

ВОЗМУЩЕННАЯ ЗОНА И УДАРНАЯ ВОЛНА, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ КОРОНАЛЬНЫМ ВЫБРОСОМ МАССЫ

М.В. Еселевич, В.Г. Еселевич

A DISTURBED REGION AND SHOCK WAVE DRIVEN BY A CORONAL MASS EJECTION

M.V. Eselevich, V.G. Eselevich

Подтверждено существование перед корональным выбросом массы (КВМ) возмущенной зоны и исследовано ее изменение при возрастании скорости КВМ. Показано, что при скоростях КВМ порядка и выше локальной альфвеновской скорости впереди возмущенной зоны формируется разрыв концентрации плазмы, который можно интерпретировать как ударную волну. Оценки свидетельствуют о том, что в рамках погрешности эксперимента наблюдаемая ширина ударного фронта на расстояниях $R < 15\text{--}20R_{\odot}$ от центра Солнца, вероятно, порядка длины свободного пробега относительно парных протон-протонных соударений, т. е. возможно, что механизм диссипации энергии во фронте является столкновительным на этих расстояниях.

The existence of a disturbed region in front of a coronal mass ejection (CME) has been proved; and its variation with increasing CME velocity has been investigated. A plasma density discontinuity that can be interpreted as a shock wave is shown to develop in front of the disturbed region at CME velocities that are about or above the local Alfvén velocity. Estimations testify that within the experimental error the observed shock-wave width is of order of the mean free path relative to paired proton-proton collisions at distances $R < 15\text{--}20R_{\odot}$ from the Sun center; i.e., conceivably the energy dissipation mechanism in the front is collisional at these distances.

Введение

Структура КВМ при наблюдении в белом свете характеризуется следующими хорошо известными особенностями: яркой передней фронтальной структурой (FS, front structure), охватывающей область пониженной плотности плазмы (cavity), которая включает в себя яркую внутреннюю часть (core). Однако, кроме перечисленных особенностей, непосредственно перед КВМ при скоростях V менее 700–800 км/с существует еще возмущенная зона, определение которой было дано в работе [1]. При этом ударная волна, скорее всего, отсутствует. Здесь следует отметить, что однозначно измерить ударный фронт в короне Солнца до сих пор не удавалось (несмотря на отдельные попытки). Важность этой задачи с точки зрения физики связана с тем, что измерение профиля фронта дает информацию о механизме диссипации направленной энергии плазмы в ударном фронте. При наблюдении в белом свете ударный фронт должен наблюдаться как движущийся от Солнца разрыв яркости (концентрации плазмы) на масштабе δ_F , который мало меняется на длине пути $R \gg \delta_F$.

Чтобы отождествить разрыв с ударным фронтом, существуют следующие два способа:

1. Показать выполнение соотношений Рэнкина–Гюгонио на разрыве. На практике достаточно показать существование на исследуемом разрыве одно-временного скачка основных параметров плазмы: концентрации, температуры, модуля магнитного поля и скорости (упрощенный вариант способа 1).
2. Показать, что при превышении скорости КВМ некоторой величины V_A состояние возмущенной зоны резко меняется, а именно возникает разрыв параметров потока плазмы, который при меньших скоростях КВМ отсутствует.

Упрощенный вариант первого способа широко применяется для отождествления ударных волн в гелиосфере, но он практически не применим для отождествления ударных волн в короне. Поэтому в короне на данном этапе можно использовать только второй способ.

Целью настоящей работы является исследование возмущенной зоны и возможности образования ударной волны при возрастании скорости КВМ, движущегося в короне Солнца.

Данные

Исходными данными при анализе служили калиброванные изображения короны Солнца в белом свете, полученные на коронографах SOHO/LASCO C2, C3 [2] (<http://lasco-www.nrl.navy.mil>). Значения яркости P в этих изображениях выражены в единицах средней яркости Солнца (P_{msb}).

Методы анализа

Использовались два способа представления данных.

1. Разностная яркость $P(t) - P(t_0)$, где $P(t_0)$ – невозмущенная яркость в момент t_0 до возникновения рассматриваемого события, $P(t)$ – возмущенная яркость в любой момент времени $t > t_0$. По значениям $P(t) - P(t_0)$ рассчитывалась избыточная масса ρ столба плазмы с единичной площадью основания (в г/см²), ориентированного вдоль луча зрения (или коротко – избыточная масса).

2. Яркость с вычтенным «фоном» $\Pi(PA, R) = P(PA, R) - P_S(PA, R)$ для выделения лучей повышенной яркости. «Фон» $P_S(PA, R)$ представляет собой усреднение исходной яркости P по угловому интервалу $\approx (2\text{--}3)d$ (в градусах); d – характерный угловой размер лучей повышенной яркости, а PA и R – позиционный угол и расстояние от центра Солнца. Рассмотрим три характерных КВМ в порядке возрастания их скорости V .

