УДК 524.1-352

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАРЕГИСТРИРОВАННОГО ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

И. Ангелов[1], Б. Вачев[1], В. Н. Ващенко[2], А. Н. Литвиненко[3], Е. Маламова[1], В. Н. Павлович[3], В. Д. Русов[4], И. Стаменов[1]

[1]Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София, Болгария
[2]Национальный антарктический научный центр МОНУ, Киев
[3]Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев
[4]Одесский национальный политехнический университет, Одесса

Представлены результаты статистического анализа данных эксперимента по детектированию черенковского излучения от широких атмосферных ливней. Выявлены аномалии Фурье- и вейвлет-спектра исследуемого процесса.

Космические лучи и статистические свойства данных их регистрации

Проблема космических лучей высоких и сверхвысоких энергий привлекала и привлекает значительное внимание. Так, например, академик Гинзбург внес проблему детектирования космических лучей сверхвысоких энергий в перечень самый актуальных проблем физики на начало 21-го века [1].

Интерес к космическим лучам сверхвысоких энергий вызван, прежде всего, тем, что само их существование в настоящее время не удается объяснить с точки зрения современных физических представлений. Так, Грейзен, Зацепин и Кузьмин в 60-х годах прошлого столетия показали, что вследствие взаимодействия с фотонами реликтового излучения расстояние, которое может преодолеть протон (считается, что львиную долю космических лучей составляют протоны) с энергией $E > 3\cdot10^{19}$ эВ ($= E_{GZK}$), ограничено приблизительно 100 Мпк [2]. Поэтому в высокоэнергетической части спектра космических лучей должен был бы наблюдаться завал (называемый завалом Грейзена - Зацепина - Кузьмина).

Однако в 2000 - 2001 гг. были опубликованы результаты японского эксперимента AGASA [3], в соответствии с которыми зарегистрировано восемь событий с энергиями выше E_{GZK}, продолжающих спектр космических лучей без упомянутого завала. Если бы эти данные нашли подтверждение, это означало бы, что 1) следует пересмотреть модель взаимодействия космических лучей с веществом либо 2) следует искать источник космических лучей приблизительно в пределах 100 Мпк. В любом случае это связано с необходимостью пересмотра некоторых фундаментальных представлений.

Несколько позднее, в конце 2001 г. и в 2002 г., появились данные независимых экспериментов [4], в которых спектр космических лучей имел прогнозируемый завал. Ситуация стала неоднозначной, поскольку разные группы исследователей отстаивают надежность полученных данных. Для решения проблемы ожидаются данные эксперимента [5], полный монтаж которого был завершен в 2007 г. с на порядок большей статистикой событий на этих энергиях.

Помимо энергетического спектра космических лучей внимание уделяется и статистическим свойствам их потока. На первый взгляд, в силу независимости событий, поток регистрируемых событий должен описываться распределением Пуассона (можно сказать, что это так для внеземных наблюдений). С этой статистической точки зрения космические лучи были впервые рассмотрены в работе [6]. Их модель была эквивалентна процессу с нулевой памятью и для счетчика давала пуассоновское распределение числа зарегистрированных частиц.

Более детальное рассмотрение, однако, показывает, что прохождение космических лучей через атмосферу и аппаратуру регистрации вносит в распределение определенные коррективы. Входя в атмосферу Земли, первичная частица (обычно – протон) вступает во взаимодействие с ядрами атомов атмосферы, порождая вторичные частицы – мезоны, пионы и т.д. Затем возникает электромагнитный каскад: электроны посредством тормозного излучения порождают фотоны, которые, в свою очередь, порождают электронно-позитронные пары, и т. д. Этот процесс по своей природе является стохастическим и к нему применяются разные вероятностные модели.

В частности, следует упомянуть работу [7]. Авторы показали, что для описания флуктуаций космических лучей на поверхности Земли можно применить процесс Юла - Ферри, управляемый пуассоновским процессом. Подобная статистика приводит к появлению скоплений событий - их кластеризации. В работе показано, что данная модель отвечает экспериментальному распреде-

лению и кластеризация проявляется при экспозиции порядка десятков секунд. Причины такой статистики, по утверждению авторов, обусловлены, во-первых, механизмом развития каскада частиц в атмосфере (ветвящийся процесс) и, во-вторых, свойствами регистрирующего оборудования (в статье рассмотрены фотоумножители).

В целом значение статистического метода состоит в том, что он, во-первых, дает способ отсеять информацию, не имеющую отношения к исследуемому явлению (космическим лучам), и, во-вторых, дает указание на механизм взаимодействия космических частиц с веществом (атмосферой).

В данной работе статистические характеристики данных регистрации космических лучей исследованы методом традиционного Фурье-анализа, а также методом вейвлет-анализа.

Эксперимент, данные которого исследовались

В настоящей работе представлены результаты статистической обработки некоторых данных эксперимента по детектированию черенковского излучения от широкого атмосферного ливня (ШАЛ), проводившегося в 2002 - 2006 гг. на Главной экологической обсерватории на пике Муссала, Болгария (2925 м над уровнем моря) [8]. Детектор черенковского излучения размещен на горном выступе на высоте 212 м от Ледового озера (2700 м над уровнем моря).

Главной задачей эксперимента была регистрация излучения, отраженного от поверхности Ледового озера в соответствии с методом, идея которого была предложена в 1972 г. А. Е. Чудаковым [9]. Основное преимущество этого метода состоит в возможности охвата площади в несколько сотен квадратных километров с помощью детекторов относительно малого размера, поэтому он пригоден для регистрации космических частиц сверхвысоких энергий, поток которых на уровне поверхности Земли, как известно, весьма мал (для частиц с энергией $E > 10^{20}$ эВ – порядка 1 частицы на 1 км^2 за столетие). Целью таких экспериментов является экспериментальное изучение спектра первичных частиц космических лучей сверхвысоких энергий. Однако площадь Ледового озера мала (приблизительно 0,5 км^2), так что реально детектируется черенковское излучение от ливней, порождаемых частицами сравнительно малых энергий (~10^{15} эВ). Поскольку целью данного эксперимента являлось исследование статистических свойств космических лучей, то также проводилась прямая регистрация черенковского излучения с детекторами, направленными в зенит.

Детектор состоит из двух параболических рефлекторов диаметром 1 м каждый, двух фотоумножителей (по одному на каждый рефлектор) и электронной системы регистрации. Чтобы исключить из результатов фоновый шум от ночного неба, экспериментаторы установили энергетический порог, чтобы, таким образом, регистрировались лишь ШАЛ с энергиями выше 10^{14} эВ.

В силу того, что в данной работе нас интересует лишь статистический аспект регистрации космических лучей, а не построение энергетического спектра, рассмотрены, прежде всего, данные регистрации, полученные от рефлектора, направленного в зенит. Такой выбор обусловлен тем, что эта серия регистрации дает на порядок большую выборку.

Исследование спектральной плотности

Результаты эксперимента представляют собой временную последовательность событий с соответствующими значениями напряжения на выходе системы регистрации в милливольтах. Общее время эксперимента (1082 с) разбито на интервалы 1 с. На каждом интервале подсчитано число событий и, таким образом, исходный поток событий связан с реализацией случайного процесса *f(t)*.

Спектральный анализ проведен с использованием дискретного Фурье-преобразования

$$F_n = \Delta \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{2\pi ikn/N} ,$$

где Δ – длительность интервала разбиения; $f_k = f(t_k)$ – значения реализации случайного процесса в точках t_k; N – число интервалов разбиения; n – частота.

Сигнал *f(t)* во всем диапазоне амплитуд (тут и далее использованы данные лишь от одного из рефлекторов) представлен на рис. 1 (в двойном логарифмическом масштабе)

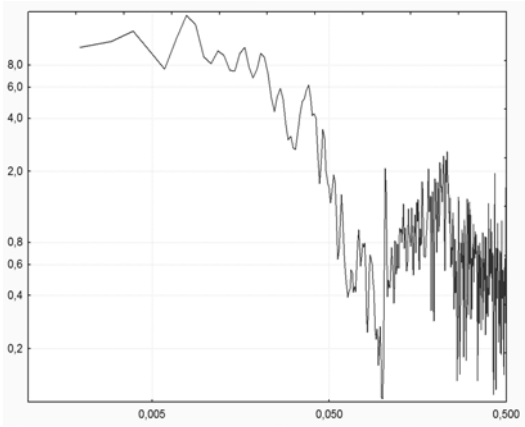

Рис. 1. Спектральная плотность, интервал 1 с, выборка 1094 события. По оси абсцисс – частота (Гц), по оси ординат – спектральная плотность (n^2/Гц).

Для сравнения на рис. 2 приведен график спектральной плотности реализации пуассоновского процесса (пуассоновский поток событий $f_p(k,t) = \frac{(\lambda t)^k e^{\lambda t}}{k!}$, с параметром $\lambda t = 5$, по длительности равный потоку, полученному в эксперименте).

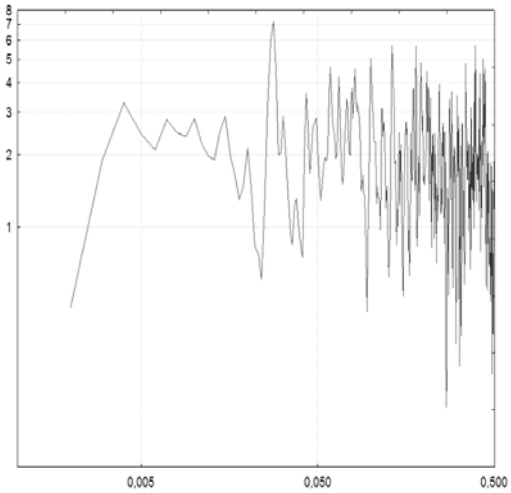

Рис. 2. Спектральная плотность, пуассоновский процесс, интервал 1 с, выборка 1000 событий. По оси абсцисс – частота (Гц), по оси ординат – спектральная плотность (n^2/Гц).

Сравнение построенных графиков спектральной плотности показывает, что в области низких частот (приблизительно до 0,08 Гц) присутствует аномальная низкочастотная составляющая, предположительно растущая по мере понижения частоты, и процесс отличается как от пуассоновского, так и от процесса Юла - Ферри. Но поскольку спектральный анализ дает лишь общую информацию о частотном составе сигнала без учета того, в какой момент эта частота дает свой вклад, определить, чем обусловлена аномалия спектральной плотности в области низких частот – систематическим шумом или одиночными всплесками интенсивности счета, этим методом не удается.

Вейвлет-анализ

Как указано выше, вклад отдельных частот Фурье-спектра является нелокализованным, что обусловлено нелокализованностью самих базисных функций Фурье во временной области. Поэтому вклад отдельных частот оказывается «размазанным» по всему исследуемому интервалу.

Природу аномально большого вклада низких частот в спектральную плотность удобно выяснить с помощью вейвлет-преобразования.

В отличие от преобразования Фурье вейвлет-преобразование является двухпараметрическим с параметром масштаба, который можно сопоставить с частотой Фурье-преобразования (условно говоря, масштаб – величина, обратная к частоте) и параметром сдвига, который в Фурье-преобразовании отсутствует [10]. Именно параметр сдвига дает возможность локализовать вклад определенной частоты на временной оси. По словам И. Майера, «вейвлет-базисы имеют универсальную пригодность: все, что ни попадется под руку, будь то обычная или обобщенная функция, может быть представлено в виде вейвлет-ряда и, в отличие от ситуации с Фурье-рядами, коэффициенты вейвлет-рядов передают особенности функции или распределения точно и надежно» [11]. В целом можно сказать, что Фурье-спектр хорошо подходит для анализа стационарных сигналов. Для нестационарных же сигналов, когда важно определить момент времени внезапного изменения частотной характеристики, лучше использовать какое-нибудь разложение с локализованными базисными функциями. Таким разложением и является вейвлет-спектр [12].

Общий вид вейвлет-преобразования сигнала *x(t)* следующий:

$$C_{ab} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi_{ab}(t)dt,$$

где $\psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2}\psi\left[(t-b)/a\right]$, $\psi(t)$ – функция-прототип или материнский вейвлет; a – параметр масштаба; b – параметр сдвига.

Выбор вейвлетного базиса зависит от конкретных условий и является нетривиальным. Поскольку целью нашего рассмотрения является не получение большой точности, а выявление общих черт статистики, был выбран достаточно простой вейвлет-спектр, полученный с помощью вейвлета «сомбреро» (MHAT-wavelet), являющегося второй производной от гауссианы:

$$\psi(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^3}}\right)\left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right)e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}.$$

График базового вейвлета «сомбреро» приведен на рис. 3

Вейвлет-спектр функции представляется поверхностью в трехмерном пространстве. Обычно он отображается в виде проекции на плоскость *ab*. По горизонтальной оси отмечаются значения параметра сдвига *b*, по вертикальной – значения параметра масштаба *a*. Величина коэффициентов разложения C_{ab} изображается интенсивностью затемнения (рис. 4).

Сразу видим два всплеска интенсивности в спектре – возле отметок 600 и 850 с. Для сравнения ниже приведен вейвлет-спектр пуассоновского процесса (рис. 5).

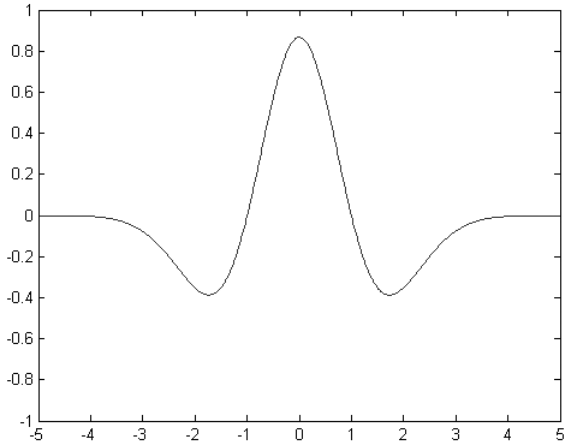

Рис. 3. Вейвлет «сомбреро».

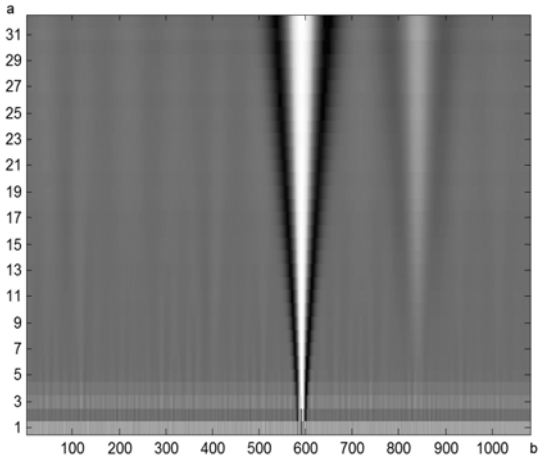

Рис. 4. Вейвлет-спектр экспериментальных данных; a – масштаб, b – сдвиг.

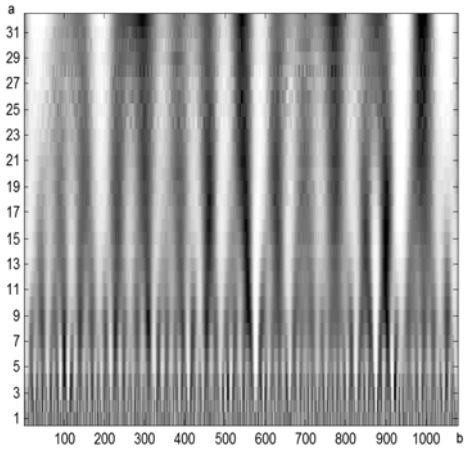

Рис. 5. Вейвлет-спектр пуассоновского процесса; a – масштаб, b – сдвиг.

Оказывается, что вейвлет-спектр данных эксперимента становится «почти пуассоновским», если на него наложить небольшую «заплатку» - отрезок пуассоновского процесса, в промежутке от 585 до 600 с (рис. 6).

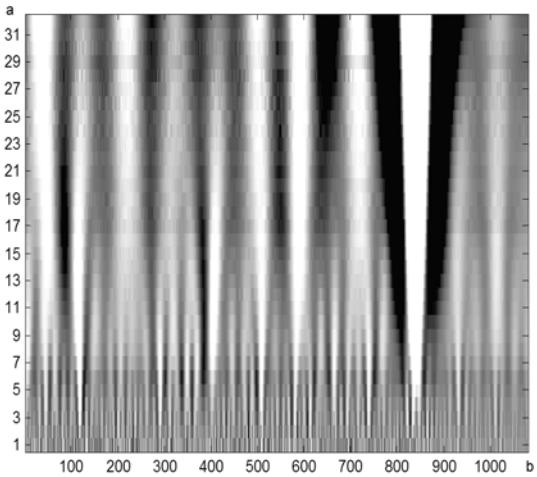

Рис. 6. Вейвлет-спектр экспериментальных данных с наложенной «заплаткой»; a – масштаб, b – сдвиг.

Наложение незначительных заплаток превращает спектр исследуемого процесса в «почти пуассоновский», поэтому причина аномального характера спектральной плотности локализована и состоит не в систематической помехе, а в одноразовом всплеске интенсивности счета.

Как и ожидается, в целом после наложения заплаток спектральная плотность приобретает форму, приближающуюся к форме спектральной плотности пуассоновского процесса (рис. 7):

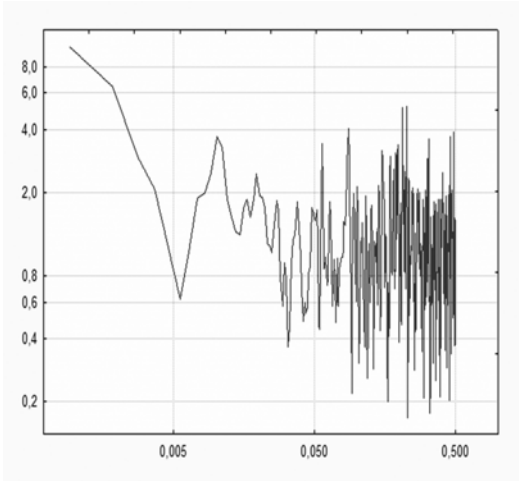

Рис. 7. Спектральная плотность скорректированного процесса, интервал 1 с, выборка 1094 событий. По оси абсцисс – частота (Гц), по оси ординат – спектральная плотность (n^2/Гц).

Кроме того, если не учитывать аномальные всплески, дисперсия числа отсчетов за промежуток времени практически равняется математическому ожиданию (соответственно 0,67 и 0,64 в случае 1-секундного промежутка), что также может свидетельствовать о том, что процесс пуассоновский.

Наконец, соответствие полученного экспериментального распределения распределению Пу-

ассона (без учета аномалий) проверено с использованием критерия согласия Пирсона. При нулевой гипотезе о том, что распределение является пуассоновским со средним 0,636, шесть степеней свободы, уровень значимости $\alpha = 0{,}1$ (см. таблицу).

Экспериментальные частоты, n_i	Теоретические частоты, n_i'	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$(n_i - n_i')^2 / n_i'$
564	549	15	225	0,41
320	349	-29	841	2,41
124	111	13	169	1,52
25	23	2	4	0,17
3	4	-1	1	0,25
1	1	0	0	0

Критическое значение для $\alpha = 0{,}1$: $\chi_{кр}^{\ 2} = 10{,}6$. Эмпирическое значение $\chi_{эмп}^{\ 2} = 4{,}77 < \chi_{кр}^{\ 2}$. Следовательно, нет оснований отбрасывать нулевую гипотезу.

Выявленные аномалии не имеют систематического характера и, скорее всего, подлежат исключению из общей статистики при построении энергетического спектра.

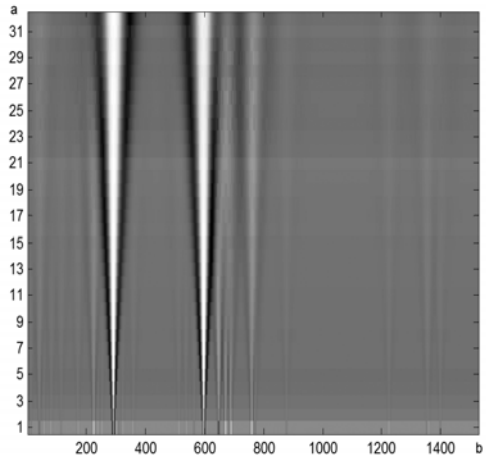

Рис. 8. Вейвлет-спектр данных регистрации излучения, отраженного от поверхности озера; a – масштаб, b – сдвиг.

Кроме обработки результатов регистрации черенковского излучения при регистрации рефлекторами, направленными в зенит, также были обработаны результаты регистрации излучения, отраженного от поверхности замерзшего озера (данные от 4 мая 2003 г.). Первоначальное изучение процесса также показывает значительное отклонение от пуассоновского по значениям среднего и дисперсии (0,08 и 0,46 соответственно на промежутке 10 с). Вейвлет-анализ показывает отличие спектра от пуассоновского со сходными аномалиями (рис. 8).

При этом присутствует еще большая кластеризация событий в некоторых точках, нежели в первом случае. Дальнейшее изучение этих данных усложняется малостью выборки – всего 100 событий.

Выводы

Произведена статистическая обработка результатов эксперимента по детектированию черенковского излучения от ШАЛ. Выявлен аномальный характер спектральной плотности процесса, состоящего из зарегистрированных событий. Дальнейшее изучение с помощью вейвлет-анализа дало возможность локализовать аномалии в спектре. Показано, что поток событий регистрации в целом является пуассоновским: после исключения двух аномалий вейвлет-спектр становится «почти пуассоновским». К исправленному спектру применен критерий согласия, также свидетельствующей о пуассоновости процесса.

Физическая причина выявленных аномалий, вообще говоря, недостаточно ясна. Аномалии могут быть обусловлены как флуктуациями плотности атмосферы, так и техногенной подсветкой ночного неба в процессе проведения экспериментов. Для выяснения причин аномалий, вероятно, требуются более систематические наблюдения и их анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гинзбург В.Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особо важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? // УФН. - 1999. - Т. 169, вып. 4.
2. *Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А.* О верхней границе спектра космических лучей // Письма в ЖЭТФ. 1966, - Т.4. - С. 114.
3. *AGASA* (Akeno Giant Air Shower Array). http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/
4. *High Resolution Fly's Eye.* http://hires.physics.utah.edu/

5. *Pierre Auger Observatory*. http://www.auger.org/
6. *Bhabha H.J., Heitle, W.* The Passage of Fast Electrons and the Theory of Cosmic Showers // Proc. Royal Soc. A. - 1937. - Vol. 159 - P. 432 - 458.
7. *Teich M.C., Campos R.A., Saleh B.E.A.* Statistical properties of cosmic ray showers at ground level determined from photomultiplier-tube background registration // Phys. Rev. D. - 1987. - Vol. 36, No. 9. - P. 2649 - 2665.
8. *Malamova E., Angelov I., Davidkov K. et al.* First results obtained with wide-angle Cerenkov light telescope - BEO - p. Mussala // Universal Academy Press, Inc., 28th International Cosmic Ray Conference. - 2003. - P. 225 - 228.
9. *Чудаков А.Е.* Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности земли // Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий: Материалы Всесоюз. симп. - 1972. - С. 69.
10. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и применения // УФН. - 1996. - Т. 166, вып. 11.
11. *Meyer Y.* Wavelets and operators // Cambidge: Cambridge Univ. Press, 1992.
12. *Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А.* Вейвлеты и их использование // УФН. - 2001. - Т. 171, вып. 5.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАРЕЄСТРОВАНОГО ПОТОКУ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ

І. Ангелов, Б. Вачев, В. М. Ващенко, А. М. Литвиненко, Є. Маламова, В. М. Павлович, В. Д. Русов, І. Стаменов

Представлено результати статистичного аналізу даних експерименту з детектування черенковського випромінювання від широких атмосферних злив. Виявлено аномалії Фур'є- та вейвлет-спектра досліджуваного процесу.

STUDY OF THE STATISTICAL PROPERTIES OF THE DETECTED COSMIC RAYS

I. Angelov, B. Vachev, V. M. Vashchenko, A. M. Lytvynenko, E. Malamova, V. M. Pavlovych, V. D. Rusov, J. Stamenov

The results of statistic analysis of Cherenkov radiation detection data are presented. Some abnormalities in Fourier and wavelet spectra of the analyzed process have been found.

Поступила в редакцию 10.12.07,
после доработки – 01.04.08.