

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 523.98



Егоров Ярослав Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ
КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ И СВЯЗАННЫХ С
НИМИ УДАРНЫХ ВОЛН**

Специальность 01.03.03 —
«Физика Солнца»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Файнштейн В.Г.

Иркутск – 2014

Содержание

Введение	4
1 Исследование формирования и начальной стадии движения КВМ по данным с высоким временным и пространственным разрешением . . .	16
1.1 Методы исследования	17
1.1.1 Методы предварительной обработки изображений	17
1.1.2 Методы анализа кинематики КВМ	19
1.1.3 Методы определения геометрических параметров КВМ.	20
1.2 Отбор событий для анализа	21
1.3 Морфологическая и физическая картина формирования, а также особенности кинематики КВМ, связанных с эруптивными протуберанцами или эмиссионными петлями	22
1.3.1 КВМ 13 июня 2010 года.	22
1.3.2 КВМ 7 июня 2011 года.	26
1.3.3 КВМ 8 марта 2011 года.	29
1.3.4 КВМ 29 июня 2011 года.	33
1.4 О возможных механизмах эрупции протуберанцев	38
1.5 О связи эрупции волокна (протуберанца) с солнечными вспышками	41
1.6 Изменение геометрических характеристик КВМ в зависимости от времени.	43
1.7 Основные результаты исследования, представленные в Главе 1.	46
2 Исследование формирования и распространения ударных волн, связанных с КВМ, по данным с высоким временным и пространственным разрешением	48
2.1 Методы определения ударных волн по данным с высоким временным и пространственным разрешением	49
2.2 Отбор событий для анализа	51
2.3 Результаты исследования распространения ударных волн, связанных с КВМ, и их природы по данным с высоким временным и пространственным разрешением	52
2.4 Основные результаты исследования, представленные в Главе 2.	62
3 Характеристики КВМ и связанной с ним ударной волны в трехмерном пространстве	63
3.1 Метод определения трехмерных характеристик КВМ. Новый подход: для быстрых КВМ отдельно определяются трехмерные параметры тела КВМ и связанных ударных волн.	64
3.2 Оценка точности метода.	67
3.3 Результаты исследования динамики трехмерных параметров КВМ и связанных с ними ударных волн	71

3.4	Применение метода “Ice-stream cone” в исследовании геоэффективного события 18 ноября 2003 года.	75
3.5	Применение метода “Ice-stream cone” для измерения магнитного поля в солнечной короне вдоль произвольного направления модифицированным методом Goralswamy and Yashiro (2011)	77
3.6	Основные результаты исследования, представленные в Главе 3.	79
	Заключение	80
	Список рисунков	89
	Литература	90

Введение

Диссертация посвящена исследованию корональных выбросов массы (КВМ) и связанных с ними ударных волн. КВМ представляют собой сгустки плазмы и магнитного поля, которые время от времени выбрасываются из короны Солнца в межпланетное пространство. Уже несколько десятилетий они являются объектом интенсивных исследований [1,2]. Результаты таких исследований имеют научную и практическую ценность. С научной точки зрения изучение КВМ позволяет ответить на важные вопросы физики Солнца, которые касаются накопления и быстрого высвобождения энергии, сопровождающих возникновение КВМ, а также закономерностей выноса в межпланетное пространство значительного количества солнечного вещества и магнитного поля. Практическая значимость исследований КВМ определяется ролью выбросов массы в космической погоде. Воздействие некоторых КВМ и/или связанных с ними ударных волн на магнитосферу Земли может приводить к возникновению в околоземном пространстве геомагнитных бурь, в том числе самых сильных [3, 4]. В свою очередь, геомагнитные бури могут оказывать негативное воздействие на различные элементы техносферы и на биосферу.

Регулярные наблюдения КВМ стали возможны с использованием коронографов на космических аппаратах. Коронографы регистрируют рассеянное на свободных электронах корональной плазмы фотосферное излучение (Томсоновское рассеяние). Структуры короны с повышенной плотностью плазмы выглядят в поле зрения коронографа более яркими. КВМ являются для короны сильными возмущениями с повышенной плотностью, поэтому оказываются доступными для наблюдений коронографами. Первые коронографические наблюдения КВМ были произведены телескопом, установленным на борту космического аппарата OSO-7 в начале семидесятых годов прошлого столетия [5]. Затем наблюдения КВМ продолжились с использованием коронографов на борту космической станции Skylab в 1973 – 1974г.г. [6], P78-1 в 1979 – 1985г.г. и SMM в 1980; 1984 – 1989 [7]. В настоящее время сведения о КВМ получаются с использованием 2-х коронографов LASCO C2 и C3 [8], установленных на борту космического аппарата SOHO, а также коронографов COR1 и COR2 на борту каждого из двух космических аппаратов STEREO A, B [9].

КВМ наблюдаются и с помощью наземных коронографов. По наблюдениям короны в белом свете выбросы массы регистрируются в поле зрения MarkIV К-коронометра (Mauna Loa Solar Observatory (MLSO) [10]. КВМ были также зарегистрированы в поле зрения наземных коронографов, наблюдающих корону в зеленой линии [11].

Помимо наблюдений в белом свете и в отдельных линиях в видимом спектре коронального излучения, в нижней короне КВМ удается зарегистрировать в рентгеновском диапазоне спектра, в радиодиапазоне, а также в спектральном диапазоне крайнего ультрафиолета. Изображения КВМ в мягком рентгеновском излучении (0.6-6 нм) получают с помощью телескопов SXI [12] на борту космических аппаратов GOES. В различных участках спектра в области крайнего ультрафиолета КВМ регистрируются инструментами EIT на борту космического аппарата SOHO [13], EUVI на борту двух аппаратов STEREO [14], AIA на борту SDO [15] и SWAP на борту PROBA2 [16–18].

И, наконец, отметим, что в последнее десятилетие появилась возможность регистрировать КВМ в межпланетном пространстве с помощью космического аппарата Solar Mass

Ejection Imager (SMEI) [19] и инструментов Heliospheric Imagers (HIs) на борту аппаратов STEREO A, B. [20]. На Рис. 1 приведены примеры наблюдения КВМ в различных спектральных диапазонах и с помощью различных инструментов.

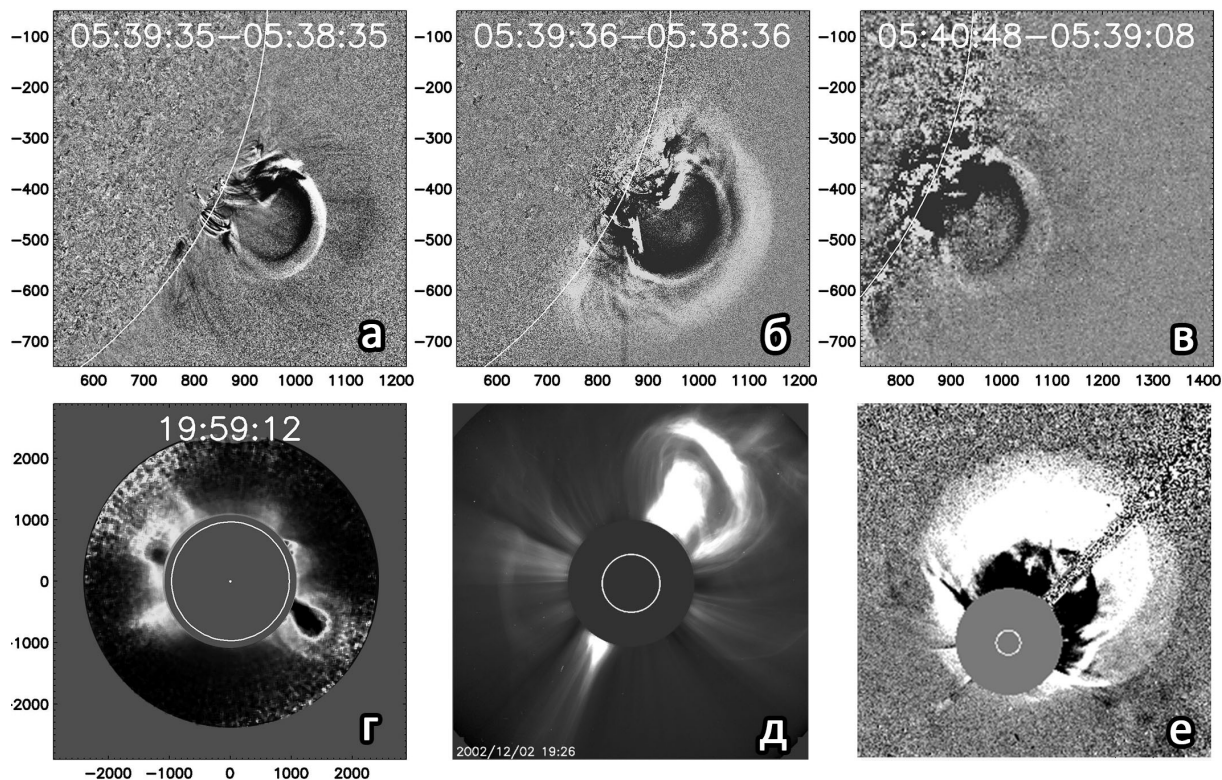


Рисунок 1: Примеры КВМ в поле зрения разных инструментов. а- КВМ в спектральной линии 171 Å инструмента SDO/AIA. б - КВМ в спектральной линии 211 Å инструмента SDO/AIA. в - КВМ в поле зрения инструмента SWAP/PROBA2. г - КВМ в поле зрения инструмента Mark IV. д - КВМ в поле зрения инструмента LASCO/C2. На рисунке видна трехчастная структура КВМ (яркое ядро, темная полость и яркая фронтальная часть.) е - гало КВМ, окруженный диффузной областью - ударной волной. Рисунки (д) и (е) взяты с ресурса http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list.

Для КВМ характерно разнообразие наблюдаемых форм и структуры, но значительная часть выбросов массы по данным коронографов имеет структуру, состоящую из трех частей: внешней области повышенной яркости – фронтальной структуры, следующей за ней темной полости (cavity в англоязычной литературе) и, наконец, яркого ядра [21], Рис. 1(д). Считается, что ядро – это эруптивный протуберанец [21]. В то же время, недавно появились сведения, что ядро в некоторых КВМ может иметь и другую природу [22]. В зависимости от наблюдаемых геометрических особенностей КВМ выделяют лимбовые КВМ, оси которых находятся вблизи плоскости неба, и корональные выбросы массы типа гало (ГКВМ), регистрируемые как области повышенной яркости, полностью охватывающие в плоскости неба искусственную луну коронографа и расширяющиеся во все стороны в направлении от Солнца. Такие КВМ называют еще полными гало КВМ. Многие ГКВМ движутся под относительно небольшими углами к оси Солнце-Земля. Они могут двигаться либо по направлению к Земле (фронтальные КВМ), либо в противоположном направлении, в зависимости от того, где находятся их источники: на видимой или на обратной стороне Солнца. ГКВМ составляют примерно 4% от всех наблюдаемых выбросов массы.

ГКВМ характеризуются не только наблюдательными особенностями, но и играют особую роль в космической погоде. ГКВМ составляют наиболее геоэффективную группу КВМ [23]. Средняя скорость ГКВМ составляет примерно 1090 км/с, что более чем в 2 раза больше средней скорости всех КВМ [23]. Их угловой размер, определяемый с помощью различных 3-х мерных моделей выбросов массы, примерно в 2 раза больше среднего углового размера всех КВМ [24]. Рассматривают два механизма формирования ГКВМ. В одном случае КВМ, по мере удаления от поверхности Солнца, увеличивает свои поперечные размеры, и, двигаясь вдоль направления вблизи оси Солнце – Земля, на определенном расстоянии будет иметь поперечный размер в проекции на плоскость неба, превышающий размер искусственной Луны [23]. Второй механизм формирования ГКВМ «работает» даже для выбросов массы, источники которых находятся вблизи лимба, а сами ГКВМ движутся под большим углом к оси Солнце-Земля. В этом случае свечение, охватывающее полностью луну коронографа, частично формируется проекцией КВМ на плоскость неба, а частично волной, возникающей в области источника ГКВМ и распространяющейся в сторону противоположного лимба. Это могут быть так называемые EIT (или EUVI) волны (см. ниже), или ударные волны, сопровождающие КВМ. Заметим, что ГКВМ по сути своей такие же, как лимбовые выбросы массы. А их особенные характеристики связаны с тем, что происходит своеобразный отбор выбросов массы по характеристикам для того, чтобы в поле зрения коронографа возник КВМ типа гало. Например, узкие КВМ с угловым размером меньше $< 30^\circ$ хорошо наблюдаются в поле зрения существующих коронографов в тех случаях, когда они оказываются лимбовыми. А превращение таких выбросов, летящих под небольшим углом к оси Солнце-Земля, в ГКВМ возможно лишь при столь большом их удалении от поверхности Солнца, что из-за сильного уменьшения плотности в них они становятся «невидимыми» в поле зрения коронографов. Таким образом, в поле зрения современных коронографов выбросы массы будут наблюдаться в виде ГКВМ лишь в том случае, если у них будет большой угловой размер.

Различные физические и геометрические параметры КВМ варьируются в широком диапазоне. Скорость КВМ в поле зрения коронографа оказывается в пределах от десятков км/с до более 3000 км/с. Масса КВМ варьируется в диапазоне от 10^{10} до 3×10^{13} кг. Кинетическая энергия КВМ лежит в диапазоне от 10^{20} до 10^{25} Дж. Концентрация электронов во фронтальной структуре вблизи Солнца составляет от 10^{14} до 10^{15} м $^{-3}$ и по мере движения КВМ быстро уменьшается с расстоянием [23,25]. Считается, что КВМ является много температурной структурой. В нем обнаруживаются участки плазмы с $T_e \sim 2 \times 10^6$ К, а также $T_e \sim 10^7$ К. Исследователи отмечали присутствие в КВМ областей плазмы с температурой 3×10^4 - 3×10^5 К. Температура ядра (волокна) на начальном этапе движения КВМ оценивается $\sim 8 \times 10^3$ К, а его плотность примерно на три порядка выше плотности фронтальной структуры. Угловой размер КВМ в поле зрения бортовых коронографов варьируется от $\sim 10^\circ$ до 120° . Здесь в качестве верхней границы углового размера взят условно определенный минимальный размер КВМ типа полу гало. В то же время есть основание считать, что максимальный угловой размер КВМ может достигать 150° и более. Средние значения параметров КВМ за период 1996 – 2007 г.г. по данным LASCO составляют ((Гополсвами и др. 2009а Earth Moon Planet): скорости – 475 км/с (для всех зарегистрированных КВМ), массы – 3.5×10^{11} кг (за период 1996 – июнь 2006 г.г.), энергии 2.9×10^{22} Дж (за период 1996 – июнь 2006 г.г.), ускорения $a = - 0.015 (V - 466)$, м/с $^{-2}$, где V скорость КВМ в км/с, углового размера – 44° (без учета ГКВМ).

Энергия КВМ складывается из трех составляющих: кинетическая, магнитная и потенциальная энергия в поле тяжести Солнца. Кинетическая энергия довольно легко определяется из наблюдений КВМ коронографами, т.к. массу и скорость КВМ можно оценить или измерить. Магнитная энергия в основном оценивается по наблюдениям КВМ на орбите Земли в предположении, что магнитный поток в КВМ по мере его распространения

между Солнцем и Землей не меняется. И, наконец, зная массу КВМ (для ее нахождения существуют различные методы) и положение КВМ, можно без труда оценить потенциальную гравитационную энергию выброса. Оказалось, что для медленных КВМ эти три вида энергии КВМ близки, а для быстрых КВМ преобладает кинетическая энергия выброса.

В отдельную группу выбросов массы выделяют так называемые "узкие" КВМ с угловым размером $< 15^\circ$ [26]. Средняя скорость таких КВМ практически не отличается от классических. В работе [26] было показано, что источник большинства узких КВМ располагался в местах резких изгибов нейтральной линии.

Завершая обсуждение свойств КВМ, отметим, что частота появления КВМ в поле зрения коронографа зависит от чувствительности коронографа и меняется в цикле солнечной активности. В период 1996 – 2007 г.г. по данным LASCO усредненная за кэррингтоновский оборот частота появления выбросов массы составила в минимуме активности (1996 г.) ≈ 0.5 КВМ/сутки, в максимуме активности и в начале спада активности (1999 г. – 2002 г.) $\approx (5.2 - 6.6)$ КВМ/сутки [27]. В то же время, в отдельные сутки может регистрироваться больше КВМ, чем получено при усреднении за кэррингтоновский оборот. С другой стороны, незарегистрированными могут оказаться узкие КВМ, летящие под небольшим углом к оси Солнце – Земля (см. обсуждение этого вопроса выше).

Отметим два крупномасштабных явления, которые могут сопровождать КВМ: корональные «потемнения» (или dimming в англоязычной литературе) и так называемые EIT волны (в последнее время используют другое название этих волн – EUV волны или корональные волны) [1]. Корональные потемнения – это области пониженной яркости, регистрируемые на изображениях Солнца в рентгеновском диапазоне и в крайнем ультрафиолете в окрестности места возникновения КВМ и в близкие к началу эрупции выброса массы моменты времени. Они наблюдаются в виде нескольких отдельных темных участков или одного большого темного участка. Предполагается, что корональные потемнения возникают вследствие ухода (эвакуации) из некоторых участков короны части находившегося там вещества, что приводит к уменьшению в них плотности плазмы, а, значит, и к уменьшению яркости в этих участках [28]. Рассматривалась и другая возможность потемнения короны: уменьшение температуры в таких участках короны, что приводит к уменьшению свечения короны в линиях, формирующихся при определенных температурах (например, излучение в канале 19.5 нм формируется в плазме с $T \sim 1.6 \times 10^6$ К). Но в последнее время эту интерпретацию появления потемнений стали отвергать [29]. Есть точка зрения, согласно которой корональные потемнения – это основания «ног» КВМ, которые, по мере удаления КВМ от поверхности Солнца, вытягиваются, что и приводит к уменьшению в них плотности плазмы [29]. В настоящее время появились сведения, что эти потемнения регистрируются в хромосфере и даже фотосфере, а также проникают высоко в корону [30].

EIT (EUV) волны – возмущения, распространяющиеся во все стороны от места эрупции КВМ и связанной с ним вспышки или от места вспышки, которая может быть и не связана с КВМ [31]. Эти волны обычно имеют вид диффузной кольцевой структуры вокруг источника КВМ. Скорость таких волн варьируется в пределах $\sim 200-400$ км/с [32]. За фронтом этих волн часто наблюдается корональное потемнение (dimming). На распространение таких волн влияют различные неоднородности магнитного поля: корональные дыры, активные области и т.д. [33]. Это может приводить к пространственному искажению фронта, его отражению от неоднородностей и т.д. Природа этих волн окончательно невыяснена и является предметом интенсивных дискуссий (см., например, обзор [34]).

Корональные выбросы массы тесно связаны с другими формами солнечной активности: вспышками и эруптивными волокнами. Уже первые исследования КВМ обнаружили существование сильной связи между появлением выброса массы и эрупцией волокна (протуберанца). В работе [35] показано, что $\approx 50\%$ КВМ, связанных с эрупцией протуберанца

(ЭП) и/или со вспышками, связаны только с ЭП, а $\approx 70\%$ рассмотренных авторами КВМ связаны с ЭП (со вспышками или без вспышек). В этой же работе установлено, что $\approx 40\%$ КВМ связаны со вспышками. При этом сделан вывод, что КВМ, связанные со вспышками, в среднем, более быстрые, чем связанные только с ЭП. Аналогичный результат, касающийся скорости КВМ, был получен в работе [ссылка]. В тоже время заметим, что и современные исследования показывают, что многие выбросы массы не удается связать с эруптивными волокнами [36].

Burkerpile и др. (2004) [37] и Vršnak и др. (2005) [38] обнаружили, что скорость и кинетическая энергия КВМ коррелируют с максимумом потока мягкого рентгеновского излучения $I_{SXR}(t)$ из области связанной вспышки. Также установлено, что максимум скорости КВМ коррелирует с полной энергией ускоренных во вспышке электронов [39]. Обнаружено, что возрастание со временем скорости многих КВМ синхронизовано с изменением $I_{SXR}(t)$ из области вспышки [40–45]. Bein и др. (2012) [36] установили, что КВМ, связанные со вспышками, характеризуются, в среднем, большими максимумами и меньшими длительностями ускорения, а также возникают на меньших высотах и на меньших высотах достигают максимума скорости. В работе [46] сделан вывод, что существует сильная корреляция между параметрами вспышек с большой длительностью нарастания $I_{SXR}(t)$ (LDE вспышки) и характеристиками КВМ. Temmer и др. [47, 48] показали, что временной профиль основного ускорения $a(t)$ КВМ синхронизован с профилем потока жесткого рентгеновского излучения $I_{HXR}(t)$, полученным по данным Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI; [49]). A Patsourakos и др. [44] продемонстрировали близкую зависимость между ускорением $a(t)$ и $dI_{SXR}(t)/dt$ в течение импульсной фазы вспышки, поскольку в соответствии с эффектом Neupert [50] зависимость $dI_{SXR}(t)/dt$, является аналогом интенсивности жесткого рентгеновского излучения $I_{HXR}(t)$. Сегодня принято считать, что вспышка и КВМ есть разные составляющие единого явления, и соответственно, должно описываться единой моделью, известной как "стандартная" модель вспышки или CSHKP модель (по первым буквам фамилий авторов Carmichael 1964; Sturrock 1966; Hirayama 1974; Kopp & Pneuman 1976) [51–53].

В последние 10 лет выполнено большое количество работ, в которых по данным различных инструментов изучалась кинематика КВМ сразу после их формирования [40–42, 44, 47, 48, 54, 55]. Zhang и др. [41] сделали вывод, что движение КВМ можно разбить на три стадии: (i) начальная стадия, когда скорость КВМ медленно нарастает, (ii) фаза основного ускорения (до достижения скоростью КВМ максимального значения), которая может длиться от нескольких минут до нескольких часов, и (iii) фаза спокойного распространения с приблизительно постоянной или медленно меняющейся скоростью. В то же время, согласно [44, 45, 47, 48, 55] временной профиль скорости многих КВМ может быть сложнее, чем обсуждавшийся в работе [41]. После достижения максимума, скорость КВМ может быстро уменьшиться (иногда на несколько сотен км/с), и лишь затем наступает стадия спокойного распространения выброса массы с относительно медленным изменением скорости.

Фундаментальной проблемой солнечной физики является вопрос о том, как возникают КВМ. Предложено несколько теоретических моделей, описывающих инициацию корональных выбросов массы. Эти модели описывают различные этапы возникновения КВМ. Но первый вопрос, на который необходимо дать ответ – откуда черпается энергия, обеспечивающая формирование и последующее движение с большой скоростью сгустков вещества с большой массой - КВМ. Сегодня считается, что эта энергия черпается из энергии магнитного поля. Такое представление опирается, в частности, на оценки плотности различных видов энергии в активной области. Согласно [56], плотность магнитной энергии составляет 40 Дж/м^3 при характерном значении магнитной индукции 10^{-2} Т , что более, чем на 3 – 4 порядка больше плотности тепловой, кинетической и потенциальной (в поле тяже-

сти Солнца) энергии. Общее представление о том, как возникают КВМ, сформулировано в работе [57]: «Большинство моделей инициации КВМ основано на предположении, что КВМ и вспышки черпают свою энергию из коронального магнитного поля. Токи, которые создаются в короне в результате всплытия потока и поверхностных течений, медленно эволюционируют к состоянию, где устойчивое равновесие становится невозможным. Когда это произойдет, поле эруптирует».

Прежде, чем перейти к обсуждению конкретных теоретических моделей генерации КВМ, выделим две проблемы, решение которых должны включать в себя наиболее адекватные наблюдениям модели: (1) должен быть указан механизм быстрого преобразования большого количества магнитной энергии в энергию КВМ; (2) модель должна «обходить» противоречие, отмеченное Aly и Sturrock: переход от первоначальной конфигурации КВМ как области с замкнутыми силовыми линиями, к конфигурации с протяженными участками открытых линий поля при удалении выброса массы от поверхности Солнца это переход от меньшей магнитной энергии к большей энергии.

Рассмотрим несколько теоретических моделей возникновения КВМ. Но прежде заметим, что, как отмечено в обзоре [1], большинство моделей, предназначенных для описания возникновения и последующего движения КВМ, недостаточно развиты для сравнения их с наблюдениями. «Многие из таких моделей не могут реалистично описать сложную эволюцию давления, магнитного поля и гравитационных сил, действующих на замкнутые корональные структуры». С точки зрения автора диссертации, большинство существующих моделей опирается, на довольно ограниченный набор экспериментальных сведений, недостаточный для решения поставленной задачи – объяснить возникновение КВМ. Webb и Howard [1] также отметили, что некоторые модели, весьма популярные совсем недавно, сегодня представляются нежизнеспособными. К таким моделям относится, например, модель, в которой триггером КВМ является вспышка. Тем не менее, создание теоретических моделей КВМ – важный этап в изучении механизмов формирования выбросов массы и особенностей их дальнейшего поступательного движения, т.к. модели позволяют лучше понять роль различных физических явлений в эволюции магнитного потока, приводящего к созданию КВМ. Сегодня активно обсуждается роль таких явлений, как всплытие нового магнитного потока и шир силовых линий магнитного потока поперек линии инверсии знака магнитного поля (нулевой или нейтральной линии фотосферного поля). Подробно о современных моделях возникновения КВМ говорится в обзорах и монографии [1, 2, 57].

Ниже мы кратко обсудим лишь некоторые модели возникновения корональных выбросов массы. Первый механизм образования КВМ, на который мы обратим внимание, это механизм обрыва связей (tether - cutting), [58] или аннулирование (уничтожение) магнитного потока (flux cancellation), [59–61]. Суть этой модели возникновения КВМ заключается в следующем. Пусть имеется аркада петель с большим широм. Это означает, что «ноги» петель, формирующих аркаду и расположенных по разные стороны от нейтральной линии фотосферного магнитного поля, смещены вдоль этой линии раздела полярностей поля в разные стороны. «Ноги» некоторых петель с противоположной полярностью поля могут оказаться рядом друг с другом и в этом месте могут возникнуть условия для магнитного пересоединения. В результате пересоединения в нескольких местах возникнет протяженный магнитоплазменный жгут, состоящий из навешивающихся вокруг оси жгута силовых линий магнитного поля (flux rope) и расположенный под маленьким углом к нейтральной линии поля. Такая структура может быть неустойчивой и начать двигаться вверх. При этом расположенные сверху внешние петли магнитного поля, у которых практически отсутствует шир, начнут под воздействием жгута вытягиваться вверх, формируя под жгутом токовый слой, в котором вследствие магнитного пересоединения происходит вспышка. Это приводит к росту полоидального поля вокруг жгута, что увеличивает силу, действующую на жгут вверх, а внизу образуется после вспышечная аркада.

Второй механизм описывается моделью магнитного «побега» (magnetic breakout model), [62]. В этой модели эрупция магнитного потока возникает в определенной конфигурации внешнего магнитного поля. Магнитная петлеобразная структура начинает двигаться вверх, сжимает вышележащие области плазмы и магнитного поля, в результате чего вследствие специфической конфигурации магнитного поля вверху возникают условия для возникновения магнитного пересоединения. В результате перестройки конфигурации поля в процессе пересоединения для медленно движущейся магнитной структуры пространство в пределах определенного диапазона высот оказывается свободным от поперечного магнитного поля, тормозящего движение магнитных петель снизу.

Одна из моделей рассматривает всплытие нового магнитного потока в качестве триггерного механизма формирования КВМ [63]. Идея этой модели возникла после того, как Feynman and Martin (1995) [64] обнаружили, что многим КВМ предшествует всплытие нового магнитного потока с ориентацией полярности, благоприятствующей магнитному пересоединению между всплывающим потоком и существующим до всплытия потока корональным полем внутри или снаружи канала волокна. Если новый поток возникает внутри канала волокна, то пересоединение с корональным полем приводит к уменьшению магнитного давления над каналом волокна, к последующему возникновению токового слоя над линией инверсии полярности коронального поля и последующей эрупцией существующего над каналом волокна магнитного жгута (flux rope). Если всплытие нового потока происходит вне канала волокна, то после пересоединения возникает область с искривленными силовыми линиями, натяжение которых приводит к движению области короны над магнитным жгутом, а вслед за этим начинает двигаться и сам магнитный жгут.

Еще один механизм возникновения КВМ – инжекция магнитного потока как триггерный механизм генерации КВМ. Пусть имеется магнитный жгут, находящийся в равновесии. В ряде работ было показано, что инжекция через торец жгута дополнительного тока, что эквивалентно инжекции нового полоидального поля, при определенных условиях приводит к неустойчивости жгута, который начинает двигаться вверх, достигая характерных для КВМ скоростей [65]. Этот процесс называют также тороидальной неустойчивостью [66].

И, наконец, отметим еще одну неустойчивость, которая может привести к эрупции скрученного магнитного жгута - изгибная неустойчивость (kink instability в англоязычной литературе) [67,68].

Можно ожидать прорывных результатов в изучении механизмов возникновения КВМ при использовании солнечных наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением. В ряде работ, использующих данные с высоким временным и пространственным разрешением, включая SDO/AIA, уже получены важные результаты, касающиеся возникновения КВМ. Авторы работы [69] пришли к выводу, что триггером вспышки и КВМ была винтовая изгибная неустойчивость (helical kink instability) жгута (flux rope), и ускорение выброса массы было обеспечено тороидальной неустойчивостью. В работе [45] на примере из шести КВМ описан процесс формирования КВМ, где эруптивный протуберанец или эмиссионная петля играет роль триггера возникновения КВМ. Эруптивный протуберанец (эмиссионная петля) возмущает вышележащие области короны, создавая движущиеся с разной скоростью петлеобразные структуры повышенной яркости. Сформированная фронтальная структура КВМ начинает быстрое движение в направлении от лимба после прихода к месту ее формирования движущихся внутренних петлеобразных структур. С другой стороны, согласно [70], формирование одного КВМ, не связанного с эрупцией волокна, происходит следующим образом. Примерно за 7 часов до появления КВМ возникает магнитоплазменный жгут, наблюдаемый первоначально в самой «горячем» канале SDO/AIA 131 Å. Далее жгут охлаждается и затем, вследствие дестабилизации, происходит его выброс - возникает КВМ. И, наконец, в работе [22] исследовано фор-

мирование быстрых импульсных КВМ, не связанных с эрупцией волокна. Сделан вывод, что КВМ формируется вследствие нарушения равновесия эмиссионных петель, наблюдаемых в спектральном диапазоне крайнего ультрафиолета.

Быстрые КВМ связаны с ударными волнами. Последние 10 лет были временем интенсивных коронографических и спектроскопических исследований таких ударных волн [71]. Считается, что ударная волна – это граница диффузной области в поле зрения инструментов SDO или коронографов, например, LASCO, окружающая (не всегда полностью) более яркое тело КВМ, Рис. 1(б,е). Но при этом скорость всех участков границы диффузной области, которые принимаются за ударную волну, должна превышать величину $V_{MS} + V_{SW}$. Здесь V_{MS} скорость быстрых магнитозвуковых волн, V_{SW} – скорость окружающего солнечного ветра, по которому распространяется ударная волна. Ударную волну можно выделить из распределения яркости вдоль прямой линии, пересекающей границу диффузной области. Если на границе диффузной области возникнет резкий скачок яркости, есть основание считать такой скачок ударной волной [72]. Здесь основная проблема заключается в том, что выделить такие скачки удается, как правило, в нескольких небольших по широте участках границы диффузной области. Отсутствие таких скачков на других участках границы диффузной области можно связать с тем, что шумовая амплитуда яркости на этих участках границы диффузной области сравнима или больше амплитуды ударной волны. Наличие ударных волн в короне определяется также по наблюдениям в некоторых линиях крайнего ультрафиолета, позволяющих оценить наличие скачков плотности, температуры и др. [73]. Считается также, что радио всплески II типа отражают распространение ударной волны, связанной с КВМ (Cliver et al., 1999; Gopalswamy et al., 2005) [74]. И, наконец, о наличии ударных волн, связанных с КВМ, можно судить по отклонению стримеров в широтном направлении и по распространению области повышенной яркости вдоль таких стримеров [75].

В настоящее время преобладающей является точка зрения, согласно которой ударные волны, связанные с КВМ, являются поршневыми волнами с телом КВМ в виде поршня. В то же время, в диссертации будет показано, что, по крайней мере, некоторые ударные волны, связанные с КВМ, являются взрывными. В работах [76–78] было показано, что на высотах $> 6 R_s$ ударные волны являются бесстолкновительными, а на высотах $< 6 R_s$ – столкновительным, в то же время в работе [79] установлено, что в поле зрения SDO/AIA до $\sim 1.5 R_s$ наблюдаются бесстолкновительные ударные волны. Это означает, что толщина ударной волны примерно равна характерной длине рассеяния заряженных частиц на возмущениях электрического и магнитного поля волн, существующих в короне. По наблюдениям ударных волн в поле зрения различных инструментов (SDO/AIA; LASCO C2 и C3) толщина ударной волны примерно равна величине пространственного разрешения, т.к. реальная толщина бесстолкновительной ударной волны во много раз меньше. Важным свойством ударных волн, связанных с КВМ, является то, что в них ускоряются до высоких энергий заряженные частицы (электроны, протоны и др.), потоки которых регистрируются на орбите Земли. Этот вывод опирается на тот факт, что наличие потоков высокоэнергичных частиц тесно связано с появлением быстрых КВМ [80].

Сделанный выше краткий обзор полученных с периода скайлэбовских наблюдений Солнца сведений о КВМ свидетельствует о большом прогрессе за 40 лет в нашем понимании свойств корональных выбросов массы, особенностей их движения и сопровождающих их физических процессов, связанных с выделением большого количества энергии за короткие промежутки времени. Тем не менее, на многие вопросы, касающиеся возникновения КВМ и их движения ответы получить до сих пор не удалось. Ниже мы отметим несколько нерешенных проблем, касающихся КВМ, сконцентрировав наше внимание на проблемах, на решение которых направлена диссертация. Выше уже отмечалось, что источником энергии КВМ является магнитная энергия замкнутых структур на Солнце, но

мы не знаем, что вызывает высвобождение этой энергии. Накопленная энергия высвобождается в виде ЭВ, КВМ, вспышки и других эруптивных явлений. В то же время, до сих пор нет количественного понимания того, как сложность магнитной конфигурации в источнике КВМ соотносится с энергией КВМ. Распознавание индикаторов накопления энергии - важный шаг в определении того, будет ли и когда эрупция КВМ. В течение фазы накопления энергии, наблюдаются разные небольшие эруптивные события, но сложно определить, что является предвестником КВМ, а что есть отдельное эруптивное событие. Мы также не знаем, как высвобожденная энергия распределяется между энергией вспышки и механической энергией КВМ. До сих пор неясно как происходят вспышки без КВМ и наоборот.

Несмотря на давно установленную формальную связь между эрупцией волокна, КВМ и вспышкой (т.е. на пространственную и временную близость этих событий, а в некоторых случаях на временную последовательность этих проявлений солнечной активности), нет исчерпывающих ответов на следующие вопросы. Какова роль эруптивного волокна (ЭВ) в процессе генерации КВМ? ЭВ и КВМ – это разные проявления единого процесса высвобождения свободной энергии магнитного поля? Или ЭВ – это предвестник формирования КВМ? Или ЭВ – это триггер коронального выброса массы? Аналогичные вопросы касаются связи вспышки с ЭВ и КВМ. Какова физическая связь между этими проявлениями солнечной активности?