Вид возмущенной зоны в зависимости от скорости КВМ

Развитие во времени КВМ 1 (7 мая 1997 г.) достаточно четко видно на изображениях избыточной массы ρ (рис. 1). Почти за 4 ч до появления FS КВМ на изображениях появляются распространяющиеся от Солнца усиления (сплошные линии) и ослабления (штриховые линии) ρ , причем усиления главным об-

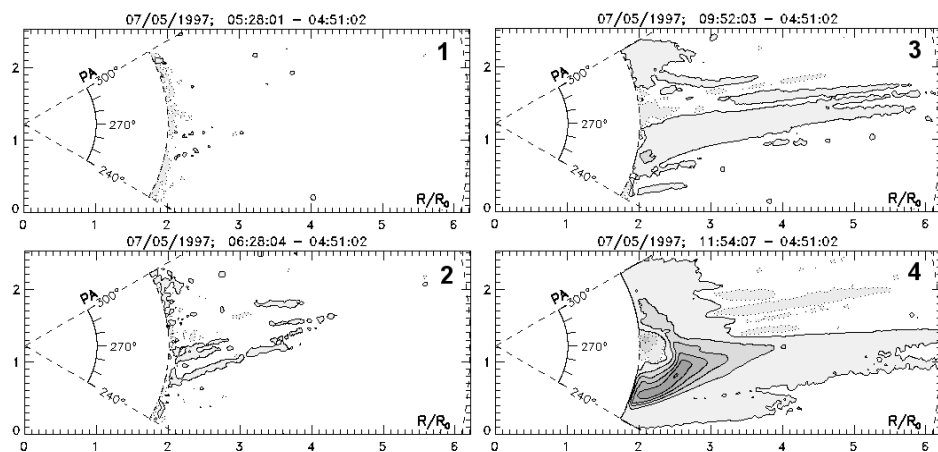


Рис. 1. Изображения избыточной массы $\rho(PA, R)$ для четырех моментов времени 7 мая 1997 г. (КВМ 1). Первый закрашенный уровень соответствует $\rho = 6 \times 10^{-9}$ г/см², разность между уровнями – 50×10^{-9} г/см². Штриховыми линиями показаны отрицательные уровни, соответствующие уменьшению массы.

разом вдоль (внутри) нижнего луча яркости. FS KBM появляется на последнем изображении в $t = 11:54$ UT.

Проследить детально развитие KBM и возмущенной зоны перед ним можно, рассмотрев, как изменяется радиальный профиль избыточной массы со временем, например, вдоль направления $PA = 270^\circ$, вдоль которого происходит усиление ρ (рис. 2). Видно, что, как минимум, за 5–6 ч до появления FS KBM на расстояниях $R > 2.5R_\odot$ наблюдается постепенное и волнообразное увеличение ρ , которое распространяется от Солнца со скоростью, заметно превышающей скорость KBM. Фронтальная структура данного KBM (выделена штриховкой на кривых рис. 2) появляется на $R \approx 2.55R_\odot$ лишь в момент времени 11:54 UT. Все, что впереди штриховки, – возмущенная зона.

Причина образования возмущенной зоны достаточно очевидна. Действительно, скорость FS KBM относительно невозмущенного СВ на $R \approx 4R_\odot$ составляет $\Delta V \approx 15\text{--}25$ км/с, и она существенно меньше альфвеновской скорости V_A (оценка минимального значения V_A на $R \approx 4R_\odot$ составляет 750 км/с). Малость ΔV в сравнении с V_A и есть причина образования возмущенной зоны, так как любые возмущения, вызываемые KBM, опережают его.

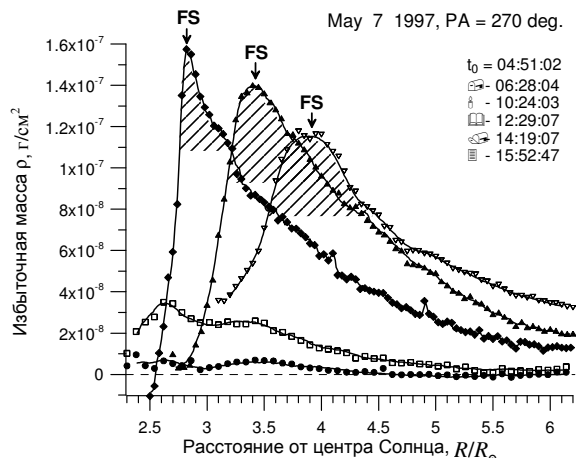


Рис. 2. Радиальные распределения избыточной массы $\rho(R)$ из центра Солнца вдоль $PA = 270^\circ$ 7 мая 1997 г.

Анализ показал, что формирование возмущенной зоны перед FS представляет собой одновременное проявление, как минимум, двух процессов:

- 1) появление и усиление дополнительных относительно невозмущенной плазмы потоков плазмы;
- 2) распространение нелинейных ($\Delta \rho \sim \rho_0$) колебаний массы корональной плазмы.

КВМ 2 (2 июня 1998 г.). Это событие похоже на КВМ 1 и отличается только большей скоростью V . Однако именно это обстоятельство приводит к их принципиальному различию. На расстояниях $R < 6R_\odot$, где скорость $V \approx 400$ км/с, относительная скорость $\Delta V < V_A$, и события развиваются как в предыдущем случае. Однако если для КВМ 1 такая картина сохраняется и на больших расстояниях (вплоть до $30R_\odot$), то для КВМ 2 она кардинально меняется уже на $R \approx 10R_\odot$.

Рассмотрим $\rho(R)$ вдоль $PA = 247^\circ$ на $R \leq 6R_\odot$, где передняя часть возмущенной зоны представляет собой понижение ρ , или волну разрежения (рис. 3). Слева возмущенная зона ограничена фронтальной структурой

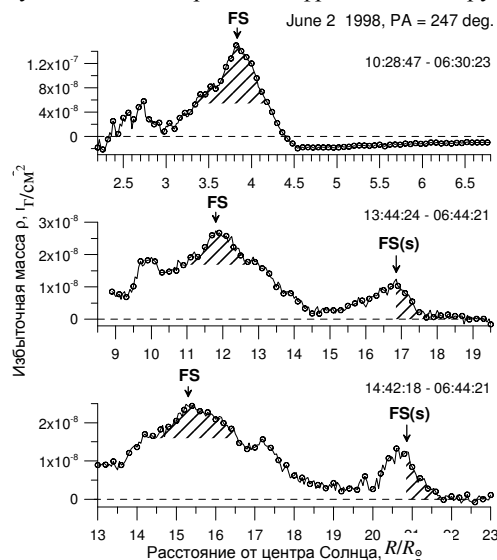


Рис. 3. Радиальные распределения избыточной массы $\rho(R)$ из центра Солнца для трех моментов времени 2 июня 1998 г. (КВМ 2) вдоль $PA = 247^\circ$.

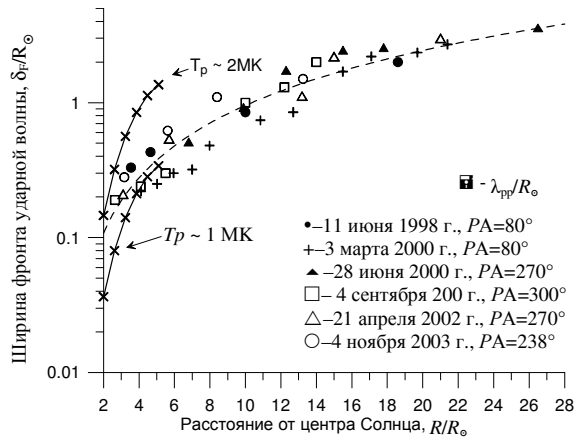


Рис. 4. Зависимость ширины ударного фронта δ_F от расстояния R , построенная для шести КВМ со скоростями $V > 900$ км/с. Кривые с крестиками – длина свободного пробега относительно парных протон-протонных соударений $\lambda_{pp}(R)$, рассчитанная для двух значений протонной температуры в короне: $T=10^6$ К и $T=2 \times 10^6$ К.

рой (заштрихованная область, отмеченная FS) КВМ, а справа – невозмущенной плазмой. С 13:44 UT ситуация резко меняется: в передней части возмущенной зоны на расстоянии $R \approx 17R_\odot$ возникает разрыв на масштабе $\delta_F \approx 0.6R_\odot$. На рисунке он заштрихован и обозначен как FS(s). При распространении размер δ_F постепенно увеличивается. Причина образования разрыва в том, что на расстояниях $R > 10R_\odot$ скорость КВМ относительно окружающего СВ становится бо-

льше альфвеновской скорости V_A . Возмущения не могут опережать КВМ и, «накапливаясь», они образуют разрыв в распределении $\rho(R)$, т. е. ударную волну. Масштаб разрыва δ_F должен определяться механизмом диссипации энергии в разрыве.

Зависимость ширины ударного фронта δ_F от расстояния R , построенная для шести КВМ со скоростями $V > 900$ км/с, показана на рис. 4. Нижняя и верхняя кривые с крестиками – рассчитанные зависимости от расстояния длины свободного пробега относительно парных протон-протонных соударений $\lambda_{pp}(R)$ для двух значений протонной температуры в короне: $T \sim 10^6$ К и $T \sim 2 \times 10^6$ К. Из рис. 4 видно, что на расстояниях $R < 6R_\odot$ величина δ_F порядка λ_{pp} . При этом зависимости $\lambda_{pp}(R)$ и $\delta_F(R)$ подобны. Это свидетельствует в пользу того, что механизм диссипации энергии во фронте ударной волны является столкновительным на этих расстояниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Первые экспериментальные исследования возмущенной зоны перед фронтом коронального выброса массы // *Астрономический журнал*. 2007. Т. 84, № 11. С. 1046.
2. Brueckner G.E., et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // *Sol. Phys.* 1995. V. 162. P. 357.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск