

УДК 523.947+523.98-782

РЕГИСТРАЦИЯ ВЗРЫВНОЙ И ПОРШНЕВОЙ УДАРНЫХ ВОЛН, СВЯЗАННЫХ С ВОЗНИКНОВЕНИЕМ И РАСПРОСТРАНЕНИЕМ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ

© 2013 г. В. Г. Еселевич^{1*}, М. В. Еселевич¹, И. В. Зимовец²

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского
отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

²Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

Поступила в редакцию 02.07.2012 г.; принята в печать 12.07.2012 г.

По данным инструмента AIA космической обсерватории SDO (изображения в каналах 193 и 211 Å) и изображениям белой короны, полученным на коронографах LASCO C2 и C3 космической обсерватории SOHO, проведен анализ коронального выброса массы на Солнце, произошедшего 3 ноября 2010 г. В данном событии удалось одновременно зарегистрировать и измерить фронты поршневой и взрывной ударных волн, вызванных формированием и распространением коронального выброса массы. Показано, что каждому из этих типов ударных волн может соответствовать распространяющийся впереди фронта источник радиовсплеска II типа.

DOI: 10.7868/S0004629913020047

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] был разработан метод отождествления и регистрации фронта поршневой ударной волны впереди коронального выброса массы (СМЕ) на расстояниях $R < 30R_{\odot}$ от центра Солнца (R_{\odot} — радиус Солнца) и в различных направлениях относительно оси движения СМЕ. Физической основой этого метода является понятие возмущенной зоны [3], которая возникает впереди СМЕ в результате его взаимодействия с невозмущенным солнечным ветром. Было показано, что при скорости СМЕ u относительно невозмущенного солнечного ветра больше локальной магнитозвуковой скорости, которая в короне Солнца, примерно, равна альфвеновской скорости V_A , в передней части возмущенной зоны формируется поршневая ударная волна. В этом случае сам СМЕ является поршнем. Измерения ширины ударного фронта показали, что в зависимости от расстояния от центра Солнца имеет место изменение механизма диссипации энергии в ударном фронте от столкновительного к бесстолкновительному [4]. Значительно сложнее обстоит дело с регистрацией взрывной ударной волны, которая также может возникать в процессе формирования СМЕ. Ее отличие от поршневой волны состоит в том, что она возникает в результате взрывного процесса, каким

часто сопровождается стадия формирования СМЕ, и далее распространяется свободно без воздействия поршня (СМЕ). До сих пор нет примеров регистрации взрывной ударной волны, распространяющейся от Солнца, если не считать отдельные попытки ее отождествления по всплескам радиоизлучения II типа.

В данной работе на примере СМЕ, произошедшего 3 ноября 2010 г., сделана первая попытка одновременной регистрации взрывной и поршневой ударных волн и сопоставление их со всплесками радиоизлучения II типа. Начальная стадия формирования этого СМЕ была ранее исследована в работе [5].

2. ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

Для анализа использовались данные инструмента AIA/SDO [6] (EUV-изображения в каналах 193 и 211 Å, http://www.lmsal.com/get_aia_data/). Временное разрешение инструмента составляло ≈ 12 с, внешняя граница поля зрения находилась на расстоянии $1.3\text{--}1.4R_{\odot}$ от центра Солнца. На больших расстояниях использовались изображения белой короны с коронографов LASCO C2 ($1.5\text{--}6.0R_{\odot}$) и C3 ($3.7\text{--}30R_{\odot}$) космического аппарата SOHO [7].

Для исследования динамики возмущенной зоны впереди СМЕ и формирования ударной волны во

*E-mail: esel@iszf.irk.ru

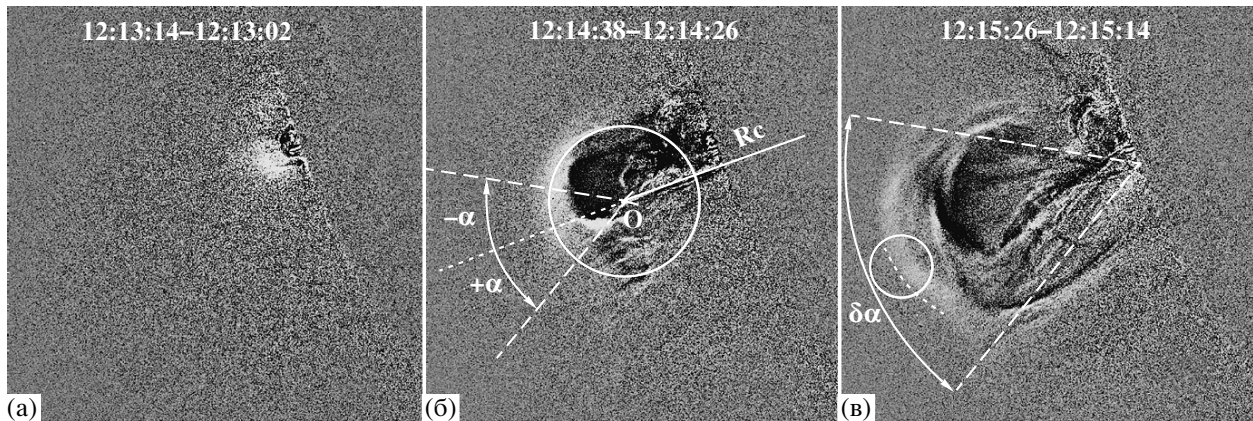


Рис. 1. Изображения бегущей разностной яркости для 3 различных моментов времени для СМЕ 3 ноября 2010 г. по данным AIA/SDO (в канале 211 Å). На правой карте большим светлым кружком отмечено положение источника радиоизлучения на частоте 327 МГц, соответствующего компоненте f_2 (данные Nançay Radioheliograph).

времени и в различных направлениях относительно оси распространения СМЕ использовались разностные изображения. EUV-изображения представлялись в виде бегущей разностной яркости $\Delta P = P(t_2) - P(t_1)$, где $P(t_2)$ и $P(t_1)$ — яркость ближайших по времени изображений. Изображения в белом свете (данные LASCO C2 и C3) представлялись в виде разностной яркости $\Delta P = P(t) - P(t_0)$ с фиксированным начальным моментом t_0 и $t > t_0$.

В анализируемом событии 3 ноября 2010 г. фронтальная структура (FS) СМЕ имела вид, близкий к окружности. Положение этой окружности в каждый момент времени задавалось положением ее центра O (рис. 1б), находящемся на расстоянии R_C от центра Солнца в направлении позиционного угла PA_C (отсчитывается от северного полюса против часовой стрелки). Позиционный угол PA_C задает направления оси движения СМЕ, которое лишь немного меняется в поле зрения инструментов AIA и LASCO.

Для построения профиля и корректного изменения размера ударного фронта из изображений разностной яркости строились распределения разностной яркости $\Delta P(r)$ под различными углами α относительно оси движения СМЕ (PA_C) в различные моменты времени (отсчет угла α — положительный против часовой стрелки; рис. 1б). Расстояние r отсчитывается от центра фронтальной структуры O в отличие от расстояния R , отсчитываемого от центра Солнца. Таким образом, распределения $\Delta P(r)$ направлены примерно по нормали к фронтальной структуре СМЕ и к расположенному перед ней фронту ударной волны.

3. ДИНАМИКА ФРОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ВОЗМУЩЕННОЙ ЗОНЫ

Появление полости, окруженной ярким кольцом, наблюдается в этом событии на самой ранней стадии движения СМЕ в момент 12:13:14 UT близко к поверхности Солнца ($R \approx 1.03R_\odot$; рис. 1а). Согласно [8], круговая фронтальная структура СМЕ при наблюдении в крайнем ультрафиолете (171 Å) и белом свете в близкие моменты времени примерно совпадают по форме и местоположению, отличаясь только шириной кольца фронтальной структуры. Это позволяет отождествить это яркое кольцо, охватывающее полость на рис. 1а–1в с фронтальной структурой СМЕ.

Распределения бегущей разностной яркости $\Delta P(R)$, построенные вдоль направления позиционного угла $PA \approx 110.4^\circ$ в последовательные моменты времени, показаны темными кружками на рис. 2. Для снижения уровня шума при построении профилей $\Delta P(R)$ использовалось усреднение в пределах угла 1° (вершина угла усреднения находилась на поверхности Солнца, как показано на рис. 1в).

Для оценки шума использовалось распределение разностной яркости $\Delta P_N(R)$, построенное для разности моментов времени 12:12:50–12:12:38 UT (показано светлыми кружками на рис. 2). Вплоть до момента 12:12:50 UT признаков СМЕ не наблюдалось, поэтому распределение $\Delta P_N(R)$ отражает уровень шума, присущий сигналу разностной яркости. Распределение $\Delta P_N(R)$ строилось в том же направлении ($PA \approx 110.4^\circ$) и с тем же усреднением по углу (1°), что и распределения $\Delta P(R)$.

В начальный момент 12:13:14 UT фронтальная структура имеет минимальную ширину $\approx 0.01R_\odot$

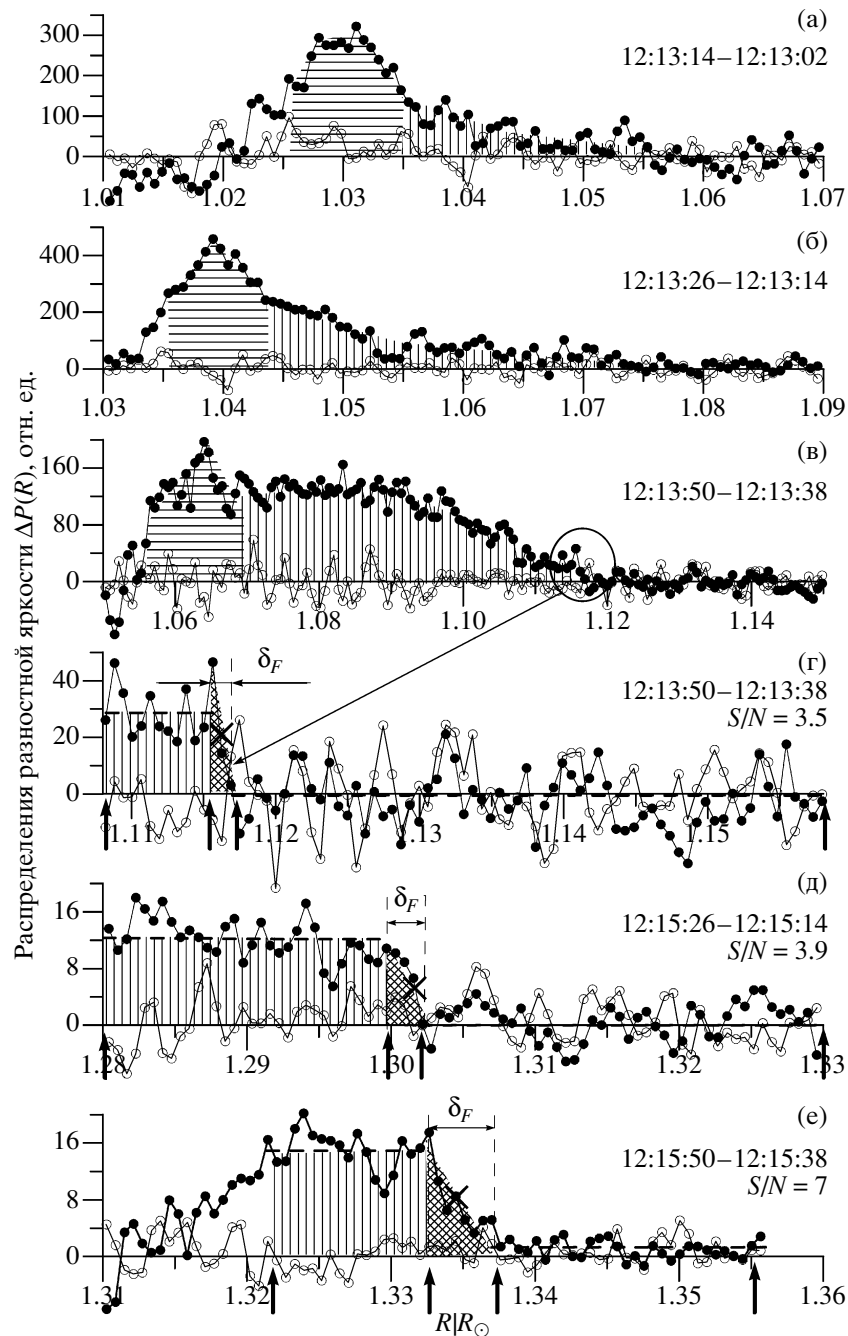


Рис. 2. Распределения бегущей разностной яркости $\Delta P(R)$ в различные моменты времени для направления $PA = 110.4^\circ$ ($R_C = R_\odot$, $\alpha = 0^\circ$, угол усреднения $\delta\alpha = 1^\circ$) для СМЕ 3 ноября 2010 г. по данным AIA/SDO (в канале 211 Å). Уровень шума (светлые кружки) построен для разности моментов 12:12:50–12:12:38 UT. Штриховкой отмечены: горизонтальной – фронтальная структура (FS), вертикальной – возмущенная зона, перекрестной – разрыв.

(определялась как размер на полувысоте; показано горизонтальной штриховкой на рис. 2а). Размер возмущенной зоны, амплитуда которой плавно спадает с расстоянием (вертикальная штриховка), составляет $\approx 0.025R_\odot$ (левая граница зоны начинается условно на полувысоте максимальной разностной яркости FS; рис. 2а). Разрыва (или

скачка) в передней части возмущенной зоны нет. В следующий момент времени 12:13:26 UT на рис. 2б ширина FS практически не меняется, а размер возмущенной зоны возрастает до $\approx 0.037R_\odot$. Начиная с момента 12:13:50 UT на распределении разностной яркости в передней части возмущенной зоны становится заметным разрыв. Разрыв на

рис. 2в выделен большим кружком, а на растянутой пространственной шкале (рис. 2г) он показан перекрестной штриховкой. Для того чтобы более четко выделить разрыв на распределении $\Delta P(R)$, находились средние значения $\Delta P(R)$ на двух пространственных интервалах: за разрывом (отмечен слева от него парой вертикальных стрелок, одна из которых расположена непосредственно за разрывом) и перед разрывом (отмечен парой вертикальных стрелок, одна из которых расположена непосредственно перед разрывом; например, рис. 2г, 2д). Эти средние значения показаны двумя штриховыми прямыми соответственно перед разрывом и за ним. Возмущенная зона за разрывом показана вертикальной штриховкой на рис. 2в–2е. Отношения сигнал/шум $S/N \approx 3.1-7.5$ для интервала за разрывом указаны в правой части графиков на рис. 2г–2е. Значение S/N определялось как отношение среднего сигнала за разрывом к среднеквадратичному отклонению, рассчитанному на этом же интервале для момента 12:12:50 UT (который принят за уровень шума).

Ширина разрыва $\delta_F \approx 0.0015R_\odot$ определялась как удвоенная ширина на полувысоте максимума разрыва на рис. 2г–2е. Величина δ_F в пределах погрешности измерений не меняется на расстояниях $R \leq 1.29R_\odot$, и она примерно равна разрешению инструмента AIA ($\sim 0.0013R_\odot$). Ширина разрыва возрастает на $R > 1.29R_\odot$ (рис. 2д, 2е).

Разрыв, который наблюдается на отдельных распределениях $\Delta P(R)$, образует фронт, имеющий конечный размер. Это видно на рис. 3, где приведены распределения разностной яркости $\Delta P(r)$ в зависимости от расстояния r от центра фронтальной структуры CME ($R_C \approx 1.17R_\odot$) в момент времени 12:15:26 UT для различных направлений $\alpha = -40^\circ \dots +50^\circ$ относительно линии PA $C \approx 110.7^\circ$. Анализ показывает, что:

1. Область направлений, в которых достаточно устойчиво существует разрыв, составляет $\alpha = -5^\circ \dots +40^\circ$ (это соответствует PA $\sim 108^\circ \dots 112^\circ$; рис. 3б–3е). На изображениях разностной яркости на рис. 1в эта область α показана светлыми точками.

2. В направлениях $\alpha > 40^\circ$ и $\alpha < -5^\circ$, в основном, существует плавно спадающая с расстоянием возмущенная зона без разрыва (рис. 3а, 3ж). В отдельные моменты времени и на различных расстояниях разрыв может возникать и исчезать. Это может свидетельствовать о том, что в этих направлениях (при этих α) он или находится на стадии формирования, или имеет слишком малую амплитуду. Поэтому его существование неустойчиво и сильно зависит от условий в невозмущенном солнечном ветре (СВ).

3. Наиболее устойчиво разрыв существует в направлении угла $\alpha = 0^\circ$. Отметим, что по изображениям разностной яркости на рис. 1 практически невозможно отличить границу плавно спадающей разностной яркости возмущенной зоны от случаев с разрывом на границе. В то же время использование распределений разностной яркости $\Delta P(r)$ и их сравнение с распределениями “шума” $\Delta P_N(r)$ позволяет достаточно уверенно регистрировать разрыв.

Распределения разностной яркости белой короны на больших расстояниях от Солнца (по данным коронографа LASCO C2) для этого события вдоль направления PA = 95° представлены на рис. 4. Из него следует, что размер возмущенной зоны (вертикальная штриховка) постепенно увеличивается, достигая на $R \approx 4.5R_\odot$ величины $\Delta R \approx 1.4R_\odot$. При этом разрыв на переднем крае возмущенной зоны отсутствует.

4. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЫВА ВПЕРЕДИ ВОЗМУЩЕННОЙ ЗОНЫ

В работах [1, 2, 4, 9] были исследованы свойства поршневой ударной волны на основе анализа более чем 30 лимбовых CME, место возникновения которых в проекции на поверхность Солнца находилось на долготях $>60^\circ$. Их скорости относительно невозмущенного солнечного ветра находились в диапазоне $u \approx 200-2500$ км с⁻¹. События рассматривались по данным Mark 4 (MLSO), SOHO/LASCO C2 и C3, STEREO/COR 1, 2 на расстояниях $1.5R_\odot < R < 30R_\odot$. Для всех рассмотренных событий по мере движения CME наблюдалось формирование возмущенной зоны впереди фронтальной структуры. В некоторых случаях в передней части возмущенной зоны формировался разрыв. Изменялось изменение с расстоянием скорости $u(R) = V(R) - V_{SW}(R)$ переднего края возмущенной зоны, либо разрыва относительно окружающего солнечного ветра. Скорость квазистационарного медленного солнечного ветра $V_{SW}(R)$ в поясе стримеров была взята из работы [10]. Было показано, что критерием формирования разрыва является условие $u(R) \geq V_A(R)$, где $V_A(R)$ — альфвеновская скорость, полученная [11] для плазмы пояса стримеров. Это позволило связать наблюдаемые разрывы с фронтом поршневой ударной волны.

