

УДК 523.98

## ВОЗМУЩЕННАЯ ЗОНА И УДАРНАЯ ВОЛНА, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ КОРОНАЛЬНЫМ ВЫБРОСОМ МАССЫ

М.В. Еселевич, В.Г. Еселевич

### DISTURBED REGION AND SHOCK WAVE CAUSED BY CORONAL MASS EJECTION

M.V. Eselevich, V.G. Eselevich

Впервые экспериментально доказано существование перед корональным выбросом массы (КВМ) возмущенной зоны и исследовано ее изменение при возрастании скорости КВМ. Показано, что при скорости КВМ, порядка и выше локальной альвеновской скорости  $V_A$ , впереди возмущенной зоны формируется ударная волна и на расстояниях  $R < 30 R_0$  ( $R_0$  – радиус Солнца) от центра Солнца ширина ударного фронта составляет порядка длины свободного пробега относительно парных протон-протонных соударений, т. е. механизм диссипации энергии во фронте является столкновительным.

First experimental proof is given for the existence of a disturbed region before a coronal mass ejection (CME), and its change with increase of CME speed is studied. For CME speed exceeding the local Alfvén speed a shock wave is formed before a disturbed region. The shock front width is demonstrated to have a ( $R_0$  is the sun's radius) scale of the order of the free path for proton-proton collisions, i. e. the dissipation mechanism in the front is collisional at  $R < 30 R_0$ .

#### Введение

Экспериментально показано, что в гелиосфере корональные выбросы массы (КВМ) с достаточно большими скоростями возбуждают ударную волну. Об этом свидетельствуют прямые спутниковые измерения параметров плазмы солнечного ветра, и такие ударные волны достаточно хорошо изучены [1].

О том, возбуждают ли КВМ ударную волну уже в солнечной короне (где скорости отдельных КВМ могут быть достаточно велики), можно судить в основном по косвенным данным. В первую очередь к таким данным относятся всплески радиоизлучения II типа, которые связывают с распространением ударных волн в короне [2], вызванных как вспышками, так и КВМ. Кроме того, в ряде событий КВМ с помощью инструмента UVCS/SOHO [3] в области за предполагаемым фронтом ударной волны было зарегистрировано изменение в ультрафиолетовом спектре, связанное с нагревом вследствие сжатия плазмы в ударном фронте. Таким образом, есть основания полагать, что при скоростях, больших локальной альвеновской скорости, КВМ в короне возбуждают впереди себя ударную волну. Однако обнаружить область сжатия, связанную с ударной волной на изображениях короны в белом свете, которые отражают распределение плотности, оказалось непростой задачей. Здесь могут быть разные подходы к проблеме: в [4] предполагаемое движение ударной волны регистрировалось по характеру отклонения окружающих выброс корональных стримеров, а в [5] скачок плотности на фланге одного КВМ авторы интерпретировали как ударный разрыв, подтверждая это моделирование в МГД-приближении. Однако отличить ударную волну, например, от обычного токового слоя или просто волны сжатия при таком подходе практически невозможно. В этой связи примечательна достаточно давняя работа [6], в которой на качественном уровне было показано, что при большой скорости КВМ возмущения не распространяются впереди его фронта. Эта работа показывает важность исследования области впереди КВМ. В работе [7] для нее было введено общее понятие «возмущенная зона», под которой подразумевается область, заполненная как энергией отраженных от КВМ частиц, так и энергией возбуждаемых КВМ

колебаний. Там же было показано, что при скоростях КВМ, больших альвеновской скорости, впереди КВМ наблюдается образование «убегающего» разрыва концентрации плазмы, который на расстояниях  $R < 20 R_0$  может быть интерпретирован как столкновительная ударная волна. Данные инструмента LASCO/SOHO по регистрации КВМ дают уникальную возможность не только доказать существование возмущенной зоны, но и детально исследовать процесс ее трансформации в зависимости от скорости КВМ. Это связано с тем, что за последние 10 лет на LASCO/SOHO были зарегистрированы тысячи событий КВМ со скоростями в диапазоне от нескольких десятков до нескольких тысяч километров в секунду. Величина альвеновской скорости в короне лежит внутри этого диапазона скоростей, таким образом можно детально исследовать условия перехода через альвеновскую скорость.

Целью настоящей работы является исследование, с использованием данных LASCO/SOHO, возмущенной зоны и ударной волны, возникающих впереди КВМ в короне.

#### Данные и метод анализа

Для анализа использовались калиброванные изображения солнечной короны в белом свете, полученные на коронографах LASCO C2 и C3 космического аппарата SOHO [8]. Значения яркости  $P$  в этих изображениях выражены в единицах средней яркости Солнца ( $P_{msb}$ ). Поле зрения инструментов составляет соответственно  $2-6R_0$  и  $4-30R_0$ . В основном были использованы два метода представления данных. Первый из них, аналогичный процедуре, примененной в [7], основан на вычитании локального фона в изображении и повышает контраст наблюдаемых в короне структур. Это позволяет судить о мгновенном положении КВМ и его частей, а также возмущений в корональной плазме. Во втором методе использовалась разность двух изображений короны, полученных в моменты  $t$  и  $t_0$  ( $t > t_0$ ). Момент  $t_0$  был фиксированным в каждом событии и выбирался до момента появления первых признаков КВМ в поле зрения коронографа. По таким разностным изображениям строились распределения «избыточной массы» в единицах  $г/см^2$  по аналогии с [9]. Получен-

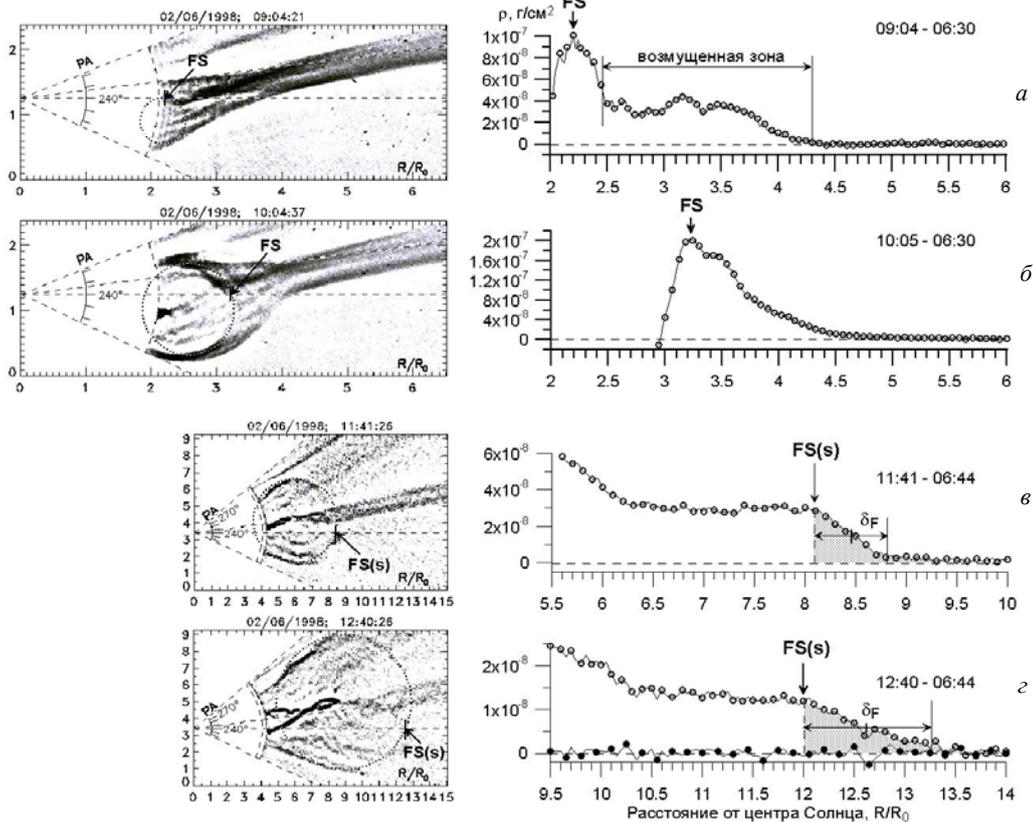


Рис. 1. Изменение возмущенной зоны в событии КВМ 2 июня 1998 г.

ные распределения избыточной массы  $\rho$  использовались для исследования динамики КВМ и возмущенной зоны впереди его фронта. Отметим, что интеграл от  $\rho$  по площади какого-либо участка изображения короны позволяет вычислить изменение массы, произошедшее за время от  $t_0$  до  $t$ , однако эта величина будет нижней оценкой реального изменения массы.

#### Изменение возмущенной зоны в зависимости от скорости КВМ

При движении КВМ в короне Солнца впереди него возникает возмущенная зона. Рассмотрим более детально, как это выглядит, на конкретном примере КВМ, произошедшего 2 июня 1998 г. позиционный угол ( $PA \approx 240^\circ$ , начало  $\approx 08:10$ ). При наблюдении в белом