

*И.В. Кузьменко, В.В. Гречнев\*, А.М. Уралов\**

### О ХАРАКТЕРЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ЭРУПТИВНОМ СОБЫТИИ 13 ИЮЛЯ 2004 Г.

Для выяснения характера возбуждения ударной волны в событии 13.07.2004 по изображениям орбитального телескопа TRACE с высоким пространственным разрешением в канале  $173 \text{ \AA}$  была исследована кинематика эруптивной системы, состоящей из фрагментов волокна, яркого выброса и петельной системы. Показано, что волна, вероятнее всего, была возбуждена внезапно ускорившись до  $450 \text{ км/с}$  ярким выбросом как импульсным поршнем. Волна быстро стала ударной, а затем, после замедления выброса, свободно распространялась подобно взрывной волне.

Причины возникновения ударных волн в короне до сих пор остаются неясными. Считается, что взрывные ударные волны возбуждаются импульсом давления от вспышек, а поршневые волны управляются КВМ. Также предполагают, что мелкомасштабные выбросы могут быть причиной МГД ударных волн. Такие выбросы действуют как временный поршень, генерирующий управляемую ударную волну, но когда выброс замедляется или останавливается, возмущение продолжается как свободно распространяющаяся ударная волна [6, 9].

Исследования солнечного эруптивного события 13.07.2004, проведенные ранее в ряде работ [1, 3, 5], показали, что наблюдаемые в событии волна Мортонa, «волна EIT» и радиовсплеск II типа могли быть проявлением одной и той же замедлявшейся корональной ударной волны. Их кинематика была согласована с аналитическим описанием распространения сильной ударной волны в среде со степенным спадом плотности от центра расширения.

\* Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Для выяснения характера возбуждения ударной волны в событии 13.07.2004 по изображениям орбитального телескопа TRACE с высоким пространственным разрешением в канале  $173 \text{ \AA}$  была исследована кинематика эруптивной системы (рис. 1). Система состояла из двух тёмных фрагментов 1 и 2 волокна (fil), яркого выброса (bf) и наклонной петельной структуры (loop), вершина которой находилась в  $55 \text{ Мм}$  от волокна. Фрагменты эруптивной системы на рис. 1 обозначены дугами овалов. В тех случаях, когда существовали трудности в отождествлении лидирующего края какого-либо фрагмента, его определяли по разностным изображениям.

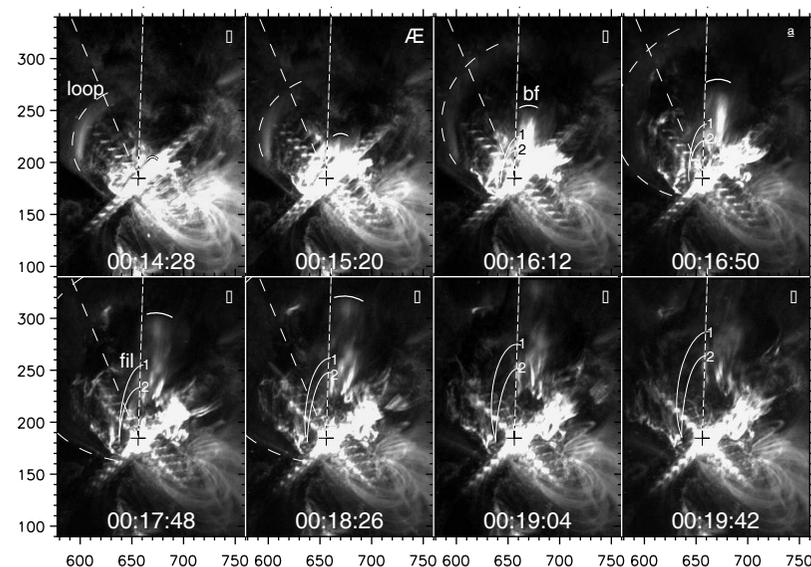


Рис. 1. Изображения области эрупции по данным телескопа TRACE. Крестом показано местоположение волокна до эрупции, дугами овалов – лидирующие края фрагментов волокна 1 и 2 (fil), яркого выброса (bf) и петли (loop). По осям – сек. дуги от центра солнечного диска

Измеренные положения фрагментов эруптивной системы в зависимости от времени использовались для начального приближения. На начальном и конечном этапе движения скорости фрагментов

были постоянными, их определяли путем нахождения соответствующих коэффициентов при линейной аппроксимации измеренных расстояний. Плавный переход от начальной скорости к конечной можно получить интегрированием какой-либо известной аналитической функции, описывающей профиль ускорения. Ограниченность наблюдаемых данных не позволила определить его детальный профиль, поэтому для его описания использовалась гауссиана. Подобное приближение сделано в [8], в этом случае ускорение определяется выражением:

$$a = \frac{(v_1 - v_0)e^{-((t-t_0)/\tau_{acc})^2/2}}{\sqrt{2\pi} \tau_{acc}},$$

где  $v_0$  и  $v$  – начальная и конечная скорости,  $\tau_{acc}\sqrt{8\ln 2}$  – полная ширина на половине максимума профиля ускорения, который центрирован на время  $t_0$ . Параметры  $\tau_{acc}\sqrt{8\ln 2}$  и  $t_0$  подбирались таким образом, чтобы кинематические кривые расстояние-время, полученные путем интегрирования аналитических функций ускорения и скорости, наилучшим образом описывали соответствующие зависимости, полученные из наблюдений. В том случае, если кинематика была более сложной, использовались комбинации гауссиан, и их параметры подбирались вручную.

Результаты измерений, выполненных в картинной плоскости, представлены на рис. 2 для фрагментов волокна (слева) и яркого выброса и петли (справа). Штрихпунктирная кривая на рис. 2а рассчитана с использованием профиля ускорения, показанного штрихпунктиром на рис. 2в, и аппроксимирует точки, измеренные для верхнего края быстрого фрагмента волокна 1. Точечные кривые на рис. 2а–в соответствуют верхнему краю медленного фрагмента 2, а сплошной линией показано среднее положение между двумя фрагментами. Горизонтальными отрезками отмечено время экспозиции. Максимальное ускорение «усредненного» волокна достигло  $2 \text{ км/с}^2$  в 00:14:05, соответствующие кривые скорости и расстояния показаны сплошными линиями на рис. 2б,а.

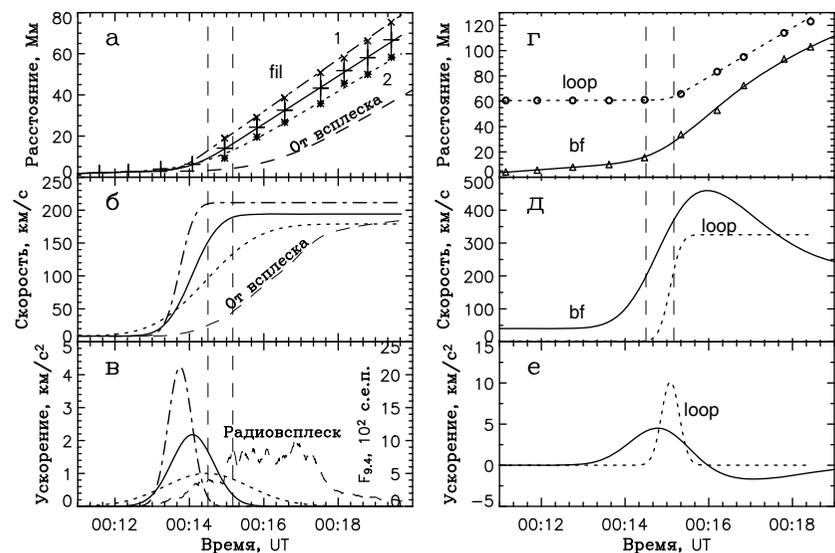


Рис. 2. Кинематические графики фрагментов эруптивной системы: а–в – для фрагментов волокна (fil) 1 и 2, и их среднего положения, г–е – для петлевой системы (loop) и яркого выброса (bf). Символами показаны измеренные положения фрагментов, кривыми – их аппроксимации

В [7] было показано, что профили ускорения КВМ близки к профилям всплесков в жестком рентгене, а последние, как известно, похожи на профили микроволновых всплесков. Пунктиром на рис. 2а–в показаны кинематические кривые, рассчитанные в предположении, что профиль ускорения повторяет профиль микроволнового радиовсплеска на частоте 9.4 ГГц, представленный на рис. 2в. Зависимость расстояние-время, рассчитанная по профилю микроволнового всплеска, имеет задержку примерно в 2 мин по сравнению с измеренными положениями волокна, что показывает, что вспышка, вероятно, была вызвана эрупцией, а не наоборот.

Расстояния эруптивной петли (кружки) и яркого выброса (треугольники) от начального положения волокон, а также их аппроксимации (точечная и сплошная кривая) приведены на рис. 2г. Эти фрагменты эруптивной системы видны на изображениях гораздо лучше фрагментов волокна, поэтому неопределенности в поло-

жении их лидирующих краев значительно меньше. Ускорение яркого выброса началось в 00:13 (рис. 2е), оно достигло своего максимального значения ( $4 \text{ км/с}^2$ ) в 00:14:50, а затем сменилось замедлением. Темное волокно начало подниматься почти одновременно с ярким выбросом, но его скорость и ускорение были значительно меньше. Что представляет собой яркий выброс bf, сказать трудно. Он является либо аркадой над волокнами, либо ещё одним нагретым волокном, либо мелкомасштабной петельной структурой, чья эрупция могла вызвать дестабилизацию волокна (как, напр., в [4]). Отметим, что момент ускорения яркого выброса совпадает с расчетным временем возникновения волны, найденным в [3], поэтому можно заключить, что волна, скорее всего, была возбуждена этим выбросом как импульсным поршнем. В дальнейшем, после его замедления, волна могла свободно распространяться подобно взрывной волне.

Петля (loop) оставалась неподвижной до 00:14:30 (рис. 2е), после 00:15:10 ее скорость резко возросла, достигла максимальной величины в  $320 \text{ км/с}$  и далее не менялась. Ускорение петельной структуры произошло в период, отмеченный двумя вертикальными штриховыми линиями, максимальное ускорение достигло  $10 \text{ км/с}^2$ . Петельная система находилась в стороне от яркого выброса и, скорее всего, ее движение было вызвано прохождением волны. Для определения силы волны было оценено число Маха:  $M = \frac{V_{sh}}{V_{fast}}$ . Скорость ударной волны  $V_{sh}$  в момент ускорения петли (00:15:05)  $\sim 1200 \text{ км/с}$  (рис. 2б). Скорость быстрого магнитного звука  $V_{fast}$  в предположении, что направление распространения волны перпендикулярно направлению магнитного поля, можно приблизительно оценить из выражения [2]:  $V_{sh} \approx V_{fast} + \frac{\kappa U_{sh}}{2}$ . Коэффициент  $\kappa$  зависит от значения плазменной  $\beta$  и от направления распространения волны, его значения находятся в пределах  $(\gamma+1)/2 \leq \kappa \leq 3/2$ . Мы приняли скорость петли равной скорости газа за ударным фронтом  $U_{sh} = V_{loop\_max} \approx 320$

км/с (рис. 2д). Оцененное число Маха  $M \approx 1.3$  (при  $\kappa = 3/2$ ), т.е. через 15 с после своего возникновения волна становится ударной.

Нами было выяснено, что петельная система наклонена под небольшим углом к фотосфере и что высота ее вершины над фотосферой  $\sim 30 \text{ Мм}$ . Если начальная высота волокна была более  $10 \text{ Мм}$ , то это значит, что участок волнового фронта, на пути которого лежала вершина петельной структуры, распространялся почти в горизонтальном направлении. Скорее всего, в вертикальном направлении интенсивность волны была выше.

Таким образом, мы пришли к выводу, что ударная волна в событии 13.07.2004 была возбуждена ускорившимся ярким выбросом как импульсным поршнем, а затем, после его замедления, свободно распространялась как взрывная. Наши результаты совпадают с выводами [5] об образовании ударной волны на малой высоте в короне, и об ее дальнейшем замедлении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменко И.В., Гречнев В.В., Уралов А.М. Волна Мортонa, «волна EIT» и радиовсплеск II типа как проявление единого волнового фронта в событии 13 июля 2004 г. // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2010. С. 82–91. (Ежегодник Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН, Вып. 13).
2. Уралов А.М. Затухание уединенных МГД-ударных волн малой интенсивности в плавно-неоднородной среде // Магнитная гидродинамика, 1982. № 1. С. 45–50.
3. Grechnev V.V., Uralov A.M., Slemzin V.A. et al. Absorption phenomena and a probable blast wave in the 13 July 2004 eruptive event // Solar Phys. 2008. V. 253, P. 263–290.
4. Meshalkina N. S., Uralov A. M., Grechnev V. V. Eruptions of magnetic ropes in two homologous solar events of 2002 June 1 and 2: a key to understanding an enigmatic flare // PASJ, 2009. V. 61. No. 4. P. 791–803.
5. Pohjolainen S., Hori K., Sakurai T. Radio Bursts Associated with Flare and Ejecta in the 13 July 2004 Event // Solar Phys., 2008. V. 253. P. 291–303.
6. Pomoell J., Vainio R., Kissmann R. MHD modeling of coronal large-amplitude waves related to CME lift-off // Solar Phys., 2008. V. 253. P. 249–261.
7. Temmer M., Veronig A. M., Vršnak B. et al. Acceleration in fast halo CMEs and synchronized flare HXR bursts // Astrophys. J., 2008. V. 673. P. L95–L98.

8. Wang Yu., Zhang J., Shen Ch. An analytical model probing the internal state of coronal mass ejections based on observations of their expansions and propagations // J. Geophys. Res., 2009. V. 114. P. A10104–A10129.

9. Warmuth A., Vršnak B., Magdalenic et al. A multiwavelength study of solar flare waves. II. Perturbation characteristics and physical interpretation // Astron. and Astrophys., 2004. V. 418. P. 1117–1129.

УДК 523.985

*В. Г. Лозицкий\*, Е.В. Курочка\*, О.Б. Осыка\**

### **МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ: ДАННЫЕ СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ НАБЛЮ- ДЕНИЙ**

Исследуется солнечная вспышка 5 ноября 2004г. балла M4.1/1B. Для 4-х моментов этой вспышки (11<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>, 11<sup>h</sup> 37<sup>m</sup>, 11<sup>h</sup> 39<sup>m</sup> и 11<sup>h</sup> 45<sup>m</sup> UT) изучены стоксовы  $I \pm V$  профили 10 фотосферных линий FeI, FeII, ScII и CrII. Магнитные поля во вспышке измерялись двояко: методом «центров тяжести» и инверсным методом – на основе сопоставления наблюдаемых и рассчитанных по программе Э.А.Барановского профилей линий. Данные обоих методов хорошо согласуются между собой и указывают на то, что в максимуме вспышки (11<sup>h</sup>35<sup>m</sup>) существовал острый пик магнитного поля в верхней фотосфере ( $\lg\tau(500) = -2.7$ ), который в процессе развития размывался и смещался в более глубокие слои фотосферы со скоростью до 3 км/с. Полуэмпирическая модель вспышки имеет не один, а два слоя с повышенной температурой: в верхней и средней фотосфере, которые также смещались вглубь с угасанием вспышки. В целом, при угасании вспышки индукция магнитного поля уменьшалась, а турбулентная скорость – увеличивалась, что свидетельствует о трансформации магнитной энергии в энергию турбулентных движений.

### *ВВЕДЕНИЕ*

Магнитные поля в солнечных вспышках изучены значительно меньше, чем в пятнах. Одна из причин этого – в том, что наблюдать вспышки намного сложнее, чем пятна или факелы. Пятна, например, можно наблюдать на диске непрерывно много дней подряд, тогда как вспышки возникают нечасто и внезапно, а развиваются

---

\* Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина