

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

ВОЛНА МОРТОНА, «ВОЛНА EIT» И РАДИОВСПЛЕСК II ТИПА КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ЕДИНОГО ВОЛНОВОГО ФРОНТА В СОБЫТИИ 13 ИЮЛЯ 2004 г.

Показано, что наблюдаемые в событии 13 июля 2004 г. волна Мортонa, «волна EIT» и радиовсплеск II типа могут быть проявлением замедляющейся ударной волны, возникшей во время взрывной эрупции волокна. Выполнена аппроксимация частотного дрейфа радиовсплеска II типа зависимостью расстояние-время для распространения сильной ударной волны в среде, описываемой двумя моделями плотности. Рассчитанные скорости ударной волны и ее оценки, выполненные на разных станциях (по данным SGD), находятся в согласии друг с другом.

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что ударные волны в солнечной короне возникают во время вспышек [18, 19] или корональных выбросов массы (КВМ) [15, 16]. Следствием их прохождения по корональному стримеру является возникновение радиовсплесков II типа на метровых длинах волн, которые появляются на динамическом спектре как узкие полосы радиоизлучения, медленно дрейфующие от высоких частот к низким со скоростью порядка 0,1–1 МГц/с [2].

Также предполагают, что ударные волны могут быть причиной возникновения волн Мортонa и некоторых «волн EIT». Волна Мортонa [12] – это возмущение, которое можно наблюдать в хромосфере в центре и крыльях линии H α , а также в линии He I 10830 Å [20]. В работе [25] было показано, что, вероятно, все волны Мортонa сопровождаются радиовсплесками II типа. Была обнаружена хорошая корреляция между их кинематикой, что позволило сделать

предположение, что они являются проявлениями одного и того же возмущения.

EIT-волны обычно наблюдаются в виде яркого расширяющегося диффузного кольцевого фронта в корональных каналах крайнего ультрафиолетового диапазона, реже – в мягком рентгене. Согласно одной точке зрения [17, 23], EIT-волна является корональным аналогом хромосферной волны Мортонa, другая интерпретация рассматривает «волну EIT» как следствие сжатия плазмы в процессе постепенного открытия линий магнитного поля во время подъема КВМ [4, 6]. В пользу волнового происхождения EIT-волн говорят результаты, полученные в исследованиях [23-25], где была найдена близость кинематических кривых для EIT- и волн Мортонa и было сделано предположение, что они могут являться признаками одного и того же возмущения. Типичные характеристики такого возмущения – его замедление, расширение профиля и уменьшение амплитуды, что характерно для свободно распространяющейся быстрой ударной волны.

Одним из аргументов против волнового происхождения EIT-волн является несоответствие между их наблюдаемыми скоростями и скоростями ударных волн, оцениваемыми по частотному дрейфу сопутствующих радиовсплесков II типа. Klassen et al. [10] пришли к заключению, что скорости источников всплесков II типа, рассчитанные из скоростей их дрейфа, примерно в 3 раза превышают скорости волн EIT. В настоящей работе мы хотим показать, что в исследованном ранее событии 13 июля 2004 г. [8] существует тесное соответствие между дрейфом радиовсплеска II типа и распространением волны Мортонa и «EIT-волны».

АППРОКСИМАЦИЯ РАДИОВСПЛЕСКА II ТИПА

Событие 13 июля 2004 г. ранее уже детально исследовано в ряде работ [8, 13]. Оно было связано со вспышкой класса M 6.7 в мягком рентгене (максимум в 00:17 UT) и КВМ. В событии наблюдались эрупция волокна и волна Мортонa в линии H α (по данным обсерватории BBSO), расширение петли и яркий выброс в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (изображения TRACE в 171 Å), в ка-

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

нале 195 \AA (SOHO/EIT) была зафиксирована EIT-волна. В канале 304 \AA наблюдалось крупномасштабное потемнение, по своей форме и положению отличное от диммингов в корональных каналах, на ряде частот микроволнового диапазона – отрицательные радиовсплески.

На метровых длинах волн несколькими обсерваториями (Кулгура, Лермонт, Хирайсо) были зарегистрированы всплески II и III типов, всплеск II типа наблюдался с 00:16 до 00:43 UT в частотном диапазоне от 300 МГц до 20 МГц. Динамический спектр, представленный на рис. 1, получен радиоспектрографом обсерватории Хирайсо (<http://sunbase.nict.go.jp/solar/denpa/hirasDB/Events/>). Радиовсплеск II типа начался в 00:16:40 UT, излучение наблюдалось как на основной плазменной частоте ($\approx 120 \text{ МГц}$), так и на второй гармонике ($\approx 240 \text{ МГц}$). Скорость частотного дрейфа уменьшалась от $0,4 \text{ МГц/с}$ до $\approx 0,1 \text{ МГц/с}$. Всплеск II типа на декаметровых волнах зарегистрирован не был.

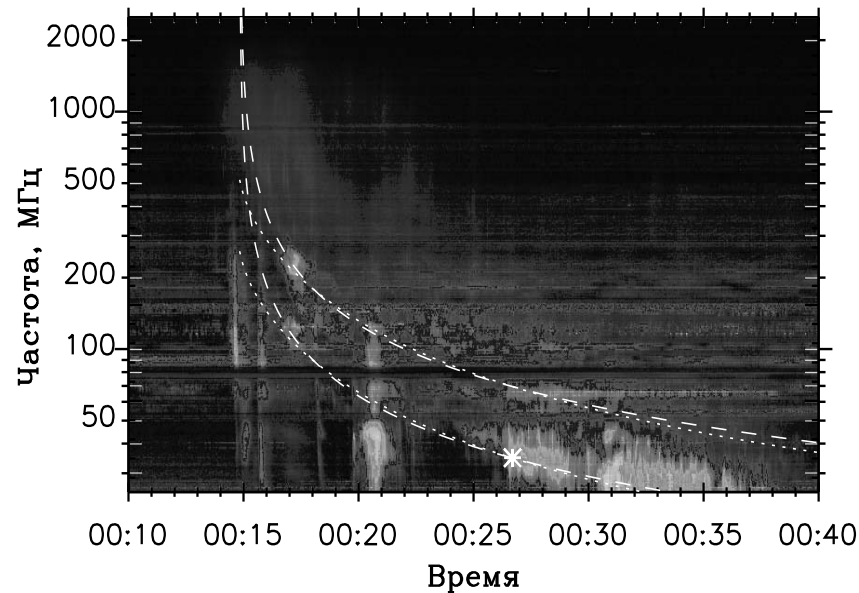


Рис.1. Радиовсплеск II типа на динамическом спектре (по данным радиоспектрографа Хирайсо) и его аппроксимация, выполненная с помощью степенной модели изменения плотности (штрихи) и модели Ньюкирка (точки)

Ранее в работе [8] была выполнена аппроксимация измеренных расстояний фронта волны Мортон и фронта EIT-волны с помощью выражений, описывающих распространение сильной ударной волны, возникшей в результате взрывной эрупции волокна, в среде с постоянной плотностью ($N = N_0$) и со степенным спадом плотности от центра взрыва:

$$N = N_0 r^{-\delta}. \quad (1)$$

Результаты аппроксимации функцией $R \sim t^{2/(5-\delta)}$ в виде

$$R = R_0 + (R_1 - R_0) \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right)^{\frac{2}{5-\delta}} \quad (2)$$

показаны на рис. 2. Здесь R_0 – расстояние от виртуального центра расширения до начального положения волокна, от которого проводились измерения фронта волны на изображениях, t_0 – начало расширения. Эти величины задаются численно. Для нахождения параметров t_1 и R_1 использовалась последняя точка для волны Мортон.

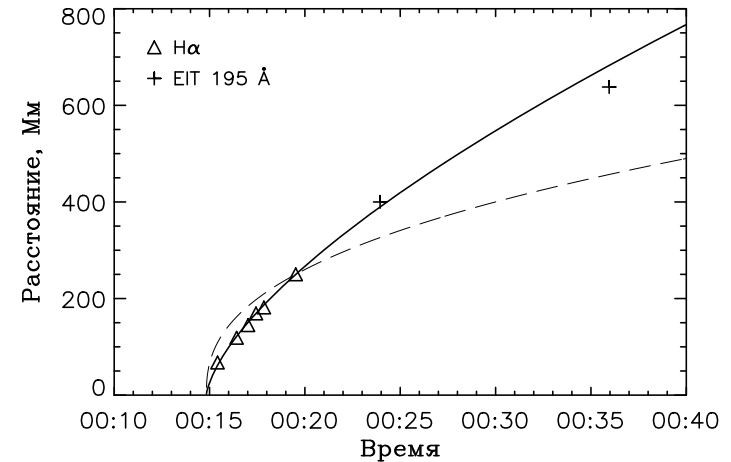


Рис.2. Зависимость расстояние-время (в картинной плоскости) для волны Мортон (треугольники) и EIT-волны (кресты), измеренные в одном и том же направлении от эруптивного центра. Сплошная линия – распространение сильной ударной волны в среде с радиальным спадом плотности $N \sim R^{-2}$, штрихи – в среде с постоянной плотностью $N = const$

Наилучшее соответствие между измеренными точками и теоретической кривой было достигнуто при показателе степени спада плотности среды $\delta = 1.9$ и времени старта волны $t_0 = 00:14:46$ UT. Неопределенность положения центра расширения R_0 не превышает 20 Мм. Логично предположить, что радиовсплеск II типа, также как волна Моргтона и EIT-волна, был вызван прохождением сильной ударной волны через области короны с подобной моделью изменения плотности.

Основная частота плазменного излучения f_p пропорциональна электронной плотности N_e [1]:

$$f_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{\pi m_e}} = 8,98 \times 10^3 \sqrt{N_e} \text{ [Гц]}, \quad (3)$$

поэтому, используя радионаблюдения совместно с подходящей моделью корональной электронной плотности, можно вычислить высоты и скорости источников радиовсплеска II типа. Кроме предложенной в [8] степенной модели спада плотности, можно также использовать модель Ньюкирка, которая часто применяется для нахождения электронной плотности в активных областях солнечной короны [11]:

$$N_e = N_0 \times 10^{4,32R_C / R}. \quad (4)$$

Здесь $N_0 = 4,2 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$, R_C – солнечный радиус, расстояние R измеряется от центра Солнца. Поскольку в событии 13 июля 2004 г. над северо-западной частью солнечного диска перед появлением КВМ находился стример (по изображениям SOHO/LASCO), применение модели Ньюкирка вполне обосновано.

Выбирая на динамическом спектре реперную точку (t_1, f_p) , через которую должна пройти теоретическая кривая, мы определили по формуле (3) электронную плотность N_e , а в соответствии с различными моделями плотности (1) и (4), и высоту R_1 источника радиовсплеска II типа в этой точке (показана звездочкой на рис.3,а). Далее, используя найденную в [8] зависимость (2) для распространения сильной ударной волны во времени, можно рассчитать изменение плотности, основной плазменной частоты и ее гармоники.

Аппроксимированный таким образом частотный дрейф радиовсплеска II типа с применением модели со степенным спадом плотности от центра расширения и модели Ньюкирка, показан на рис.1. При использовании первой модели наилучшее соответствие получается при $N_0 = 3,5 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, шкале высот $h_0 = 100$ Мм и $\delta = 2,1$. В обоих случаях теоретические кривые хорошо совпадают с реальной картиной радиовсплеска II типа, видимой на динамическом спектре.

Можно отметить, что применение модели Ньюкирка имеет некоторые ограничения. Во-первых, величина электронной плотности при $R = R_C$ не может быть больше, чем $1,7 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$. Во-вторых, эта модель дает распределение плотности для усредненной активной области, тогда как оно может быть различно в каждом конкретном событии. Модель со степенным спадом плотности позволяет изменять величины N_0 и δ для того, чтобы добиться наилучшего совпадения наблюдений с теоретическими кривыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Событие 13 июля 2004 г. является одним из довольно редких событий, в которых одновременно наблюдались волна Моргтона, EIT-волна и радиовсплеск II типа. Кинематика этих явлений хорошо описывается выражением для распространения сильной ударной волны, возникшей во время взрывной эрупции волокна, в среде со степенным спадом плотности. Это позволяет предположить, что обе волны и радиовсплеск II типа в этом событии имели общее происхождение.

Причина возникновения ударных волн, порождающих радиовсплески II типа, до сих пор является предметом дискуссий. Предполагается, что всплески II типа на метровых волнах ассоциируются с ударными волнами, возникшими во вспышках [21], а всплески в дека- и гектометровом диапазоне возникают при распространении ударных волн, управляемых КВМ, в межпланетное пространство [5, 7].

Считается, что взрывные ударные волны, возникающие во время вспышек, вызываются импульсом давления от вспышки, а поршневые волны управляются КВМ. Также предполагают, что

мелкомасштабные выбросы могут быть причиной МГД и ударных волн [22]. Такие выбросы действуют как временный поршень, генерирующий управляемую ударную волну, однако когда выброс замедляется или останавливается, возмущение продолжается как свободно распространяющаяся ударная волна. При исследовании ряда событий Гречневым [9] было показано, что ударная волна может возбуждаться импульсным поршнем (например, эруптивным волокном) на высотах до 100 Мм, а затем свободно распространяться подобно взрывной волне. Именно это и произошло в событии 13 июля 2004 г.

