

ЭРУПЦИИ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ СОЛНЕЧНОМ СОБЫТИИ 13 ДЕКАБРЯ 2006 г.

В.В. Гречнев, В.И. Киселев, А.М. Уралов, Н.С. Мешалкина

ERUPTIONS AND SHOCK WAVES IN THE EXTREME SOLAR EVENT OF 13 DECEMBER 2006

V.V. Grechnev, V.I. Kiselev, A.M. Uralov, N.S. Meshalkina

Выяснены взаимосвязи между эрупциями магнитных жгутов, вспышкой и возникновением ударных волн в экстремальном протонном событии 13 декабря 2006 г. Ускорения трех эруптивных структур достигали $1\text{--}8 \text{ км/с}^2$, а их временные профили на 2 мин опережали всплески вспышечного излучения. Как минимум, две ударные волны были возбуждены импульсно-поршневым механизмом на фазе роста вспышки. Их следы впервые выявлены на изображениях и в динамическом радиоспектре. Сегменты ударных фронтов, распространявшиеся вверх, вероятно, слились в одну более сильную ударную волну, наблюдавшуюся на коронографах как внешнее гало коронального выброса. Факт раннего возбуждения ударных волн внутри зарождающегося выброса требует пересмотра воззрений на условия ускорения ионов на ударных волнах.

Relations between eruptions of magnetic flux ropes, flare, and development of shock waves have been found in the extreme solar event of 13 December 2006. The accelerations of three eruptive structures reached $1\text{--}8 \text{ км/с}^2$, and their time profiles led the flare bursts by 2 min. At least, two shock waves were excited by the impulsive-piston mechanism. Their traces have been revealed for the first time in images and the dynamic radio spectrum. The upward-directed segments of the shocks probably merged into a single stronger shock observed by coronagraphs as the outer halo of a coronal mass ejection. The fact of the early excitation of shock waves inside the developing CME requires reconsideration of the conditions assumed for the shock-acceleration of ions.

Введение

В солнечных эруптивных событиях протоны ускоряются до высоких энергий. Существуют две точки зрения на их источники. Согласно одной из них, достигающие Земли потоки протонов ускоряются во вспышке над активными областями. Согласно другой концепции, протоны ускоряются поршневой ударной волной, возбуждаемой СМЕ на $(2\div 4)R_{\odot}$. Для выяснения условий ускорения протонов с конечной целью определения их источника мы пытаемся установить, когда и где возникли ударные волны в экстремальном солнечном событии 13 декабря 2006 г. Основная задача работы – анализ эруптивных эпизодов возникновения и распространения ударных волн.

Эрупции

В предшествовавших исследованиях этого события (X3.4/4В, GLE70) [Asai, 2008; Kusano, 2012] выявлены эрупции трех структур (EF1, EF2, EF3), но их кинематика была изучена недостаточно. Начальные положения этих структур, вероятно, магнитных жгутов, совпадали с магнитной линией инверсии. Мы измерили их кинематику по изображениям Hinode/XRT по методике [Grechnev, 2011a]. По измерениям переднего края эруптивной структуры оценивались ее начальная и конечная скорости. Ускорения аппроксимировались гауссианами; их параметры оптимизировались для наиболее точного отслеживания измеряемой структуры. В сложных случаях использовалась комбинация гауссиан.

Эрупция структуры EF1 показана на рис. 1. Ускорение EF1 (сплошная кривая на рис. 4) в картинной плоскости достигло в 02:20:30 1 км/с , а ее скорость – 110 км/с . Эрупция EF2, напоминавшая лук, показана на рис. 2. Структура EF2 была самой

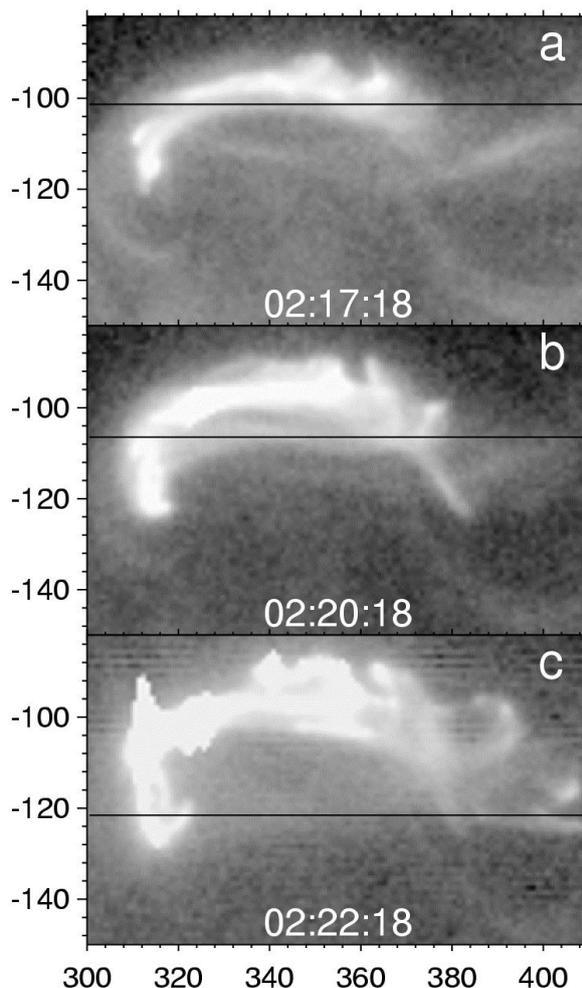


Рис. 1. Эруптивная структура EF1. Передний край EF1 отмечен горизонтальной линией. Для всех изображений по осям указаны расстояния от центра солнечного диска в угловых секундах.

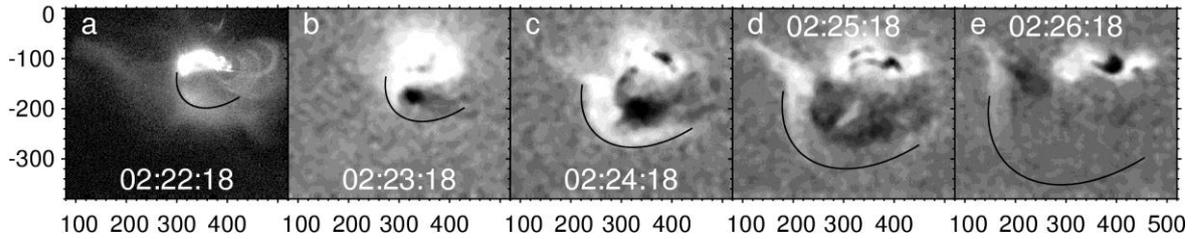


Рис. 2. Эруптивная структура EF2 (b–e – разностные изображения). Дугой обведена передняя граница EF2.

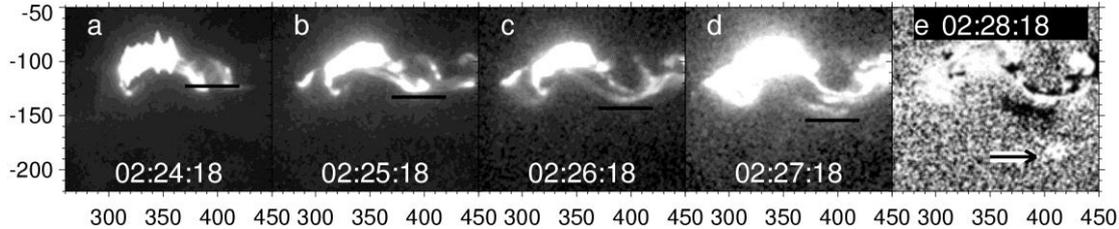


Рис. 3. Эруптивная структура EF3 (e – разностное изображение). Горизонтальным отрезком (a–d) и стрелкой (e) отмечен передний край EF3.

