

И.В. Кузьменко, В.В. Гречнев¹, А.М. Уралов¹

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНОЙ
ВОЛНЫ В ЭРУПТИВНОМ СОЛНЕЧНОМ СОБЫТИИ
11 МАЯ 2011 г.**

Проведен анализ наблюдений слабого по мощности события 11 мая 2011 г., связанного с эрупцией волокна. По изображениям в различных спектральных диапазонах выполнены измерения, позволяющие проследить возникновение и распространение корональной ударной волны от момента ее возникновения в нижней короне до расстояния в 17 солнечных радиусов. Результаты измерений подтвердили импульсно-поршневой механизм возбуждения ударной волны эруптивным волокном. МГД-возмущение, возбужденное при эрупции, быстро превращается в ударную волну, проходит через пассивно расширяющуюся над эруптивным волокном аркаду, и затем распространяется свободно, подобно замедляющейся взрывной волне. Установлено, что «волна EIT», наблюдаемая над солнечным лимбом, не имела отношения к ударной волне, а представляла собой область сжатия перед расширяющейся над волокном аркадой.

ВВЕДЕНИЕ

Существование ударных волн в солнечной короне подтверждается рядом явлений. Волна Мортонa, согласно идее Учиды [13], представляет собой нижний край корональной магнитогидродинамической (МГД) ударной волны, распространяющийся вдоль солнечной поверхности. В результате прохождения ударной волны по корональному стримеру возникает радиовсплеск II типа. Волновое происхождение некоторых «EIT-волн» подтверждает сходство кинематических кривых для «EIT-волн» и волн Мортонa, найденное в

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск.

исследованиях [16–18], а также тесное соответствие между дрейфом радиовсплеска II типа и распространением этих возмущений [10].

Механизм возбуждения ударных волн до сих пор является предметом дискуссий. Первоначально их возникновение было связано со вспышками [9]. В наиболее популярном сейчас сценарии ударная волна возбуждается внешней поверхностью быстрого коронального выброса массы (КВМ) [4]. Такие ударные волны часто рассматривают как основные ускорители протонов и тяжелых ионов в событиях с солнечными частицами [11]. Нами была показана возможность возбуждения ударных волн импульсно ускоренным магнитным жгутом [6, 7], индикатором положения которого до начала эрупции является протуберанец. Эруптивное волокно (протуберанец) обычно рассматривается как пассивное вместилище плотной плазмы в нижней части магнитного жгута большего масштаба. Согласно нашей концепции, магнитный жгут, расположенный низко в короне, резко ускоряется и производит МГД-возмущение. Оно быстро становится крутым и переходит в ударную волну в области быстрого спада альфвеновской скорости над активной областью. Дальше это возмущение свободно распространяется подобно замедляющейся взрывной волне.

Разногласия по поводу механизмов возбуждения ударных волн и интерпретации «волн EIT» могут существовать из-за ограниченности наблюдений. Наземные наблюдения эрупций волокон, выполненные в основном в линии H_{α} , ограничены быстрым убыванием непрозрачности эруптивного волокна при его расширении, а также эффектом Доплера, за счет которого наблюдаемые фрагменты выходят из полосы пропускания фильтра даже при умеренной скорости вдоль луча зрения. Космические наблюдения на SOHO/EIT в линиях HeII 304 Å и FeXII 195 Å, хорошо подходящие для обнаружения эрупций и волновых проявлений, были ограничены по времени. Ситуация значительно улучшилась, когда были запущены современные космические обсерватории SDO и STEREO, получающие изображения с высоким временным и пространственным разрешением на разных длинах волн.

В данной работе мы исследуем слабое по мощности событие 11 мая 2011 г. по данным различных спектральных диапазонов. Оно

было связано со вспышкой В8.1 в мягком рентгене по данным GOES, максимум которой зарегистрирован в 02:43 (здесь и далее время всемирное). Излучение в жестком рентгене отсутствовало, в микроволновом диапазоне наблюдалось небольшое увеличение, а затем уменьшение потока. В ходе события произошла эрупция волокна, которое находилось между двумя небольшими северо-западными активными областями NOAA 10207 и 10204, и был зарегистрирован КВМ. Событие интересно тем, что, несмотря на его малую мощность, в нем зафиксированы радиовсплеск II типа сложной структуры и «волна EIT». Наша цель состояла в выяснении возможной причины возникновения ударной волны и того, что представляла собой «волна EIT» в этом событии.

