

Препринт ЕФИ-1274(60)-90

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԶԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE



Փ. Ա. ԱԳՐՈՆՅԱՆ, Ա. Կ. ԿՈՆՈՔԵԼՅՈՒ, Ա. Վ. ՔԼՅԵՇՆԻԿՈՎ,
Ա. Ա. ՇԻԼԻՆԳՐՅԱՆ

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ФОНА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПРИ РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-КВАНТОВ СВЕРХВЫСОКОЙ
ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ЧЕРЕНКОВСКИХ ГАММА-ТЕЛЕСКОПОВ
С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ СВЕТОПРИЕМНИКАМИ

ЦНИИатоминформ
ЕРЕВАН-1990

**Ֆ.Ա.ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Ա.Կ.ԿՈՆՈՊԵԼԿՈՒՆ * , Ա.Վ.ՊԼՅԱՇԵՇՆԻԿՈՎ * ,
Ա.Ա.ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ**

**ԲԱԶՄԱԿԱՆԱԼԱՑԻՆ ԼՈՒՍՁՆԴՈՒՆԻՉՆԵՐՈՎ ՉԵՐԵՆԿՈՎՅԱՆ ԳԱՄՄԱ ՏԵԼԵ
ՍԿՈՊՆԵՐԻ ԶԱՄԱԿԱՐԳԻ ՕԳՆՈՒԹՅԱՄԲ ՏԻԵՁԵՐԱԿԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅՑՆԵՐԻ
ՖՈՒՏ ԸՆՇՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԳԵՐԲԱՐՁՐ
ԷՆԵՐԳԻԱՑԻ ՏԻԵՁԵՐԱԿԱՆ ԳԱՄՄԱ-ՔՎԱՆՏՆԵՐԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ**

Բայեսյան որոշման կանոնների և հավանականությունների բազմաչափ խտության վրա հիմնված բազմաչափ փոխհարաբերակցական վերլուծությունը կիրառվել է բազմականալային լուսընդունիչներով չերենկովյան գամմա-տեղեսկոպների համակարգով գրանցված չերենկովյան պատկերների դասակարգման համար: Կետային աղբյուրների ուղղությամբ գամմա-քվանտներից և տիեզերական ճառագայթներից ծնված դեպքերի դասակարգման համար օգտագործում են չերենկովյան պատկերի չափերի, ինչպես նաև նրա գտնվելու տեղի ու գամմա-տեղեսկոպի հայելու կիսակետային հարթության մեջ գրաված դիրքի տարբերությունները: Ցույց է տրված, որ բազմաչափ փոխհարաբերակցական վերլուծությունը բույլ է տալիս մինչև տոկոսի մասը տարանջատել տիեզերական ճառագայթների ֆոնը, ըստ որում թողնելով օգտավետ դեպքերի մոտ 50%-ը:



УДК 537.591:001.1

Ф. А. АГАРОНЯН, А. К. КОНОПЕЛЬКО*, А. В. ПЛЯШЕШНИКОВ*,
А. А. ЧИЛИНГАРЯН

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ФОНА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПРИ РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-КВАНТОВ СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ
С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ЧЕРЕНКОВСКИХ ГАММА-ТЕЛЕСКОПОВ С
МНОГОКАНАЛЬНЫМИ СВЕТОПРИЕМНИКАМИ

Многомерный корреляционный анализ, основанный на байесовских решающих правилах и непараметрическом оценивании многомерных плотностей вероятностей, применен для классификации черенковских образов, зарегистрированных системой черенковских гамма-телескопов с многоканальными светоприемниками. Для классификации событий, порожденных космическими гамма-квантами от локальных источников и космическими лучами, используются различия в размерах черенковского образа, а также в его местоположении и ориентации в фокальной плоскости зеркала гамма-телескопа. Показано, что многомерный корреляционный анализ позволяет дискриминировать фон космических лучей до долей процента, оставляя при этом до ≈ 50 полезных событий.

Ереванский физический институт

Ереван 1990

* Алятайский государственный университет

1. Введение

В настоящее время коллаборацией HEGRA, в состав которой входят научные институты ФРГ, Испании, Великобритании, а также Ереванский физический институт, разрабатывается крупномасштабный научный эксперимент по регистрации космического гамма-излучения очень высокой (10^{12} - 10^{14} эВ) и сверхвысокой (10^{14} - 10^{18} эВ) энергий.

Регистрация космического гамма-излучения очень высокой энергии будет осуществляться в эксперименте [1] посредством системы, состоящей из пяти черенковских гамма-телескопов с многоканальными светоприемниками. Для увеличения чувствительности этой системы планируется использовать дискриминацию фона космических лучей по различиям в свойствах регистрируемых гамма-телескопами двумерных черенковских образов атмосферных ливней, порожденных гамма-квантами и космическими лучами. Настоящая работа посвящена выполненному на примере системы [1] теоретическому анализу возможности подавления фона космических лучей по различиям в свойствах двумерных черенковских образов атмосферных ливней, регистрируемых системой гамма-телескопов с многоканальными светоприемниками. До настоящего времени такой анализ проводился только для случая одиночного гамма-телескопа [2-6].

2. Краткое описание системы телескопов [1] .

Каждый из черенковских гамма-телескопов экспериментальной установки имеет геометрическую площадь зеркала $\approx 5.3 \text{ м}^2$. В фокальной плоскости зеркала телескопа размещен светоприемник, состоящий из 37 фотоэлектронных умножителей. Полный угол обзора телескопа составляет $\approx 3.0^\circ$, угловой размер отдельного ФЭУ в фокальной плоскости зеркала $\approx 0.42^\circ$. Среднее число фотоэлектронов, выбиваемых с фотокатодов ФЭУ, составляет в пересчете на один падающий на поверхность зеркала черенковский фотон $\approx 0.10 + 0.11$. Высота расположения установки [1] над уровнем моря ≈ 2200 м, географические координаты $(-28^\circ \text{ N}, 18^\circ \text{ W})$.

Для черенковских гамма-телескопов [1] планируется использовать следующий критерий жесткого отбора событий: 2 любых из 19 внутренних ФЭУ светоприемника должны зарегистрировать сигнал, превышающий некоторое предельное значение q_0 . Указанный мастерный критерий $(2/19 > q_0)$ хорошо зарекомендовал себя в экспериментах [7,8], т.к. он дает возможность достаточно точно определить основные параметры черенковского образа [8,9]. При исследовании гамма-излучения от локальных источников мастерный критерий $(2/19 > q_0)$ обеспечивает, кроме этого, дополнительную режекцию фоновых событий за счет того, что вспышки черенковского света, вызванные гамма-квантами от локального источника, группируются в основном вблизи центра фокальной плоскости зеркала гамма-телескопа (при условии, что оптическая ось телескопа направлена на источник), в то время как вспышки, инициированные фоном космических лучей, распределены равномерно в поле зрения гамма-телескопа. Отметим, что минимально допустимое значение q_0 при

указанном выше мастерном критерии выбирается из соображений надежного подавления фоновых вспышек, обусловленных свечением ночного неба, и составляет для телескопов [1] 9 фото-электронов (ф.э.) [10].

Черенковские телескопы экспериментальной установки [1] планируется разместить в вершинах и в центре воображаемого квадрата с длиной стороны $1 \pm 50 + 100$ м (рис.1). В настоящее время обсуждаются два возможных режима эксплуатации системы телескопов, изображенной на рис.1: мода 1 - регистрируются события, в которых мастерный критерий $(2/19 > q_0)$ выполняется одновременно для центрального и двух соседних периферийных телескопов; мода 2 - условием регистрации ливня является выполнение мастерного критерия $(2/19 > q_0)$ хотя бы для одного из телескопов системы, однако при дальнейшей обработке события учитываются черенковские образы, зарегистрированные двумя соседними телескопами.

Мода 1 более проста с точки зрения технической реализации, т.к. она осуществима в условиях независимого функционирования каждого из телескопов системы. Преимуществом моды 2 является существенно большее значение эффективной чувствительной площади регистрации.

3. Метод расчета .

Численный анализ, выполненный в настоящей работе, основывается на моделировании методом Монте-Карло развития широких атмосферных ливней, инициированных космическими гамма-квантами, протонами и ядрами, а также моделировании процессов регистрации черенковского излучения от таких ливней системой

гамма-телескопов . Описание алгоритмов вычислительных процессов, использованных для этой цели, дано в работе [2]. Предполагалось, что заряженная компонента космических лучей состоит из протонов (95%) и альфа-частиц (5%) . Вкладом более тяжелых ядер ($\leq 1\%$) мы пренебрегли. Считалось также, что α -частица при первом взаимодействии распадается на 4 нуклона с одинаковыми энергиями. Для уменьшения трудоемкости наши расчеты были разбиты на два этапа, описание которых дается ниже.

На первом этапе вычислений на основе одних и тех же реализаций каскадного процесса моделировались отклики достаточно большого числа черенковских гамма - телескопов, находящихся на различных расстояниях от оси ливня. При этом предполагалось, что каждый из телескопов имеет светоприемник со сравнительно мелкими прямоугольными ячейками ($0.2^\circ \times 0.2^\circ$) и углом обзора, существенно превышающим угол обзора телескопов системы [1].

Вид системы телескопов, использованной на первом этапе вычислений, приведен на рис. 2. Ось ливня считалась проходящей через начало системы координат, оптические оси отдельных телескопов - направленными вдоль оси ливня, а ось ливня - направленной вертикально. Информация о значениях первичной энергии E , а также об использованном в наших расчетах количестве независимых случайных реализаций каскадного процесса дана в табл. 1.

На втором этапе вычислений осуществлялись :

1) Переход к результатам вычислений, соответствующим равномерному распределению положения оси ливня относительно троек гамма-телескопов, расположенных в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны 50 и 100м. Это

достигалось путем суперпозиции данных, соответствующих всевозможным комбинациям троек гамма-телескопов (рис. 2) Такой подход позволяет приближенно моделировать функционирование системы телескопов [1] в описанных выше модах (1 и 2) регистрации ливней для значения базы l равного 50 или 100 м.

2) Учет гексагональности структуры светоприемников гамма-телескопов и изотропности фона космических лучей. Последнее учитывалось путем случайного синхронного смещения в фокальной плоскости, полученного на первом этапе вычислений двумерных черенковских образов, соответствующих определенной тройке телескопов конфигурации (рис. 2) При этом требовалось, чтобы для одного из телескопов тройки, выбранного наугад, положение максимума интенсивности светового пятна находилось в пределах круга с центром в начале фокальной плоскости и угловым радиусом (2°), слегка превышающим половинный угол обзора телескопа.

3) Переход к результатам вычислений, соответствующим заданным энергетическим спектрам гамма-излучения и космических лучей, путем введения соответствующих статистических весов.

4) Расчет параметров черенковского образа, использующихся в дальнейшем анализе. Это [2, 3] ширина светового пятна $WIDTH$, длина $LENGTH$, расстояние $DIST$ от положения максимума интенсивности до центра фокальной плоскости, угол $ALPHA$, определяющий ориентацию образа, а также

$$MISS = DIST * SIN(ALPHA) \quad , \quad \Delta X WIDTH = WIDTH / COS(ALPHA). \quad (1)$$

4. Одномерный анализ.

В настоящее время для дискриминации фона космических лучей на черенковских гамма-телескопах с многоканальными свето-

приемниками используются [2-4] следующие различия в свойствах двумерного черенковского образа ливней :

1) Из-за большей угловой расходимости частиц в ливнях, инициированных космическими лучами (КЛ), пятно черенковского света в фокальной плоскости телескопа от ливня КЛ имеет большие размеры, т.е. характеризуется в среднем большими значениями параметров LENGTH и WIDTH.

2) Плоскопараллельность потока гамма-излучения от локального источника приводит (при условии, что оптическая ось телескопа направлена на источник) к тому, что световые пятна от гамма-ливней группируются в основном вблизи центра фокальной плоскости и ориентируются в радиальном направлении. Световые пятна, порожденные изотропным фоном космических лучей, распределены равномерно по полю зрения гамма-телескопа и ориентированы произвольно. Поэтому черенковский образ гамма-ливня от локального источника будет характеризоваться в среднем меньшими значениями параметров DIST и ALPHA.

3) При одной и той же первичной энергии максимум развития ливня КЛ приходится на более глубокие слои атмосферы. Поэтому черенковское излучение ливня КЛ содержит большую долю ультрафиолета.

В табл. 2 представлены данные по дискриминации фона космических лучей на одиночном черенковском гамма-телескопе с многоканальным светоприемником, соответствующие случаю так называемого одномерного анализа, когда для классификации события используются только один из определенных в п. 3 параметров двумерного черенковского образа ливня (обозначим этот параметр через χ). Эти данные соответствуют применению простейшего условия классификации следующего вида: при $\chi < \chi_0$ (χ_0

- некоторое фиксированное значение параметра χ событие считается гамма-ливнем, а при $\chi \geq \chi_0$ ливнем КЛ.

Величина $P_{\gamma \rightarrow \gamma}$ в табл. 2 определяет вероятность правильной классификации черенковского образа, соответствующего гамма-ливню, т.е. дает эффективность отбора полезных событий. Величина $P_{\text{КЛ} \rightarrow \gamma}$ в табл. 2 определяет вероятность ошибочной классификации ливней, порожденных фоном космических лучей.

Данные табл. 2 получены для значений χ_0 , соответствующих максимально возможному значению величины $\eta = P_{\gamma \rightarrow \gamma} * \{P_{\text{КЛ} \rightarrow \gamma}\}^{-1/2}$, которую называют фактором улучшения эффективности дискриминации [2]. Величина η показывает, в какой степени использование дискриминации позволяет улучшить выявление слабого сигнала от источника гамма-излучения на фоне большого числа черенковских вспышек, порожденных космическими лучами. В этой связи η называют также фактором увеличения отношения сигнал/флуктуации фона.

Данные табл. 2 соответствуют двум различным телескопам: одиночному гамма-телескопу установки HEGRA [1] и гамма-телескопу обсерватории им. Уиппла [7], имеющим близкие по параметрам светоприемники, но сильно отличающимся по величине геометрической площади зеркала (5.3 и 80 м² соответственно). Эти данные соответствуют критерию жесткого отбора событий ($2/19 > q_0$), причем для q_0 использовано минимально допустимое значение (9 и 40 ф.э. соответственно). Интегральный энергетический спектр первичных частиц, для которого получены данные табл. 2, имеет вид $E^{-\gamma}$, где $\gamma=1.25$ для гамма-кванта и $\gamma=1.65$ для космических лучей.

Отметим также, что при расчете величин, приведенных в табл. 2, принимались во внимание (по аналогии с [3,9]) только такие

события, для которых ФЭУ, зарегистрировавший наибольший по величине сигнал, принадлежал первой или второй кольцевым зонам, окружающим центральный ФЭУ гексагонального светоприемника.

Как видно из данных табл. 2, для гамма-телескопа [7] одномерная дискриминация фона космических лучей по различиям в свойствах двумерного черенковского образа является достаточно эффективной (значение фактора повышения эффективности дискриминации изменяется в пределах от ≈ 1.1 до ≈ 2.3 в зависимости от применяемого параметра). В то же время, для одиночного гамма-телескопа [1] единственным параметром, обеспечивающим достаточно высокую эффективность дискриминации, является параметр $AZWIDTH$, причем и для этого параметра фактор улучшения эффективности дискриминации η существенно ниже по сравнению с η для гамма-телескопа [7].

Отмеченная выше особенность объясняется различием в площади зеркала гамма-телескопов. Из-за малой площади зеркала гамма-телескопа [1] вспышки черенковского света формируются здесь (при одинаковом значении первичной энергии) существенно меньшим числом фотонов. Поэтому имеют место большие флуктуации числа фотоэлектронов, испущенных фотокатодами электронных умножителей светоприемника, параметры черенковского образа определяются менее точно, и, как следствие этого, уменьшается фактор улучшения эффективности дискриминации η .

5. Выбор оптимального значения порога q_0 .

В табл. 3 приводятся данные, иллюстрирующие зависимость эффективности одномерной дискриминации фона космических лучей от порога q_0 , входящего в критерий жесткого отбора событий. Эти

данные соответствуют гамма-телескопу экспериментальной установки NEGRA и получены при тех же предположениях, что и данные табл. 2.

Как видно из таблицы 3, с увеличением порога q_0 фактор улучшения эффективности дискриминации η быстро возрастает, и она становится сопоставимой с эффективностью дискриминации для телескопа с большим размером зеркала. Поэтому для черенковского гамма-телескопа с малым размером зеркала при выборе порога q_0 не стоит руководствоваться, как это сделано в эксперименте [7], только соображениями надежного подавления световых всплесков, обусловленных фоновым свечением ночного неба. Таким образом, возникает вопрос об оптимальном выборе порога запуска гамма-телескопа q_0 .

Изменение порога q_0 оказывает (независимо от использования дискриминации по параметрам двумерного черенковского образа) влияние на величину эффективной чувствительной площади регистрации как полезных, так и фоновых событий, т.е. приводит к изменению чувствительности гамма-телескопа. Как отмечается в работе [6], оптимальному режиму работы гамма-телескопа с многоканальным светоприемником соответствует максимальное значение параметра κ , который определяется следующим образом:

$$\kappa = \eta * \bar{s}_\gamma / \bar{s}_{\text{кл}}^{1/2} \quad (2)$$

В формуле (2) η - фактор улучшения эффективности дискриминации с использованием каких-либо параметров двумерного черенковского образа, $\bar{s}_\gamma, \bar{s}_{\text{кл}}$ - усредненные по соответствующему энергетическому спектру эффективные чувствительные площади регистрации полезных и фоновых событий.

Наиболее последовательный подход к выбору оптимального

значения q_0 состоит в использовании для η данных многомерного корреляционного анализа, который будет обсуждаться ниже. Здесь рассматривается более приближенный, но существенно менее трудоемкий подход, при котором в качестве η в формуле (1) используются данные дискриминации по одиночному параметру образа, дающему наиболее высокую эффективность дискриминации. Как видно из табл. 2 и 3, таким параметром является параметр **AZWIDTH**.

Некоторые результаты вычислений по формуле (1) приведены в табл. 4. Как видно из таблицы, зависимость $\chi(q_0)$ имеет максимум вблизи $q_0 = 15$ ф.э., слабо зависящий от формы энергетического спектра гамма-источника. Таким образом, оптимальное значение параметра q_0 для гамма-телескопов [1] составляет ≈ 15 ф.э.

6. Многомерный корреляционный анализ.

Существенно более высоких результатов в подавлении фона космических лучей по сравнению с описанным выше одномерным анализом можно достичь путем одновременного использования для классификации события нескольких параметров черенковского образа [3]. Наиболее последовательным подходом к этой проблеме является многомерный корреляционный анализ, опирающийся на решающие правила Байеса и непараметрические методы оценки многомерной функции плотности вероятности [11].

В работах [5,12] многомерный корреляционный анализ был успешно применен для анализа дискриминации фона космических лучей на одиночном черенковском гамма-телескопе с многоканальным светоприемником, имеющим относительно большой геометрический размер зеркала ($S \approx 100 \text{ м}^2$). В частности, было

показано, что применение данного анализа позволяет получить коэффициент режески фона $R = \{P_{\text{кляу}}\}^{-1}$ на уровне нескольких сотен, сохраняя при этом ≈ 50 полезных событий ($P_{\gamma-\gamma} \approx 0.5$).

Как отмечается в работе [11], применение многомерного корреляционного анализа включает два этапа: выбор наилучших комбинаций признаков, по которым ведется классификация событий, и построение решающего правила.

Полная различительная информация, содержащаяся в признаках, определяется различием функций плотности вероятности и различием корреляций между признаками в различных классах событий. Количественные сопоставления различий в плотностях вероятности, соответствующих одному и тому же признаку в разных классах событий, может быть произведено на основе стандартных статистических тестов [11]. Результаты применения этих тестов для случая одиночного гамма-телескопа экспериментальной установки [1] приведены в табл. 5.

Как видно из данных табл. 5, наибольшей различительной ценностью обладают параметры $ALWIDTH$, $LENGTH$ и $WIDTH$ (этим параметрам соответствуют самые высокие значения P -квантилей).

Самые низкие значения имеет параметр $ALPHA$, определяющий направление главной оси светового пятна в фокальной плоскости зеркала гамма-телескопа. Последнее обстоятельство связано с низкой точностью определения этого параметра из-за довольно больших ($\approx 0.5^\circ$) угловых размеров отдельных ФЗУ светоприемника в фокальной плоскости.

Различие в корреляциях между признаками в разных классах событий может быть охарактеризовано с помощью матрицы Фишера, указывающей значимость различий в корреляциях [10], которая приведена в табл. 6. Как видно из таблицы, наиболее сильно

корреляции отличаются для пар признаков ($WIDTH, AZWIDTH$), ($WIDTH, DIST$) и ($MISS, DIST$), что может быть объяснено следующим путем:

1) Для черенковских образов, инициированных γ -ливнями, плоскопараллельность потока первичных гамма-квантов приводит к преимущественной ориентации главной оси симметрии пятна черенковского света в направлении к центру фокальной плоскости. В результате параметр $ALPHA$ принимает для γ -событий в основном малые значения, а параметр $AZWIDTH$ (см. формулу (1)) имеет в основном значения, близкие к $WIDTH$, т.е. имеет место сильная положительная корреляция между $WIDTH$ и $AZWIDTH$. Для изотропного фона космических лучей, напротив, имеет место хаотическая ориентация световых пятен в фокальной плоскости, параметр $ALPHA$ распределен равномерно, и корреляция между $WIDTH$ и $AZWIDTH$ является менее существенной.

2) Из-за плоскопараллельности потока гамма-квантов для черенковских образов, порожденных гамма-ливнями, имеет место довольно сильная положительная корреляция между параметром $DIST$ и расстоянием r от гамма-телескопа до оси ливня [2]. Для ливней КЛ, из-за изотропности направлений их прихода, такая корреляция полностью отсутствует. Поскольку параметр $WIDTH$ для обоих типов событий положительно коррелирует с расстоянием r , то возникает различие в корреляции между параметрами $WIDTH$ и $DIST$ в разных классах событий.

3) Различие в корреляции параметров $DIST$ и $MISS$ (см. рис. 4,5) связано с тем, что для гамма-ливней параметр $MISS$ определяется направлением на источник и слабо коррелирует с параметром $DIST$, определяемым прицельным параметром; для изображений от КЛ, не имеющих ориентацию на источник, корреляция между параметрами $DIST$ и $MISS$ довольно значительна.

Как показал многомерный анализ, проведенный нами в работах [5,12] для случая одиночного черенковского гамма-телескопа, одновременное использование более 3-4 параметров черенковского образа не приводит к сколько-нибудь существенному росту эффективности дискриминации. В то же время, при увеличении размерности пространства, ввиду ограниченности выборки, возрастают ошибки оценивания многомерной плотности. В связи с этим мы использовали в обсуждаемом здесь многомерном анализе по 3 параметра черенковского образа для каждого из гамма-телескопов экспериментальной установки [1]. При моделировании работы системы телескопов [1] в описанных выше модах 1 и 2, когда при обработке событий используются одновременно черенковские образы, зарегистрированные тремя гамма-телескопами системы, такой подход соответствует общей размерности многомерной плотности вероятностей, равной 9.

Наилучшие тройки признаков для анализа были отобраны нами путем комбинации наилучших одиночных признаков и наилучших пар признаков. Это тройка (WIDTH, AZWIDTH, LENGTH), включающая наилучший одиночный признак LENGTH и наилучшую пару (WIDTH, AZWIDTH), а также тройка (DIST, MISS, WIDTH), включающая две из отмеченных выше наилучших пар признаков.

Основные результаты проведенного нами многомерного анализа представлены в табл. 7. Данные этой таблицы соответствуют двум рассмотренным в п. 2 модам функционирования системы гамма-телескопов [1], а также двум различным значениям базы 1, определяющей расстояние между телескопами в системе. Порог запуска гамма-телескопов $q_0=15$ ф.э. выбран в соответствии с рекомендациями п. 5. Отметим также, что данные табл. 5-7 соответствуют интегральному энергетическому спектру первичных

гамма-квантов степенного вида с показателем $\gamma=1,25$. Как отмечалось выше, при расчете данных табл. 2-4, демонстрирующих результаты одномерного анализа, из рассмотрения были исключены события, для которых максимум интенсивности приходится на центральный или один из периферийных ФЭУ многоканального светоприемника. Такой прием, как показано в [3], позволяет добиться более высокой дискриминации фоновых событий.

При проведении многомерного анализа для системы гамма-телескопов (данные табл. 5-7) мы отказались от указанной отбраковки, т.к. ее использование приводит к сильному уменьшению эффективной чувствительной площади регистрации полезных событий. Последнее связано с тем, что из-за сильной корреляции (для образа, соответствующего гамма-ливню) между прицельным параметром τ и параметром $DIST$ мала вероятность попадания максимума интенсивности светового пятна (одновременно для трех гамма-телескопов системы) во внутренние гексагональные зоны многоканальных светоприемников.

Из данных табл. 7 могут быть сделаны следующие выводы:

- 1) Многомерный корреляционный анализ применительно к системе телескопов [1] позволяет достичь дискриминации фона космических лучей на уровне нескольких десятых долей процента, сохраняя при этом до половины полезных событий. Фактор повышения эффективности дискриминации η достигает при этом значения 5-8, что сопоставимо [5,12] с результатами применения многомерного анализа для случая одиночного гамма-телескопа с большим размером зеркала.
- 2) Функционирование системы гамма-телескопов в моде 1 позволяет (при прочих равных условиях) получить более высокую эффективность дискриминации фона космических лучей. Это связано

с тем, что в моде 1 для анализа отбираются черенковские образы, имеющие в среднем большую интенсивность и, следовательно, меньшие флуктуации.

Э) С увеличением базы 1 от 50 до 100 м эффективность дискриминации увеличивается, т.к. при этом уменьшаются корреляции между черенковскими образами отдельных телескопов системы и набор образов приобретает большую информативность.

Следует отметить, что для системы телескопов эффективная площадь регистрации гамма-квантов существенно больше, чем для одиночного гамма-телескопа даже такой большой площади, как телескоп обсерватории им. Уипла [7]. В связи с этим при сопоставимых значениях фактора повышения эффективности дискриминации в обоих случаях система гамма-телескопов обеспечивает выигрыш в регистрируемом сигнале гамма-излучения.

ТАБЛИЦА 1

Данные о числе использованных в расчетах независимых случайных реализаций каскадного процесса для ливней, порожденных гамма-квантами (N_{γ}) и космическими лучами ($N_{\text{КЛ}}$).

Е, ТэВ	0.25	0.40	0.70	1.0	2.0	4.0	7.0	10.0	15.0	25.0
N_{γ}	-	25	25	75	25	25	25	25	25	-
$N_{\text{КЛ}}$	-	50	50	100	50	50	25	25	25	25

ТАБЛИЦА 2

Дискриминация фона космических лучей по
одному из параметров черенковского образа:

* - наши данные для одного 3м гамма-телескопа
обсерватории [1], **, *** - данные для 10м гамма-телескопа
обсерватории им. Уиппла [7] авторов работы [6] (***) и
Хилласа (***) из работы [9].

Параметр дискриминации		LENGTH	WIDTH	DIST	MISS	AZWIDTH
*	P_{γ}	0.442	0.871	0.890	0.867	0.249
	$P_{\text{кл}}$	0.171	0.735	0.697	0.611	0.024
	η	1.070	1.015	1.068	1.108	1.619
**	P_{γ}	0.932	0.942	0.791	0.714	0.615
	$P_{\text{кл}}$	0.186	0.458	0.384	0.206	0.069
	η	2.16	1.39	1.28	1.57	2.35
***	P_{γ}	0.826	0.858	0.935	0.676	0.768
	$P_{\text{кл}}$	0.210	0.367	0.683	0.231	0.121
	η	1.802	1.420	1.132	1.408	2.204

ТАБЛИЦА 3

Эффективность дискриминации фона космических лучей по одному из параметров черенковского образа в зависимости от порога запуска гамма-телескопа q_0 . Одиночный гамма-телескоп экспериментальной установки [1].

q_0		LENGTH	WIDTH	DIST	ALPHA	MISS	AZWIDTH
9	P_{γ}	0.442	0.871	0.890	0.842	0.867	0.249
	$P_{\text{КЛ}}$	0.171	0.736	0.697	0.679	0.611	0.024
	η	1.068	1.015	1.066	1.022	1.108	1.619
12	P_{γ}	0.611	0.861	0.924	0.736	0.802	0.353
	$P_{\text{КЛ}}$	0.231	0.561	0.653	0.409	0.252	0.018
	η	1.273	1.120	1.144	1.150	1.200	2.639
15	P_{γ}	0.733	0.925	0.928	0.729	0.659	0.416
	$P_{\text{КЛ}}$	0.251	0.622	0.589	0.378	0.238	0.015
	η	1.461	1.173	1.209	1.186	1.349	3.390
	P_{γ}	0.783	0.827	0.967	0.719	0.735	0.496
20	$P_{\text{КЛ}}$	0.306	0.506	0.632	0.392	0.242	0.021
	η	1.416	1.163	1.216	1.149	1.493	3.449

ТАБЛИЦА 4

Зависимость параметра x от порога запуска телескопа q_0 и показателя энергетического спектра гамма-источника.

Используется дискриминация по параметру AZWIDTH.

γ	q_0 ф.э	9	12	15	20	25
1.00		700	832	948	788	714
1.25		480	563	627	504	442
1.65		268	308	327	247	206

ТАБЛИЦА 5

Значения P-квантилей для параметров черенковского образа Гамма-телескоп экспериментальной установки NEGRA. $q_0=15$ ф.э. Показатель энергетического спектра гамма-источника $\gamma=1.25$.

Вид теста	LENGTH	WIDTH	DIST	ALPH	MISS	AZWIDTH
Стьюдента	30.2	18.4	25.9	8.00	8.16	27.2
Колмогорова	13.3	9.03	8.60	4.82	5.83	12.7
Манн-Уитни	28.1	21.0	18.7	9.95	11.6	27.0

ТАБЛИЦА 6

Матрица Фишера для параметров черенковского образа.

Гамма-телескоп экспериментальной установки NEGRA.

$$\varphi_0 = 15 \text{ ф.э.}, \quad \gamma = 1.25.$$

	<i>LENGTH</i>	<i>WIDTH</i>	<i>DIST</i>	<i>ALPHA</i>	<i>MISS</i>	<i>AZWIDTH</i>
<i>LENGTH</i>	*	12.3	11.9	4.10	2.92	8.15
<i>WIDTH</i>	12.3	*	15.2	8.44	8.02	20.6
<i>DIST</i>	11.9	15.2	*	4.74	16.4	13.1
<i>ALPHA</i>	4.10	8.44	4.74	*	11.9	0.80
<i>MISS</i>	2.92	8.02	16.4	11.9	*	4.91
<i>AZWIDTH</i>	8.15	20.6	13.1	0.80	4.91	*

ТАБЛИЦА 7

Данные многомерного корреляционного анализа для системы черенковских гамма-телескопов экспериментальной установки НЕГРА. $q_0 = 15$ ф.э., $\gamma = 1.25$. # N и #КЛ - общее число показаний троек гамма-телескопов, использовавшихся в анализе.

I, м	Мода	N/#КЛ	Параметры		
50	1	$\frac{1008}{780}$	WIDTH AZWIDTH LENGTH	$R_{\gamma \rightarrow \gamma}$	0.160 0.380 0.436
				$R_{\text{КЛ} \rightarrow \gamma}$	0.002 0.002 0.015
				η	4.07 7.28 3.53
50	1	$\frac{1008}{780}$	DIST WIDTH MISS	$R_{\gamma \rightarrow \gamma}$	0.372 0.457 0.518
				$R_{\text{КЛ} \rightarrow \gamma}$	0.004 0.003 0.005
				η	6.05 8.03 7.13
50	1	$\frac{3161}{2553}$	DIST WIDTH MISS	$R_{\gamma \rightarrow \gamma}$	0.170 0.218 0.257
				$R_{\text{КЛ} \rightarrow \gamma}$	0.001 0.002 0.004
				η	5.00 5.10 3.89
100	2	$\frac{2964}{2345}$	DIST WIDTH MISS	$R_{\gamma \rightarrow \gamma}$	0.269 0.336 0.431
				$R_{\text{КЛ} \rightarrow \gamma}$	0.001 0.003 0.013
				η	8.07 5.70 3.83

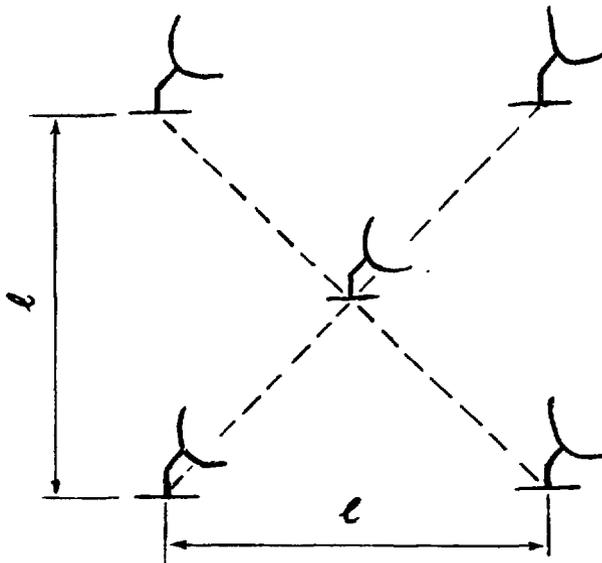
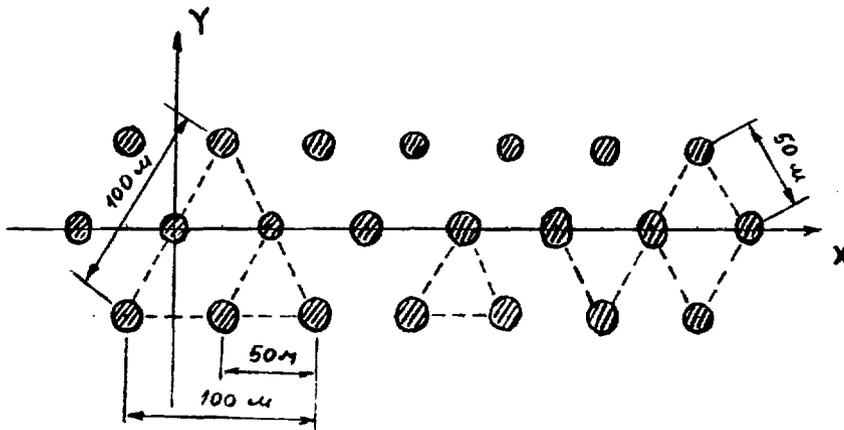


Рис. 1



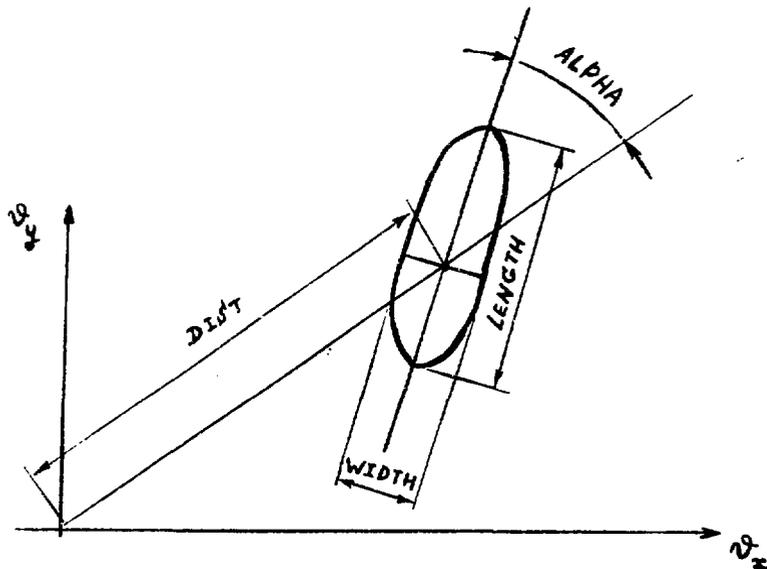


Рис. 3

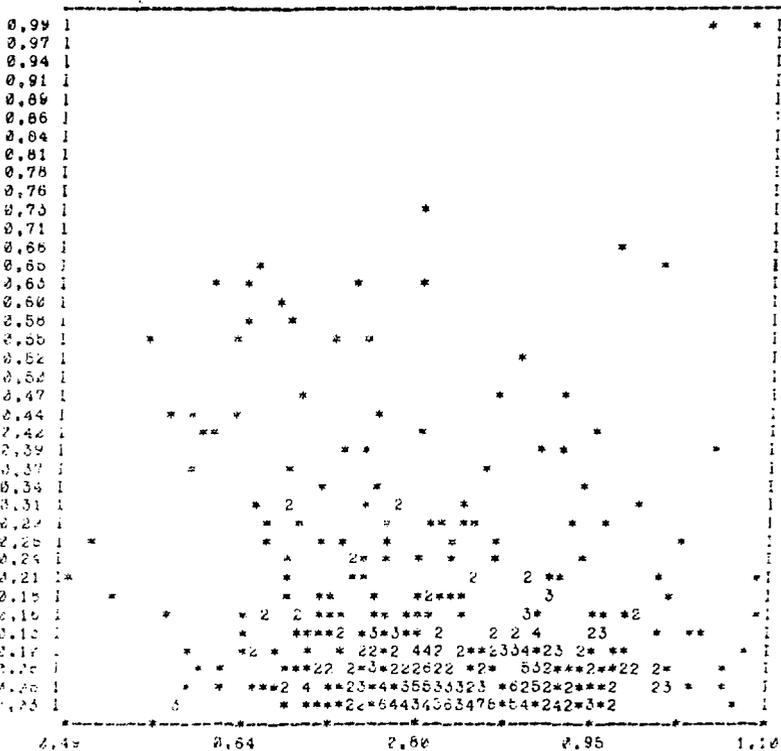


Рис. 4

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. Система черенковских гамма-телескопов экспериментальной установки [1].
- Рис. 2. Расположение системы гамма - телескопов, использованных на первом этапе расчетов.
- Рис. 3. Параметры двумерного черенковского образа.
- Рис. 4. Диаграмма рассеяния параметров черенковского образа *MISS* и *DIST* в выборке гамма-ливней.
- Рис. 5. Диаграмма рассеяния параметров черенковского образа *MISS* и *DIST* в выборке ливней КЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aharonian F.A., Akhperjanian A.G., Allkofer O.C., Samorski M., Stamm W., Proposal for imaging air Cherenkov telescopes in the HEGRA particle array. Kiel, 1989, 11 p.
2. Plyasheshnikov A.V., Bignami G.F. The investigation on the improvement of discrimination efficiency against cosmic ray background by imaging the air showers Cherenkov light flashes, Nuovo Cimento, 1985, vol.8c, p.39.
3. Hillas A.M. Proc. 19th ICRC, 1985, vol.3, p.445.
4. Зыскин Ю.Л. ВАНТ, 1987, 2 (33), стр.36.
5. Aharonian F.A., Chilingarian A.A., Konopelko A.K., Plyasheshnikov A.V. On the possibility of an improvement of background hadronic showers discrimination against γ -ray coming from a discrete source by a multidimensional Cherenkov light analysis. 21st ICRC, Adelaide, 1990, vol.4, p.246-249.
6. Plyasheshnikov A. V., Konopelko A.K. The dependence of the cosmic ray background discrimination effectiveness on the VHE γ -ray telescope parameters, 21st ICRC, Adelaide, 1990, vol.4, p.250-253.
7. Cawley M. F., Fegan D.J. et al, 19th ICRC, 1985, USA, vol.3, p.449.
8. Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л. и др. Определение угловых характеристик черенковских вспышек широких атмосферных ливней с энергией 10^{13} эв, Изв. КРАО, 1985, т.70, стр.152.
9. Gibbs K.G. Ph. Thesis. Univ. of Arizona, 1986.
10. Aharonian F.A. et al., Proc. of Int. Workshop on very high energy gamma-ray astronomy, Crimea, 1990.
11. Chilingarian A.A. Comp. Physics Comm., 1989, vol.54, p.381.

12.Aharonian F.A., Chilingarian A.A., Konopelko A.K.,
Plyasheshnikov A.V. On the possibility for a higher
efficiency of discrimination of γ -rays from point sources
against cosmic ray background by the pattern recognition
method. Preprint YERPHI-1171(48)-89, Yerevan 1989.

Рукопись поступила 20 июня 1990 г.

Ф. А. АГАРОНЯН, А. К. КОНОПЕЛЬКО, А. В. ПЛЯШЕШНИКОВ, А. А. ЧИЛИНГАРЯН
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ФОНА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ
РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-КВАНТОВ СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ С
ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ЧЕРЕНКОВСКИХ ГАММА-ТЕЛЕСКОПОВ С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ
СВЕТОПРИЕМНИКАМИ

Редактор Л. П. Мукаян

Технический редактор А. С. Абрамян

Подписано в печать 30/8-90

Офсетная печать. Уч. изд. л. 1,5

Зак. тип. 192

Формат 60×84×16

Тираж 299 экз. Ц. 22к.

Индекс 3649

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул. Братьев Алиханян 2.

**The address for requests:
Information Department
Yerevan Physics Institute
Alikhanian Brothers 2,
Yerevan, 375036
Armenia, USSR**

ИНДЕКС 3649



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