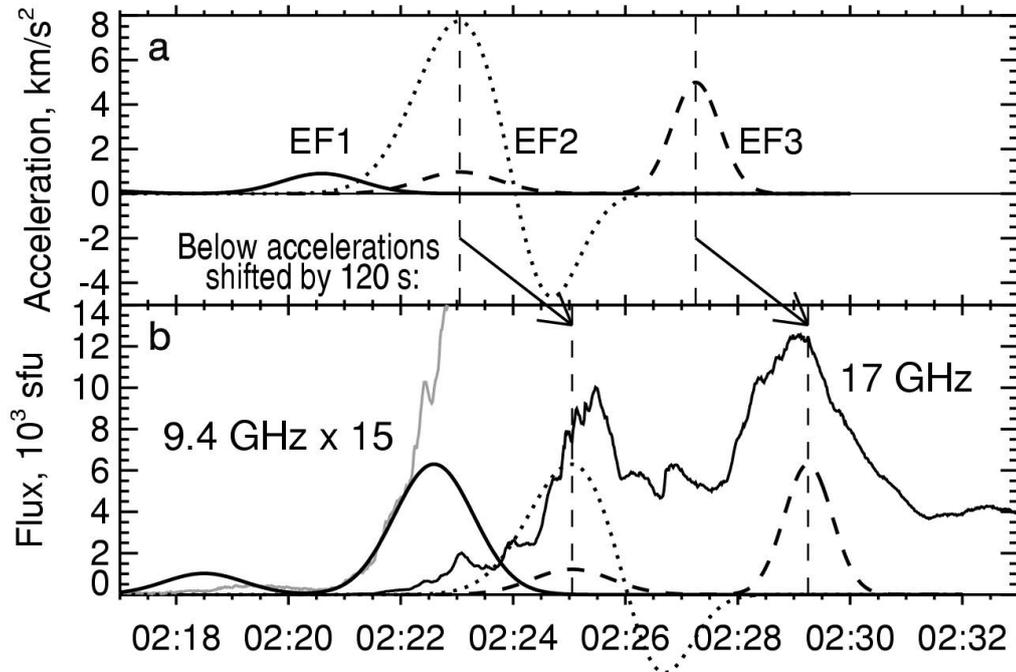


Рис. 4. Измеренные ускорения EF1 (сплошная линия), EF2 (пунктир), EF3 (штриховая линия) (a); микроволновые всплески на 9.4 ГГц (серая кривая), 17 ГГц (черная кривая) и нормированные графики ускорения, задержанные на 120 с. Штриховые вертикали – пики ускорения EF1 и EF2 (b).

протяженной и импульсной в этом событии. Ее ускорение (пунктир на рис. 4) достигло 8 км/с^2 в 02:23, а скорость – 750 км/с , которая затем снизилась до 456 км/с . Вероятно, вторая эрупция вызвала эрупцию EF3 (рис. 3), претерпевшую два эпизода ускорения (штриховая линия на рис. 4) с максимумом 5 км/с^2 в 02:27 при конечной скорости 420 км/с . Высокие значения ускорений и скоростей EF2 и EF3 предполагают быстрое возбуждение ударных волн (УВ) импульсно-поршневым механизмом [Афанасьев, 2008], что соответствует и высказанному ранее [Asai, 2008] предположению о связи EF2 с УВ. Ожидаемые времена возникновения УВ соответствуют пикам ускорения EF2 и EF3.

Рис. 4 позволяет понять соотношения между эруптивными эпизодами и вспыхивающим излучением.

Раннее возрастание излучения на 9.4 ГГц совпадает с задержанным ускорением EF1, а всплеск на 17 ГГц имеет поразительное сходство с задержанными на 2 мин кривыми ускорения EF2 и EF3. Всплески вспыхивающего излучения были вызваны эрупциями, но не наоборот. Эта картина согласуется со стандартной моделью, рассматривающей вспыхивку как продукт магнитного пересоединения, вызванного эрупцией. Каждая эрупция, предшествовавшая вспыхивающему всплеску, была причинно связана с другой.

Что касается ударных волн, то импульсно-поршневое возбуждение двух УВ в 02:23 и 02:27 подтверждает следы их распространения вдоль солнечной поверхности на изображениях SOHO/EIT и GOES/SXI (рис. 5). Начальные положения центров УВ соответствуют местам эрупции EF2 и EF3. Затем

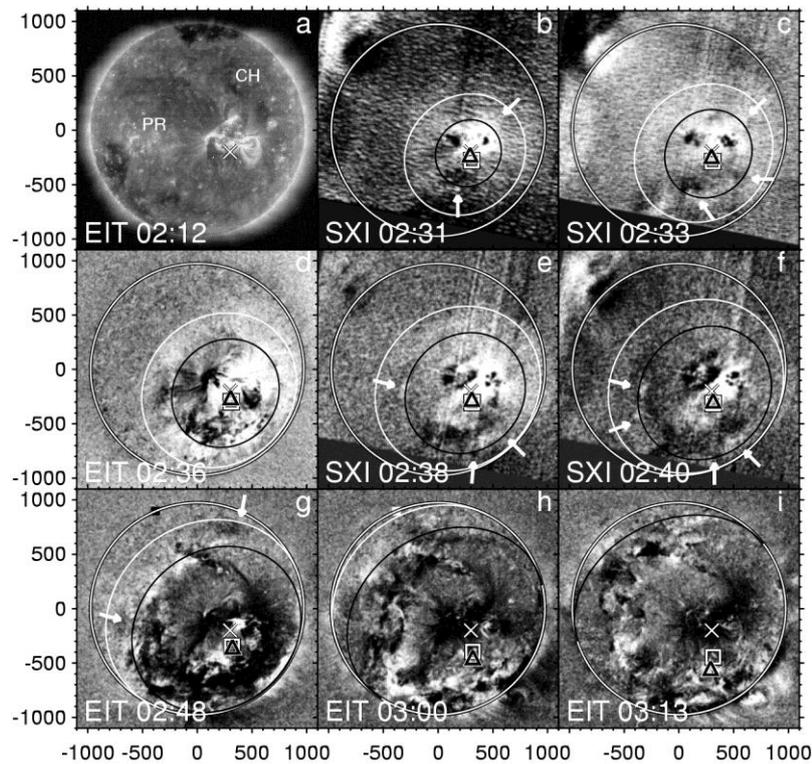


Рис. 5. Следы УВ1 и УВ2 на изображениях EIT 195 и SXI. Ситуация до события: CH – корональная дыра, PR – факельные области (a). Разностные изображения: эллипсы – расчетные фронты УВ1 и УВ2; стрелками указаны их возможные следы. Эпицентры: × начальный, □ УВ1, △ УВ2 (b–i).

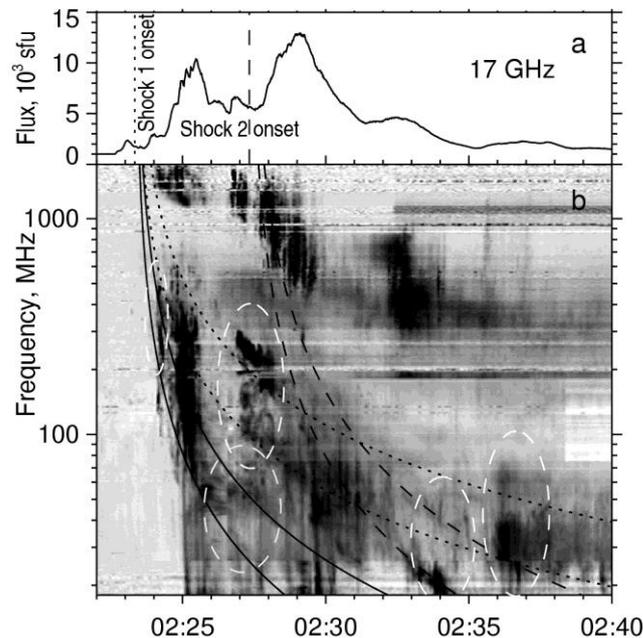


Рис. 6. Всплеск II типа (b) и на 17 ГГц (a). Следы УВ1 и УВ2 (в овалах) обведены расчетными кривыми.

УВ1 и УВ2 отделились от возбуждавших их «поршней» и свободно распространялись как замедляющиеся взрывные волны. Черные и белые эллипсы – положения фронтов УВ1 и УВ2, распространяющихся в однородной плазме, рассчитанные согласно [Grechnev, 2011a]. Отличия следов УВ1 и УВ2 от расчетных в корональной дыре CH, над факельными областями PR и прогрессивное смещение их эпицентров соответствуют свойствам быстрых МГД-волн [Grechnev, 2011b].

