

**П И С Ь М А**  
**В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ**  
**И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ  
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 59, ВЫПУСК 3  
10 ФЕВРАЛЯ, 1994

Письма в ЖЭТФ, том 59, вып.3, стр.145 - 149

©1994 г. 10 февраля

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ**  
**ЖЕСТКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК**

*А.М.Гальпер, В.М.Земсков, Б.И.Лучков, Ю.В.Озеров, В.Ю.Тугаенко,*  
*А.М.Ходарович*

*Московский инженерно-физический институт*  
*115409 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 28 декабря 1993 г.

Приводятся результаты измерения и анализа временного хода  $\gamma$ -излучения с энергией более 30 МэВ двух мощных солнечных вспышек (26 марта и 15 июня 1991 г.), зарегистрированных орбитальным телескопом ГАММА-1. Гамма-вспышка 26 марта состояла из главного всплеска длительностью 11 с и более слабых всплесков, повторяющихся с интервалом от 10 с до нескольких минут. Обнаружена тонкая структура всплесков, состоящая из отдельных пиков излучения с характерным временем 0,1–0,3 с. Предполагается, что временная структура гамма-вспышки соответствует отдельным актам ускорения частиц во время солнечной вспышки и, возможно, банчировке ускоренных пучков. Во временном ходе вспышки 15 июня, длительностью  $\sim 2$  час., также имеются указания на наличие отдельных всплесков излучения.

Наряду с традиционными наблюдениями солнечных вспышек наземными оптическими и радиотелескопами в последнее время все больше внимания уделяется их исследованию с помощью детекторов рентгеновского и гамма-диапазонов, устанавливаемых на спутниках и орбитальных станциях. Исследования в жестких лучах призваны выяснить роль ядерных процессов во вспышке, механизм ускорения частиц и взаимодействия ускоренных пучков с солнечной атмосферой. Большое число вспышек, сопровождающихся  $\gamma$ -излучением, было зарегистрировано спутником SMM в интервале энергий  $\gamma$ -квантов 10-140 МэВ [1, 2]. Приблизительно в той же области энергий проводил наблюдения Солнца спутник Hinotori [3]. Астрофизический модуль ГАММА исследовал солнечные вспышки в интервале энергий 30 МэВ–5 ГэВ [4]. Более широкий интервал (от 10 КэВ до 30 ГэВ) охватывают детекторы орбитальной гамма-обсерватории КОМПТОН [5, 6].

В настоящей статье рассмотрены результаты исследования жесткого излучения солнечных вспышек телескопом ГАММА-1, впервые зарегистрировавшим длительное ( $\sim 2$  час.) и высокоэнергичное (до нескольких ГэВ)  $\gamma$ -излучение от солнечной вспышки [7].

Советско-французский телескоп ГАММА-1 был выведен на орбиту летом 1990 г. и в течение 1991 г. провел программу солнечных наблюдений. Состав, принцип действия и рабочие характеристики телескопа приведены в [4, 8]. Пороговая энергия регистрируемых  $\gamma$  квантов равна 30 МэВ. Эффективная площадь регистрации для источника, расположенного по оси телескопа, для энергии  $E_\gamma = 100$  МэВ составляет  $\sim 180$  см<sup>2</sup>.

По прогнозу предвспышечной активности телескоп ориентировался на Солнце и проводил измерения в ждущем режиме, пока активная область солнечных пятен не уходила за лимб. Так были зарегистрированы потоки  $\gamma$ -излучения с энергией  $E_\gamma \geq 30$  МэВ от двух мощных солнечных вспышек, произошедших 26 марта и 15 июня 1991 г. Предварительные и последующие более точные результаты исследования временного хода и энергетического спектра  $\gamma$ -излучения солнечных вспышек приведены в [6, 9–11]. Здесь излагаются результаты анализа временной зависимости  $\gamma$ -излучения вспышек с предельно возможным для телескопа разрешением, наиболее полно раскрывающим их временную структуру.

В отличие от предыдущего анализа временного профиля вспышки [6, 11], основанного на стандартной зависимости от времени темпа счета телескопа за фиксированный временной интервал, в настоящем исследовании используется метод "скользящей средней частоты". Частота регистрации  $\gamma$ -квантов определяется по временному интервалу между 5 последовательными событиями с учетом мертвого времени прибора и приписывается последнему зарегистрированному  $\gamma$ -кванту. Зависимость "скользящего средней частоты" от времени описывает временной профиль вспышки с высоким, несмотря на сглаживание, временным разрешением, которое определяется темпом счета и в лучшем случае составляет 0,05 с.

Вспышка 26 марта 1991 г. класса 3В/Х 4,7 произошла в центральной области диска Солнца (южная широта  $28^\circ$ , западная долгота  $23^\circ$ ) и продолжалась в  $\gamma$ -лучах около 15 мин. Активная фаза  $\gamma$ -вспышки началась в  $20^h 27^m 57^s$  UT, через 2 мин после появления оптического излучения вспышки и через 8 мин после начала теплового рентгеновского излучения, что, в соответствии с принятой терминологией, указывает на ускорение частиц на второй, протяженной, стадии вспышки [12].

На рис.1 и рис.2 показан временной ход  $\gamma$ -вспышки 26 марта в разных временных масштабах, чтобы показать все детали временной структуры. Время  $t$  выражено в секундах относительно произвольно взятого начала отсчета, соответствующего  $20^h 26^m 41^s, 216$  UT. Временной профиль оказался более сложным, чем представлялось ранее при стандартной обработке. В нем отчетливо проявляются как известные ранее временные детали, так и новые, скрытые прежде в результате сглаживания профиля при суммировании событий за большой временной интервал. Наряду с главным импульсом вспышки длительностью 11 с, состоящим из двух субимпульсов длительностью 5 с и 6 с, повторяющихся всплесков излучения, следующих с интервалами 10–15 с и 50–60 с, двух дополнительных импульсов, произошедших через 5 мин и 8 мин после главного импульса (рис.1), временной профиль обнаруживает тон-

кую структуру субимпульсов (рис.2). Первый субимпульс расщепляется на три пика с максимальной частотой 60, 140 и 30 Гц и длительностью от 0,04 с до 0,2 с. Второй субимпульс состоит в основном из пика частотой 40 Гц, шириной не более 0,3 с. Пиковый поток  $\gamma$ -квантов в интервале энергий 30–300 МэВ достигает значения  $2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для самого узкого пика с длительностью около 40 мс и частотой 140 Гц. Всего в главном импульсе зарегистрировано 106  $\gamma$ -квантов при ожидаемом фоне, определенном до вспышки, 1,1 события.

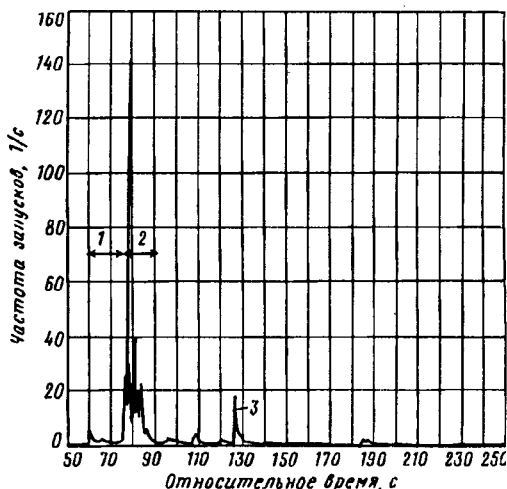


Рис.1

Рис.1. Временная развертка солнечной гамма-вспышки 26.03.91 (ноль –  $20^{\text{h}} 26^{\text{m}} 41^{\text{s}} 216 \text{ UT}$ ): 1 – предвестник; 2 – основная вспышка; 3 – повторный всплеск

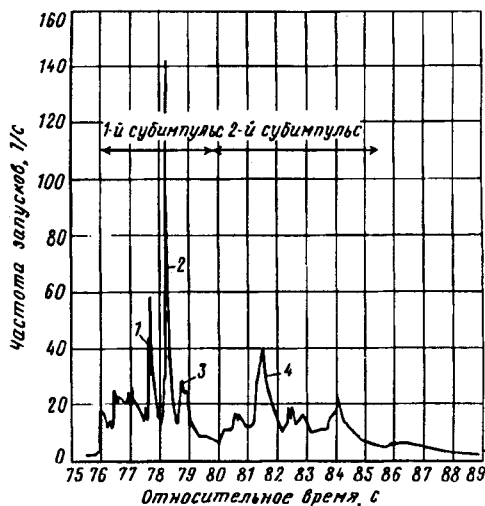


Рис.2

Рис.2. Временная развертка основной части солнечной гамма-вспышки 26.03.91: 1 – первый пик первого субимпульса; 2 – второй пик первого субимпульса; 3 – третий пик первого субимпульса; 4 – основной пик второго субимпульса

Главному импульсу  $\gamma$ -вспышки предшествует более плавное возрастание потока  $\gamma$ -излучения. Начальная фаза вспышки видна на рис.1. Уровень предвспышечного фона телескопа составляет 0,1 Гц и не должен был измениться (в соответствии с широтной зависимостью) более, чем на 5%. Однако приблизительно за 15 с до основной фазы вспышки наблюдается увеличение темпа счета до 1 Гц. Возможно этот предвестник, так же как и основная вспышка, обладает временной структурой, статистическая достоверность которой не позволяет надежно утверждать этого.

Солнечная вспышка 15 июня 1991 г. класса 3B/X 12+ оказалась более мощной в рентгеновском излучении и произошла вблизи лимба (северная широта  $33^\circ$ , западная долгота  $70^\circ$ ). Телескоп ГАММА-1 смог зарегистрировать ее только через 17 мин после оптического старта, упустив из-за затенения Землей активную фазу вспышки. Спадающий поток  $\gamma$ -излучения регистрировался в течение 37 мин, пока спутник не зашел в тень Земли, и продолжал быть виден на следующем витке после выхода спутника из тени, так что общая продолжительность  $\gamma$ -излучения была не меньше 2 час.

На рис.3 представлен временной ход  $\gamma$ -излучения вспышки 15 июня за первые 15 мин после включения телескопа (0 временной шкалы соответствует

$8^h 38^m 41^s$ , 323 UT ). Вспышка оказалась более мощной не только в рентгеновском, но и в  $\gamma$ -излучении, о чем свидетельствует большая продолжительность и величина потока  $\gamma$ -квантов ( $\bar{\nu} = 5 - 10$  Гц на "хвосте" вспышки). Временная структура проявляется в виде отдельных секундных импульсов, следующих с интервалом в 10–20 с на медленно меняющемся со временем пьедестале. Однако надо иметь в виду, что статистическая достоверность отдельных импульсов существенно ниже, чем для вспышки 26 марта, и часть импульсов может быть случайной. Малая статистика  $\gamma$ -квантов для отдельных импульсов не позволяет также провести их анализ для выявления тонкой структуры. Во временном ходе отсутствуют повторные значительные импульсы, которые были видны во вспышке 26 марта, но это и неудивительно, так как регистрировался далекий "хвост" вспышки.

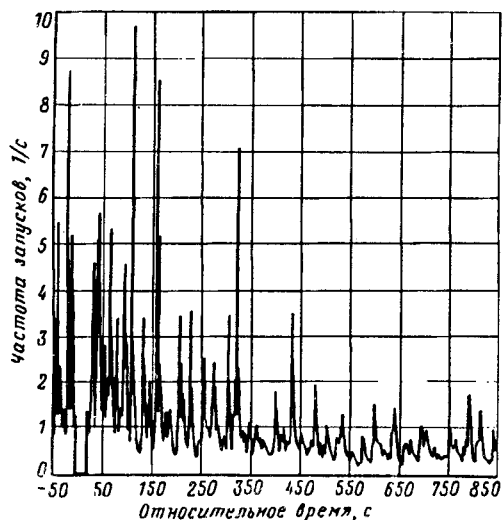


Рис.3. Временная развертка солнечной гамма-вспышки 15.06.91

Оценка достоверности обнаруженных особенностей временного хода рассматриваемых  $\gamma$ -вспышек проводилась исходя из средней скорости счета телескопа в области пиков. Вычисленные пуассоновские вероятности случайного появления пиков составляют:  $4,5 \cdot 10^{-2}$ ,  $2,1 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,3 \cdot 10^{-1}$  и  $1,3 \cdot 10^{-2}$  для 1-го и 2-го субимпульсов вспышки 26 марта и не более  $5 \cdot 10^{-3}$  для пиков с амплитудой  $\nu \geq 9$  Гц во вспышке 15 июня. Часть пиков, следовательно, может носить случайный характер.

Таким образом, проведенный анализ временного хода  $\gamma$ -излучения мощной солнечной вспышки показал, что во время активной фазы излучение состоит из отдельных всплесков средней длительности 10 с, повторяющихся с интервалом от 10 с до нескольких минут. Каждый всплеск, в свою очередь, состоит из последовательности пиков излучения шириной 0,1–0,3 с, следующих друг за другом через несколько секунд. Столь детальная картина временного хода жесткого  $\gamma$ -излучения превосходит даже то, что известно сейчас о рентгеновском и мягком  $\gamma$ -излучении солнечных вспышек, где в качестве "элементарного всплещечного всплеска" фигурируют импульсы длительностью  $\approx 10$  с, следующие с интервалом в 3–30 с [13]. В нашем представлении этой структуре соответствуют отдельные  $\gamma$ -всплески (субимпульсы и повторные импульсы). Если их принять за акты ускорения частиц, то пики тонкой структуры можно

сопоставить с банчировкой ускоренных пучков или отдельными сбросами их на мишень.

Полученные результаты не противоречат механизму коллективного ускорения протонов в солнечной вспышке [14, 15], при котором характерное время ускорения до энергии в несколько ГэВ составляет  $10^{-2} - 10^{-1}$  с.

Авторы благодарят проф. С.С.Герштейна за обсуждение результатов работы, а также доктора В.Е.Нестерова и доктора Н.Г.Лейкова за полезные замечания. Работа осуществлялась с частичной поддержкой Российского фонда фундаментальных исследований и Госкомитета РФ по высшему образованию.

- 
1. D.J.Forrest, W.T.Vestrand, E.L.Chupp et.al., Proc. of 19-th Inter. Cosmic Ray Conf., La Jolla 4, 146 (1985).
  2. R.J.Murphy, C.D.Dermer, and R.Ramaty, *Astrophys. J., Supplement Series* 63, 721 (1987).
  3. M.Yoshimori, *Journal of Phys. Soc. Japan* 53, 4499 (1984).
  4. V.V.Akimov, A.R.Bazer-Bachi, A.S.Belaousov et al. Proc. of. 22-nd Inter. Cosmic ray Conf., Dublin 2, 483 (1991).
  5. M.McConnel and K.Bennett, COSPAR World Congress, 1992.
  6. P.W.Kwok and D.L.Bertsch, *BAAS* 24, 783 (1992).
  7. V.V.Akimov, V.G.Afanassyev, A.S.Belousov et al., Proc. of 22-nd intern. cosmic Ray conf., Dublin, 3, 73 (1991).
  8. В.В.Акимов, В.Г.Афанасьев, А.С.Белоусов и др., *Письма в АЖ* 18, 167 (1992).
  9. N.G.Leikov, V.V.Akimov, V.A.Volsenskay et.al., *Symposium "Recent Advances of High Energy Astronomy"*, Toulouse, 1992.
  10. V.V.Akimov, A.V.Belov, V.G.Kurt et al., 23-rd Intern. Cosmic Ray Confer., Calgary 3, 111 (1993).
  11. А.М.Гальпер, В.М.Земсков, Г.Е.Кочаров и др., *Известия РАН, сер. физ.* 57, N 7, 132 (1993).
  12. Г.Е.Кочаров, *Итоги науки и техники, Астрономия* 32, 43 (1987).
  13. Б.В.Сомов, *Итоги науки и техники* 34, 78 (1987).
  14. С.С.Герштейн, *Геомагнетизм и аэрономия* 19, 202 (1979).
  15. G.Fiorentini and S.S.Gershtein, Preprint INFN-FE-09/92, 1992.