

DOI: 10.5862/JPM.218.15

УДК: 523.985.3

Ю.Е. Чариков^{1,2}, В. И. Глобина³,
А.Н. Шабалин², Е.П. Елфимова¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

³ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Исследованы временные задержки жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ), зарегистрированного спектрометром BATSE во время солнечных вспышек. Для 82 вспышек получены спектры задержек: спадающие, возрастающие и U -образные с ростом энергии квантов. Интерпретация спектров задержек ЖРИ проведена на основе модели кинетики ускоренных электронов, которые распространяются во вспышечной петле. Решение нестационарного уравнения Фоккера – Планка позволило определить функцию распределения электронов вдоль петли во времени. Распределение яркости ЖРИ вдоль вспышечной петли использовано для построения спектров временных задержек. Показано, что спадающие спектры временных задержек поддаются интерпретации, если допустить пространственное разделение областей ускорения и инжекции электронов. Установлено различие спектров временных задержек ЖРИ из вершины и оснований вспышечной петли, поэтому необходимо проведение регулярных измерений ЖРИ с высоким пространственным разрешением.

СОЛНЦЕ, ВСПЫШКА, РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЭЛЕКТРОН, ВРЕМЕННАЯ ЗАДЕРЖКА.

Введение

Анализ временных задержек вспышечного электромагнитного излучения в широком диапазоне энергий позволяет получать информацию не только о динамике энергетических спектров, но и об особенностях процессов ускорения и распространения электронов в петельных структурах магнитного поля во время солнечных вспышек. Впервые детальное исследование временных задержек ЖРИ было выполнено на основе измерений на спутнике Compton спектрометром BATSE [1, 2]. Высокое временное разрешение спектрометра BATSE позволило определить значения задержек, лежащих в пределах от миллисекунд до

секунд, и проанализировать их энергетический спектр. В работах [1, 2] ставилась задача обнаружить зависимость спектра задержек от энергии ЖРИ конкретного вида $E^{-0,5}$ или $E^{1,5}$ (E – среднее значение энергии электронов в каждом канале), что соответствовало бы гипотезе (альтернативе) свободного пролета электронов во вспышечной петле либо захвата электронов в петле с последующим их высыпанием в конус потерь.

Следует отметить, что ожидаемые зависимости спектров задержек от энергии получены в упрощенных предположениях о переносе и излучении ускоренных электронов в плазме солнечных вспышек.

К тому же спектрометр BATSE не обладал пространственным разрешением и поэтому регистрировал излучение со всей петли в целом. На самом деле процессы ускорения электронов, их инжекция, перенос и тормозное излучение влияют на спектр задержек в целом, и поэтому маловероятно ожидать зависимостей, указанных выше. Кроме того, спектры задержек, скорее всего, должны быть различными в вершине петли и ее основаниях.

Исходя из вышеизложенного, в данной работе рассмотрена более реальная задача получения и интерпретации спектров временных задержек как из петли в целом, так и из ее различных частей.

Методика обработки временных рядов жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек

Методика обработки экспериментальных данных, полученных с помощью спектрометра BATSE для простых одноимпульсных событий, описана в статье [3]. Основа методики состоит в построении взаимной корреляционной функции (ВКФ) для всех пар временных рядов из рассматриваемого энергетического диапазона 20 кэВ – 2 МэВ с последующей интерполяцией трех точек вблизи ее максимума полиномом второй (четвертой) степени.

В настоящей работе, в отличие от методики работы [3], при построении спектров задержек солнечных вспышек по измерениям BATSE [4] проведена оценка ошибки значений времени задержки по методу Монте-Карло. Данные BATSE содержат массивы ошибок, связанных с определением скорости счета квантов для каждой вспышки. Вычисление ошибки значений задержек производится для $N = 100$ (N – число итераций). На основе данных BATSE на каждой итерации генерируются временные ряды с гауссовым разбросом числа отсчетов в каждом бине и определяется значение времени задержки. Затем полученные значения сортируются в порядке возрастания и нумеруются от 1 до 100 (в общем случае, от 1 до N). В качестве итогового значения времени задержки t_d берется величина, соответствующая номеру 50 ($N/2$). Нижняя и

верхняя границы доверительного интервала на уровне 68 % определяются величинами, стоящими под номерами 16 ($N \cdot 0,16$) и 84 ($N \cdot 0,84$), соответственно ($t_{d\text{dn}}$ и $t_{d\text{up}}$). Ошибка находится по формуле

$$\Delta = \{(1/2) \cdot [(t_{d\text{up}} - t_d)^2 + (t_d - t_{d\text{dn}})^2]\}^{1/2}.$$

Еще одним важным дополнением при изучении временных задержек ЖРИ солнечных вспышек по данным BATSE явилось рассмотрение многопиковых событий (ранее отбирались лишь однопиковые вспышки). В этом случае корреляционный анализ проводился как для всего временного ряда, так и для отдельных импульсов после разложения многопиковой структуры ЖРИ. При разложении комплексной временной структуры ЖРИ возникает проблема выбора формы импульса, на которые раскладывается исходный профиль. В данной работе нами выбрана форма, которая наблюдается чаще остальных среди единичных импульсов короткой длительности; она имеет резкий рост и плавный спад. Для описания такой формы импульса была выбрана следующая функция:

$$f = \begin{cases} y = y_0 + He^{-0,5\left(\frac{x-x_c}{w_1}\right)^2} (x < x_c); \\ y = y_0 + He^{-0,5\left(\frac{x-x_c}{w_2}\right)^2} (x > x_c), \end{cases}$$

где $y(x)$ описывают контур кривой импульса; y_0 – уровень шума; H – высота максимума; w_1, w_2 – параметры формы импульса; x_c – положение на оси x .

Коэффициент, определяющий отношение параметров w_1 и w_2 , которые обуславливают форму импульса, был найден из аппроксимации вспышки 2028 по каталогу BATSE (30.10.92, 22:53:31 UT). Далее на примере вспышки 1450 по каталогу BATSE (29.02.1992, 7:39:48 UT, рентгеновский класс GOES C1.7), мы рассмотрим разложение ЖРИ на отдельные импульсы. Временные профили выбранной вспышки представлены на рис. 1, а. Количество импульсов разложения выбирается конкретно для каждой вспышки так, чтобы интегральная кривая повторяла исходный временной профиль. Структурный профиль вспышки 1450 был разложен на пять импульсов (рис. 1, б).

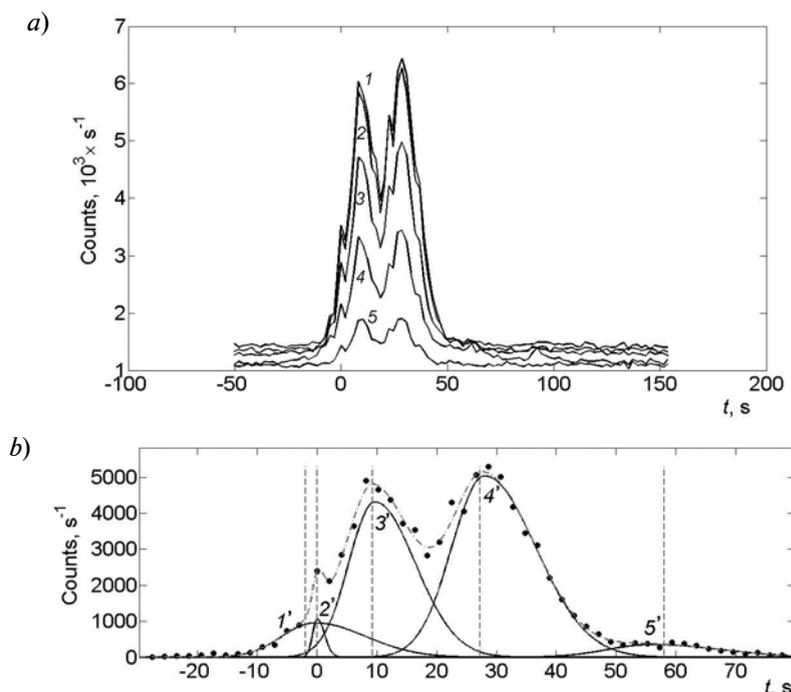


Рис. 1. Временные профили (1 – 5) солнечной вспышки 1450 (a) и разложение ее профиля 1 на пять импульсов (1' – 5') (b)

При анализе этой вспышки сравнение задержек проведено только для наиболее мощных импульсов (3', 4' на рис. 1, b).

Результаты анализа временных задержек солнечных вспышек по данным спектрометра BATSE

Банк данных BATSE содержит ЖРИ солнечных вспышек за период с апреля 1991 по май 2000 года [4]. Анализ временных задержек был проведен для 82 вспышек, имеющих однопиковую структуру. Полученные спектры задержек можно разделить на три типа по виду функциональной зависимости от энергии квантов: спадающий, растущий и U-образный. Незначительное количество вспышек имеет неопределенный спектр, который нельзя отнести к какому-либо классу (8 событий неопределенного типа). Распределения исследованных солнечных вспышек по типам спектров задержек и по максимальной величине времени задержки показаны на гистограммах рис. 2.

Вспышка 2028 по каталогу BATSE. На рис. 3, a приведены временные профили вспышки 2028. Она произошла 30.10.1992

года, ее начало зарегистрировано в 22:53:31 UT (UT – всемирное время), рентгеновский класс – X1.2. Профили ЖРИ на разных энергиях представляли собой одиночные всплески. Длительность всплесков разных энергий в среднем составляла 30 с; число энергетических каналов, в которых анализировали скорость счета, равно 5; диапазон энергий составлял от 24,1 до 100,6 кэВ.

На рис. 3, a видно, что в данном событии фоновое излучение измерялось длительное время как до, так и после самого всплеска. Поэтому задачу определения фона можно было решить аккуратно. После вычитания фона мы вычисляли парную ВКФ для всех пяти каналов, определяли временные задержки и строили их спектр по отношению к самому «быстрому» энергетическому каналу. На рис. 3, b показан полученный спектр временных задержек. Он выражен монотонно спадающей функцией по всему рассматриваемому диапазону энергий, и его можно аппроксимировать степенной функцией с показателем степени $\alpha = -2,28$.

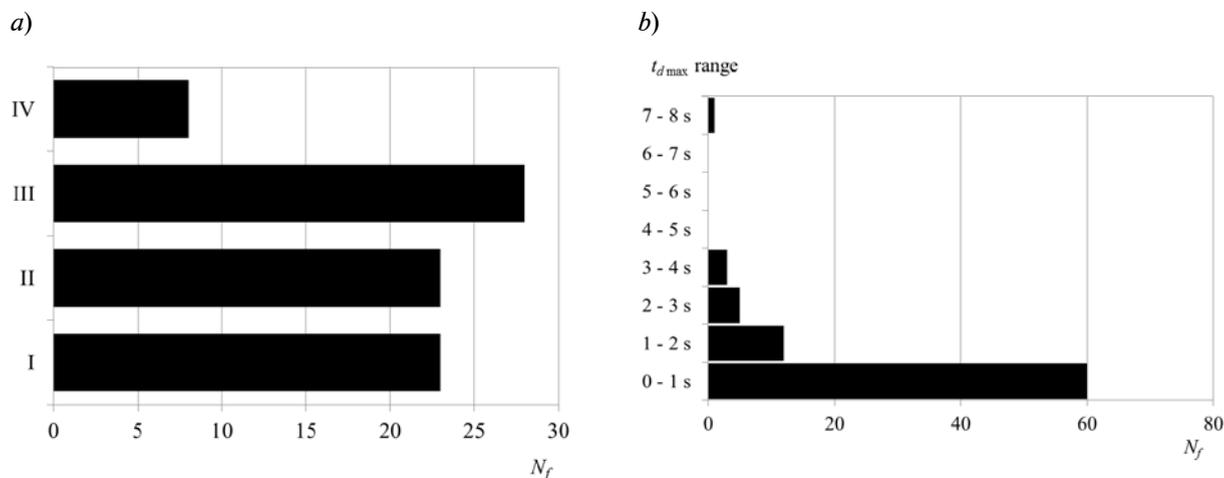


Рис. 2. Гистограммы распределения выбранных 82 солнечных вспышек по типам спектров задержек I – IV (a) и по максимальной величине времени задержки $t_{d \max}$ (b); N_f – количество солнечных вспышек; $t_{d \max}$ range – диапазон значений $t_{d \max}$; I, II, III, IV – типы спектров задержек: растущий, U-образный, спадающий, неопределенный, соответственно

Вспышка 1266 по каталогу BATSE. Эта вспышка произошла 02.01.1992 года, ее начало – 06:51:53 UT, рентгеновский класс – C6.6. Временные профили вспышки показаны на рис. 4, a. В разных энергетических каналах они представляют собой одиночный всплеск общей длительностью около 30 с. В данном событии анализировали ЖРИ из четырех энергетических каналов; энергетический диапазон составлял от 24,0 до 166,2 кэВ. Рентгеновский фон, как и в предыдущем случае, мог быть аккуратно вычислен. Построение ВКФ и определение парных задержек позволило построить спектр временных задержек для данного

всплеска (рис. 4, b). Спектр задержек для рассматриваемой солнечной вспышки оказался монотонно растущим и также был аппроксимирован степенной функцией, но с показателем степени $\alpha = 1,88$.

Вспышка 270 по каталогу BATSE. Примером вспышки, имеющей U-образный спектр временных задержек, может служить вспышка N 270. Вспышка произошла 05.06.1991 г., начало – в 00:00:20 UT, рентгеновский класс – M. Временные профили вспышки показаны на рис. 5, a. Как и в случае предыдущего всплеска, анализировалось ЖРИ из четырех энергетических каналов (25,4 – 160,2 кэВ). Профили ЖРИ

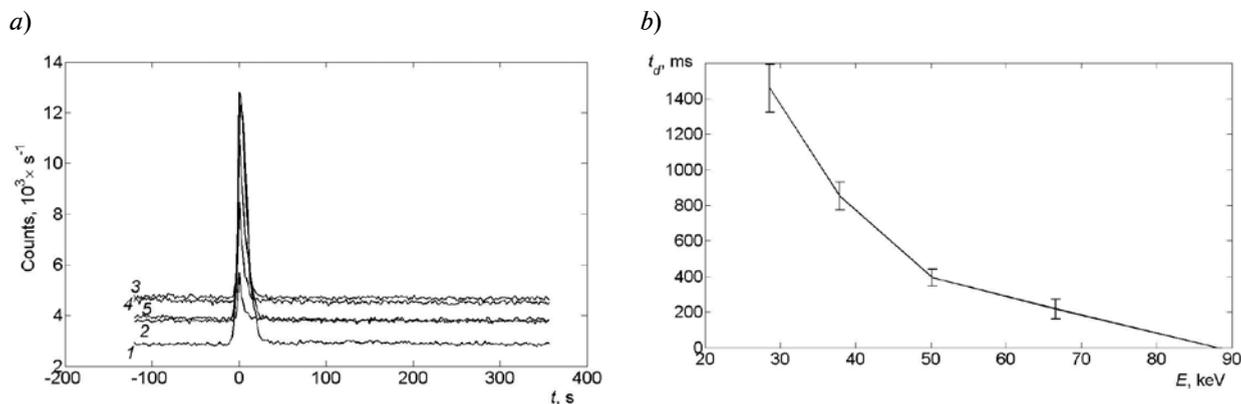


Рис. 3. Временные профили (1 – 5) вспышки 2028 (a) и полученный спадающий спектр ее временных задержек (b); E – среднее значение энергии в канале; t_d – время задержки, Counts – отсчеты

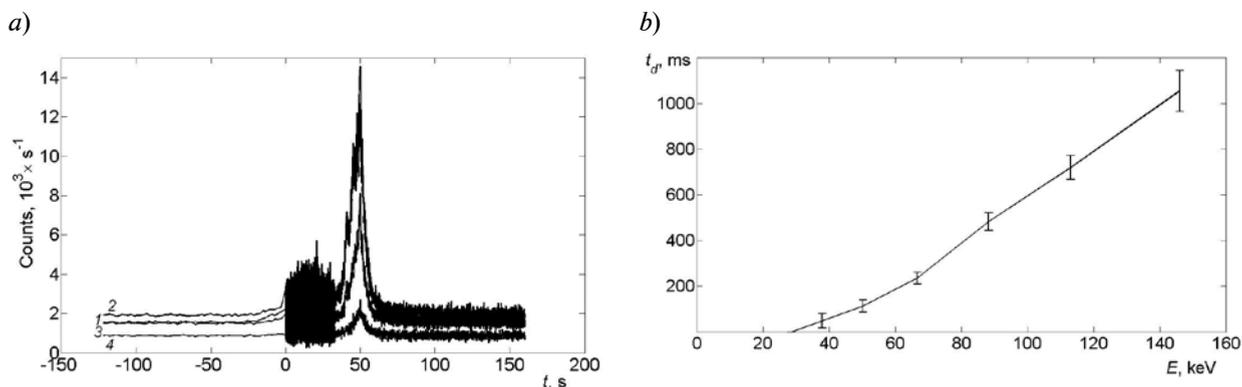


Рис. 4. Временные профили из четырех энергетических каналов для вспышки 1266 (a) и полученный растущий спектр ее временных задержек (b)

на разных энергиях также выражены одиночными всплесками. Общая длительность всплеска составила в среднем около 100 с. ЖРИ измерялось до и после всплеска, что позволяет точно определить фон рентгеновского излучения. Спектр задержек для данного всплеска приведен на рис. 5, b. Он состоит из двух частей: монотонно спадающей и растущей. Как следует из вида спектра, первыми регистрировались фотоны в канале со средней энергией 83,2 кэВ.

Спадающую ветвь спектра можно аппроксимировать степенной функцией, при этом значение показателя степени составляет $\alpha = -2,09$.

Для многопиковых временных профилей был проведен анализ семи событий. Исходя из предположения о том, что акты ускорения происходят последовательно, мы проводили сравнение спектров временных задержек отдельных импульсов с

интегральным спектром задержек; это позволяло выяснить, насколько идентичны процессы ускорения электронов во времени. Среди обработанных данных встретились такие вспышки, для которых виды спектров задержек отдельных импульсов и интегрального совпадают, и такие, для которых они не совпадают. Пример указанного совпадения (вспышка 1450 по каталогу BATSE) приведен на рис. 6. В случае совпадения можно сделать вывод о подобии процессов в ускорителе. В противном случае, по-видимому, темп и механизмы ускорения были различными для отдельных импульсов в одной вспышке.

Модель переноса и инжекции ускоренных электронов в магнитной петле

Для интерпретации полученных значений временных задержек ЖРИ и их спектров рассмотрим модель кинетики уско-

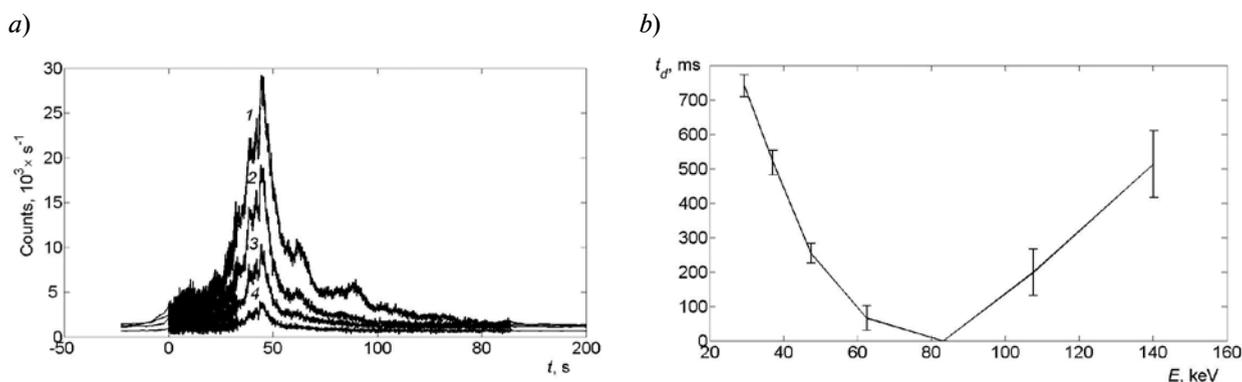


Рис. 5. Временные профили вспышки 270 (a) и полученный U-образный спектр ее временных задержек (b)

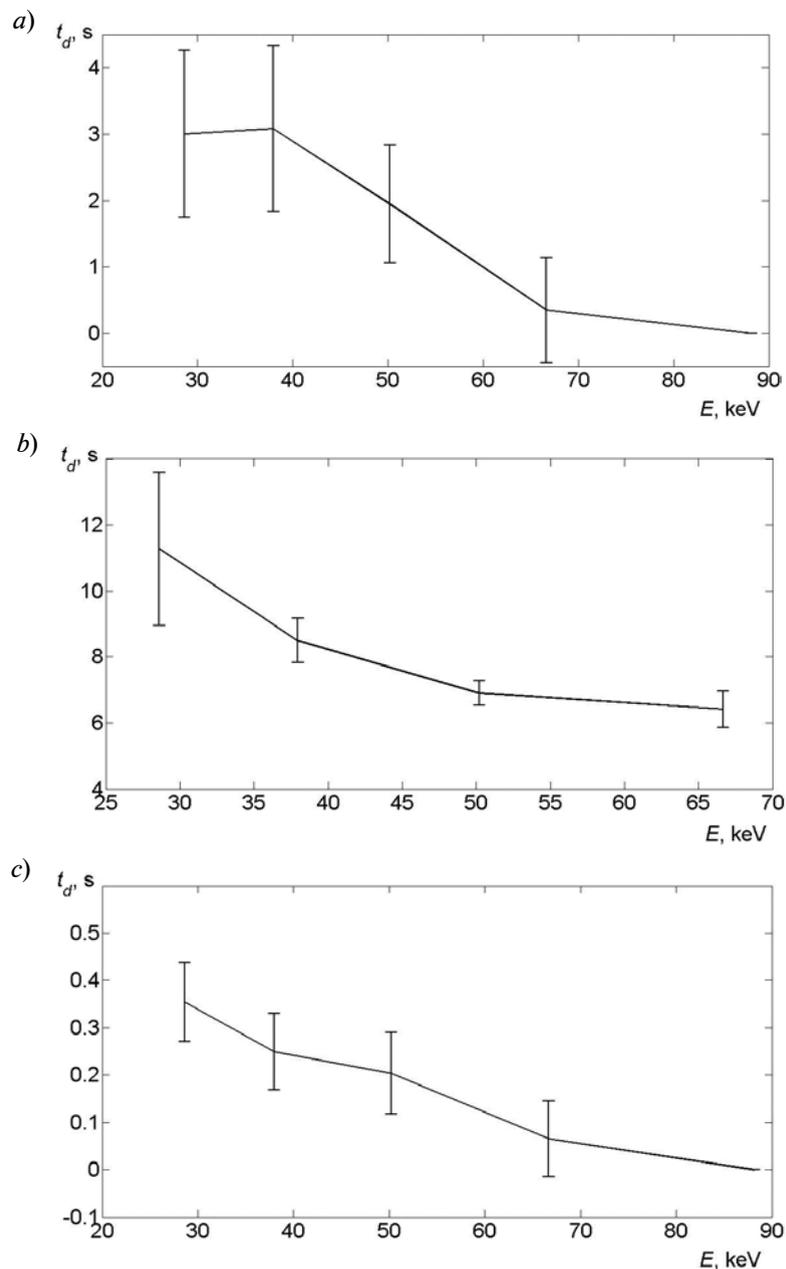


Рис. 6. Сравнение спектров задержек отдельных импульсов вспышки 1450 (*a*, *b*) с ее интегральным спектром (*c*); *a*, *b* – данные для импульсов 3' и 4'

ренных электронов в магнитных петлях во время солнечных вспышек [5 – 8]. Процессы ускорения, инжекции и переноса ускоренных электронов в плазме в магнитной петле во время солнечных вспышек еще далеки в настоящее время от ясной и четкой интерпретации. Последние данные наблюдений жесткого рентгеновского и микроволнового излучений [10, 11] с высоким

пространственным разрешением позволяют предположить, что для вспышечной области характерна определенная геометрия. Однако локализация процесса ускорения частиц в этой геометрии еще не выяснена.

В различных моделях кинетики пучка электронов в плазме вспышечной петли [6 – 9] предполагается совмещенность областей ускорения и инжекции. Мы рассмо-

трели как этот случай, так и модель, согласно которой процесс ускорения происходит высоко в короне в токовом слое при пересоединении силовых линий магнитного поля. В процессе ускорения в токовом слое формируется распределение электронов по углам и энергиям. В то время как распределение по энергиям чаще всего принимается в виде степенной функции, угловая часть распределения остается неизвестной и поэтому задается модельным образом.

Будем полагать, что электроны из токового слоя с некоторым питч-угловым и энергетическим распределениями устремляются вдоль магнитного поля вниз по направлению к хромосфере без рассеяния и потерь энергии (тонкая мишень). Процесс инжекции мы связываем с переходом электронов в область замкнутой петли (например, в результате формирования замкнутой магнитной конфигурации либо дрейфового движения электронов) в коронально-хромосферной конфигурации магнитного поля. Высота области ускорения над вершиной замкнутой петли является параметром задачи, и она выбиралась нами, исходя из длины замкнутой петли, т. е. и ожидаемого времени задержек в сотни миллисекунд.

Таким образом, на первом этапе движение электронов представляет собой свободный разлет ускоренных электронов в корональной части магнитного поля в разреженной плазме. В дальнейшем ускоренные электроны могут захватываться в магнитную ловушку и «уходить» в конус потерь, в соответствии с питч-угловым распределением и условиям в плазме петли, а именно – распределению концентрации плазмы и конфигурации магнитного поля. Обратим внимание, что в отличие от более ранних работ по кинетике пучков [5 – 9], предложенная нами модель предполагает комбинированное начальное условие по времени, зависящее также и от энергии электронов, что связано с их пролетом от области ускорения до области инжекции. Поскольку из наблюдений достаточно сложно определить пространственную локализацию области ускорения и инжекции ускоренных электронов, мы рассматривали

модели с разделенными ($l_r \neq 0$) и совмещенными в пространстве ($l_r = 0$) областями ускорения и инжекции.

Результаты численного моделирования спектров временных задержек

Кинетика ускоренных электронов описывается нестационарным релятивистским уравнением Фоккера – Планка [5]. В модели с разнесенными областями ускорения и инжекции электронов временная часть функции распределения электронов выглядит как $S_4(t(E))$, аргумент t имеет сдвиг, зависящий от энергии как $E^{-1/2}$. Рассматривалось три типа инжекции в вершине замкнутой петли:

- изотропная инжекция;
- инжекция в узкий конус, по направлению к одному из оснований петли;
- симметричная двухпучковая инжекция, с угловой частью вида $\cos^6\alpha$.

Первоначально для всех моделей рассчитывалась функция распределения ускоренных электронов во времени и пространстве, вдоль петли. Поскольку целью статьи является расчет только временных задержек ЖРИ, здесь не приведены результаты расчета функции распределения, хотя они и представляют самостоятельный интерес. Полученные распределения, свернутые с релятивистским сечением тормозного излучения, позволили рассчитать распределение рентгеновской яркости вдоль магнитной петли, энергетические спектры ЖРИ, их динамику и, наконец, временные задержки.

Систематизированные кривые расчетных спектров временных задержек приведены на рис. 7, а исходные параметры моделей с номерами кривых даны в таблице.

На рис. 7, а показан интегральный по петле спектр задержек, рассчитанный по модели изотропной инжекции. Из него следует, что спектры задержек являются растущими с ростом энергии квантов как в модели с удаленным ускорителем электронов ($l_r = 1,5 \cdot 10^7$ см, кривая 2), так и в модели с совмещенным с инжектором ускорителем ($l_r = 0$, кривая 1); величина задержек монотонно возрастает до 520 и 620 мс, соответственно.

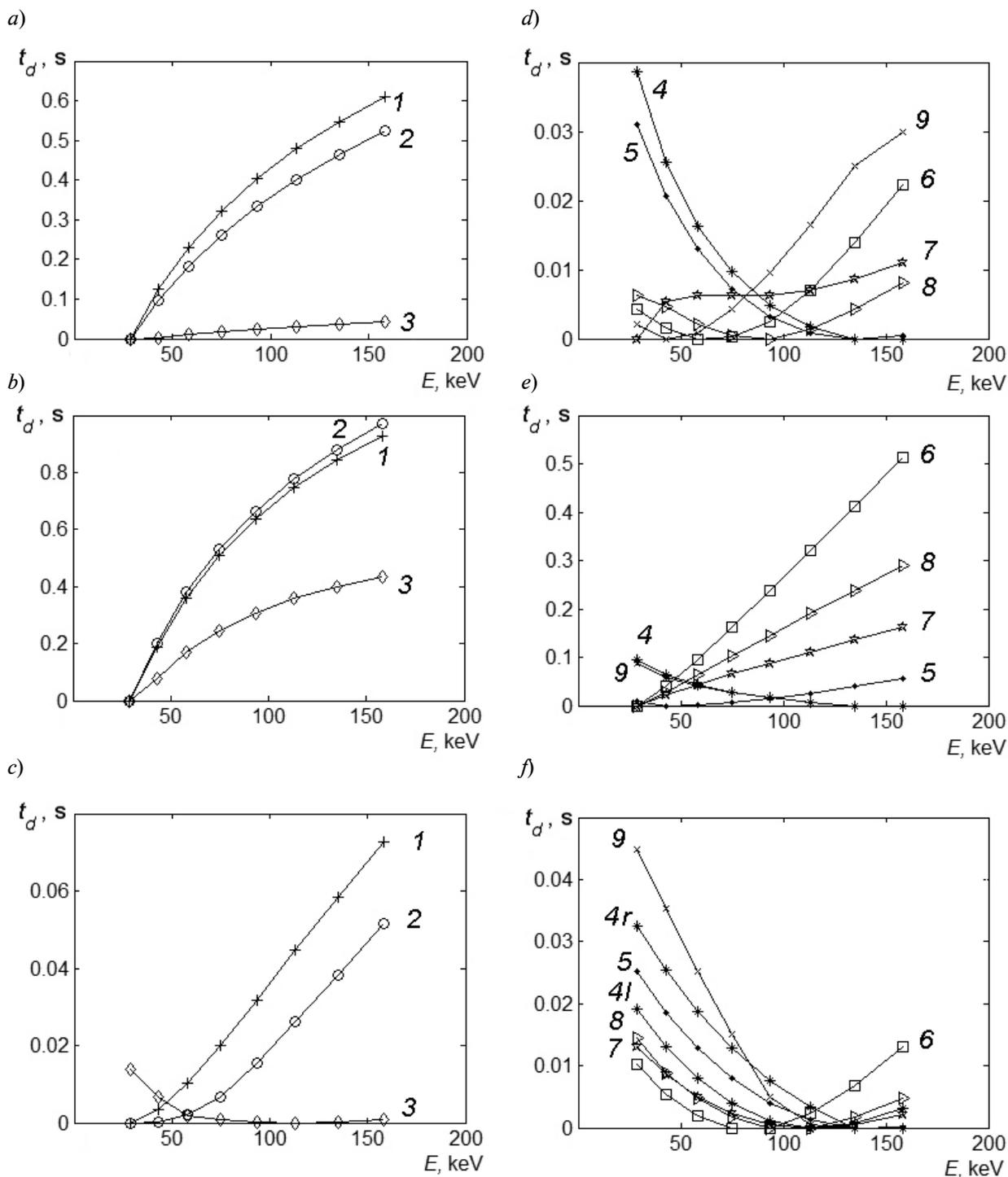


Рис. 7. Результаты расчетов спектров временных задержек ЖРИ по моделям изотропной (a – c) и анизотропной двухлучковой (d – f) инжекции электронов в плазму магнитной петли. Сопоставлены спектры для вершин (b, e) и подножий (c, f) петли с интегральными спектрами по всей петле (a, d).

Заданные угловые распределения электронов и расчетные параметры задачи представлены в таблице

Таблица

Заданные угловые распределения энергии электронов и параметры моделирования спектров временных задержек (рис. 7)

Номер кривой	$S(\alpha)$	l_r , м	t_0 , с	b_1 , м
1	1	0	1,4	0
2		$1,5 \cdot 10^7$	1,4	
3		$1,5 \cdot 10^7$	0,5	
4/4l/4r	$\cos^6\alpha$	$1,5 \cdot 10^7$	0,5	$-1,0 \cdot 10^7$
5		$1,5 \cdot 10^7$	0,5	0
6		$1,5 \cdot 10^7$	1,4	
7		0	0,5	
8		$1,0 \cdot 10^7$	0,8	
9		$\exp[(\alpha - \alpha_1)^2/\alpha_0^2]$	$1,5 \cdot 10^7$	

Обозначения: $S(\alpha)$ – заданное угловое распределение электронов по энергии для определенного типа инъекции в магнитную петлю, $\alpha_0 = 36^\circ$, $\alpha_1 = 0^\circ$, l_r – длина замкнутой магнитной петли, b_1 – величина сдвига минимума магнитного поля относительно геометрической вершины петли, $4l$ – левое основание, $4r$ – правое основание.

Для модели с меньшей длительностью инъекции ($t_0 = 0,5$ с, кривая 3) спектр задержек нарастает до меньших значений – 50 мс. Отметим, что определенные ранее из наблюдений спадающий и U -образный спектры задержек получить с помощью этих моделей не удастся.

В вершине петли характер задержек повторяет интегральные кривые спектров задержек (см. рис. 7, *b*), величина задержек несколько большая: максимальные значения составляют около 1 с. На рис. 7, *c* показаны кривые задержек из оснований магнитной петли. Важно обратить внимание на изменение характера спектра для коротких импульсов инъекции ($t_0 = 0,5$ с); видно, что нарастающий спектр сменился спадающим для модели с удаленным по петле ускорителем частиц. Однако это не повлияло на вид интегрального спектра задержек (см. рис. 7, *a*, кривая 3), что свидетельствует о преимущественном вкладе в общий поток ЖРИ из вершины и промежуточных областей магнитной петли.

Для анизотропной двухпучковой инъекции, в случае удаленного процесса ускорения, расчеты показали U -образный тип интегральных спектров временных за-

держек (рис. 7, *d*). Различие между этими спектрами определяется, в первую очередь, длительностью процесса инъекции. В случае более длительной инъекции ($t_0 \geq 1$ с) спектры задержек становятся U -образными, причем энергия, соответствующая задержкам, равным нулю, находится в диапазоне 60 – 80 кэВ. При уменьшении длительности инъекции эта энергия смещается в область 140 кэВ и более. В модели совмещенных областей ускорения и инъекции спектр задержек – нарастающий.

На рис. 7, *e* приведены спектры задержек ЖРИ, полученные для вершины петли. Величина задержек несколько большая: она колеблется от десятка до 500 мс; спектры задержек ЖРИ с большей длительностью инъекции оказываются, как и в изотропном случае, растущими с ростом энергии и спадающими для менее длительной инъекции ($t_0 = 0,5$ с). Совсем иной характер спектров в основаниях петли: они спадают с ростом энергии (рис. 7, *f*). Величина задержек составляет от единиц до 50 мс и подобна значениям задержек ЖРИ от всей петли в целом.

Таким образом, различие спектров задержек ЖРИ в разных частях петли

(при наличии соответствующих наблюдений) может стать решающим при выборе модели ускорения электронов, их распространения и излучения в плазме магнитной петли во время солнечных вспышек.

Заключение

Анализ временных задержек жесткого рентгеновского излучения во время солнечных вспышек по данным измерений рентгеновского спектрометра BATSE позволил систематизировать полученные энергетические спектры указанных задержек и выделить из массива данных три типа спектров: растущие, спадающие и U -образные с ростом энергии квантов E . При этом спектры задержек ЖРИ от всей петли в целом для большинства из изученных 82 вспышек не соответствовали ни закону $E^{-1/2}$ (свободный разлет электронов), ни $E^{3/2}$ (модель ловушки с высыпанием). Поэтому в качестве альтернативной была рассмотрена модель кинетики пучка электронов в плазме магнитной петли с разнесенными областями процесса ускорения высоко в короне, в токовом слое и последующей инжекцией

вдоль силовых линий в замкнутую петельную структуру магнитного поля. На момент инжекции электроны с энергией 20 кэВ запаздывали на десятки миллисекунд, по сравнению с электронами более высоких энергий. Дальнейшая динамика электронов в магнитной петле определяется параметрами пучка, плазмы и магнитного поля. Оказалось, что распределение жесткого рентгеновского излучения является неоднородным вдоль петли, а, следовательно, и временные задержки излучения из различных частей петли и их спектр также различаются между собой. Поэтому интегральный спектр задержек ЖРИ по всей петле может принадлежать любому из трех типов. Предлагаемая концепция подтверждается примерным равномерным распределением 82 вспышек по типам спектров задержек.

На наш взгляд, более перспективным для наблюдений является получение и последующий анализ временных задержек ЖРИ, регистрируемых в экспериментах с высоким пространственным разрешением (например, спектрометром RHESSI) из различных частей петли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Aschwanden M.J., Schwartz R.A., Alt D.M.** Electron time-of-flight differences in solar flares // *Astrophysical Journal*. 1995. Vol. 447. Pp. 923–935.
- [2] **Ashwanden V.J., Bynum R.V., Kosugi T., et al.** Electron trapping times and trap densities in solar flare loops measured with Compton and Yohkoh // *Astrophysical Journal*. 1997. Vol. 487. No. 2. Pp. 936–955.
- [3] **Чариков Ю.Е., Глобина В.И., Складова Е.М.** Спектры временных задержек жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным спектрометра BATSE // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2013. № 3 (177). С. 237–244.
- [4] База данных NASA [Электронный ресурс] / NASA database. Режим доступа: <ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/compton/data/batse>.
- [5] **Hamilton R.J., Lu E.T., Petrosian V.** Numerical solution of the time-depending kinetic equation for electrons in magnetized plasma // *Astrophysical Journal*. 1990. Vol. 354. Pp. 726–734.
- [6] **Gorbikov S.P., Melnikov V.F.** The numerical solution of the Fokker-Planck equation for modeling of particle distribution in solar magnetic traps // *Mathematical Modeling*. 2007. Vol. 19. Pp. 112–122.
- [7] **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 & Astrophysics*. 2010. Vol. 512. A8. 18 p.
- [8] **Charikov Yu.E., Melnikov 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. No. 8. P. 1021.
- [9] **Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н., Кудрявцев И.В.** Жесткое рентгеновское излучение ускоренных электронов в петельной структуре магнитного поля во время солнечных вспышек // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2013. № 4-1 (182). С. 154–165.
- [10] **Krucker S., Battaglia M., Cargill P.J., et al.** Hard X-ray emission from the solar corona // *The Astronomy and Astrophysics Review*. 2008.

Vol. 16. Pp. 155–208.

[11] **Нанаока У.** Flares and plasma flow caused

by interacting coronal loops// Solar Physics. 1996.

Vol. 165. No. 2. Pp. 275–301.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru

ГЛОБИНА Вероника Игоревна – аспирантка сектора эволюции звезд Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН.

196140, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65
gvi1109@gmail.com

ШАБАЛИН Александр Николаевич – аспирант лаборатории космических лучей Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН;

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
taoastronomer@gmail.ru

ЕЛФИМОВА Евгения Петровна – студентка ИФНУТ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
elfimovaevgeniya@gmail.com

Charikov Yu.E., Globina V.I., Shabalin A.N., Elfimova E.P. SIMULATION OF HARD X-RAY TIME DELAYS IN SOLAR FLARES.

Hard X-ray radiation (HXR) time-delays have been studied. HXR was recorded during the solar flares using the BATSE spectrometer. The time-delays energy spectra were obtained for 82 flares; the spectra were classified under three species: decreasing spectra, increasing spectra and *U*-shaped ones.

The spectra were interpreted on the basis of a model of kinetics of accelerated electrons propagating in the flaring loop with the given plasma concentration distribution and magnetic field configuration. The kinetics in question is governed by the processes of Coulomb scattering, reflecting in the converging magnetic field, and with the return current factored in. Solving the time-dependent relativistic Fokker – Planck equation for the given initial conditions allowed to find the time-dependent electron distribution function along the loop. The brightness distribution of the bremsstrahlung of HXR derived from the electron distribution functions was calculated for different photon energies along the flare loop and used to plot the time-delays spectra. The calculated data showed that decreasing time-delays spectra were tractable assuming spaces of electrons acceleration and injection were separated. The distinction between time-delays spectra from the looptop and footpoints was established.

SUN, FLARE, X-RAYS, TRANSPORT ELECTRON, TIME DELAY.

REFERENCES

[1] **M.J. Aschwanden, R.A. Schwartz, D.M. Alt,** Electron time-of-flight differences in solar flares, *Astrophysical Journal*. 447 (1995) 923–935.

[2] **V.J. Ashwanden, R.V. Bynum, T. Kosugi, et al.,** Electron trapping times and trap densities in solar flare loops measured with Compton and Yohkoh, *Astrophysical Journal*. 487 (2) (1997) 936–955.

[3] **Yu.E. Charikov, V.I. Globina, E.M. Sklyarova,** Hard X-ray time delay spectra of solar

flares: BATSE spectrometer data, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 3 (177) (2013) 237–244.

[4] NASA database, <ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/compton/data/batse>.

[5] **R.J. Hamilton, E.T. Lu, V. Petrosian,** Numerical solution of the time-depending kinetic equation for electrons in magnetized plasma, *Astrophysical Journal*. 354 (1990) 726–734.



[6] **S.P. Gorbikov, V.F. Melnikov**, The numerical solution of the Fokker-Planck equation for modeling of particle distribution in solar magnetic traps, *Mathematical Modeling*. 19 (2007) 112–122.

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

[8] **Yu.E. Charikov, V.F. Melnikov, I.V. Kudryavtsev**, Intensity and polarization of the hard X-ray radiation of solar flares at the top and footpoints of a magnetic loop, *Geomagnetism and Aeronomy*.

52 (8) (2012) 1021.

[9] **Yu.E. Charikov, A.N. Shabalin, I.V. Kudryavtsev**, Hard X-rays in solar flaring loops from accelerated electron beams, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 4-1 (182) (2013) 154–165.

[10] **S. Krucker, M. Battaglia, P.J. Cargill, et al.**, Hard X-ray emission from the solar corona, *The Astronomy and Astrophysics Review*. 16 (2008) 155–208.

[11] **Y. Hanaoka**, Flares and plasma flow caused by interacting coronal loops, *Solar Physics*. 165 (2) (1996) 275–301.

THE AUTHORS

CHARIKOV Yury E.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru

GLOBINA Veronica I.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo
65, Pulkovskoe Sh., St. Petersburg, 196140, Russian Federation
gvi1109@gmail.com

SHABALIN Alexander N.

Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg 194021, Russian Federation
taoastronomer@gmail.ru

ELFIMOVA Eugenia P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
elfimovaevgeniya@gmail.com