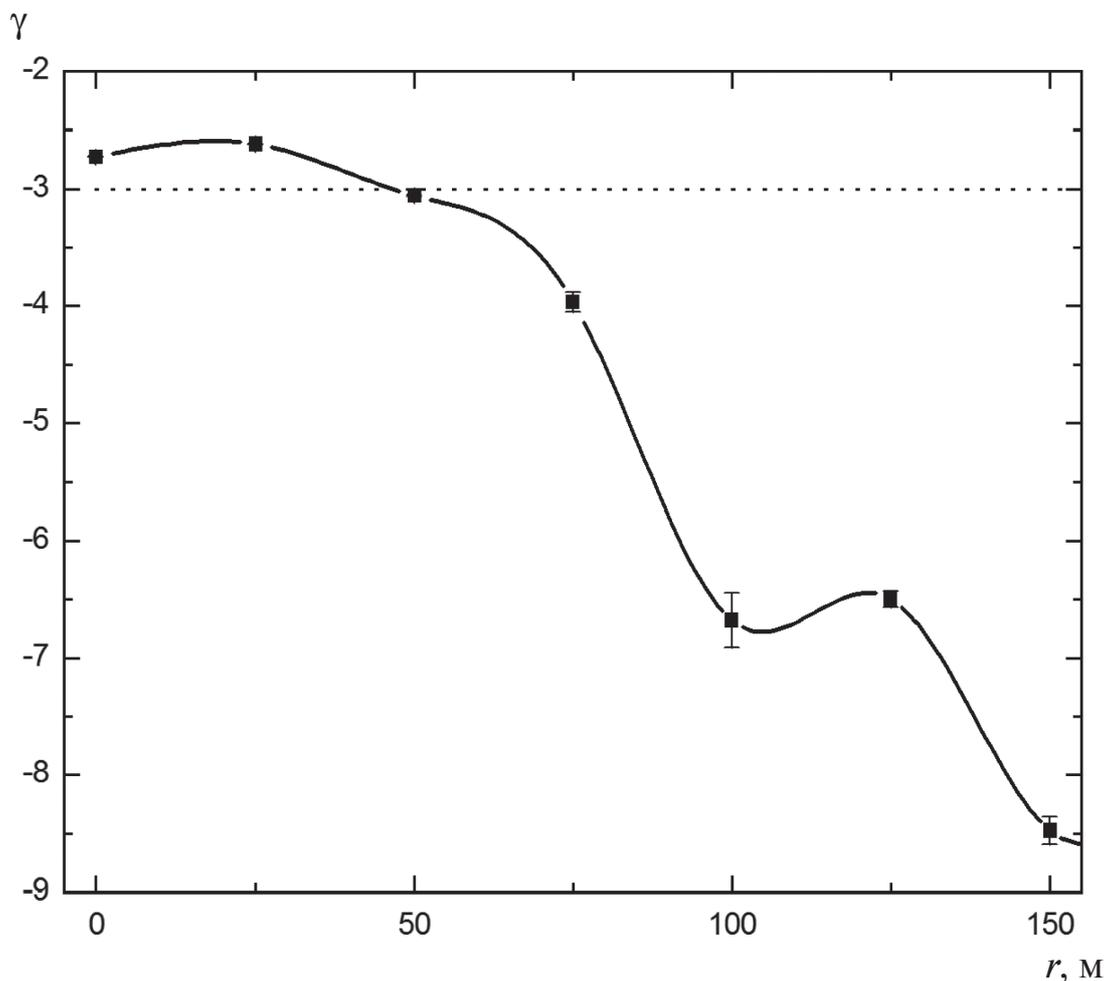


Рис. 3. Зависимость показателя степени γ асимптотик плотности вероятности от расстояния r до оси ливня. Вертикальные отрезки показывают величину среднеквадратичного отклонения σ_γ от среднего значения. Пунктиром показан критический уровень: -3

от плотности вероятности $\rho(F)$ составляет 0,2;

индекс j_1 имеет минимальное значение такое, что $\rho_{j_1+1} = 0$, т. е. это последняя точка перед первым из нулей в последовательности ρ_j .

Степенные аппроксимации функций распределения $\rho \approx AF^\gamma$ для различных расстояний от оси ливня также представлены на рис. 2. Функциональная зависимость $\gamma(r)$ приведена на рис. 3.

Результаты и их обсуждение

Одним из наиболее важных результатов настоящей работы, позволяющим оценить

возможность и целесообразность создания черенковского гамма-телескопа с порогом регистрации 5 ГэВ, является зависимость средней поверхностной плотности черенковских фотонов от расстояния до оси ливня и среднеквадратичное отклонение этой величины (см. рис. 1 и таблицу). Указанный результат хорошо согласуется с полученным на основе интерполяции данных работы [15] (расчет с помощью кода ALTAI) и экстраполяции результатов другой работы [19] (расчет с помощью кода CORSIKA 6), с учетом некоторых различий в значениях энергии первичного кванта, магнитного поля и сопутствующих условий. В таблице приведены численные значения некоторых характеристик

ППЧФ от расстояния до оси ШАЛ, вызванного первичным гамма-квантом с энергией 5 ГэВ.

Зависимость основных характеристик поверхностной плотности черенковских фотонов от расстояния r до оси ливня

| $r, \text{ м}$ | F_{max} | \bar{F} | σ_F | γ | σ_γ |
|----------------|------------------|-----------|------------|----------|-----------------|
| | м^{-2} | | | | |
| 0 | 15,5 | 0,51 | 0,90 | -2,73 | 0,01 |
| 50 | 13,1 | 0,50 | 0,67 | -3,06 | 0,01 |
| 100 | 3,9 | 0,48 | 0,44 | -6,68 | 0,23 |
| 150 | 1,9 | 0,29 | 0,21 | -8,47 | 0,12 |
| 200 | — | 0,21 | 0,13 | -8,12 | 0,45 |
| 250 | — | 0,16 | 0,09 | -5,22 | 1,35 |
| 300 | — | 0,12 | 0,05 | -9,15 | 0,86 |

Энергия первичного кванта – 5 ГэВ.

Обозначения: \bar{F} , F_{max} – среднее и максимальное значения поверхностной плотности; σ_F – ее среднеквадратичное отклонение; γ , σ_γ – показатель аппроксимирующей степенной зависимости и его среднеквадратичное отклонение.

Большие значения среднеквадратичного отклонения σ_γ при $r \geq 100$ м обусловлены двумя факторами: во-первых, систематической ошибкой, появляющейся вследствие использования недостаточно большого числа (0,8) в правой части условия (8), единого для всех r . Оказывается, что при некоторых r степенная аппроксимация недостаточно точно описывает реальную функцию распределения $\rho(F)$ в области F , удовлетворяющей неравенству (8); во-вторых, недостаточно большим количеством точек для анализа и построения функции плотности вероятности в «крыльях» ливня, что в свою очередь связано с недостаточной статистикой. Для более точного определения показателя степени в области $r \geq 100$ м (для достижения значения $|\sigma_\gamma/\gamma|$ порядка 10^{-2}) требуется анализировать статистику по примерно 300 тысячам событий.

Полученные функции плотности вероятности $\rho(F)$ заданы на положительной полуоси, поскольку ППЧФ по определению неотрицательна. Все функции $\rho(F)$ являются монотонно убывающими (максимумы отсутствуют), т.е. наиболее вероятны малые, близкие к нулю значения поверхностной плотности. Все

показанные функции $\rho(F)$ имеют степенные асимптотики, пропорциональные F^γ , которые становятся круче с ростом расстояния до оси ливня (см. таблицу).

Типичная ширина функции плотности вероятности $\rho(F)$ уменьшается при увеличении расстояния до оси ливня, т. е. вероятность реализации больших ППЧФ (3–10 фотон/м²) существенно падает. В то же время в центральной области ствола ливня ($r < 50$ м) функция $\rho(F)$ существенно шире, чем в его «крыльях», что и приводит к относительно большим значениям среднеквадратичного отклонения (т. е. к менее определенному среднему значению ППЧФ). Более того, в области $r < 50$ м абсолютное значение показателя степени $|\gamma| < 3$ (см. рис. 3), что означает отсутствие среднеквадратичного отклонения в пределе бесконечно большой статистики (так как второй момент функции распределения $\int F^2 \rho(F) dF$ расходится). Столь медленное убывание функции распределения $\rho(F)$ объясняет относительно большие значения среднеквадратичного отклонения, рассчитанные по результатам конечной серии испытаний. Перегиб кривой $\gamma(r)$ в области расстояний $r = 75 - 125$ м, вероятно, обусловлен недостаточной для данного интервала расстояний статистикой (см. пояснения выше), о чем свидетельствуют, в частности, большие значения среднеквадратичного отклонения σ_γ при $r = 100$ м (см. рис. 3).

Расчет функций плотности вероятности $\rho(F)$ для различных расстояний от оси ливня (см. рис. 2 и таблицу) показывает, что поверхностная плотность черенковских фотонов, рождающихся при взаимодействии первичного гамма-кванта с энергией 5 ГэВ с атмосферой, имеет негауссову статистику. Отклонения от распределения Гаусса наиболее сильны в центральной области ливня. Это может приводить к дополнительным сложностям в обработке результатов. Например, понятие среднеквадратичного отклонения уже не столь явно связано с шириной распределения, как в случае Гауссовой статистики, и, соответственно, попадание измеренного значения ППЧФ в интервал $\pm 3\sigma_F$ от среднего значения уже не соответствует уровню достоверности 99,7 %. Возможно, что более подходящими окажутся методы статистического анализа, оперирующие



не средними значениями исследуемых величин, а соответствующими заданным уровням вероятности, например медианными (т. е. отвечающими уровню вероятности 50 %).

Таким образом расчеты показывают, что среднее значение поверхностной плотности черенковских фотонов, рождающихся при взаимодействии первичного гамма-кванта энергии 5 ГэВ с атмосферой, составляет 0,2–0,5 фотон/м² в пределах 200 м от оси ливня. Это позволяет рассчитывать на то, что оптический телескоп с эффективным диаметром зеркала 30 м, установленный на высоте 5 км, сможет регистрировать такие события.

Однако при определении энергии первичного гамма-кванта могут возникнуть существенные сложности, связанные с большими флуктуациями поверхностной плотности черенковских фотонов, генерируемых в ливне. Так, неопределенность ППЧФ, характеризуемая среднеквадратичным отклонением от среднего, составляет примерно 0,1–0,9 фотон/м² (в пределах 200 м от оси ливня), т. е. 50–180 % в зависимости от расстояния до оси ливня. В области ствола ливня, где ППЧФ имеет наи-

большие значения (0,5 фотон/м²), неопределенность превышает 100 % от среднего значения и уменьшается до 50–70 % к «крыльям» ливня, где ППЧФ относительно мала (0,2–0,3 фотон/м²). Это заставляет говорить о необходимости дополнительных методов определения энергии первичного кванта, более эффективных по сравнению с калориметрией. К таким методам относится анализ морфологии пятна-образа широкого атмосферного ливня в фокальной плоскости телескопа, а также использование стереоскопической системы телескопов. Возможны и иные вспомогательные методы наблюдения, например регистрация радиоизлучения широких атмосферных ливней.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор 11.G34.31.0001) и РФФИ (гранты 11-02-12082-ОФИ-М-2011 и 11-02-00253-а).