КИНЕМАТИКА ЭРУПТИВНОГО ВОЛОКНА И АРКАДЫ НАД НИМ

Эруптивное волокно хорошо наблюдалось на изображениях SDO/AIA в канале 304 Å и несколько хуже – в 193 Å. В его структуре выделялся более медленный северный сегмент и более тонкий и быстрый юго-западный. Используя фиксированные отношения (то есть отношения данного изображения к изображению до начала события), обработанные с разными порогами яркости в двух каналах, мы измерили кинематику поднимающегося волокна в направлении между двумя сегментами (рис. 1). Максимальная ошибка измерений не превышала 8 Мм. Измерения также были сделаны с использованием изображений радиогелиографа Нобеяма (NoRH) на частоте 17 ГГц, чье поле зрения больше по сравнению с SDO/AIA.

Яркий овал над лимбом, хорошо видимый на изображениях с фиксированными отношениями в 193 Å (как на рис. 1д), обычно называют «волной EIT». В разных событиях «волны EIT» могут иметь различное происхождение и, как отмечалось во введении, часто являются проявлением ударных волн. Но они также могут представлять собой петельные магнитные структуры коронального выброса, расширяющиеся над солнечным лимбом. В данном событии яркий овал, скорее всего, был связан с предэруптивной аркадой, охватывающей

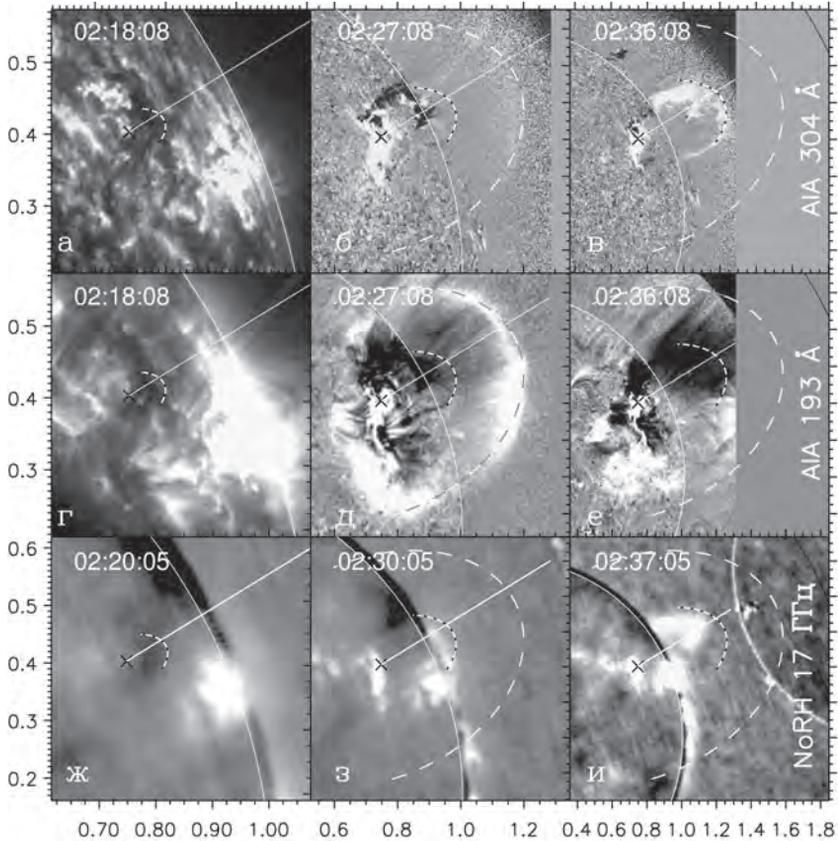


Рис. 1. Подъем эруптивного волокна и аркады над ним, наблюдаемых на изображениях SDO/AIA в каналах 304 \AA (верхний ряд), 193 \AA (средний ряд) и NoRH на частоте 17 ГГц (нижний ряд). Вершины расширяющегося волокна и аркады отмечены штриховыми дугами. Прямая линия показывает направление, в котором были сделаны измерения. Белой дугой отмечен солнечный лимб. Крестом показан центр эрупции. По осям – расстояние от центра солнечного диска в радиусах Солнца

волокно, которая пассивно расширялась при его подъеме. Ориентация волокна и лент вспышки указывает на то, что ось магнитного жгута находилась близко к картинной плоскости, а петли аркады располагались в плоскости, близкой к лучу зрения, поэтому их не видно на изображениях SDO/AIA. Но вот почти радиальные структуры, видимые

внутри овала (рис. 1д), были, вероятно, петлями аркады, плоскости которых имели малые углы относительно луча зрения.

Вершина аркады может быть связана с сепаратрисной поверхностью и препятствует проникновению плазмы внутрь, действуя подобно мембране. Ее расширение приводит к появлению района сжатия на ее вершине, состоящего из «нагребаемой» плазмы, яркость которого постепенно растет. Это уярчение и есть наблюдаемая «волна EIT». Однако расширение аркады приводит к уменьшению плотности внутри ее петель, и, как видно на рис. 1д, е, за расширяющейся аркадой развивается димминг.

Таким образом, яркий овал над лимбом, скорее всего, соответствует вершине расширяющейся предэруптивной аркады. Его положение над лимбом было измерено примерно в том же направлении, что и для волокна. Сначала овал был не резким, поэтому погрешность измерений составила ≈ 15 Мм.

Традиционный способ измерения скорости и ускорения дифференцированием измеренных расстояний приводит к большому разбросу результатов. Чтобы избежать этого, мы задаем гладкую форму профиля ускорения, описывая его аналитической функцией (гауссианой). Измерения, выполненные по изображениям, используются для оценки начальной и конечной скорости, плавный переход между которыми получается интегрированием гауссианы с задаваемыми параметрами. Такая методика аппроксимации данных описана в [1, 6].

На рис. 2 представлены кинематические графики, рассчитанные для волокна и вышележащей аркады. Волокно сначала медленно поднималось со скоростью ≈ 21 км/с, которая характерна для начального этапа эрупции [3]. В 02:17:00 ускорение волокна составило $0,5$ км/с², а затем произошло импульсное возрастание ускорения до $3,3$ км/с² в 02:22:05 \pm 00:00:05. Конечная скорость волокна достигла ≈ 320 км/с и не изменялась после 02:25.

Аркада ускорялась от начальной скорости 325 ± 5 км/с до 465 ± 5 км/с. Кинематические кривые для нее представлены на рис. 2 сплошной серой линией. Наблюдения позволяют оценить только нижний предел максимума ускорения $> 0,9$ км/с² в 02:25:20 \pm 00:00:10. В действительности его длительность может быть меньше, а величина больше. Точками на рис. 2в показан профиль возможного более рез-

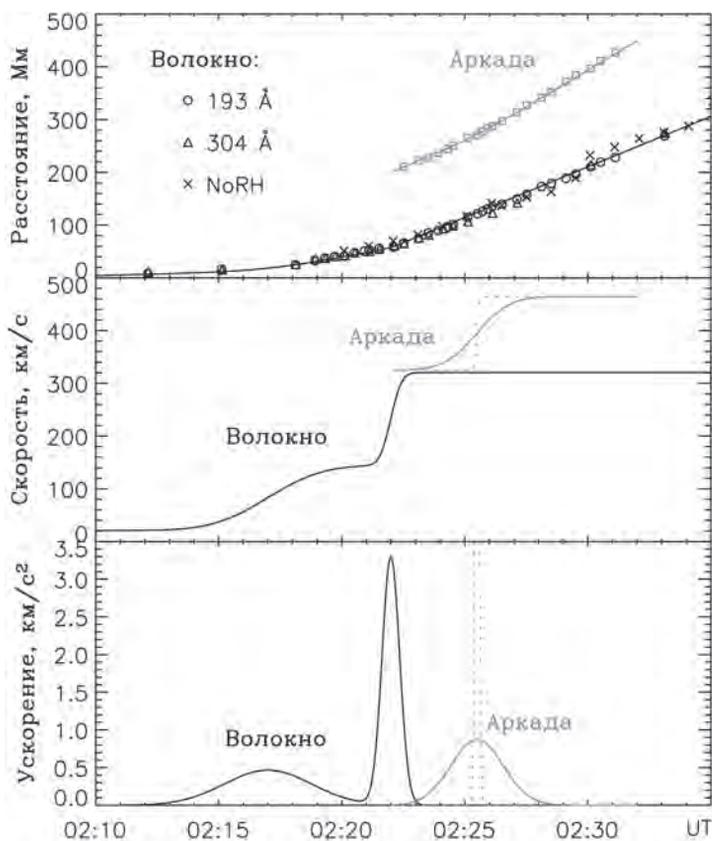


Рис. 2. Кинематические графики для эруптивного волокна и аркады над ним. Символы – измеренные расстояния от центра эрупции по данным SDO/AIA и NoRH, линии – их аппроксимации

кого ускорения аркады. Применение в вычислениях различных профилей ускорения между сплошной и точечной серыми линиями не вызывало заметных отклонений в рассчитанных положениях аркады. Определено время ее ускорения – 02:25:20±00:00:10, то есть аркада ускорилась уже после волокна. Наиболее активное поведение волокна указывает на то, что его эрупция является основной причиной всех наблюдаемых возмущений в этом событии. Резкая эрупция волокна с ускорением до 3,3 км/с² ($\approx 11g_{\odot}$) могла возбудить ударную волну.

АППРОКСИМАЦИЯ ЭМИССИОННЫХ ПОЛОС ДИНАМИЧЕСКОГО СПЕКТРА

Динамические спектры радиовсплеска II типа со станций Кулгура и Лермонт показывают его резкое начало в 02:27:30, которое имело С-образную форму. Мы рассматриваем происхождение всплеска II типа на основе идеи А.М. Уралова, согласно которой всплеск возникает в корональном стримере на фронте ударной волны [14]. С-образная форма его начала означает квазиперпендикулярное столкновение ударной волны с удаленной структурой, подобной стримеру.

В сложной структуре всплеска II типа мы выделили две пары эмиссионных полос (рис. 3). Известно, что часто полосы расщепляются по частотам [15], а в данном случае, если расщепление и существует, то с большим расстоянием между парами, чем обычно. Мы связали такую особенность с прохождением ударного фронта через два стримера, находящихся близко друг к другу (как в [6]).

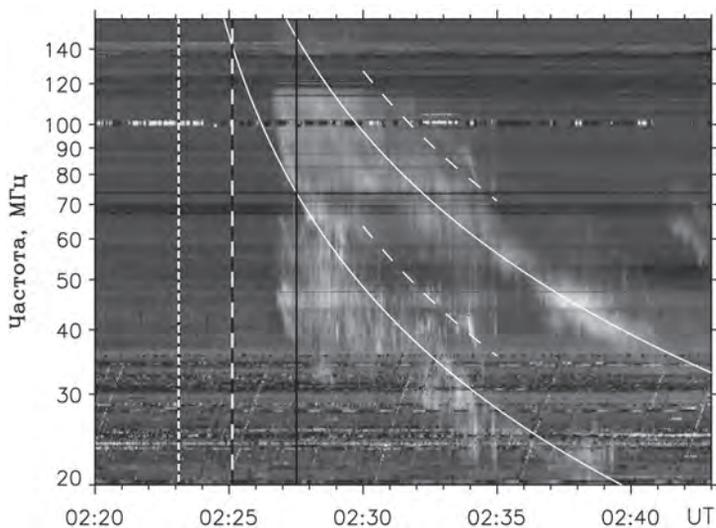


Рис. 3. Динамический спектр радиовсплеска II типа по данным станции Кулгура. Эмиссионные полосы всплеска аппроксимированы сплошной и пунктирной кривыми. Вертикальные линии показывают время наблюдений изображений на рис. 4

Оценка времени возникновения ударной волны t_0 затруднена как из-за сложной структуры всплеска, так и из-за довольно низкой частоты ≤ 140 МГц, на которой он начался. Аппроксимация наблюдаемого частотного дрейфа полос радиовсплеска производилась с использованием соотношений автотомельного приближения сильной ударной волны, распространяющейся в среде, плотность δ которой убывает с расстоянием от центра эрупции по степенному закону $n = n_0(x / h_0)^{-\delta}$ (x – расстояние от источника волны, n_0 – плотность на удалении h_0). В этом приближении распространение ударной волны описывается выражением $x(t) \sim t^{2/(5-\delta)}$, где t – время [6, 10]. Задавая одно и то же время возникновения волны при аппроксимации разных пар полос (рис. 4), мы оценили $t_0 \approx 02:22:10$. Это время соответствует импульсному ускорению эруптивного волокна (сначала мы оценили время возникновения ударной волны, а второй пик ускорения волокна был обнаружен позже).