Данный результат в применении к рассматриваемому CME 3 ноября 2010 г. иллюстрирует рис. 5. Значения относительной скорости $u(R)$ разрыва, полученные на расстояниях $R \approx 1.11-1.34R_\odot$, показаны темными кружками на рис. 5. На расстояниях $R > 3R_\odot$ разрыв отсутствовал, поэтому измерялась относительная скорость $u(R)$ передней

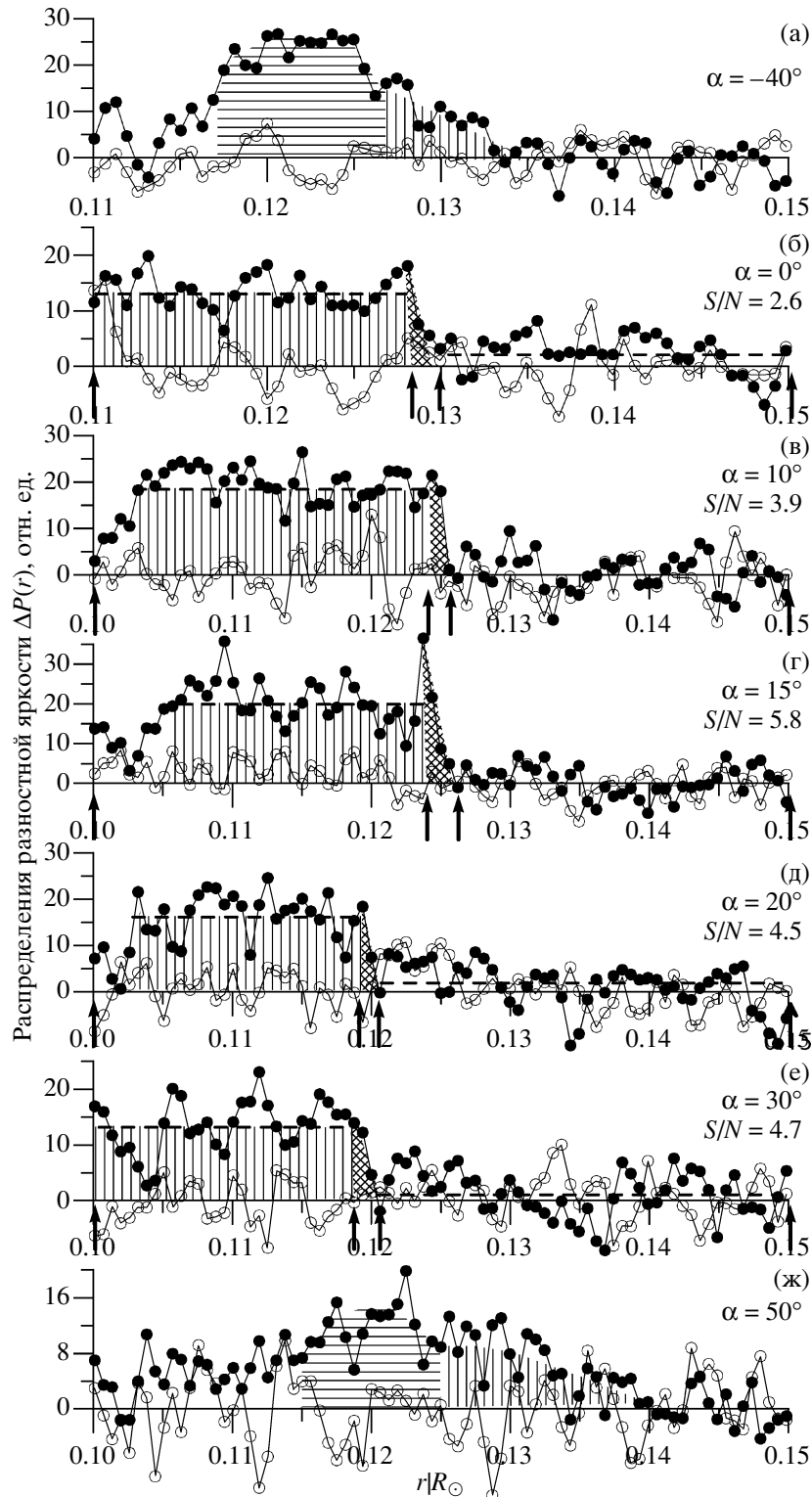


Рис. 3. Распределения разностной яркости $\Delta P(r)$ в зависимости от расстояния r от центра O фронтальной структуры СМЕ 3 ноября 2010 г. ($PA_C = 110.7^\circ$, $R_C = 1.17R_\odot$) для разности моментов времени 12:15:56–12:15:14 UT в различных направлениях $\alpha = -40^\circ \dots +50^\circ$ относительно линии $PA_C = 110.7^\circ$ по данным AIA/SDO (в канале 211 Å).

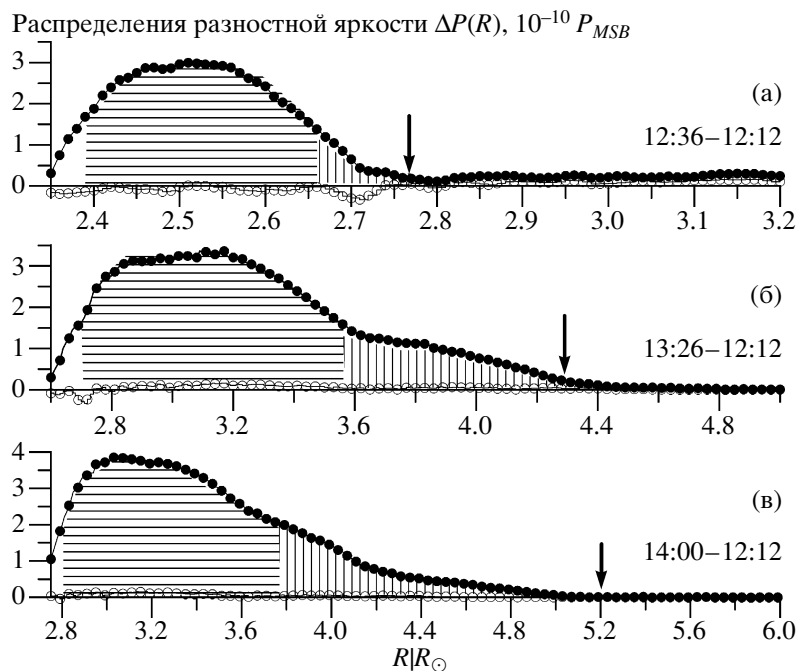


Рис. 4. Распределения разностной яркости $\Delta P(R)$ белой короны для трех последовательных моментов времени для СМЕ 3 ноября 2010 г. в направлении $PA = 95^\circ$ на больших расстояниях от Солнца по данным LASCO/SOHO C2. Угол усреднения $\delta PA = 20^\circ$. Уровень шума (светлые кружки) построен для разности моментов 12:24–12:12 UT.

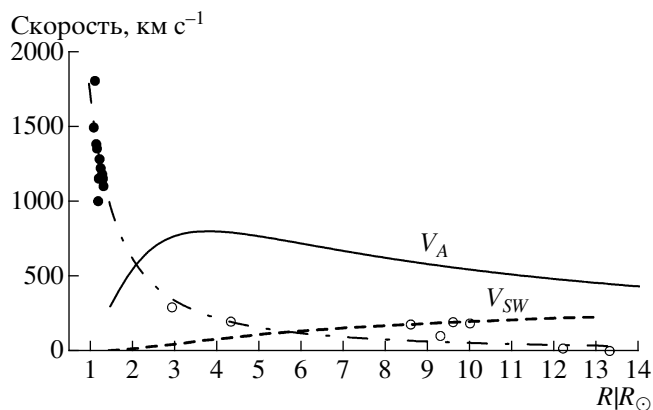


Рис. 5. Измеренная скорость СМЕ $u(R) = V(R) - V_{SW}(R)$ относительно окружающего СВ в зависимости от расстояния от центра Солнца: темные кружки — скорость разрыва по данным AIA/SDO в канале 211 Å, светлые кружки — скорость передней части возмущенной зоны по данным LASCO C2, C3. Штрих-пунктирная кривая — аппроксимация данных скорости степенной функцией. Штриховая кривая — скорость $V_{SW}(R)$ квазистационарного медленного СВ в поясе стримеров из работы [10]. Сплошная кривая — рассчитанная альфвеновская скорость $V_A(R)$ в поясе стримеров из работы [11].

части возмущенной зоны, значения которой показаны светлыми кружками на рис. 5. Скорость разрыва определялась по перемещению участка фронта, расположенного на половине амплитуды разрыва (отмечены крестиком на рис. 2д, 2е). Положение передней части возмущенной зоны, по которой определялась скорость, отмечено вертикальными стрелками на рис. 4а–4в. Сплошная кри-

вая на рис. 5 показывает зависимость альфвеновской скорости от расстояния $V_A(R)$, рассчитанная в [11]. Все значения скорости $u(R)$, измеренные для разрыва (темные кружки), расположены выше кривой $V_A(R)$, а значения скорости для моментов времени, когда разрыв отсутствовал (светлые кружки) — ниже этой кривой. Интересно также отметить, что на расстояниях $R \geq 10R_\odot$ величина

$u \approx 0$, т.е. СМЕ и его возмущенная зона сносят со скоростью невозмущенного солнечного ветра. Таким образом, критерий формирования или исчезновения поршневой ударной волны перед СМЕ $u(R) \approx V_A(R)$ в этом событии также выполняется.

5. ВЗРЫВНАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА

Возможность существования в рассматриваемом событии взрывной ударной волны связана с тем, что:

1) процесс возникновения СМЕ происходит взрывообразным образом,

2) СМЕ сопровождается вспышкой (рентгеновский балл С4.9).

Каждый из этих процессов в принципе может быть источником взрывной ударной волны, которая, предположительно, должна сформироваться раньше и двигаться впереди поршневой. На рис. 2д, 2е видно, что распределения $\Delta P(R)$ на 211 Å, которые были получены путем усреднения по небольшому углу $\delta\alpha = 1^\circ$, имеют довольно высокий уровень шума перед фронтом поршневой волны. Это не позволяет в данном случае зарегистрировать взрывную волну. Для того чтобы увеличить соотношение сигнал/шум для взрывной ударной волны, было использовано усреднение по большему углу, который для различных моментов времени составлял величину $\delta\alpha = 60^\circ - 110^\circ$ (вершина угла усреднения находилась на $R = R_\odot$ и $PA = 110.4^\circ$, как показано на рис. 1в). Эта процедура существенно искажила (размыла) фронт поршневой ударной волны, но и не позволила зарегистрировать достаточно надежно фронт взрывной волны в 211 Å. Однако в канале 193 Å, в котором поршневая волна при $\delta\alpha = 1^\circ$ регистрируется хуже, чем в канале 211 Å, удалось при $\delta\alpha = 60^\circ - 110^\circ$ выделить впереди поршневой волны фронт взрывной волны (рис. 6). Возможной причиной этого является то, что кривая температурной чувствительности канала 193 Å, кроме основного максимума вблизи $T = 10^6$ К (близкий к 211 Å), имеет еще второй максимум в области $T > 10^7$ К [6].

Разрыв, который мы связываем с фронтом взрывной волны, отчетливо регистрируется на распределениях разностной яркости $\Delta P(R)$ в 193 Å, построенных вдоль направления позиционного угла $PA \approx 110.4^\circ$ в последовательные моменты времени (темные кружки на рис. 6). Распределения $\Delta P(R)$ получены усреднением по углу $\delta\alpha = 60^\circ - 110^\circ$, значения которого для различных моментов времени показаны справа на графиках рис. 6. Светлыми кружками показаны распределения разностной яркости $\Delta P_N(R)$, полученные для разности моментов времени 12:12:20–12:12:08 UT

до появления СМЕ (т.е. невозмущенные) также в направлении $PA \approx 110.4^\circ$ с использованием тех же углов усреднения. Горизонтальными штриховыми прямыми показаны средние значения $\Delta P(R)$ соответственно перед разрывом и за ним. Возмущенная зона за разрывом показана вертикальной штриховкой на рис. 6. Отношение сигнал/шум $S/N \approx 2.0 - 2.85$ для интервала за разрывом указано в правой части графиков (рис. 6а–6д).

Ширина разрыва $\delta_F \approx 0.0015 R_\odot$ — порядка пространственного разрешения AIA, и она почти не меняется на расстояниях $R \leq 1.26 R_\odot$ (как и для поршневой волны). На больших расстояниях регистрация фронта взрывной волны на распределениях разностной яркости затруднительна из-за его малой амплитуды относительно уровня шума.

На рис. 7 показаны измеренные зависимости от времени расстояния $h(t) = R(t) - R_\odot$ относительно поверхности Солнца для фронта взрывной (кружки) и поршневой (треугольники) ударных волн. Из него следует, что взрывная волна опережает поршневую волну на $\approx 0.03 - 0.06 R_\odot$ в разные моменты времени.

О взрывообразном выделении энергии в этом событии также свидетельствует формирование короткоживущей (~ 1 мин) области излучения в жестком рентгеновском диапазоне, которая наблюдалась на RHESSI (канал 25–50 кэВ) в импульсной фазе события. Примерные границы этой области показаны заштрихованным прямоугольником на рис. 7 (более детальное обсуждение источников в жестком рентгеновском диапазоне можно найти в [12]).

Сравнение распределений $\Delta P(R)$ в каналах 211 Å ($\delta\alpha = 1^\circ$, 12:13:50 UT) и 193 Å ($\delta\alpha = 100^\circ$, 12:13:57 UT) приведено на рис. 8. Для учета разных моментов регистрации профиль в канале 193 Å сдвинут в сторону меньших расстояний на величину $0.015 R_\odot$ (что компенсирует разницу в 7 с моментов регистрации в каналах 211 и 193 Å с учетом скорости взрывной волны $V \approx 1600$ км с⁻¹ на данном участке). На рис. 8 видно, что усреднение по углу $\delta\alpha = 100^\circ$ бегущей разностной яркости в канале 193 Å, действительно позволяет выделить взрывную ударную волну, но при этом фронт поршневой волны полностью сглаживается (нижний рис. 8). Штриховой линией показано соответствие положения этого фронта на верхнем и нижнем графиках рис. 8.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из важных подтверждений существования ударных волн в короне является наличие сопровождающих их радиовсплесков II типа. Для

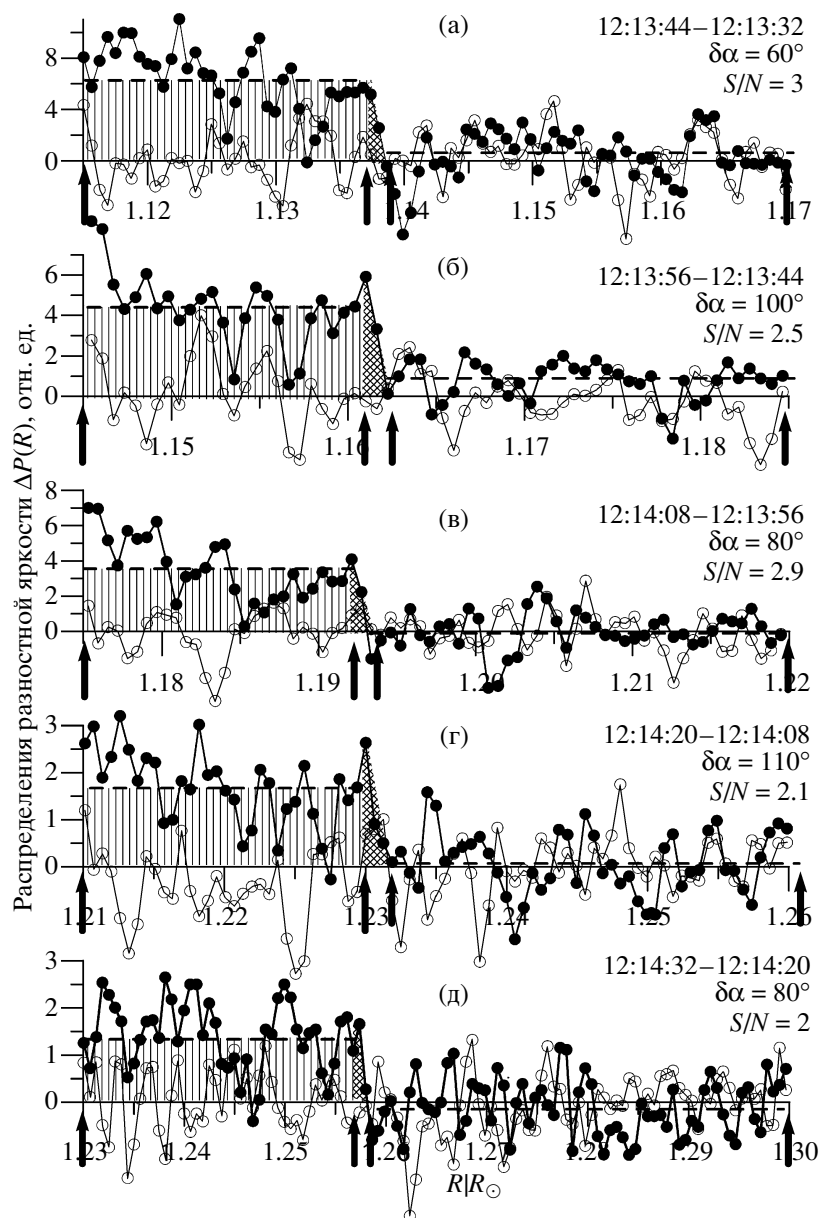


Рис. 6. То же, что на рис. 2, по данным в канале 193 Å и с большим углом усреднения $\delta\alpha = 60^\circ\text{--}110^\circ$. Уровень шума (светлые кружки) построен для разности моментов 12:12:20–12:12:08 UT.

проверки этого воспользуемся пространственно-разрешенными измерениями источников радиовсплесков II типа, выполненными на телескопе Nançay Radioheliograph [13]. Для данного события было зарегистрировано расщепление второй гармоники на две близкие частотные компоненты, которые условно обозначим f_1 и f_2 ; при этом $f_1 < f_2$ (результаты наблюдений представлены в работе [12]). Их положение в зависимости от времени показано на рис. 7 (квадратики) одновременно с положением фронтов поршневой (треугольники) и взрывной (кружки) ударных волн.

Ранее было показано [15], что наличие потоков

энергичных частиц (электронов и ионов) в разреженной плазме может приводить к раскачке электростатических колебаний на плазменной электронной частоте. Затем в результате рэлеевского и комбинационного рассеяния эти колебания могут трансформироваться соответственно в первую и вторую гармонику радиоизлучения II типа на одинарной и двойной электронной плазменной частотах. В случае ударной волны этот процесс может быть локализован в двух следующих областях:

- 1) непосредственно в области ударного фронта [16],
- 2) перед фронтом в области форшока [17].

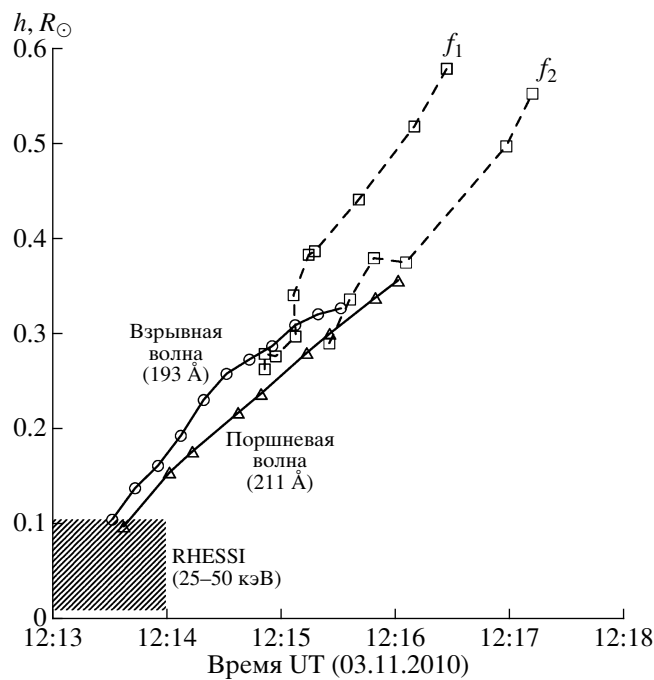


Рис. 7. Зависимость от времени расстояния $h(t) = R(t) - R_{\odot}$ относительно поверхности Солнца для взрывной (кружки) и поршневой (треугольники) ударных волн. Квадратики — положение источников всплесков радиоизлучения II типа, зарегистрированных на Nançay Radioheliograph. Заштрихованный прямоугольник — область вспышечного энерговыделения в жестком рентгеновском диапазоне по данным RHESSI в канале 25–50 кэВ.

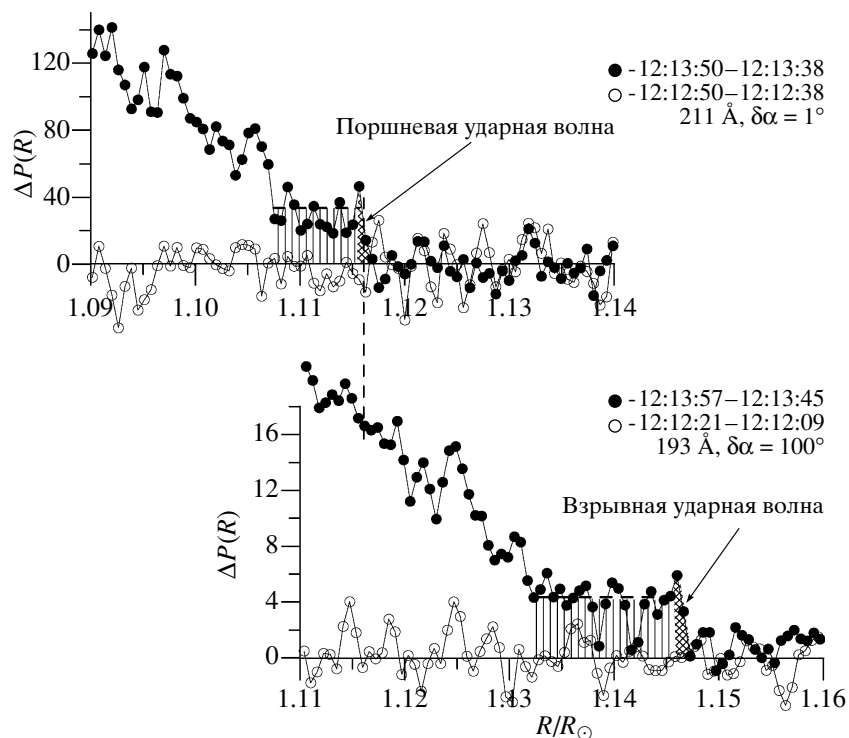


Рис. 8. Сравнение распределений $\Delta P(R)$ в канале 211 Å в момент 12:13:50 UT (верхний профиль; усреднение по углу $\delta\alpha = 1^\circ$) и в канале 193 Å в момент 12:13:57 UT (нижний профиль; $\delta\alpha = 100^\circ$). Для компенсации разницы моментов регистрации профиль в 193 Å сдвинут в сторону меньших расстояний на $0.015R_{\odot}$.

Как следует из рис. 7, в нашем случае оба всплеска локализованы перед ударным фронтом. Поэтому в своей интерпретации остановимся на варианте 2. Будем проводить аналогию с ударными волнами на орбите Земли, для которых хорошо измеряются все основные параметры (в отличие от корональных ударных волн).

Для межпланетной ударной волны, зарегистрированной на орбите Земли, случай связи со всплеском радиоизлучения II типа был детально исследован в работе [17]. Авторами этой работы для ударной волны, которая достигла орбиты Земли 25 августа 1998 г., примерно в 06:40:25 UT, в области форшока был зарегистрирован сильный всплеск ленгмюровских колебаний. Начало этого всплеска пришлось на переднюю границу форшока, удаленную от фронта вверх по невозмущенному потоку СВ на $L_{FS} \approx 137000$ км. Всплеск радиоизлучения II типа авторы однозначно связали со всплеском ленгмюровских колебаний на этой границе форшока.

Размер форшока L_{FS} тем больше, чем больше сила ударной волны. В то же время от силы ударной волны зависит ширина фронта δ_F бесстолкновительной ударной волны. Чтобы использовать этот результат для интерпретации наших наблюдений, оценим значение относительной величины L_{FS}/δ_F , где δ_F — ширина фронта межпланетной ударной волны. Для этого будем использовать следующие параметры невозмущенного СВ и ударной волны 25 августа 1998 г. в 06:40:00 UT. Параметры СВ перед фронтом — $V_{СВ} \approx 400$ км с⁻¹, $N \approx 5$ см⁻³, $B \approx 7$ нТ (данные OMNI, <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Параметры ударной волны — угол между направлением невозмущенного магнитного поля и нормалью к фронту $B_n \approx 86^\circ$ (квазиперпендикулярная волна), альфвеновское число Маха $M_A \approx 13$, магнитозвуковое число Маха $M_{ms} \approx 10$, скорость ударной волны $V_{sh} \approx 1300$ км с⁻¹ [17].

Согласно [18], для таких чисел M_{ms} величина $\delta_F \approx 2.8c/\Omega_p$, где c — скорость света, $\Omega_p = (4\pi Ne^2/m_i)^{1/2}$ — ионная плазменная частота, рассчитанная по концентрации невозмущенного СВ. Отсюда $\delta_F \approx 270$ км, а $L_{FS} \sim 500\delta_F$.

Переходя к анализу нашего события, отметим, что для температуры плазмы $T \sim 10^6$ К длина свободного пробега протонов на $R \sim 1.25-1.3R_\odot$ составляет $\lambda_p \sim 0.002R_\odot$. Полагая, что $\delta_F \sim \lambda_p \sim 0.002R_\odot$ (что согласуется с измерениями), получаем оценку максимального возможного расстояния (опережения) всплеска радиоизлучения относительно фронта ударной волны в нашем случае: $L_{FS\max} \sim 500\lambda_p \sim R_\odot$.

Воспользуемся этой оценкой для анализа связи всплеска f_1 со взрывной волной. Из рис. 7 видно, что в последний момент 12:15:32 UT, когда удаётся еще зарегистрировать фронт волны, опережение всплеска f_1 волны составляет $L_{FS} \sim 0.05R_\odot$. При этом всплеск f_1 продолжает удаляться от фронта волны с прежней скоростью. Возможная интерпретация — этот процесс отражает начальную стадию формирования ударного фронта, и, что особенно важно, стадию формирования форшока. Действительно, в этом случае запаздывание почти на минуту появления всплеска f_1 (в $\approx 12:14:50$ UT) по отношению к моменту возникновения взрывного фронта на рис. 7 может свидетельствовать о запаздывании начала формирования форшока. Это вполне естественно, так как только фронт, имеющий достаточно большую амплитуду скачка параметров (в частности, электрического потенциала), может обеспечить необходимое число отраженных электронов для формирования форшока. По мере возрастания числа отраженных от фронта электронов можно ожидать увеличения размера форшока. То, что всплеск f_1 продолжает удаляться от фронта после 12:15:32 UT, также находит свое объяснение: формирование и увеличение размера форшока продолжается и в принципе может быть закончено, когда его размер достигнет величины $L_{FS\max} \sim R_\odot$.

Отметим, что всплеск f_2 , в отличие от всплеска f_1 , в момент первой регистрации расположен вблизи фронта поршневой волны (большой светлый кружок на рис. 1в; 12:15:26 UT) и не удаляется от него заметно в последующие моменты времени (рис. 7). Здесь следует учесть, что поршневая волна движется по плазме, нагретой взрывной волной. Поэтому условия раскачки плазменных колебаний впереди нее могут заметно отличаться от условий раскачки перед взрывным фронтом.

Предложенная качественная картина для интерпретации этих сложных процессов является достаточно непротиворечивой. Она принципиально отличается от всего того, что до сих пор использовалось для объяснения связи корональных ударных волн и всплесков II типа. Если ее справедливость получит подтверждение в будущих исследованиях, то откроется новый подход в изучении механизма формирования корональных ударных волн и их форшока. Именно поэтому она важна для дальнейших исследований в этой области.

7. ВЫВОДЫ

1. Впервые удалось одновременно зарегистрировать и измерить фронты поршневой и взрывной ударных волн, вызванных формированием и распространением коронального выброса массы.

2. Показано, что каждому из этих двух типов ударных волн может соответствовать распространяющийся впереди фронта свой источник радиовсплеска II типа.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 10-02-00607-а, 10-02-01285-а). Авторы благодарят команды всех инструментов (AIA/SDO, LASCO/SOHO, Наңай Radioheliograph, RHESSI), данные которых использовались в этой работе. Данные OMNI были получены через OMNIWeb-интерфейс GSFC/SPDF на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. V. Eiselevich and V. G. Eiselevich, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L22105 (2008).
2. М. В. Еселевич, В. Г. Еселевич, *Астрон. журн.* **88**, 1124 (2011).
3. М. В. Еселевич, В. Г. Еселевич, *Астрон. журн.* **84**, 1046 (2007).
4. М. В. Еселевич, *Астрон. журн.* **87**, 197 (2010).
5. X. Cheng, J. Zhang, Y. Liu, and M. D. Ding, *Astrophys. J. (Letters)* **732**, L25 (2011).
6. J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, *et al.*, *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
7. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
8. S. Patsourakos, A. Vourlidas, and B. Kliem, *Astron. and Astrophys.* **522**, A100 (2010).
9. М. В. Еселевич, В. Г. Еселевич, *Астрон. журн.* **88**, 393 (2011).
10. Y.-M. Wang, N. R. Sheeley, D. G. Socker, *et al.*, *J. Geophys. Res.* **105**, 25133 (2000).
11. G. Mann, H. Aurass, A. Klassen, *et al.*, in: *Plasma Dynamics and Diagnostics in the Solar transition Region and Corona*, Proc. 8th SOHO Workshop, Paris, France, 22–25 June 1999, eds J. Rybák, W. Curdt, A. Kucera, *et al.*, ESA Publs SP-446 (Europ. Space Agency, 1999), p. 477.
12. I. Zimovets, N. Vilmer, A. C.-L. Chian, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **547**, id.A6 (2012).
13. A. Kerdraon and J.-M. Delouis, in: *Coronal Physics from Radio and Space Observations*, Proc. CESRA Workshop, Nouan le Fuzelier, France, 3–7 June 1996, ed. G. Trottet (Springer, 1997), p. 192.
14. S. F. Smerd, K. V. Sheridan, and R. T. Stewart, *Proc. IAU Symp.* **57**, 389 (1974).
15. Z. Kuncic, I. H. Cairns, S. Knock, and P. A. Robinson, *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1161 (2002).
16. G. Mann, T. Classen, and H. Aurass, *Astron. and Astrophys.* **295**, 775 (1995).
17. S. D. Bale, M. J. Reiner, J.-L. Bougeret, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 1573 (1999).
18. V. Eiselevich, *Planet. and Space Sci.* **32**, 65 (1982).