Научные сотрудники Е.Е. Холупенко и Д.А. Байко благодарят за поддержку научную школу НШ-3769.2010.2. Часть расчетов выполнена в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН, а также в его филиале в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чудаков, А.Е.** Поиск фотонов высокой энергии от локальных источников космического радиоизлучения [Текст] / А.Е. Чудаков, В.Л. Дадькин, В.И. Зацепин, Н.М. Нестерова // Труды ФИАН. — 1963.— Т. 26.— С. 118 — 141.
2. **Jelley, J.V.** Cherenkov radiation from the night sky, and its application to γ -ray astronomy [Текст] / J.V. Jelley, N.A. Porter // Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society. — 1963. — Vol. 4.— P. 275 — 293.
3. **Stepanian, A.A.** A search for discrete gamma-ray sources of energy greater than $2 \cdot 10^{12}$ eV [Текст] / A.A. Stepanian, B.M. Vladimirov, Yu.I. Neshpor, V.P. Fomin // Astrophysics and Space Science. — 1975.— Vol. 38.— P. 267—282.
4. **Fazio, G.G.** A search for discrete sources of cosmic gamma-rays of energies near $2 \cdot 10^{12}$ eV [Текст] / G.G. Fazio, H.F. Helmken, G.H. Rieke, T.C. Weekes // Astrophysical Journal. — 1968.— Vol. 154.— P. L83 — L89.
5. **Fegan, D.J.** A fast optical Cherenkov system for directional studies of possible gamma-ray sources [Текст] / D.J. Fegan, B. McBreen, E.P. O'Mongain, [et al.] // Canadian Journal of Physics. — 1968.— Vol. 46.— P. S433 — S436.
6. **Андреева, Н.А.** Результаты наблюдений потока гамма-квантов от галактики Mk 501 [Текст] / Н.А. Андреева, Ю.Л. Зыскин, О.Р. Калекин [и др.] // Письма в Астрономический журнал. — 2000.— Т. 26. № 4. — С. 243 — 248.
7. **Нешпор, Ю.И.** Результаты наблюдений Суг γ -2, BL Lac, 3C 66A, Mk 501 и Крабовидной туманности на гамма-телескопе ГТ-48 в 2006 году [Текст] / Ю.И. Нешпор, А.В. Жовтан, Н.А. Жоголев [и др.] // Изв. КрАО. — 2008.— Т. 104.— С. 191 — 196.
8. **Catanese, M.** Multiwavelength observations of a flare from Markarian 501 [Текст] / M. Catanese, S.M. Bradbury, A.C. Breslin [et al.] // Astrophysical Journal. — 1997.— Vol. 487.— P. L143 — L146.
9. **Pichel, A.** Highlights from the Whipple 10-m VHE Blazar Monitoring Program [Текст] / A. Pichel // Proc. of the 31st ICRC — 2009. — arXiv:0908.0010 — P. 1 — 4.
10. **Fidelis, V.V.** The X-ray variability of Mrk 421 [Текст] / V.V. Fidelis, D.A. Iakubovskiy // Astronomy Reports. — 2008.— Vol. 52, No. R7— P. 526 — 538.
11. **Aharonian, F.A.** H.E.S.S. — the high energy stereoscopic system [Текст] / F.A. Aharonian, H.E.S.S. Collaboration // Bulletin of the American Astronomical Society. — 2000.— Vol. 32— P. 1261.
12. **Mirzoyan, R.** 17m diameter MAGIC telescope project for sub-100 GeV gamma ray astronomy [Текст] /

R. Mirzoyan // Nuclear Physics. B. Proc. Suppl. – 1997. – Vol. 54. – P. 350 – 361.

13. **Weekes, T.C.** VERITAS: Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System [Текст] / T.C. Weekes, C. Akerlof, S. Biller [et al.] // Proc. of the 25th Internat. Cosmic Ray Conf.; eds. M.S. Potgieter, C. Raubenheimer, and D. J. van der Walt. – 1997. – Vol. 5. – P. 173 – 176.

14. **Mori, M.** The CANGAROO-III project [Текст] / M. Mori, S.A. Dazeley, P.G. Edwards [et al.] // GeV-TeV Gamma Ray Astrophysics Workshop, AIP Conf. Proc. – 2000. – Vol. 515. – P. 485 – 491.

15. **Aharonian, F.A.** 5@5 – a 5 GeV energy threshold array of imaging atmospheric Cherenkov telescopes at 5 km altitude [Текст] / F.A. Aharonian, A.K. Konopelko, H.J. Volk, H. Quintana // Astroparticle Physics – 2001. – Vol. 15. – Iss. 4. – P. 335 – 356.

16. **Allison, J.** Geant4 developments and applications [Текст] / J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis [et al.] // Nuclear Science. – 2006. – Vol. 53. – P. 270 – 278; <http://geant4.cern.ch>

17. ICAO. Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet)) [Текст]: Doc 7488-CD. Third Edition – 1993. ISBN 92-9194-004-6.

18. **Ивченко, Г.И.** Математическая статистика [Текст]: Учеб. пос. для вузов / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. – М.: Высш. шк., 1984.

19. **Mishev, A.L.** Gamma rays studies based on atmospheric Cherenkov technique at high mountain altitude [Текст] / A.L. Mishev, S. Cht. Mavrodiev, J.N. Stamenov // Internat. Journal of Modern Physics. A. – 2005. – Vol. 20. – Iss. 29. – P. 7016 – 7019.