

УДК 523.985.3

Ю.Е. Чариков, В.И. Глобина, Е.М. Склярова

**СПЕКТРЫ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК ЖЕСТКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК
ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРА BATSE**

Yu.E. Charikov^{1,2}, V.I. Globina¹, E.M. Skliarova²

¹ St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

² Ioffe Physical Technical Institute of Russian Academy of Sciences,
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia.

**HARD X-RAY TIME DELAY SPECTRA OF SOLAR FLARES:
BATSE SPECTROMETER DATA**

Рассмотрены временные задержки импульсов рентгеновского излучения в разных энергетических каналах в диапазоне 20 – 200 кэВ, зарегистрированного спектрометром BATSE во время полета космической станции CGRO. Для получения временных задержек вычисляются попарные корреляционные функции для всех рядов со значимыми скоростями счета. После этого строится спектр задержек от энергии рентгеновских квантов для различных фаз вспышек. На начальной фазе вспышек спектр задержек монотонно возрастает с ростом энергии. В максимуме излучения характер спектра меняется для разных вспышек: от U-образного до монотонно убывающего. На фазе спада скорости счета спектр задержек скорее повторяет спектр в максимуме. Проведено сравнение полученных спектров задержек с задержками, следующими из моделей распространения ускоренных электронов.

СОЛНЦЕ, ВСПЫШКИ, ЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ, СПЕКТРОМЕТР BATSE.

A time delays of X-rays in the energy range of 20 – 200 keV registered by BATSE spectrometer during a space flight of CGRO have been considered. Pair wise correlation functions for all time series with a significant count rates were computed. Delay spectra are based via X-ray energy for different phases of flares. In the initial phase of the burst the delays increase monotonically with increasing energy. At the peak of the radiation pattern of the spectrum of different bursts is changing: from U-shaped to monotonically decreasing. On the decay phase of the count rate the delay spectra rather repeat the same of the maximum. A comparison of the delay spectra to the delays, following the models of the transport of the accelerated electrons were carried out.

SUN, FLARES, HARD X-RAY, TIME DELAYS, BATSE SPECTROMETER.

По современным представлениям, во время солнечных вспышек ускорение электронов происходит в короне, в то время как жесткое рентгеновское излучение (ЖРИ)

генерируется в хромосфере (см., например, работу [1]). Изучение временных задержек указанного рентгеновского излучения солнечных вспышек служит дополнительным

каналом информации о процессах распространения ускоренных электронов и механизме излучения рентгеновских квантов. Так, например, в модели свободного пролета электронов от области ускорения до области источника ЖРИ ожидаются монотонные временные задержки квантов меньших энергий по отношению к высокоэнергичному излучению [2, 3]. Обратная зависимость задержек от энергии квантов ожидается в модели ускоренных электронов, захваченных в магнитную ловушку вспышечной петли, с последующим их высыпанием в область плотной плазмы (толстая мишень) [4]. В работах [2, 3] анализировалось 5430 рентгеновских всплесков во время 640 солнечных вспышек, зарегистрированных спектрометром BATSE с временным разрешением 64 мс. Главной задачей указанных работ было обнаружение временных задержек квантов меньших энергий по отношению к излучению квантов более высоких энергий. Другими словами, проводились попытки обнаружить свободный пролет ускоренных электронов от области ускорения до области тормозного излучения. В результате были получены времена задержек в широком диапазоне значений: от нескольких миллисекунд до секунд. Используя миллисекундные задержки, авторы работ [2, 3] построили модель распространения электронов с определением параметров магнитной петли и плазмы в ней. На наш взгляд, вызывает сомнение точность, с которой авторы определяли величины задержек в несколько миллисекунд. Согласно проведенной нами обработке данных, аппроксимации корреляционной функции (точнее ее максимума) как полиномами второй и четвертой степеней, подобно проделанной в работах [2, 3], так и кривой Гаусса, приводят уже к расхождению в десятки миллисекунд. В связи с этим, задержки в несколько миллисекунд определены с ошибкой, которая имеет порядок, также измеряемый в миллисекундах. Авторы работы [4] строят спектр задержек для 78 вспышек, одновременно наблюдавшихся на космических аппаратах CGRO и Yohkoh, используя 16 энергетических каналов. Для сглаженных потоков ЖРИ в этих всплесках обнаружены, согласно указанной публикации, систематические задержки

длительностью 1 – 10 с, причем знаки этих задержек были отрицательными, то есть высокоэнергичные фотоны регистрировались ранее, чем низкоэнергичные. Следует отметить, что вид спектра задержек не во всех исследованных вспышках был спадающим с ростом энергии. В ряде всплесков отмечалась и обратная зависимость, но в работе [4] она не принималась во внимание.

Здесь мы хотим особо подчеркнуть, что для исследования временных задержек интереснее получить их спектры на разных фазах развития вспышки, поскольку в процессе развития самой вспышки меняется как темп ускорения заряженных частиц, так и условия их распространения в плазме вспышечной петли.

Поэтому основная цель статьи – построение спектра временных задержек ЖРИ на разных стадиях эволюции, его анализ и сравнение с модельными спектрами задержек, полученными в простых предположениях о движении ускоренных электронов вдоль вспышечной петли.

Методика обработки временных рядов жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек

Спектрометр BATSE регистрировал излучение в режимах умеренного (16 каналов) и высокого (100 каналов) энергетического разрешения. В первом случае временное разрешение меняется от 16 до 2048 мс (в зависимости от величины скорости счета и режима накопления данных). Банк данных BATSE содержит ЖРИ солнечных вспышек в период с апреля 1991 по май 2000 года [5]. Определение времени задержки между двумя сигналами из различных энергетических каналов проводилось с помощью построения взаимной корреляционной функции (далее – ВКФ). Эта функция описывает степень сходства формы двух сигналов и их расположение друг относительно друга по временной координате (независимой переменной). Для двух дискретных сигналов ВКФ определяется следующим образом:

$$R_{xy}(m) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{N-m} x_{n+m} y_n, & m \geq 0; \\ R_{yx}(-m), & m < 0, \end{cases}$$

где N — общее число точек двух последовательностей, m — временной сдвиг между ними.

Для двух сигналов произвольной формы максимум ВКФ соответствует тому значению сдвига m , при котором площадь перекрывания сигналов максимальна. В частном случае двух сигналов симметричной формы максимум ВКФ соответствует разности времен максимумов этих сигналов. Таким образом, время задержки между двумя сигналами определялось по максимальному значению данной функции.

Первая задача, которую было необходимо решить в процессе обработки, связана с отбором вспышек для последующего анализа. Для начала мы ограничили себя отбором событий с наиболее простым временным профилем в виде единичного рентгеновского всплеска короткой длительности. При этом для построения спектра задержек данный всплеск должен был регистрироваться не менее чем в пяти энергетических каналах с энергией от 24 кэВ до примерно 200 кэВ. Например, для вспышки 2704 из каталога BATSE предельным каналом являлся восьмой (диапазон энергий 125,5 — 166,5 кэВ). В среднем, по всем исследованным вспышкам последним для корреляции каналом является шестой (75,7 — 100,6 кэВ, см. таблицу).

Следующим этапом обработки сигналов являлось выделение фона в энергетических каналах; в каждом из них уровень фона зависит от энергии квантов. Поскольку определение времени задержки между сигналами различных каналов выполняется по максимуму ВКФ, очевидно, что наличие фона в каждом канале влияет на величину сдвига, которой соответствует максимальная площадь перекрывания сигналов. Таким образом, вычитание фона из сигнала есть необходимая процедура обработки. Как правило, в данных, полученных с помощью спектрометра BATSE, зарегистрированы сигналы как до начала вспышки, так и после нее. Определение фона в каждом энергетическом канале проводилось посредством аппроксимации экспериментальных данных линейной функцией как на стадии до, так и после вспышечного всплеска. Далее ап-

роксимированный фон вычитался из данных, полученных на каждом канале. Затем проводилось построение ВКФ для всех пар временных рядов из рассматриваемых энергетических диапазонов. Ввиду сравнительно небольшого значения ожидаемой величины задержки между сигналами (меньше 2048 мс), проводилась интерполяция трех точек ВКФ вблизи ее максимума полиномом второй (четвертой) степени.

Результаты анализа временных задержек

Анализ временных задержек проводился для вспышек, представленных в таблице. Поскольку их спектры аналогичны, мы рассмотрим только некоторые из них.

Вспышка 284 по каталогу спектрометра BATSE. На рис. 1 приведены временные профили вспышки 284. Она произошла 6 июня 1991 г., начало зафиксировано в 05:06:04 UT, ее рентгеновский класс — M1.1. Профили вспышки в разных энергетических каналах представляют собой одиночный всплеск общей длительностью 15 с (см. рис. 1). Число энергетических каналов, в которых анализировалась скорость счета, равно пяти; диапазон энергий — (24,1 — 100,6) кэВ.

Из данных рис. 1 следует, что в данном событии фоновое излучение измерялось длительное время до и после самого всплеска. Поэтому задача определения фона могла быть решена аккуратно. После вычитания фона вычислялась парная ВКФ для всех пяти каналов, определялись временные задержки и строился их спектр по отношению к самому «быстрому» энергетиче-

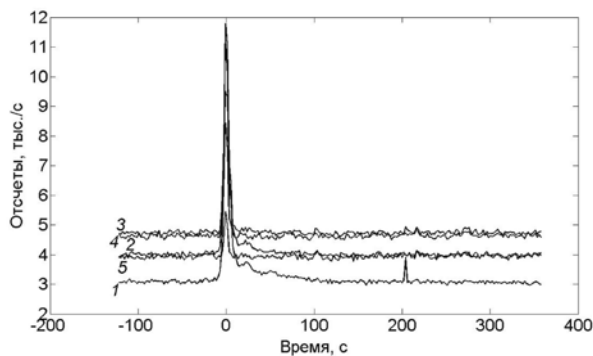


Рис. 1. Временные профили солнечной вспышки 284 (см. таблицу) для пяти энергетических каналов, кэВ: 24,1 — 33,1 (1), 33,1 — 42,8 (2), 42,8 — 57,6 (3), 57,6 — 75,7 (4), 75,7 — 100,6 (5)

Основные характеристики и результаты анализа рассмотренных солнечных вспышек из каталога BATSE

Данные вспышек по каталогу						Результаты анализа задержек		
Номер	Дата	Начальный момент, UT	Длительность, с	Класс GOES	Диапазон энергий, кэВ	Число каналов	Максимальная длительность, мс	Вид спектра
151	06.05.91	16:11:30	15	C1.8	24 – 76	4	155	Сп
284	06.06.91	05:06:04	15	M1.1	24 – 101	5	523	Сп
598	31.07.91	10:14:42	20	C6.1	24 – 101	5	1200	Сп
874	07.10.91	07:29:11	20	C	24 – 101	5	392	U
880	08.10.91	08:34:34	20	C3.2	24 – 101	5	237	Сп
903	15.10.91	06:12:51	30	C6.8	24 – 101	5	713	Сп
1296	13.01.92	17:27:28	> 300	M2.0	24 – 101	5	321	U
2024	30.10.92	13:32:52	30	–	24 – 101	5	148	U
2028	30.10.92	22:53:31	30	X1.2	24 – 101	5	1415	Сп
2091	09.12.92	17:24:18	15	–	24 – 101	5	345	Сп
2704	23.12.93	05:28:30	25	C4.4	24 – 166	7	642	Сп–Р

Обозначения вида спектров задержек: Сп – спадающий, U – U-образный, Сп – Р – состоящий из спадающей и растущей ветвей

скому каналу. На рис. 2 показаны спектры временных задержек для всего всплеска и для разных фаз развития вспышки: роста, максимума и спада ЖРИ.

Отметим, что спектр задержек на стадии увеличения скорости счета монотонно возрастает с увеличением энергии, в то время как на последующих стадиях спектр задержек монотонно спадает. На стадии роста закон зависимости длительности задержек от величины энергии не является строго степенным. Однако аппроксимация данной

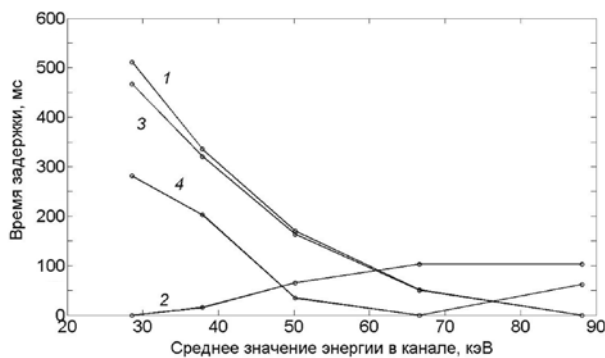


Рис. 2. Спектры задержек всплеска 284 (см. таблицу) для всего профиля (1), а также для его различных стадий: роста (2), пика (3) и спада (4) жесткого рентгеновского излучения (см. рис. 1)

кривой степенным законом соответствует показателю степени $\alpha = +1,52$. Во все последующие моменты времени спектр задержек монотонно спадает вплоть до самых высоких энергий (см. рис. 2, кривые 1, 3 и 4). Следует отметить небольшую особенность в спектре задержек на стадии спада: монотонное уменьшение времени задержек происходит до энергий 67 кэВ с последующим ростом на больших значениях энергии. Закон изменения задержек от энергии как на стадии пика, так и для всей вспышки в целом аппроксимируется степенной функцией с показателем степени $\alpha = -2$.

Величина задержек также меняется на разных фазах всплеска. Максимальные значения около 500 мс имеют место и для всего всплеска, и для стадии пика, несколько уменьшаясь на стадии роста (100 мс).

Вспышка 2028 по каталогу BATSE. Она произошла 30 октября 1992 года, ее начало зафиксировано в 22:53:31 UT, рентгеновский класс – X1.2. Временные профили вспышки представлены на рис. 3.

Профили ЖРИ при разных значениях энергии являются одиночными всплесками. Длительность всплесков разных энергий составляет в среднем 30 с. Рентгеновский фон, как и в предыдущем случае, аккуратно

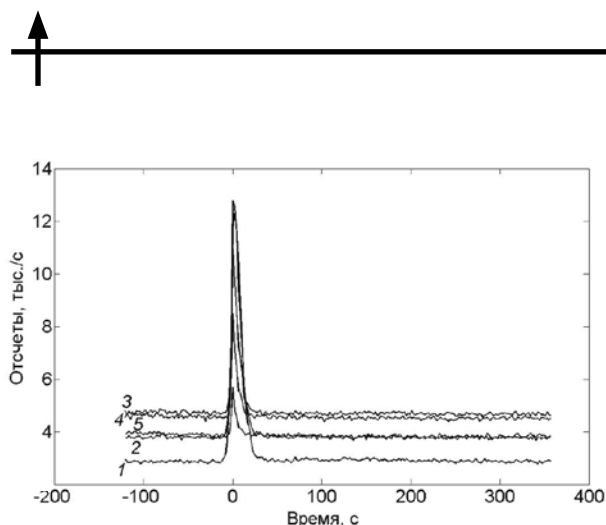


Рис. 3. Временные профили солнечной вспышки 2028 (см. таблицу) для пяти энергетических каналов (те же, что на рис. 1)

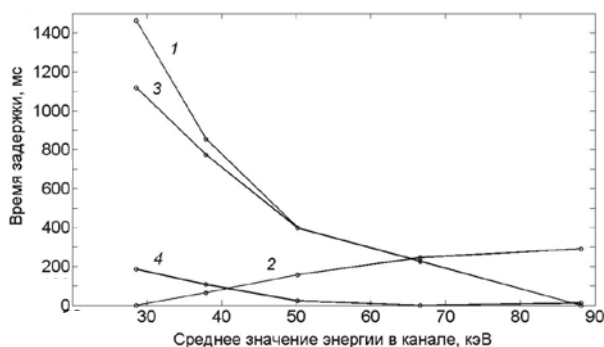


Рис. 4. Спектры задержек всплеска 2028 (см. таблицу) для всего профиля (1) и тех же стадий (2 – 4) жесткого рентгеновского излучения, что на рис. 2 (см. рис. 3)

вычисляется. Построение ВКФ и определение парных задержек позволяет построить спектр временных задержек для данного всплеска (рис. 4).

Первое, на что следует обратить внимание, – это существенно большая величина задержек в этом всплеске. Она достигает значений порядка 1,5 с для всего всплеска в целом. На отдельных стадиях эволюции всплеска также отметим возросшие значения задержек. Необходимо особо рассмотреть спектр задержек, его зависимость от энергии. Аппроксимация этого спектра степенной функцией для стадии роста дает значение показателя степени, равное $\alpha = +1,59$. Зависимость задержек от энергии и на стадии пика, и для всей вспышки в целом носит также степенной характер, но значения показателя степени – отрицательные и составляют $\alpha = -1,93$ и $-2,28$, соответственно.

Вспышка 2704 по каталогу BATSE. Иной характер спектра задержек получен во вспышке 2704. Вспышка произошла 23 декабря 1993 года, в 05:28:30 UT, рентгеновский класс – С4.4. Временные профили вспышки показаны на рис. 5. В данном событии анализировалось ЖРИ из семи энергетических каналов. Энергетический диапазон составлял (24,1 – 166,5) кэВ. Профили ЖРИ на разных энергиях также характеризуются одиночными всплесками. Общая длительность всплесков составляет около 25 с. Стадии фона до и после всплеска позволяют точно определить фон. Спектр задержек для данного всплеска приведен на рис. 6.

Отметим иной характер спектра задержек. На стадии роста спектр по-прежнему остается монотонно возрастающим с увеличением энергии (кривая 2). Максимальная задержка составляет около 100 мс для квантов с энергией 150 кэВ по отношению к ЖРИ с энергией 50 кэВ. На стадии пика ЖРИ (кривая 3) кривая спектра имеет U-образную форму, а излучение с энергиями до и выше 50 кэВ запаздывает. При этом ЖРИ с энергией 150 кэВ запаздывает по отношению к таковому с энергией 50 кэВ на 642 мс. Спектр задержек в данном всплеске характеризуется производными разных знаков. Аппроксимация степенным законом дает значение показателя степени $\alpha = +1,3$ на стадии роста вспышки. Для спектров задержек, соответствующих стадии пика и всей вспышки в целом, аппроксимация проводилась только для монотонно возрастающих участков ввиду малого коли-

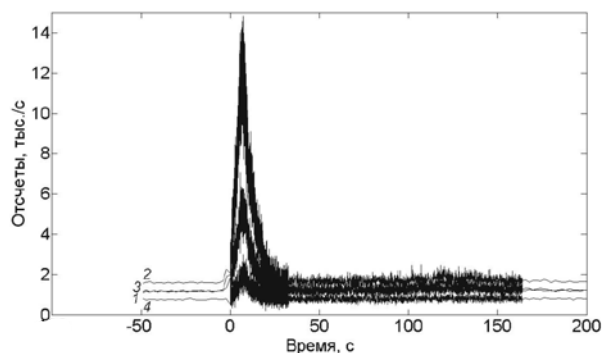


Рис. 5. Временные профили вспышки 2704 (см. таблицу) для четырех энергетических каналов, кэВ: 24,1 – 33,1 (1), 42,8 – 57,6 (2), 75,7 – 100,6 (3), 125,5 – 166,5 (4)

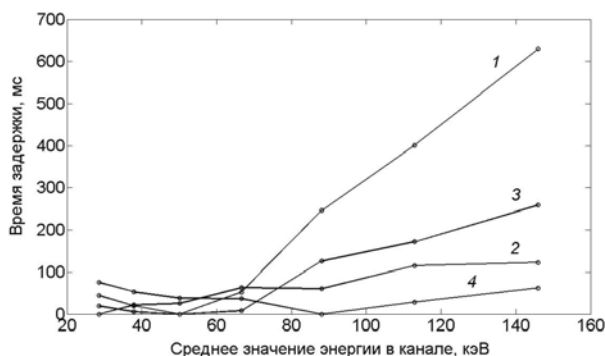


Рис. 6. Спектры задержек всплеска 2704 (см. таблицу) для всего профиля (1) и тех же стадий (2 – 4), что на рис. 2 и 4 (см. рис. 5)

чества точек. Значения показателя степени составили +2,18 (для стадии пика) и +2,29 (для всей вспышки). Зависимость задержек от величины энергии для стадии спада аппроксимировалась степенным законом на участке, соответствующем убыванию величины задержек с ростом энергии, и значение показателя степени составило $\alpha = -1,37$.

Обсуждение результатов

Рассмотрим возможные причины возникновения временных задержек жесткого рентгеновского излучения разных энергий. Очевидно, что эти задержки могут быть связаны с процессами ускорения, инжекции и распространения электронов, их излучением во вспышечной плазме. В настоящее время затруднительно ответить точно на вопрос о темпе набора энергии электронами в момент непосредственного ускорения. Остается также неясным вопрос о локализации области ускорения: согласно стандартной модели, ускорение происходит в короне единым образом. Однако в этой модели остается нерешенной проблема ускорения большого числа частиц до релятивистских скоростей. В короне их просто недостаточно. Поэтому предполагается существование второго этапа ускорения частиц: на МГД-волнах. При этом возникает естественный вопрос о темпе набора энергии заряженными частицами в рамках данной модели. Если предположить, что ускорение электронов происходит в продольном электрическом поле (без учета потерь энергии) с характерным масштабом L (размер магнитного «острова»), то время

набора энергии t^{acc} связано с кинетической энергией E соотношением

$$t^{\text{acc}} = (L/c)(\gamma^2 - 1)^{1/2}/(\gamma_{\text{max}} - 1),$$

где $\gamma = 1 + E/mc^2$ – Лоренц-фактор электрона.

Если сравнить времена ускорения электронов в продольном электрическом поле до энергий 20 и 100 кэВ, то получим отношение $t_{100}/t_{20} = 1,33$. Таким образом, задержка t_{100} в ускорении высокоэнергичных электронов может быть связана со временем t_{20} (ускорение до энергий 20 кэВ) соотношением

$$t_{100} = 0,33t_{20}.$$

Например, если $t_{20} = 100$ мс (что следует в настоящее время из наблюдений [1]), то задержка электронов с энергией 100 кэВ составит 33 мс.

Второй тип задержек связан с зависимостью времени пролета электронов от области ускорения (по всей видимости, в короне) до области ЖРИ (в хромосфере) от энергии электронов примерно как $E^{-1/2}$. Менее энергичные, т. е. с энергией 20 кэВ, электроны запаздывают на 20 мс по отношению к электронам с энергией больше 50 кэВ. Обратный характер задержек имеет место в модели описания частиц, захваченных в петельной структуре магнитного поля, с последующим их высыпанием в область подножий [4]. Время пребывания электронов в магнитной ловушке в приближении слабой диффузии, так же как и время парных соударений, пропорционально энергии в степени 3/2. Скорее всего, характер распространения ускоренных электронов во вспышечных петлях – более сложный [6 – 13], и простые закономерности для времени задержек могут не выполняться.

Проанализируем полученные результаты. Прежде всего отметим, что величина задержек изменяется от десятков миллисекунд до секунды. Максимальная величина задержек на стадии нарастания скорости счета ЖРИ составляет около 100 мс и возрастает до 1400 мс на стадии пика излучения. Более важным фактом является энергетическая зависимость спектра задержек (см. рис. 2, 4 и 6). Для вспышки 284, по каталогу BATSE на стадии роста интенсивности ЖРИ, аппроксимация спектра степенным законом приводит к значению показателя степени,



равному 1,5. Подобный спектр характерен для модели «захваченных частиц». Другими словами, можно предположить, что в начальный момент ускоренные электроны распределены преимущественно по поперечным импульсам. Они инжектируются в магнитную петлю с наличием точек отражения и становятся захваченными, совершая движение в магнитном поле между точками отражения. Питч-угол электронов уменьшается со временем в результате кулоновских соударений, а возможно, и при взаимодействии с МГД-волнами; это приводит к высыпанию в конус потерь и генерации жесткого рентгеновского излучения. Обратная ситуация должна иметь место на фазе пика скорости счета, когда ускорение происходит более эффективно и приводит к распределению электронов уже преимущественно по продольным импульсам. В этом случае более существенным для времени задержек является пролет электронов вдоль вспышечной петли. Он не может быть свободным, поскольку концентрация плазмы в петле возрастает примерно от 10^{10} до 10^{13} см⁻³. Более того, некоторый вклад в величину задержек продолжают вносить отраженные электроны, и потому спектр задержек вряд ли должен соответствовать степенному закону с показателем, равным $-0,5$. Полученный при анализе спектров закон изменения задержек от уровня энергии и на стадии пика, и для всей вспышки в целом (см. рис. 2, кривые 2, 3 и 4) выражается степенной функцией с показателем степени $\alpha = -2$.

Более сложный характер спектра задержек получен нами для вспышки 2704 по

каталогу BATSE (см. рис. 6). На стадии нарастания скорости счета (кривая 1) спектр задержек по-прежнему аппроксимируется степенным законом с показателем, совпадающим (в пределах ошибки) с величиной 1,5. Другими словами, процесс ускорения на начальной фазе вспышки подобен такому во вспышке 284. Однако на последующих фазах эволюции вспышки динамика ускорения и переноса электронов становится довольно сложной. Распределение высокоэнергичных электронов (выше 50 кэВ) по-прежнему остается преимущественным для поперечных импульсов, в то время как на меньших энергиях распределение по импульсам носит продольный характер. Хотя показатели степени аппроксимирующих функций для спектров, равные $\alpha = +2,2$ и $\alpha = -1,37$, не соответствуют ни значению 1,5, ни значению $-0,5$.

Итак, проведенный нами анализ показывает необходимость дальнейших исследований временных задержек с привлечением данных, относящихся к высокому энергетическому разрешению, для построения более детального спектра временных задержек жесткого рентгеновского излучения. Кроме того, следует рассмотреть характер и закономерности временных задержек в различных моделях как инъекции, так и распространения ускоренных электронов в плазме вспышечных петель.

Данные исследования проведены при частичной поддержке грантами Президиума РАН № 22 и Федеральной целевой программы «Кадры 1.5» N8524.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aschwanden, M.J.** Particle acceleration and kinematics in solar flares [Текст]/ M.J. Aschwanden // Space Sci. Rev. — 2002. — Vol. 101. — № 1. — P. 1–227.
2. **Aschwanden, M.J.** Electron time-of-flight differences in solar flares [Текст]/ M.J. Aschwanden, R.A. Schwartz, D.M. Alt// Astrophys. J. — 1995. — Vol. 447. — № 2. — P. 923–935.
3. **Aschwanden, M.J.** Accuracy, uncertainties and delay distribution of electron time-of-flight measurements in solar flares [Текст]/ M.J. Aschwanden, R.A. Schwartz// Astrophys. J. — 1995. — Vol. 455. — № 2. — P. 699–715.
4. **Ashwanden, M.J.** Electron trapping times and trap densities in solar flare loops measured with Compton and Yohkoh [Текст] / M.J. Aschwanden, R.V. Bynum, T. Kosugi T., [et al.]// Astrophys. J. — 1997. — Vol. 487. — № 2. — P. 936–955.
5. База данных NASA [Электронный ресурс]: NASA database. — Режим доступа: ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/compton/data/batse.
6. **Petrosian, V.** On the spatial distribution of hard X-rays from solar flare loops [Текст]/ V. Petrosian, T.Q. Donaghy//Astrophys. J. — 1999. — Vol. 527. — P. 945 – 957.
7. **Petrosian, V.** Stochastic acceleration of electrons and protons. I. Acceleration by parallel-propagating waves [Текст]/ V. Petrosian, S. Liu // Astrophys. J. — 2004. —Vol. 610. — P. 550 – 571.
8. **Stepanov, A.V.** Electron-whistler interaction

in coronal loops and radiation signatures [Текст] /A.V. Stepanov, Y.T. Tsap//Solar Physics.—2002. —Vol. 211. — P. 135–154.

9. **Fletcher, L.** A model for hard X-ray emission from the top of flaring loops [Текст] / L. Fletcher, P.C.H. Martens // *Astrophys. J.*—1998. — Vol. 505. — P. 418–431.

10. **Chen, B.** The role of inverse Compton scattering in solar coronal hard X-ray and γ -ray sources [Текст]/ B. Chen, T.S. Bastian//*Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 750. P. 35 (16 p).

11. **Charikov, Yu.E.** Intensity and polarization of the hard X-ray radiation of solar flares at the top and footpoints of a magnetic loop [Текст]/

Yu.E. Charikov, V.F. Mel'nikov, I.V. Kudryavtsev// *Geomagnetism and Aeronomy.* — 2012. —Vol. 52. — P. 1021–1031.

12. **Kudryavtsev, I.V.** Hard X-rays of relativistic electrons accelerated in solar flares [Текст] / I.V. Kudryavtsev, Yu.E. Charikov//*Geomagnetism and Aeronomy.* — 2012. —Vol. 52. — P. 875–882.

13. **Zharkova, V.V.** Diagnostics of energetic electrons with anisotropic distributions in solar flares. I. Hard X-rays bremsstrahlung emission [Текст]/ V.V. Zharkova, A.A. Kuznetsov, T.V. Siversky// *Astronomy and Astrophysics.* — 2010. — Vol. 512. — P. A8 (18 p.)

REFERENCES

1. **Aschwanden M.J.** Particle Acceleration and Kinematics in Solar Flares. *Space Sci. Revs.*, 2002, vol. 101, № 1, pp. 1-227.

2. **Aschwanden M.J., Schwartz R.A., Alt D.M.** Electron time-of-flight differences in solar flares. *Astrophys. J.*, 1995, vol. 447, № 2, pp. 923–935.

3. **Aschwanden M.J., Schwartz R.A.** Accuracy, uncertainties and delay distribution of electron time-of-flight measurements in solar flares. *Astrophys. J.*, 1995, vol. 455, № 2, pp. 699–715.

4. **Aschwanden V.J., Bynum R.V., Kosugi T., Hudson H.S., Schwartz R.A.** Electron trapping times and trap densities in solar flare loops measured with Compton and Yohkoh. *Astrophys. J.*, 1997, vol. 487, pp. 936–955.

5. **NASA database.** Available at: ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/compton/data/batse.

6. **Petrosian V., Donaghy T.Q.** On the Spatial Distribution of Hard X-Rays from Solar Flare Loops. *Astrophys. J.*, 1999, vol.527, pp. 945-957.

7. **Petrosian V., Liu S.** Stochastic Acceleration of Electrons and Protons. I. Acceleration by Parallel-Propagating Waves. *Astrophys. J.*, 2004, vol. 610,

pp. 550–571.

8. **Stepanov A.V., Tsap Y.T.** Electron-Whistler Interaction in Coronal Loops and Radiation Signatures. *Solar Physics*, 2002, vol.211, pp.135–154.

9. **Fletcher L., Martens, P.C.H.** A Model for Hard X-Ray Emission from the Top of Flaring Loops. *Astrophys. J.*, 1998, vol.505, pp. 418–431.

10. **Chen B., Bastian T.S.** The Role of Inverse Compton Scattering in Solar Coronal Hard X-Ray and γ -Ray Sources. *Astrophys. J.*, 2012, vol.750:35, (16pp).

11. **Charikov Yu.E., Mel'nikov V.F., Kudryavtsev I.V.** Intensity and polarization of the hard X-ray radiation of solar flares at the top and footpoints of a magnetic loop. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, vol.52, pp. 1021–1031.

12. **Kudryavtsev I.V., Charikov Yu.E.** Hard X rays of relativistic electrons accelerated in solar flares. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, vol.52, pp. 875–882.

13. **Zharkova V.V., Kuznetsov A.A., Siversky T.V.** Diagnostics of energetic electrons with anisotropic distributions in solar flares. I. Hard X-rays bremsstrahlung emission. *Astronomy and Astrophysics*, 2010, vol.512, A8, 18p.

ЧАРИКОВ Юрий Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры космических исследований Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, старший научный сотрудник лаборатории космических лучей Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
y.charikov@yandex.ru

ГЛОБИНА Вероника Игоревна — студентка Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
gvi1109@gmail.com

СКЛЯРОВА Елена Михайловна — научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
sklyarova.mhd@mail.ioffe.ru