**ДИНАМИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ
БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ
НА ОСНОВЕ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 11 ИЮНЯ 2003 ГОДА**

**Савченко М.И.¹, Ватагин П.В.¹, Кудрявцев И.В.^{1,2},
Лазутков В.П.¹, Моторина Г.Г.², Скородумов Д.В.¹**

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

**DYNAMICS OF THE ENERGY SPECTRA OF FAST ELECTRONS
RECONSTRUCTED ON THE BASIS OF HARD X-RAY RADIATION
OF SOLAR FLARE ON 11 JUNE 2003**

**Savchenko M.I.¹, Vatagin P.V.¹, Kudryavtsev I.V.^{1,2},
Lazutkov V.P.¹, Motorina G.G.², Skorodumov D.V.¹**

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

Solar flares on June 11, 2003 (X-ray class X1.6) were recorded by the IRIS X-ray spectrometer installed on the KORONAS-F station [1], in hard x-rays in 32 energy channels. The flare of June 11, 2003 began in the hard X-ray range at 20:03. Flare have an expressed impulsive structure. The results of the reconstruction of hard X-ray emission spectra with taking into account the instrumental function of the X-ray spectrometer are presented here as well as the reconstruction of the energy distributions of fast electrons that generate this radiation. Reconstruction of the hard X-ray spectra is performed by the method of random search, and electron spectra are reconstructed using the Tikhonov method for solving integral equations. The behavior of the energy spectra of electrons at different stages of flares is analyzed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-339-342

Рентгеновское излучение солнечных вспышек содержит наиболее непосредственную информацию о процессах энерговыделения в солнечных вспышках. Рентгеновское излучение солнечных вспышек является тормозным излучением тепловых электронов горячей плазмы и нетепловых ускоренных электронов. В последнее десятилетие получены многочисленные результаты по регистрации жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) во время вспышек на Солнце (см. обзоры [2–4]). Характеристики ЖРИ (поток, спектр, направленность, поляризация, временная структура) несут информацию о функции распределения высокоэнергичных электронов и динамике их ускорения. Для восстановления функции распределения быстрых электронов во вспышечной петле необходимо решать обратную задачу на основе измеренных энергетических спектров ЖРИ.

В данной работе были реконструированы энергетические распределения ускоренных электронов для солнечной вспышки 11.06.2003 рентгенов-

ского класса X1.6 с координатами N12W53 на основе спектров ЖРИ, полученных рентгеновским спектрометром ИРИС на борту орбитальной станции «КОРОНАС-Ф» [1]. Восстановление спектра ЖРИ по приборному спектру и реконструкция спектра ускоренных электронов производились аналогично [5]. Спектр ЖРИ вспышек восстанавливался по приборному спектру без априорного задания вида спектра (решалась обратная задача) методом случайного поиска. Задача реконструкции спектров электронов по спектру ЖРИ решалась с помощью регуляризации исходного интегрального уравнения по методу Тихонова [6]. В расчетах использовалось нерелятивистское сечение для электронов.

1. Восстановление энергетического спектра ЖРИ вспышки

Спектр падающего на прибор излучения трансформируется в приборный спектр с учетом энергетического разрешения детекторов и, зависящей от энергии, эффективной площади прибора.

В результате, количество отсчетов ΔN_i за 1 секунду в энергетическом канале с номером i будет определяться выражением:

$$\Delta N_i = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\infty} \int_{A_i}^{A_{i+1}} p(A, \varepsilon) J(\varepsilon) dA d\varepsilon, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\min}$ – минимальная энергия квантов, попадающих в детекторы; A_i и A_{i+1} – амплитуды сигналов детекторов соответствующие нижней и верхней границе канала с номером i ; $i = 1, \dots, I_{\max}$, где $I_{\max}$ – количество каналов регистрации; $p(A, \varepsilon)$ – приборная функция, учитывающая изменение эффективной площади детекторов, их энергетическое разрешение; $J(\varepsilon)$ – интенсивность падающего на детектор излучения, измеряемая в фотон/(см² кэВ с).

Для нахождения приближенного решения уравнения (1) использовали метод случайного поиска аналогично работе [5]. На рис. 1 представлены усредненные по времени аппаратурные спектры (ΔN_i) вспышки 11.06.2003 (X1.6) для четырех последовательных временных интервалов на стадии начала и стадии роста вспышки. На рис. 2 представлены восстановленные с учетом приборной функции спектры квантов. Необходимо отметить, что данные могут искажаться за счет не стационарности фона, особенно в области высоких энергий, где скорости счета невелики.

При реконструкции спектров ускоренных электронов мы применяли два алгоритма. В первом мы рассматривали это излучение как тормозное излучение ускоренных электронов. Во втором мы, используя информацию о положении вспышки на диске Солнца и данные, приведенные в работе [7], производили приближенную корректировку спектров фотонов с учетом эффекта альбеда. В работе [8] отмечено, что данный эффект может приводить к особенностям реконструированного спектра электронов в области энергий около 20 кэВ.

Рис. 1.

Рис. 2.

2. Восстановление энергетического спектра электронов по спектрам ЖРИ вспышки

На основе этих спектров произведено восстановление энергетических спектров электронов, генерирующих ЖРИ. Для этого используется следующее выражением [5, 6]

$$I(\varepsilon, t) = \frac{\bar{n} V}{4\pi R^2} \int_{\varepsilon}^{\infty} \bar{F}(E, t) Q(E, \varepsilon) dE, \quad (2)$$

где $I(\varepsilon, t)$ – поток рентгеновских квантов, V – объем излучающей области; $\bar{n}$ – среднее значение концентрации частиц плазмы в источнике; R – расстояние от Солнца до места регистрации излучения; $Q(E, \varepsilon)$ – сечение тормозного излучения кванта энергии ε электроном с энергией E [9];

$\bar{F}(E, t) = \int F(E, \mathbf{r}, t) n(\mathbf{r}) dV / \int n(\mathbf{r}) dV$; F – плотность потока быстрых электронов (измеряется в $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$), которая, как известно, связана с функцией распределения электронов $f(v, \mathbf{r}, t)$ выражением $F(E, \mathbf{r}, t) dE = v f(v, \mathbf{r}, t) dv$, см., например, [6].

Решение интегрального уравнения (2) относительно функции $\bar{F}$ производилось методом регуляризации Тихонова нулевого порядка [10, 11]. На рисунке 3 приведены результаты этой реконструкции для различных параметров регуляризации α для 4-х временных интервалов с учетом и без учета альбедо. Полученные спектры электронов имеют провал в области энергий порядка 25 кэВ. В спектрах, полученных с учетом альбедо, этот провал менее выражен, хотя и остается. Данная особенность спектра электронов может быть вызвана и тем, что в данном энергетическом диапазоне излучение является суперпозицией излучений двух популяций электронов, имеющих разное энергетическое и угловое распределение – тепловых и ускоренных.

Рис. 3.

Кроме этого, как отмечено в работе [3], инверсная часть функции распределения может быть вызвана тем, что частота кулоновских столкновений увеличивается с уменьшением энергии электронов.

Литература

1. Матвеев Г.А. и др. / В книге «Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф» под редакцией д.ф.-м.н. В.Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. – 488 с., Глава 14., с. 366–400.
2. Krucker S., et al. // Astronomy & Astrophys Review. 2008. V. 16. P. 155.
3. Kontar E.P. et al. // Space Sci. Rev. 2011. V. 159. Issue 1-4. P. 301-355.
4. Holman G.D. et al. // Space Sci. Rev. 2011. V. 159. Issue 1-4. P. 107-166.
5. Моторина, Г.Г.; Кудрявцев, И.В.; Лазутков, В.П.; и др. // ЖТФ, 2016, т. 86, 4 с. 47-52.
6. Brown J.C. et al. // The Astrophysical Journal. 2006. V. 643. p. 523.
7. Kontar E.P. et al. // Astronomy & Astrophys. 2006. V.446. P. 1157-1163.
8. Kontar E.P. et al. // Sol. Phys. 2008. Vol. 252. P. 139
9. Koch H.W., Motz J.W. // Rev. of modern physics. 1959. V. 31. No 4. P. 920.
10. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы – Киев: «Наукова думка», 1986. – 544 с.
11. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач – М.: Наука, 1979. – 286 с.