свете это событие имеет яркую переднюю фронтальную структуру (FS), которая окружает область пониженной плотности плазмы (cavity), и включает в себя яркую внутреннюю часть (core). Это видно на рис. 1, б (слева), где показаны изображения с вычтенным фоном для четырех моментов времени КВМ 2 июня 1998 г. Справа приведены радиальные распределения  $\rho(R)$  «избыточной массы» для этих же моментов. На этих распределениях видно, что возмущения в короне распространяются далеко впереди фронтальной структуры КВМ в течение интервала времени 09:04–10:05 (рис. 1, а, б): передняя часть распределений представляет собой очень плавно спадающий профиль, который слева переходит в FS КВМ. Однако, начиная с момента времени 11:41 (а возможно несколько раньше), ситуация резко меняется: в передней части возмущенной зоны, дос-

тигшей расстояния  $R \approx 8.5R_0$ , возникает разрыв в распределении  $\rho(R)$  на масштабе  $\delta_F \approx 0.7R_0$  (рис. 1, в, справа). При дальнейшем распространении разрыва его размер  $\delta_F$  постепенно увеличивается (рис. 1, з, справа). Появившемуся разрыву, обозначенному как FS(s), теперь соответствует яркое переднее кольцо на изображениях с вычтенным фоном (рис. 1, в, з, слева).

Причину такого изменения возмущенной зоны можно объяснить, если учесть, что скорость КВМ при движении от Солнца увеличивается и на  $R \approx 6R_0$  достигает значения  $V \approx 660$  км/с. Относительно окружающего солнечного ветра на этих расстояниях его скорость составляет  $\approx 600$  км/с, что близко значению локальной альвеновской скорости. При дальнейшем движении КВМ его скорость продолжает нарастать, а альвеновская скорость падать. Таким образом, образование разрыва вполне можно связать с формированием ударной волны. Отметим, что для КВМ с меньшими скоростями такого изменения возмущенной зоны не наблюдалось, в то время как для КВМ, имеющих большие скорости ( $>800$  км/с), возмущенная зона оказывалась ограниченной спереди разрывом на более близких расстояниях от Солнца.

#### Размер разрыва в зависимости от расстояния

Итак, у КВМ с большими скоростями впереди возмущенной зоны наблюдается разрыв концентрации, который может быть связан с формированием ударной волны в короне. Отметим, что в рассмотренных шести событиях КВМ со скоростями  $>800$  км/с на близких расстояниях от Солнца скорость разрыва превышала скорость FS, но постепенно их скорости становились сравнимыми. Для этих событий был определен

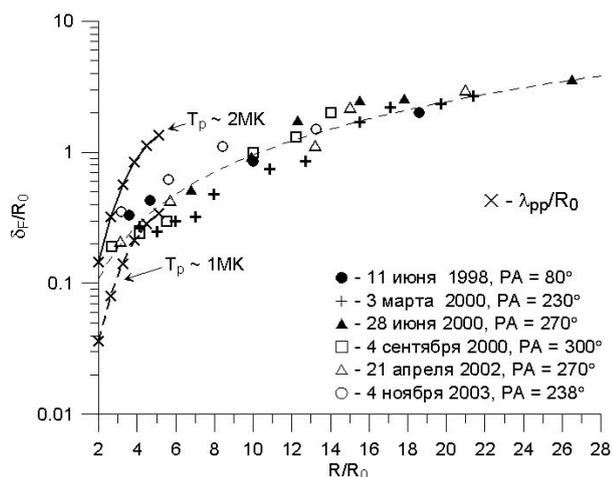


Рис. 2. Размер разрыва на фронте различных КВМ в зависимости от расстояния.

характерный размер  $\delta_F$  разрыва на разных расстояниях от центра Солнца. Полученные зависимости приведены на рис. 2. На этот же рисунок нанесен график изменения длины свободного пробега относительно протон-протонных соударений, рассчитанный для двух температур  $10^6$  К и  $2 \cdot 10^6$  К. Этот график ограничен расстояниями до  $\sim 6R_0$ , для которых измерен профиль изменения температуры. При измерениях ширины ударного разрыва  $\delta_F$  следует учитывать, что реальный размер профиля концентрации в короне может быть меньше наблюдаемого профиля яркости из-за усреднения вдоль луча зрения в оптически тонкой короне. Однако в данном случае, если фронт ударной волны является квазисферической поверхностью или оболочкой, эффект усреднения не должен приводить к ошибкам более, чем несколько десятков процентов и, по сути, мы разрешаем близкий реальному размер неоднородности плотности во

фронте ударной волны. С учетом разброса измеряемых параметров плазмы из рис. 2 можно сделать вывод о том, что  $\delta_F \sim \lambda_{pp}$ , а значит механизм диссипации в ударной волне столкновительным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheeley N.R., Jr., Howard R.A., Koomen M.J., et al. Coronal mass ejections and interplanetary shocks // JGR. 1985. V. 90. P. 163.
2. Cliver E.W., Webb D.F., Howard R.A. On the origin solar metric type II bursts // Solar Phys. 1999. V. 187. P. 89.
3. Mancuso S., Raymond J.C., Kohl J., et al. UVCS/SOHO observations of a CME-driven shock: Consequences on ion heating mechanisms behind a coronal shock // A&A. 2002. V. 383. P. 267.
4. Sheeley N.R., Jr., Hakala W.N., Wang Y.-M. Detection of coronal mass ejection associated shock waves in the outer corona // JGR. 2000. V. 105. P. 5081.
5. Vourlidas A., Wu S.T., Wang A.H., et al. Direct detection of a coronal mass ejection-associated shock in large angle and spectrometric coronagraph experiment white-light images // ApJ. 2003. V. 598, N 2. P. 1392.
6. Sime D.G., Hundhausen A.J. The coronal mass ejection of July 6, 1980 – a candidate for interpretation as a coronal shock wave // JGR. 1987. V. 92. P. 1049.
7. Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Первые экспериментальные исследования возмущенной зоны впереди коронального выброса массы // Сборник тезисов докладов конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности» 28 сентября – 2 октября 2006 г., CAO РАН, п. Нижний Архыз.
8. Brueckner G.E. et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // Solar Phys. 1995. V. 162. P. 357.
9. Jackson B.V., Hildner E. Forerunners: outer rims of solar coronal transients // Solar Phys. 1978. V. 60. P. 155.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск