

УДК 519.23-73

**И. В. Архангельская**

Институт астрофизики Московского инженерно-физического института (Державного університету), Москва, Росія

**Применимость фрактального анализа  
для обработки временных профилей  
нестационарных событий,  
аппаратурой АВС-Ф в эксперименте  
на космическом аппарате КОРОНАС-Ф**

---

Розглядаються характеристики часових профілів, зареєстрованих сплесковою чарункою апаратури АВС-Ф, встановленою на космічному апараті КОРОНАС-Ф. Зареєстровані два типи коротких подій порядку кількох мілісекунд. Події першого типу дуже подібні до  $\gamma$ -подій, джерелом яких є атмосфера Землі (ТGF). Вважається, що ТGF виникають при електричних розрядах між верхнім шаром хмар та іоносферою. Події другого типу пов'язані з післясвітінням детектора. Зроблено спробу розділити такі події з використанням фрактального аналізу. Розглядаються умови, при яких часові ряди можна вважати статистично самоафінними, а також приводяться умови застосування чарункового механізму визначення фрактально розмірності часових профілів, реєстрованих апаратурою АВС-Ф у сплесковій моді, і приводяться результати визначення показника фрактальності цих часових рядів. Всього проаналізовано 100 сплескових часових профілів і виділено три ТGF-подібні події, одна з яких спостерігалась у безпосередній близькості від центру тропічного циклону Бені, що підтверджує правильність його інтерпретації як ТGF.

---

Аппаратура АВС-Ф (Амплитудно-Временная спектрометрия Солнца) [1, 2] предназначена для изучения характеристик потоков жесткого рентгеновского и  $\gamma$ -излучения от Солнца, солнечных вспышек и  $\gamma$ -всплесков, а так же изучения потоков нейтронов в по результатам анализа двумерных распределений зависимости полного энерговыделения в детекторе СОНГ-Д от отношения медленного компонента высвечивания к полному компоненту световыхода. Эксперимент проводится в рамках международной программы КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околосолнечные Наблюдения Активного Солнца) на спутнике КОРОНАС-Ф, запуск которого был произведен 31.07.2001 г. Прибор АВС-Ф имеет два режима работы: фоновый, в котором проводится анализ потоков излучения и поиск событий типа «вспышка» и при выделении

такого события — всплесковый режим. Аппаратура АВС-Ф переключается во всплесковый режим работы при превышении скорости счета в мягком  $\gamma$ -диапазоне на 6 стандартных отклонений за время 16 мс относительно среднего значения скорости счета за предыдущие 128 бинов по 16 мс [1, 2]. После срабатывания всплесковой ячейки вне зависимости от длительности регистрируемого события временной профиль с дискретностью 1 мс регистрируется в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ (мягкий  $\gamma$ -диапазон) в течение 4.096 с. Во всплесковом режиме аппаратуры АВС-Ф временные профили регистрируются со сцинтилляционного (на основе CsI(Tl)) детектора СОНГ-Д (Солнечные Нейтроны и Гамма-кванты) комплекса СКЛ, разработанного НИИЯФ МГУ, который представляет собой цилиндр  $\varnothing$  200 мм и высотой 100 мм, окружен-

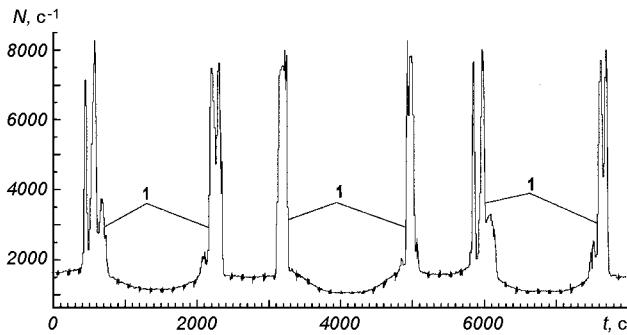


Рис. 1. Типичная зависимость скорости счета от времени для аппаратуры АВС-Ф в мягком  $\gamma$ -диапазоне; 1 — области радиационного пояса

ный для защиты от заряженных частиц антисовпадательным пластиковым детектором.

Среднее значение скорости счета аппаратуры АВС-Ф в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ изменяется в несколько раз в зависимости от геомагнитных координат космического аппарата КОРОНАС-Ф по сравнению со средним значением скорости счета в области геомагнитного экватора [6]. Типичный временной профиль в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ по данным аппаратуры АВС-Ф приведен на рис. 1. Тем не менее, в отсутствие всплесковых событий той или иной природы, среднее значение скорости счета аппаратуры АВС-Ф можно считать постоянным на интервале времени длительностью 4.096 с в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ вне областей радиационного пояса и Южно-Атлантической магнитной аномалии (SAA), так как период обращения космического аппарата вокруг Земли — около 90 мин. Естественно, что на всех интервалах по 4.096 с эта величина будет иметь различное значение в зависимости от геомагнитных координат космического аппарата, на котором установлена регистрирующая аппаратура. Таким образом, для определения природы зарегистрированных событий необходимо использовать метод, который позволил бы исследовать изрезанность временного профиля с постоянным средним значением скорости счета вне зависимости от величины этого среднего значения. Следовательно, используемый метод должен обладать свойством масштабной инвариантности по отношению к среднему значению  $m$  анализируемой величины, а это является одной из основных особенностей фрактального анализа.

Возможность рассматривать временные ряды, полученные при анализе данных различных физических экспериментов, как множества с определенным показателем фрактальности, определяется их

статистическими свойствами: такие временные ряды должны быть самоподобными или, в крайнем случае, статистически самоаффинными [7], в последнем случае должен быть способ представления рассматриваемого множества  $K$  как объединения нескольких непересекающихся подмножеств, каждое из которых получено из некоего исходного множества  $M$ , имеющим аналогичные  $K$  статистические свойства, аффинным преобразованием, которое определяется неким вектором  $g$ . Напомним, что аффинное преобразование переводит точку  $x(x_1, \dots, x_n)$  в точку  $x'(r_1x_1, \dots, r_nx_n)$ , причем коэффициенты подобия  $r_i$  могут отличаться друг от друга. Подобные представления часто являются основой конструкции генераторов последовательностей случайных чисел, имеющих гауссово и пуассоновое распределение; такие последовательности являются статистически самоаффинными фракталами с  $D = 1.5$ .

Фоновые загрузки в детекторе прибора АВС складываются как из внутреннего фона, обусловленного активацией кристалла под действием протонов космических лучей, вторичных нейтронов и радиационных поясов, так и внешнего фона, обусловленного диффузным гамма-излучением, локальным гамма-фоном спутника и гамма-альбедо Земли [13]. Их флуктуации с достаточной степенью точности можно считать пуассоновскими при выполнении условия [4]:

$$m \cdot \tau \ll t_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где  $m$  — среднее значение скорости счета,  $\tau$  — мертвое время прибора, информация с которого анализируется,  $t_{\text{изм}}$  — время измерения. Мертвое время аппаратуры АВС-Ф составляет приблизительно 100 мкс [3], т. е. условие (1) выполняется в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ на всех участках орбиты, кроме областей радиационного пояса и SAA. Поток частиц высокой энергии, приводящих к наблюдаемому послесвечению детектора в мягком гамма-диапазоне, на различных участках орбиты космического аппарата КОРОНАС-Ф (исключая область радиационного пояса и Южно-Атлантическую магнитную аномалию) также можно считать пуассоновским с переменным средним значением, зависящем от геомагнитных координат космического аппарата. Таким образом, в отсутствие всплесковых событий той или иной природы, флуктуации фона аппаратуры АВС-Ф в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ являются пуассоновскими. Однако последовательности случайных чисел, имеющих гауссово и пуассоновое распределение со средним значением, сильно изменяющимся в анализируемом диапазоне, статистически самоаф-

финными фракталами отнюдь не являются [7]. Тем не менее, так как в данной работе рассматриваются временные интервалы по 4.096 с, и в пределах каждого такого участка среднее значение скорости счета можно считать постоянным, то фоновый временной профиль на каждом анализируемом отдельном участке в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ является статистически самоаффинным при выполнении условия (1).

С другой стороны, применимость фрактального анализа для обработки временных рядов в физических экспериментах определяется критериями применимости методов определения фрактальной размерности временных профилей. Методы определения показателя фрактальности временного профиля события обычно основаны на разбиении временного профиля на бины и анализа флуктуаций скорости счета в каждом бине. Если количество точек в бине не достаточно для анализа, то используется ячеистый механизм определения показателя фрактальности [8]. При использовании ячеистого механизма для кривой вычисляется размерность Минковского, которая для компактного множества  $X$  равна взятому с обратным знаком пределу отношения логарифма минимального количества шаров  $N(\varepsilon)$  радиуса  $\varepsilon$  к логарифму  $\varepsilon$ , если он существует, т. е.

$$\dim_M(X) = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg \varepsilon}. \quad (2)$$

Изначально при ее вычислении использовались шары в евклидовом пространстве с радиусом  $r < \varepsilon \rightarrow 0$ , однако есть теорема об эквивалентности размерностей Минковского компактного множества  $X$ , если они получены в эквивалентных метриках [7]. Как известно, куб можно представить как шар в  $\infty$ -метрике ( $p$ -метрика является обобщением евклидовой метрики, и для  $R^n$  определяется следующим образом:

$$\|x - y\|_p = \begin{cases} \sqrt[p]{|x_1 - y_1|^p + \dots + |x_n - y_n|^p}, & 1 \neq p < \infty, \\ \max\{|x_1 - y_1|, \dots, |x_n - y_n|\}, & p = \infty. \end{cases}$$

Итак, размерность Минковского можно вычислять, покрывая исходное множество кубами; в этом случае говорят о клеточной размерности фрактальной кривой. В общем случае следовало бы вычислять для каждого анализируемого временного профиля не размерность Минковского, а размерность Хаусдорфа — Безиковича, которая для множества  $\xi$  определяется [8] как число  $D \geq 0$ , такое что при покрытии этого множества конечным или бесконечным множеством окрестностей радиуса  $r_i < \varepsilon$  для любого  $a > 0$

$$\inf_{\xi} \sum r_i^a \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0 \text{ для каждого } a < D, \\ \inf_{\xi} \sum r_i^a \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \infty \text{ для каждого } a > D. \quad (3)$$

Однако для самоаффинных фракталов, в качестве которых рассматриваются в данной работе анализируемые временные профили, фрактальная размерность Минковского (клеточная фрактальная размерность) и фрактальная размерность Хаусдорфа — Безиковича совпадают.

В ходе эксперимента были зарегистрированы короткие события двух типов, для выяснения природы которых использовался фрактальный анализ. Длительность событий первого типа несколько миллизекунд, и они очень похожи на  $\gamma$ -события (Terrestrial GAMMA Flashes — TGF), обнаруженные несколько лет назад при обработке данных с аппаратуры BATSE [14], которая была установлена на спутнике CGRO. Источником TGF являлась атмосфера Земли, причем они наблюдались несмотря на то, что события, идущие из-под горизонта Земли, должны были отсеиваться [9]. Предполагают, что TGF связаны с грозовыми явлениями в верхних слоях атмосферы Земли: они возникают при электрических разрядах между верхним слоем облаков и ионосферой. Во время этого процесса наблюдается как минимум четыре вида физических явлений, кроме собственно молнии (рис. 2): спрайты (Red Sprite — RS), джеты (Blue Jet — BJ), субмиллизекундные ионосферные вспышки (Elve) и TGF, причем оптическое излучение наблюдалось и камерами, установленными на космических аппаратах [12]. Джеты — пучки синего свечения (иногда с фиолетовым оттенком), возникающие в верхней части заряженной облачной структуры, направленные в нижнюю часть атмосферы и рассеивающиеся на высотах 40—50 км [15]. Спрайты — оптические вспышки красного цвета, наблюдающиеся на высотах 50—90 км непосредственно над грозовым облаком при грозовом разряде [12, 15]. Субмиллизекундные ионосферные вспышки вызваны флуоресценцией азота во время удара молнии, направленного в нижнюю часть ионосферы. TGF возникает при взаимодействии вещества атмосферы и так называемых уходящих (runaway) электронов, т. е. электронов, образовавшихся при ионизации молекул атмосферы Земли космическими лучами и затем ускоренных в процессе многократного рассеяния и при взаимодействии с электромагнитным полем грозовой формации (большая часть электронов, естественно, термализуется в процессе многократного рассеяния, однако плотность электронов с энергией  $E_e > 1$  МэВ на высоте около 10 км порядка

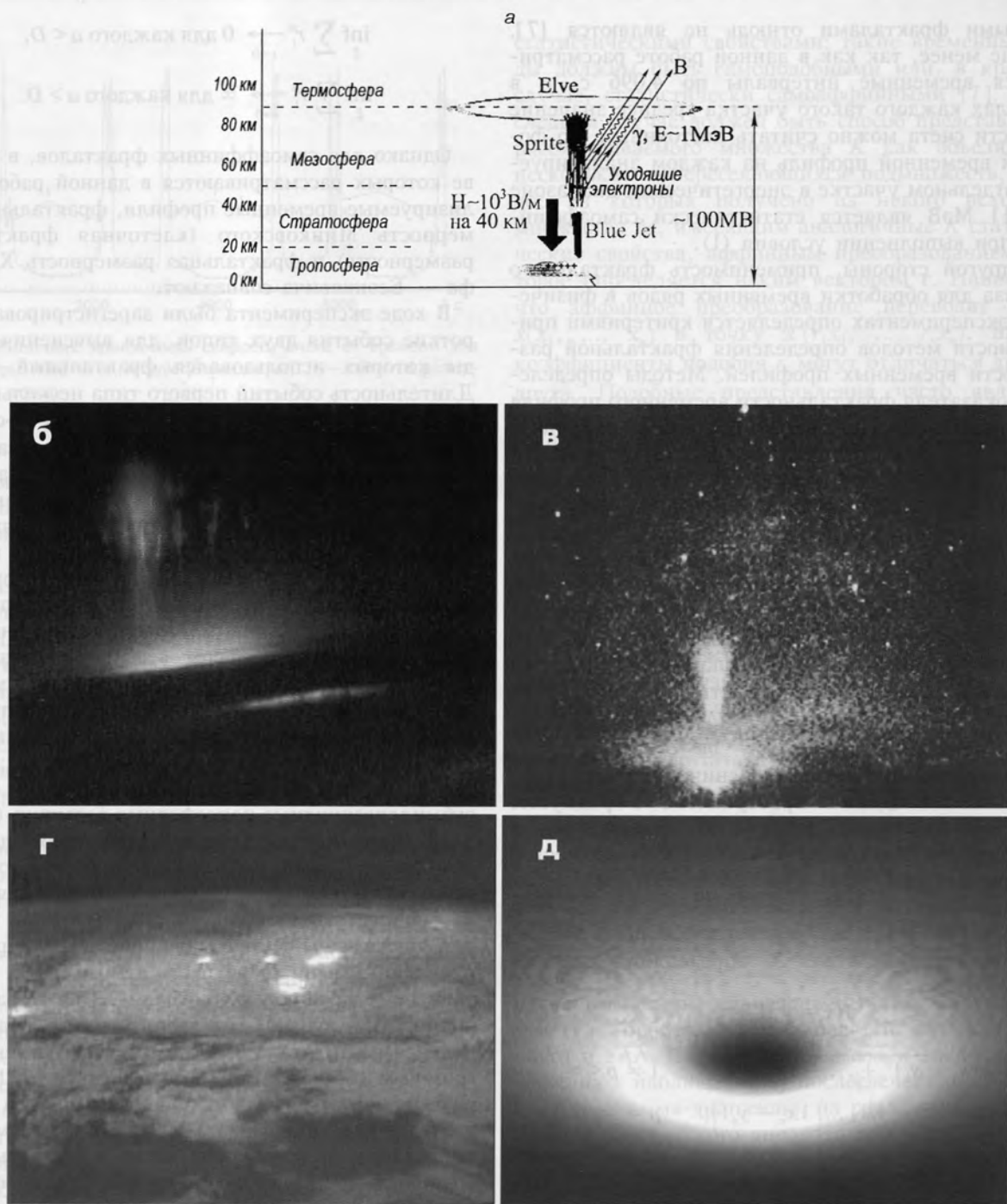


Рис. 2. Физические явления, сопутствующие грозовому разряду в верхних слоях атмосферы Земли [10, 12, 15]: а — схема образования  $\gamma$ -излучения во время грозового разряда; б — фотография RS, наблюдавшегося во время грозы 4 июля 1994 г.; в — фотография VJ, наблюдавшегося во время грозы 1 июля 1998 г. над Флоридой; г — фотография вспышек света во время грозы над Аргентиной ночью 21 октября 1989 г., полученная камерой, установленной на челноке; д — фотография субмиллисекундной ионосферной вспышки во время грозы 1 июля 1998 г. над Флоридой

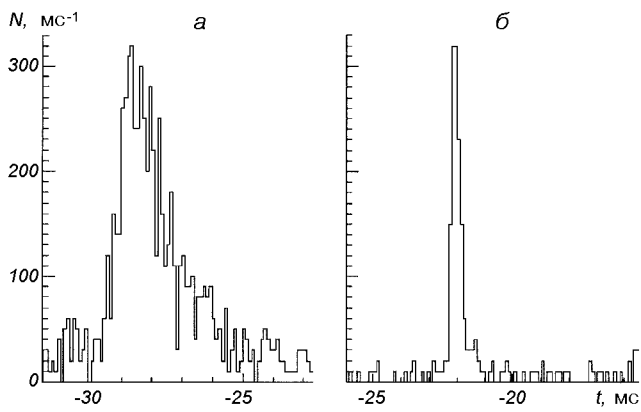


Рис. 3. Типичные временные профили TGF по данным BATSE: *a* — BATSE/CGRO (TGF # 2457,  $E > 21.39$  кэВ), *б* — BATSE/CGRO (TGF # 2465,  $E > 24.77$  кэВ)

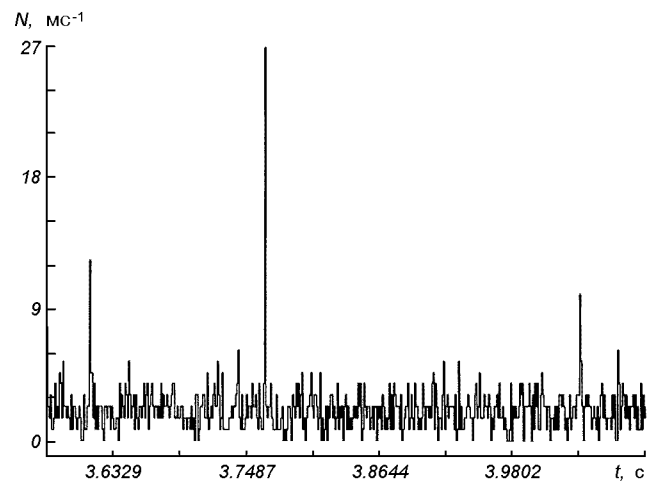


Рис. 4. Типичный временной профиль скорости счета с временной дискретностью 1 мс для аппаратуры АВС-Ф в мягком  $\gamma$ -диапазоне в области геомагнитного экватора

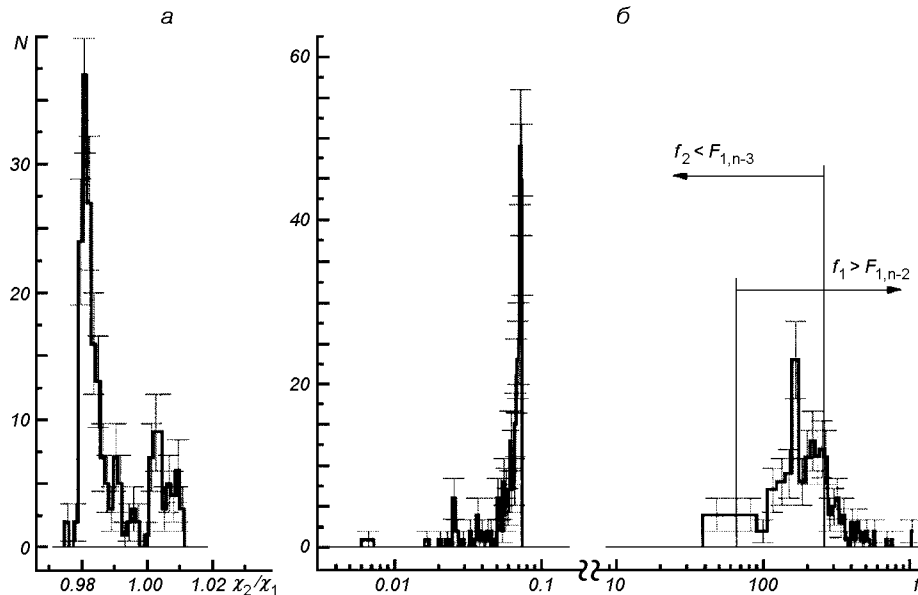


Рис. 5. Распределение анализируемых временных профилей: *a* — по отношению значения статистики  $\chi^2$  для аппроксимации параболой к значению статистики  $\chi^2$  для аппроксимации прямой; *б* — по  $f_1$  и  $f_2$

$10^{-5} \text{ см}^{-3}$  [10]). Следовательно, TGF представляет собой тормозное излучение, направленное вдоль пучка электронов, причем средняя энергия  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma \sim 1$  МэВ [10, 11]. Типичные временные профили TGF по данным аппаратуры BATSE в энергетическом диапазоне 0.02—10 МэВ приведены на рис. 3.

События второго типа регистрируются постоянно в ходе эксперимента (десятки раз в секунду) и связаны с послесвечением детектора при прохождении заряженных частиц высокой энергии через

детектор (антисовпадательная защита блокирует детектор только на время прохождения заряженной частицы, а послесвечение может быть длиннее). Длительность этих событий также составляет несколько миллисекунд (см. рис. 4) и отличить собственно TGF от такого события затруднительно без использования специальных методов.

Для определения клеточной размерности временной профиль покрывается сеткой из ячеек шириной  $\delta t_j$  и подсчитывается суммарный размах скорости счета  $N(\delta t_j)$  для набора  $\delta t_j$ . Если зависимость

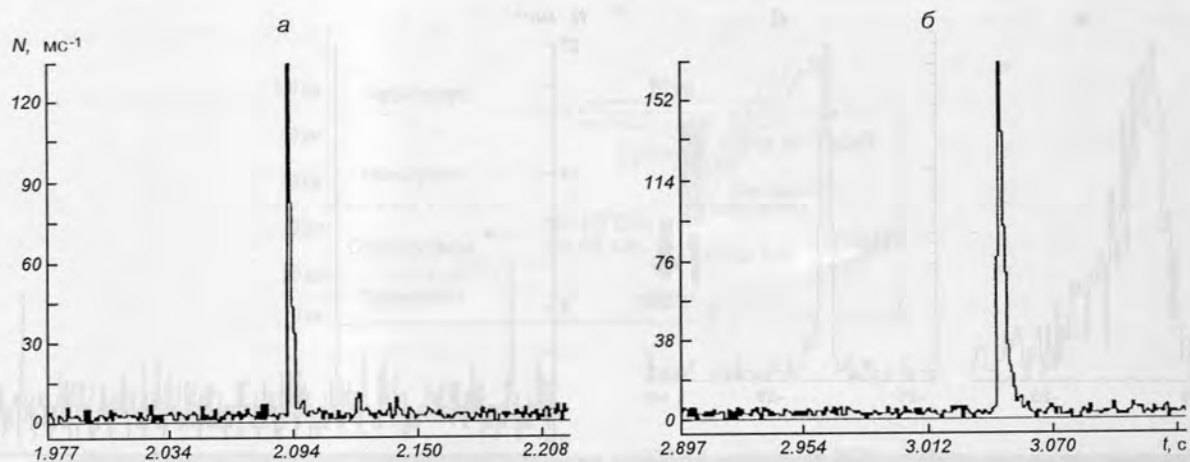


Рис. 6. Типичные временные профили TGF-подобных событий по данным ABC-Ф

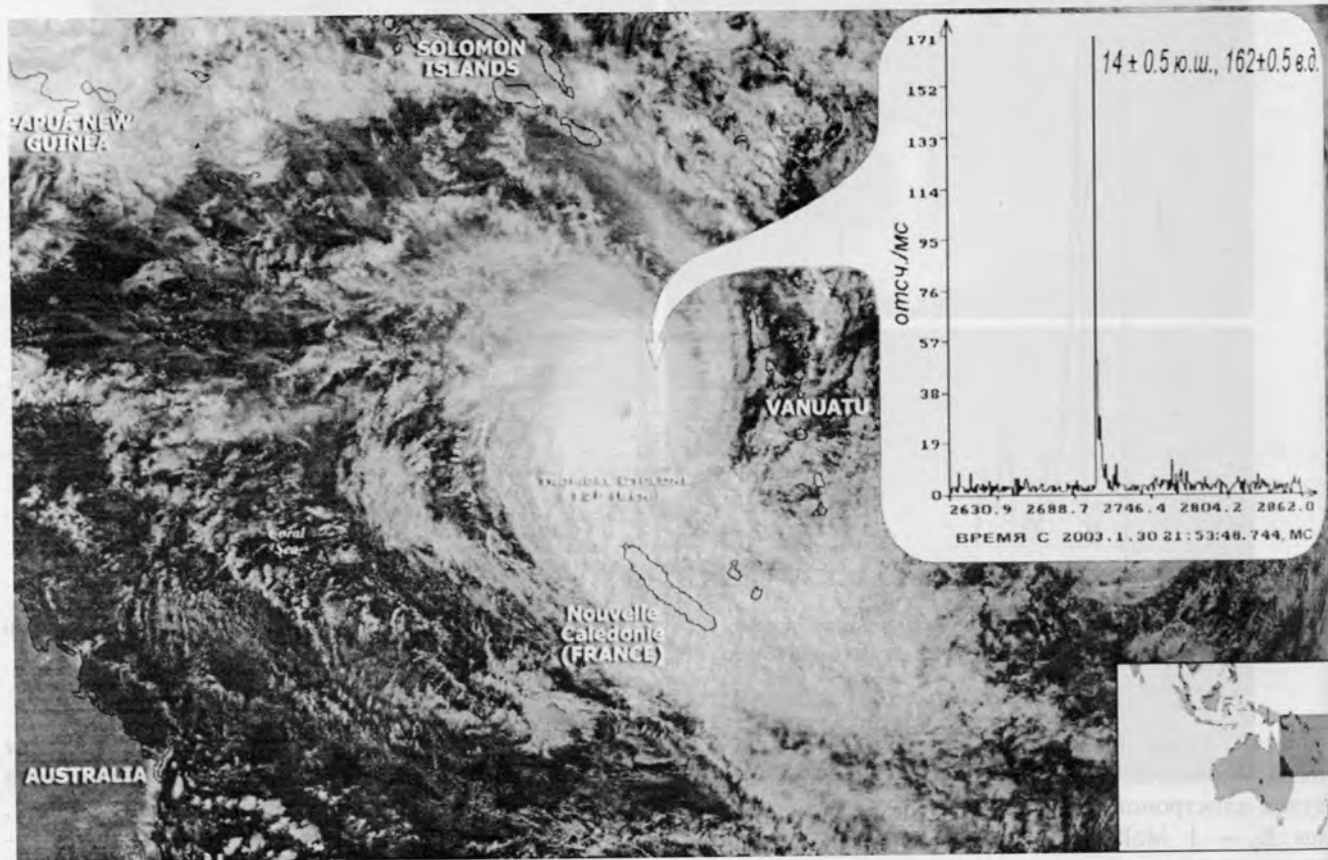


Рис. 7. Вид из космоса облачной формации тропического циклона Бени и временной профиль зарегистрированного в это время TGF-подобного события по данным ABC-Ф

$N(\delta t_j)$  выглядит как

$$N(\delta t_j) = a \times \delta t_j^{-D} \quad (4)$$

для  $a > 0$ , то показатель фрактальности анализируемой кривой равен  $D$  и определяется методом наименьших квадратов (именно погрешностями этого метода обусловлены погрешности показателя фрактальности) по графику функции  $\lg N(\lg \delta t_j)$  при условии, что наилучшей аппроксимацией этой зависимости является прямая. Значит, прежде чем использовать ячеистый механизм определения показателя фрактальности, надо сначала доказать, что прямая является наилучшей аппроксимацией зависимости

$$\lg N = -D \lg \delta t \quad (5)$$

для выбранного набора  $\delta t_j$ . В данном случае зависимость (5) такова, что критерий  $\chi^2$  не позволяет определить, что является наилучшей аппроксимацией этой зависимости: прямая или полином другой степени (рис. 5), поэтому приходится использовать критерий Фишера. Хорошо известно, что последовательность из  $n$  точек может быть аппроксимирована полиномом степени  $r = n - 1$ . Полином степени  $r$  является наилучшей аппроксимацией зависимости (5), если выполняются условия

$$f_r = \frac{\omega_r}{R_r / (n - 1 - r)} > F_{1, n-r-1} \quad (6)$$

и

$$f_{r+1} = \frac{\omega_{r+1}}{R_{r+1} / (n - 1 - (r + 1))} < F_{1, n-(r+1)-1}, \quad (7)$$

где  $F$  — функция Фишера,  $\omega_j$  — набор весов для ортонормированных полиномов  $Q_{ij}$ , для которых  $N(\delta) = \sum_{j=0}^r \omega_j Q_j$ . Таким образом, ячеистый механизм может быть использован для определения значения показателя фрактальности, если для зависимости (5) на каждом анализируемом интервале выполняются условия (6) и (7) при  $r = 1$ , т. е.

$$f_1 > F_{1, n-2} \quad (8)$$

и

$$f_2 < F_{1, n-3}, \quad (9)$$

где  $n$  — количество различных значений  $\delta$ , а  $F_{1, n-2}$  и  $F_{1, n-3}$  — соответствующие значения функции Фишера. Распределения 100 анализируемых временных профилей по  $f_1$  и  $f_2$  показаны на рис. 5, б. Видно, что ячеистый механизм применим для определения показателя фрактальности временных профилей с дискретностью 1 мс в энергетическом

диапазоне 0.1—11 МэВ, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф вне областей радиационного пояса и Южно-Атлантической магнитной аномалии.

Чтобы выделить один или несколько TGF на изучаемом временном интервале, содержащем события, вызванные послесвечением детектора после прохождения заряженных частиц, необходимо анализировать фрактальную размерность временного профиля на временном масштабе по крайней мере в 10 раз большем, чем характерная длительность TGF. В данной работе приводятся результаты анализа 100 временных профилей длительностью по 4.096 с каждый с временной дискретностью 1 мс в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф вне областей радиационного пояса и Южно-Атлантической магнитной аномалии. Для определения показателя фрактальности изучаемых временных профилей использовались пять значений  $\delta t_j$  начиная от 100 мс с шагом 50 мс. На анализируемом интервале выделялся отрезок длительностью 1 с и вычислялась на нем фрактальная размерность временного профиля. Следующий отрезок брался такой же длительности, но со смещением относительно начала отсчета на 10 мс. Среднее значение показателя фрактальности фона для 97 проанализированных временных интервалов  $D = 1.50 \pm 0.03$ . В трех случаях были получены значения  $D = 1.63 \pm 0.03$ ,  $D = 1.37 \pm 0.03$  и  $D = 1.62 \pm 0.03$ . Временные профили двух выделенных событий приведены на рис. 6: они похожи на TGF по длительности и форме. Одно из выделенных событий было зарегистрировано во время мощного тропического циклона Бени, что подтверждает правильность его интерпретации как TGF. Положение этого TGF находится недалеко от центра циклона (рис. 7). В настоящее время выясняются погодные условия в момент регистрации двух других событий и обрабатываются остальные данные.

Таким образом, условия статистической самоаффинности фонового потока  $\gamma$ -излучения в диапазоне энергий 0.1—11 МэВ выполняются на различных участках орбиты космического аппарата КОРОНАС-Ф (исключая область радиационного пояса и Южно-Атлантическую магнитную аномалию) при анализе временных профилей с дискретностью 1 мс. Для определения фрактальной размерности временных профилей с дискретностью 1 мс в отсутствии всплесковых событий той или иной природы применим ячеистый механизм определения показателя фрактальности. При обработке временных профилей с дискретностью 1 мс по данным, накопленным во всплесковом режиме аппаратуры АВС-Ф, методом фрактального анализа было выделено три события, подобных TGF, при-

чем одно из них было зарегистрировано во время мощного тропического циклона Бени.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки Российской Федерации по теме «Анализ и интерпретация наблюдательных данных для исследования солнечной активности и ее проявлений в околоземном пространстве и земной атмосфере на фазе спада солнечной активности».

1. Архангельский А. И., Гляненко А. С., Котов Ю. Д. и др. Эксперимент АВС-Ф по регистрации быстропеременных потоков космического и солнечного гамма-излучения в проекте КОРОНАС-Ф // Приборы и техн. эксперимента.—1999.—5.—С. 16—23.
2. Архангельский А. И., Гляненко А. С., Котов Ю. Д. и др. Модернизация эксперимента АВС-Ф в проекте КОРОНАС-Ф // Научная сессия МИФИ-1999: Сб. науч. тр. — М.: МИФИ, 1999.—Т. 4.—С. 30—31.
3. Архангельский А. И., Гляненко А. С., Павлов А. В. Предполетная калибровка прибора АВС-Ф комплекса научной аппаратуры КОРОНАС-Ф // Научная сессия МИФИ-2002: Сб. науч. тр. — М.: МИФИ, 2002.—Т. 7.—С. 18—19.
4. Волков Н. Г., Рубцов П. М. Статистические явления в детекторах ядерных излучений. — М.: МИФИ, 1986.
5. Калашникова В. И., Козодаев М. С. Детекторы элементарных частиц. — М.: Наука, 1966.
6. Котов Ю. Д., Архангельская И. В., Архангельский А. И. и др. Предварительные результаты обработки данных с прибора АВС-Ф в энергетическом диапазоне 0.1—11 МэВ // Изв. РАН. Сер. Физ.—2002.—С. 1666—1671.
7. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах, М: Постмаркет, 2000.
8. Федер Е. Фракталы. — М.: Наука, 1991.
9. Horack J. M., Koshut N. M., Mallozzi R. S., et al. Implications of the BATSE data for a helocentric origin of gamma-ray bursts // *Astrophys. J.*—1994.—429.—P. 319—324.
10. Inan U. S. Lightning effects at high altitudes: sprites, elves, and terrestrial gamma ray flashes // *C. R. Phys.*—2002.—3.—P. 1411—1421.
11. Inan U., Reising S. C., Fishman G. J., et al. On the association of terrestrial gamma ray bursts with lightning and implications for sprites // *Geophys. Res. Lett.*—1996.—23, N 9.—P. 1017—1023.
12. Koshak W. J., Krider E. P. Analysis of Lightning field changes during active Florida thunderstorms // *J. Geophys. Res.*—1999.—94.—P. 1165—1186.
13. Kotov Yu. D., Belousova I. V., Glyanenko A. S., et al. Background conditions in the range from 30 keV to 5 MeV in the orbit of CORONAS satellites // *J. Moscow Phys. Soc.*—1996.—N 6.—P. 415—423.
14. Pacias W. S., Pendleton G. N., Fishman G., et al. Performance of the large-area detectors for the Burst and Transient Source Experiment (BATSE) on the GAMMA Ray Observatory // *SPIE.*—1989.—1159.—P. 156—164.
15. Wescott E. M., Sentman D. D., Heavner M. J., et al. Blue starters: Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm // *Geophys. Res. Lett.*—1996.—23.—P. 2153—2156.

---

**THE APPLICABILITY OF FRACTAL ANALYSIS FOR THE PROCESSING OF TEMPORAL PROFILES OF NON-STATIONARY EVENTS DETECTED BY THE AVS-F APPARATUS DURING AN EXPERIMENT ONBOARD THE CORONAS-F SATELLITE**

I. V. Arkhangelskaja

Some characteristics of temporal profiles detected by burst trigger of the AVS-F apparatus onboard the CORONAS-F satellite are discussed. Two classes of short events with a duration of some milliseconds were observed. The first class of short events is very similar to  $\gamma$ -events appearing in the Earth's atmosphere (TGF). The second class of short events is connected with the detector persistence. We made an effort to separate such events by the use of the fractal analysis. We discuss the conditions at which the time series may be considered as statistically self-affine ones. The conditions of applicability of the cell mechanism of definition of fractal dimension of the temporal profiles detected by the AVS-F apparatus in a flare mode are considered and the results of definition of a fractal dimension of these time series are presented. In all, 100 flare temporal profiles are studied and three TGF-similar events are selected. One of the events is observed in the immediate vicinity of the centre of the tropical cyclone Beni, which confirms its interpretation as TGF.