Нами было сделано предположение о сильной ударной волне и радиальном спаде плотности от центра взрыва, тогда как в действительности он может быть анизотропным и, вероятно, переменным. Падение плотности по всем направлениям вполне возможно вблизи активной области, но вряд ли это верно на больших расстояниях. В реальной ситуации можно предположить, что показатель спада плотности должен находиться в некотором диапазоне значений. Диапазон величин для этого показателя, измеренного в работах [23-25], составляет от 0,12 до 2,8.

На рис.3,а показана зависимость расстояние-время, рассчитанная для распространения сильной ударной волны в среде с двумя моделями изменения плотности при аппроксимации радиовсплеска II типа. На рисунке также отмечены точки для волны Мортон и EIT-волны. Показатель спада плотности среды при аппроксимации радиовсплеска II типа несколько больше ($\delta = 2,1$), чем при аппроксимации точек для волны Мортон и EIT-волны ($\delta = 1.9$). Как и следовало ожидать, при распространении волны вверх от центра расширения плотность среды уменьшается быстрее, чем при распространении вдоль поверхности.

Рассчитанную мгновенную скорость сильной ударной волны, показанную на рис.3,б можно сравнить с оценками скорости волны, полученными на разных станциях и опубликованными в Solar Geophysical Data. Оцениваемые скорости уменьшаются от 1000 км/с в 00:17 (ст. Кулгура) и 850 км/с в 00:16 (ст. Лермонт) и до 550 км/с в 00:27 (ст. Холломэн). Т.е. всплески II типа, по которым были сделаны данные оценки, показывают возникновение ударной волны

с начальной скоростью ~ 1000 км/с и ее постепенное замедление в дальнейшем. Можно видеть, что рассчитанные нами скорости ударной волны и эти оценки находятся в хорошем согласии.

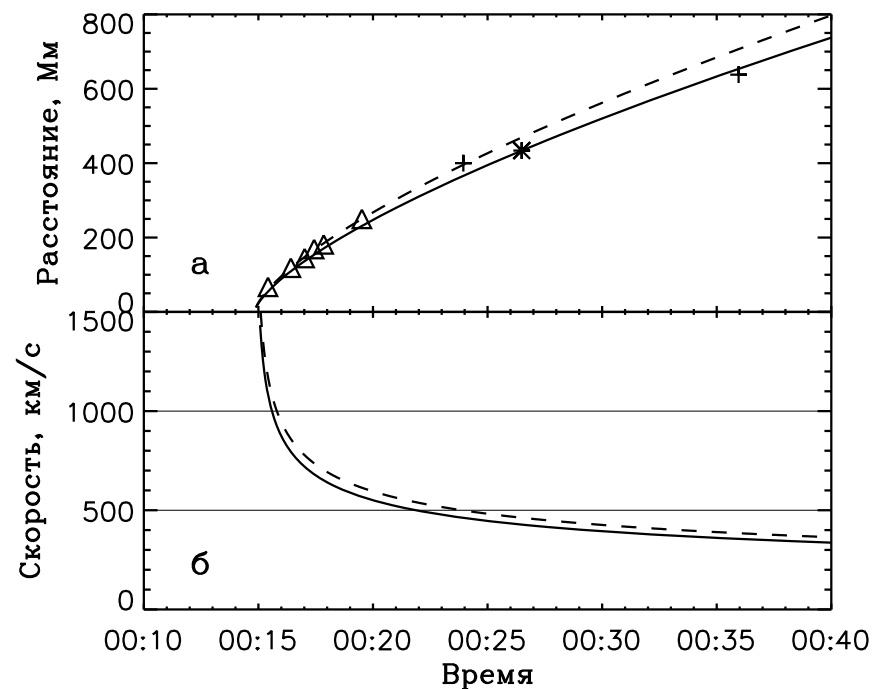


Рис.3: а – зависимость расстояние-время для распространения сильной ударной волны в среде со степенным спадом плотности (сплошная линия) и с применением модели Ньюкирка (штрихи). Звездочкой показана высота радиоисточника II типа, рассчитанная для реперной точки, отмеченной на рис.1. Треугольники и кресты – точки для волны Мортон и EIT-волны; б – мгновенные скорости сильной ударной волны, полученные с применением двух моделей изменения плотности

Таким образом, кинематическая близость волны Мортон, EIT волны и радиовсплеска II типа подтверждает их общую природу. Соответствие наблюдаемых данных рассчитанной теоретической кривой позволяет предположить, что они были вызваны сильной ударной волной, замедляющейся со временем, которая возникла во

время эрупции волокна и распространялась в среде со степенным спадом плотности от центра расширения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краус Дж. Радиоастрономия. М.: Советское радио. 1973. 456 с.
2. Крюгер А. Солнечная радиоастрономия и радиофизика. М.: Мир. 1984. 469 с.
3. Biesecker D. A., Myers D. C., Thompson B. J. et al. Solar Phenomena Associated with «EIT Waves» // *Astrophys. J.* 2002. V.569, P.1009-1015.
4. Chen P. F., Wu S. T., Shibata K., Fang C. Evidence of EIT and Moreton waves in numerical simulations // *Astroph. J.* 2002. V.572. P.99-102.
5. Classen H. T., Aurass H. On the association between type II radio bursts and CMEs // *Astron. and Astrophys.* 2002. V.384, P.1098-1106.
6. Delannée C. Another view of the EIT wave phenomenon // *Astroph. J.* 2000. V.545, P.512-523.
7. Gopalswamy N., Kaiser M. L., Lepping R. P., Kahler S. W., Ogilvie K., Berdichevsky D., Kondo T., Isobe T., Akioka M. Origin of coronal and interplanetary shocks - A new look with WIND spacecraft data // *J. Geophys. Res.* 1998. V.103, P.307-316.
8. 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.
9. Grechnev V., Uralov A., Chertok I., Afanasyev A. The Onset and Propagation of CMEs and Coronal Waves // Тезисы в кн.: The Sun: from active to quiet. International Coronal Workshop. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. 19-23 October 2009. Moscow 2009. С. 37.
10. Klassen A., Aurass H., Mann G., Thompson B.J. Catalogue of the 1997 SOHO-EIT coronal transient waves and associated type II radio burst spectra // *Astron. and Astrophys.* 2000. V.141, P. 357-369.
11. Newkirk G. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation // *Astrophys. J.* 1961. V.133, P.983-1013.
12. Moreton G. E., Ramsey H. E. Recent observations of dynamical phenomena associated with solar flares // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific (PASP).* 1960. V.72, No. 428. P.357.
13. 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.
14. Robinson R. D. Velocities of type II solar radio events // *Solar Phys.* 1985. V.95, P.343-357.
15. Stewart R. T., Howard R. A., Hansen F. et al. Observations of Coronal Disturbances from 1 to 9 R_{sun}. II: Second Event of 1973, January 11 // *Solar Phys.* 1974. V.36, P.219-231.
16. Stewart R. T., McCabe Marie K., Koomen M. J. et al. Observations of Coronal Disturbances from 1 to 9 R_{sun}. I: First Event of 1973, January 11 // *Solar Phys.* 1974. V.36, P.203-217.
17. Thompson B. J., Reynolds B., Aurass H., Gopalswamy N., Gurman J. B., Hudson H. S., Martin S. F., St. Cyr. O. Observations of the 24 September 1997 coronal flare waves // *Sol. Phys.* 2000. V.193, P.161-180.
18. Uchida Y., Altschuler M., Newkirk G. Flare-Produced Coronal MHD-Fast-Mode Wavefronts and Moreton's Wave Phenomenon // *Solar Phys.* 1973. V.28, P.495-516.
19. Vršnak B., Ruzdjak V., Zlobec P., Aurass H. Ignition of MHD shocks associated with solar flares // *Solar Phys.* 1995. V.158, P. 331-351.
20. Vršnak B., Warmuth A., Brajša R., Hanslmeier A. Flare waves observed in Helium I 10830 Å. A link between H α Moreton and EIT waves // *Astron. and Astrophys.* 2002. V.394, P.299-310.
21. Wagner W. J., MacQueen R. M. The excitation of type II radio bursts in the corona // *Astron. and Astrophys.* 1983. V.120, P.136-138.
22. Warmuth A. Large-scale Waves and Shocks in the Solar Corona // *Lecture Notes in Physics.* 2007. V. 725, P.107-138.
23. Warmuth A., Vršnak B., Aurass H., Hanslmeier A. Evolution of two EIT/H α Moreton waves // *Astrophys. J.* 2001. V.560, P.105-109.
24. Warmuth A., Vršnak B., Magdalenic et al. A multiwavelength study of solar flare waves. I. Observations and basic properties // *Astron. and Astrophys.* 2004. V.418, P.1101-1115.
25. 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.