Используя степенную аппроксимацию, мы вычислили распространение фронта ударной волны. Результат показан на рис. 4, где изображения представляют собой фиксированные отношения и позволяют увидеть расширяющуюся «ЕIT-волну». Дуги разных стилей очерчивают положения фронта волны, рассчитанные при $t_0 = 02:22:10$

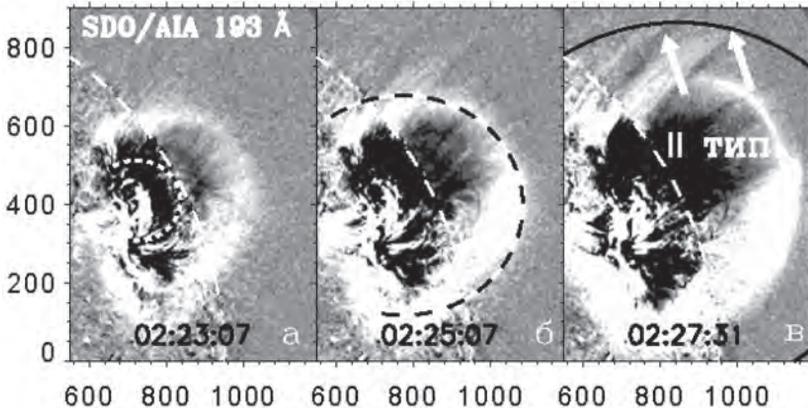


Рис. 4. Распространение расчетного фронта ударной волны на изображениях SDO/AIA в 193 Å (показано дугами разного стиля). По осям – угловые секунды от центра солнечного диска

и $\delta = 2,7$. В данном случае δ соответствует показателю спада плотности над спокойным Солнцем по модели Сайто на средних широтах [12]. Изображения на рис. 4 показаны в разные моменты времени: почти сразу же после возникновения волны (а), во время прохождения волны через аркаду (б), в начале всплеска II типа (в). Эти моменты времени отмечены на динамическом спектре (рис. 3) вертикальными линиями, стили и цвета которых соответствуют дугам.

Проходя через располагающуюся над эруптивным волокном аркаду, пассивное расширение которой происходит из-за деформации крупномасштабных магнитных полей при подъеме волокна, ударная волна увеличивает ее скорость на 140 км/с и распространяется дальше. Уярчения на фронте волны нет, но на ее прохождение указывают две лучеподобные структуры, подобные стримерам, расположенные к северу от места эрупции. Стрелками на рис. 4в отмечено отклонение двух небольших стримеров, в которых, возможно, и были расположены источники всплеска II типа.

Распространение ударной волны в этом событии подтверждают два дополнительных факта. Во-первых, наблюдалась поверхностная «EIT-волна», которая является проявлением ударной волны, распространяющейся в короне вдоль солнечной поверхности в соответствии с идеей Учиды [13], первоначально предложенной для волны Мортонна. Во-вторых, на изображениях в 193 \AA с большим полем зрения наблюдается отражение ее юго-восточной части от корональной дыры. Отразившийся фронт распространялся медленнее, как и в исследовании [8]. В [6] показано, что такие свойства ожидаются для ударной волны.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Распространение волны прослеживается и на изображениях с коронографов SOHO/LASCO/C2 и C3. На рис. 5 представлены последовательные разностные изображения, нормированные к изображению до события. Для того чтобы расширяющиеся фрагменты коронального выброса были видны лучше и для облегчения их сравнения

друг с другом, масштаб всех изображений был изменен таким образом, чтобы на них расширяющийся фронт волны сохранил неизменное положение. Видно, что КВМ имел обычную трехкомпонентную структуру: эруптивное волокно стало его ядром, а расширяющаяся над волокном аркада – фронтальной структурой выброса. Овалами на рис. 5 показаны положения расчетного фронта ударной волны, вычисления которых проведены с теми же параметрами, что и на рис. 4. Распространение волны обнаруживается в отклонении корональных лучей, которые показаны стрелками на рис. 5а–в. Овалы удовлетворительно очерчивают след волны, распространяющейся перед КВМ до $17 R_{\odot}$.

Кинематические графики для ударной волны показаны на рис. 6. Ударная волна замедлялась от начальной скорости > 1200 км/с до ≈ 550 км/с, пока ее скорость не стала сравнимой со скоростью солнеч-

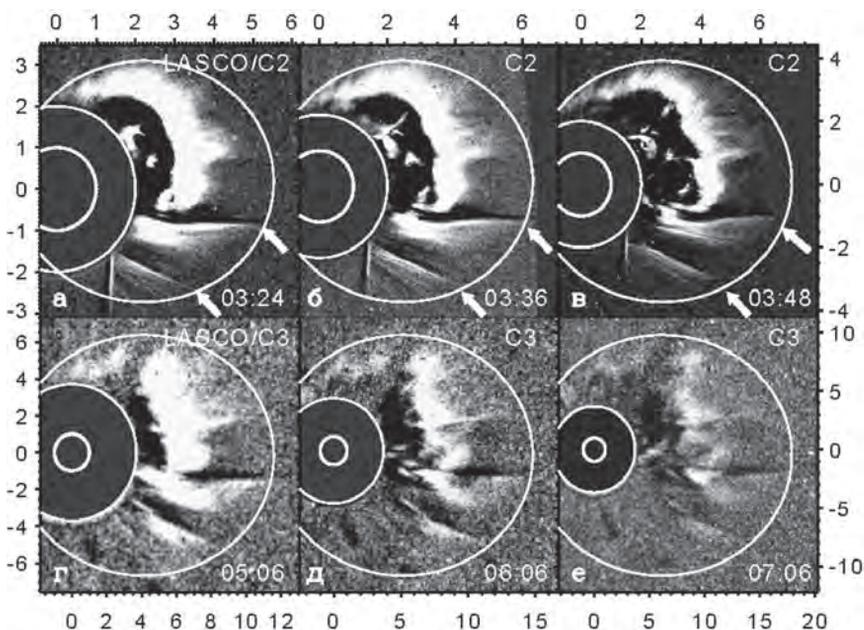


Рис. 5. Распространение расчетного фронта ударной волны на изображениях SOHO/LASCO/C2 и C3. По осям показаны расстояния от центра солнечного диска в радиусах Солнца. Стрелки указывают на отклонения корональных лучей

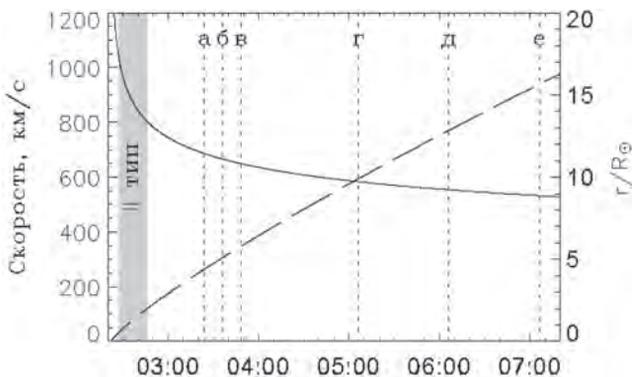


Рис. 6. Расчетные зависимости расстояние–время (ось справа) и скорость–время (ось слева). Вертикальные точечные линии показывают моменты времени, когда получены изображения на рис. 5

ного ветра. Таким образом, ударная волна в этом событии постепенно превратилась в слабое возмущение.

ВЫВОДЫ

При исследовании слабого по мощности события 11 мая 2011 г., связанного с эрупцией волокна вне активной области, мы получили следующие результаты.

Анализ наблюдений в различных спектральных диапазонах показал, что в событии возникла ударная волна. Ее проявления в крайнем ультрафиолете и белом свете, а также динамический спектр радиовсплеска II типа количественно согласуются друг с другом в соответствии с выводами, представленными в [6, 7]. По данным телескопа крайнего ультрафиолетового излучения SDO/AIA, радиогелиографа Нобейма (NoRH) и коронографов SOHO/LASCO/C2 и C3 были выполнены измерения, позволяющие проследить возникновение и распространение корональной ударной волны от ее возникновения в нижней короне до расстояния в 17 солнечных радиусов.

Результаты измерений подтвердили импульсно-поршневой механизм возбуждения ударной волны эруптивным волокном, как было

показано нами ранее [6]. МГД-возмущение возбуждается при эрупции волокна, расширяющегося с импульсным ускорением. Это возмущение быстро превращается в ударную волну, проходит через пассивно расширяющуюся над эруптивным волокном аркаду вперед и затем распространяется свободно, подобно замедляющейся взрывной волне. Распространение волны с высокой точностью описывается степенной аппроксимацией, вычисленной на основе предложенной нами модели [6]. Скорость волны, наблюдаемой на этих изображениях, монотонно снижается от 1200 до 550 км/с.

Установлено, что «волна EIT» в этом событии, наблюдаемая над солнечным лимбом, не является проявлением ударной волны. Повидимому, сгребаемая расширяющейся аркадой плазма не успевает стечь с ее внешней поверхности, и перед ней образуется область сжатия, яркость которой нарастает. Яркость же самой аркады, наоборот, быстро падает за счет снижения концентрации плазмы в петлях при ее расширении.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН – ДВО РАН № 13 «Магнитная активность Солнца и эруптивные процессы в его атмосфере» (12-П-СО-02–07).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьменко И.В., Гречнев В.В., Уралов А.М. О характере возбуждения ударной волны в эруптивном событии 13 июля 2004 г. // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 87–92.
2. Chen P.F., Wu S.T., Shibata K., Fang C. Evidence of EIT and Moreton waves in numerical simulations // *Astroph. J.* 2002. Vol. 572. P. 99–102.
3. Chifor C., Mason H.E., Tripathi D., Isobe H., Asai A. The early phases of a solar prominence eruption and associated flare: a multi-wavelength analysis // *Astron. and Astrophys.* 2006. Vol. 458. P. 965–973.
4. Cliver E.W., Nitta N.V., Thompson B.J., Zhang J. Coronal shocks of November 1997 revisited: the Cme type II timing problem // *Solar Phys.* 2004. Vol. 225. P. 105–139.
5. Delannée C. Another view of the EIT wave phenomenon // *Astroph. J.* 2000. Vol. 545. P. 512–523.
6. Grechnev V.V. 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.* 2011. Vol. 273. P. 433–460.

7. *Grechnev 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 // *Solar Phys.* 2011. Vol. 273. P. 461–477.
8. *Gopalswamy N., Yashiro S., Temmer M. et al.* EUV wave reflection from a coronal hole // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 691. P. L123–L127.
9. *Hirayama T.* Theoretical model of flares and prominences. I: Evaporating flare model // *Solar Phys.* 1974. Vol. 34. P. 323–338.
10. *Kuzmenko I.V., Grechnev V.V., Uralov A.M.* Moreton wave, «EIT wave», and type II radio burst as manifestations of a single wave front // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011. Vol. 51. P. 1045–1048.
11. *Reames D.* Solar release times of energetic particles in ground-level events // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 693. P. 812–821.
12. *Saito K.* A non-spherical axisymmetric model of the solar K corona of the minimum type // *Ann. Tokyo Astr. Obs.* 1970. Vol. 12. P. 53–120.
13. *Uchida Y.* Propagation of hydromagnetic disturbances in the solar corona and Moreton's wave phenomenon // *Solar Phys.* 1968. Vol. 4. P. 30–44.
14. *Uralova S.V., Uralov A.M.* WKB approach to the problem of MHD shock propagation through the heliospheric current sheet // *Solar Phys.* 1994. Vol. 152. P. 457–479.
15. *Vršnak B., Aurass H., Magdalenic J., Gopalswamy N.* Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts. I. Basic properties // *Astron. and Astrophys.* 2001. Vol. 377. P. 321–329.
16. *Warmuth A., Vršnak B., Aurass H., Hanslmeier A.* Evolution of two EIT/Ha Moreton waves // *Astrophys. J.* 2001. Vol. 560. P. 105–109.
17. *Warmuth A., Vršnak B., Magdalenic et al.* A multiwavelength study of solar flare waves. I. Observations and basic properties // *Astron. and Astrophys.* 2004. Vol. 418. P. 1101–1115.
18. *Warmuth A., Vršnak B., Magdalenic et al.* A multiwavelength study of solar flare waves. II. Perturbation characteristics and physical interpretation // *Astron. and Astrophys.* 2004. Vol. 418. P. 1117–1129.