

УДК 523.98-77

## О ВОЗМОЖНОЙ ПРИЧИНЕ ЧАСТОТНОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ГАРМОНИК СОЛНЕЧНОГО РАДИОВСПЛЕСКА ВТОРОГО ТИПА

© 2015 г. В. Г. Еселевич<sup>1\*</sup>, М. В. Еселевич<sup>1</sup>, И. В. Зимовец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

Поступила в редакцию 14.04.2015 г.; принята в печать 13.05.2015 г.

На основе анализа данных инструмента AIA/SDO (канал 193 Å) впереди коронального выброса массы в лимбовом событии на Солнце 13 июня 2010 г. удалось одновременно зарегистрировать и измерить фронты двух различных ударных волн. Угловой размер каждого из этих фронтов относительно центра коронального выброса массы составил около 20°, а их направления распространения отличались на ≈25° (по позиционному углу на ≈4°). Более быстрый фронт, названный взрывной ударной волной, опережал фронт другой волны, названной поршневой, на  $R \approx (0.02-0.03) (R_{\odot})$  (радиус Солнца) и имел максимальную начальную скорость  $V_B \approx 850 \text{ км с}^{-1}$  (у поршневой  $V_P \approx 700 \text{ км с}^{-1}$ ). Появление и движение этих ударных волн сопровождалось всплеском радиоизлучения II типа на фундаментальной частоте  $F$  и второй гармонике  $H$ . Каждая из частот была расщеплена на две близкие частоты  $f_1$  и  $f_2$ , различающиеся на величину  $\Delta f = f_2 - f_1 \ll F, H$ . На основе проведенного анализа был сделан вывод о том, что наблюдаемое частотное расщепление  $\Delta f$  частот  $F$  и  $H$  радиоизлучения II типа может быть результатом одновременного распространения поршневой и взрывной ударных волн с различными скоростями в несколько разных направлениях, которые отличаются значениями концентрации корональной плазмы.

DOI: 10.7868/S0004629915110043

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ударные волны в короне генерируются корональными выбросами массы (КВМ). Они проявляют себя в виде всплесков радиоизлучения II типа на фундаментальной частоте  $F$  и ее гармонике  $H \approx 2F$  (см., например, [1]). Величина дрейфа  $F$  и  $H$  во времени от высоких частот к низким связана со скоростью распространения ударного фронта и с градиентом концентрации плазмы в короне. Физическая теория [2] связывает возникновение этих радиовсплесков с наличием потоков энергичных частиц (электронов и ионов) в разреженной плазме, которые могут раскачивать электростатические колебания на плазменной электронной частоте. Затем, в результате рэлеевского и комбинационного рассеяний, эти колебания могут трансформироваться, соответственно, в первую (фундаментальную)  $F$  и вторую  $H$  гармонику радиоизлучения II типа.

Часто наблюдаемый дрейф частоты  $F$  (и  $H$  тоже) во времени происходит в виде двух узких параллельных полос, частотное расстояние между

которыми  $\Delta f = f_2 - f_1 \ll F$ . Такое расщепление связывают:

1) с тем, что различные участки фронта ударной волны одновременно распространяются в разных областях фоновой плазмы с отличающимися концентрациями, что приводит к нескольким одновременно возбуждаемым частотам [3];

2) с одновременной генерацией радиоизлучения в двух следующих областях: а) во фронте и непосредственно за ним, б) перед фронтом в области “foreshock”; при этом, согласно [4, 5], частотное расщепление  $\Delta f$  фундаментальной гармоники  $F$  (и  $H$ ) определяется значениям концентрации перед фронтом  $N_1$  и за фронтом  $N_2$  из соотношения  $\Delta f/f_1 = (N_2/N_1)^{1/2} - 1$ .

Первый вариант, очевидно, может иметь место, однако показать его реализацию в эксперименте чрезвычайно сложно, так как для этого необходима прямая регистрация ударного фронта. Используемые в настоящее время методы определения положения фронта по разностным изображениям в ультрафиолете не позволяют это сделать, поскольку с их помощью невозможно отличить переднюю границу возмущенной зоны перед КВМ от

\*E-mail: esel1@iszf.irk.ru

ударного фронта. В то же время предложенный и реализованный в работах [6, 7] комплексный метод регистрации и отождествления ударного фронта перед КВМ позволяет это сделать. И мы им воспользуемся в данной работе.

Вторая причина частотного расщепления, несмотря на определенные доводы в ее пользу в работах [4, 5, 8, 9], вызывает определенные сомнения. Они связаны с результатами работ [10, 11], в которых для межпланетных ударных волн, зарегистрированных на орбите Земли, была детально исследована их связь с межпланетными всплесками радиоизлучения II типа. В этих работах было показано отсутствие всплеска ленгмюровских колебаний во фронте волны и за ним, и его наличие непосредственно перед фронтом в области “foreshock”. При этом всплеск радиоизлучения II типа авторы однозначно связали с этим всплеском ленгмюровских колебаний в области “foreshock”.

В работе [12] была сделана первая попытка использования метода прямой регистрации ударного фронта [6, 7] с одновременным анализом пространственно-разрешенных измерений источников радиовсплесков II типа, выполненных на телескопе Nançay Radioheliograph [13]. В результате в событии 3 ноября 2010 г., для которого наблюдалось расщепление второй гармоники H на две близкие частотные компоненты  $f_1$  и  $f_2$ , в работе [12]:

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

2) было показано, что каждому из этих двух типов ударных волн соответствует распространяющийся впереди фронта свой всплеск радиоизлучения II типа (соответственно, компоненты  $f_1$  и  $f_2$ ).

3) была предложена качественная картина, согласно которой всплески радиоизлучения происходят в “foreshock” этих ударных волн, которые находятся на стадии формирования.

Целью настоящей работы является развитие подхода, использованного в [12], для анализа других событий и нахождение возможной связи частотного расщепления фундаментальной и второй гармоник на близкие частотные компоненты  $f_1$  и  $f_2$  с процессами распространения двух типов ударных волн, связанных с КВМ, на основе детального анализа солнечного события 13 июня 2010 г.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

Для анализа использовались данные инструмента AIA/SDO [14] (EUV-изображения в канале 193 Å). Временное разрешение инструмента составляло  $\approx 12$  с, угловое разрешение —  $\approx 1.5''$  (размер пикселя —  $\approx 0.6''$ ), внешняя граница поля зрения находилась на расстоянии 1.3–1.4  $R_\odot$  от центра Солнца.

Согласно оценкам в работе [12], канал 193 Å более удобен для регистрации взрывной ударной волны, чем канал 211 Å. Возможной причиной этого является то, что кривая температурной чувствительности канала 193 Å, кроме основного максимума вблизи  $T \approx 10^6$  К (близкий к 211 Å), имеет еще второй максимум в области  $T > 10^7$  К [14].

Для исследования динамики возмущенной зоны впереди КВМ и формирования ударной волны во времени и в различных направлениях относительно оси распространения КВМ использовались разностные изображения. EUV-изображения представлялись в виде бегущей разностной яркости  $\Delta P = P(t_2) - P(t_1)$ , где  $P(t_2)$  и  $P(t_1)$  — яркости ближайших по времени изображений. В отдельных случаях они также представлялись в виде разностной яркости  $\Delta P = P(t) - P(t_0)$  с фиксированным начальным моментом  $t_0$  перед возникновением КВМ и  $t > t_0$ .

Фронтальная структура (FS) КВМ обычно имеет вид, близкий к окружности, как это показано, например, на характерной схеме в статье [7, рис. 1b]. Положение этой окружности в каждый момент времени задавалось положением ее центра O, находящимся на расстоянии  $R_C$  от центра Солнца в направлении позиционного угла  $PA_C$  (отсчитывается от северного полюса против часовой стрелки). Для построения профиля и корректного измерения размера ударного фронта по изображениям разностной яркости строились распределения разностной яркости  $\Delta P(r)$  под различными углами  $\alpha$  относительно оси движения КВМ (определяемого углом  $PA_C$ ) в различные моменты времени (отсчет угла  $\alpha$  положительный в направлении против часовой стрелки [7, рис. 1b]). 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 КВМ и к расположенному перед ней фронту ударной волны. Величины  $R$  и  $r$  связаны соотношением  $R = (R_C^2 + r^2 + 2R_C r \cos \alpha)^{1/2}$ .

## 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

## 3.1. Динамика поршневой ударной волны

Развитие поршневой ударной волны в событии 13 июня 2010 г. по распределениям разностной яркости  $\Delta P(R)$  в канале 211 Å, построенным вдоль направления  $\alpha = 25^\circ$  относительно направления  $PA_C \approx 244.3^\circ$  в последовательные моменты времени при  $t_0 = 05:32:02$  UT, ранее исследовалось в статье [7]. Для регистрации же возможной взрывной ударной волны в этом событии, согласно выводам работы [12], желательнее использовать бегущую разностную яркость в канале 193 Å и сравнивать результаты с исследованиями поршневой волны в том же канале 193 Å.

На рис. 1 для события 13 июня 2010 г. темными кружками показаны распределения разностной яркости  $\Delta P(R)$  в канале 193 Å, вдоль направления  $\alpha = 25^\circ$  относительно линии  $PA_C \approx 244.3^\circ$  в последовательные моменты времени при  $t_0 = 05:36:56$  UT. Светлыми кружками даны распределения разностной яркости  $\Delta P(R)$  до появления КВМ (т.е. невозмущенные) в момент 05:37:08 UT также в направлении  $\alpha = 25^\circ$ . Каждое из них имеет те же значения  $R_C$  и  $\alpha$ , что и соответствующий ему возмущенный профиль  $\Delta P(R)$ . Их значения указаны в подписи к рис. 1. Все профили  $\Delta P(R)$  усреднены по углу  $\delta\alpha = 1^\circ$ .

Невозмущенные распределения характеризуются уровнем “шума”  $\delta N$ , который несколько отличается в различных направлениях  $\alpha$ . Их регистрация одновременно с основным сигналом дает возможность более надежно выделять скачки разностной яркости в передней части возмущенной зоны, соответствующих ударному фронту.

В момент 05:37:32 UT (рис. 1а) фронтальная структура (ее вершина отмечена надписью FS) имеет минимальный размер: ее ширина на полувысоте (показана вертикальной штриховкой на рис. 1а) составляет  $\approx 0.008 R_\odot$ . Размер возмущенной зоны, разностная яркость которой плавно спадает с расстоянием (наклонная штриховка), составляет  $\approx 0.02 R_\odot$  (левая граница зоны, отмеченная вертикальной штриховкой линией, начинается условно на полувысоте максимальной разностной яркости FS; рис. 1а). Разрыва (или скачка) яркости в передней части возмущенной зоны еще нет. В следующий момент времени 05:37:44 UT на рис. 1б ширина FS сравнительно мало меняется, а размер возмущенной зоны резко возрастает до  $\approx 0.035 R_\odot$ , и в передней части возмущенной зоны появляется разрыв разностной яркости. Он на рис. 1б выделен кругом и отмечен надписью PS, а на растянутой пространственной шкале (рис. 1в) выделен серой заливкой. Согласно исследованиям изображений

в канале 211 Å, проведенным в [7], этот разрыв является фронтом поршневой ударной волны.

Для того чтобы более четко выделить разрыв в распределениях  $\Delta P(R)$ , находились средние значения разностной яркости на двух пространственных интервалах — за разрывом и перед разрывом (на рис. 1в–1к эти средние значения показаны штриховыми горизонтальными прямыми). Возмущенная зона за разрывом показана наклонной штриховкой (рис. 1в–1к).

Уровень шума  $\delta N$  (среднеквадратичное отклонение от среднего значения) определялся по распределениям невозмущенной разностной яркости (светлые кружки) для полных участков распределений, показанных на рис. 1в–1к.

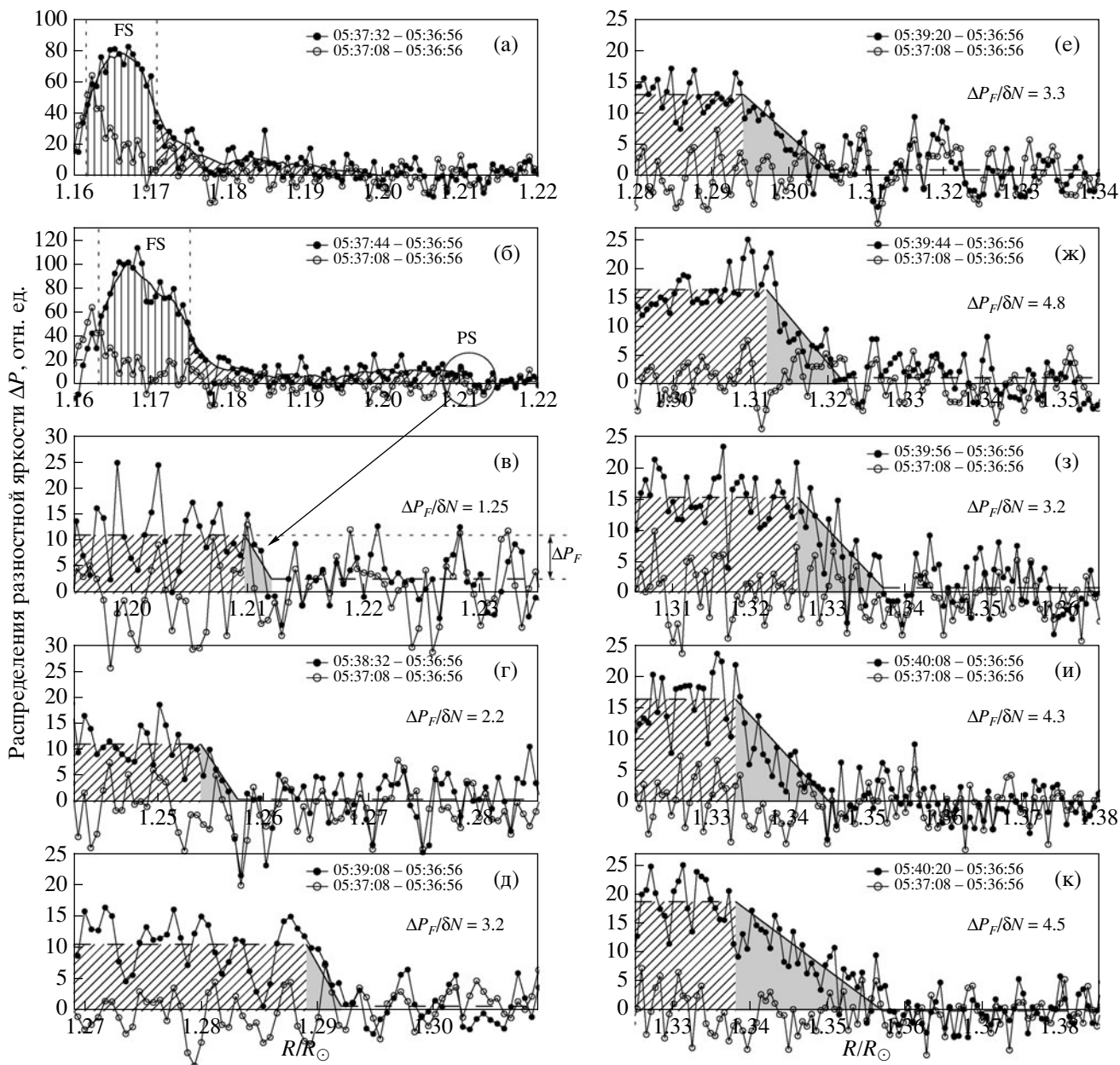
Скачок яркости на разрыве характеризуется величиной  $\Delta P_F$ , как показано на рис. 1в. Значение отношения сигнала (скачка яркости) к шуму  $\Delta P_F/\delta N$  приведены в правой части рисунка (рис. 1в–1и). Начиная с момента 05:38:32 UT (рис. 1г) величина  $\Delta P_F/\delta N > 2$ , т.е. фронт поршневой волны (разрыв на распределениях разностной яркости) регистрируется достаточно надежно.

На рис. 2а–2д даны распределения разностной яркости  $\Delta P(R)$  в момент времени 05:39:20 UT ( $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C \approx 1.11 R_\odot$ ) для различных направлений  $\alpha = -10^\circ$ – $(+40^\circ)$  относительно  $PA_C = 244.3^\circ$  при  $t_0 = 05:36:05$  UT. Из графиков видно следующее:

1. Диапазон направлений, в которых достаточно устойчиво регистрируется фронт поршневой волны (отмечен надписью PS), составляет  $\alpha \approx 10^\circ$ – $30^\circ$  (соответствует  $PA \approx 245^\circ$ – $259^\circ$ ). На рис. 2б–2г жирным косым крестиком отмечена средняя точка фронта.

2. В направлениях  $\alpha < 10^\circ$  и  $\alpha > 30^\circ$  в основном регистрируется плавно спадающая с расстоянием возмущенная зона без разрыва (рис. 2а, 2д, наклонная штриховка). Усредняющая кривая получена аппроксимацией измеренного профиля (темные кружки) полиномом 2-ой степени (параболой). В отдельные моменты времени и на различных расстояниях разрыв может возникать и исчезать. Это может свидетельствовать о том, что в этих направлениях (при этих  $\alpha$ ) он или находится на стадии формирования, или имеет слишком малую амплитуду. Поэтому в направлениях  $\alpha > 30^\circ$  и  $\alpha < 10^\circ$  существование фронта неустойчиво и сильно зависит от условий в невозмущенном солнечном ветре.

3. Наиболее устойчиво разрыв существует в направлении угла  $\alpha = 25^\circ$  (рис. 2в; см. также рис. 1). Все это согласуется с выводами о свойствах поршневой ударной волны, полученными для данного события в [7] при анализе профилей  $\Delta P(R)$  в канале 211 Å.

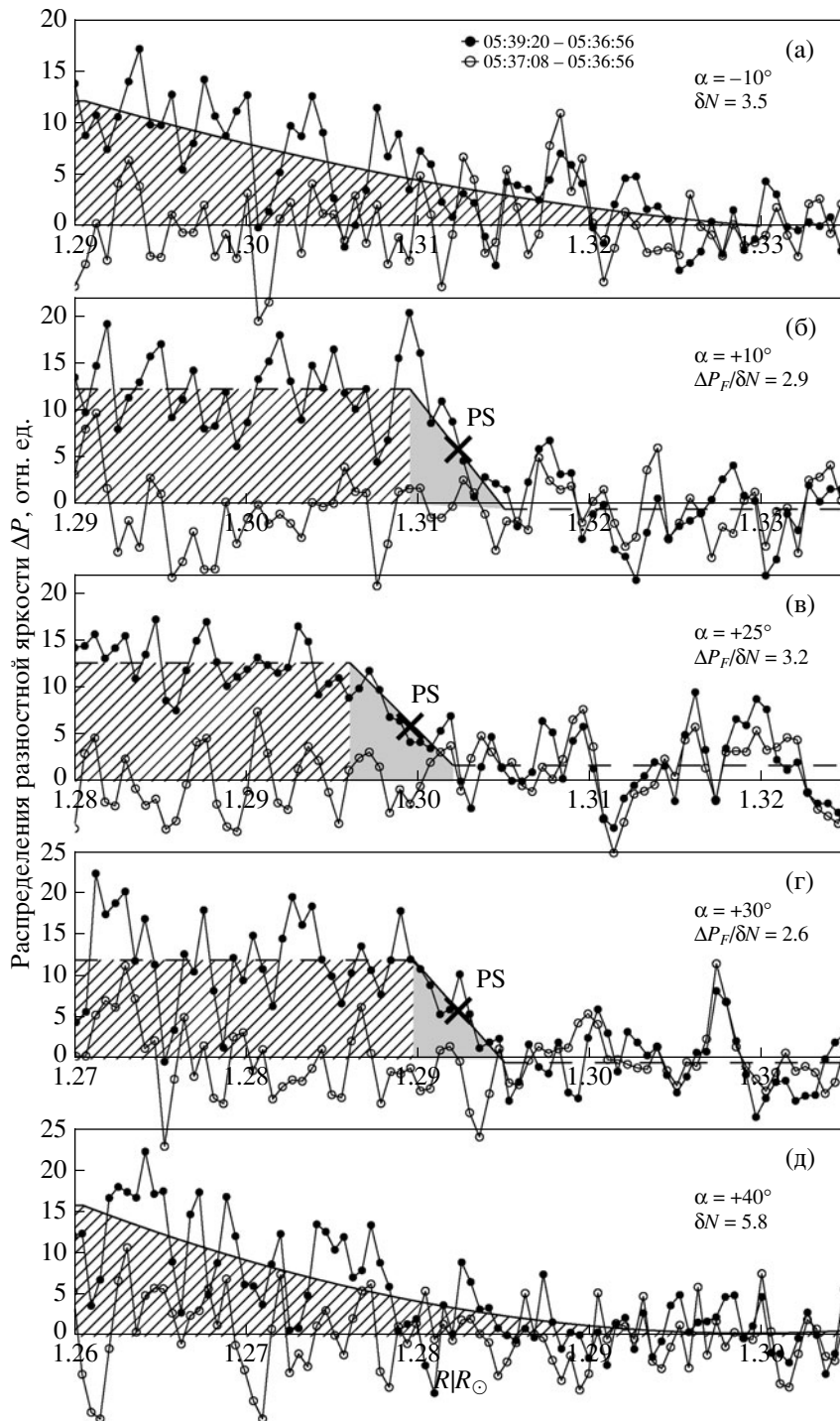


**Рис. 1.** Профили разностной яркости  $\Delta P(R)$  в зависимости от расстояния  $R = (R_C^2 + r^2 + 2R_C r \cos \alpha)^{1/2}$  относительно центра Солнца, построенные по измеренным профилям  $\Delta P(r)$  относительно центра  $O$  ( $PA_C = 244.3^\circ$ ) фронтальной структуры КВМ в направлении угла  $\alpha = 25^\circ$  в последовательные моменты времени при  $\delta\alpha = 1^\circ$ : (а-г) —  $R_C \approx 1.07 R_\odot$ , (д-ж) —  $R_C \approx 1.11 R_\odot$ , (з-к) —  $R_C \approx 1.14 R_\odot$ . Отношение сигнал/шум ( $\Delta P_F/\delta N$ ) для интервала за фронтом указано справа на графиках (в-к). КВМ 13 июня 2010 г. Данные SDO/AIA, канал 193 Å.

### 3.2. Динамика взрывной ударной волны

Возможность существования в рассматриваемом событии взрывной ударной волны связана с тем, что: 1) процесс возникновения КВМ происходит взрывообразным образом, 2) КВМ сопровождается вспышкой (рентгеновский балл M1.0). Каждый из этих процессов в принципе может быть источником взрывной ударной волны, которая

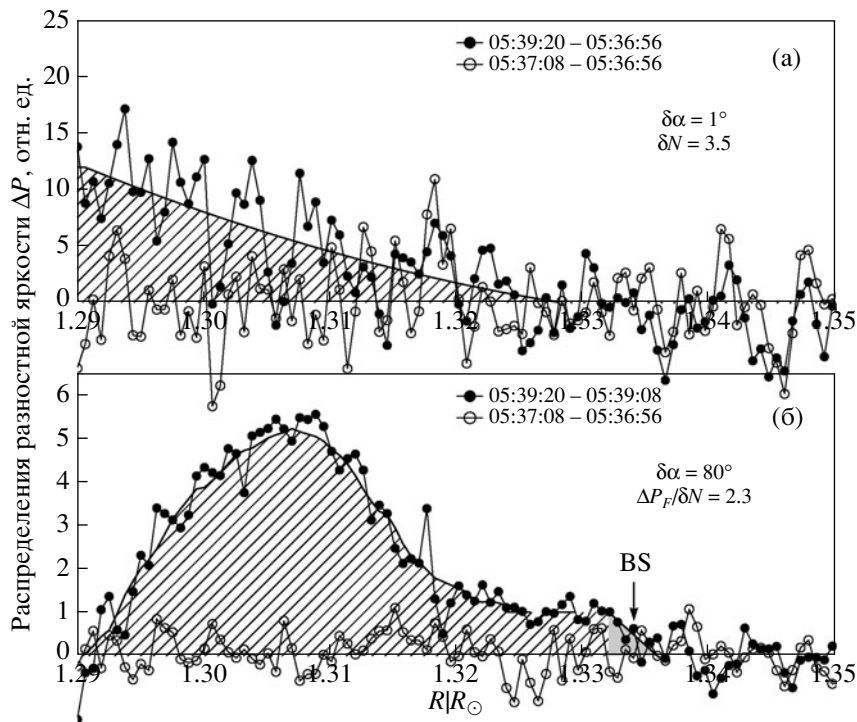
предположительно должна сформироваться раньше и двигаться впереди поршневой ударной волны. В работе [12] была предпринята первая попытка регистрации одновременно с поршневой также и взрывной ударной волны. Используя метод этой работы, попытаемся зарегистрировать взрывную ударную волну и исследовать ее свойства в данном событии 13 июня 2010 г. Этот метод основывает-



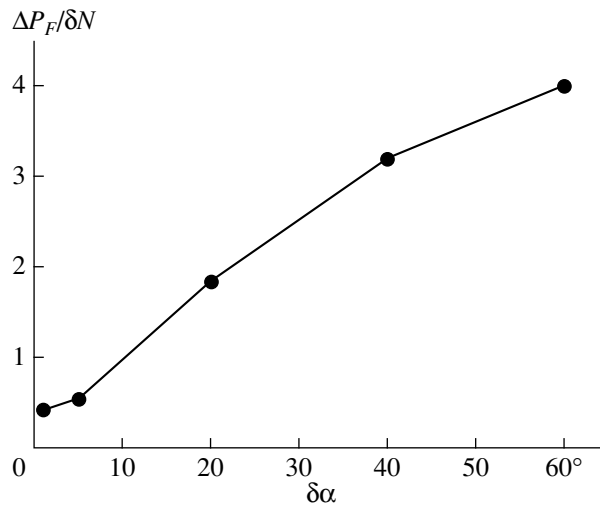
**Рис. 2.** Профили разностной яркости  $\Delta P(R)$  в зависимости от расстояния  $R$  относительно центра Солнца, построенные по измеренным профилям  $\Delta P(r)$  относительно центра  $O$  ( $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C \approx 1.11 R_\odot$ ) фронтальной структуры КВМ для различных углов  $\alpha = -10^\circ \div +40^\circ$  в момент времени  $t = 05:39:20$  UT при  $\delta\alpha = 1^\circ$ . Отношение сигнал/шум ( $\Delta P_F/\delta N$ ) для интервала за фронтом указано справа на графиках (б–г); уровень шума  $\delta N$  указан на графиках (а, д). КВМ 13 июня 2010 г. Данные SDO/AIA, канал 193 Å.

ся на предположении о том, что взрывная волна должна распространяться впереди поршневой волны, где существует довольно высокий уровень шу-

ма, сравнимый или превышающий скачок  $\Delta P_F$  на ударном фронте. Поэтому для увеличения отношения сигнал/шум  $\delta P_F/\delta N$  в области фронта взрыв-



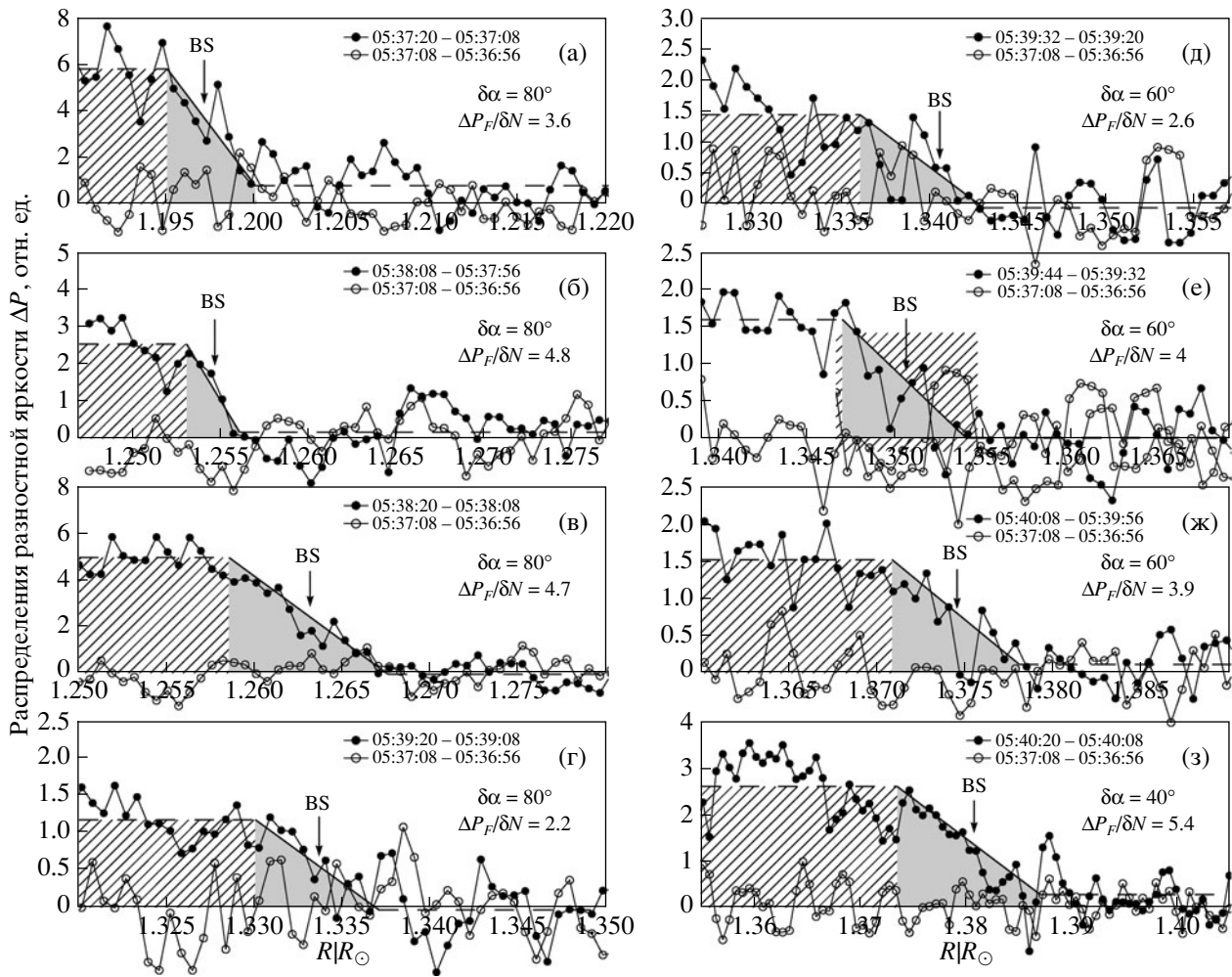
**Рис. 3.** Сравнение профилей для одного момента времени при  $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C \approx 1.11 R_\odot$ ,  $\alpha = -10^\circ$ : (а) — разностной яркости  $\Delta P(R)$  с малым углом усреднения  $\delta\alpha = 1^\circ$ , (б) — бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$  с большим углом усреднения  $\delta\alpha = 80^\circ$ . КВМ 13 июня 2010 г. Данные SDO/AIA, канал 193 Å.



**Рис. 4.** Зависимость от угла усреднения  $\delta\alpha$  отношения сигнал/шум  $\Delta P_F/\delta N$  для скачка на фронте взрывной волны (BS) на профиле бегущей разностной яркости в момент  $t_2 - t_1 = 05:40:08 - 05:39:44$  UT при  $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C \approx 1.14 R_\odot$ ,  $\alpha = -10^\circ$ . КВМ 13 июня 2010 г. Данные SDO/AIA, канал 193 Å.

ной ударной волны необходимо провести усреднение не по углу  $\delta\alpha = 1^\circ$ , а по значительно большему углу, который для различных моментов времени может составить величину  $\delta\alpha = 60^\circ - 100^\circ$ . При

этом для более четкой регистрации взрывной волны при усреднении по большим  $\delta\alpha$ , согласно [12], следует использовать профили бегущей разностной яркости  $\Delta P = \Delta P(t_2) - \Delta P(t_1)$ . В то же время



**Рис. 5.** Профили бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$  относительно центра Солнца, построенные по измеренным профилям  $\Delta P(r)$  относительно центра О ( $PA_C = 244.3^\circ$ ) фронтальной структуры КВМ в направлении угла  $\alpha = -10^\circ$  в последовательные моменты времени при  $\delta\alpha = 40^\circ - 80^\circ$ : (а-д) —  $R_C \approx 1.07 R_\odot$ , (е) —  $R_C \approx 1.11 R_\odot$ ; (ж, з) —  $R_C \approx 1.14 R_\odot$ . Величина отношения сигнал/шум ( $\Delta P_F/\delta N$ ) для интервала за фронтом и значение  $\delta\alpha$  указаны справа на каждом из графиков. КВМ 13 июня 2010 г. Данные SDO/AIA, канал 193 Å.

для регистрации поршневой ударной волны (PS на рис. 1 и 2) можно использовать профили разностной яркости с фиксированным начальным моментом времени  $\Delta P = \Delta P(t) - \Delta P(t_0)$ .

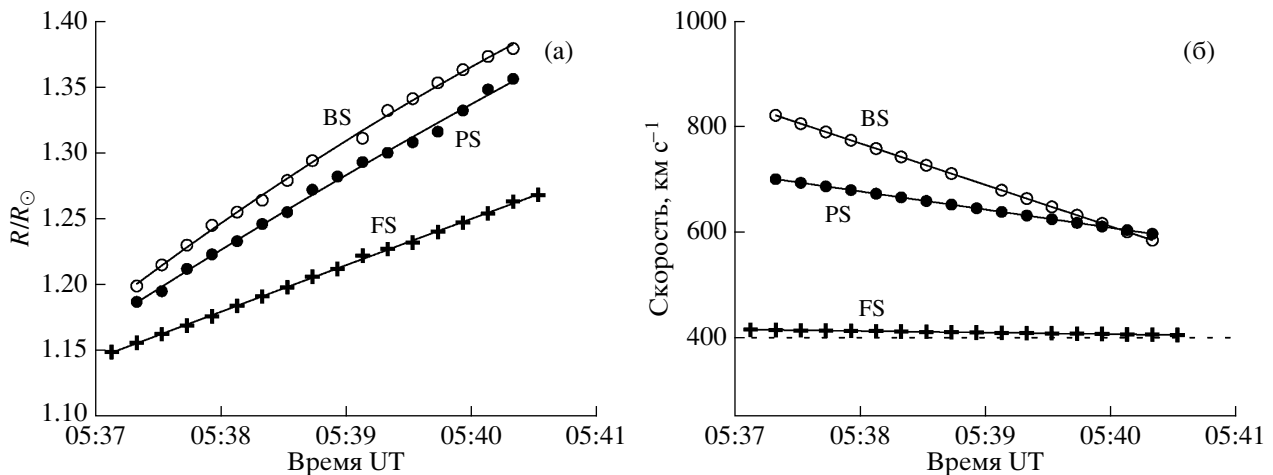
На рис. 3 для события 13 июня 2010 г. показано сравнение следующих профилей для одного момента времени при  $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C \approx 1.11 R_\odot$  и  $\alpha = -10^\circ$ :

а) разностной яркости  $\Delta P(R)$  для  $t_2 - t_0 = 05:39:20 - 05:36:56$  UT (темные кружки) и  $t_2 - t_0 = 05:37:08 - 05:36:56$  UT (светлые кружки) с малым углом усреднения —  $\delta\alpha = 1^\circ$ ;

б) бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$  для  $t_2 - t_1 = 05:39:20 - 05:39:08$  UT (темные кружки) и  $t_2 - t_1 = 05:37:08 - 05:36:56$  UT (светлые кружки) с большим углом усреднения —  $\delta\alpha = 80^\circ$ .

Из рис. За видно, что при  $\delta\alpha = 1^\circ$  в направлении  $\alpha = -10^\circ$  регистрируется усредненный по колебаниям плавно спадающий профиль возмущенной зоны (наклонная штриховка), а фронт поршневой волны отсутствует, что согласуется с рис. 2а для того же момента времени. Уровень шума составляет  $\delta N \approx 3.5$ . При усреднении по углу  $\delta\alpha = 80^\circ$  уровень шума становится существенно меньше, и наблюдаемая картина кардинально меняется (рис. 3б): в передней части возмущенной зоны регистрируется новый фронт — предположительно фронт взрывной ударной волны (показан серой заливкой и обозначен BS).

Возможность зарегистрировать новый фронт BS при усреднении по большому углу становится понятной из рассмотрения рис. 4. На нем



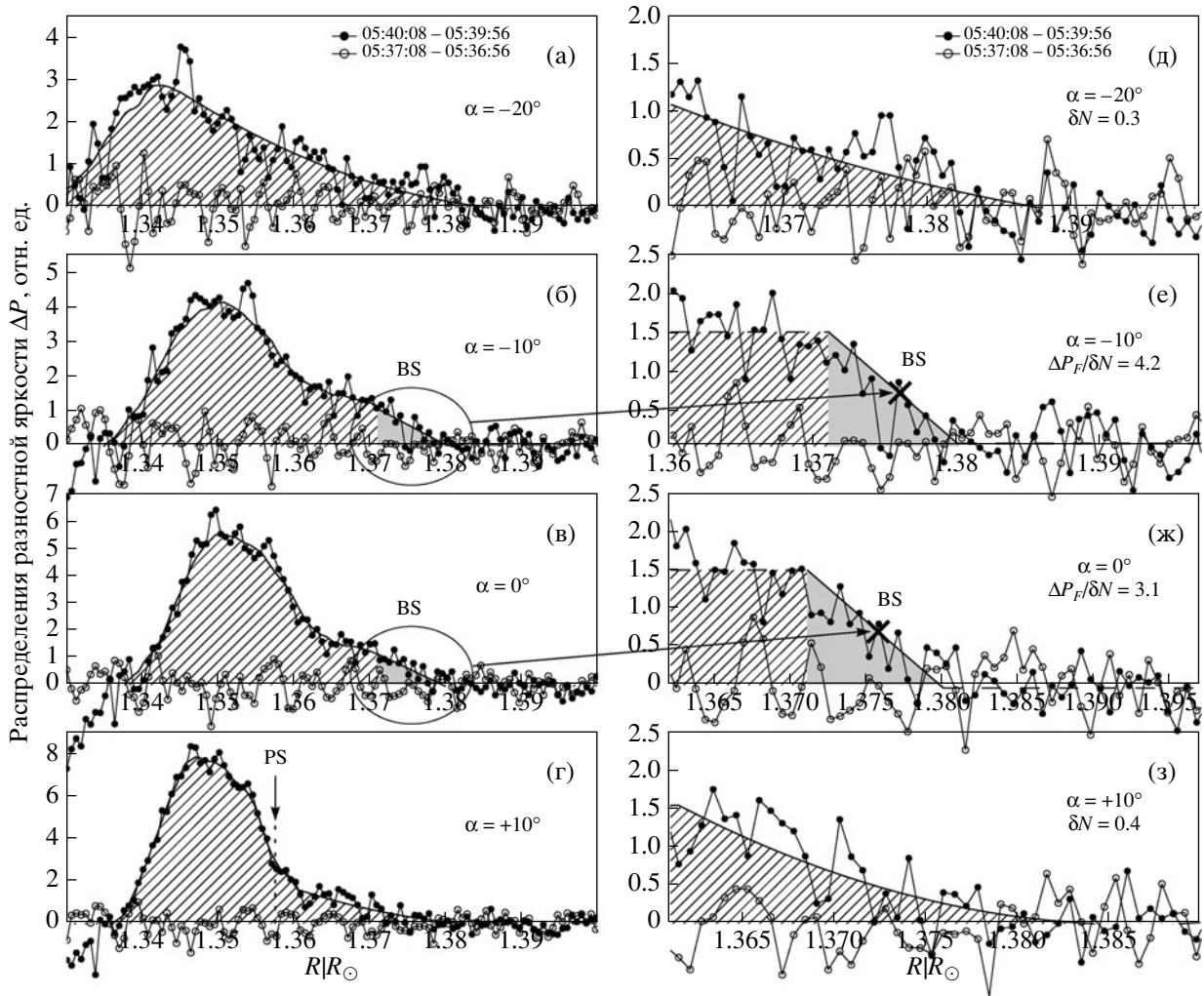
**Рис. 6.** (а) — Зависимости от времени расстояния  $R$  от центра Солнца (для  $PA_C = 244.3^\circ$ ) для: темные кружки — фронта поршневой волны (PS) в направлении угла  $\alpha = 25^\circ$ ,  $\delta\alpha = 1^\circ$  (построено по данным рис. 1), светлые кружки — фронта взрывной волны (BS) в направлении  $\alpha = -10^\circ$ ,  $\delta\alpha = 40^\circ - 80^\circ$  (построено по данным рис. 5), крестики — максимума яркости фронтальной структуры КВМ (FS) в направлении  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\delta\alpha = 5^\circ$ . Аппроксимирующие кривые — полином 2-й степени. (б) — Скорости фронтов PS, BS и FS (первые производные аппроксимирующих кривых, показанных на графике (а) слева).

представлена зависимость отношения сигнал/шум  $\Delta P_F / \delta N$  от величины угла усреднения  $\delta\alpha$  для скачка на фронте BS, регистрируемого на профиле разностной яркости в моменты  $t_2 - t_1 = 05:40:08 - 05:39:44$  UT ( $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C = 1.14 R_\odot$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ). Видно, что при  $\delta\alpha < 10^\circ$  величина  $\Delta P_F / \delta N < 1$ , т.е. скачок на фронте практически не виден на фоне шума. С ростом  $\alpha$  величина  $\Delta P_F / \delta N$  становится больше единицы, достигая максимальных значений при  $\delta\alpha \approx 60^\circ - 100^\circ$ . Скачок на фронте  $\Delta P_F$  достаточно надежно регистрируется уже при  $\delta\alpha \geq 20^\circ$ , когда  $\Delta P_F / \delta N > 2$ . Зависимости, аналогичные приведенной на рис. 4, для других моментов времени (и других расстояний  $R$ ), имеют подобный вид, хотя несколько отличаются по значениям  $\Delta P_F / \delta N$ .

На рис. 5 для события 13 июня 2010 г. темными кружками показаны профили бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$  канала  $193 \text{ \AA}$  вдоль угла  $\alpha = -10^\circ$  относительно направления  $PA_C = 244.3^\circ$  в последовательные моменты времени  $t_2 - t_1$ , указанные на графиках, при больших угловых усреднениях  $\delta\alpha = 40^\circ - 80^\circ$ . Также как на рис. 1 и 2, определялись средние значения  $\Delta P$  на двух участках профиля разностной яркости: за разрывом BS и перед ним. Эти средние значения показаны на рис. 5 горизонтальными штриховыми прямыми. Профиль фронта BS усреднен наклонной прямой и отмечен серой заливкой, участок за разрывом (соответствует ударно-нагретой плазме) показан наклонной штриховкой (рис. 5).

Первый момент, когда надежно регистрируется фронт BS, это 05:37:20 UT (рис. 5а). По мере движения скорость фронта BS падает. На рис. 6а светлыми кружками показана зависимость от времени расстояния  $R(t)$  для фронта BS, построенная по профилям на рис. 5 для  $\alpha = -10^\circ$ . Для сравнения на том же графике темными кружками показана зависимость  $R(t)$  для фронта поршневой ударной волны (PS), построенная по профилям на рис. 1 в направлении угла  $\alpha = 25^\circ$ . Для обеих зависимостей на рис. 6а линиями проведены аппроксимации кривой 2-го порядка (параболой). На рис. 6б нанесены производные от этих кривых, т.е. скорости взрывной (BS) и поршневой (PS) ударных волн. Видно, что фронт BS опережает фронт PS на  $\approx 0.01 - 0.02 R_\odot$ , а его максимальная начальная скорость  $V_B \approx 850 \text{ км с}^{-1}$  превышает соответствующую скорость фронта PS, составляющую  $V_P \approx 700 \text{ км с}^{-1}$ . По мере движения скорость фронтов BS и PS падает. При этом торможение фронта поршневой волны можно связать с постепенным замедлением его магнитного поршня — фронтальной структуры (FS) КВМ (крестики на рис. 6б относительно горизонтальной штриховой прямой). Согласно каталогу SOHO LASCO CME ([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) на расстояниях  $R > 2.5 R_\odot$  скорость FS уменьшается до значения  $V_{КВМ} \approx 300 \text{ км с}^{-1}$  и далее мало меняется с расстоянием.

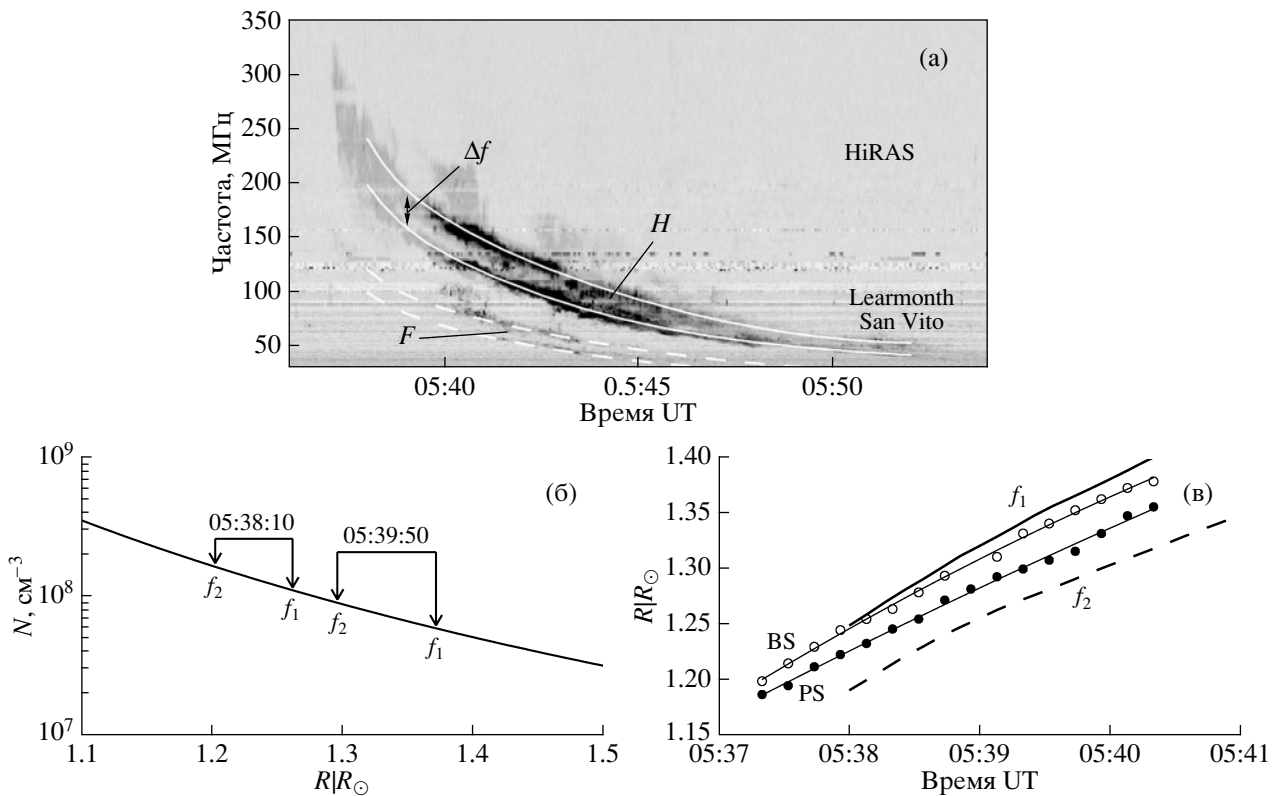




**Рис. 7.** Профили бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$  относительно центра Солнца, построенные по измеренным профилям  $\Delta P(r)$  относительно центра О ( $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C \approx 1.14 R_\odot$ ) фронтальной структуры КВМ для четырех различных углов  $\alpha = -20^\circ - 10^\circ$  в момент времени  $t = 05:40:08$  UT при  $\delta\alpha = 60^\circ$ : (а-г) — на обычной пространственной шкале, (д-з) — на растянутой пространственной шкале в области фронта BS. Величина отношения сигнал/шум ( $\Delta P_F/\delta N$ ) для интервала за фронтом указана справа на графиках (е) и (ж), уровень шума  $\delta N$  — справа на графиках (д) и (з). КВМ 13 июня 2010 г. Данные SDO/AIA, канал 193 Å.

Однако самое интересное, на наш взгляд, отличие BS от PS следует из рис. 7. На нем представлены профили бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$  при большом угле усреднения  $\delta\alpha = 60^\circ$  для момента  $t_2 - t_1 = 05:40:08 - 05:39:44$  UT, при  $PA_C = 244.3^\circ$ ,  $R_C \approx 1.14 R_\odot$  для четырех углов  $\alpha$ :  $-20^\circ$  (рис. 7а, 7д),  $-10^\circ$  (рис. 7б, 7е),  $0^\circ$  (рис. 7в, 7ж),  $10^\circ$  (рис. 7г, 7з). В левой колонке графиков (рис. 7а-7г) профили  $\Delta P(R)$  даны на обычной пространственной шкале, а в правой (рис. 7д-7з) — на более растянутой пространственной шкале и ограниченном участке в области фронта BS (он выделен кружком на рис. 7б и 7в). Из рисунка видно, что ударный фронт

с  $\Delta P_F/\delta N > 2$ , показанный штриховой линией, формируется преимущественно при углах  $\alpha = -10^\circ$  и  $0^\circ$ . А при  $\alpha < -10^\circ$  и  $\alpha > 10^\circ$  отношение  $\Delta P_F/\delta N$  становится  $\sim 1$ , т.е. фронт практически неразличим на фоне шума. Таким образом, среднее направление распространения фронта BS соответствует  $\alpha \approx -5^\circ$ . В то же время фронт PS, как следует из рис. 2, устойчиво регистрируется при  $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ , и среднее направление распространения соответствует  $\alpha \approx 20^\circ$ . Это означает, что направления распространения фронтов BS и PS отличаются (разница позиционных углов  $\Delta PA_C \approx 4^\circ$ ). Положение фронта PS в момент



**Рис. 8.** (а) — Всплеск радиоизлучения II типа 13 июня 2010 г. на фундаментальной частоте  $F$  и второй гармонике  $H$  по данным радиоспектрографов HIRAS, Learmonth, San Vito. Каждая из частот расщеплена на две близкие частоты, различающиеся на величину  $\Delta f = f_2 - f_1 \ll F, H$ . (б) — Распределение  $N(R)$  из [15]. Стрелками отмечены рассчитанные значения концентрации, соответствующие измеренным компонентам расщепления  $f_1$  и  $f_2$  второй гармоники  $H$  для двух последовательных моментов времени 05:38:10 UT и 05:39:50 UT. (в) — Измеренные положения фронтов BS и PS (светлые и темные кружки) в зависимости от времени (из рис. 6а). Жирная сплошная и штриховая кривые — рассчитанные по распределению концентрации из [15] зависимости  $f(R)$  для частот  $f_1$  и  $f_2$  расщепления второй гармоники  $H$ .

05:40:08 UT показано на рис. 7г. вертикальной штриховой линией.

#### 4. СВЯЗЬ ВЗРЫВНОЙ И ПОРШНЕВОЙ УДАРНЫХ ВОЛН СО ВСПЛЕСКОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ II ТИПА

На радиоспектрографах регистрируется всплеск радиоизлучения II типа — дрейф излучения от частоты  $\approx 250$  МГц до частоты  $\approx 50$  МГц на интервале времени 15 мин (05:37 Т–05:52 UT). Наблюдается излучение на основной частоте  $F$  и вторая гармоника  $H$  (рис. 8а). Излучение на  $H$  существенно интенсивнее излучения на  $F$ . Обе гармоники показывают расщепление на две компоненты  $f_1$  и  $f_2$  с отношением частот  $f_2/f_1 \approx 1.26 \pm 0.03$ .

Используя графики радиоизлучения для второй гармоники  $H$  и соотношение между плазменной

частотой и концентрацией  $N[\text{см}^{-3}] = (f[\text{МГц}]/9 \times 10^{-3})^2$ , можно построить зависимость  $f(R)$ , полагая, что  $N(R)$  удовлетворяет распределению из [15] в виде  $N = N_0 \times 10^{4.32 R_\odot/r}$ , где  $N_0 = 4.2 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ . График распределения  $N(R)$  приведен на рис. 8б, где стрелками отмечены рассчитанные значения концентрации, соответствующие измеренным компонентам расщепления  $f_2$  и  $f_1$  второй гармоники  $H$  для двух последовательных моментов времени 05:38:10 UT и 05:39:50 UT. Непосредственно рассчитанные зависимости  $f(R)$  для второй гармоники  $H$  показаны на рис. 8в жирной сплошной (компонента  $f_1$ ) и штриховой (компонента  $f_2$ ) кривыми. Измеренные положения фронтов BS и PS, показанные на рис. 8а, нанесены на рис. 8в соответственно светлыми и темными кружками.

Можно предположить, что наблюдаемое расщепление радиоизлучения связано с двумя близ-

ко расположенными фронтами BS и PS, двигающимися с примерно равными скоростями. Такое различие в  $N$  вполне может быть обеспечено небольшим отличием в направлениях распространения фронтов BS и PS, которое, как уже упоминалось выше, составляет около  $\Delta\text{РА}_C \approx 4^\circ$ . Это связано с тем, что распространение фронтов BS и PS происходит вблизи пояса стримеров, т.е. квазистационарного “медленного” солнечного ветра [16]. Указанная неоднородность концентрации пояса стримеров вдоль позиционного угла РА (долготы) является вполне типичной вследствие существования лучевой структуры [17].

В заключение следует отметить, что нельзя полностью исключить возможность того, что наблюдаемые фронты PS и BS являются различными частями единой ударной волны, которые распространяются в направлениях с различными значениями концентрации. Однако в пользу версии того, что это, скорее, взрывная и поршневая ударные волны могут свидетельствовать следующие аргументы:

а) взрывная волна должна распространяться впереди поршневой волны, имея на начальном этапе большую скорость, как это и наблюдается в наблюдениях;

б) оба типа наблюдаемых ударных волн имеют по широте ограниченный фронт ( $\sim 20^\circ$  по углу  $\alpha$ ); при этом направления их распространения несколько отличаются (по позиционному углу на  $\Delta\text{РА}_C \approx 4^\circ$ ), вследствие чего их фронты если и перекрываются по позиционному углу, то лишь частично.

## 5. ВЫВОДЫ

1. В событии 13 июня 2010 г. на основе анализа данных инструмента AIA/SDO (канал 193 Å) удалось одновременно зарегистрировать и измерить фронты двух различных ударных волн. Угловой размер каждого из этих фронтов вдоль долготы относительно центра КВМ составил около  $20^\circ$ , а направления их распространения отличались по позиционному углу на  $\approx 4^\circ$ .

2. Более быстрый фронт, названный взрывной ударной волной, опережал фронт другой, названной поршневой ударной волной, на  $\Delta R \approx (0.02-0.03) R_\odot$  и имел максимальную начальную скорость  $V_B \approx 850 \text{ км с}^{-1}$  (у поршневой  $V_P \approx 700 \text{ км с}^{-1}$ ).

3. Появление и движение этих ударных волн сопровождалось всплеском радиоизлучения II типа на фундаментальной частоте  $F$  и второй гармонике  $H$ . Каждая из частот была расщеплена на две близкие частоты  $f_1$  и  $f_2$ , различающиеся на величину  $\Delta f = f_2 - f_1 \ll F, H$ .

4. На основе проведенного анализа был сделан вывод о том, что наблюдаемое частотное расщепление  $\Delta f$  радиоизлучения II типа может быть результатом одновременного распространения поршневой и взрывной ударных волн с различными скоростями в несколько разных направлениях, которые отличаются значениями концентрации корональной плазмы примерно в 1.2 раза.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 13-02-00202-а). Авторы благодарят команды всех инструментов (AIA/SDO, радиоспектрографы HIRAS, Learmonth и San Vito), данные которых использовались в этой работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Gopalswamy, W. T. Thompson, J. M. Davila, M. L. Kaiser, S. Yashiro, P. Mäkelä, G. Michalek, J.-L. Bougeret, and R. A. Howard, *Solar Phys.* **259**, 277 (2009).
2. Z. Kuncic, I. H. Cairns, S. Knock, and P. A. Robinson, *Geophys. Res. Lett.* **29**(8), 2-1-4 (2002).
3. D. J. McLean, *Proc. Astron. Soc. Austral.* **1**, 47 (1967).
4. G. T. Mann, H.-T. Clafien, and H. Aurafi, *Astron. and Astrophys.* **295**, 775 (1994).
5. B. Vrsnak, H. Aurass, J. Magdalenic, and N. Gopalswamy, *Astron. and Astrophys.* **377**, 321 (2001).
6. M. V. Eselevich and V. G. Eselevich, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L22105 2008.
7. V. G. Eselevich and M. V. Eselevich, *Astrophys. J.* **761**, 68 (2012).
8. I. Zimovets, N. Vilmer, A. C.-L. Chian, I. Sharykin, and A. Struminsky *Astron. and Astrophys.* **547**, A6 (2012).
9. P. Zucca, M. Pick, P. Demoulin, A. Kerdraon, A. Lecacheux, and P. T. Gallagher, *Astrophys. J.* **795**, 68 (2014).
10. S. D. Bale, M. J. Reiner, J. -L. Bougeret, M. L. Kaiser, S. Krucker, D. E. Larson, and R. P. Lin, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 1573 (1999).
11. M. Pulupa and S. D. Bale, *Astrophys. J.* **676**, 1330 (2008).
12. В. Г. Еселевич, М. В. Еселевич, И. В. Зимовец *Астрон. журн.* **90**, 166 (2013).
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 (Berlin: Springer, 1997), p. 192.

14. J. R. Lemen, J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, C. Chou, J. F. Drake, D. W. Duncan, Ch. G. Edwards, F. M. Friedlaender, G. F. Heyman, N. E. Hurlburt, N. L. Katz, G. D. Kushner, M. Levay, R. W. Lindgren, D. P. Mathur, E. L. McFeaters, S. Mitchell, R. A. Rehse, C. J. Schrijver, L. A. Springer, R. A. Stern, Th. D. Tarbell, J.-P. Wuelser, C. J. Wolfson, C. Yanari, J. A. Bookbinder, P. N. Cheimets, D. Caldwell, E. E. Deluca, R. Gates, L. Golub, S. Park, W. A. Podgorski, R. I. Bush, Ph. H. Scherrer, M. A. Gummin, P. Smith, G. Aufer, P. Jerram, P. Pool, R. Soufli, D. L. Windt, S. Beardsley, M. Clapp, J. Lang, and N. Waltham, *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
15. G. Newkirk, Jr., *Astrophys. J.* **133**, 983 (1961).
16. V. G. Eselevich, in: *Exploring the Solar Wind*, ed. M. Lazar, (Croatia: INTECH, 2012), p. 3.
17. M. Eselevich and V. Eselevich, *Solar Phys.* **235**, 331 (2006).