УДАРНАЯ ВОЛНА В СОЛНЕЧНОМ СОБЫТИИ, СВЯЗАННОМ С ЭРУПЦИЕЙ КРУПНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

Кузьменко И.В.¹, Гречнев В.В.²

¹*Институт прикладной астрономии РАН, г. Уссурийск, Россия*

²*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

SHOCK WAVE IN A SOLAR EVENT ASSOCIATED WITH THE ERUPTION OF A LARGE PROMINENCE

Kuzmenko I.V.¹, Grechnev V.V.²

¹*Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Ussuriysk, Russia*

²*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

A large prominence eruption that occurred on 29 September 2013 away from active regions produced a fast coronal mass ejection (CME). Its high speed indicates the presence of a shock wave ahead that is confirmed by observations of a type II radio burst and a halo surrounding the CME. The shock wave was impulsively excited by the erupting prominence and transformed into a bow shock later at a considerable distance from the Sun. The positions calculated for the wave front correspond to its manifestations in images. The type II radio emission from 30 MHz to 70 kHz was caused by the propagation of a single shock wave. The excitation scenario and evolution of the shock wave in this event were the same as in flare-associated events that were studied previously.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-181-184

Несмотря на многолетние наблюдения и теоретические исследования, сценарии возбуждения и распространения ударных волн в солнечной атмосфере до сих пор являются предметом дискуссий. Известны разные механизмы их возбуждения [1]. Часто постулируется возникновение головной ударной волны после превышения КВМ альфвеновской скорости. В исследованиях ряда вспышечных эруптивных событий [2–4] было выявлено импульсно-поршневое возбуждение ударных волн.

Импульсное расширение эруптивной структуры вызывает сильное МГД-возмущение, имеющее свойства простой волны. Распространяясь в окружающие области, где альфвеновская скорость ниже, возмущение быстро укручается в ударную волну. Кинематика поршневой ударной волны определяется движущимся позади неё поршнем, расходуя энергию на вытеснение плазмы из занимаемого им объёма, и напоминает кинематику замедляющейся газодинамической взрывной волны, распространяющейся из точечного источника [2]. Вследствие этого замедление поршневой ударной волны определяется спадом плотности плазмы от места возникновения волны. В течение некоторого времени поршневая ударная волна распространяется подобно замедляющейся взрывной волне перед поршнем, роль которого играет корональный выброс массы (КВМ). Затем,

если KBM медленный, ударная волна затухает и становится слабым магнитозвуковым возмущением. В случае быстрого KBM поршневая волна со временем переходит в режим головной ударной волны [4].

В некоторых событиях возникновение и формирование выброса связано с эрупцией протуберанца вне активных областей. Обычно такие KBM достигают скоростей 400–600 км/с. Мы исследовали солнечное событие 29 сентября 2013 г., скорость KBM в котором превышала 1000 км/с. Высокая скорость KBM предполагает наличие перед ним ударной волны. Это подтверждается радиоизлучением II типа, зарегистрированным спектрографами WAVES на космических обсерваториях WIND и STEREO 29–30 сентября 2013 г.

Для выяснения причины возникновения ударной волны в этом событии исследованы её проявления на динамических радиоспектрах и на изображениях коронографов. Динамические спектры на рис. 1 составлены из данных наземной обсерватории Culgoora и спектров WIND/WAVES и STEREO-A/WAVES. Сравнение спектров, полученных на разных космических аппаратах, выявляет как их сходство, так и различия между ними. Скорее всего, различия вызваны разными условиями распространения радиоизлучения в разных направлениях (рефракцией, поглощением, интерференцией), из-за чего оно может исчезать, возобновляться и различаться на спектрах, полученных в разных точках гелиосферы.

Рис. 1. Динамический спектр 29–30 сентября 2013 г., составленный из данных Culgoora (а, в), WIND/WAVES (б) и STEREO-A/WAVES (г). Белые линии разных типов – расчётные траектории полос излучения радиовсплеска II типа для плазменной частоты (длинный пунктир) и её второй (короткий пунктир) и четвертой гармоники (точки)

Две гармонических полосы всплеска II типа на частотах около 32 и 16 МГц начались в 21:53 (везде указано всемирное координированное время – UTC). Кратковременное излучение основного тона заметно и на спектре STEREO-A/WAVES (рис. 1г) около 11 МГц.

Для аппроксимации наблюдаемого частотного дрейфа всплеска II типа использовано приближение распространения ударной волны в среде, плотность n которой спадает с расстоянием x от места возникновения волны по степенному закону $n = n_0(x / h_0)^{-\delta}$, где n_0 – плотность на высоте h_0 . В

этом приближении кинематика ударной волны описывается выражением $x(t) \sim t^{2/(5-\delta)}$, где t – время [2]. Расчётные траектории для основного тона и второй гармоники соответствуют проявлениям радиоизлучения II типа вплоть до частоты около 70 кГц при показателе степени спада плотности среды $\delta = 2,79 \pm 0,05$ и эффективном времени начала волны $t_0 = 21:41 \pm 00:01,5$. Короткая полоса, видимая с 9 до 5 МГц на спектре STEREO-A/WAVES (рис. 1г), соответствует четвертой гармонике.

Согласие расчётных траекторий с проявлениями радиоизлучения II типа в диапазоне от метровых до километровых волн снимает давний вопрос о несоответствии между метровым всплеском и межпланетным излучением II типа, связываемым с головной ударной волной, движимой KBM. Кажущийся частотный разрыв между ними считался признаком различия агентов, возбуждающих ударные волны, ответственных за радиоизлучение II типа в разных диапазонах (напр., [5]). Радиоизлучение II типа от 30 МГц до 70 кГц было вызвано одной и той же ударной волной. Этот простой и наглядный пример подтверждает ранее сделанные выводы [4].

Рис. 2. Проявления волны на разностных изображениях STEREO-A (а–в) и SOHO/LASCO (г, д). Черные дуги – расчётные положения фронта волны, черный пунктир – фронтальная структура. Белым пунктиром на панелях «в» и «д» показаны самые быстрые части волны. Белыми окружностями обозначен солнечный лимб

След ударной волны проявлялся и на изображениях коронографов STEREO-A/COR2 и SOHO/LASCO как гало вокруг KBM. На рис. 2 черной дугой обозначены положения фронта волны, рассчитанные с использованием параметров, полученных при анализе динамических спектров. Черным пунктиром показано положение фронтальной структуры (ФС) KBM. Виртуальный точечный источник волны с $t_0 = 21:41$ располагался вблизи центра солнечного диска. Этот сдвиг положения учитывает время распространения волны от её точечного виртуального центра до протяжённого фактического драйвера – эруптивного протуберанца. Фронт волны прошел через его вершину в 21:50–21:53 незадолго до максимума его ускорения и пересёк ФС на рис. 2б в 21:57–22:05. Расчётные положения волнового фронта близки к проявлениям ударной волны на изображениях коронографов. Самые быстрые части волны обведены белыми пунктирными дугами

с использованием той же кинематики при скорости, увеличенной в 1,15 раза (рис. 2в,д).

На рис. 3 приведены кинематические графики для ядра КВМ [6], а также для самых быстрых участков ФС и ударной волны. Символами на рис. 3а представлены пересчитанные на картинную плоскость STEREO-A измерения из каталога SOHO/LASCO, относящиеся к самой быстрой детали. Замедление ударной волны на рис. 3б контрастирует с ускорением структурных частей КВМ, не соответствующая режиму головной ударной волны, кинематику которой определяет внешняя часть выброса, и подтверждает начальное импульсно-поршневое возбуждение волны. Вероятно, на значительном расстоянии от Солнца поршневая волна постепенно перешла в режим головной ударной волны, которая со временем тоже замедляется.

Рис. 3. Кинематические графики, измеренные в картинной плоскости STEREO-A для ядра КВМ, фронтальной структуры (ФС) и ударной волны

Единственный механизм возбуждения ударных волн, установленный для вспышечных событий – импульсное возбуждение поршневой волны эруптивным протуберанцем, выявлен и при эрупции протуберанца вне активных областей. Переход в режим головной ударной волны происходит позже, если КВМ быстрый. Гипотеза о возникновении ударной волны лишь после превышения КВМ альфвеновской скорости не подтверждается.

Литература

1. Vršnak B., Cliver E.W. // Solar Phys., 2008, V. 253, Is. 1-2. P. 215.
2. Grechnev V.V., Uralov A.M., Slemzin V.A. et al. // Solar Phys., 2008, V. 253, P. 263.
3. Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V. et al. // Solar Phys., 2015, V. 290, P. 129.
4. Grechnev V.V., Kiselev V.I., Uralov A.M. et al. // Solar Phys., 2017, V. 292, Is. 8. article id.102, 34 pp.
5. Cane H.V., Erickson W.C. // Astrophys. J., 2005, V. 623, Is. 2. P. 1180.
6. Grechnev V.V., Kuzmenko I.V. // Solar Phys., 2020, V. 295, Iss. 4. Article number: 55.