

УДК 523.98

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Т.С. Сизых, Л.К. Кашапова

### INVESTIGATION OF THERMAL PROCESSES IN SOLAR FLARES

T.S. Sizykh, L.K. Kashapova

В настоящее время известно, что температура и плотность вспышечной плазмы являются важными характеристиками процессов выделения и переноса энергии в солнечных вспышках. Кроме традиционного изучения изменений этих параметров во времени можно также использовать сконструированные из них диаграммы. Хорошо известна зависимость меры эмиссии (плотности) от температуры, которая используется для описания процессов нагрева и охлаждения вспышечной плазмы и для выявления характерных особенностей вспышек, сопровождавшихся выбросом корональной массы. Проводится сравнение результатов, полученных для нескольких вспышек, с известными теоретическими моделями нестационарных процессов на Солнце.

At present time it is well known that plasma temperature and density of flare plasma are important characteristics of energy transport and release processes in solar flares. The diagrams constructed of these parameters could be used besides traditional methods of studying their evolution. Dependence of emission measure (density) on temperature is very popular for studying of heating and cooling processes in flaring plasma. We apply this method to reveal characteristics of flares followed by CMEs events. We carried out comparison of the results obtained for several of flares with known models of solar non-stationary processes.

#### Введение

Впервые метод исследования солнечных вспышек при помощи диаграмм параметров плазмы был предложен в работе [Jakimiec et al., 1991], где рассматривалась эволюция плотности и температуры плазмы. Дальнейшее развитие этот метод получил в работах [Jakimiec et al., 1992; Sylwester et al., 1993; Лившиц, Бадалян, 2004; Aschwanden, Tsiklauri, 2009]. В этих работах были определены основные свойства диаграмм температуры и меры эмиссии. В работах [Sylwester et al., 1993] и [Лившиц, Бадалян, 2004] вместо плотности плазмы рассматривался параметр, основанный на мере эмиссии. Согласно формуле,  $EM = \int N^2 V dV$  ( $EM$  – мера эмиссии,  $N$  – концентрация или плотность плазмы,  $V$  – объем излучающей плазмы). Принимая во внимание, что объем излучающего вещества меняется незначительно, получаем  $N \approx 1/2 (EM)$ . Общий вид теоретически рассчитанной диаграммы представляет собой петлю, т. е. в начале и в конце события температура и плотность плазмы имеют близкие значения. Движение по диаграмме (во времени) происходит по часовой стрелке. На фазе нагрева температура и эмиссия растут, причем температура достигает максимума раньше, чем мера эмиссии. Затем значения обоих параметров падают с небольшими колебаниями, что соответствует фазе охлаждения плазмы. Общая вытянутость диаграммы зависит от продолжительности и мощности события.

Во всех предыдущих работах эти диаграммы использовались только для исследования фаз нагрева и охлаждения в длительных вспышках. При этом не рассматривалось влияние выбросов корональной массы (ВКМ) на форму диаграмм. В работе [Sizykh, Kashapova, 2011], анализируя диаграммы тепловых параметров (мера эмиссии и температура плазмы) для вспышек 14 июля 2005 г., мы обнаружили, что на фоне стандартной фазы нагрева наблюдаются резкие пики, по времени совпадающие с началом ВКМ. Был сделан вывод о возможной связи между резкими пиками на диаграммах на стадии нагрева с ВКМ. В данной работе мы решили проверить сле-

данный ранее вывод на более значимом статистическом материале, рассмотрев несколько мощных вспышек с ВКМ, происходивших в разных частях диска Солнца, и сравнив их с соответствующими диаграммами для вспышек без ВКМ.

#### Исследованные события

При проведении данного исследования мы использовали наблюдения рентгеновского излучения, полученные в ходе проекта RHESSI [Lin et al., 2002]. RHESSI производит наблюдения вспышечных явлений на Солнце в широком рентгеновском диапазоне (от 3 кэВ до 20 МэВ). Аппаратура, установленная на борту космического аппарата, позволяет одновременно получать изображения и спектры с высоким временным и пространственным разрешением. Была использована тепловая часть спектра, формируемая излучением электронов, подчиняющихся распределению Больцмана. Время начала ВКМ взято из каталога SOHO LASCO [[http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)]. Выбрано 8 вспышек (4 сопровождалась ВКМ, 4 происходили без ВКМ) на разных расстояниях от центра солнечного диска. Для всех вспышек были получены параметры плазмы из тепловой части спектра: мера эмиссии и температура плазмы. На основе полученных параметров были построены диаграммы логарифма меры эмиссии от  $1/2$  логарифма температуры плазмы. Диаграммы вспышек с ВКМ и без ВКМ представлены соответственно на рис. 1, 2. Для построения диаграмм мы произвели усреднение параметров по времени (от 30 до 40 с для разных событий). Обе группы рассмотренных вспышек включают события вблизи лимба ( $a$ ,  $b$ ) и в центре солнечного диска ( $v$ ,  $z$ ).

Как видно из диаграмм, для вспышек обеих групп сначала происходит довольно быстрый рост тепловых параметров плазмы, соответствующий фазе нагрева, затем, после достижения максимума, начинается более длительный постепенный спад параметров, соответствующий фазе охлаждения. Однако на диаграммах событий с ВКМ на стадии нагрева присутствуют резкие пики. Они соответствуют тому, что мера эмиссии

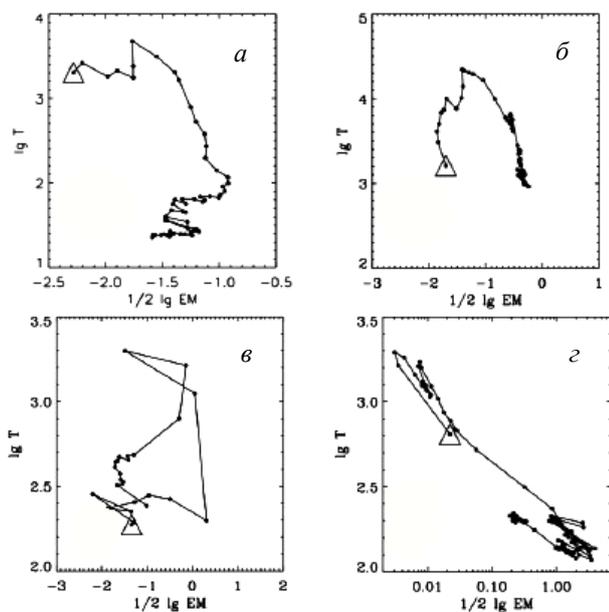


Рис. 1. Диаграммы тепловых параметров (логарифм меры эмиссии ( $10^{50} \text{ см}^{-3}$ ) –  $1/2$  логарифма температуры плазмы (МК) для вспышек, сопровождавшихся ВКМ. Начальный момент времени отмечен на диаграммах треугольником. События происходили вблизи центра диска (а, б) и около лимба (в, г).

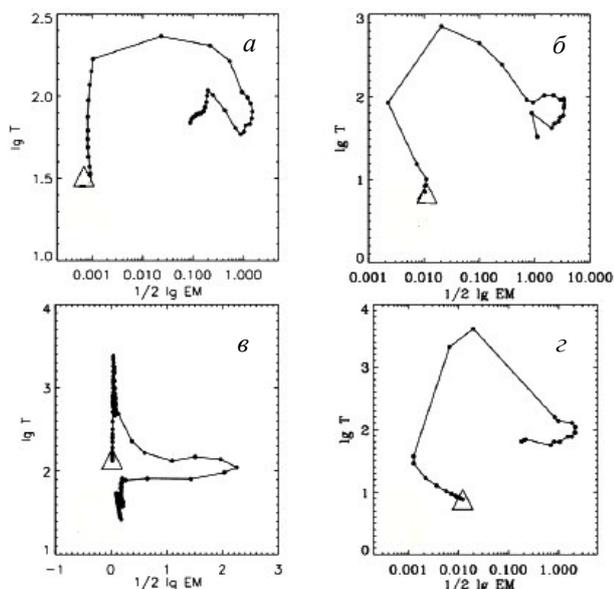


Рис. 2. То же для вспышек, не сопровождавшихся ВКМ.

практически не меняется, а температура сначала падает, а потом резко возрастает (рис. 1). Кроме того, можно заметить, что форма диаграмм событий, происходивших в центре в отличие от лимбовых событий, ближе типичной форме таких диаграмм, описанной в [Jakimiec et al., 1992; Sylwester et al., 1993; Aschwanden, Tsiklauri, 2009].

### Результаты и выводы

В данной работе проведено сравнение форм диаграмм тепловых параметров вспышек с ВКМ и без ВКМ. Выяснилось, что форма диаграмм тепловых параметров плазмы зависит от места расположения вспышки на диске Солнца. В случае расположения центра вспышки на лимбе (для событий как с ВКМ,

Вспышки с ВКМ				
Дата	Пик по GOES		Координаты	Рис. 1
	UT	Класс		
03.10.2002	02:22	M	-114, -418	A
10.06.2003	02:54	M	555, 204	B
20.05.2002	10:52	M	-814, -345	C
21.08.2002	05:09	X	724, -237	D
Вспышки без ВКМ				
Дата	Пик по GOES		Координаты	Рис. 2
	Время	Класс		
02.12.2005	02:50	M	-292, -82	A
26.02.2004	02:00	X	232, 341	B
09.09.2005	02:51	X	-867, -250	C
17.09.2005	06:13	X	630, -269	D

так и без ВКМ) диаграмма имеет более вытянутую форму, т. е. мало меняется мера эмиссии. Если же источник излучения находится в центре диска, форма диаграммы тепловых параметров имеет типичную форму, описанную в [Sylwester et al., 1993; Лившиц, Бадалян, 2004; Aschwanden, Tsiklauri, 2009]. Эта разница между диаграммами может быть связана с тем, что количество вещества на луче зрения меньше в случае лимбовых событий. В четырех исследованных вспышках, сопровождавшихся ВКМ, на диаграммах параметров, полученных из тепловой части спектра – меры эмиссии и температуры плазмы – присутствуют характерные резкие изменения температуры. Форма диаграмм вспышек без ВКМ сравнительно гладкая на стадии нагрева, как это и предполагается стандартным сценарием. Таким образом, проведенное исследование подтвердило сделанное в предыдущей работе предположение о связи резких изменений температуры плазмы на стадии, соответствующей по времени фазе нагрева, с ВКМ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лившиц М.А., Бадалян О.Г. Связь импульсных и постэруптивных процессов в рентгеновских вспышках на Солнце // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81, № 12, С. 1138–1152.  
 Каталог SOHO LASCO [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list).  
 Aschwanden M.J., Tsiklauri D. The hydrodynamic evolution of impulsively heated coronal loops: explicit analytical approximations // *Astrophys. J.* 2009. Suppl. Ser. 185. P. 171–185.  
 Jakimiec J., Sylwester B., Sylwester J., et al. Dynamics of flaring loops. II. Flare evolution in the density-temperature diagram // *Astron. Astrophys.* 1992. V. 253. P. 269–276.  
 Lin R.P. et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Solar Phys.* 2002. V. 210, Iss. 1. P. 3–32.  
 Sizykh T.S., Kashapova L.K. Study of energy release and transport processes of the 14th July 2005 flare in AR 10786 // *Central European Astrophysical Bulletin.* 2011. V. 35. P. 93–102.  
 Sylwester B., Sylwester J., Serio S., et al. Dynamics of flaring loops. III. Interpretation of flare evolution in emission measure – temperature diagram // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 267. P. 586–594.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск