

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

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ  
 ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 63, ВЫПУСК 12  
 25 ИЮНЯ, 1996

Письма в ЖЭТФ, том 63, вып.12, стр.889 - 893

© 1996г. 25 июня

**ПОВТОРНЫЕ ВСПЛЕСКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ**  
**ВСПЫШКИ 15.06.91**

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

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

Поступила в редакцию 20 мая 1996 г.

Рассматриваются результаты выделения повторных всплесков гамма-излучения с энергий больше 30 МэВ солнечной вспышки 15.06.91, наблюдавшейся телескопом "Гамма-1". Показано их присутствие на спадающей части временного профиля гамма-излучения длительностью  $\sim 10$  мин (спустя 27 мин после оптического начала вспышки). Во время последующей квазипостоянной части ( $\sim 20$  мин) заметных всплесков излучения не обнаружено. Делается вывод о наличии повторных актов ускорения частиц на активной стадии мощной солнечной вспышки 15.06.91. Отмечается общий характер гамма-вспышек 15.06.91 и 26.03.91 при заметном различии их спектральных и временных характеристик.

PACS: 95.85.Pw, 96.60.Rd

1. Введение. В настоящее время по вспышке 15.06.91 накоплен значительный объем информации. Гамма-излучение от этой мощной (класс 3В/X12) лимбовой (N33, W69) вспышки наблюдалось телескопом "Гамма-1" в диапазоне энергий от 30 МэВ до нескольких ГэВ. Эта вспышка также наблюдалась в гамма-диапазоне 0.8–30 МэВ (телескоп COMPTEL(GRO)), в оптическом диапазоне (Astronomical Institute of the Wroclaw University), рентгеновском (GOES7) и радиодиапазонах (радиоастрономическая станция "Зименки" (Нижний Новгород, Россия)) [1]. Кроме того, вспышка 15.06.91 была замечена сетью нейтронных мониторов [1, 2].

В оптическом и мягком рентгеновском диапазонах вспышка 15.06.91 началась в 08:10 UT и достигла максимума в 08:21 UT [1]. Телескоп "Гамма-1" начал регистрацию гамма-излучения (начало регистрации  $\sim 08:37$  UT) после импульсной фазы вспышки ( $\sim 08:15$  UT) [1], пропустив ее вследствие затенения Землей. При сравнении временных профилей радио- и гамма-излучения

от вспышки 15.06.91 [1] было обнаружено, что наблюдения в гамма-диапазоне, проведенные телескопом "Гамма-1", начались после повторного всплеска излучения в радиодиапазоне. Результаты моделирования, проведенного при анализе данных нейтронного монитора г.Алма-Ата [2], показали, что наилучшей моделью протекания вспышки является ускорение протонов не только во время импульсной, но и в течение послеимпульсной стадии вспышки. Ранее на основании предварительной обработки данных эксперимента "Гамма-1" было высказано предположение о наличии отдельных импульсов излучения при спадающем со временем общем потоке излучения вспышки 15.06.91 [3-5], однако статистическая достоверность отдельных всплесков была невелика. Так, пуассоновская вероятность случайного появления даже для самых максимальных пиков составляла величину  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  [3]. В настоящей статье приведен анализ структуры данных эксперимента "Гамма-1" с целью выявления возможных повторных всплесков жесткого гамма-излучения в течение послеимпульсной стадии вспышки 15.06.91.

2. Исходные экспериментальные данные телескопа "Гамма-1" и их предварительный анализ. Телескоп "Гамма-1" был выведен на орбиту летом 1990 г. и провел программу солнечных наблюдений в течение 1991 г. Состав, принцип действия и рабочие характеристики телескопа приведены в [6,7]. Пороговая энергия регистрируемых гамма-квантов  $\sim 30$  МэВ. Эффективная площадь регистрации гамма-квантов для нормально падающего потока достигает в области больших энергий величины  $\sim 300$  см<sup>2</sup>.

Во время проведения измерений на орбите 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 гамма-излучения от мощных солнечных вспышек 26 марта, 15 июня и 27 октября 1991 г. Для анализа временного хода вспышек использовался метод "скользящей средней частоты" (ССЧ), подробное описание которого приведено в [8]. Суть метода заключается в том, что темп счета аппаратуры определяется по временному интервалу  $T_n$  между фиксированным числом  $n$  следующих друг за другом событий. Средняя частота  $\nu$  по  $n$  событиям определяется выражением

$$\nu = (n - 1) / (T_n - \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i), \quad (1)$$

где  $\tau_i$  - мертвое время, которое в общем случае может быть разным для каждого события.

В работах [3-5] метод ССЧ был применен для построения временных профилей гамма-вспышек и позволил выявить отдельные всплески излучения вспышки 26.03.91, продолжительность которых составляла от 40 до 200 мс, и получить указания на наличие отдельных всплесков излучения во вспышке 15.06.91 [3,4].

3. Описание методики выделения гамма-всплесков и полученные результаты. Неопределенность существования в течение вспышки 15.06.91 повторных всплесков излучения устраняется в данной работе с помощью сравнения экспериментальных распределений скользящих средних частот с аналогичными распределениями, полученными путем моделирования по методу Монте-Карло.

На рис.1 представлена временная зависимость вспышки 15.06.91, определенная по методу ССЧ (время прохождения Бразильской Магнитной Аномалии

исключено из рассмотрения). Видно, что в течение  $\sim 600$  с после начала измерений существует экспоненциальный спад с постоянной  $\tau_1 = 410 \pm 80$  с (методика определения приведена ниже), который переходит в квазипостоянный темп счета, продолжающийся не менее 1100 с. Повышенный темп счета наблюдался и на следующем витке после выхода спутника из тени. В предположении перехода быстрого экспоненциального спада с постоянной  $\tau_1$  в медленный с постоянной  $\tau_2$  и используя темп счета "квазипостоянной" составляющей на двух последовательных витках наблюдения за Солнцем, можно определить вторую постоянную спада  $\tau_2 = 83 \pm 7$  мин.

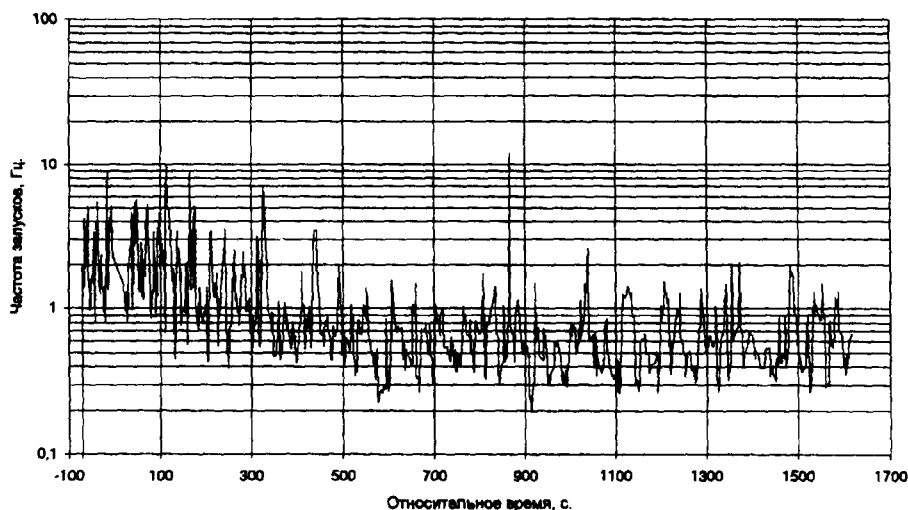


Рис.1. Временной ход солнечной гамма-вспышки 15.06.91 (Ноль временной шкалы соответствует  $8^h 38^m 41^s,323$  UT)

Для ответа на вопрос, все ли пики на временном профиле рис.1 являются статистическими флуктуациями или часть их представляет реальные повторные всплески гамма-излучения, были построены распределения ССЧ для двух временных интервалов: первых 600 с (экспоненциально спадающая часть временного профиля с постоянной  $\tau_1$ ) и последующих 1100 с (квазипостоянная часть). Полученные экспериментальные распределения, показанные на рис.2, сравнивались с расчетными, в которых учитывались средний темп счета телескопа и мертвое время после каждого события. Расчетные распределения были получены методом Монте-Карло, состоящем в розыгрыше моментов регистрации событий, определении величины мертвого времени телескопа и исключении тех событий, которые попадали в мертвое время. Распределение моментов регистрации без учета мертвого времени дается формулой

$$T_i = \begin{cases} T_0 - \tau_1 \text{Ln}(1 - \xi_i(1 - \exp(-(T_1 - T_0)/\tau_1))) & \text{для первого интервала,} \\ T_1 + \xi_i(T_m - T_1) & \text{для второго интервала,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_0$  — начало первого интервала,  $T_1$  — его окончание;  $\xi_i$  —  $i$ -ое случайное число, равномерно распределенное на отрезке  $0 \div 1$ ;  $T_m$  — конец второго интервала.

Учет блокировки телескопа в полученном по формуле (2) наборе  $\{T_i\}$  производился исключением событий, попавших в мертвое время, которое для

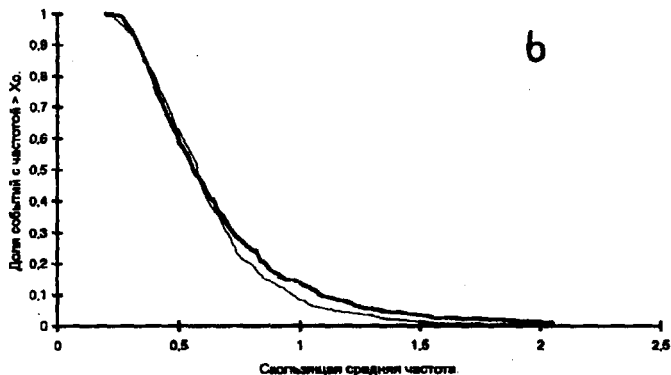
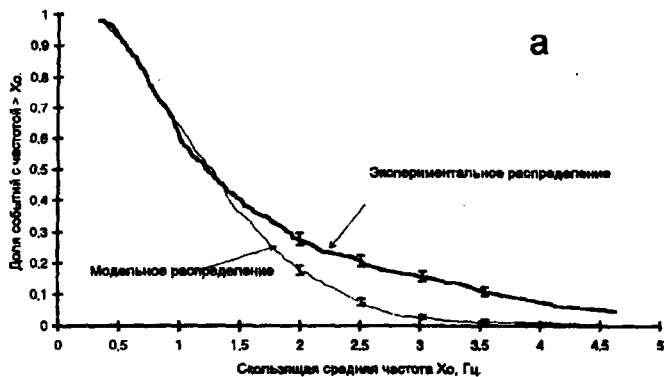


Рис.2. Сравнение модельного и экспериментального распределения ССЧ для экспоненциальной составляющей (а) (число событий 546) и постоянной части (б) (число событий 528) солнечной гамма-вспышки 15.06.91

телескопа "Гамма-1" не является постоянным и зависит от условий регистрации события. Более полное описание системы блокировки телескопа приведено в [8]. Для оставшихся после учета мертвого времени событий были построены распределения ССЧ по той же методике, что и при обработке экспериментальных данных. Они также приведены на рис.2 для первого и второго интервалов.

Из сравнения экспериментальных и расчетных частотных распределений следует, что они существенно различаются на первом временном интервале (рис.2а). Вероятность совпадения по критерию Колмогорова [9] составляет  $5 \cdot 10^{-5}$ . Расхождение проявляется на частотах  $\nu > 2$  Гц, которые и характерны для заметных пиков временного хода рис.1. Биномиальная вероятность случайного расхождения распределений на этих частотах составляет  $\sim 10^{-14}$ , что полностью исключает такую возможность. Для второго временного интервала наблюдается хорошее согласие экспериментального и расчетного частотных распределений (рис.2б): вероятности совпадения, оцененные по критерию Колмогорова и по биномиальному распределению, составили соответственно  $\sim 0.3$  и не ниже 0.003. Это обстоятельство, в частности, дает хороший аргумент против возможности объяснения расхождений экспериментального и расчетного распределений на первом временном интервале какими-либо методическими причинами.

Применяемые при моделировании значения  $T_1 = 600$  с и  $\tau_1 = 410 \pm 80$  с были подобраны при сравнении распределений ССЧ, смоделированных для всего 1700-секундного диапазона, с соответствующим экспериментальным распреде-

лением и отвечают максимальной вероятности совпадения распределений по критерию Колмогорова.

4. *Обсуждение и выводы.* Избыток значений ССЧ с большой амплитудой в течение экспоненциального спада вспышки 15.06.91 можно интерпретировать как наличие повторных всплесков гамма-излучения. Совпадение распределений для послеекспоненциальной части означает отсутствие таких всплесков на длительной стадии вспышки. Анализ энергетических спектров, приведенных в работе [4], свидетельствует о том, что во время вспышки 15.06.91 присутствовали как электроны, так и протоны, причем нет никаких значимых указаний на изменение их соотношения со временем. Таким образом, гамма-излучение вспышки 15.06.91 имеет активную фазу длительностью по крайней мере 10 мин, в течение которой существуют отдельные акты одновременного ускорения электронов и протонов, и относительно спокойную продолжительную фазу длительностью не менее 2ч [3], в течение которой генерация излучения происходит, по-видимому, в области захвата магнитной петли короны, где ускоренные частицы могут продолжительно удерживаться [5].

Аналогичные повторные всплески длительностью от 40 до 200 мс были выявлены при анализе длящейся  $\sim 1 \div 3$  мин активной фазы вспышки 26.03.91 [4]. Спад интенсивности гамма-излучения этой вспышки в течение активной фазы также может быть описан экспоненциальной зависимостью [5], которая тоже переходит в продленную компоненту. Спектр этой вспышки также может интерпретироваться как излучение одновременно ускоренных электронов и протонов. При этом различие спектров гамма-излучения вспышек 15.06.91 и 26.03.91 [4] можно объяснить зависимостью спектра от направления пучка ускоренных частиц относительно наблюдателя, которое различно для лимбовой вспышки 15.06.91 и центральной вспышки 26.03.91 [4].

Таким образом, экспериментальные данные демонстрируют, что для солнечных гамма-всплесков можно выделить активную фазу с экспоненциально спадающей интенсивностью излучения длительностью до 10 мин, в течение которой происходят отдельные акты ускорения электронов и протонов, и последующую спокойную фазу без заметных отдельных всплесков излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 94-02-03316 и 96-02-17127, и Госкомвуза РФ.

- 
1. T.P.Armstrong, E.I.Chuikin, L.G.Kocharov et al., *Solar Physics* **150**, 267 (1994).
  2. L.G.Kocharov, G.A.Kovaltsov, H.Kananen et al., *Solar Physics* **158**, 395 (1995).
  3. А.М.Гальпер, В.М.Земсков, Б.И.Лучков и др., *Письма в ЖЭТФ* **59**(3), 145 (1994).
  4. V.Yu.Chesnokov, N.M.Djantemirov, A.M.Galper et al., *Biannual Report*, 93, 94. Ed. V.N.Nevolin. М.: МЕРФИ, 1995.
  5. А.М.Гальпер, В.М.Земсков, Б.И.Лучков и др., *Известия РАН, серия физ.* **59**(4), (1995).
  6. V.V.Akimov, A.R.Bazer-Bachi, A.S.Belaousov et al., *Proc. of 22-nd Inter. Cosmic ray Conf, Dublin*, **2**, 483 (1991).
  7. И.И.Акимов, В.Г.Афанасьев, А.С.Белоусов и др., *Письма в АЖ* **18**, 167 (1992).
  8. Ю.В.Ефремова, Ю.В.Озеров, А.М.Ходарович, *Приборы и техника эксперимента* (в печати).
  9. В.Идье, Д.Драйард, Ф.Джеймс и др., *Статистические методы в экспериментальной физике*, пер. с англ., под ред. А.А.Тяпкина, М.: Атомиздат, 1976.