

В работе [4] на основании ежедневных наземных наблюдений Солнца в течение последних 35 лет анализировалась связь между различными индексами солнечной активности. Высокая корреляция между индексами активности в оптическом, радио- и коротковолновом участках спектра дает возможность в дальнейшем прогнозировать с достаточно хорошей точностью потоки излучения не только от Солнца, но и от многих звезд солнечного типа во всех интересующих нас участках спектра.

Моделирование потоков излучения позволяет ликвидировать пробелы в рядах регулярных астрономических наблюдений и проводить экстраполяцию данных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Федеральной программы «Астрономия» (грант 1.4.3.4).

Автор выражает благодарность М. М. Кацовой и М. А. Лившицу за полезные обсуждения проблемы.

#### Литература

1. Balinas S.L., Donahue R.A., Soon W.H. // *Astrophys. J.* 1995. **438**. P. 269.
2. Noyes R.W., Weiss N.O., Vaughan A.H. // *Astrophys. J.* 1984. **287**. P. 769.
3. Pallavicini G., Wilson R.F., Lang K.P. // *Astron. Astrophys.* 1985. **149**. P. 95.
4. Lean J.L., Brueckner B.V. // *Astrophys. J.* 1989. **337**, No. 1, Pt. 1. P. 568.
5. Snowgrass H.B., Wilson P.R. // *Nature*. 1987. **328**, No. 6132. P. 677.
6. Алексеев И.Ю., Гершберг П.Е. // *Астрон. журн.* 1996. **73**, № 4. С. 579.
7. Бочарова Н.Ю., Нусинов А.А. // *Солнечные данные*. 1983. № 1. С. 106.

Поступила в редакцию  
16.11.98

УДК 539.591.16

## О СТЕРЕОВОЗМОЖНОСТЯХ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ГАММА-ТЕЛЕСКОПОВ, РЕГИСТРИРУЮЩИХ УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

А. М. Анохина, В. И. Галкин, Г. П. Кузнецова, Т. М. Роганова, А. А. Степанян<sup>\*)</sup>

(НИИЯФ)

Статистическое моделирование процесса регистрации гамма- и фонового излучения сверхвысокой энергии черенковским гамма-телескопом ГТ-48 Крымской астрофизической обсерватории показало, что невозможно эффективное выделение атмосферных ливней, вызываемых гамма-квантами, по глубине максимума черенковского излучения. Увеличение расстояния между телескопами не приведет к повышению эффективности отбора гамма-событий.

Во многих экспериментах источники гамма-излучения сверхвысокой энергии наблюдаются одновременно несколькими, разнесенными на некоторое расстояние друг от друга, телескопами, регистрирующими угловое распределение черенковского излучения атмосферных ливней. Можно попытаться использовать возможности такой стереосистемы для оценки глубины максимума интенсивности черенковского излучения и, следовательно, для отбора гамма-событий на фоне первичных ядер. Такой способ отбора гамма-ливней был предложен в работах [1, 2].

Для определения возможностей этого метода было проведено моделирование процесса регистрации черенковским стереотелескопом Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) ГТ-48 гамма- и ядерных атмосферных ливней с использованием монте-карловского кода CORSIKA [3].

Моделируемая установка ГТ-48 КрАО состоит из двух идентичных секций, расположенных на расстоянии 20 м друг от друга в направлении север–юг на высоте 570 м над уровнем моря. Площадь зеркал, установленных на каждой из секций, 13,5 м<sup>2</sup>. В фокусе зеркал установлены связки из 37 ФЭУ, с помощью

которых регистрируются изображения черенковских вспышек в атмосфере. Полный угол обзора каждой связки светоприемников 3° [1, 4].

На смоделированные черенковские образы гамма- и ядерных ливней был наложен флуктуирующий фон ночного неба (в среднем 50 черенковских фотонов на угловую ячейку), учтены флуктуации числа фотоэлектронов в ФЭУ, смоделировано триггерное условие. Из рассмотрения исключались события, для которых хотя бы в одном детекторе ячейка с максимальным сигналом располагалась во внешнем кольце связки из 37 угловых ячеек; исключались и события, в которых хотя бы в одной ячейке регистрировался сигнал, превышающий предельный для данной установки порог — 255 ед. «дискрета» (1 «дискрет» — 0,7 фотоэлектрона).

Модельные расчеты были откалиброваны путем сравнения параметров черенковских пятен от первичных протонов и ядер, полученных в эксперименте и смоделированных [5, 6]. Сравнились следующие характеристики черенковских образов: длина и ширина пятна, величина сигнала в максимальной ячей-

<sup>\*)</sup> Крымская астрофизическая обсерватория.

ке, величина суммарного сигнала по всем ячейкам, составляющим пятно (в световой образ ливня включались сигналы светоприемников, превышающие величину 13 ед. «дискрета»).

В настоящей работе рассматривается возможность определения глубины максимума излучения и отбора событий, инициированных первичными гамма-квантами, на примере двух совокупностей смоделированных событий. Сначала рассматриваются черенковские образы гамма- и протонных ливней с первичной энергией  $2 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ , затем от всего энергетического спектра регистрируемых событий. Смоделированные гамма-ливни были параллельны оптической оси установки, направленной в зенит, прицельный параметр ограничивался расстоянием в 300 м. Зенитные углы ядерных ливней разыгрывались в пределах  $0 \div 2,5^\circ$  относительно оптической оси установки, оси ливней располагались равномерно в круге с радиусом 300 м.

Оптические образы, полученные системой из двух телескопов, позволяют вычислить для каждого ливня угловую величину  $\Omega_\rho$ , введенную в работах [1, 4] и названную DRO:

$$\Omega_\rho = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2},$$

где  $(X_1, Y_1)$  и  $(X_2, Y_2)$  — координаты центров тяжести пятен в первом и втором телескопах [1, 4]. Используя как базу расстояние между двумя телескопами, можно с помощью параметра  $\Omega_\rho$  оценить глубину максимума излучения гамма- и ядерных ливней и попробовать разделить эти ливни, основываясь на различиях глубин максимума. Известно, что электронно-фотонные каскады развиваются в атмосфере выше, чем ливни, инициированные протонами и ядрами. Чем выше ливень в атмосфере, тем меньше величина  $\Omega_\rho$ . Результаты моделирования для ограниченного диапазона первичных энергий  $2 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$  подтверждают то, что используемая модель процесса регистрации черенковского излучения ливней гамма-телескопом ГТ-48 не противоречит известным представлениям о развитии каскадов в атмосфере. На основании этих данных также можно сделать вывод, что параметр  $\Omega_\rho$  чувствителен к глубине образования максимума черенковского излучения ливня. Моделирование для всего диапазона первичных энергий гамма-квантов и протонов, которые регистрирует установка ГТ-48 КрАО, продемонстрировало невозможность с достаточной эффективностью выделить класс событий, относящихся к гамма-квантам, по глубине максимума черенковского излучения.

#### Результаты для ограниченного диапазона первичных энергий $2 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$

На рис. 1 приведены сечения угловых распределений плотности черенковского излучения от электронно-фотонных атмосферных каскадов с энергиями  $10^{12}$  и  $10^{13}$  эВ в детекторе, расположенном на высоте 570 м над уровнем моря. Распределения вычислены

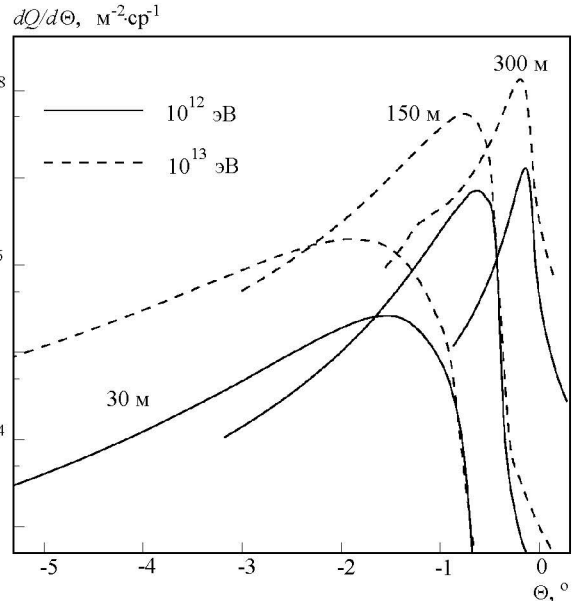


Рис. 1. Сечения трехмерных угловых распределений плотности черенковского излучения плоскостью, проходящей через ось  $\Theta$  детектора, для разных расстояний (30, 150 и 300 м) от оси гамма-ливня с энергией  $10^{12}$  и  $10^{13}$  эВ. Уровень зарождения каскада — граница атмосферы, уровень наблюдения 570 м над уровнем моря

аналитически с использованием методов каскадной теории [7] для трех расстояний от оси каскада до детектора  $R$  (30, 150 и 300 м). В табл. 1 сведены параметры, характеризующие угловое распределение черенковского излучения:  $A$  — максимальное значение плотности функции углового распределения;  $\delta\Theta$  — угловой интервал, ограничивающий область плотности функции углового распределения величиной 0,1 от максимальной;  $h$  — высота, соответствующая точке максимума излучения, относительно уровня наблюдения.

Т а б л и ц а 1

#### Характеристики углового распределения черенковского излучения

Параметры	$E_0$ , эВ	$R = 30$ м	$R = 150$ м	$R = 300$ м
$A$ , $\frac{\text{фотон}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$	$10^{12}$	$1,276 \cdot 10^7$	$7,050 \cdot 10^6$	$2,640 \cdot 10^5$
	$10^{13}$	$1,347 \cdot 10^8$	$5,403 \cdot 10^7$	$1,995 \cdot 10^6$
$\delta\Theta$ , °	$10^{12}$	0,54	1,09	2,59
	$10^{13}$	0,59	1,41	3,62
$h$ , км	$10^{12}$	10,96	12,76	11,29
	$10^{13}$	9,34	10,75	8,87

В эксперименте высота максимума излучения определяется по центрам тяжести черенковских образов, а сам черенковский образ складывается из интегралов по световым ячейкам — светоприемникам. Было выделено 92 протонных и 163 гамма-события с энергией  $2 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ , зарегистрированных установкой. На рис. 2 приведены нормированные на единицу распределения этих событий по параметру  $\Omega_M$  — угловому расстоянию от центра

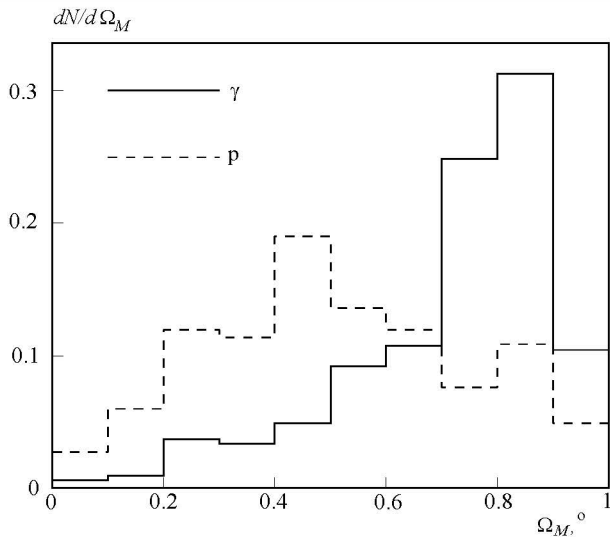


Рис. 2. Распределения гамма- и ядерных ливней с энергией  $2 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$  по параметру  $\Omega_M$  — угловому расстоянию от центра телескопа до центра тяжести пятна

телескопа до центра тяжести пятна, обозначаемому как DIST в черенковской гамма-астрономии. Средние значения распределений:  $\overline{\Omega_M(\gamma)} = (0,717 \pm 0,039)^\circ$ ,  $\overline{\Omega_M(p)} = (0,513 \pm 0,038)^\circ$ . Дисперсии:  $D_\gamma = 0,034$ ,  $D_p = 0,054$ .

Для гамма-ливней среднее по распределению значение параметра  $\Omega_M = (0,72 \pm 0,04)^\circ$  и максимум распределения по  $\Omega_M$ , равный  $0,85^\circ$ , соответствуют высотам излучения 11,90 и 10,10 км для прицельного параметра 150 м, что хорошо согласуется с данными рис. 1 и табл. 1. Для смоделированных протонных ливней, направленных под углом к оптической оси телескопов, получить информацию о глубине максимума излучения только на основе параметра  $\Omega_M$  нельзя, так как  $\Omega_M$  зависит от угла наклона оси ливня. Из рис. 2 следует, что среднее значение величины  $\Omega_M$  для протонных ливней меньше, чем для гамма-ливней. Это связано с тем, что в процессе регистрации наклонных протонных ливней отбираются ливни, наклоненные в сторону оптических осей детекторов, и соответственно центры тяжести пятен сдвигаются к оптическим центрам установки.

Распределения смоделированных гамма- и протонных событий с энергиями  $2 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$  по параметру  $\Omega_\rho$  представлены на рис. 3. Средние значения распределений:  $\overline{\Omega_\rho(\gamma)} = (0,137 \pm 0,011)^\circ$ ,  $\overline{\Omega_\rho(p)} = (0,192 \pm 0,020)^\circ$ . Дисперсии:  $D_\gamma = 0,005$ ,  $D_p = 0,009$ . Средние значения параметра  $\Omega_\rho$  и дисперсии распределений демонстрируют возможность использования данного параметра для разделения классов событий. Наилучшего разделения гамма- и фоновых событий в данном случае можно достичь, определив границу между классами в точке  $\Omega_\rho = 0,12$ . В этом случае можно отбросить 74 протонных события (80%) при сохранении 60 гамма-событий (40%).

Однако рассматриваемые одинаковые интервалы изменения первичной энергии для гамма- и протонных ливней не подходят для моделирования ситуа-

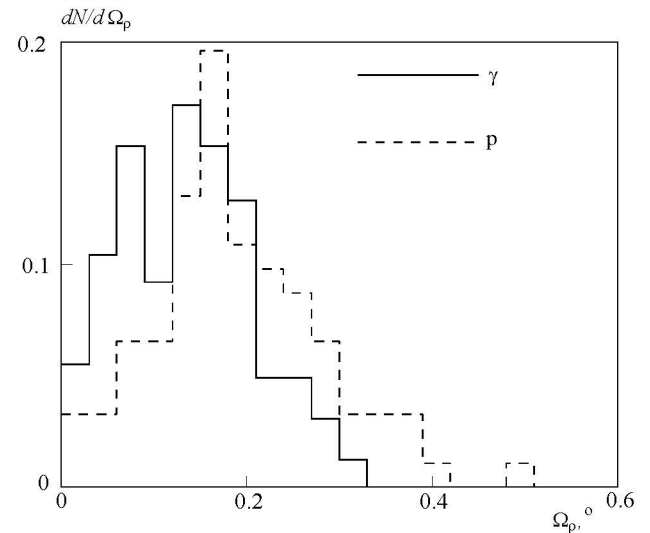


Рис. 3. Распределения гамма- и ядерных ливней с энергией  $2 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$  по параметру  $\Omega_\rho$

ции, наблюдаемой в эксперименте, так как установка чувствительна к разным диапазонам первичной энергии для разных первичных частиц.

### Результаты для полного диапазона регистрируемых энергий

Полное моделирование процесса регистрации установкой ГТ-48 КрАО фонового и гамма-излучения было проведено для широкого диапазона первичных энергий: для гамма-квантов  $0,5 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 10^{14} \text{ эВ}$  (по спектру с показателем  $-2,2$ ), для протонов и ядер гелия  $0,8 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \leq E_0 \leq 10^{14} \text{ эВ}$  (по спектру с показателем  $-2,7$ ). Спектры зарегистрированных гамма- и протонных событий приведены на рис. 4. Средние значения распределений:  $\overline{E_\gamma} = (2,112 \pm 0,109) \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ ,  $\overline{E_p} = (10,305 \pm 0,567) \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ . Дисперсии:  $D_\gamma = 7,746 \cdot 10^5$ ,  $D_p = 10,252 \cdot 10^5$ .

Для обоснования возможности разделения гамма- и ядерных ливней по параметру  $\Omega_\rho$  проводилось моделирование работы систем из двух телескопов

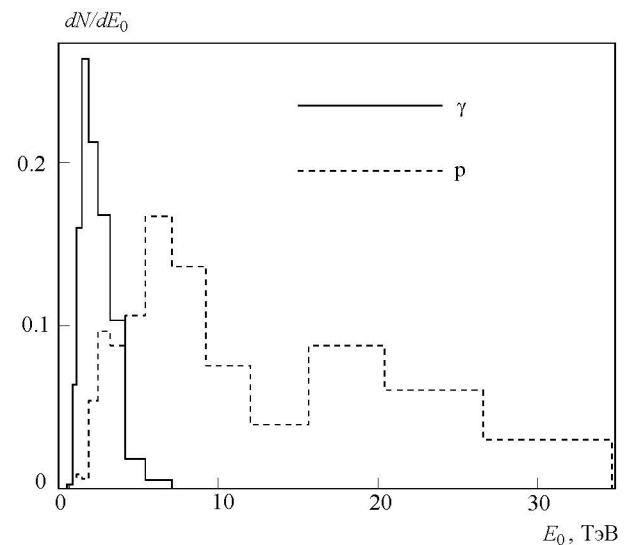


Рис. 4. Спектры регистрируемых установкой ГТ-48 КрАО гамма- и ядерных ливней

Таблица 2

Параметр  $\Omega_\rho$  и средняя энергия

База, м	Число событий	$\Omega_\rho, ^\circ$	$\bar{E}_0, 10^{12}$ эВ
20	376 $\gamma$	0,137 (0,075)	2,111 (0,880)
	217 p	0,178 (0,105)	9,255 (11,039)
	330 p+He	0,174 (0,096)	10,305 (10,125)
40	127 $\gamma$	0,273 (0,109)	2,243 (1,037)
	115 p	0,326 (0,126)	9,603 (11,110)
	179 p+He	0,315 (0,117)	7,278 (9,494)
60	171 $\gamma$	0,410 (0,099)	2,092 (0,805)
	88 p	0,482 (0,173)	9,786 (11,293)
	145 p+He	0,456 (0,160)	8,670 (9,903)
80	73 $\gamma$	0,538 (0,144)	2,458 (1,231)
	100 p	0,544 (0,093)	14,497 (9,971)

с разными базами (20 м — реальная экспериментальная база, 40, 60 и 80 м).

Результаты вычислений параметра  $\Omega_\rho$ , а также величины средней регистрируемой энергии представлены в табл. 2. В скобках приведены значения стандартных отклонений для соответствующих распределений.

Из табл. 2 видно, что значение параметра  $\Omega_\rho$  для протонных (фоновых) событий систематически больше, чем для гамма-событий, как и можно было ожидать исходя из особенностей развития каскадов. Однако различие между средними величинами параметра  $\Omega_\rho$  для гамма- и ядерных ливней уменьшается с увеличением расстояния между детекторами, а дисперсия распределений увеличивается. То и другое приводит к ухудшению разделения классов событий, и наилучшее возможное разделение будет при минимальном расстоянии между детекторами.

На рис. 5 приведены распределения сравниваемых классов событий (при полных энергетических интервалах регистрируемых ливней) по параметру  $\Omega_\rho$  для базы 20 м. Средние значения распределений:  $\overline{\Omega_\rho(\gamma)} = (0,138 \pm 0,007)^\circ$ ,  $\overline{\Omega_\rho(p)} = (0,174 \pm 0,010)^\circ$ . Дисперсии:  $D_\gamma = 0,006$ ,  $D_p = 0,010$ . В этом, наиболее благоприятном, случае дисперсии распределений таковы, что отброс 79% фоновых событий возможен при расположении границы между классами по оси  $\Omega_\rho$  в точке  $\Omega_\rho = 0,1^\circ$  при сохранении 34% гамма-событий. В условиях, когда потоки протонов превышают потоки гамма-квантов в  $100 \div 1000$  раз,

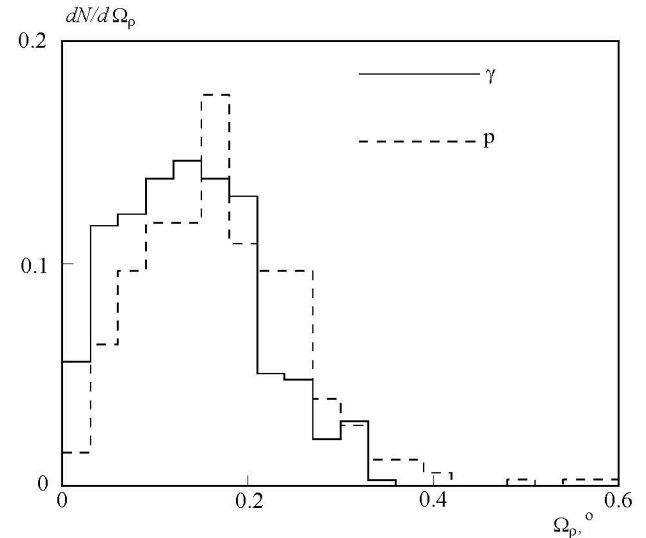


Рис. 5. Распределения регистрируемых установкой ГТ-48 КрАО гамма- и ядерных ливней по параметру  $\Omega_\rho$

устранение 79% фоновых событий недостаточно и селекция только по данному критерию неприемлема.

На основании приведенных расчетов можно сделать вывод о том, что эффективность отбора гамма-событий по параметру  $\Omega_\rho$ , связанному с глубиной максимума черенковского излучения ливней, не улучшается с увеличением расстояния между телескопами.

## Литература

1. Kalekin O.R., Stepanian A.A., Neshpor Yu.I. // Towards a Major Atmospheric Cerenkov Detector (III). Tokyo, 1994. P. 107.
2. Bowden C.C.G., Bradbury S.M., Chadwick P.M. et al. // Towards a Major Atmospheric Cerenkov Detector (II). Calgary, 1993. P. 56.
3. Knapp T., Heck D. CORSIKA 4.50, A User's Guide. Karlsruhe, 1995.
4. Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. и др. // Изв. АН, сер. физ. 1994. **58**, № 12. С. 164.
5. Анохина А.М., Галкин В.И., Кузнецова Г.П., Роганова Т.М. Препринт НИИЯФ МГУ. 1997, № 97-46/497.
6. Anokhina A.M., Chalenko N.N., Fomin V.P. et al. // Proc. 25th ICRC. Durban, 1997. V. 5. P. 93.
7. Anokhina A.M., Galkin V.I., Mandritskaya K.V., Roganova T.M. // Astrophysics and Space Science. 1993. **209**. P. 19.

Поступила в редакцию  
25.11.98