На рис. 6, b показан динамический спектр со всплеском II типа (такие всплески связывают с УВ) в сравнении со всплеском на 17 ГГц. Дрейфующие полосы всплеска II типа соответствуют кривым для УВ1 и УВ2 (расчет по методике [Grechnev, 2011a]).

Расширившиеся вверх УВ1 и УВ2 слились в одну более сильную УВ с эффективным временем начала позже исходных УВ1 и УВ2 [Grechnev, 2011a]. Расширение результирующей УВ можно проследить по отклонениям корональных лучей и как внешнее гало

СМЕ. На рис. 7 данные из каталога СМЕ [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/] (символы) аппроксимированы как расширяющийся фронт УВ. Расчетные кривые, согласующиеся с измерениями, демонстрируют, что скорость и интенсивность УВ максимальны вначале, а затем волна лишь замедляется и затухает. Возбуждение ударных волн и их последующее развитие оказывается более сложным, чем традиционно предполагалось [Grachnev, 2013]. Не подтверждается гипотеза о поршневой УВ, движимой внешней поверхностью СМЕ.

В ряде событий от слабых [Grachnev, 2011a] до данного экстремального УВ возбуждались внутри зарождающихся СМЕ импульсными поршнями.

Выводы

В экстремальном событии 13 декабря 2006 г. выявлено три эрупции с интервалом ~4 мин, опережавшие на 2 мин вспышечные всплески. Это указывает на первичность эрупций относительно вспышек. Другие вспышки с несколькими пиками тоже могут быть связаны с повторными эрупциями.

Детально измерена кинематика трех эруптивных структур. Ускорения достигали $(15 \div 25)g_{\odot}$ ускорений свободного падения на Солнце, а скорости – 400–750 км/с.

Впервые на изображениях нижней короны выявлено распространение двух ударных волн, возбужденных с интервалом 4 мин импульсно-поршневым механизмом в двух самых мощных эрупциях. Ударные волны возникли на фазе роста вспышки и затем замедлялись подобно свободно распространяющимся взрывным волнам. Эти результаты требуют пересмотра воззрений на условия ускорения ионов на ударных волнах.

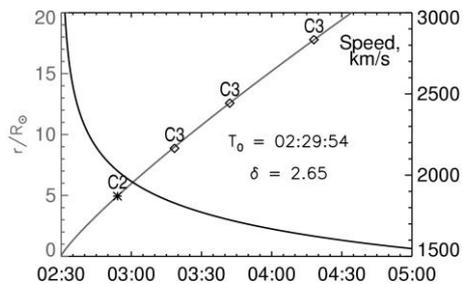


Рис. 7. Расчетная кинематика гало СМЕ как следа УВ, аппроксимирующая измерения из каталога СМЕ (символы).

Афанасьев А., Уралов А., Гречнев В. Распространение быстрой магнитозвуковой ударной волны в магнитосфере активной области // *Астрон. ж.* 2013. Т. 90, № 8. С. 648–656.

Asai A., Hara H., Watanabe T. et al., Strongly blueshifted phenomena observed with hinode EIS in the 2006 December 13 solar flare // *ApJ.* 2008. V. 685. P. 622.

Grachnev V., Uralov A., Chertok I., et al. Coronal shock waves, euv waves, and their relation to CMEs. I. Reconciliation of “EIT Waves”, Type II radio bursts, and leading edges of CMEs // *Solar. Phys.* 2011a. V. 273. P. 433.

Grachnev V., Afanasyev A., Uralov A., et al. Coronal shock waves, euv waves, and their relation to CMEs. III. Shock-associated CME/EUV wave in an event with a two-component EUV transient // *Ibid.* 2011b. V. 273. P. 461.

Grachnev V., Kiselev V., Uralov A., et al., An updated view of solar eruptive flares and development of shocks and CMEs: History of the 2006 December 13 GLE-Productive Extreme Event // *PASJ.* 2013.

Kusano K., Bamba Y., Yamamoto T., et al. Magnetic field structures triggering solar flares and coronal mass ejections // *ApJ.* 2012. V. 760. P. 31.

http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия