**МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ ВСПЫШЕЧНОЙ АРКАДЫ СОБЫТИЯ 23 СЕНТЯБРЯ 2014 Г.
С УЧЕТОМ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ RHESSI, SDO,
NOBEYAMA RADIOHELIOGRAPH**

**Шабалин А.Н.¹, Овчинникова Е.П.¹, Глобина В.И.²,
Чариков Ю.Е.¹, Кузнецов С.А.²**

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

**MODEL OF ACCELERATED ELECTRONS PROPAGATION FOR THE
FLARE OF THE SEPTEMBER 23, 2014 BASED ON THE RHESSI, SDO,
NOBEYAMA RADIOHELIOGRAPH OBSERVATIONAL DATA**

**Shabalin A.N.¹, Ovchinnikova E.P.¹, Globina V.I.²,
Charikov Yu.E.¹, Kuznetsov S.A.²**

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

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

The spectra and spatial distribution of X-ray (RHESSI) and gyro-synchrotron (Nobeyama Radioheliograph) radiation during a solar flare of September 23, 2014 23:11UT, GOES-class M2.5 are analyzed. HMI/SDO LOS magnetograms were used to reconstruct the structure of the complicated magnetic field in the corona, which is an arcade of magnetic loops of various heights. On the basis of numerical modeling of the processes of injection and propagation of accelerated electrons in the plasma of a flare magnetic loop, restriction on the parameters of accelerated electrons such as pitch-angle, energy, time dependences, spatial localization were obtained. For the northern part of the arcade the energy spectrum of the electron beam is represented by a broken power law with indexes $\delta_1 \approx 4.5$, $\delta_2 \approx 2.4$, and the break energy of the spectrum $E_{br} \approx 300$ keV.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-409-412

Восстановление энергетических и угловых распределений ускоренных электронов по данным наблюдений радио, рентгеновского, гамма излучений, и по результатам анализа доплеро- и магнитограмм производится посредством численного моделирования. Наблюдения в рентгеновском диапазоне проводятся с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением. Особо следует отметить данные, полученные на спутнике RHESSI [6], позволившие выявить в ряде вспышек локальные источники излучения, расположенные в основаниях магнитных петель, реже – в вершине, а иногда даже высоко в короне. Подобные изображения локальных источников наблюдаются и в микроволновом диапазоне длин волн. Например, в наблюдениях на радиогелиографе Nobeyama [5]. Однако, указанные виды излучения являются вторичными по отношению к процессу ускорения частиц. Они возникают при транспорте ускоренных

электронов в плазме вспышечных петель. В процессе переноса функция распределения ускоренных электронов изменяется – меняются энергетическое и угловое распределения, причем если в момент инжекции предположить независимость этих распределений друг от друга, то затем во времени эти распределения перекрываются [7]. Наиболее полные расчеты кинетики пучка ускоренных электронов проводятся, начиная с пионерских работ [4] по настоящее время [2, 8]. Особо подчеркнем, что решение подобной в строгой постановке (наиболее полный учет процессов рассеяния частиц, геометрии магнитного поля, распределения плотности плазмы и температуры в магнитной петле) кинетической задачи транспорта пучка электронов в плазме магнитной петли для вспышечной аркады к настоящему времени ни в одной работе не рассматривалось. В настоящей работе предполагается на основе данных наблюдений для вспышки 23.09.2014, используя метод численного интегрирования нестационарного кинетического релятивистского уравнения, а также метод Монте-Карло для отраженного от фотосферы рентгеновского излучения, впервые получить ограничения на параметры ускоренных электронов для всей аркады выбранного события.

Результаты моделирования

На первом этапе работы были получены ограничения на параметры источника ускоренных электронов для петель северной части аркады. Для этого проведена экстраполяция магнитного поля в короне Солнца по данным магнитограмм вдоль луча зрения HMI/SDO в пакете GX_Simulator [9]. Для согласования спектра и пространственного положения жесткого рентгеновского и радио излучения рассчитаны модели распространения ускоренных электронов в выделенных магнитных структурах. По полученным распределениям ускоренных электронов вдоль магнитных структур рассчитаны потоки жесткого рентгеновского [1] и радио излучений [3]. Были проанализированы различные модели по типу питч-углового, энергетического, пространственного распределений ускоренных электронов в источнике. В северной части аркады выделены две магнитные структуры (рисунк 2, справа), основания которых ассоциированы с северным источником ЖРИ в момент главного пика (петля № 2) и южным во все моменты времени кроме главного пика (петля № 1). Распределение магнитного поля в большинстве петель аркады сильно асимметричное с бóльшим отношением величины индукции поля в северных основаниях к минимальным значениям в короне $B_{\max}/B_{\min}$.

Характеристики модели источника ускоренных электронов, удовлетворяющие наблюдениям, следующие: питч-угловое распределение асимметричное с углом раствора ~ 100 градусов в направлении южного основания для петли № 1 и северного основания для петли № 2. Энергетическое распределение двухстепенное с точкой излома в области 300 кэВ и $\delta_1 \approx 4.5$,

Рис. 1. Слева: Магнитограмма HMI/SDO (контуры на уровне 275 Гс). Поверх магнитограммы нанесены контурные линии жесткого рентгеновского (6–12, 25–50 кэВ, RHESSI) и радио излучения (17, 34 ГГц, NORH). Момент времени соответствует главному пику рентгеновского излучения. Справа: скорости счета 29–30 кэВ, 49–52 кэВ, и потока на частотах 17 ГГц, 34 ГГц.

Рис. 2. Слева: магнитограмма и контуры ЖРИ как на рисунке 1. Поверх нанесены линии экстраполированного магнитного поля (методом LFFF). Справа: Условно выбранные магнитные петли. Кругом обозначена область расположения северного источника ЖРИ 25–50 кэВ, которая может быть ассоциирована с вершиной петли № 1, либо основанием петли № 2.

$\delta_2 \approx 2.4$. В результате инъекции электронов с данными характеристиками в области вершин петель № 1,2, сформировавшиеся распределения электронов в локальных областях позволяют объяснить спектр излучения в обла-

сти энергий 30–100 кэВ и на частотах 9, 17, 34 ГГц, а также локализацию источников 25–50 кэВ, 17, 34 ГГц. Была рассмотрена также альтернативная модель для северного источника ЖРИ – его локализация может быть результатом развития сильной турбулентности в области инжекции – в вершине петли № 1. В качестве турбулентной моды была рассмотрена ионно-звуковая стационарная турбулентность. Данная модель (с плотностью энергии турбулентности к кинетической энергии плазмы на уровне 5%) может объяснить спектр и локализацию ЖРИ источника, однако, при этом приходится предполагать более «жесткие» значения показателей спектров электронов, в результате чего не удается объяснить яркости на частотах 9 и 17 ГГц. В результате была выбрана более «простая» модель с источником в петле №2.

Работа поддержана Грантом РФФИ мол_а № 18-32-00405.

Литература

1. *Bai T., Ramaty R.* Backscatter, anisotropy, and polarization of solar hard X-rays // *The Astrophysical Journal*. 1978. (219). P. 705–726.
2. *Charikov Y.E., Shabalin A.N.* Influence of magnetic turbulence on the propagation of accelerated electrons and hard X-ray brightness distribution in solar flares // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. № 8 (55). P. 1104–1111.
3. *Fleishman G.D., Kuznetsov A.A.* Fast Gyrosynchrotron Codes // *The Astrophysical Journal*. 2010. (721). P. 1127–1141.
4. *Hamilton R.J., Lu E.T., Petrosian V.* Numerical solution of the time-dependent kinetic equation for electrons in magnetized plasma // *The Astrophysical Journal*. 1990. (354). P. 726–734.
5. *Huang G., Nakajima H.* Statistical analysis of flaring loops observed by nobeyama radioheliograph. I. Comparison of looptop and footpoints // *The Astrophysical Journal*. 2009. № 1 (696). P. 136–142.
6. *Lin R.P. et al.* The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Solar Physics*. 2002. № 1/2 (210). P. 3–32.
7. *Melnikov V.F., Charikov Y.E., Kudryavtsev I.V.* Spatial brightness distribution of hard X-Ray emission along flare loops // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. № 7 (53). P. 863–866.
8. *Melnikov V.F., Charikov Y.E., Kudryavtsev I.V.* Directivity and polarization dynamics of hard X-ray and gamma-ray emission of a flare loop // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. № 7 (55). P. 983–990.
9. *Nita G.M. et al.* Three-dimensional radio and X-ray modeling and data analysis software: Revealing flare complexity // *The Astrophysical Journal*. 2015. № 2 (799). P. 236.