Самые быстрые КВМ связаны с ударными волнами. Но как возникает такая ударная волна, остается невыясненным. Действительно ли на начальном этапе своего существования эта волна является поршневой с телом выброса массы в виде поршня? Или ударная волна возникает раньше окончательного формирования КВМ и по своей природе не является поршневой такого типа?

Оценка характеристик КВМ в трехмерном пространстве – важная задача, позволяющая определить направление движения КВМ, его 3D скорость, реальные угловые размеры в различных направлениях и другие характеристики. Это, в частности, важно для выяснения вопроса, будет ли конкретный КВМ воздействовать на магнитосферу Земли? Знание 3D скорости позволит более точно оценить время прихода КВМ на орбиту Земли. Для решения этой задачи предложено несколько методов: [81–83]. В тоже время до начала наших исследований не было сделано попыток оценить трехмерные характеристики отдельно для тела КВМ и связанной ударной волны.

Информация о свойствах КВМ и связанных с ними ударных волн может быть использована для решения различных прикладных задач. Недавно Gopalswamy et al. (2011) [84] предложили и протестировали метод определения величины магнитного поля в солнечной короне, используя сведения о характеристиках КВМ и связанных ударных волн. Это важная задача, т.к. регулярные измерения магнитного поля в короне не проводятся. В цитируемых работах были получены радиальные распределения магнитного поля в плоскости неба в медленном ветре. Представляет интерес усовершенствовать эту методику с целью нахождения распределений магнитного поля в произвольном радиальном направлении и в различных типах течений солнечного ветра (СВ): в быстрых и медленных потоках СВ.

Целью данной работы является (1) по многоволновым данным с высоким временным и пространственным разрешением исследовать формирование корональных выбросов массы, связанных с эруптивными волокнами; (2) изучить закономерности распространения и природу связанных с такими КВМ ударных волн; (3) исследовать закономерности движения быстрых КВМ различных типов и связанных с ними ударных волн в трехмерном пространстве

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методы и программное обеспечение для исследования формирования и движения КВМ, связанных с эруптивными волокнами, по данным инструментов SDO/AIA, PROBA2/SWAP, STEREO/EUVI, STEREO/COR1, MARK IV (MLSO).
2. Разработать метод и программное обеспечение для выделения ударных волн, связанных с КВМ, и исследования их кинематики на начальном этапе движения.
3. Разработать метод и программное обеспечение для нахождения в трехмерном пространстве геометрических и кинематических характеристик отдельно для тела КВМ и связанной с КВМ ударной волны.
4. Провести исследования, направленные на выполнение поставленных целей (1) –(3).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что эрупция протуберанца (или эмиссионной петли) приводит к возникновению последовательности движущихся вверх с различной скоростью петлеобразных структур и проявлению области короны – предвестника будущей фронтальной структуры.
2. Установлено, что возникновение КВМ, связанных с эрупцией протуберанца, завершается формированием фронтальной структуры выброса массы под воздействием внутренних возмущений или непосредственно эруптивного протуберанца (эмиссионной петли) на предвестника фронтальной структуры.
3. Обнаружено принципиальное различие характера движений тела КВМ и связанной с ним ударной волны в нижней короне. Сделан вывод о том, что ударные волны, связанные с КВМ, в нижней короне могут быть не поршневыми, а взрывными.
4. Впервые с помощью модели “Ice-cream cone” были найдены трехмерные характеристики отдельно для тела КВМ и связанной с ним ударной волны. Получены новые сведения об особенностях кинематики в трехмерном пространстве в короне отдельно для тела КВМ и связанной с ним ударной волны и расстояний между ними.

Научная новизна:

1. Впервые на основе анализа многоволновых данных с высоким временным и пространственным разрешением получена детальная картина формирования и движения КВМ, связанных с эруптивными волокнами или эруптивными эмиссионными петлями. Обнаружены отличительные особенности возникновения таких КВМ в конкретных случаях.
2. Впервые на основе анализа данных с высоким временным и пространственным разрешением и сопоставления с модельными расчетами показано, что ударные волны, связанные с КВМ и обнаруженные в нижней короне, могут быть взрывными.
3. Получены новые результаты, касающиеся свойств и кинематики тела КВМ и связанной ударной волны в трехмерном пространстве

Научная и практическая значимость

Полученные результаты расширяют наши знания о формировании КВМ, его связи с эруптивным протуберанцем и вспышкой. Предложенная морфологическая картина формирования КВМ полезна для сравнения с существующими теоретическими моделями.

Полученные наблюдательные факты дают материал для уточнения и улучшения таких моделей.

Регистрация ударных волн на ранних этапах ее появления позволяет выяснить природу ее образования и характер распространения. Изучение образования и распространения ударных волн является полезным в контексте генерации ею потоков геоэффективных солнечных энергичных частиц [85].

Применение усовершенствованного метода расчета параметров в трехмерном пространстве отдельно для тела КВМ и для ударной волны позволяет более точно определить положение и направление этих явлений в пространстве и их возможное время прибытия на орбиту Земли. Таким образом, этот метод может оказаться полезен для предсказания космической погоды.

Достоверность полученных результатов

Итоговые выводы и научные положения диссертационного исследования сформулированы на основе результатов расчетов, выполненных с помощью разработанных алгоритмов. Корректность методов обнаружения и определения характеристик КВМ подтверждается высокой степенью совпадения результатов расчётов с параметрами тестовых моделей. Результаты анализа кинематики КВМ согласуются с исследованиями, проведенными другими авторами.

Апробация работы.

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

1. «The Sun: from quiet to active: 2011, International Moscow workshop on solar physics» 29.08.2011 – 02. 09. 2011, Lebedev institute RAS, Moscow, 2011
2. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск, 19-24 сентября 2011 г.
3. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика-2011" (2-8 октября 2011 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН), 2011.
4. IX Российско-Монгольская конференции по астрономии и геофизике, 10-12 октября 2011 г., г. Иркутск, 2011.
5. III Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», г. Иркутск, Иркут гос. ун-т. , 22-24 ноября 2011 г.
6. Международная конференция «Физика Солнца и солнечно-земные связи», посвященная памяти Эвальда Рудольфовича Мустеля в связи с 100-летием со дня рождения. Научный, НИИ «КрАО» 5 – 10 сентября 2011 г.
7. 7-я конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 06-10 февраля 2012 г.
8. XIIth Hvar Astrophysical Colloquium 2012. The Sun and Heliosphere, Croatia, 2012.
9. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика-2012" (24-28 сентября 2012 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН).

10. 8-я конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 04-08 февраля 2013 г.
11. 2013 ILWS Workshop, Irkutsk, Russia, 24-28 June 2013
12. Международный симпозиум COSPAR "Космические магнитные поля: наследие А.Б. Северного Научно-исследовательский институт "Крымская астрофизическая обсерватория п. Научный, АР Крым, Украина, 2 - 6 сентября 2013 г.
13. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск, 9-11 сентября 2013 г.
14. Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвящённая 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова, г. Иркутск, 16 – 21 сентября 2013 г

а также на научных семинарах в ИСЗФ СО РАН.

Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, использовались при выполнении исследований по проекту СО РАН “Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца” номер гос. регистрации 01201281651, проекту №22.3 “Динамические процессы в плазме Солнца, солнечном ветре и магнитосфере планет” в рамках Программы Президиума РАН №22 “Фундаментальные проблемы исследований и освоений Солнечной системы”, а также при частичной поддержке гранта ГК № 02.740.11.0576 по ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”.

Личный вклад.

Автор принимал участие совместно с научным руководителем в постановке задач, анализе и интерпретации полученных результатов. Анализ наблюдательных данных, представленных в диссертации, проводился в процессе коллективной работы, в которой автор принимал непосредственное участие. Исследования, описанные в главах 1, 2 и 3, проводились совместно с соавторами, использовалось разработанное автором программное обеспечение.

Публикации.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 98 страницы. Список литературы содержит 158 наименования.

Глава 1

Исследование формирования и начальной стадии движения КВМ по данным с высоким временным и пространственным разрешением

С запуском космического аппарата SDO/AIA появилась возможность вести наблюдения за эруптивными процессами на Солнце по многоволновым данным с высоким временным и пространственным разрешением. Это позволяет выяснить важные детали формирования и движения корональных выбросов массы и связанных с ними ударных волн. В работе [22] по данным GOES/SXI, SOHO/EIT и TRACE показано, что быстрые импульсные КВМ, связанные с мощными вспышками, но не связанные с эруптивными волокнами, возникают в результате нарушения равновесия отдельных магнитоплазменных жгутов или нескольких жгутов (возможно, аркады петель), существующих в течение нескольких часов до начала эрупции. Kumar et al. (2012) [69] сделали вывод, что триггером КВМ и вспышки может быть изгибная неустойчивость в магнитном жгуте, и ускорение происходит в основном из-за тороидальной неустойчивости. Файнштейн и Егоров (2013) [86] по данным SDO и других космических аппаратов изучили возникновение 6 КВМ, связанных с эрупцией протуберанца или горячей эмиссионной петли, наблюдаемой в линиях крайнего ультрафиолета. Типичный процесс формирования рассмотренных КВМ выглядит следующим образом. Эруптивный протуберанец (эруптивная эмиссионная петля) возмущают вышележащие области короны. В результате этого над эруптивным протуберанцем возникают движущиеся с разной скоростью структуры повышенной яркости и, одновременно, выше выделяются несколько участков повышенной яркости, где в дальнейшем сформируется фронтальная структура КВМ. Эти участки в течение некоторого времени могут быть практически неподвижными, либо двигаться со скоростью, меньшей, чем скорость нижележащих структур. Фронтальная структура КВМ окончательно формируется и начинает быстро двигаться в направлении от лимба после соприкосновения с местом ее формирования движущихся внутренних структур. Согласно Qiu et al. (2007) [87], главная часть магнитной структуры жгута (КВМ) формируется в процессе связанной с КВМ вспышки. В то же время Patsourakos et al. (2013) [70] на примере одного КВМ по данным многоволновых наблюдений Солнца космическим аппаратом SDO показали, что магнитный жгут - основа будущего КВМ, возникает примерно за 7 часов до появления выброса массы, первоначально наблюдается в самом «горячем» канале (131 \AA) и сопровождается вспышкой, не связанной с КВМ. Далее магнитный жгут охлаждается и затем, вследствие дестабилизации, происходит его выброс, сопровождающийся связанной с КВМ вспышкой. Так возникает довольно быстрый (скорость $\sim 1000 \text{ км/с}$) КВМ.

Важным при исследовании механизмов генерации КВМ является выяснение связи выбросов массы с другими сопровождающими их видами солнечной активности. Показано, что максимум скорости КВМ коррелирует с полной энергией ускоренных во вспышке электронов [39]. Установлено, что возрастание скорости многих КВМ со временем синхронизовано с поведением интенсивности мягкого рентгеновского излучения $I_{SXR}(t)$ из области связанной вспышки [40–44, 86]. Wein et al. (2012) [36] показали, что КВМ, связанные со вспышками, характеризуются, в среднем, большими максимумами ускорения и меньшими длительностями ускорения. В работе [46] показано, что существует сильная корреляция между параметрами вспышек с большой длительностью фазы нарастания $I_{SXR}(t)$ («медленные» вспышки), с характеристиками КВМ. В работах [47, 48] сделан вывод, что временной профиль основного ускорения $a(t)$ КВМ синхронизирован с профилем интенсивности жесткого рентгеновского излучения $I_{HXR}(t)$ из связанной вспышки. Необходимым этапом на пути выяснения физических механизмов генерации КВМ является исследование кинематики и других свойств выбросов массы на начальной стадии их движения. Для многих КВМ с использованием данных различных инструментов, были получены временные профили скорости, ускорения и геометрических характеристик КВМ сразу после их возникновения [40–42, 44, 47, 48, 54, 55, 70, 86]. Эти сведения в той или иной степени отражают особенности формирования КВМ и должны учитываться при создании моделей возникновения выбросов массы, адекватных наблюдениям.

Несмотря на то, что за последние несколько десятилетий был достигнут большой прогресс в понимании эруптивных процессов, происходящих в короне Солнца [40–42, 44, 47, 48, 54, 55, 70, 86, 88–95], остается множество вопросов на которых нет исчерпывающих ответов. Одной из важных задач в изучении КВМ является исследование деталей и особенностей его формирования в нижней короне. С запуском космических аппаратов с высоким пространственным и временным разрешением стало возможным изучение КВМ на ранней стадии его развития на высотах до полутора радиусов Солнца.

В данной главе автор диссертации приводит результаты исследования особого класса корональных выбросов массы, связанных с эрупцией протуберанца и вспышкой с целью выяснения деталей формирования фронтальной структуры КВМ и ее связи с эрупцией протуберанца, а также сопоставления временных профилей скорости и ускорения КВМ и эруптивного протуберанца с временными профилями нарастания интенсивности мягкого и жесткого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки.

1.1 Методы исследования

В данном разделе описаны методы исследования формирования и начальной стадии движения КВМ, которые включают предварительную обработку изображений, особенности расчета кинематики КВМ и определение погрешности измерений, а также методику определения таких параметров КВМ как его угловой размер, нахождение траектории движения тела КВМ и отношение продольного размера тела КВМ к поперечному.

1.1.1 Методы предварительной обработки изображений

Как показал ряд исследований, максимум ускорения большинства КВМ приходится на расстояния, близкие $2 R_s$. Это значит, что формирование и начальная стадия движения КВМ происходят до выхода выбросов массы в поле зрения коронографов, и, следовательно, для изучения КВМ необходимо привлекать данные инструментов, наблюдающих Солнце в линиях крайнего ультрафиолета. Из наблюдений также известно, что импульсная фаза ускорения КВМ может длиться от нескольких минут до десятков минут. Поэтому для успешного изучения формирования и фазы начального движения КВМ необходимы

данные с высоким временным разрешением. А т.к. формирование КВМ характеризуется, как мы увидим ниже, различными мелкомасштабными деталями, то для изучения возникновения КВМ и его движения необходимы данные с высоким пространственным разрешением.

В последнее время был запущен ряд космических аппаратов с инструментами, удовлетворяющими таким требованиям: SWAP на борту европейского космического аппарата PROBA2 [16, 17] и комплекс инструментов AIA, установленный на борту SDO [15]. Инструменты SDO/AIA имеют несколько спектральных каналов, в которых регистрируются изображения Солнца с пространственным разрешением примерно 0.6 угловых секунды каждые 12 секунд. Это дает возможность изучить формирование КВМ не только с высоким временным разрешением, но и в разных температурных диапазонах. Инструмент SWAP/PROBA2 обладает худшими пространственными (3.16 угл.сек.) и временными (1-2 минуты) характеристиками, но большим по сравнению с инструментами AIA полем зрения (54 против 41 угловых минут), что может дать дополнительную информацию о кинематике КВМ на больших расстояниях от поверхности Солнца.

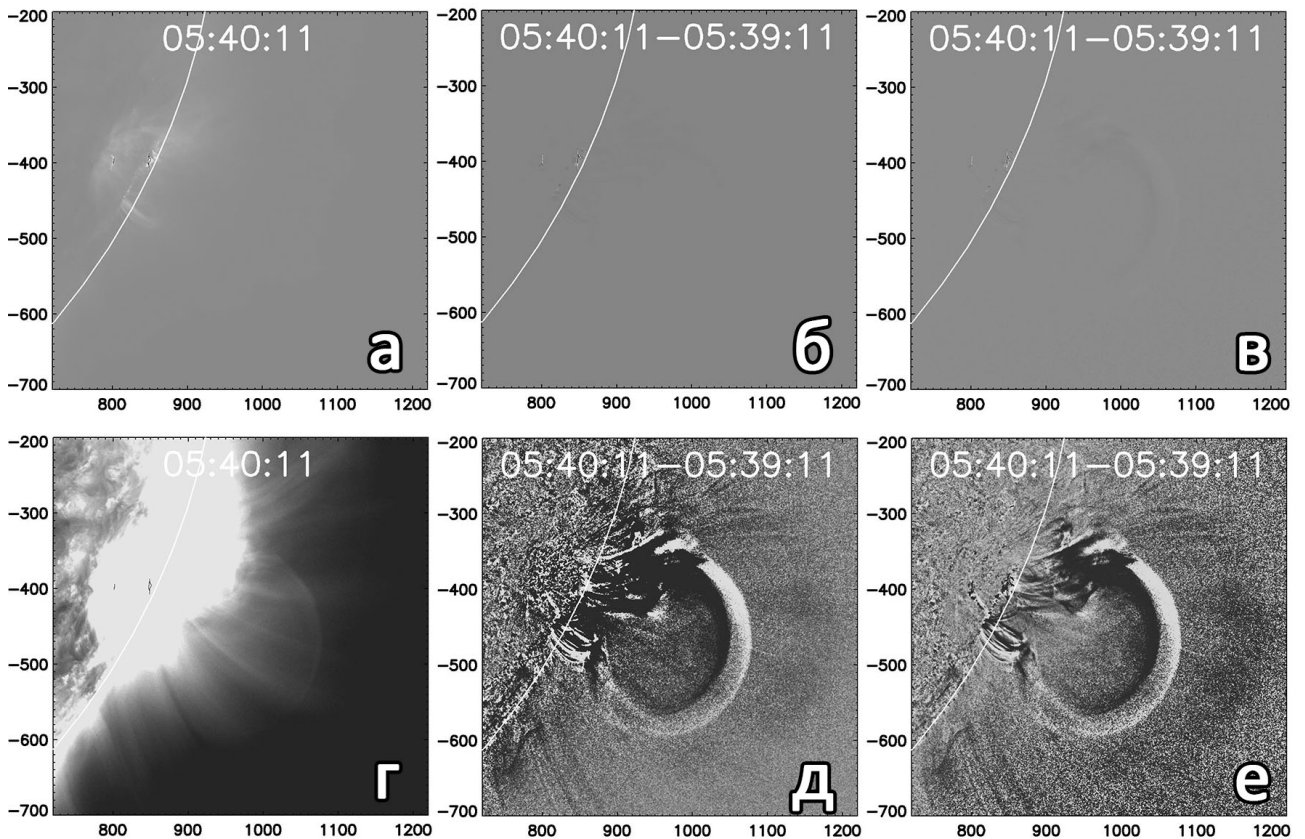


Рисунок 1.1: КВМ 13 июня 2010 года. Изображения в канале 171 Å по данным SDO/AIA. (а-в) - показаны изображения без предварительной обработки перед выводом на экран: оригинальное, разностное и разностное с делением на первый кадр временной серии. (г-е) - соответствующие изображения с предварительной обработкой перед выводом на экран.

Для изучения формирования и начальной стадии движения КВМ данные, полученные с инструментов SDO/AIA и SWAP/PROBA2 подвергались дополнительной обработке. Для более четкого выделения динамических структур, таких как КВМ и протуберанец, применялось вычитание изображений I , а также деление полученной разности на изображение в третий момент времени I_0 для усиления полезного сигнала. Эти действия можно представить следующей формулой:

$$I_j = \frac{I_j - I_{j-\Delta}}{I_0}$$

где I - изображение, j - текущий номер кадра временной серии, $j - \Delta$ - номер вычитаемого кадра, Δ - шаг вычитания, I_0 - первое изображение во временной серии.

Для каждого изученного события подбирался свой шаг вычитания, с учетом временного масштаба, на котором происходят значимые изменения в динамике КВМ или протуберанца. В среднем выбирался $\Delta = 5$, что соответствует временной разнице между изображениями 60 секунд.

Для некоторых событий время экспозиции от кадра к кадру может заметно различаться, что также учитывалось. Поэтому время экспозиции для каждого изображения временной серии делилось на время экспозиции первого кадра серии.

Отметим, что при делении одного кадра на другой может возникнуть ситуация деления на ноль или бесконечно малое число, что приведет к появлению недопустимых значений. Поэтому, после получения разностного изображения, производится поиск таких значений и присвоение им нуля.

При выводе изображения на экран, данные также подвергаются обработке. С помощью оценки гистограммы яркости, выводится только значимый диапазон данных, что позволяет увеличить отношение сигнал-шум.

Для изучения более поздней фазы движения КВМ использовались данные коронографов LASCO C2 и C3 [8], расположенных на космическом аппарате SOHO, а также коронографа Mark IV [10] наземной обсерватории Мауна Лоа (при изучении события 8 марта 2011 года), который обладает полем зрения примерно с 1.2 до 2.86 R_s , в то время как поле зрения LASCO C2 начинается примерно с 2 R_s . Это дает дополнительные точки на временном профиле положения тела КВМ при изучении его кинематики.

Предварительная обработка изображений инструментов LASCO C2 и C3 заключалась в получении разностного изображения, где в каждый момент времени вычитался первый кадр временной серии. При выводе изображения на экран применялись схожие методы обработки изображения, что и при использовании данных SDO/AIA и SWAP/PROBA2.

1.1.2 Методы анализа кинематики КВМ

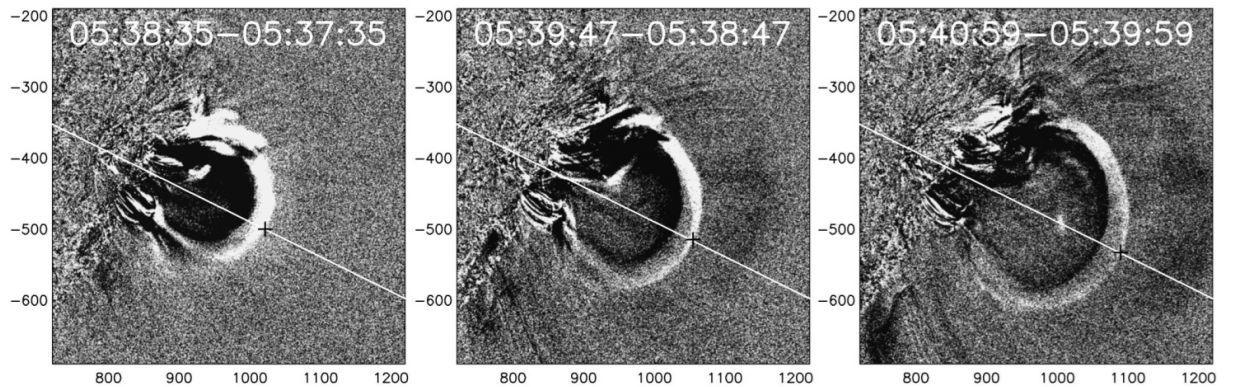


Рисунок 1.2: Определение положения фронтальной части КВМ вдоль выбранного направления (отмечено черным крестиком).

Для определения кинематики КВМ и протуберанцев использовались изображения инструментов SDO/AIA и SWAP/PROBA2, обработанные по методике, описанной в Разделе 1.1.1

В каждый момент времени вдоль выбранного направления определялись положения $S(t)$ фронта КВМ или протуберанца. Далее рассчитывалась скорость $V(t)$ по формуле:

$$V_i(t) = \frac{S_i(t) - S_{i-1}(t)}{t_i - t_{i-1}}$$

где i - текущий момент времени, $i-1$ - предыдущий момент времени. Найденному значению скорости присваивался момент времени $t = (t_i + t_{i-1})/2$. Погрешность измерения скорости рассчитывалась как среднеквадратичное отклонение измеренной скорости фронта КВМ от среднего значения при N измерениях ($N = \bar{5}, \bar{10}$).

Полученный набор скоростей аппроксимировался B-сплайнами [96] с учетом погрешности определения $V_i(t)$. В результате получалась гладкая функция $V(t)$. Ускорение КВМ находилось из соотношения $a(t) = dV(t)/dt$.

1.1.3 Методы определения геометрических параметров КВМ.

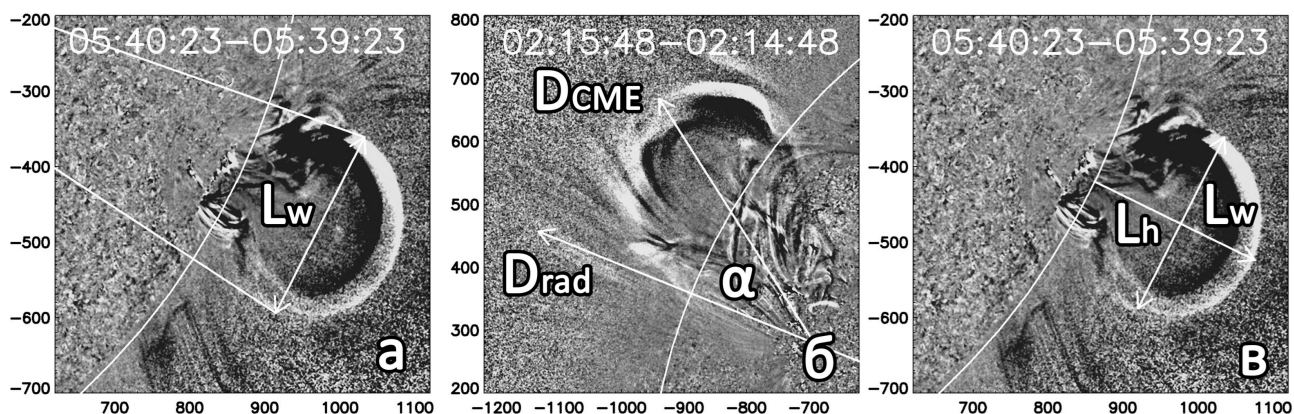


Рисунок 1.3: а - определение углового размера (L_w) КВМ. Центр угла L_w помещался в центр солнечного диска, а стороны угла проводились к крайним точкам фронтальной структуры КВМ. б - определение отклонения (α) траектории движения КВМ (D_{CME}) от радиального направления (D_{rad}). Направления движения КВМ D_{CME} определяется как вектор, выходящий из источника КВМ и делящий пополам угловой размер КВМ (с центром в источнике КВМ). в - определение отношения продольного размера (L_h) КВМ к поперечному (L_w). L_h - отсчитывается от источника КВМ.

Для определения углового размера КВМ, отклонения траектории движения КВМ от радиального направления и отношения продольного размера КВМ к поперечному в каждый момент времени выполнялась следующая процедура был разработан следующий алгоритм: (1) измеряется угловой размер КВМ по самым удаленным боковым частям фронтальной структуры, с вершиной в центре Солнца; (2) выбирается центр области источника КВМ. Направление движения КВМ D_{CME} высчитывается автоматически как биссектриса угла с вершинами в центре области источника КВМ и по бокам фронтальной структуры, найденного на шаге (1). Угол отклонения рассчитывается между прямой направления движения КВМ и прямой, проведенной через центр Солнца и центр области источника КВМ; (3) поперечный размер КВМ равен расстоянию между боковыми частями фронтальной структуры, найденными на шаге (1). Продольный размер - расстояние между центром области источника КВМ и границей фронтальной структуры КВМ в направлении движения КВМ, найденном на шаге (2).

1.2 Отбор событий для анализа

Для изучения формирования КВМ на начальной стадии его движения были проанализированы корональные выбросы массы нового солнечного цикла в период с июня 2010 по июнь 2012 года. К событиям, отбирившимся для последующего анализа, предъявлялись следующие требования: (1) КВМ должны наблюдаться двумя космическими аппаратами: SDO и PROBA2. Соответствующие изображения КВМ должны быть достаточно качественными, чтобы их можно было анализировать. Кроме того, для каждого события должно быть зарегистрировано не менее 4 последовательных изображений, на которых можно определить положение фронта КВМ для дальнейшего нахождения скорости и ускорения выброса в зависимости от времени; (2) события должны быть лимбовыми или близкими к таковым; (3) каждому отобранному по данным SDO и PROBA2 выбросу должен соответствовать КВМ, зарегистрированный в поле зрения LASCO по данным каталога http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list.

Событий, удовлетворяющих этим требованиям, оказалось девять. Мы считали событие лимбовым, если связанная с КВМ вспышка находилась на расстоянии от центра солнечного диска $\geq 60^\circ$ в гелиографических координатах.

Таблица 1.1: Общая информация отобранных событий. (*) - Начало вспышек взято из каталога RHESSI <http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser>. (**) - приведены координаты вспышки.

Дата события	Начало вспышки*	Начало движения протуберанца	Начало движения КВМ	Активная область	Координаты источника**
2010-06-13	05:32:52	05:30:33	05:35:47	11079	S24W91
2010-08-14	9:25:40	09:17:09	09:37:24	11093	N11W65
2011-02-11	21:30:20	21:30:08	21:34:36	-	N16E91
2011-03-08	03:30:12	03:29:45	~ 03:37:24	-	S21E72
2011-03-08	19:38:32	19:20:00	~ 09:45:00	11165	S20W91
2011-03-27	за лимбом	~ 04:53:00	05:08:00	-	-
2011-04-27	02:06:15	01:52:00	02:09:00	-	N31E73
2011-06-07	06:16:32	06:15:48	06:24:00	11226	S22W66
2011-06-29	0:19:52	00:16:00	00:22:00	11240	S18W81
2012-06-23	06:51:20	06:26:00	~ 06:57:20	-	N30W91

Для анализа отобранных событий использовался ряд инструментов. Для изучения формирования КВМ на начальной фазе его движения, которая сопровождается его импульсным ускорением и называется импульсной фазой [42] использовались инструменты SWAP (Sun Watcher using Active Pixel System detector and Image Processing), установленный на борту космического аппарата PROBA2 (PROject for Onboard Autonomy) [18] и AIA (the Atmospheric Imaging Assembly) [15], установленный на космическом аппарате SDO (the Solar Dynamics Observatory). Наблюдения велись в каналах 304 \AA (He II, Хромосфера и переходная зона, характерная температура - $5 \times 10^4 \text{ K}$), 171 \AA (Fe IX, Спокойная область в короне и верхняя часть переходной зоны, характерная температура - $6.3 \times 10^5 \text{ K}$), 193 \AA (Fe XII, XXIV, Корона и горячая вспышечная плазма, характерная температура - 1.2×10^6 , $2 \times 10^7 \text{ K}$), 211 \AA (Fe XIV, Активная область в короне, характерная температура - 2×10^6

K), 131 Å (Fe VIII, XX, XXIII, Вспышечная область, характерная температура - 4×10^5 K, 10^7 K).

Поиск волокон в линии H α осуществлялся с использованием наземных обсерваторий Big Bear Solar Observatory (BBSO) и Kanzelhöhe Observatory [97], а также с помощью телескопа Coronado SolarMax H α Imager в Mauna Loa Solar Observatory (MLSO) [10].

Термин “волокно” (“filament” в англоязычной литературе) мы используем, как это принято в солнечной физике, для обозначения плотных, относительно холодных (по сравнению с температурой короны) конденсаций хромосферного вещества, приподнятых над поверхностью Солнца и проникающих своей центральной частью в корону. Для волокна, наблюдаемого над краем солнечного диска, используют специальный термин – протуберанец (prominence). О волокне (протуберанце) в первом приближении можно говорить как о петлеобразной структуре, хотя нередко структура этих объектов довольно сложная.

Для определения скорости и ускорения КВМ на больших расстояниях от Солнца ($R > 2R_s$ (солнечных радиуса)) использовались данные коронографов LASCO (the Large Angle and Spectrometric Coronagraph) C2 и C3 [8] расположенных на космическом аппарате SOHO (the Solar and Heliospheric Observatory). Данные коронографы имеют поле зрения от 2 до 6 и от 6 до 30 радиусов Солнца (R_s) соответственно. Для анализа интенсивности излучения из области связанной с КВМ вспышки использовались данные инструментов GOES в мягком рентгеновском диапазоне и RHESSI [53] в жестком в диапазоне энергий 25–50 кэВ.

1.3 Морфологическая и физическая картина формирования, а также особенности кинематики КВМ, связанных с эруптивными протуберанцами или эмиссионными петлями

Формирование и движение корональных выбросов массы по данным с высоким временным и пространственным разрешением в различных спектральных диапазонах будет проиллюстрировано на примере четырех событий.

1.3.1 КВМ 13 июня 2010 года.

КВМ 13 июня 2010 года возник в активной области NOAA 11079 и был связан со вспышкой рентгеновского класса M1.0 в гелиоцентрических координатах S24W82. Мягкое рентгеновское излучение I_{SXR} из связанной вспышки в диапазоне 1-8 Å наблюдалось космическим аппаратом GOES 15. Началу вспышки по данным GOES соответствует момент времени 05:32:52 (UT) с максимумом потока рентгеновского излучения в 05:39:00 (UT). Вспышка также сопровождалась всплеском потока жесткого рентгеновского излучения I_{HXR} в диапазоне энергий 12-25 кэВ.

КВМ наблюдался как лимбовый выброс массы в поле зрения коронографов LASCO C2 и C3. Он был впервые зарегистрирован LASCO C2 в момент времени 06:06 UT. Ось КВМ имела позиционный угол 254 градуса. Линейная скорость КВМ в картинной плоскости составила 320 км/с. (по данным каталога http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list).

Формирование и импульсная фаза ускорения КВМ наблюдалась инструментами PROBA2/SWAP и SDO/AIA.

Это событие интересно тем, что по данным EUV наблюдений отчетливо выделяется фронтальная структура КВМ, а также возмущенная зона перед ним с резкой границей, которая по результатам ряда исследований является ударной волной [44, 78, 86, 98–100]. В

данной главе мы рассмотрим морфологию, общую физическую картину формирования КВМ и его кинематику, которые обсуждались в работе Файнштейн и Егоров (2013) [86]. Ударная волна, связанная с данным событием будет рассмотрена в Главе 2.

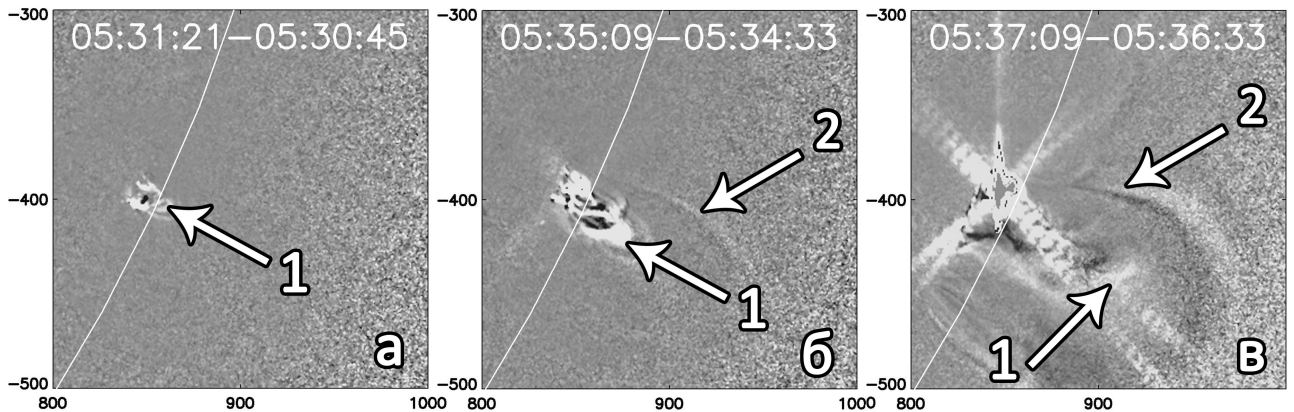


Рисунок 1.4: Событие 13 июня 2010 начинается с эрупции горячей эмиссионной петли (стрелка 1) в линии 131 Å. Данная эрупция возмущает и приводит в движение вышележащие петлевые структуры (стрелка 2)

Событие 13.06.2010 начинается с эрупции горячей эмиссионной петли (для этой эруптивной структуры не удалось найти пространственного и временного соответствия протуберанцу, видимого в спектральной линии $H\alpha$), наблюдаемой в различных спектральных диапазонах. Впервые эмиссионная петля становится видимой в момент времени $\sim 05:20:00$ UT на изображениях в канале 131 Å и приходит в движение примерно за 3 минуты до начала связанной с КВМ вспышки. Впереди более яркой и широкой горячей эмиссионной петли, отмеченной на рисунках 1.4, 1.5 и 1.6 цифрой 1, во всех рассмотренных спектральных каналах наблюдается менее яркая и более узкая движущаяся петля.

Начиная с момента 05:35 UT в канале 131 Å над движущейся горячей эмиссионной петлей начинает проявляться совокупность петлеобразных структур большего размера. Аналогичная картина, спустя примерно 1 минуту наблюдается на изображениях в канале 171 Å.

Рисунок 1.6 иллюстрирует развитие больших петлеобразных структур со временем. Видно, что самая внешняя петлеобразная структура оказывается наиболее яркой. По мере увеличения яркости эта структура также начинает двигаться в направлении от лимба и, в конечном итоге, мы видим завершение формирования фронтальной структуры КВМ 1.6(в). Отметим, что уярчение внешней петлеобразной структуры и ее движение связано с воздействием на нее совокупности внутренних движущихся с разной скоростью петель. Самая яркая из них отмечена Рис 1.6(б) цифрой 2. Когда эта петля достигает место, где начинает формироваться фронтальная структура КВМ (цифра 3).

По мнению автора диссертации, наблюдаемая картина может быть представлена в следующем виде: горячая эмиссионная петля возмущает вышележащие петлевые структуры, которые начинают двигаться с разной скоростью в направлении от Солнца, и добегают до места формирования фронтальной структуры КВМ.

В 05:36:00 эруптирующая эмиссионная петля приводит в движение вышележащую аркаду петель (Рис 1.4(б-в)), которая в дальнейшем формирует фронтальную структуру КВМ и лучше всего видна в более холодной спектральной линии 171 Å (Рис 1.6).

Используя совокупность изображений в различных каналах, аналогичных приведенным на Рис 1.4 и 1.6, были получены положения границ горячей эмиссионной петли, самой яркой внутренней петли и фронтальной структуры КВМ в зависимости от времени. С

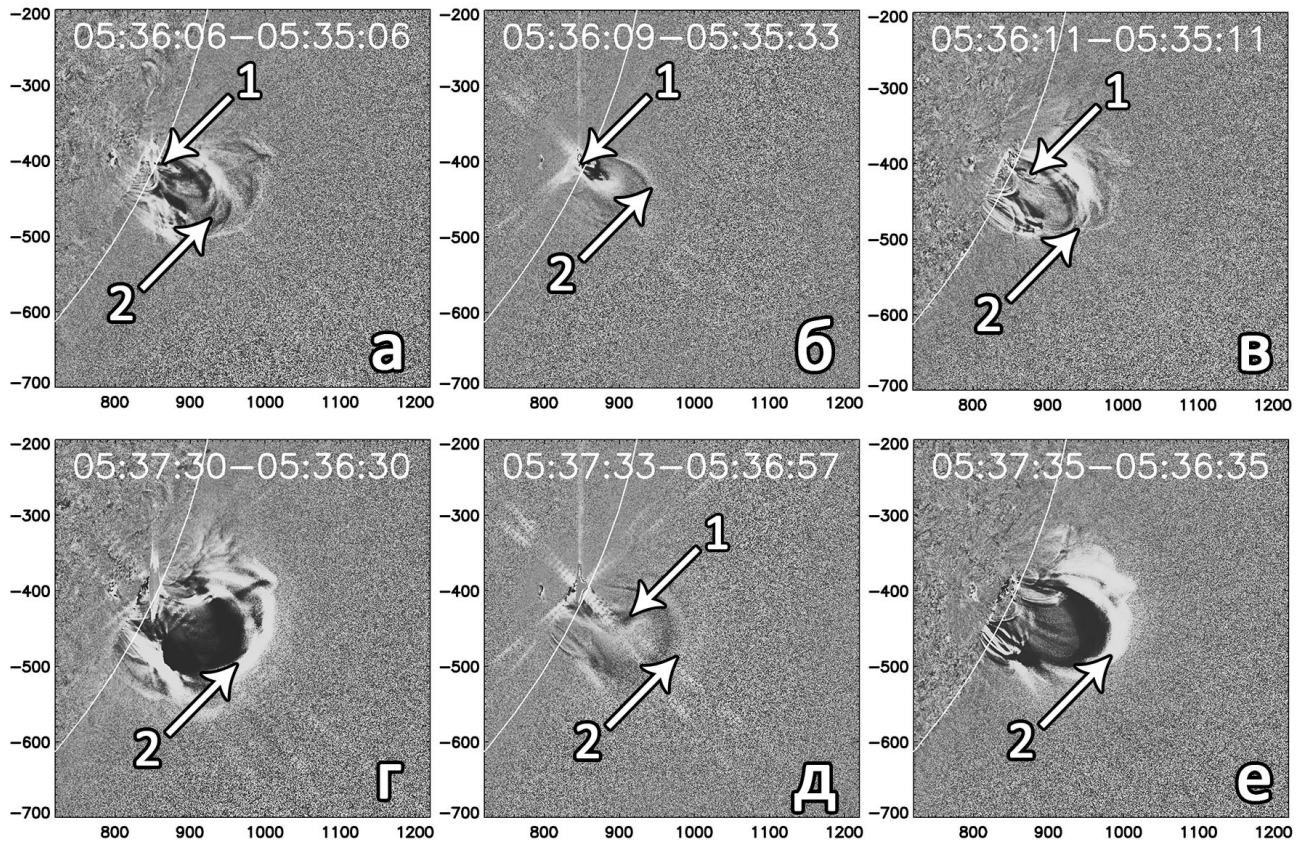


Рисунок 1.5: КВМ 13 июня 2010 года. (а,г) - разностные изображения в канале 193 Å. (б,д) - разностные изображения в канале 131 Å. (в,е) - разностные изображения в канале 171 Å. Стрелкой 1 отмечена горячая эмиссионная петля. Стрелкой 2 отмечена внутренняя петлевая структура.

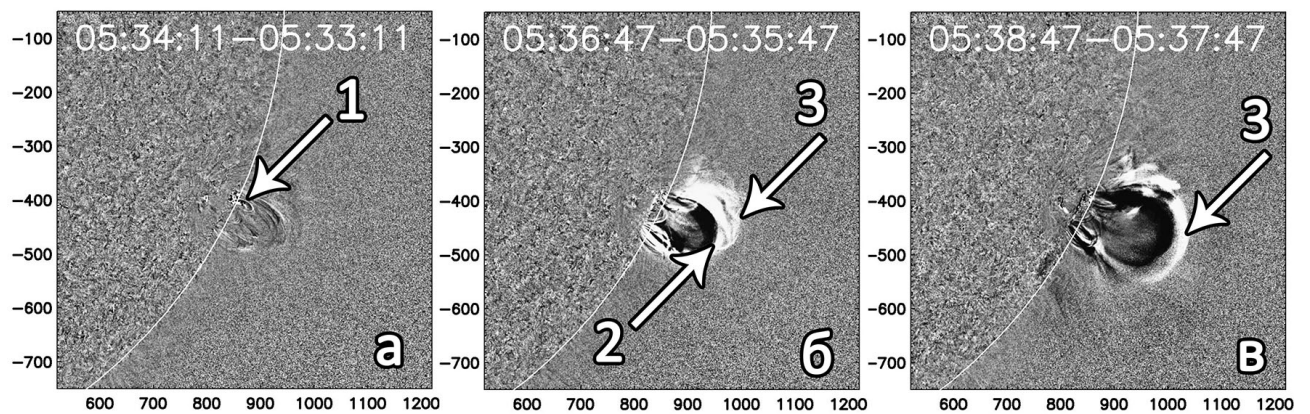


Рисунок 1.6: Событие 13 июня 2010. (а) - горячая эмиссионная петля (стрелка 1) в линии 171 Å. (б-в) - Данная эрупционная петля возмущает и приводит в движение вышележащие петлевые структуры (стрелка 2) и формирует фронтальную структуру КВМ (стрелка 3).

помощью этих положений были определены скорости указанных структур с использованием формул, приведенных в Разделе 1.1.2 (Рис 1.7(а)). Рис 1.7(б) показывает ускорения вышеописанных структур. Зависимости скорости и ускорения фронтальной структуры

КВМ (красная линия) и горячей эмиссионной петли, видимой в канале 131 \AA (черная линия). Экспериментальные зависимости скорости горячей эмиссионной петли (крестики) и фронтальной структуры КВМ (круги) получены по данным SDO/AIA в каналах 131 \AA и 171 \AA соответственно (Рис 1.7(a)). Красная и черная линии - би-сплайн аппроксимация кругов и крестиков соответственно. Синяя пунктирная линия показывает интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. На рис 1.7(б) соответствующими линиями обозначены производные скорости ЭП, КВМ и SXR интенсивности.

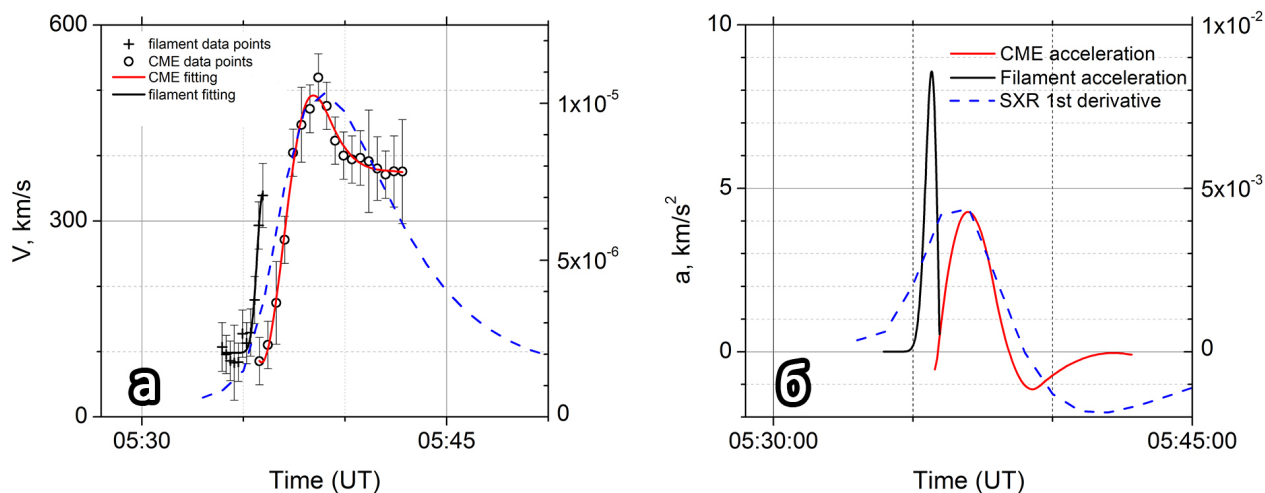


Рисунок 1.7: Событие 13 июня 2010 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и эмиссионной петли (черная линия). Синей пунктирной линией показана интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. б - ускорение КВМ (красная линия) и эмиссионной петли (черная линия). Синяя пунктирная линия - производная интенсивности мягкого рентгеновского излучения

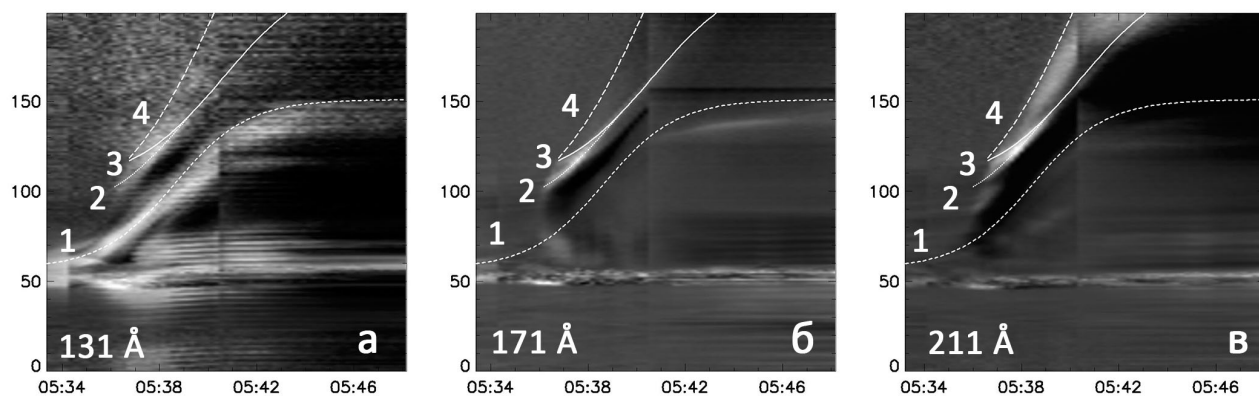


Рисунок 1.8: Событие 13 июня 2010 года. На изображениях показана временная серия в трех спектральных каналах 131 , 171 и 211 \AA , состоящая из узкой полосы 13 на 200 пикселей. Белые линии - это гиперболические функции, описывающие изменение положения со временем горячей эмиссионной петли (1), внутренней петлевой структуры (2), фронтальной структуры КВМ (3) и ударной волны (4).

Для более наглядного представления кинематики КВМ и горячей эмиссионной петли была применена специальная обработка временной серии изображений в разных спек-

тральных каналах SDO/AIA, предложенная В.В. Гречневым (Рис 1.8(а-в)). Данная обработка получается путем вырезания узкой полосы шириной в ± 6 пикселей вдоль выбранного направления и высотой в 200 пикселей. Изображения предварительно поворачиваются на 35° против часовой стрелки так, что направление движения КВМ становится параллельным горизонтальной оси x на изображении. Это сделано для удобства вырезания полосы. Такие полосы вырезаются в каждый момент времени. Рис 1.8(а-в) получается склейкой таких полос. По горизонтальной оси x указано время в UT. По вертикальной оси y - высота вырезанной полосы в пикселях. Таким образом, мы получаем зависимость положения от времени границы той или иной структуры вдоль выбранного направления. Белые линии на Рис 1.8(а-в) - это гиперболические функции, описывающие изменение положения со временем горячей эмиссионной петли (1), внутренней петлевой структуры (2), фронтальной структуры КВМ (3) и ударной волны (4). На все изображения нанесены одни и те же белые линии, но каждая из них получена на изображении, где соответствующая структура наблюдается наиболее отчетливо. Так, например, горячая эмиссионная петля лучше всего наблюдается в канале 131 \AA и практически не видна в более холодных спектральных каналах 171 и 211 \AA . В свою очередь ударная волна лучше всего наблюдается в канале 211 \AA .

1.3.2 КВМ 7 июня 2011 года.

Событие 7 июня 2011 года также была предметом изучения в работе Файнштейн и Егоров (2013) [86, 101]. КВМ произошел в активной области NOAA 11226 и был связан со вспышкой рентгеновского класса M2.5 с гелиографическими координатами центра S22W66. По данным GOES вспышка началась в 06:16:32 UT с максимумом потока излучения I_{SXR} вблизи 06:29:00 UT.

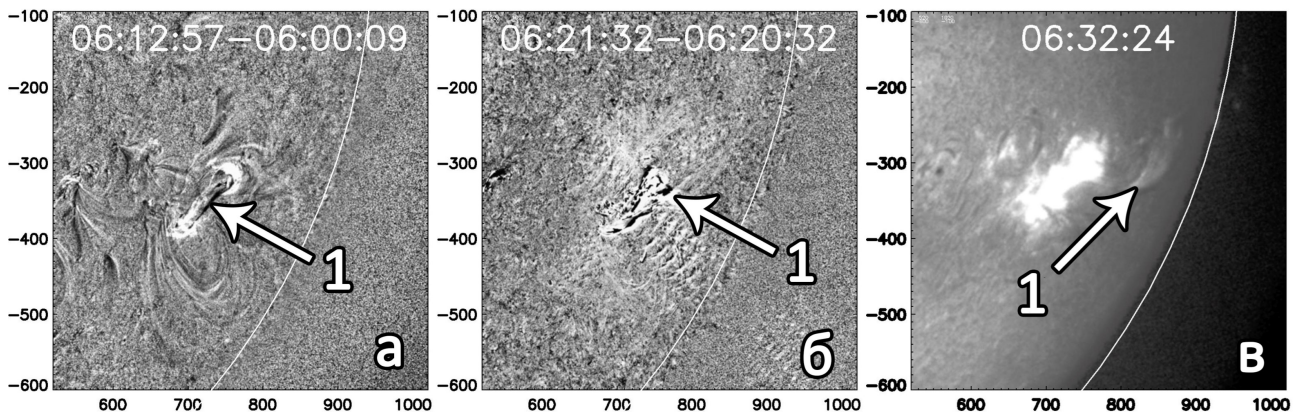


Рисунок 1.9: Событие 07 июня 2011. а - волокно (протуберанец) по наблюдению в канале 131 \AA в начальный период эрупции. б - этот же протуберанец в период импульсного ускорения в канале 304 \AA . в - этот же протуберанец в линии $H\alpha$.

КВМ наблюдался как лимбовый выброс массы в поле зрения коронографов LASCO C2 и C3. Он был впервые зарегистрирован LASCO C2 в момент времени 06:49 UT. Ось КВМ имела позиционный угол 251 градуса. Линейная скорость КВМ в картинной плоскости составила 1255 км/с . (по данным каталога http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list).

Формирование и импульсная фаза ускорения КВМ наблюдалась инструментами PROBA2/SWAP и SDO/AIA. Также для данного события удалось зафиксировать эрупцию протуберанца в линии $H\alpha$ по данным обсерватории Kanzelhöhe (Рис 1.9(в)).

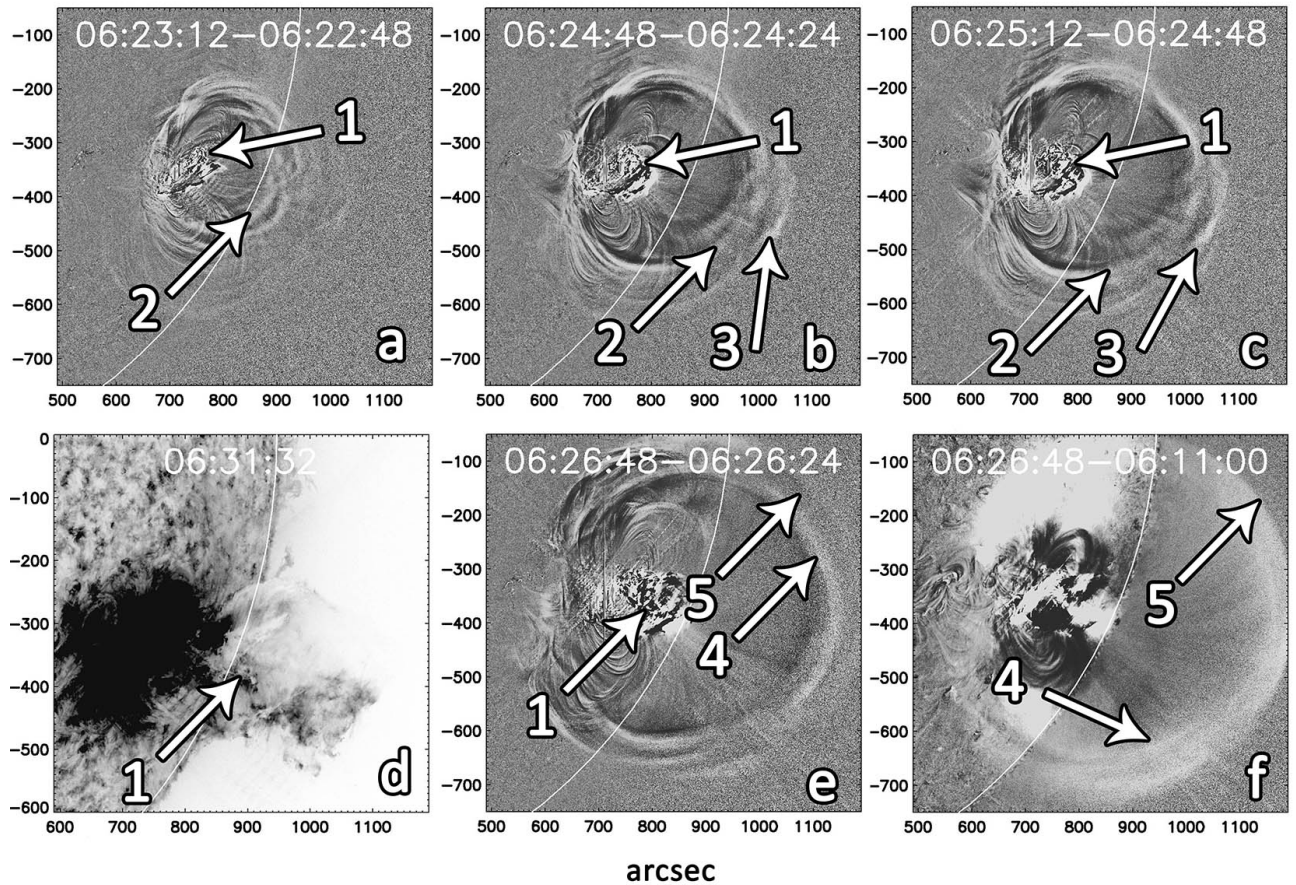


Рисунок 1.10: Событие 7 июня 2011 г. Последовательность изображений участка Солнца по наблюдениям инструментом SDO/AIA в канале 171 \AA (a-c; e). 1 – эруптивный протуберанец; 2 – внутренние движущиеся структуры; 3 – внешняя структура, впоследствии – часть фронтальной структуры КВМ отмеченной цифрой 4. d– исходное изображение участка Солнца для лучшего выделения эруптивного протуберанца. f – разностное изображение участка Солнца в канале 211 \AA . Цифрой 5 обозначена граница диффузной области впереди яркой области (отмечена цифрой 4), предположительно ударная волна.

Формирование КВМ начинается с эрупции протуберанца – триггера создания этого КВМ (Рис 1.9(а-в)). Это протуберанец было зарегистрировано как в линии $\text{H}\alpha$, так и в нескольких каналах крайнего ультрафиолета. Медленное движение эруптивного протуберанца (ЭП) начинается примерно за 6 минут до начала связанной с КВМ вспышки. Резкое увеличение скорости протуберанца начинается через ~ 1.5 минуты после начала вспышки. Как и в предыдущем рассмотренном событии, этот эруптивный протуберанец возмущает находящиеся выше участки короны, и это возмущение проявляется в виде последовательности движущихся друг за другом петлеобразных структур (отмечены стрелками с номером 2) (Рис 1.10(а-с)). При этом скорость структуры, начавшая двигаться позднее, достигает больших скоростей, чем структуры, начавшие двигаться раньше. В результате возникшие позднее структуры догоняют структуры, появившиеся раньше. Все эти внутренние движущиеся структуры, в конце концов, догоняют самую медленную внешнюю структуру под номером 3 и вместе с ней формируют фронтальную структуру КВМ (отмеченную цифрой 4). С этого момента КВМ можно считать сформировавшимся. Такая картина формирования КВМ наблюдается и в каналах 193 \AA и 211 \AA . Какова природа

движущихся возмущений яркости, обозначенных на Рис. 1 цифрами 2 и 3? С одной стороны, это могут быть особенности волн сжатия, распространяющиеся наружу в короне. С другой стороны, это могут быть движущиеся вверх в короне петлеобразные структуры вещества. Нам кажется, что довольно сложно сформировать волны сжатия с наблюдаемой кинематикой, когда возникшие волны в течение длительного времени ускоряются, а затем волны, обозначенные «2», резко тормозятся и приобретают скорость, близкую скорости волны «3». Скорее всего, области повышенной яркости «2» и «3» - это движущиеся вверх магнитоплазменные структуры. Отметим также, что область повышенной яркости, отмеченная на Рис. 1 цифрой 4, не может быть ударной волной, т.к. впереди нее имеется заметная диффузная область повышенной яркости, ограниченная резким спадом яркости, особенно отчетливо наблюдаемая в канале 211 Å (Рис 1.10(f)). Этот скачок яркости на границе диффузной области, движущийся со скоростью $V > V_{MS}$ (здесь V_{MS} - скорость быстрых магнитозвуковых волн в плазме) и является, вероятно, ударной волной (см. Глава 2.).

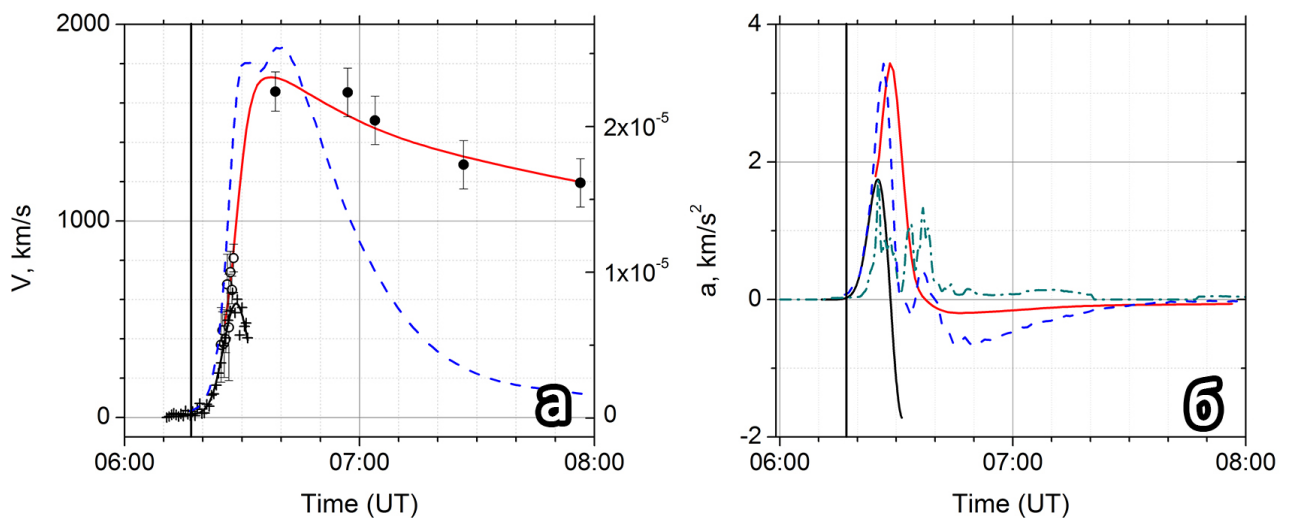


Рисунок 1.11: Событие 7 июня 2011 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синей пунктирной линией показана интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. б - ускорение КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синяя пунктирная линия - производная интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Интенсивность жесткого рентгеновского излучения по данным RHESSI показано зеленой линией. Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки.

Кинематика различных структур в процессе формирования КВМ и сформировавшегося выброса массы показана на Рис 1.11 и 1.12. Из Рис 1.11 следует, что эрупция волокна начинается раньше связанной вспышки. Движение фронтальной структуры КВМ начинается, по-видимому, после начала связанной вспышки. Ненадежность этого вывода связана с тем, что первые значения скорости формирующейся фронтальной структуры удалось определить тогда, когда скорость достигла ≈ 450 км/с. Обратим внимание на временной профиль скорости фронтальной структуры КВМ с начала ее формирования. Скорость достигает максимального значения примерно на выходе в поле зрения LASCO C2, затем относительно быстро уменьшается на ≈ 500 км/с, и далее меняется со временем относительно мало. Такие временные профили в последние годы уже наблюдались (см., например, [47, 48]), и они принципиально отличаются от профиля, предложенного на основании анализа относительно большого числа событий в работе [42], когда после

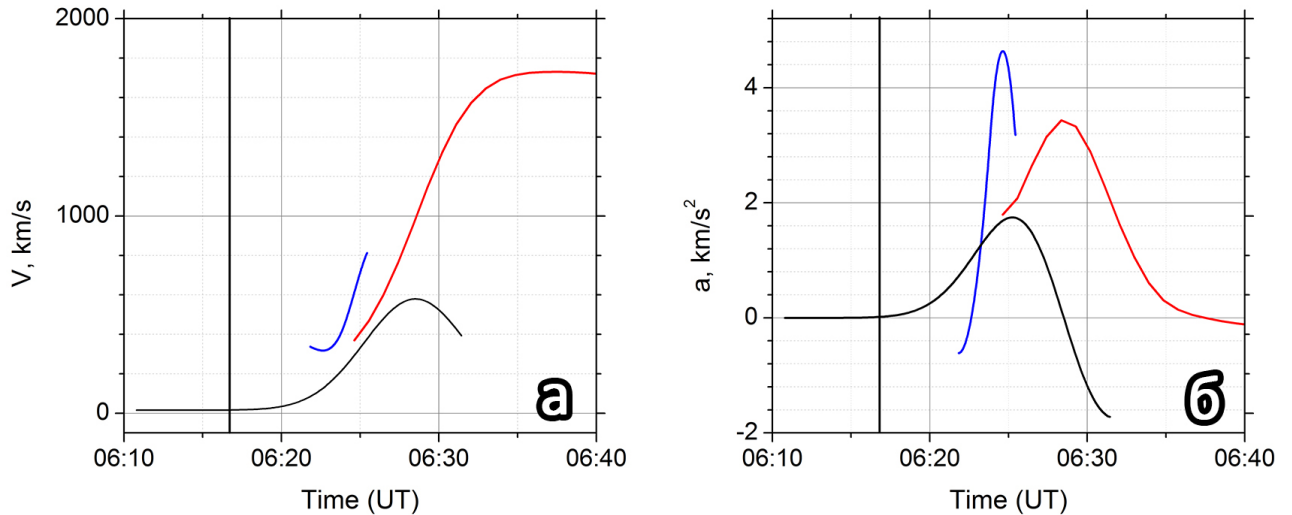


Рисунок 1.12: Событие 7 июня 2011 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Внутренняя петлевая структура показана синей линией. б - ускорение КВМ (красная линия), протуберанца (черная линия) и внутренней петлевой структуры (синяя линия). Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки.

достижения максимума скорость практически перестает меняться. Из Рис 1.11 следует также, что близкими по времени оказались максимумы скорости фронтальной структуры (или, что то же самое, тела КВМ), и максимум мягкого рентгеновского излучения $I_{SXR}(t)$; максимум ускорения фронтальной структуры и максимум $dI_{SXR}(t)/dt$. Ширина пика ускорения эруптивного протуберанца a_{EP} на уровне $a_{EP} = 0$ оказалась сравнимой с шириной самого большого пика $dI_{SXR}(t)/dt$. Перечисленные особенности движения КВМ оказались характерными для нескольких рассмотренных КВМ.

На Рис 1.12 показаны зависимости скорости и ускорения фронтальной структуры КВМ (красная линия), эруптивного протуберанца (черная линия) и внутренней петлевой структуры (синяя линия). Черными вертикальными линиями отмечены начало связанной с КВМ вспышки. Отметим интересную особенность Рис 1.12(б). Самое большое максимальное ускорение оказалось у внутренней петли, меньшего ускорения достигла фронтальная структура и, наконец, эруптивный протуберанец характеризовался наименьшими значениями максимального ускорения среди представленных структур.

1.3.3 КВМ 8 марта 2011 года.

КВМ 8 марта 2011 года произошел в активной области NOAA 11165. Хронологию события условно можно разделить на два этапа. Первый этап начинается примерно в 18:05 (UT) с появления яркой эмиссионной петли (магнитного жгута) в горячем спектральном канале 131 \AA ($T \sim 10^7 K$). Дальнейшая последовательность событий проиллюстрирована на Рис 1.13(а-в) (Приведены инвертированные изображения (т.е. более яркие области показаны черным цветом, менее яркие белым цветом) в спектральном канале 131 \AA). Магнитный жгут (отмечен стрелкой №1 на рисунке) быстро ускоряется, пока не достигнет вышележащей группы петель, образующих аркаду (отмечено стрелкой №2 на рисунке). Данная аркада препятствует дальнейшей эрупции жгута, приводя к торможению последнего. На профиле скорости (Рис 1.18(б)) черной линией показано резкое увеличение скорости жгута до момента достижения $\approx 160 \text{ км/с}$ и дальнейшее его торможение $\approx 30 \text{ км/с}$

в момент времени $\sim 18:17$ (UT), когда он “прорывается” через аркаду в том месте (отмечено стрелкой №3 на рисунке), где группа петель аркады располагается выше относительно лимба (отмечено на Рис 1.13(г-е) стрелкой №4. Приведены инвертированные изображения в спектральном канале 171 \AA). С этого момента начинается небольшое ускорение “прорвавшегося” жгута и вышележащей группы петель (отмеченных стрелкой №4 на Рис 1.13(г-е) и красной линией на рис 1.18(б)). На рис 1.13(е) заметно как поднялась группа петель (стрелка №4) по сравнению с моментами времени, показанными на рис 1.13(г-д), где ее движение практически отсутствует.

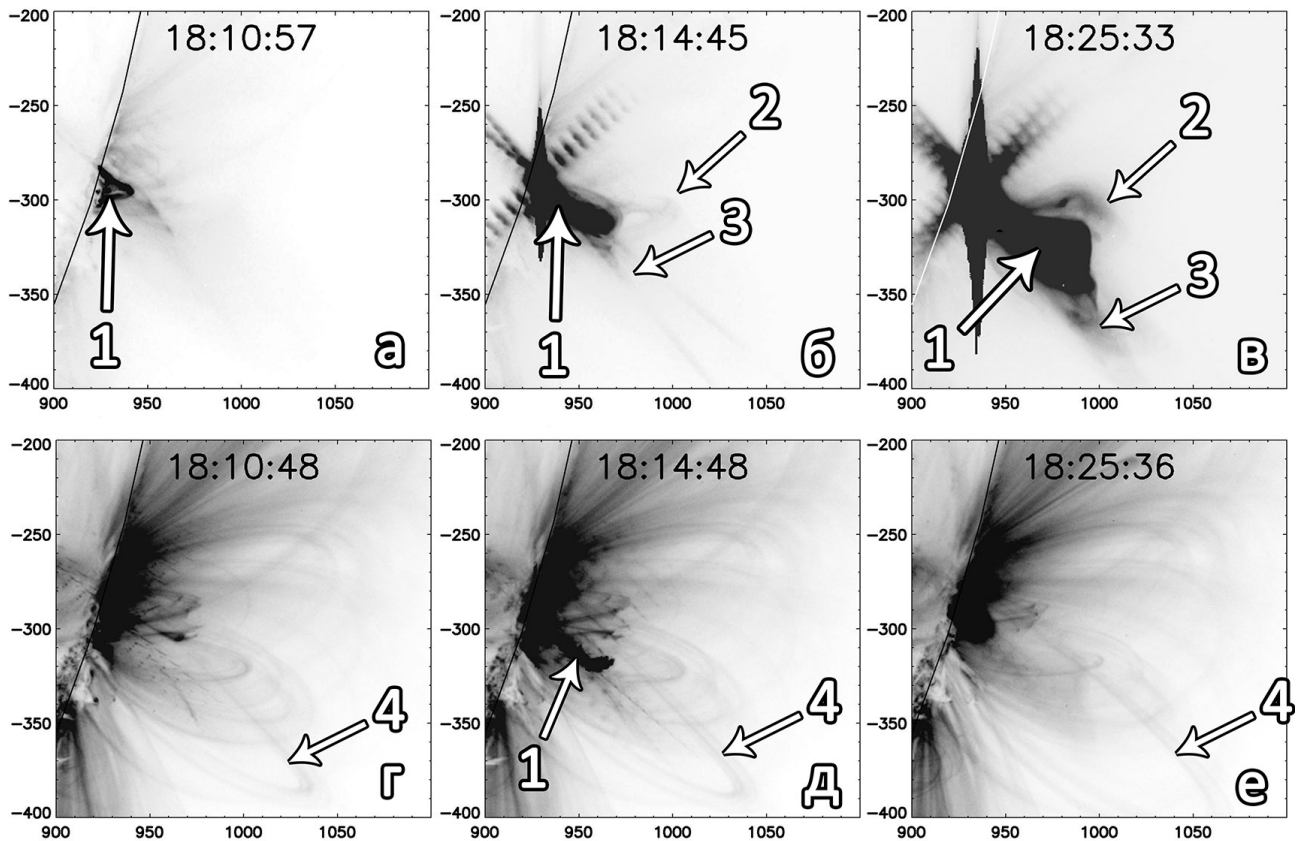


Рисунок 1.13: Событие 08 марта 2011. а-в - инвертированные изображения SDO/AIA в спектральном диапазоне 131 \AA . г-е - инвертированные изображения SDO/AIA в спектральном диапазоне 171 \AA . Стрелкой №1 показан магнитный жгут. Вышележащая аркада петель отмечена стрелкой №2. Стрелкой №3 показано место “прорыва” магнитного жгута. Место прорыва соответствует группе петель (стрелка №4), лежащих выше относительно остальной аркады петель.

Лучше всего движение жгута и группы петель после “прорыва” виден на разностных изображениях в спектральном диапазоне 171 \AA (Рис 1.15(а-в)). Процесс подъема этих структур продолжается до $\sim 18:52$ (UT). Данный этап сопровождался нарастанием мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки рентгеновского класса M4.0 (Рис 1.14(б)). Отмечено стрелкой №2). Данной эрупции в поле зрения LASCO C2 соответствует слабое возмущение (Рис 1.14(а)), что может говорить о так называемой неудавшейся эрупции (в англоязычной литературе - “failed eruption” [102]). Причиной неудавшейся эрупции могло стать то, что жгут потратил значительную часть своей энергии на преодоление вышележащей аркады.

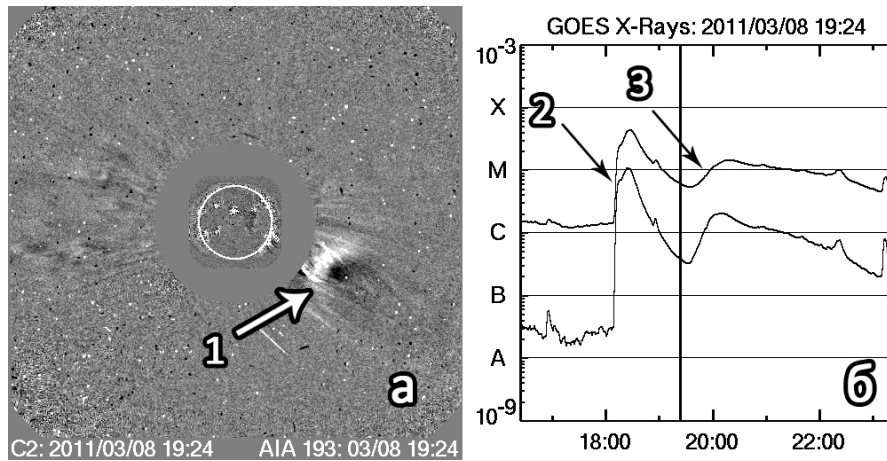


Рисунок 1.14: Событие 08 марта 2011. а - слабое возмущение в поле зрения LASCO C2 после “failed eruption”. б - нарастание интенсивности мягкого рентгеновского излучения, соответствующая первому этапу (стрелка №2) и второму этапу (стрелка №3).

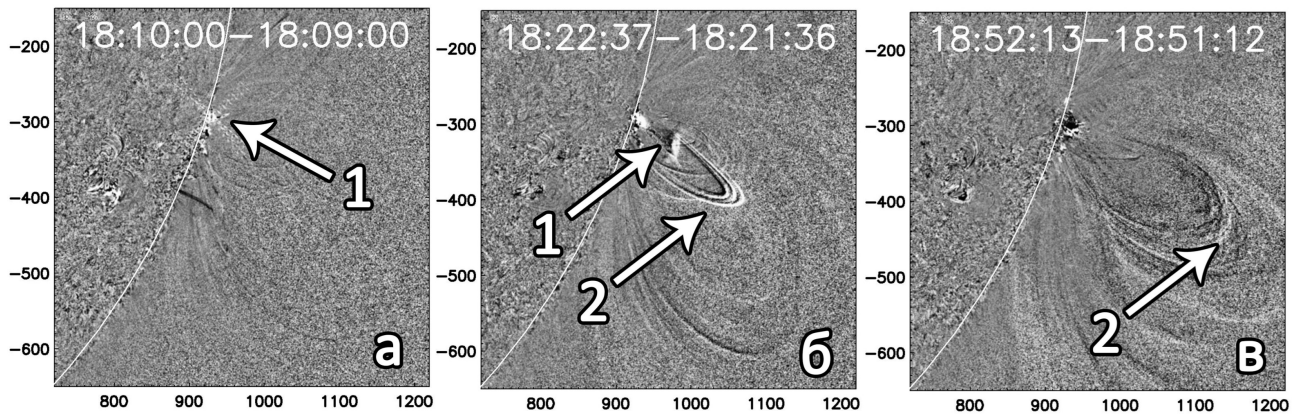


Рисунок 1.15: Событие 08 марта 2011. Первый этап. Событие начинается 8 марта 2011 с эрупции протуберанца (стрелка 1) в линии 171 Å. Данная эрупция возмущает и приводит в движение вышележащую аркаду петель (стрелка 2). Подъем аркады продолжается до примерно 18:52 (UT)

В течение получаса после завершения первого этапа видимых движений наблюдаемых явлений не происходит. Второй этап начинается в 19:20 с появления остановившегося ранее протуберанца и продолжении его медленного подъема (Рис 1.16(б)). Данный этап также сопровождается всплеском интенсивности мягкого рентгеновского излучения, отмеченный стрелкой №2 на Рис 1.14(б). Перед началом эрупции вдоль одной из ног протуберанца начинает двигаться последовательность структур ограниченной длины («блов»), Рис 1.16(а). Другими словами, бловы - это магнитоплазменные сгустки вещества, выбрасываемые из оснований протуберанца. Длина цепочки бловов со временем увеличивается. На Рис 1.16(д) показан временной профиль скорости бловов. Есть основание считать, что эти бловы возникли как возмущения, сопровождающие предшествующий КВМ, возникший в той же активной области и движущийся в том же направлении, что и анализируемый КВМ. Является ли появление таких бловов причиной эрупции протуберанца – пока неясно. Заметим, что наиболее отчетливо ЭП наблюдается в линии 171Å Рис 1.16(б).

Из-за большой начальной высоты ЭП не удастся увидеть формирование КВМ в поле зрения инструментов SDO и SWAP. Анализ последовательностей изображений, получен-

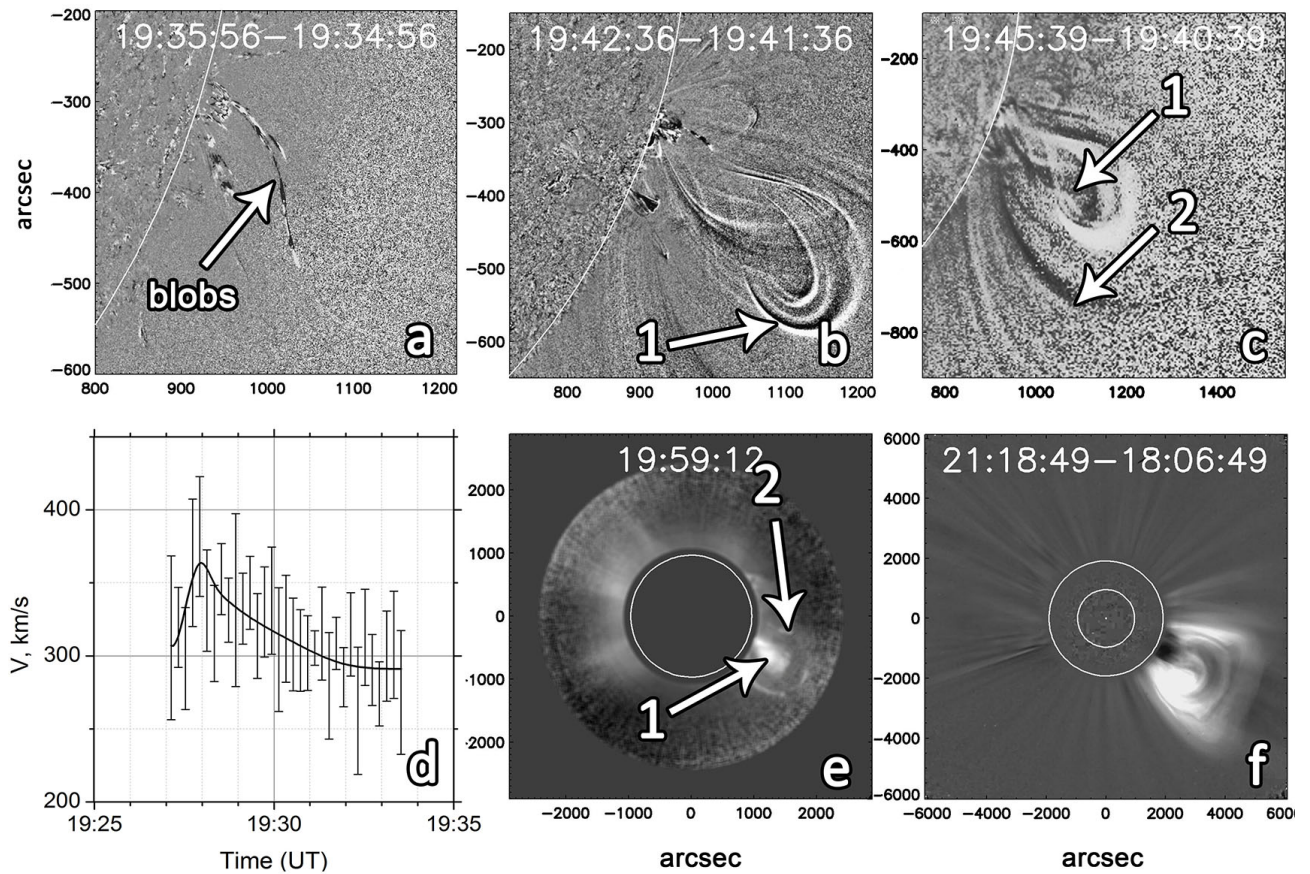


Рисунок 1.16: Событие 08 марта 2011. Второй этап. а - начало движения эруптировавшего и остановившегося ранее протуберанца (стрелка 1). Аркада петель над протуберанцем указана стрелкой 2. б - Протуберанец (1) частично раздвигает над собой аркаду петель (2). в - на разностном изображении SWAP/PROBA2 видно образование фронтальной структуры КВМ (стрелка 3).

ных инструментами SDO и PROBA2/SWAP, показал, что движение протуберанца возбуждает вышележащие области короны, которые в виде совокупности соприкасающихся петель поднимаются вверх. Но такой картины, как для события 7 июня 2011 г., когда внутренние возмущенные структуры двигались с большей скоростью, чем внешние по отношению к ним структуры, и внутренние структуры догоняли внешние - в этом событии не наблюдается. Оказалось, что возникновение и начальная стадия движения КВМ хорошо наблюдается в поле зрения коронографа MarkIV (Рис 1.16(e)). Здесь, как и в событии 29 июня 2011 г., возникает жгут в виде петлеобразной области повышенной яркости, охватывающий ЭП, и, спустя некоторое время, жгут начинает поступательное движение с большим ускорением. В процессе формирования жгут, возможно, тоже движется с небольшой скоростью, но оценить ее не удалось из-за недостаточного качества изображений. Таким образом, в целом здесь реализуется сценарий формирования КВМ, частично объединяющий процессы, сопровождавшие возникновение КВМ 29 Июня 2011 г (формирование жгута, его «окрашивание» белым цветом) и возникновение КВМ 7 Июня 2011 г. (воздействие на формирующийся жгут участков короны, возмущенных эруптивным протуберанцем).

В поле зрения LASCO/C2 и C3 также заметна деформация фронтальной структуры КВМ при движении по стримеру (Рис 1.17(a)). Так мы видим что из выпуклой формы КВМ приобретает вогнутую (Рис 1.17(б-в)).

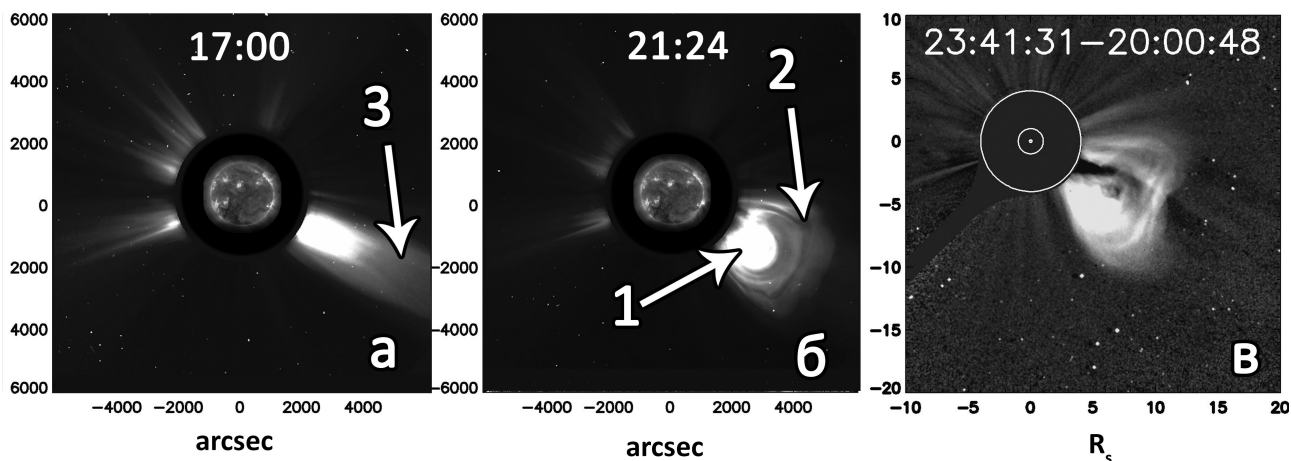


Рисунок 1.17: Событие 08 марта 2011. а - Стример (3) в поле зрения LASCO C2. б - протуберанец (1) и фронтальная структура КВМ (2) в поле зрения LASCO C2. Заметна деформация выпуклой формы фронтальной структуры КВМ. в - Разностное изображение LASCO C3. Деформация усиливается с расстоянием.

Кинематика данного события представлена на Рис 1.18(а-в). Первый рисунок показывает временной профиль положения протуберанца и КВМ на первом и втором этапах. Серыми крестиками показаны положения, линиями - би-сплайн аппроксимации этих положений. Черная линия - положения протуберанца на первом и втором этапах. Красная линия - положение аркады петель на первом этапе и КВМ (фронтальная структура) на втором этапе. Черной вертикальной линией на графиках отмечены моменты начала вспышки по данным GOES. Временной промежуток между двумя этапами составляет примерно 30 минут. Рис 1.18(б) - Этап №1. Временной профиль скорости протуберанца в 131 \AA (черная линия), протуберанца в линии 171 \AA (синяя сплошная линия) и аркады петель (красная линия). Синяя пунктирная линия показывает профиль интенсивности мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. Рис 1.18(в) - Этап №2. Временной профиль скорости протуберанца (черная линия) и КВМ (красная линия). Синяя пунктирная линия показывает профиль интенсивности мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. Черными вертикальными линиями показаны начала вспышек для каждого этапа.

1.3.4 КВМ 29 июня 2011 года.

КВМ 29 июня 2011 года произошел в активной области NOAA 11240 и был связан со вспышкой рентгеновского класса B9.0 с гелиографическими координатами центра S18W81. По данным GOES вспышка началась в 00:19:52 UT с максимумом потока излучения I_{SXR} вблизи 00:27:30 UT.

КВМ наблюдался как лимбовый выброс массы в поле зрения коронографов LASCO C2 и C3. Он был впервые зарегистрирован LASCO C2 в момент времени 00:48 UT. Ось КВМ имела позиционный угол 275 градуса. Линейная скорость КВМ в картинной плоскости составила 481 км/с . (по данным каталога http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list).

Импульсная фаза ускорения КВМ наблюдалась инструментами SWAP/PROBA2 и SDO/AIA.

Процесс формирования этого КВМ существенно отличается от формирования КВМ от 7 Июня 2011 г., хотя и в этом случае возникновению выброса массы предшествовала эрупции протуберанца. Здесь реализовался редкий случай. Появлению КВМ предшеству-

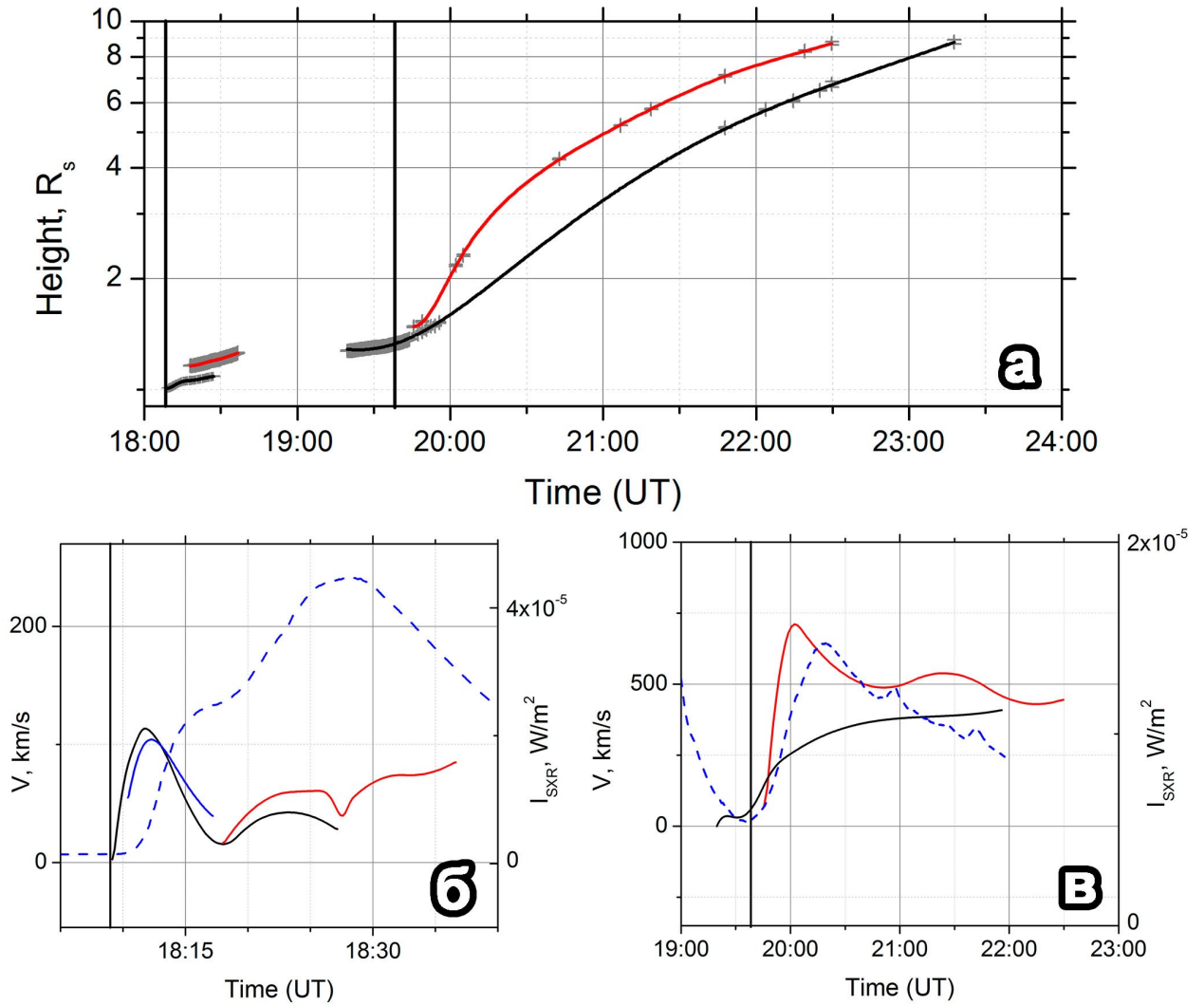


Рисунок 1.18: Событие 08 марта 2011. (а) - временной профиль положения (height) протуберанца и КВМ на первом и втором этапах. Серыми крестиками показаны положения, линиями - би-сплайн аппроксимации этих положений. Черная линия - положения протуберанца на первом и втором этапах. Красная линия - положение аркады петель на первом этапе и КВМ (фронтальная структура) на втором этапе. Черной вертикальной линией на графиках отмечены моменты начала вспышки по данным GOES. Временной промежуток между двумя этапами составляет примерно 30 минут. (б) - Этап №1. Временной профиль скорости протуберанца в 131 \AA (черная линия), протуберанца в линии 171 \AA (синяя сплошная линия) и аркады петель (красная линия). Синяя пунктирная линия показывает профиль интенсивности мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. (в) - Этап №2. Временной профиль скорости протуберанца (черная линия) и КВМ (красная линия). Синяя пунктирная линия показывает профиль интенсивности мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки.

ет эрупция двух протуберанцев, Рис 1.19(а). Событие начинается с активизации большого, со сложной структурой, протуберанца. Эта активизация проявляется в усилении яркости отдельных элементов протуберанца и смещении этих элементов друг относительно друга. Эрупция маленького протуберанца вначале сопровождается продолжением активизации большого протуберанца, далее начинается эрупция большого волокна, и затем начина-

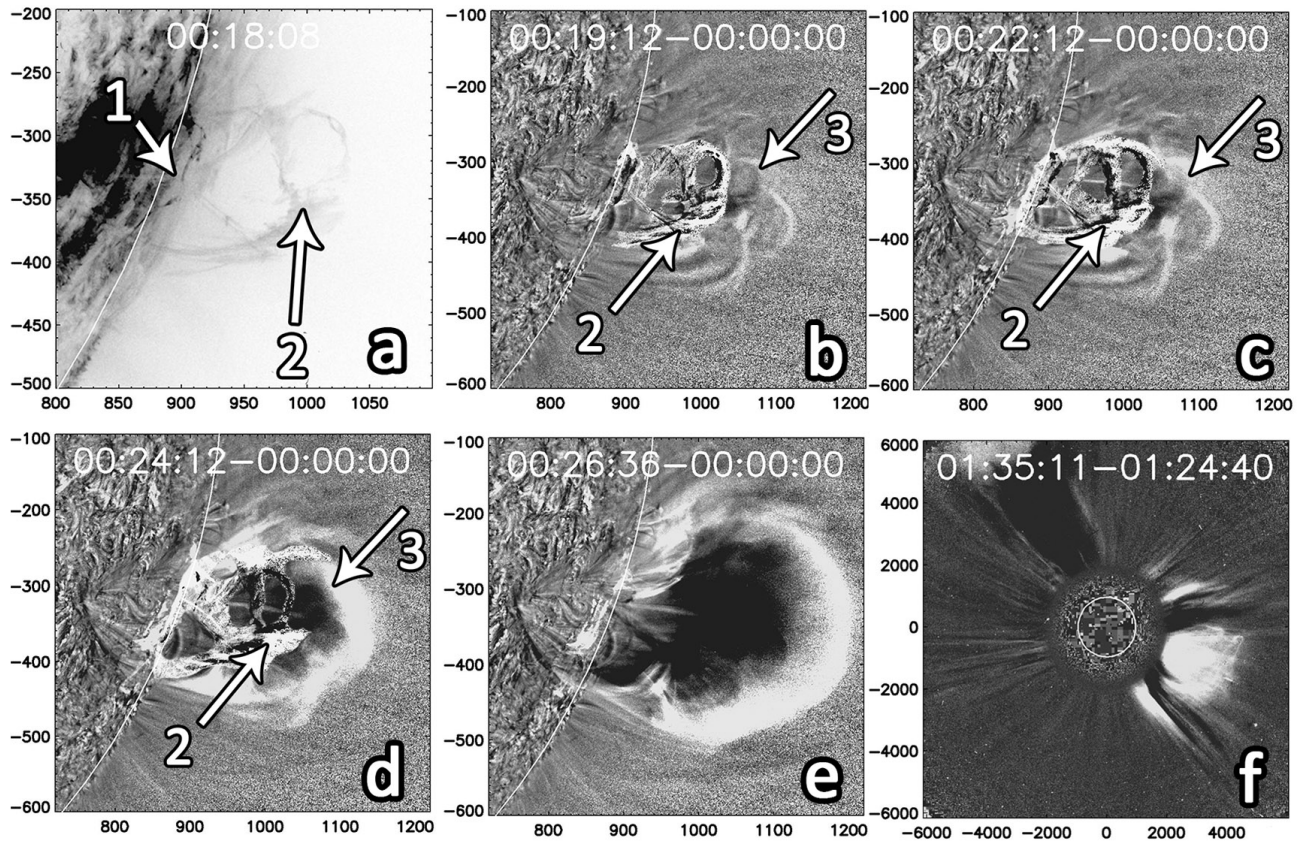


Рисунок 1.19: Событие 29 июня 2011. а - появлению КВМ предшествует эрупция двух протуберанцев (1) и (2). б и с - наложение протуберанца (2) в линии 304 \AA на формирование фронтальной структуры КВМ (3) в линии 171 \AA . Расширение фронтальной структуры КВМ соответствует расширению протуберанца (2). f - разностное изображение фронтальной структуры КВМ по данным LASCO/C2.

ется вспышка. Быстрый рост скорости большого эруптивного протуберанца оказывается синхронизированным с интенсивностью мягкого рентгеновского излучения из области вспышки.

На ранней стадии активизации большого протуберанца начинает светиться расположенный вокруг протуберанца магнитоплазменный жгут с характерной структурой силовых линий магнитного поля (Рис 1.19(b)). Когда большой протуберанец начинает двигаться, он, наряду с движением вверх, расширяется. Воздействие этого протуберанца изнутри на разные участки жгута приводит к увеличению яркости жгута, начиная с его верхней части Рис 1.19(c). Затем эта область повышенной яркости постепенно «заливает», как белой краской, весь жгут (Рис 1.19(d-e)), формируя фронтальную структуру КВМ. После такой «заливки» жгута отдельные его детали перестают быть видимыми. В течение длительного времени отчетливо наблюдавшийся жгут оставался практически неподвижным. Медленное движение жгута началось еще до начала формирования фронтальной структуры в момент времени $\sim 00:20:00$. Это время примерно совпадает с моментом начала связанной вспышки и с началом резкого нарастания скорости маленького протуберанца.

На рисунке 1.20 показаны зависимости скорости и ускорения фронтальной структуры КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Полученные из наблюдений значения скорости протуберанца отмечены крестиками, фронтальная структура КВМ пустыми кругами, треугольниками и черными кругами получены по данным SDO/AIA в

каналах 304 Å и 171 Å, PROBA2/SWAP и LASCO C2 соответственно (Рис 1.20(а)). Красная и черная линии - би-сплайн аппроксимация экспериментальных значений скорости фронтальной структуры КВМ и протуберанца соответственно. Синяя пунктирная линия показывает интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. На рис 1.20(б) соответствующими линиями обозначены ускорения ЭП и КВМ, а также производная SXR интенсивности (dI_{SXR}). К сожалению, для этого промежутка времени данные о потоке жесткого рентгеновского излучения по данным RHESSI отсутствуют.

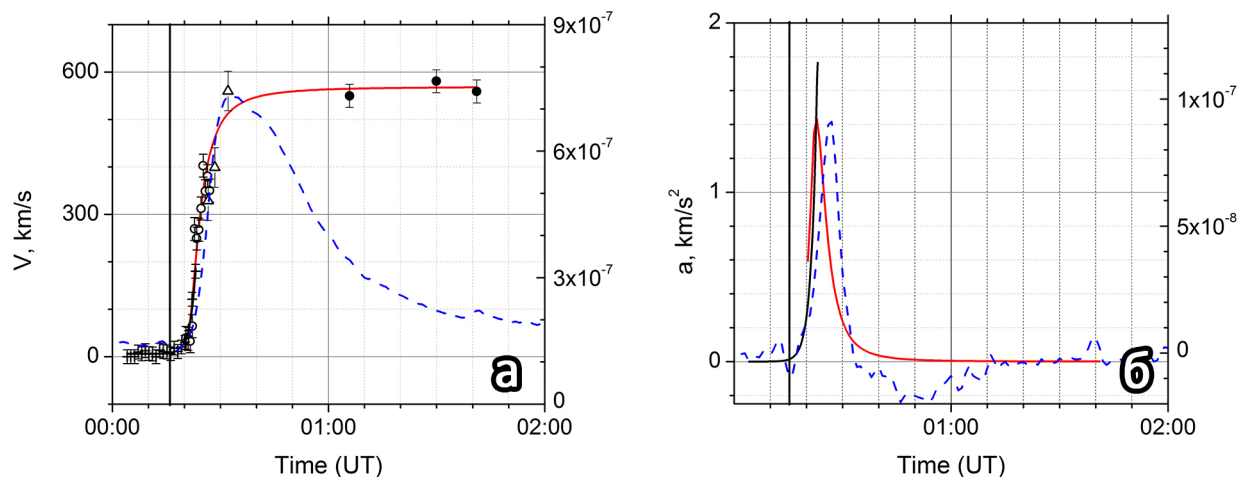


Рисунок 1.20: КВМ 29 июня 2011 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синей пунктирной линией показана интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. б - ускорение КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синяя пунктирная линия - производная интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки.

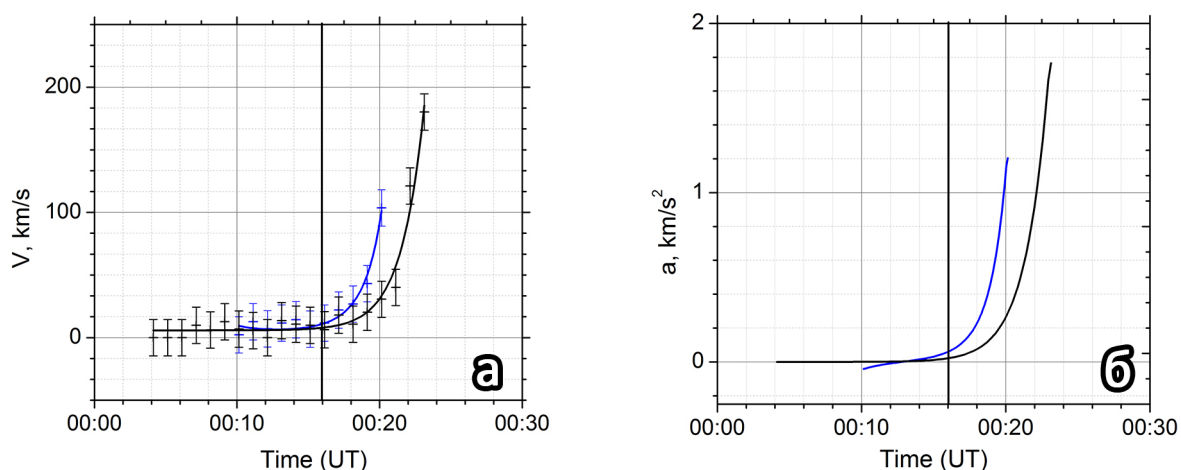


Рисунок 1.21: КВМ 29 июня 2011 года. а - профиль скорости для внутреннего протуберанца (синяя линия) и внешнего (черная линия). б - ускорение для внутреннего протуберанца (синяя линия) и внешнего (черная линия). Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки.

На Рис 1.21 показаны зависимости скорости и ускорения малого (черная линия) и большого (синяя линия) эруптивных протуберанцев. Черными вертикальными линиями отмечены начало связанной с КВМ вспышки.

1.4 О возможных механизмах эрупции протуберанцев

Исследование возникновения и движения 10 лимбовых КВМ показало, что для всех рассмотренных событий толчком для формирования КВМ стала эрупция протуберанца. Возникает вопрос, что же послужило причиной для эрупции самого протуберанца. В литературе рассмотрено много моделей, описывающих начало движения протуберанца в следствии нарушения его первоначального равновесия.

Протуберанцы проникают относительно высоко в корону и могут находиться в равновесии в течение длительного времени. Считается, что равновесие протуберанца, препятствующее его падению, обеспечивают магнитные силы.

В монографии Филиппова [103] обсуждаются модели равновесия протуберанцев. Одна из таких моделей была предложена Киппенханом и Шлютером (1957) [104]. В этой модели высокопроводящая плазма протуберанца покоится в “тамаке” магнитных силовых линий, препятствующих стеканию вещества в хромосферу. Для устойчивого равновесия силовые линии должны иметь кривизну, направленную вверх, создавая яму, которая заполняется плазмой.

Альтернативная модель равновесия протуберанцев, предложенная Куперусом и Рааду в 1974 году [105], предполагает наличие сильного электрического тока вдоль волокна, который отталкивается от токов, индуцируемых в фотосфере. Противоположно направленные токи отталкиваются, так что протуберанец как бы лежит в магнитной подушке.

Одна из главных трудностей моделей равновесия протуберанцев - это образование ямки на вершине силовых линий. Наиболее простым кажется прогиб арки под действием веса протуберанца. Чем больше вес грузика на вершине арки, тем более устойчиво равновесие [106]. Правда это справедливо только при достаточно больших значениях плазменного β , в то время как в короне β обычно полагается малым. Также остается неясным механизм доставки большого количества вещества на вершину арки. По всей вероятности, следует ожидать, что прогиб в вершине арки формируется до накопления вещества в нем.

Если все сколько-нибудь значимые источники поля находятся под фотосферой (при этом в короне - потенциальное поле), то силовые линии с прогибом могут существовать только вблизи особых точек типа седло. Для их появления нужна по крайней мере квадрупольная конфигурация магнитного поля [103].

В монографии Филиппова было показано, что область прогнутых силовых линий имеет небольшую протяженность по высоте, при которой модель будет устойчива. Если внешнее магнитное поле в области протуберанца, начиная с какой-то высоты R , спадает быстрее чем $1/R$, то эта высота будет предельной для спокойного протуберанца. При нарушении данного условия протуберанец теряет равновесие и может эруптировать.

Рассмотренные выше модели двумерны и иллюстрируют лишь принцип равновесия, указывая основные силы, ответственные за поддержку вещества в протуберанце.

Добавление аксиального поля приводит в простой аркаде к сдвигу силовых линий над нейтральной линией. Замкнутые силовые линии превращаются из окружностей в трехмерные спирали, навивающиеся на цилиндрическую поверхность, вытянутую вдоль оси протуберанца. Таким образом общая структура одной из трехмерных моделей приобретает вид жгута магнитных силовых линий (магнитного жгута), помещенного внутрь простой аркады.

Одна из моделей, представляющих волокно в виде магнитного жгута, показывает возможность образования прогиба силовых линий в арках биполярной конфигурации, деформируемых сдвиговыми движениями вблизи нейтральной линии [107, 108]. Основания силовых линий, расположенных во внутренней части аркады, под куполом основной массы арок, выносятся сдвиговыми движениями из области сильного магнитного поля. Таким образом, магнитное давление, оказываемое вышележащими арками по краям меньше, чем

в остальной части аркады. Деформируемые силовые линии стремятся расшириться, но встречают сопротивление поля, под действием которого устанавливается форма линии. Прогнутые силовые линии располагаются вдоль нейтральной линии и в проекции сверху приобретают форму буквы S. Дальнейшее увеличение смещения оснований силовых линий приводит к пересоединению. В результате из прогнутых силовых линий образуются винтовые силовые линии. Такая конфигурация описывает магнитный жгут.

Эрупция протуберанца - есть результат нарушения его равновесия. В литературе рассмотрены различные механизмы нарушения равновесия. Мы рассмотрим одну такую модель, предложенную Chen и Shibata (2000) [63], которая автору представляется как одна из наиболее реалистичных. Модель рассматривает всплытие нового магнитного потока, последующее магнитное пересоединение между полем всплывающего магнитного потока и полем, существующим в короне, который возмущает магнитную конфигурацию в области протуберанца, нарушая установившееся равновесие и приводя к эрупции данного протуберанца (Рис 1.22).

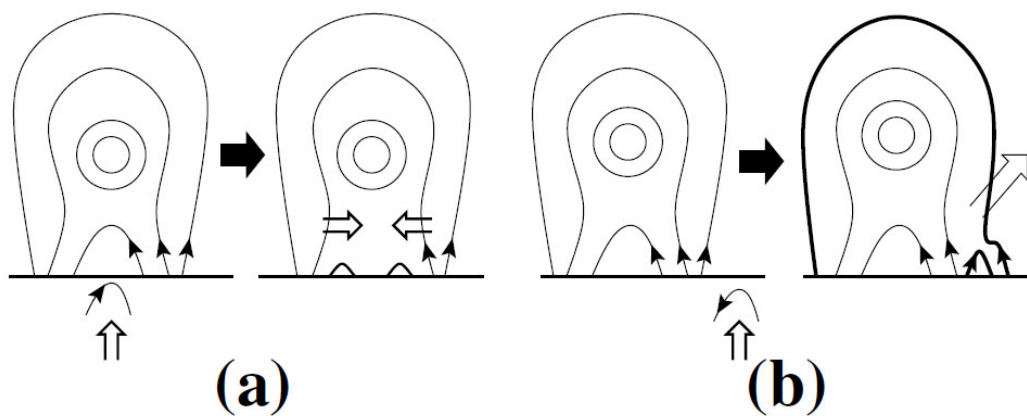


Рисунок 1.22: Схематичное изображение всплывающего магнитного потока как триггера эрупции КВМ. (a) - всплытие магнитного потока в области канала волокна приводит к перестройке существующего магнитного поля, что приводит к уменьшению магнитного давления данной структуры. Давление плазмы по бокам приводит к образованию токового слоя. (b) - всплытие магнитного потока за пределами канала волокна. В этом случае происходит магнитное пересоединения всплывающего потока с корональной петлей, отмеченной на рисунке жирной линией, что приводит к расширению этой петли.

Вследствие этого, нижележащий магнитный жгут поднимается, образуя под собой токовый слой вблизи нейтральной линии магнитного поля. Рисунок и описание рисунка взято из работ [109]

На Рис 1.22 приведено схематичное изображение всплывающего магнитного потока как триггера эрупции КВМ. Показано два возможных сценария: всплытие магнитного потока в области канала волокна и за пределами этой области. Развитие события по первому сценарию показано на Рис 1.22(a). Всплытие магнитного потока в области канала волокна приводит к перестройке существующего магнитного поля, что приводит к уменьшению магнитного давления данной структуры. Давление плазмы по бокам приводит к образованию токового слоя. Второй сценарий рассмотрен Рис 1.22(b). В этом случае происходит магнитное пересоединения всплывающего потока с корональной петлей, отмеченной на рисунке жирной линией, что приводит к расширению этой петли. В следствие этого, нижележащий магнитный жгут поднимается, образуя под собой токовый слой вблизи нейтральной линии магнитного поля.

Используя магнитограммы и изображения в белом свете по данным SDO, мы попытались обнаружить всплытие нового магнитного потока или образование новых пятен вблизи активной области. Наблюдения проводились для пяти событий в течение 2 суток до начала эрупции протуберанца в данной активной области. Заметная эволюция магнитных полей и пятен была обнаружена только для одного события 8 марта 2011 года (Рис 1.23). Можно предположить, что в этом случае мог сработать механизм нарушения равновесия, предложенный в работе [109]. В других рассмотренных событиях видимых изменений в магнитном поле и структуре пятен замечено не было. Возможно, для этих событий сработал другой механизм нарушения магнитного равновесия в области эрупции протуберанца.

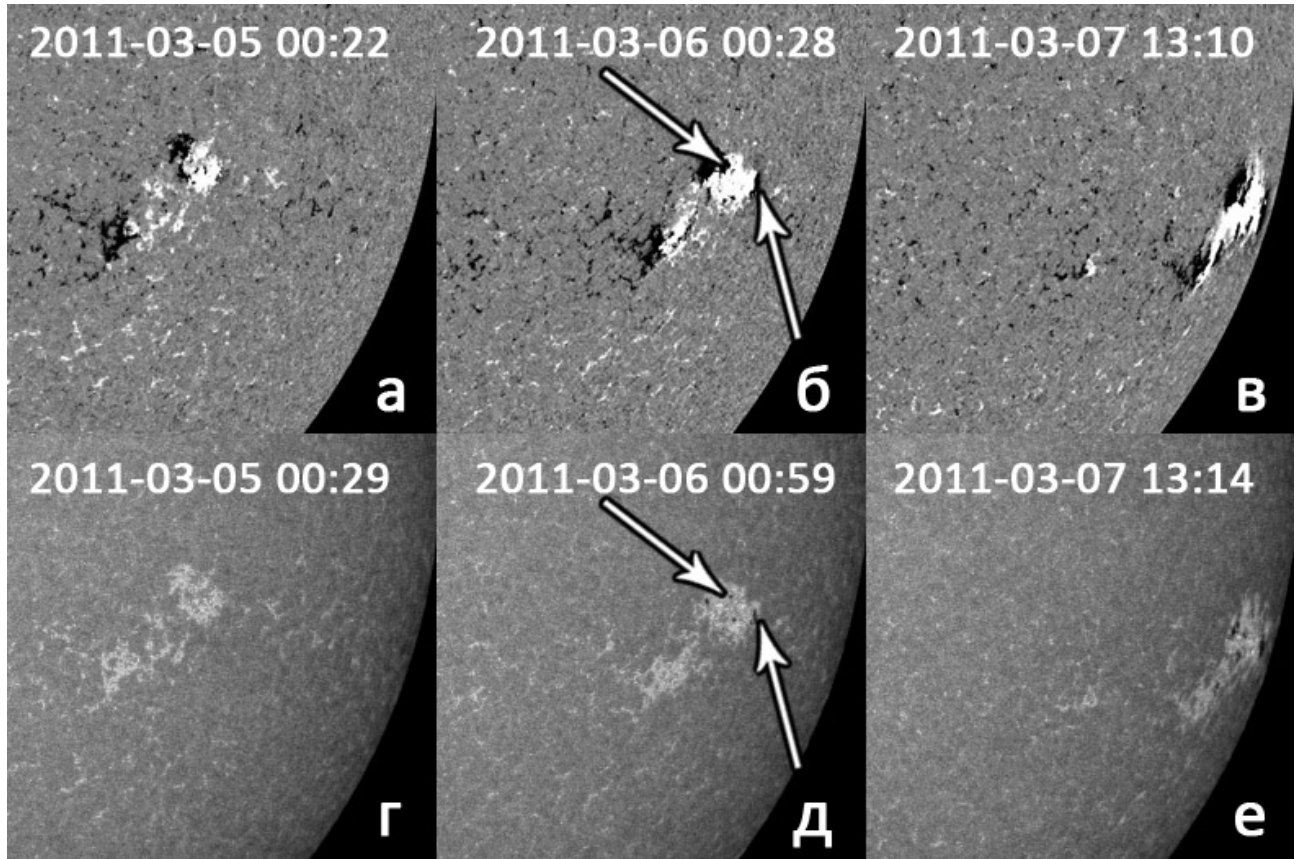


Рисунок 1.23: Событие 08 марта 2011. а-в - магнитограммы HMI/SDO. г-е - изображения SDO/AIA в спектральном диапазоне 1700 Å. Стрелками отмечены места появления пор на изображениях в канале 1700 Åи соответствующие места на магнитограммах, в которых наблюдается всплытие магнитного потока.

1.5 О связи эрупции волокна (протуберанца) с солнечными вспышками

Анализ кинематики 10 изученных событий показал, что временные профили скорости протуберанца и фронтальной структуры КВМ до достижения максимума скорость синхронизованы с нарастанием интенсивности мягкого рентгеновского излучения I_{SXR} из области связанной с КВМ вспышки. Ускорение КВМ до достижения максимального значения оказывается синхронизованным с нарастанием потока жесткого рентгеновского излучения I_{HXR} , а также с нарастанием производной dI_{SXR}/dt .

Такая синхронизация ранее уже обсуждалась в работах [47, 48]. В статье Temmer и др. (2010) [48] авторы отмечают, что такая взаимосвязь профилей скорости КВМ и интенсивности I_{SXR} , а также ускорения КВМ и интенсивности I_{HXR} хорошо согласуется со “стандартной” моделью КВМ-вспышка.

Впервые модель была предложена Корр and Pnevman (1976) [110] и позднее приобрела название “CSHKP model” по первым буквам фамилий авторов статей, внесших тот или иной вклад в появление этой модели (Carmichael 1964, Sturrock 1966, HiraYama 1974, Корр-Рневман 1976). Кратко модель можно описать следующим образом: (1) магнитное пересоединение происходит на вершине магнитной петли; (2) заряженные частицы ускоряются в области пересоединения; (3) частицы двигаются к основаниям магнитной петли (радиоизлучение) и бьют по хромосфере (жесткое рентгеновское излучение, $H\alpha$ излучение и вспышечные ленты); (4) нагретая хромосферная плазма испаряется в корону (мягкое рентгеновское излучение, аркады петель).

Позднее в эту модель добавили КВМ. В данной модели после того, как магнитная структура (магнитный жгут или протуберанец) теряет равновесие и начинает подниматься, под ней образуется токовый слой и происходит магнитное пересоединение. Как пишут авторы работы [48], это пересоединение имеет два важных последствия для ускорения КВМ: (1) магнитное пересоединение уменьшает натяжение магнитного поля над магнитным жгутом, сила которого направлена вниз [49]; (2) увеличивается полоидальная составляющая магнитного поля в магнитном жгуте [111], что, как полагается, является главной движущей силой эрупции магнитного жгута [66, 112].

На Рис 1.24 приведена иллюстрация взаимосвязи вспышечных процессов с динамическими процессами КВМ и магнитного жгута. КВМ, движущийся в направлении от поверхности Солнца, вытягивает силовые линии и уносит часть вещества с собой, создавая разрежение в области образования КВМ. Более плотная плазма по бокам от места эрупции устремляется в это место, еще больше поджимая вытянутые силовые линии, что приводит к образованию токового слоя и магнитному пересоединению. Чем больше вещества с вмороженным в нее магнитным полем придет в место магнитного пересоединения, тем сильнее будет вспышка. Последующее пересоединение силовых линий приводит к усилению полоидального поля в эруптирующем магнитном жгуте, что приводит к появлению силы, направленной от поверхности Солнца (Сила Лоренца). Рисунок взят из статьи Temmer и др. (2010) [48]

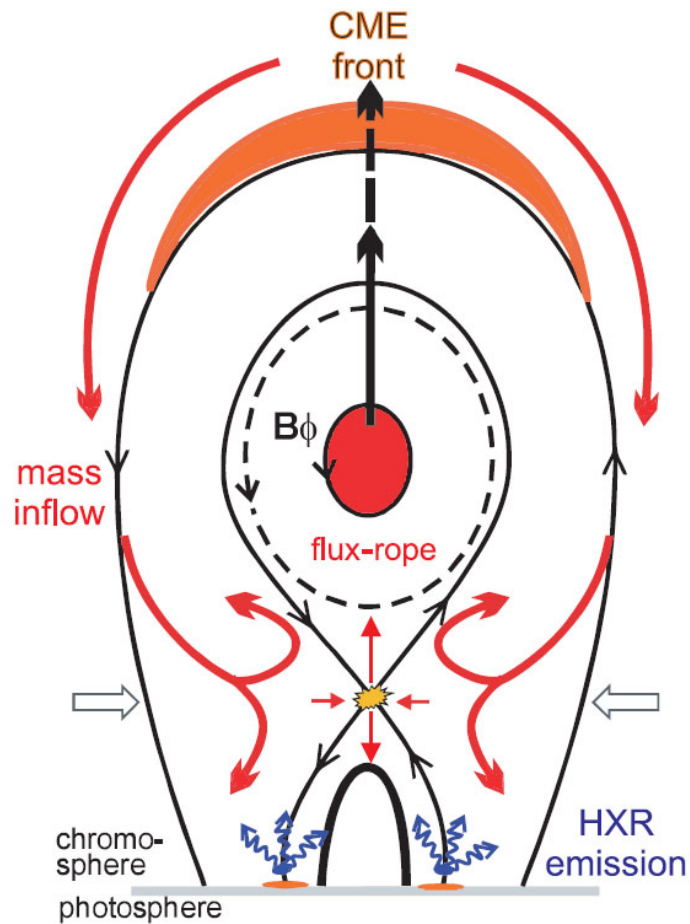


Рисунок 1.24: Иллюстрация взаимосвязи вспышечных процессов с динамическими процессами КВМ и магнитного жгута. КВМ,двигающийся в направлении от поверхности Солнца, вытягивает силовые линии и уносит часть вещества с собой, создавая разрежение в области образования КВМ. Более плотная плазма по бокам от места эрупции устремляется в это место, еще больше поджимая вытянутые силовые линии, что приводит к образованию токового слоя и магнитному пересоединению. Чем больше вещества с вмороженным в нее магнитным полем придет в место магнитного пересоединения, тем сильнее будет вспышка. Последующее пересоединение силовых линий приводит к усилению полоидального поля в эруптирующем магнитном жгуте, что приводит к появлению силы, направленной от поверхности Солнца (Сила Лоренца).

Рисунок взят из статьи Temmer и др. (2010) [48]

1.6 Изменение геометрических характеристик КВМ в зависимости от времени.

В данном разделе приводятся результаты исследования изменения со временем таких геометрических параметров КВМ как: (1) угловой размер; (2) траектория движения КВМ; (3) отношение продольного размера КВМ к поперечному. Этот анализ проводился для 8 КВМ зарегистрированных 13 июня 2010 года, 8 августа 2010 года, 11 февраля 2011 года, 8 марта 2011 года, 27 марта 2011 года, 27 апреля 2011 года, 7 июня 2011 года и 29 июня 2011 года. Максимальная скорость рассмотренных выбросов массы менялась от 490 км/ч до 1860 км/ч. Средняя продолжительность нарастания скорости до максимума - 25 минут.

Указанные геометрические характеристики обсуждаются в Разделе 1.1.3.

На Рис 1.25 приведены результаты исследования динамики геометрических характеристик КВМ. Видно, что угловой размер L_w для всех событий растет и увеличивается в 0.5-6 раз за временной промежуток от 2.5 до 6.5 минут. В среднем угловой размер увеличивается в 1.5 раза за 4.5 минут Рис 1.25(а). Для 8 изученных событий были построены зависимости углового размера КВМ от времени по данным SDO/AIA и PROBA2/SWAP. На Рис 1.25(а) показано определение углового размера выброса как угла с вершиной в центре солнечного диска и с лучами, проведенными к наиболее удаленным по широте точкам границы выброса. Видно, что для всех рассмотренных КВМ величина L_w растет со временем. Диапазон изменения L_w составил для отдельных выбросов примерно 0.5-6. Характерный масштаб времени изменения углового размера КВМ в полтора раза в среднем составляет ~ 4.5 минуты.

Давно было замечено, что КВМ может отклоняться от радиального направления при движении в поле зрения коронографов LASCO. Нами были измерено, на сколько градусов отклоняются 8 событий в течение фазы формирования КВМ и его начального движения в поле зрения SDO/AIA. Данное отклонение присутствует на всех рассмотренных КВМ и составляет от 5.5 до 67 градусов в среднем. Сама траектория движения КВМ со временем меняется слабо в поле зрения SDO/AIA и не превышает 2.5% от среднего (Рис 1.25 (б)).

Отношение продольного размера тела КВМ к поперечному удалось надежно измерить только для 6 событий из выборки (13 июня 2010 года, 8 августа 2010 года, 8 марта 2011 года, 27 марта 2011 года, 27 апреля 2011 года и 29 июня 2011 года). Для всех рассмотренных событий тело КВМ расширяется быстрее в продольном направлении в начальные моменты времени в поле зрения SDO/AIA (Рис 1.25(в)). Затем отношение постепенно уменьшается в среднем на 0.2 за 6 минут. Для 3 событий этот параметр выходит на единицу в поле зрения SDO/AIA. Это можно интерпретировать как выход на автомоделный (или самоподобный) режим расширения КВМ, когда форма границы выброса не меняется со временем.

При изучении событий 29 июня 2011 года и 8 марта 2011 года мы обратили внимание на то, что эрупция протуберанцев происходит достаточно высоко над лимбом, так что формирование фронтальной структуры КВМ увидеть в поле зрения SDO/AIA не удастся. Поэтому была сделана попытка найти связь между высотами ЭП и КВМ. Наш анализ показал, что существует корреляция между высотой ЭП перед началом его эрупции и высотой фронтальной структуры КВМ перед началом его быстрого движения (Рис 1.26). Эта корреляция должна быть проверена на большей статистике.

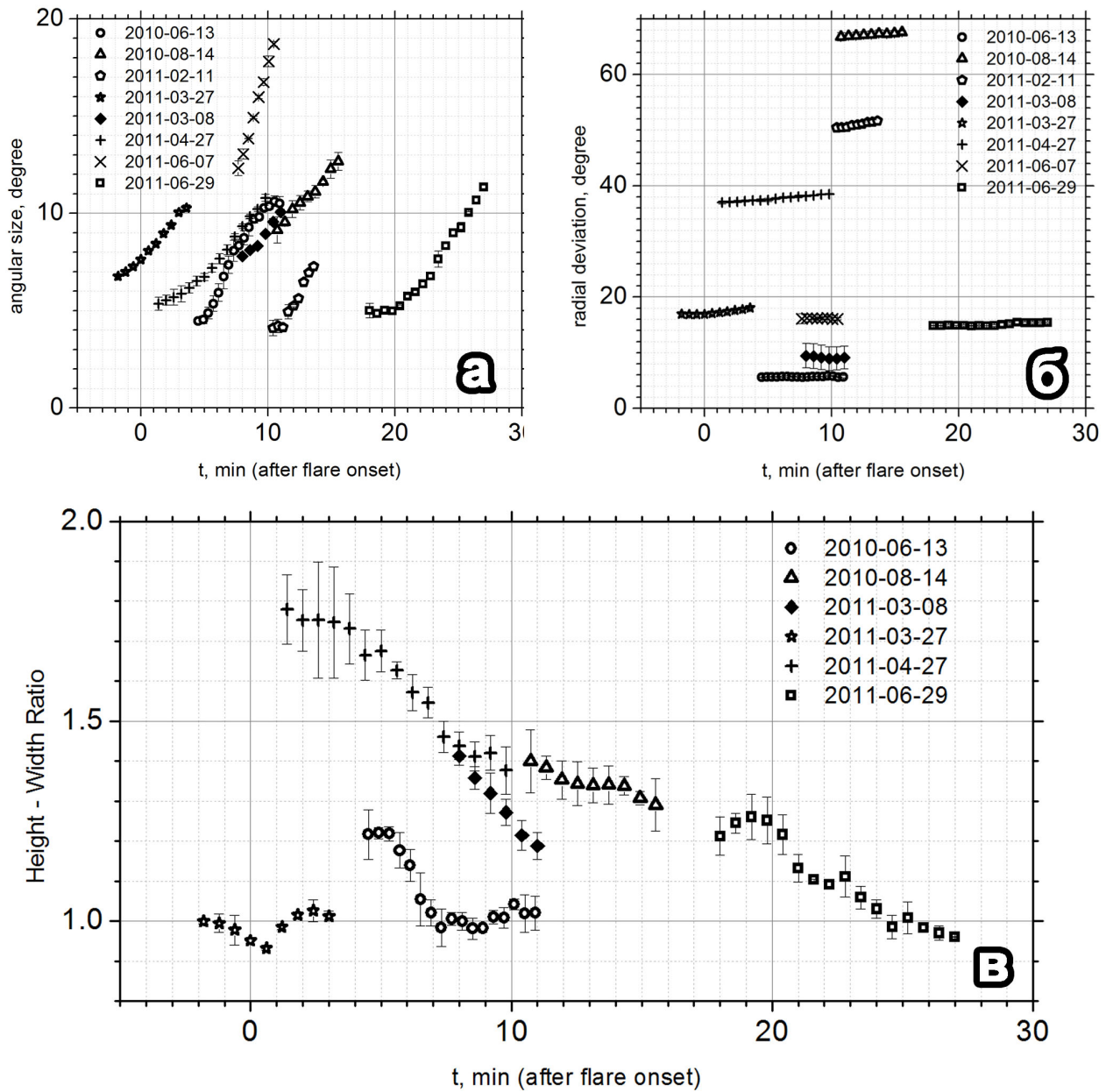


Рисунок 1.25: Параметры КВМ. а - зависимость углового размера КВМ от времени. б - зависимость отклонения траектории движения КВМ от радиального направления от времени. По углу наклона точек можно оценить, как сильно меняется траектория движения КВМ со временем. в - зависимость отношения продольного размера КВМ к поперечному от времени.

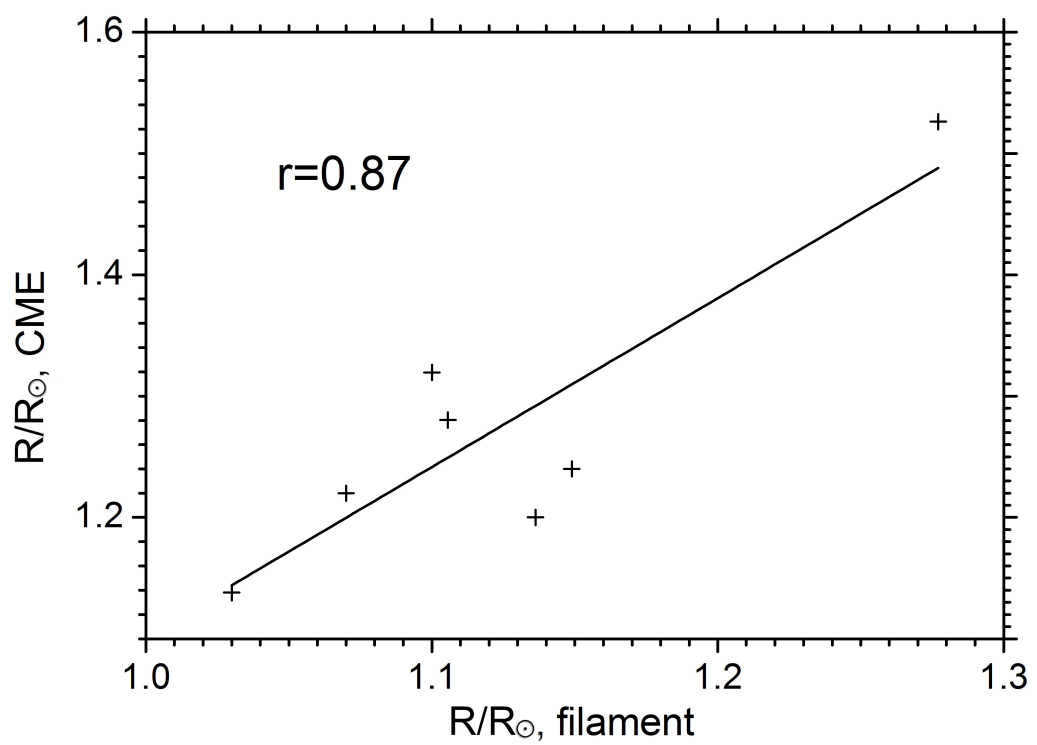


Рисунок 1.26: Прямая линия - линия регрессии. r - коэффициент корреляции.

1.7 Основные результаты исследования, представленные в Главе 1.

В данной главе исследовано формирование и начальная стадия движения 10 лимбовых КВМ связанных с эрупцией протуберанца или горячей эмиссионной петли. Установлено, что для всех рассмотренных событий существуют общие особенности формирования КВМ и в то же время присутствуют индивидуальные черты.

На основании проведенного анализа общая морфологическая и физическая картина развития КВМ, связанных с эрупцией протуберанца, выглядит следующим образом:

1. Формирование КВМ начинается с эрупции протуберанца или горячей эмиссионной петли.
2. Эруптивный протуберанец (эмиссионная петля) возмущает вышележащие структуры короны, что в некоторых случаях приводит к возникновению последовательно движущихся вверх с разной скоростью петлеобразных структур. При этом, для нескольких событий петлеобразные структуры, возникающие позднее имеют темп набора скорости выше, чем структуры, которые начинают свое движение раньше.
3. Еще одним следствием возмущения эруптивным протуберанцем вышележащих слоев короны является возникновение на определенной высоте прообраза будущей фронтальной структуры. Такая квазифронтальная структура с самого начала своей визуализации вовлекается в движение.
4. После достижения внутренних петель этой квазифронтальной структуры окончательно формируется фронтальная структура КВМ.
5. В то же время формирование практически каждого рассмотренного КВМ характеризуется различными особенностями. К таким особенностям относятся форма и вид квазифронтальной структуры, характер проявления воздействия эруптивного протуберанца на вышележащие области короны, начальная высота эруптивного протуберанца, возникновение блобов, движущихся вдоль эруптивного протуберанца и т.д.

Исследование кинематики рассмотренных КВМ показало, что:

1. Движение протуберанца с небольшой скоростью начинается за несколько минут до начала вспышки.
2. Начальное движение фронтальной структуры КВМ удалось зафиксировать лишь после начала вспышки.
3. Показано, что временной профиль скорости КВМ (фронтальной структуры КВМ) может быть двух типов. В одном случае скорость быстро достигает максимума, затем достаточно быстро уменьшается до определенного значения и далее меняется слабо. Во втором случае скорость КВМ начинает слабо меняться практически сразу после достижения максимума.
4. Временные профили скорости протуберанца и фронтальной структуры КВМ до достижения максимума скорость синхронизованы с нарастанием интенсивности мягкого рентгеновского излучения I_{SXR} из области связанной с КВМ вспышки. Ускорение КВМ до достижения максимального значения оказывается синхронизованным с нарастанием потока жесткого рентгеновского излучения, а также с нарастанием производной dI_{SXR}/dt .

Анализ геометрических характеристик рассмотренных КВМ показал, что:

1. Для всех рассмотренных КВМ угловой размер L_w растет со временем. Диапазон изменения L_w составил для отдельных выбросов примерно 0.5-6. Характерный масштаб времени изменения углового размера КВМ в полтора раза в среднем составляет ~ 4.5 минуты.
2. Показано, что ось движения всех рассмотренных КВМ отклоняется от радиального направления в диапазоне значений от 5.5 до 67 градусов. Сама траектория движения КВМ со временем меняется слабо в поле зрения SDO/AIA и не превышает 2.5% от среднего.
3. Для всех рассмотренных событий отношение продольного размера тела КВМ к поперечному в начальные моменты меняется слабо. Затем это отношение постепенно уменьшается в среднем на 0.2 за 6 минут. Для 3 событий этот параметр выходит на единицу в поле зрения SDO/AIA. Это можно интерпретировать как выход на автомобильный (или самоподобный) режим расширения КВМ, когда форма границы выброса не меняется со временем.

Глава 2

Исследование формирования и распространения ударных волн, связанных с КВМ, по данным с высоким временным и пространственным разрешением

Ударные волны - один из главных факторов, влияющих на космическую погоду. Они могут ускорять частицы до высоких энергий и быть причиной геомагнитных бурь. Долгое время ударные волны изучались только по результатам прямых измерений в межпланетном пространстве или по данным радиоизлучений (радиовсплесков II типа) как в короне так и межпланетном пространстве.

Последние 10 лет были временем интенсивных коронографических и спектроскопических исследований ударных волн, связанных с КВМ [71]. Считается, что ударная волна - это граница диффузной области в поле зрения инструментов SDO или коронографов, например, LASCO, окружающая (не всегда полностью) более яркое тело КВМ. Но при этом скорость всех участков границы диффузной области, которые принимаются за ударную волну, должна превышать величину $V_{MS} + V_{SW}$. Здесь V_{MS} скорость быстрых магнитозвуковых волн, V_{SW} - скорость окружающего солнечного ветра, по которому распространяется ударная волна. Ударную волну можно выделить из распределения яркости вдоль прямой линии, пересекающей границу диффузной области. Если на границе диффузной области возникнет резкий скачок яркости, есть основание считать такой скачок ударной волной [72]. Здесь основная проблема заключается в том, что выделить такие скачки удается, как правило, в нескольких небольших по широте участках границы диффузной области. Отсутствие таких скачков на других участках границы диффузной области мы связываем с тем, что шумовая амплитуда яркости на этих участках границы диффузной области сравнима или больше амплитуды ударной волны. Наличие ударных волн в короне определяется также по наблюдениям в некоторых линиях крайнего ультрафиолета, позволяющих оценить наличие скачков плотности, температуры и др. [73]. Считается также, что радио всплески II типа отражают распространение ударной волны. Одним из ключевых вопросов, касающихся ударных волн, связанных с КВМ, является вопрос о природе этих волн: являются ли они поршневыми с телом КВМ в качестве "поршня", или являются взрывными. Мы провели исследование, направленное на поиск ответа на этот вопрос для ударных волн, зарегистрированных в нижней короне по данным инструментов SDO.

2.1 Методы определения ударных волн по данным с высоким временным и пространственным разрешением

Как было сказано ранее во Введении, если скорость КВМ превышает локальную альвеновскую скорость в короне или в межпланетной среде, то такой выброс может приводить к образованию ударной волны. Выделение ударных волн в белом свете является трудной задачей. Изгибы в стримерах отклоненных КВМ и изменения в динамических спектрах II типа служат индикаторами наличия ударной волны на флангах КВМ. В настоящее время к таким индикаторам также относят резкие яркие границы диффузной области перед фронтальной частью быстрых КВМ [72, 113, 114].

Данный раздел будет посвящен описанию методики выделения ударных волн на профиле интенсивности в области резкой границы диффузной области перед фронтальной структурой быстрых КВМ в нижней короне по данным SDO/AIA.

Для решения этой задачи был разработан пакет программ на языке IDL, позволяющий в интерактивном режиме строить профиль яркости вдоль выбранной линии сканирования и сопоставлять тот или иной скачок яркости на профиле с его положением на изображении. Такая обратная связь дает возможность обнаружить резкий скачок яркости, который соответствует фронту ударной волны. Результаты работы данного пакета программ для одного события приведены на Рис 2.1.

Методика предварительной обработки данных заключается в следующем. (1) Для вывода изображения на экран и визуального определения фронта УВ используется разностное изображение с шагом в минуту, делением на кадр в ранний момент времени и дополнительной фильтрацией для улучшения контраста и яркости, подробнее написано в разделе 1.1 (Рис 2.1(а)). (2) Далее по трем точкам на границе диффузной области впереди фронтальной структуры тела КВМ описывается окружность, центр которой используется в качестве начала прямой, вдоль которой производится сканирование профиля яркости. Также, соединив центр данной окружности и центр Солнца, получим позиционный угол для определения радиального направления движения КВМ и связанной ударной волны. Сканирования профиля яркости производится в разных направлениях с углом, отсчитываемым от луча, проведенного из центра описанной окружности параллельно горизонтальной оси x . Похожий, но отличающийся в деталях метод выделения ударной волны ранее был предложен в работе [78].

Для получения профиля яркости вдоль выбранной линии сканирования используется предварительная обработка данных, отличающаяся от обработки данных, описанной в Разделе 1.1.1 и использовавшаяся для исследования фронтальной структуры КВМ и эруптивных протуберанцев в Главе 1. В данном случае, разностное изображение получается путем вычитания из него фиксированного кадра в ранний момент времени, без дополнительной обработки по яркости и контрасту. Для выделения фона изображения до появления ударной волны, используется усреднение профиля яркости вдоль выбранного направления по изображениям, полученным в четыре более ранних момента времени. Полученная таким образом шумовая составляющая показана пунктирной линией на Рис 2.1(б-в). Черная линия на Рис 2.1(б-в) - профиль яркости вдоль выбранного направления для изображения в текущий момент времени. На этом профиле отчетливо наблюдается скачок яркости с шириной, сравнимой с величиной пространственного разрешения инструмента (0.6 угл.сек.). Данный скачок мы идентифицируем с фронтом ударной волны. Физическое обоснование этого будет дано ниже при обсуждении конкретного события. Рис 2.1(б) идентичен рисунку 2.1(в) и показывает место скачка яркости в увеличенном масштабе. На Рис 2.1(б-в) резкий скачок яркости отмечен красной стрелкой и расстоя-

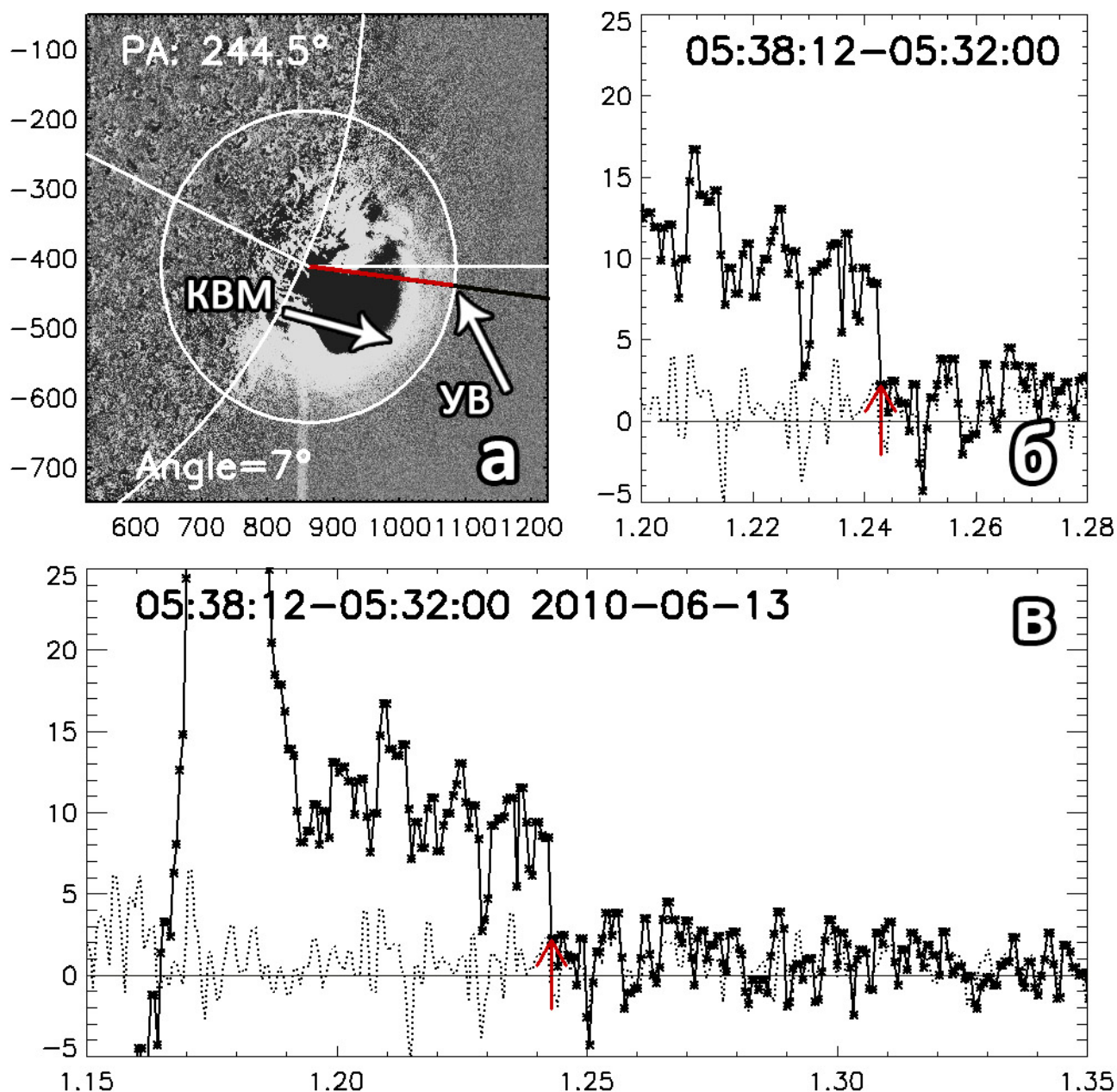


Рисунок 2.1: Событие 13 июня 2010 года. (а) - разностное изображение. Стрелками указаны границы тела КВМ и связанной ударной волны. Окружность описана по границе диффузной области. Сканирование ведется вдоль прямой с началом в центре окружности. Угол сканирования отсчитывается от прямой с началом в центре окружности и параллельным оси x . Черная прямая - линия сканирования. (б) - распределение яркости вдоль линии сканирования в области скачка яркости. Красная стрелка указывает на скачок яркости (фронт УВ) и соответствует концу красного отрезка на Рис 2.1(а). (в) - распределение яркости, что и на Рис 5(б) но в большем диапазоне по оси x . Пунктирная линия - среднее по 4 изображениям в ранние моменты времени вдоль линии сканирования.

ние, на котором находится эта стрелка, соответствует положению границы, разделяющий участки линии сканирования, окрашенной в красные и черные цвета.

Для более надежного выделения полезного сигнала, включая скачок яркости на границе диффузной области, в каждом пикселе вдоль линии сканирования производится усред-

нение яркости по дуге окружности. Эта дуга окружности по форме совпадает с аналогичной дугой окружности на границе диффузной области, и вершина этой дуги помещается в данный пиксель (Рис 2.2). Длина дуги окружности $l(t)$ может варьироваться для различных моментов времени и в каждый момент времени подбирается ее оптимальное значение. Такой подход выделения яркости вдоль линии сканирования с фиксированным значением длины дуги окружности в конкретный момент времени позволяет более надежно выделять ударную волну, чем это делается с использованием методики, предложенной в работах [77, 78], где усреднение выполняется по дуге окружности, проведенной по границе фронтальной структуры КВМ и длина дуги измеряется в градусах, что предполагает зависимость ее длины от радиуса. При большем усреднении может увеличиваться ширина скачка яркости на профилях сканирования.

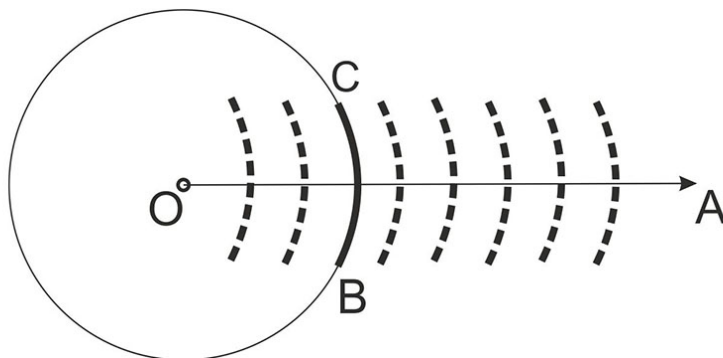


Рисунок 2.2: Иллюстрация метода сканирования. Пусть OA - линия сканирования профиля яркости, проведенная из центра окружности, описанной по границе диффузной области. BC - дуга окружности с заданной для конкретного момента времени длиной $l(t)$. Усредненное значение яркости $b(r)$ вдоль дуги BC присваивается точке $x(r)$ на линии сканирования. Подобное усреднение по дуге окружности фиксированной длины $l(t)$ производится в каждой точке линии сканирования OA .

2.2 Отбор событий для анализа

Для выделения ударных волн, связанных с КВМ, по данным SDO/AIA использовался следующий подход для отбора событий:

1. С данным событием связаны радиовсплески II типа в моменты близкие к появлению КВМ.
2. Перед фронтальной структуры КВМ существует диффузная область с резкой границей
3. Измеренная скорость границы диффузной области превышает локальную скорость быстрых магнитозвуковых волн и скорость солнечного ветра.

Поиск подходящих событий велся с использованием каталога радиовсплесков II типа www.ips.gov.au/Solar/2/6/1. Время начала радиовозмущения сопоставлялось со вспышкой и ее локализацией на Солнце по данным ресурса <http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/>. Если источник вспышки находился вблизи лимба, то анализировались изображения, полученные SDO/AIA в каналах 193 Å и 211 Å. После этого выяснялось наличие на этих изображениях КВМ. Далее проверялись условия (2) и (3). Если эти

условия выполнялись, то данное событие подвергалось полной обработке, по методике, описанной в разделе 2.1.

Так как поле зрения SDO/AIA не превышает 42 угловых минут, то на события, отобранные для анализа, накладываются дополнительные условия. Скорость КВМ не должна быть большой, чтобы выброс массы не вышел из поля зрения инструментов SDO/AIA слишком быстро.

Нам удалось обнаружить лишь два события, удовлетворяющие всем описанным условиям, в период с июня 2010 года по январь 2014 года. Эти события произошли 13 июня 2010 года и 7 декабря 2012 года. В то же время заметим, что в некоторых наших работах [79] мы отмечали существование ударной волны, связанной с КВМ 7 июня 2011 года, а в работе [115] анализируются ударные волны, зарегистрированные 3 ноября 2011 года. В диссертации не приводится анализ этих ударных волн, т.к. эти события полностью не удовлетворяют условиям (1)-(3), указанным выше.

2.3 Результаты исследования распространения ударных волн, связанных с КВМ, и их природы по данным с высоким временным и пространственным разрешением

КВМ 13 июня 2010 года возник в активной области NOAA 11079 и был связан со вспышкой рентгеновского класса M1.0 в гелиоцентрических координатах S24W82. Спектрограмма показала радиовсплеск II типа с началом примерно в 05:37:30 (Рис 2.5(в)). Ударная волна для этого события изучалась автором диссертации в работе [79]

Диффузная область перед фронтальной частью КВМ впервые видна в 05:37:12 в поле зрения SDO/AIA в линии 211 Å. Первые резкие скачки яркости удалось обнаружить в 05:37:36 по сканам, полученным по методике, описанной в разделе 2.1.

На Рис. 2.3(а-в) показаны три изображения в разные моменты времени для КВМ, зарегистрированного 13 июня 2010 г. На изображениях выделяется более яркая область - фронтальная структура тела КВМ, и окружающее ее диффузная область. Сопоставив скорость V_{dr} границы диффузной области с оцененной скоростью распространения быстрых магнитозвуковых волн V_{MS} (скорость солнечного ветра (направленного от лимба движения вещества) на этих расстояниях в активной области должна быть близка к нулю), имеем $V_{dr} > V_{MS}$. Найти скорость быстрой магнитозвуковой волны можно по формуле $V_{MS} = \sqrt{1/2(C_s^2 + V_A^2) + 1/2(C_s^4 + V_A^4 - 2C_s^2V_A^2 \cos 2\theta_b)^{1/2}}$ [116], где V_A - альвеновская скорость, C_s - ионо-звуковая скорость, θ_b - угол между направлением распространения магнитозвуковой волны и направлением магнитного поля. Оценки V_{MS} для данного события проводилась в работах [98, 99] и составили $V_{MS} \approx 476$ км/с. Измеренная скорость границы диффузной области V_{dr} колеблется в диапазоне от 800 до 500 км/с. Таким образом, выполняется условие $V_{dr} > V_{MS}$. Это означает, что граница диффузной области может быть ударной волной. Сканирование яркости в указанных на верхней панели Рис. 2.3 направлениях позволило выявить на границе диффузной области несколько участков, в пределах которых яркость резко меняется при пересечении границы диффузной области (указаны красными стрелками на Рис. 2.3(г-е)). Такие скачки с шириной $d_{SH} \sim \Delta$, где Δ - пространственное разрешение инструмента, мы считаем бесстолкновительными ударными волнами. Действительно, ширина фронта сильной ударной волны в газе близка к средней длине свободного пробега частиц в газе [117]. В корональной плазме оценим среднюю длину свободного пробега между столкновениями электронов с протонами L_{ep} и протонов с протонами L_{pp} на $R = 1.29R_\odot$ для концентрации электронов $N_E \approx 7.5 \times 10^7$ cm^{-3} [99],

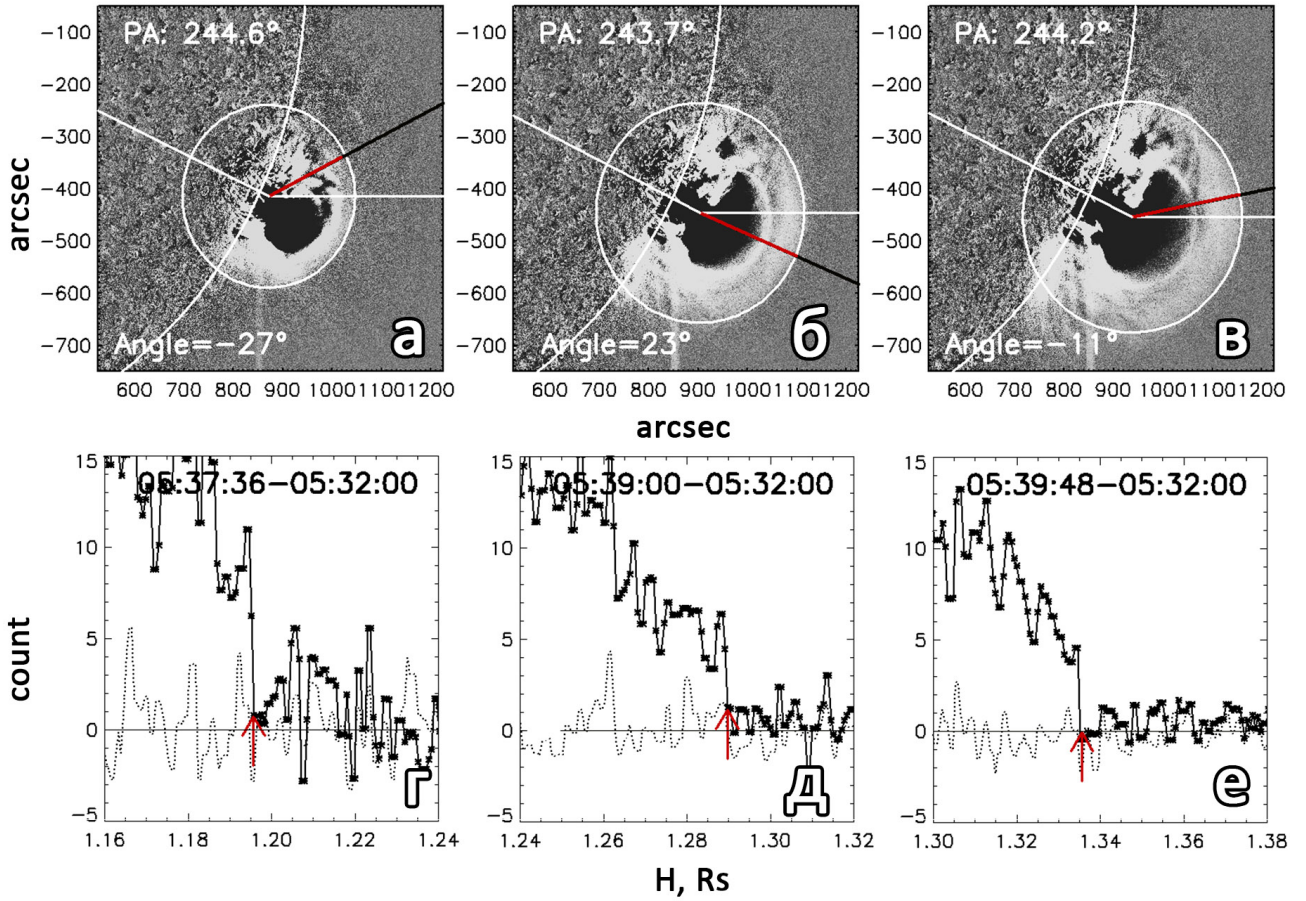


Рисунок 2.3: Событие 13 июня 2010 года. (а-в) - показаны три изображения в разные моменты времени для КВМ, зарегистрированного 13 июня 2010 г. (г-е) - показаны сканы яркости в соответствующие моменты времени. Красная стрелка указывает на скачок яркости, который соответствует фронту ударной волны. Угол (Angle) отсчитывается от горизонтальной белой линии, проведенной из центра окружности.

$T \approx 10^6$ К: $L_{ep} \approx L_{pp} \approx 10^4$ км. Отсюда следует, что $L_{ep}, L_{pp} \gg \Delta \approx 1000$ км. С другой стороны, ширина фронта поперечной бесстолкновительной ударной волны (т.е. движущейся поперек магнитного поля) $\sim r_g$ – ларморовскому радиусу протонов в электронно-протонной плазме, а движущейся вдоль магнитного поля $\sim l_S$ – длине рассеяния частиц плазмы на флуктуациях параметров волн, возбуждаемых в окрестности ударной волны [118, 119]. Для $T_p \approx 10^6$ К, $B \approx 2$ Гс имеем $r_g \approx 4$, т.е. $r_g \ll \Delta$. Скачки яркости, соответствующие такой ширине фронта ударной волны, должны наблюдаться как скачки яркости шириной $\sim \Delta$, что мы и наблюдаем на нижней панели Рис. 2.3. Ударная волна для этого события анализировалась также в работах [78, 98, 120].

Стоит отметить, что фронт ударной волны регистрируется в широком диапазоне углов ($\sim 50^\circ$, Рис 2.3). Фронт ударной волны с максимальной амплитудой перепада яркости регистрируется в разные моменты времени под разными углами. Это можно связать с наличием неоднородного шума перед фронтом ударной волны, который в некоторых случаях не позволяет определить этот фронт. В каждый момент времени отношение полезного сигнала (величины скачка яркости) и шума меняется в зависимости от угла и наилучшим образом удастся зарегистрировать фронт ударной волны там где это отношение максимально.

Наиболее строгим доказательством того, что наблюдаемые скачки яркости являются ударными волнами, будет выполнение на таких скачках условий Ренкина-Гюгонио.

Для события 13 июня 2010 года на высотах до полутора радиусов Солнца наиболее подходящим будет приближение перпендикулярной ударной волны, распространяющейся перпендикулярно внешнему магнитному полю. В этом случае из соотношений Ренкина-Гюгонио вытекают следующие соотношения между скачками параметров плазмы на фронте ударной волны [116]:

$$v_2/v_1 = X^{-1}, \quad (2.1)$$

$$B_2/B_1 = X, \quad (2.2)$$

$$p_2/p_1 = \gamma M^2(1 - X^{-1} + \beta^{-1}(1 - X^2)), \quad (2.3)$$

где $X \equiv \rho_2/\rho_1$ - отношение плотностей, $M \equiv v_1/C_s$ - число Маха, $\beta \equiv 2\mu p_1/B_1^2 \equiv 2c_s^2/\gamma v_A^2$ - плазменная бета. Здесь ρ_1, p_1, v_1, B_1 - плотность, давление, скорость и магнитное поле перед фронтом ударной волны соответственно. Параметры ρ_2, p_2, v_2, B_2 соответствуют значениям параметров возмущенной плазмы. c_s - скорость звука и v_A - альвеновская скорость для невозмущенной плазмы [116].

К сожалению строго проверить выполнение этих условий на наблюдаемых скачках яркости не представляется возможным из-за трудностей, возникающих при нахождении всех параметров, меняющихся при прохождении УВ. Тем не менее удалось оценить изменение некоторых параметров плазмы при переходе через наблюдаемые скачки яркости, которые грубо позволяют сделать вывод о том, что эти скачки яркости действительно возникают на фронте УВ. В работе [99] было найдено отношение плотностей ρ_2/ρ_1 из расщепления гармоники плазменной частоты с использованием радиоспектрограммы. Полученное отношение было сравнено для нескольких моментов времени с теоретическим, в предположении квазиперпендикулярной УВ, с использованием упрощенной формулы [121]:

$$\rho_2/\rho_1 = 2(\gamma + 1)/(D + [D^2 + 4(\gamma + 1)(2 - \gamma)M^{-2}]^{1/2}), \quad (2.4)$$

где $D = (\gamma - 1) + (2/M_s^2 + \gamma/M^2)$ и $M_s = V_{sh}/C_s$. Сравнение экспериментальных и теоретических отношений плотностей в разные моменты времени показали близкие значения.

В работе [98] с использованием формулы (2.4) и соотношений между скачками параметров плазмы на фронте ударной волны (2.1-2.3) авторы оценили температуру плазмы за фронтом ударной волны T_2 . Используя полученное значение T_2 были оценены временные масштабы изменения ионизации в каналах 211 Å и 335 Å по данным SDO/AIA и сравнены с временными масштабами ионизации, полученными из условий скачка. Было найдено хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими значениями.

В обеих работах [98, 99] на основе проведенных оценок плазменных параметров впереди и позади наблюдаемой диффузной области авторы сделали вывод, что данная яркая структура является ударной волной.

При выделении скачков яркости под разными углами мы переходили в единую систему отсчета от центра солнечного диска в единицах солнечного радиуса R_s . Это приводило к появлению погрешности определения положения УВ при большой разнице в углах сканирования. Поэтому для более корректного нахождения зависимости положения и скорости ударной волны от времени был выбран фиксированный угол сканирования (0° относительно горизонтальной белой линии, проведенной из центра окружности, Рис. 2.4(a)). Результаты сканирования яркости вдоль выбранного направления показаны на Рис. 2.4(б-е), где красными стрелками отмечены скачки яркости, соответствующие положению ударной волны.

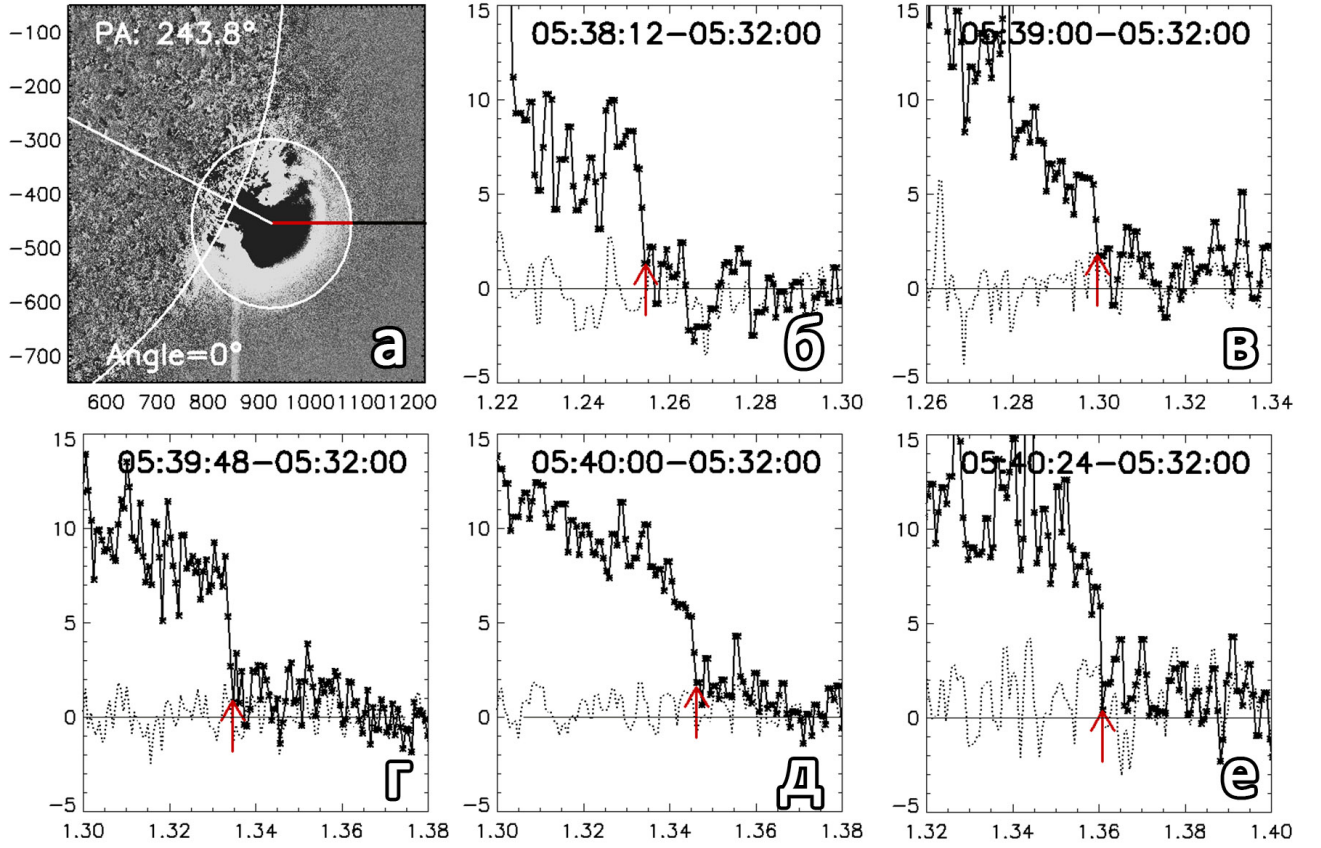


Рисунок 2.4: Событие 13 июня 2010 года. Сканы яркости в разные моменты времени вдоль выбранного направления, показанного на (а).

На Рис. 2.5(а) показаны зависимости от времени границы тела КВМ и связанной ударной волны. Зависимость полученных из наблюдений положений ударной волны от времени сопоставлены с теоретической зависимостью $h_S(t)$ распространения взрывной ударной волны в автомодельном приближении: $r(t) = (r_1 - r_0)[(t - t_0)/(t - t_1)]^{2/(5-\delta)} + r_0$ [122]. Здесь r_0 , t_0 и δ - начальное положение центра волны, момент её возбуждения и показатель спада плотности, которые подбираются для наилучшего согласия между $h_S(t)$ и $r(t)$. В данном случае $r_0 = 1.17R_\odot$, $t_0 = 05:37:12$, $\delta = 2.5$. Видно, что имеет место хорошее согласие между экспериментальной и теоретической зависимостями положений ударной волны от времени. Пунктирная линия на Рис. 2.5(а) - би-сплайн аппроксимация зависимости положений фронтальной структуры КВМ от времени.

На Рис. 2.5(б) показаны временные профили скорости ударной волны $V_{SH}(t) = dH_{SH}/dt$ и границы тела КВМ $V_{CME}(t) = dH_{CME}/dt$. Из Рис. 2.5(б) следует, что на начальном этапе движения характер изменения скорости ударной волны и тела КВМ существенно различается, и, по мнению авторов работы, это различие не согласуется с представлением о том, что обнаруженная ударная волна является поршневой с телом КВМ в виде поршня.

На Рис. 2.5(в) приведен график изменения расстояния между фронтом тела КВМ и связанной с ним ударной волны $\Delta R = R_{SH} - R_{CME}$. Рис. 2.5(г) показывает скорость изменения этого расстояния.

Отметим, что использованная теоретическая зависимость имеет три свободных параметра (r_0 , t_0 и δ). В общем случае это позволяет получить множество решений при использовании метода наименьших квадратов (МНК). Поэтому необходимо ввести ограничения на искомые параметры модели. Для r_0 очевидными ограничениями сверху будет являться

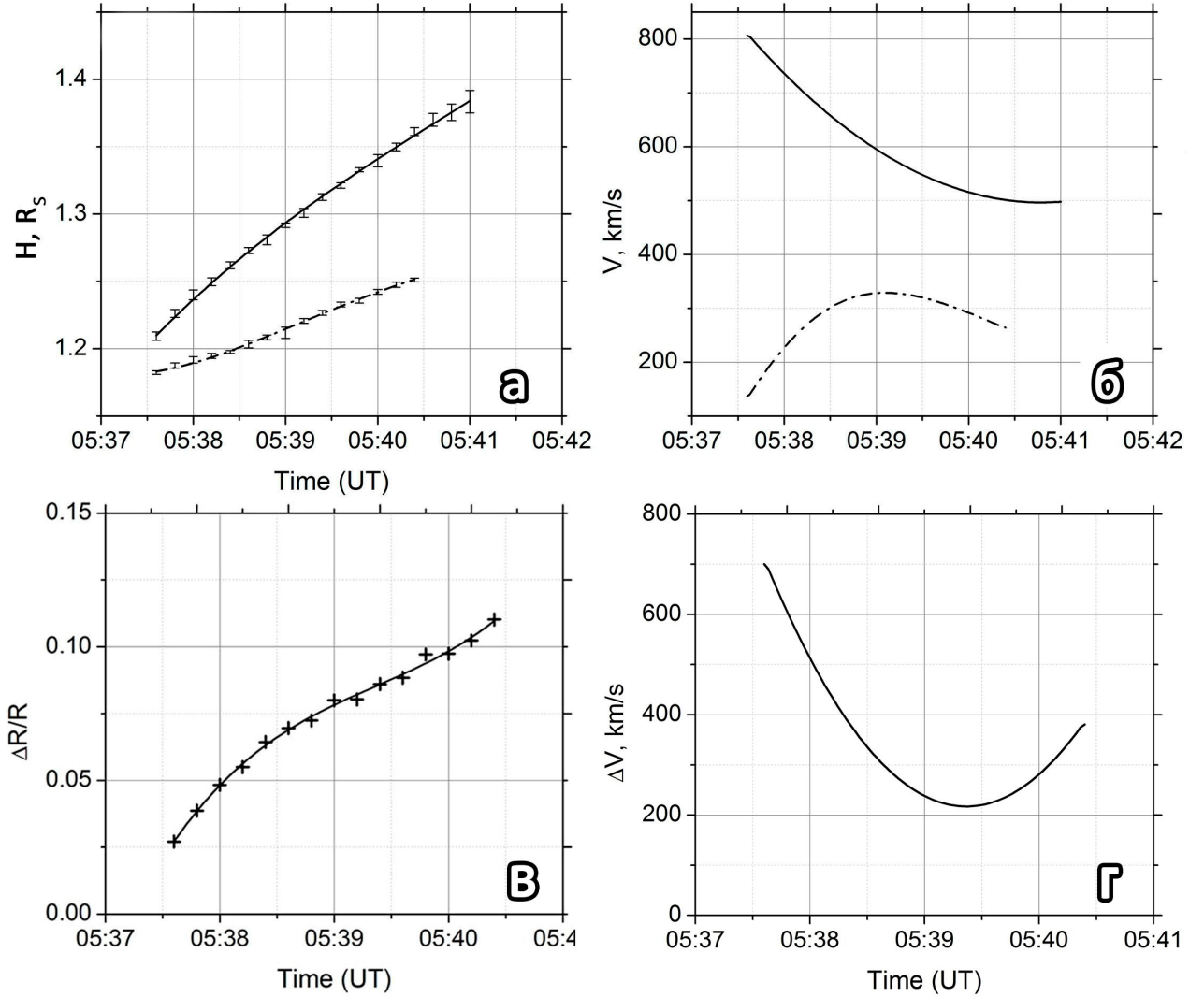


Рисунок 2.5: Событие 13 июня 2010 года. (а) - Зависимость положения от времени ударной волны (сплошная линия), полученная с использованием теоретической зависимости $r(t) = (r_1 - r_0)[(t - t_0)/(t - t_1)]^{2/(5-\delta)} + r_0$ и фронтальной структуры КВМ (пунктирная линия) в направлении параллельно оси X из фиксированного центра окружности в координатах [894;-438] arcsec. (б) - скорость тела КВМ (пунктирная линия) и ударной волны (сплошная линия) вдоль выбранного направления. (в) - Зависимость расстояния между телом КВМ и связанной с ним ударной волной ΔR от времени. (г) - зависимость скорости изменения ΔR со временем.

первое измеренное значение положения ударной волны, а снизу $1R_s$, т.к. отсчет мы ведем от центра диска Солнца. Исходя из тех же соображений, можно ввести ограничения на t_0 . Верхней границей будет являться первый измеренный момент времени по данным SDO/AIA. За нижнюю границу можно принять начало регистрации всплеска II типа. В работе [122] предложенная модель используется для расчета концентрации электронов вдоль радиального направления. Показано, что модель является универсальной и можно подобрать δ так, чтобы распределения концентрации электронов совпадали с известными моделями Newkirk и Saito. Для модели Newkirk [123], описывающей распределение плотности плазмы в корональных стримерах, значение $\delta \sim 2$. Распределение плотности плазмы в модели Saito [124] зависит от широты ϕ . Соответствующее значение δ лежит в диапа-

зоне 2.6-2.7. Таким образом, на δ можно ввести ограничение от 2 до 2.8. Причем данное ограничение можно сделать более жестким, при уточнении условий окружающей плазмы, в которой распространяется ударная волна.

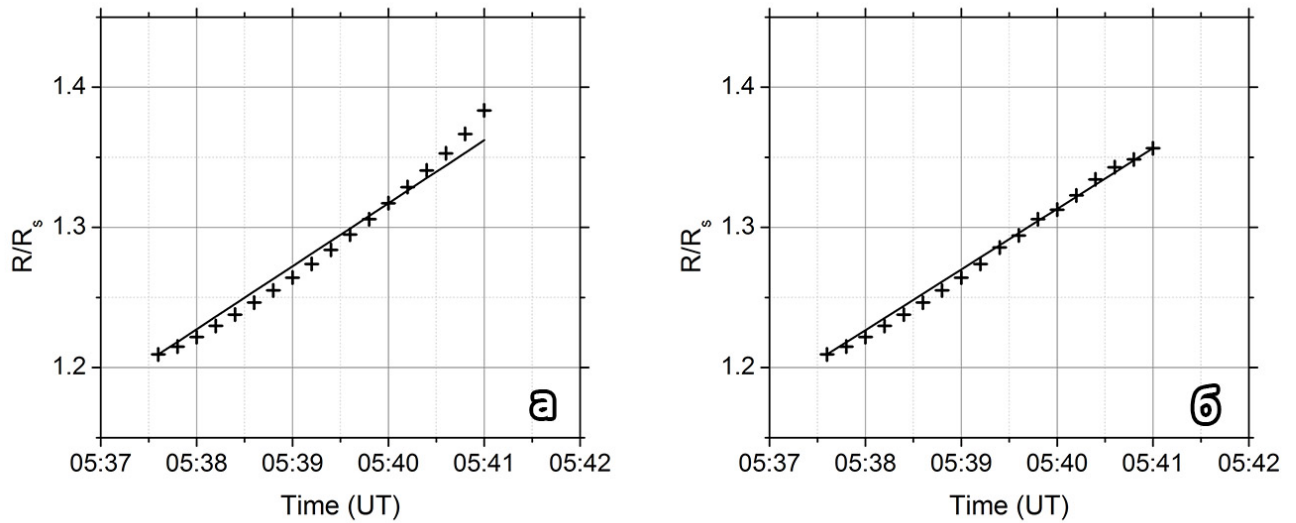


Рисунок 2.6: Событие 13 июня 2010. (а,б) - Приведены зависимости положения от времени ударной волны (сплошная линия), полученные с использованием теоретической зависимости по измененному набору точек измеренных положений ударной волны.

Можно показать, что, используя такие ограничения, не каждое измеренное распределение положений фронта ударной волны в зависимости от времени, возможно, удовлетворительно аппроксимировать данной теоретической зависимостью. На Рис 2.6(а-б) показано, что лишь небольшое изменение значений измеренной зависимости положений ударной волны приводит к заметному ухудшению согласия экспериментальных и теоретических зависимостей положений УВ от времени.

Каким образом возникает данная ударная волна? В настоящее время рассматривают два механизма генерации такой ударной волны. Первый механизм связан с солнечными вспышками. Сильный и быстрый локальный нагрев корональной плазмы приводит к резкому расширению этой нагретой области с последующей генерацией взрывной ударной волны [125]. Второй механизм связан с воздействием эруптивного протуберанца, движущегося с большим ускорением, на вышележащие слои солнечной короны [122].

Автор диссертации считает, что более предпочтительным механизмом генерации взрывной ударной волны является второй механизм.

За генерацию ударной волны для события 13 июня 2010 года может быть ответственен протуберанец (или горячая эмиссионная петля), который лучше всего наблюдается в линии 131 Å (Рис 2.7(б)). Его импульсное ускорение ($\sim 8 \text{ км/с}^2$) могло привести к образованию волны, которая, предположительно, возникает ниже места формирования фронтальной структуры КВМ.

На Рис 2.7(а) приведена радиоспектрограмма, полученная Hiraizo Radio Observatory. На ней отчетливо видна вторая гармоника плазменной частоты, расщепленная на две составляющие. Это расщепление указывает на то, что излучение регистрируется перед фронтом ударной волны и за ним [126, 127]. Для события 13 июня 2010 года наблюдается близость момента первой регистрации ударной волны по данным SDO/AIA и появления радиовсплеска II типа.

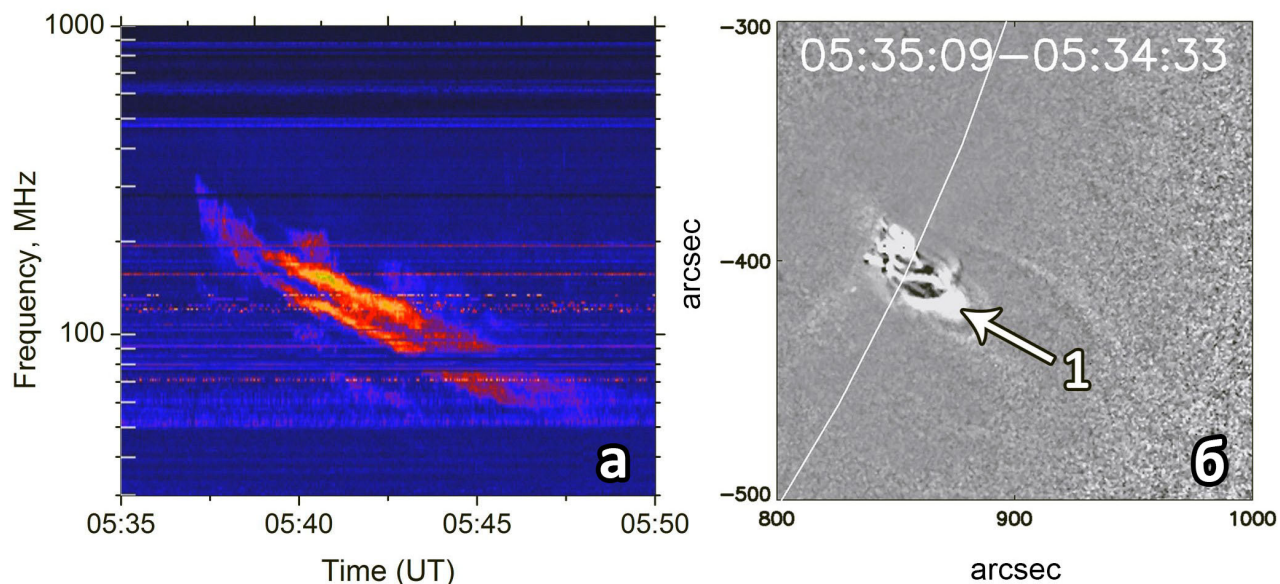


Рисунок 2.7: КВМ 13 июня 2010 года. (а) - Радиовсплеск II типа по данным Hiraio Radio Observatory. (б) - эрупция горячей эмиссионной петли (цифра 1) в канале 131 Å по данным SDO/AIA.

Известно, что изменение со временем распределения частоты радиовсплесков II типа позволяет найти зависимость положения ударной волны, ответственной за эти радиовсплески, от времени, учитывая, например, модельное пространственное распределение концентрации электронов, предложенная в работе [123].

Получив из наблюдений для события 13 июня 2010 года распределения положений ударной волны в зависимости от времени и используя сведения о зависимости частоты радиовсплесков II типа от времени, можно рассчитать реальные пространственные распределения концентрации электронов для данного события.

Концентрацию электронов n (см^{-3}) можно определить, зная связь частоты радиовсплесков II типа с плазменной частотой $f_p = 9 \times 10^{-3} n^{1/2}$. Здесь - плазменная частота дана в МГц. Невозмущенная плазма впереди фронта ударной волны связана с радиовсплесками II типа более низкой частоты, чем за фронтом. Поэтому для нахождения концентрации электронов перед ударной волной будем использовать частоту излучения из нижней компоненты расщепления (f_d) (Рис 2.7(а)).

Полагая, что обе частоты, полученные в результате расщепления, относятся ко второй гармонике плазменной частоты, имеем $f_d = 2f_p$. Отсюда можно найти зависимость концентрации электронов от времени перед фронтом движущейся ударной волны (Рис 2.8(а)). Найденное распределение точек хорошо аппроксимируется гиперболическим законом $n(t) = 0.05t/(t - 2.4 \times 10^6)$, где n - концентрация электронов (см^{-3}), t - время (в сек).

Далее найденные ранее положения фронта ударной волны в зависимости от времени, полученные с помощью расчетов по сканам яркости, сопоставим с найденными значениями $n(t)$. Это позволяет получить зависимость концентрации электронов от расстояния (Рис 2.8(б)). Крестики соответствуют полученным из наблюдений положениям ударной волны, сплошная линия - аппроксимация экспериментальных данных $n(R)$ зависимостью $n(R) = 9.2 \times 10^{14} \times \exp(-13R) + 2.9 \times 10^7$, где n - концентрация электронов (см^{-3}), R - расстояние в радиусах Солнца.

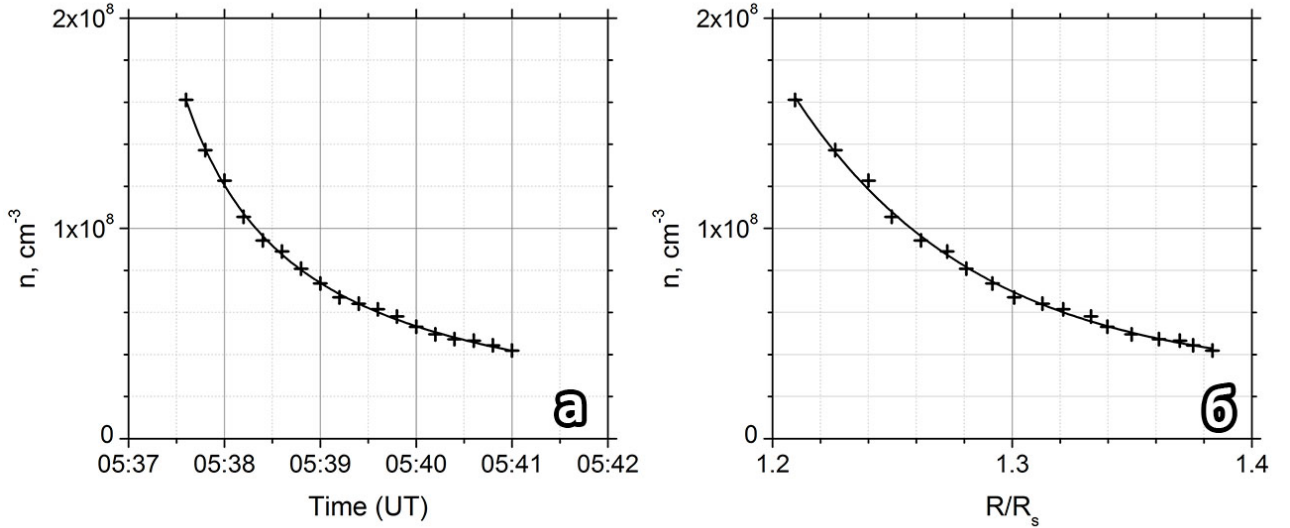


Рисунок 2.8: КВМ 13 июня 2010 года. (а) - Найденная по радиоизлучению зависимость концентрации электронов от времени (крестики). Сплошная линия проведена по гиперболическому закону $n(t) = 0.05t/(t - 2.4 \times 10^6)$; (б) - Зависимость концентрации электронов от расстояния R (крестики). Сплошная линия проведена по экспоненциальному закону $n(R) = 9.2 \times 10^{14} \times \exp(-13R) + 2.9 \times 10^7$

Подобные расчеты концентрации электронов были выполнены для этого события в работе [99]. Отличие наших расчетов $n(R)$ от расчетов, выполненных в этой работе, заключается в том, что мы использовали положения ударной волны, найденные из распределения яркости вдоль выбранного направления, а в работе [99] положение ударной волны определялось визуально на изображениях, содержащих КВМ и диффузную область перед ним. Заметим, что в работе [99] была получена зависимость скачка плотности электронов во фронте ударной волны в зависимости от времени (расстояния). Мы также получили аналогичный результат, используя положения ударной волны, описанным выше способом.

Ударная волна была также обнаружена перед телом КВМ, зарегистрированным 7 декабря 2012 года (Рис. 2.9). КВМ был связан со вспышкой рентгеновского класса С3.9 с гелиографическими координатами центра N16W91.

На верхней панели Рис.2.9 показаны три изображения в разные моменты времени для КВМ, зарегистрированного 7 декабря 2012 г. На изображениях выделяется более яркая область - фронтальная структура тела КВМ, и окружающее ее диффузная область. Сканирование яркости в указанных на рисунке направлениях позволило выявить на границе диффузной области несколько участков, в пределах которых яркость резко меняется при пересечении границы диффузной области (указаны красными стрелками на нижней панели Рис. 2.9).

На Рис. 2.10(а) показаны зависимости от времени границы тела КВМ и связанной ударной волны. Зависимости полученных из наблюдений положения ударной волны от времени сопоставлены с теоретической зависимостью $h_S(t)$ распространения взрывной ударной волны в автомодельном приближении: $r(t) = (r_1 - r_0)[(t - t_0)/(t - t_1)]^{2/(5-\delta)} + r_0$ [122]. Здесь r_0 , t_0 и δ - начальное положение центра волны, момент её возбуждения и показатель спада плотности, которые подбираются для наилучшего согласия между $h_S(t)$ и $r(t)$. В данном случае $r_0 = 1.176R_\odot$, $t_0 = 21:19:50$, $\delta = 2.22$. Видно, что имеет место хорошее согласие между экспериментальной и теоретическими зависимостями положения ударной волны от

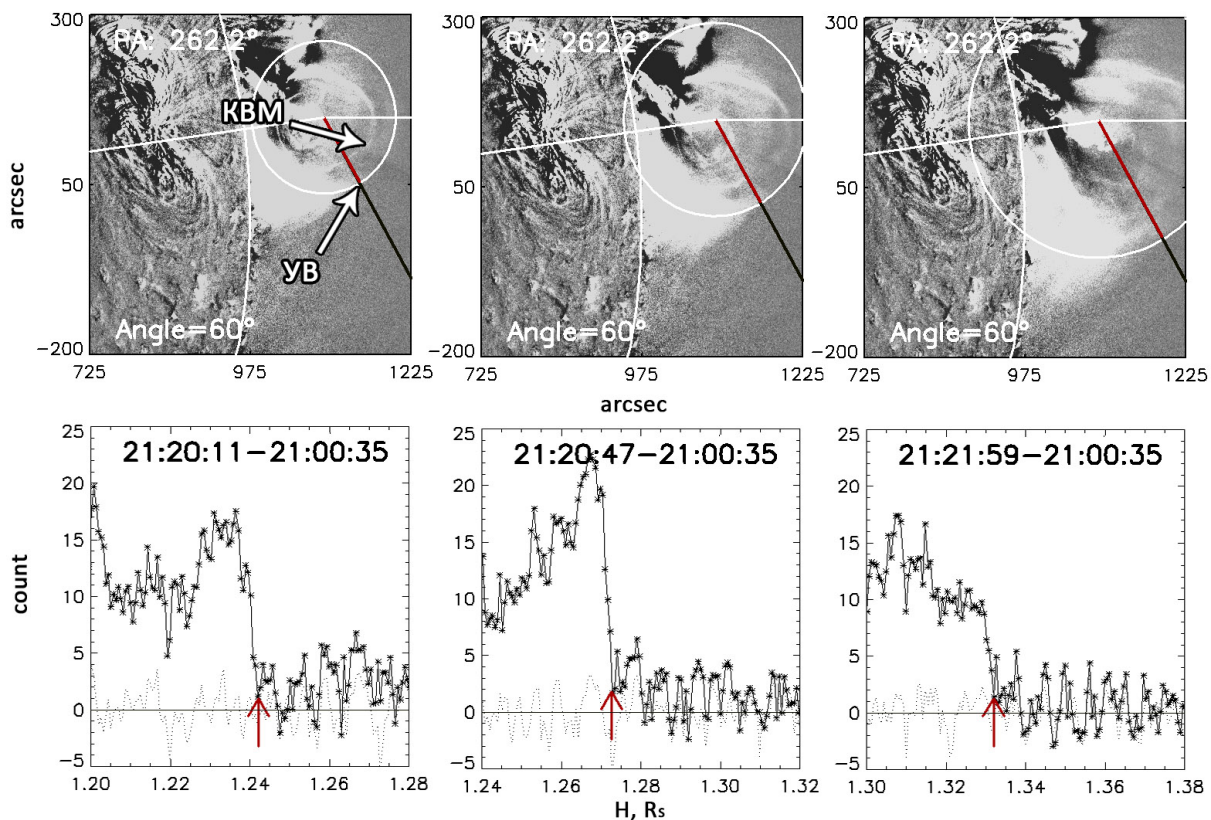


Рисунок 2.9: Событие 7 декабря 2012 года. На нижней панели приведены сканы яркости в три момента времени вдоль направлений, показанных на верхней панели красно-черными линиями. Красные стрелки указывают на ударную волну.

времени. Пунктирная линия на Рис. 2.10(а) - би-сплайн аппроксимация зависимости положений фронтальной структуры KBM от времени.

На Рис. 2.10(б) показаны временные профили скорости ударной волны $V_{SH}(t) = dH_{SH}/dt$ и границы тела KBM $V_{CME}(t) = dH_{CME}/dt$. Из Рис. 2.10(б) следует, что на начальном этапе движения характер изменения скорости ударной волны и тела KBM существенно различается, и, по мнению авторов работы, это различие не согласуется с представлением о том, что обнаруженная ударная волна является поршневой с телом KBM в виде поршня. Это событие сопровождалось радиовсплеском II типа с началом в $\sim 21:20$ UT (Рис 2.10(в)).

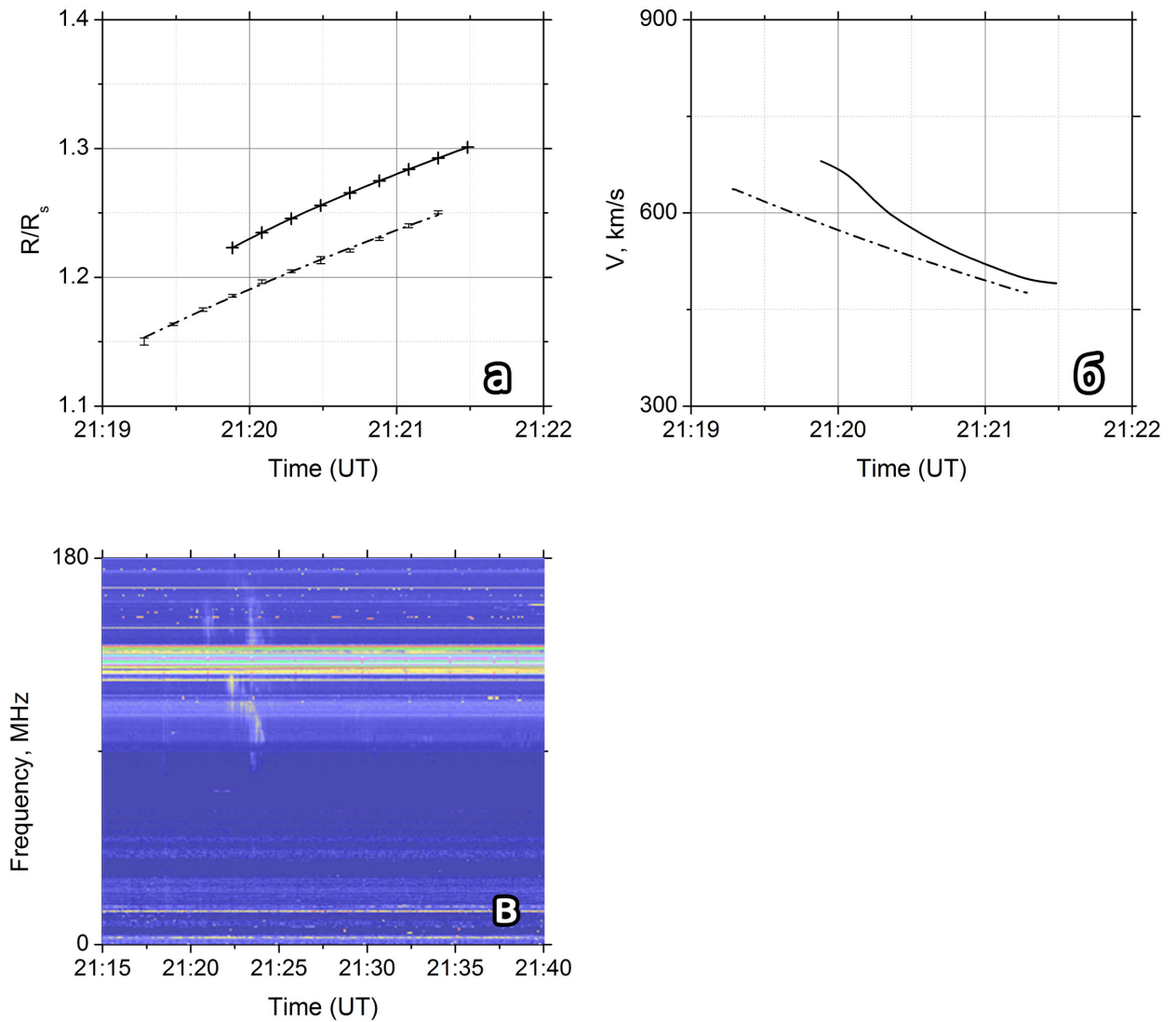


Рисунок 2.10: Событие 7 декабря 2012 года. (а) - Зависимость положения от времени ударной волны (сплошная линия), полученная с использованием теоретической зависимости $r(t) = (r_1 - r_0)[(t - t_0)/(t - t_1)]^{2/(5-\delta)} + r_0$ и фронтальной структуры КВМ (пунктирная линия) в направлении, указанном на Рис 2.9 из фиксированного центра окружности. (б) - скорость тела КВМ (пунктирная линия) и ударной волны (сплошная линия) вдоль выбранного направления. (в) - Радиовсплеск II типа по данным Culgooga.

2.4 Основные результаты исследования, представленные в Главе 2.

1. Предложен метод выделения ударных волн, связанных с КВМ в поле зрения инструментов с высоким пространственным разрешением SDO/AIA.
2. Найдены кинематические характеристики для нескольких ударных волн, связанных с КВМ.
3. Для двух событий (13 июня 2010 года и 7 декабря 2012 года) были сопоставлены временные профили положения и скорости границы тела КВМ и ударной волны. Сделан вывод, что временные профили скорости границы тела КВМ и ударной волны существенно различаются.
4. Для событий, указанных в пункте 3, временные профили положения и скорости ударной волны были сопоставлены с теоретическими зависимостями соответствующих кинематических характеристик, полученных для взрывной ударной волны, движение которой описывается автомодельным приближением. Показано, что существует очень хорошее согласие между временными профилями положений ударной волны, полученных из наблюдений, а также из теории.
5. На основании результатов, отмеченных в пунктах 3 и 4, сделан вывод о том, что исследованные ударные волны являются взрывными на начальном этапе их движения.
6. Высказано предположение, что механизмом генерации взрывных ударных волн, в данном случае, является сильное воздействие эруптивного протуберанца, движущегося с большим ускорением, на вышележащие слои короны.
7. С использованием найденных положений ударной волны и сведений о радиовсплесках II типа для события 13 июня 2010 года были получены пространственные распределения концентрации электронов в поле зрения инструментов SDO/AIA, а также величины скачка плотности электронов на фронте ударной волны, которые оказались в очень хорошем согласии с аналогичными зависимостями, полученными ранее в работе [99].

Глава 3

Характеристики КВМ и связанной с ним ударной волны в трехмерном пространстве

Гало КВМ (ГКВМ) выглядят как яркое облако, полностью охватывающее диск Солнца. Впервые ГКВМ упоминаются в работе [128] как сгусток плотной плазмы с направлением движения в сторону (или от) Земли. Во многих случаях, источник таких КВМ на Солнце близок к центру солнечного диска. ГКВМ играют значительную роль в космической погоде: их влияние на магнитосферу Земли может приводить к сильнейшим геомагнитным бурям [129]. Поэтому предсказание времени прибытия КВМ в окрестности Земли является одной из главных задач исследований космической погоды. Определение скорости и ускорения ГКВМ на начальной стадии его движения позволяют оценить более точно время прибытия КВМ. Но угловой размер и скорость ГКВМ, получаемая из прямых измерений коронографов LASCO дают значения этих параметров в проекции на картинную плоскость. Полученные значения скорости и углового размера в проекции могут заметно отличаться от реальных, кроме тех случаев, когда объектом исследования являются лимбовые КВМ с минимальным углом отклонения движения от картинной плоскости.

Было замечено, что проекция большинства лимбовых КВМ на картинную плоскость принимает конусовидную форму и движется в поле зрения LASCO C2 и C3 квазирадиально. В тоже время угловой размер большинства лимбовых КВМ не меняется со временем [130]. Отсюда можно сделать вывод, что большинство КВМ расширяется преимущественно симметрично относительно оси их движения и геометрические свойства КВМ можно описать с помощью модели конуса [131–133].

Позднее появилась модель GSC (graduated cylindrical shell), описывающая КВМ как расширяющийся магнитный жгут [134, 135], что является более точным приближением, чем описание КВМ конусом со сферой в основании. Расчеты с трехмерных параметров КВМ с применением таких моделей дают более точные значения, при этом требуя более сложных расчетов.

В тоже время в работе [136] приведено сравнение модели “Ice-cream cone” с использованием данных SOHO/LASCO и модели магнитного жгута [135] с использованием данных STEREO/SECCHI. Корреляция между полученными данными составила $R > 0.9$. Таким образом, несмотря на то, что описание геометрических свойств КВМ с использованием конуса является более грубым приближением по сравнению с моделями, использующими форму расширяющегося магнитного жгута, это вполне адекватные результаты при меньших по сложности расчетах.

С запуском космических аппаратов STEREO в 2006 году появилась возможность наблюдать за КВМ на Солнце дополнительно еще с двух точек зрения. Это дало возможность оценить трехмерные характеристики КВМ с использованием методов стереоскопии. К методам стереоскопии можно отнести: “Geometric Localisation (GL)” [137], “Mask Fitting (MF)” [138], “GCS Forward Modelling (FM)” [134, 135], “Polarisation Ratio (PR) Technique” [139–141], “Local Correlation Tracking Plus Triangulation (LCT-TR)” [141]. Сравнение описанных методов проводилось в работе Feng et al. (2013) [142].

Несмотря на то, что методы стереоскопии позволяют проводить более точные расчеты трехмерных характеристик КВМ, они обладают очевидными ограничениями. Они не позволяют проводить исследования событий, произошедших до запуска космических аппаратов STEREO, в том числе КВМ, зарегистрированных в максимуме 23 солнечного цикла и характеризующихся большими скоростями и энергиями, что особенно актуально при изучении выбросов массы и связанных с ними ударных волн. Космические аппараты STEREO движутся по орбитам вокруг Солнца, и в периоды их положения за Солнцем относительно оси Солнце-Земля наблюдение геоэффективных ГКВМ, направленных в сторону Земли, представляется невозможным.

Таким образом, модель “Ice-cream cone”, при всех описанных недостатках, представляется надежным инструментом для оценки трехмерных параметров КВМ и связанных ударных волн в периоды, когда это невозможно сделать с помощью данных космических аппаратов STEREO и методов стереоскопии.

В диссертации с помощью этого метода впервые найдены трехмерные параметры отдельно для тела КВМ и связанных с ними ударных волн и рассмотрены приложения результатов такого анализа для решения двух конкретных задач (для исследования геоэффективного события 18 ноября 2003 года и для измерения магнитного поля вдоль направления близкого к оси Солнце-Земля).

3.1 Метод определения трехмерных характеристик КВМ. Новый подход: для быстрых КВМ отдельно определяются трехмерные параметры тела КВМ и связанных ударных волн.

В работе [133] при расчете трехмерных параметров быстрых КВМ не учитывалось, что наблюдаемые в поле зрения коронографов LASCO C2 и C3 движущиеся области повышенной яркости, которые идентифицируются как КВМ, в действительности состоят из тела КВМ и связанной с ним ударной волны. Мы применили метод, предложенный Xue et al. [133] для расчетов трехмерных параметров отдельно для тела КВМ и для ударной волны.

В модели “Ice-cream cone” корональный выброс массы представляется в виде конуса с вершиной в центре Солнца, опирающегося на часть сферической поверхности радиусом, равным длине образующей конуса. Направление движения КВМ определяется положением в пространстве оси модельного конуса, которое описывается двумя углами: θ_0 и ϕ_0 . Угол θ_0 (коширота) отсчитывается по часовой стрелке ($\theta_0 = [0^\circ; 180^\circ]$) от положительного направления оси, проходящей через центр Солнца и перпендикулярной плоскости эклиптики, а долготный угол ϕ_0 отсчитывается в плоскости эклиптики от центрального меридиана против часовой стрелки ($\phi_0 = [0^\circ; 180^\circ]$). При использовании этой модели мы будем пренебрегать наклоном плоскости эклиптики к плоскости солнечного экватора. Кроме направления движения, этот метод позволяет рассчитать на оси модельного КВМ скорость ее движения V_p , а также угловой размер выброса массы α .

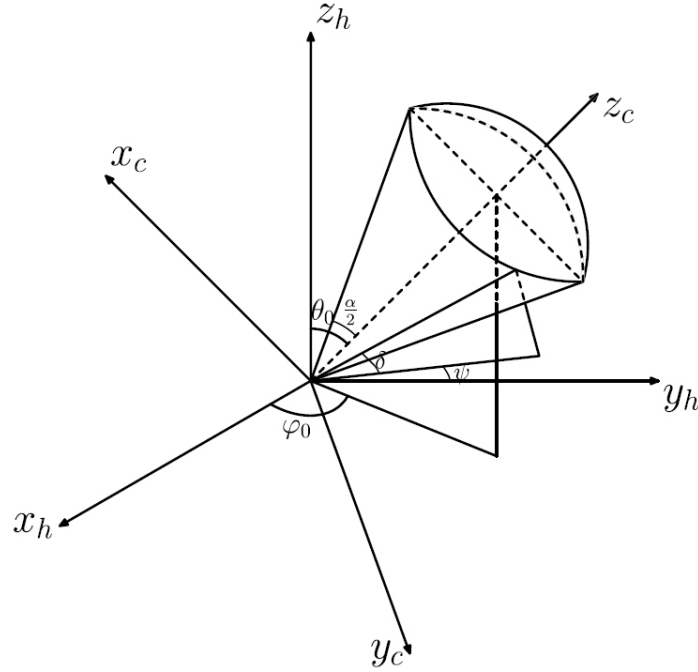


Рисунок 3.1: Иллюстрация “Ice-cream cone” модели и соотношение между системой координат конуса и гелиоцентрической системой координат. Здесь α - угловой размер конуса, θ_0 - широтный угол, ϕ_0 - долготный угол, ось x_h - соответствует оси Солнце-Земля, ось z_c соответствует оси конуса и описывает направление движения КВМ. Рисунок взят из работы [133]

В работе [133] приводится следующая формула, связывающая геометрические параметры модели и реального изображения КВМ в картинной плоскости:

$$V_p = V \cos \delta = V \left| \frac{A \cos \frac{\alpha}{2} \pm C \sqrt{A^2 + C^2 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}{A^2 + C^2} \right|$$

$$A = \cos \psi \sin \phi_0 \sin \theta_0 + \sin \psi \cos \theta_0$$

$$C = \sin \theta_0 + \cos \phi_0$$

где V - восстановленная скорость в трехмерном пространстве, V_p - найденная скорость КВМ в картинной плоскости в зависимости от угла ψ . Здесь ψ - угол в картинной плоскости, отсчитываемый против часовой стрелки от горизонтальной прямой линии, проведенной из центра солнечного диска в западном направлении. δ - угол между образующей конуса и картинной плоскостью. α - угловой размер в пространстве, θ_0 и ϕ_0 - широтный и долготный углы соответственно.

На рисунке 3.2(а) показан КВМ типа гало, зарегистрированный в поле зрения коронографа LASCO C3 в определенный момент времени. Черными квадратами отмечена внешняя граница КВМ, которая, скорее всего, в данном случае является фронтом ударной волны. Через эти квадраты из центра солнечного диска проведены прямые линии, вдоль которых определялась скорость указанных точек $V_p(\psi)$. На рисунке 3.2(б) треугольниками показаны значения скорости $V_p(\psi)$ для точек из рисунка 3.2(а). Сплошная линия - это результаты расчетов $V_p(\psi)$ проекции граничных точек, полученных с помощью модели “Ice-cream cone”. Определение положения фронтальной структуры тела КВМ в работе

Хае и др. [133] показано на рисунке 3.2(а). находится вдоль радиальных прямых проведенных под углами ψ . Далее с помощью формулы, приведенной выше наилучшим образом описываются полученные скорости, как показано на рисунке 3.2(б).

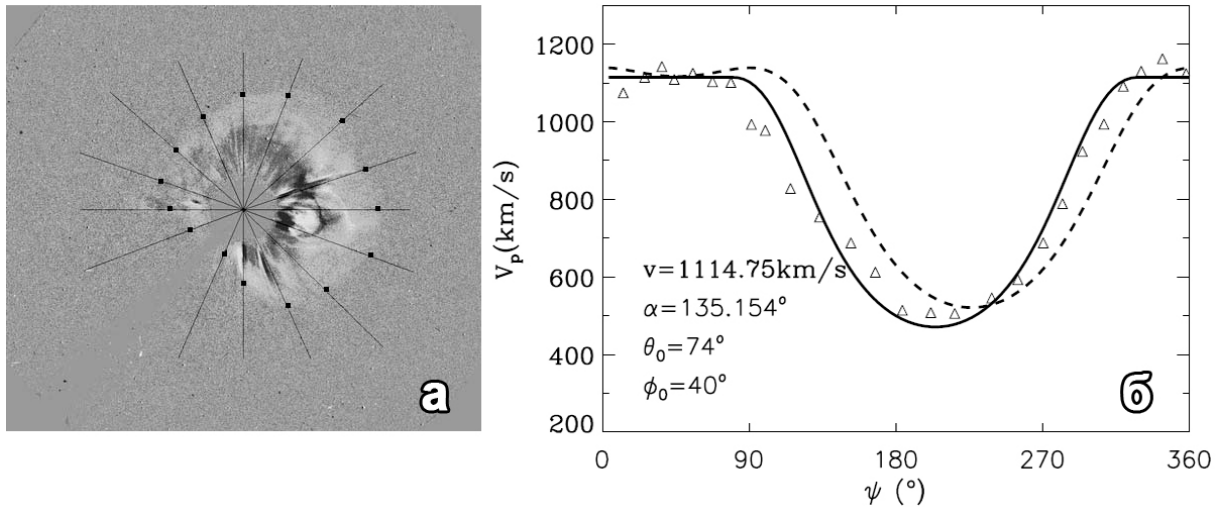


Рисунок 3.2: а - определение положений (черные квадраты) фронтальной структуры КВМ вдоль радиальных прямых (серые линии). б - реконструкция трехмерных параметров КВМ (черная линия) по распределению экспериментальных точек положения фронтальной структуры КВМ (треугольники) вдоль угла ψ . Пунктирная линия - результат расчетов модели, предложенной авторами статьи [133] в их предыдущей работе. Рисунок взят из работы [133]

В нашей работе мы модифицировали определение положения тела КВМ путем описывания формы границы тела КВМ или ударной волны фрагментами эллипсов. Таким образом, мы можем получить сколько угодно точек положения фронта КВМ с произвольным шагом по углу ψ , что должно дать прирост в точности определения восстановленных трехмерных параметров. Иллюстрация нашего способа приведена на рисунке 3.3.

Отметим, что в отличие от работы [133], где из кинематических характеристик определялась только скорость осевой части модельного КВМ, мы в наших исследованиях определяли также положения границы тела КВМ и ударной волны.

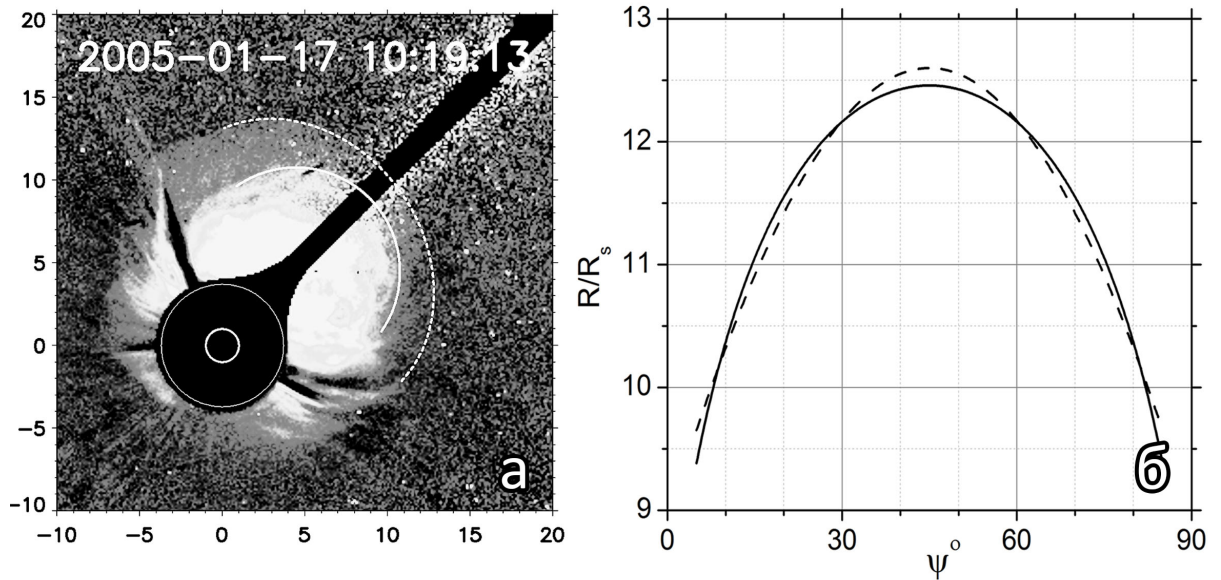


Рисунок 3.3: а - определение положений (сплошная белая линия) фронтальной структуры КВМ с помощью описывания границы эллипсом; пунктирной линией описана граница ударной волны. б - зависимость удаленности границы тела КВМ от угла ψ по данным наблюдений (сплошная линия) и с использованием расчетов (пунктирная линия)

3.2 Оценка точности метода.

Для оценки точности расчетов трехмерных (3D) параметров КВМ и связанной ударной волны было использовано два подхода. Первый заключается в сравнении рассчитанных 3D параметров тела КВМ и связанной ударной волны для лимбовых выбросов массы, источник которого будет находиться вблизи лимба. Такие КВМ, как правило, движутся под относительно небольшими углами к картинной плоскости, и их параметры (положение, форма, угловой размер и скорость границы тела КВМ) определяются непосредственно по изображениям выбросов массы в картинной плоскости. Сравнение измеренных таким образом характеристик тела КВМ и/или связанной ударной волны и полученного с помощью метода “Ice-stream cone” даст оценку погрешности этого метода.

В качестве примера такого сопоставления определим 3D параметры для КВМ 18 августа 2010 года, который был связан со вспышкой рентгеновского класса C4.5 (04:45 (UT)). Центр связанной с КВМ вспышки имел гелиографические координаты N18W88, что дает основания отнести данный КВМ к лимбовому.

На Рис 3.4(а) фронт тела КВМ описан дугой эллипса, вдоль которой рассчитывается распределение положения фронта тела КВМ в зависимости от азимутального угла ψ . Для данного распределения в момент 06:41 UT были получены следующие трехмерные характеристики КВМ: $R = 9.3 R_s$, $\alpha = 61.7^\circ$, $\theta_0 = 125.4^\circ$, $\phi_0 = 123.5^\circ$. Напомним, что здесь R - положение тела КВМ, α - угловой размер, θ_0 - коширота, ϕ_0 - долгота. В то же время измерение положения фронта КВМ по данным LASCO C3 дало значение $9.24 R_s$. Таким образом, разница между положением, измеренным и рассчитанным по модели “Ice-stream cone” составило $\approx 0.06 R_s$.

Для оценки угла отклонения ϕ направления движения тела КВМ от картинной плоскости по данным LASCO/C3 были привлечены данные STEREO-A/COR2 (Рис 3.4(б)). С использованием данных на рисунках 3.4(а-в) можно показать, что угол ϕ равен соответствующему углу между осью КВМ и пунктирной линией в поле зрения STEREO-A/COR2. С учетом корректировки относительно положения космического аппарата STEREO-

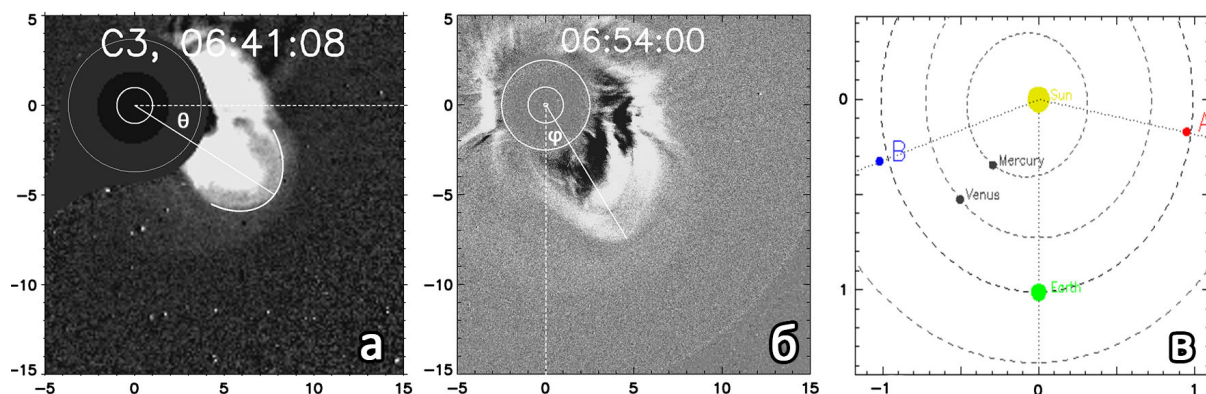


Рисунок 3.4: Событие 18 августа 2010 года. а - разностное изображение в поле зрения LASCO/C3. Сплошной кривой линией очерчена граница тела КВМ. Пунктиром показан солнечный экватор. Сплошной прямой линией, проведенной из центра солнечного диска под углом θ к экватору, показана ось КВМ (линия, проходящая через наиболее удаленную точку границы КВМ). б - разностное изображение в поле зрения коронографа STEREO-A/COR2. Пунктиром показана линия, соединяющая центр солнечного диска с космическим аппаратом. Сплошной линией показана ось КВМ. Угол ϕ практически совпадает с долготой оси КВМ относительно картинной плоскости LASCO/C3. в - положение аппаратов STEREO-A и STEREO-B 18 августа 2010 года.

A/COR2 в соответствующий момент времени (Рис 3.4(в)) угол ϕ стал равен $\approx 21.5^\circ$ или $\approx 111.5^\circ$ в той же системе отсчета, что и ϕ_0 . Отклонение рассчитанного угла ϕ_0 от оценочного ϕ составило не более 12%. Оценить значение угла θ можно по изображениям LASCO/C3 как показано на Рис 3.4(а). Отклонение рассчитанного угла θ_0 от оценочного θ составило не более 3%.

Другой подход оценки точности модели “Ice-cream cone” заключается в сравнении расчетов данной модели с расчетами 3D параметров, полученных другими методами. В данном случае, полученные с помощью “Ice-cream cone” модели 3D параметры были сопоставлены с 3D параметров, полученных с помощью методик под названием “stereoscopy” (описание методик можно прочитать в работах [143–145]. Пакет программ SolarSoftWare (SSW) <http://www.lmlsal.com/solarsoft> дает возможность для реализации этих методов, например, с помощью процедуры “scc_measure.pro”. Окно интерфейса данной процедуры показано на Рис 3.5.

В данном окне достаточно указать курсором мыши положение на фронте тела КВМ на обоих изображениях космических аппаратов STEREO (изображение, полученное с помощью одно аппарата STEREO можно объединять с изображениями, полученными другими космическими аппаратами, например, SOHO или SDO со STEREO). После выбора точки на одном изображении, на втором строится линия луча зрения данного инструмента в поле зрения второго инструмента. Далее следует выбрать точку пересечения данного луча с фронтом тела КВМ или ударной волны. После этого процедура рассчитывает положение выбранной особенности в трехмерном пространстве в единицах солнечного радиуса.

Сопоставление 3D положений границы тела КВМ и ударной волны, рассчитанное двумя методами проводилось для события 7 марта 2011 года.

На Рис 3.6(а) для этого события показан КВМ и связанная ударная волна в поле зрения LASCO/C2. На Рис 3.6(б) приведены результаты расчетов (сплошная линия) положения отдельных точек на границе тела КВМ и на ударной волне в зависимости от угла ψ . Синим цветом показаны зависимости положения от времени фронта ударной волны по методу “Ice-cream cone” (сплошная линия) и методом стереоскопии (пунктирная линия). Те же зависимости, но для фронта тела КВМ показаны на рисунки черным цветом.

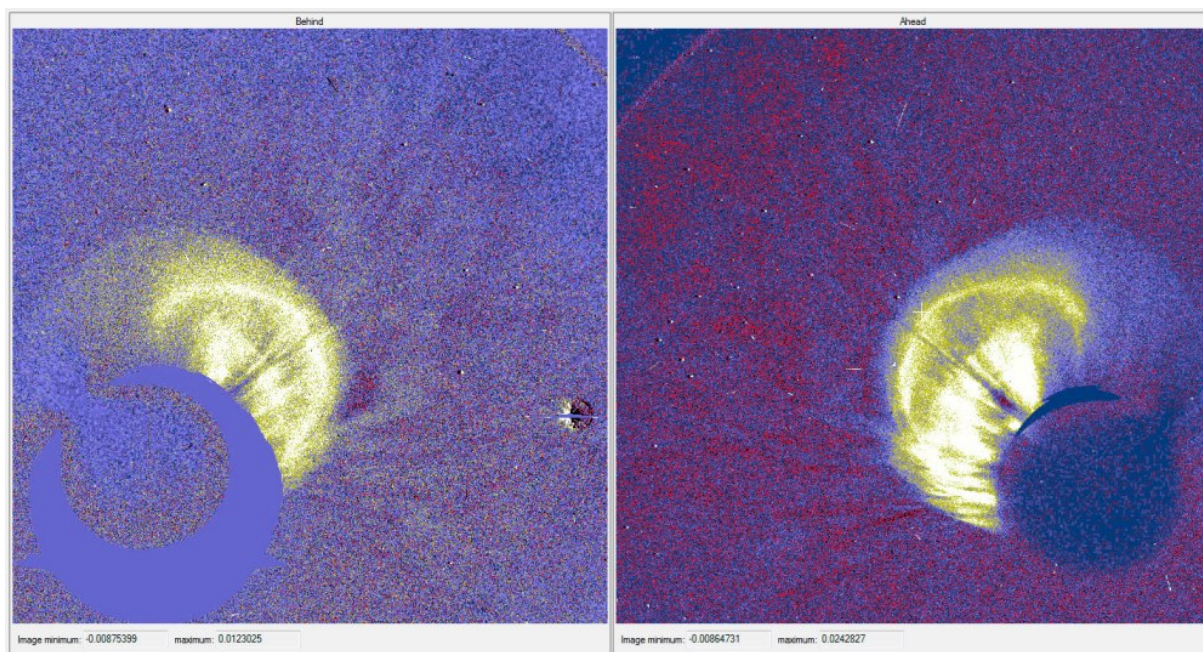


Рисунок 3.5: Окно интерфейса процедуры “ssc_measure.pro”. Слева направо приведены изображения КВМ в поле зрения инструментов COR2 космических аппаратов STEREO-B и STEREO-A для события 7 марта 2011 года.

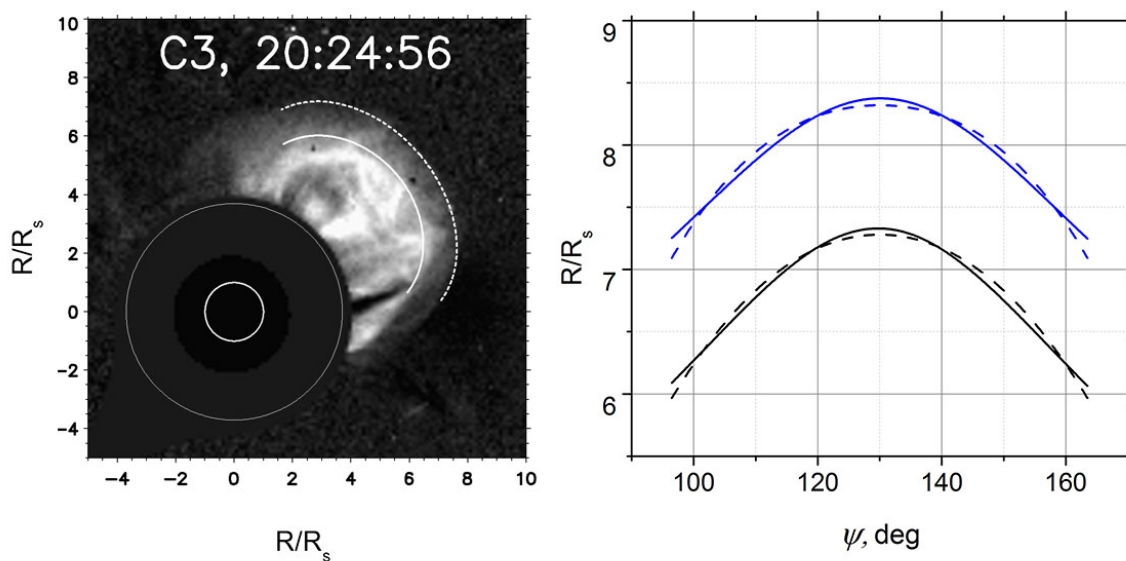


Рисунок 3.6: Событие 7 марта 2011 года. (а) - изображение КВМ в поле зрения LASCO/C2. Сплошной линией очерчена граница тела КВМ, пунктирной линией - ударная волна. (б) - приведены результаты расчетов (сплошная линия) положения отдельных точек на границе тела КВМ и на ударной волне в зависимости от угла ψ .

Обе методики были использованы для определения положений в трехмерном пространстве на оси КВМ отдельно для границы тела КВМ и отдельно для ударной волны для нескольких моментов времени. Результаты расчетов таких положений в зависимости от времени показаны на Рис 3.7. Линиями синего цвета приведены зависимости положения от времени фронта ударной волны, полученные с использованием “Ice-cream cone” модели (сплошная линия) и с помощью методов стереоскопии (пунктирная линия). Аналогичные зависимости, но для фронта тела КВМ, показаны на рисунки черным цветом.

Отметим хорошее согласие результатов, полученных разными методами: максимальное различие в значениях положений КВМ и ударной волны, не превышает $0.36 R_s$.

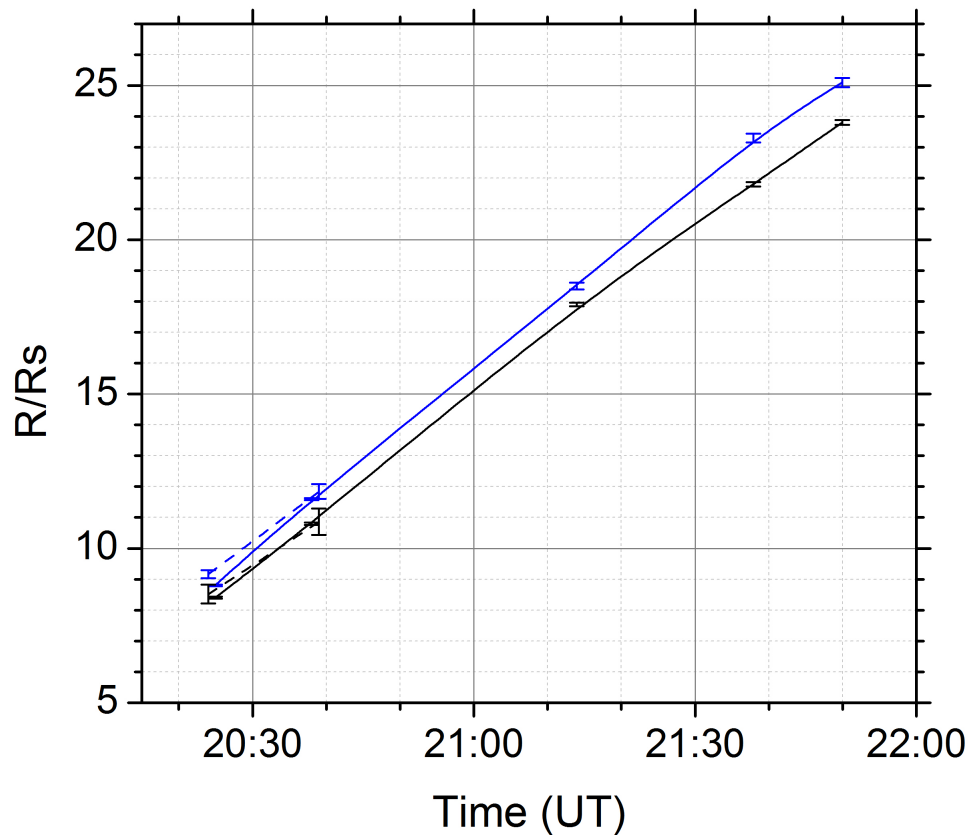


Рисунок 3.7: Результаты расчетов положений тела КВМ и ударной волны в трехмерном пространстве. Синим цветом показаны зависимости положения от времени фронта ударной волны по методу “Ice-cream cone” (сплошная линия) и методом стереоскопии (пунктирная линия). Те же зависимости, но для фронта тела КВМ показаны на рисунки черным цветом.

Напомним также, что эффективность “Ice-cream cone” модели для определения 3D параметров по данным LASCO была подтверждена в работе [136] путем сравнения с моделью магнитного жгута, предложенной в работе [135], с использованием данных STEREO/SECCHI. Корреляция между скоростями, полученными двумя методами, оказалась равна $\sim R > 0.9$. Таким образом, несмотря на то, что описание геометрических свойств КВМ с использованием конуса является более грубым приближением по сравнению с моделями, использующими форму расширяющегося магнитного жгута, это вполне адекватные результаты при меньших по сложности расчетах.

Общий вывод по результатам оценки точности расчетов трехмерных параметров КВМ и УВ с использованием метода “Ice-cream cone” по результатам двух подходов, описанных выше, заключается в следующем: Данная методика дает адекватные результаты с точностью определения положения фронта тела КВМ или ударной волны до 0.4 радиусов Солнца.

3.3 Результаты исследования динамики трехмерных параметров КВМ и связанных с ними ударных волн

Метод определения трехмерных параметров КВМ, предложенный в работе [133], был применен отдельно для тела КВМ и отдельно для ударной волны. Были отобраны девять событий по данным LASCO/C3 с изображениями, на которых присутствует диффузная область перед фронтом тела КВМ. Чтобы наверняка связать границу диффузной области с ударной волной, были отобраны события со скоростью КВМ, превышающими 1400 км/с по данным каталога http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list. Для большинства рассмотренных событий скорость ударной волны превышала $V_{MS} + V_{SW}$ как в медленном солнечном ветре (SW), так и в быстрых потоках SW. Для нескольких событий это условие выполнялось, начиная с $10 R_s$. Здесь V_{MS} - скорость быстрой магнитозвуковой волны, V_{SW} - скорость окружающего солнечного ветра, в котором распространяется ударная волна. По оценкам $V_{MS} + V_{SW}$ на расстоянии $R \geq 10 R_s$ не превышает 1500 км/с.

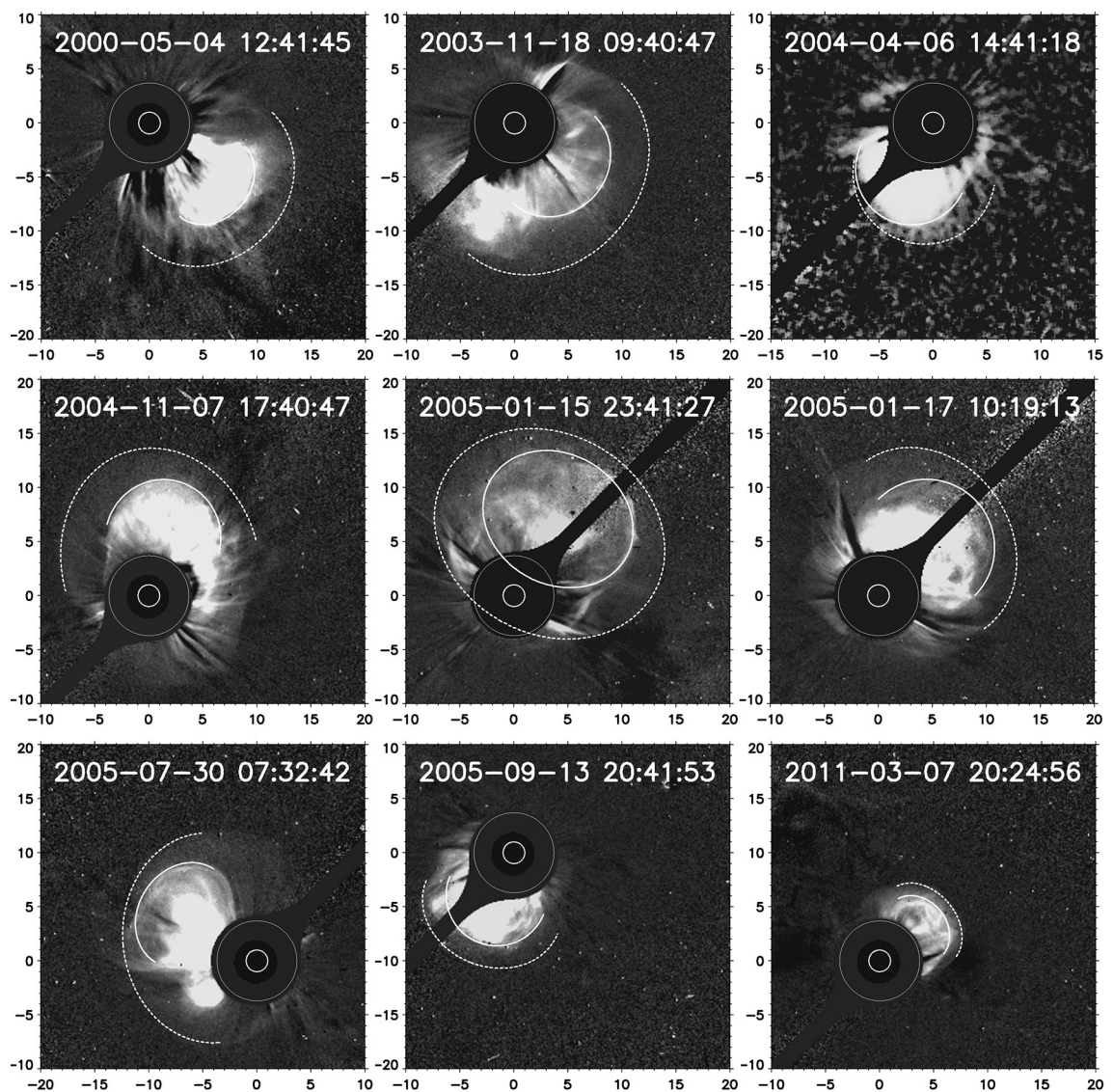


Рисунок 3.8: Разностные изображения LASCO/C3 для 9 изученных событий. Сплошной белой линией участком эллипса выделена граница тела КВМ, пунктирной линией - ударная волна.

На Рис 3.8 показаны разностные изображения LASCO/C3 для 9 изученных событий, произошедших 4 мая 2000, 18 ноября 2003, 6 апреля 2004, 7 ноября 2004, 15 января 2005, 17 января 2005, 30 июля 2005, 13 сентября 2005 и 7 марта 2011 года. Все события связаны со вспышками рентгеновского класса M3.0-X3.0. Сплошной белой линией выделена граница тела КВМ. Пунктирная белая линия показывает границу фронта ударной волны. Значительная часть границы тела КВМ и ударной волны во всех случаях хорошо описываются участками эллипсов. Выделенные белыми линиями очерченные участки границ тела КВМ и ударной волны использовались для нахождения положений отдельных точек фронтов КВМ и УВ в зависимости от азимутального угла ψ .

Трехмерные характеристики для тела КВМ и ударной волны (УВ) были измерены для каждого изученного события в разные моменты времени. В таблице 3.1 представлены такие рассчитанные характеристики КВМ и ударной волны как их положение в трехмерном пространстве (R), угловой размер (α), и направление, описываемое широтой (φ) и долготой (λ). Здесь и далее для описания направления оси КВМ и ударной волны, в отличие от работы [133], вместо кошироты θ_0 мы будем использовать широту φ , отсчитываемую от солнечного экватора. Для событий к северу от экватора мы будем полагать $\varphi > 0$, для событий к югу от экватора - $\varphi < 0$. Долготу мы будем отсчитывать от центрального меридиана в диапазоне углов $[-90^\circ, 0^\circ]$, $[0^\circ, 90^\circ]$. Будем обозначать долготу чаще используемой для этих целей буквой λ . В таблице приведены параметры для КВМ и ударной волны в один и тот же момент времени. Стандартное отклонение σ рассчитанного положения от измеренного приведено в последней колонке таблицы.

Таблица 3.1: Трехмерные характеристики КВМ и ударной волны для 9 изученных событий. В данной таблице и далее мы будем использовать более привычные обозначения для широты φ , а для долготы λ .

Дата события	Объект	Расстояние $[R/R_s]$	Угл.размер α $[\circ]$	Широта φ $[\circ]$	Долгота λ $[\circ]$	Отклонение σ , $[R_s]$
2000-05-04 12:41:45	КВМ	10.9	35.6	-23.9	27.9	0.06
2000-05-04 12:41:45	УВ	11.1	67.8	-28.4	33.9	0.14
2003-11-18 09:16:56	КВМ	9.5	49.8	-15.7	17.2	0.06
2003-11-18 09:16:56	УВ	12.1	91.4	-16	8.2	1.17
2004-04-06 14:17:18	КВМ	9.6	40.4	-19.6	-7.3	0.22
2004-04-06 14:17:18	УВ	11.4	48.1	-19.7	3.6	0.09
2004-11-07 17:16:54	КВМ	11.9	37.2	21.1	5.5	0.04
2004-11-07 17:16:54	УВ	15.3	52.8	14.9	1.2	1.49
2005-01-15 23:17:25	КВМ	10.2	55.2	28.5	18.7	0.65
2005-01-15 23:17:25	УВ	10.7	84.2	25	15.6	0.04
2005-01-17 09:40:54	КВМ	7	60.8	21.3	23	0.3
2005-01-17 09:40:54	УВ	7.8	90.4	24.5	26.9	0.09
2005-07-30 07:00:32	КВМ	9.2	34.6	15.2	-25.2	0.41
2005-07-30 07:00:32	УВ	10.9	65.7	8.2	-9.5	1.6
2005-09-13 20:17:49	КВМ	6.7	50.7	-27.3	-12	0.82
2005-09-13 20:17:49	УВ	7.4	84.1	-25.9	-2.5	0.01
2011-03-07 20:24:54	КВМ	8.4	45.9	22.8	30	0.03
2011-03-07 20:24:54	УВ	8.8	58.1	24.6	32.9	0.02

На рис 3.9(а) приведен пример рассчитанных с помощью модели “Ice-cream cone” значений положения фронта тела КВМ и ударной волны. Через полученные значения положений границы тела КВМ и УВ проведены линии, которые являются аппроксимацией таких положений полиномом II степени. Зависимости скорости от времени для тела КВМ и ударной волны получены дифференцированием аппроксимирующих полиномов, Рис 3.9(б).

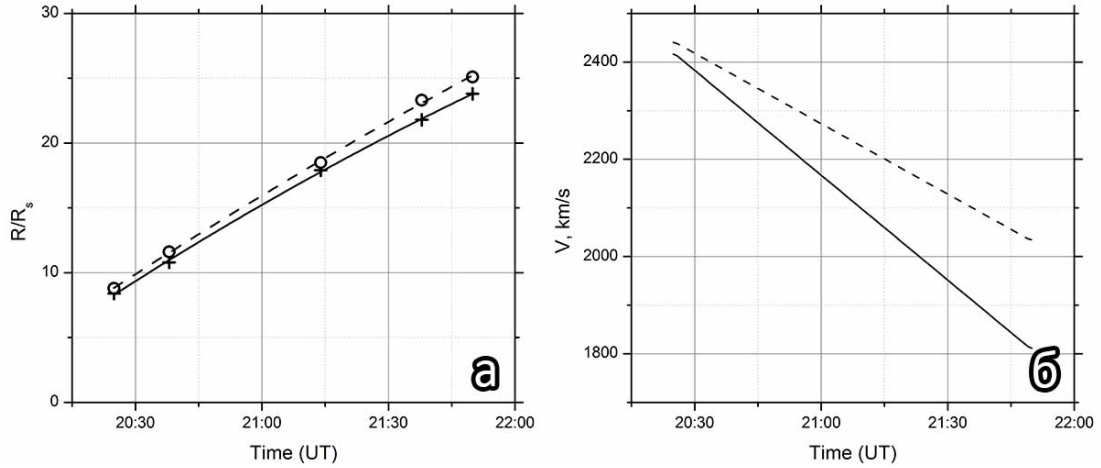


Рисунок 3.9: Событие 7 марта 2011 года. (а) - график зависимости рассчитанного положения КВМ (крестики) и УВ (круги) от времени. Сплошная и пунктирная линии - аппроксимация полиномом II степени положений КВМ и ударной волны соответственно. (б) - график скорости КВМ (сплошная линия) и УВ (пунктирная линия).

На Рис 3.10(а) показано распределение положений тела КВМ (крестики) и ударной волны (круги) в зависимости от времени для всех изученных событий. За начало отсчета взят момент начала вспышки, связанной с соответствующим КВМ. Сплошная и пунктирная линии - аппроксимация полиномом II степени положений тела КВМ и ударной волны соответственно. На Рис 3.10(б) приведены зависимости скорости КВМ (сплошная линия) и ударной волны (пунктирная линия) как производной от аппроксимации положений КВМ и УВ полиномом.

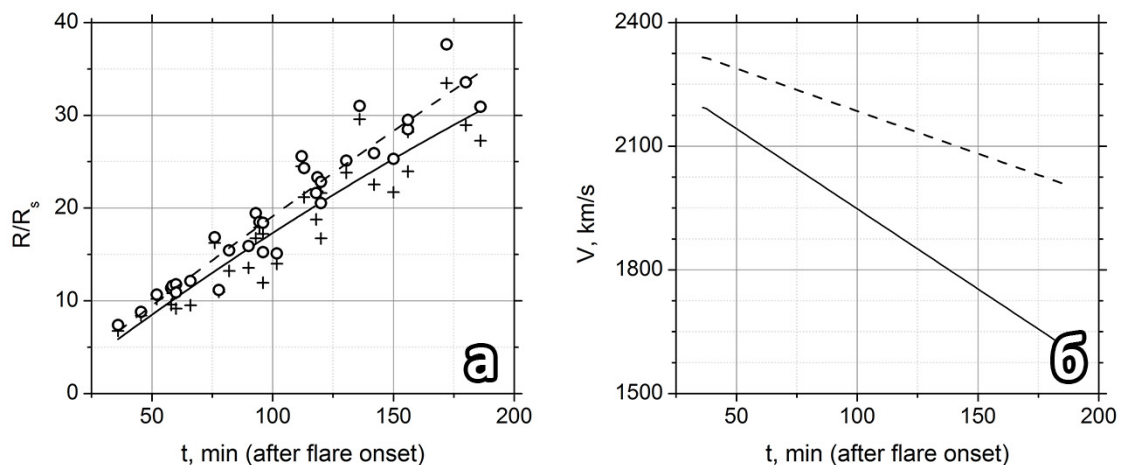


Рисунок 3.10: (а) - график зависимости рассчитанного положения КВМ (крестики) и УВ (круги) от времени. Сплошная и пунктирная линии - аппроксимация полиномом II степени положений КВМ и ударной волны соответственно. (б) - график скорости КВМ (сплошная линия) и УВ (пунктирная линия).

Имея рассчитанные трехмерные параметры для тела КВМ и ударной волны, мы можем оценить, как меняется разность их положения (ΔR) в зависимости от времени (t) и расстояния R_{CME} . На рис 3.11(а-б) показаны зависимость изменения ΔR от расстояния (взято положение фронта тела КВМ R_{CME}) и времени соответственно. За начало отсчета для всех событий выбран момент начала связанной с КВМ вспышки.

Сравнение угловых размеров КВМ и ударной волны показало, что угловой размер ударной волны во всех случаях больше в 1.2-1.9 раза, чем угловой размер тела КВМ. (Рис 3.11(в))

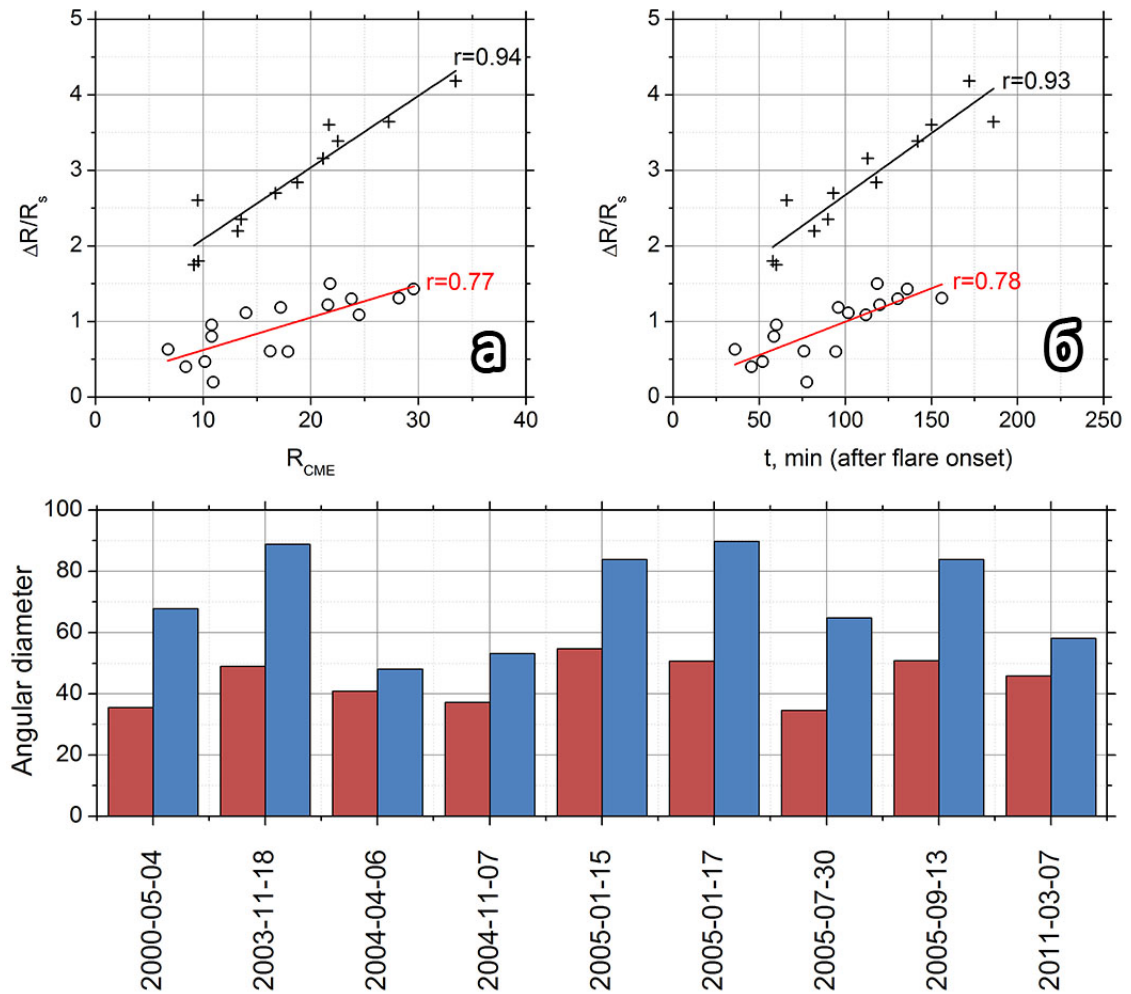


Рисунок 3.11: (а,б) - зависимость изменения ΔR от расстояния до центра Солнца (в качестве такого расстояния взято положение границы тела КВМ R_{CME}) и от времени соответственно. За начало отсчета для всех событий выбран момент начала связанной с КВМ вспышки. Первая группа точек отмечена кругами. Красная линия - линия регрессии этих точек. Вторая группа - крестики с линией регрессии, показанной черной прямой. (в) - соотношение угловых размеров КВМ (выделено красным цветом) и ударной волны (синий цвет).

Отметим, что на графике 3.11(а-б) видно как точки разделились на две условные группы. В первую группу, выделенную кругами, вошли следующие события: 4 мая 2000, 15 января 2005, 17 января 2005, 13 сентября 2005, 7 марта 2011 года. Во вторую группу соответственно вошли события: 18 ноября 2003 года, 6 апреля 2004 года, 7 ноября 2004 года

и 30 июля 2005 года. Коэффициент корреляции для первой группы на обоих графиках составил примерно 0.77, для второй группы этот показатель равен 0.93.

Разделение событий на две группы можно связать с разницей в направлениях тела КВМ и ударной волны. Для первой группы характерно небольшое отклонение направления тела КВМ и ударной волны, до ~ 5 градусов по долготе. В то же время во второй группе этот показатель может достигать 11 градусов. Также на рис 3.8 можно визуальнo оценить ориентацию эллипсов относительно друг друга, которые описывают фронт тела КВМ и ударной волны, соответственно. Для первой группы характерно меньшее расхождение оси эллипсов, чем для второй группы.

3.4 Применение метода “Ice-cream cone” в исследовании геоэффективного события 18 ноября 2003 года.

Данная методика нашла применение в исследовании двух КВМ 18 ноября 2003 года в совместной статье [146], посвященной исследованию КВМ, связанных с геомагнитной бурей 20 ноября 2003 года.

20 ноября 2003 года произошла самая сильная геомагнитная буря в 23 солнечном цикле с $\min Dst = -422$ нТ. Но причины, приведшие к мощнейшему геомагнитному возмущению, и его источник на Солнце остаются неясными до сих пор, несмотря на неоднократные попытки выяснить природу этого явления [147–153]. Источником данного события, вероятно, могла быть только активная область NOAA 10501. Из этой активной области наблюдались два близких по времени выброса, зарегистрированных в поле зрения коронографов LASCO 18 ноября 2003 года. Эти КВМ в ряде работ [147–153] рассматривались как вероятные причины геомагнитной бури: юго-восточный КВМ №1 с началом эрупции в 08:06 и юго-западный КВМ №2, который появился в 08:49 (Рис 3.12).

В работе [146] авторы ставят следующие вопросы: когда и где сформировался КВМ №1? Как ориентирована траектория движения КВМ №2 относительно оси Солнце-Земля? Что эруптировало в период с 08:07 до 08:17 вблизи центра диска Солнца?

В работе [146] также был поставлен вопрос о направлении движения КВМ №1 и КВМ №2 относительно оси Солнце-Земля. Эти направления были найдены с использованием “Ice-cream cone” модели. Из-за неопределенности выделения границы тела КВМ №2 были рассмотрены два возможных варианта: CME2 Main, обведенная сплошной белой линией и CME2 Wide, обведенная пунктирной линией (Рис 3.12). Трехмерные характеристики для двух КВМ представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2: Трехмерные характеристики КВМ №1 и КВМ №2

КВМ №	Время интервал	Скорость [км/с]	Угл.размер α [°]	Широта φ [°]	Долгота λ [°]	Отклонение σ , [км/с]
CME1	08:05-11:41	1950 ± 24	28 ± 2.0	-26 ± 1.8	-8 ± 0.7	8.1-13.5
CME2 Main	08:49-12:17	1778 ± 9.0	50 ± 2.4	-16 ± 1.2	17 ± 1.4	1.0-1.8
CME2 Wide	08:49-12:17	1718 ± 55	66 ± 2.5	-18 ± 1.7	13 ± 1.4	3.2-4.9

Рисунок 3.13 показывает (не в масштабе) реконструкцию КВМ №1 и КВМ №2 в трехмерном пространстве согласно параметрам, представленным в таблице 3.2.

Подробно с описанием проблемы и результатами анализа можно ознакомиться в статье [146]. Здесь лишь приведем основные выводы:

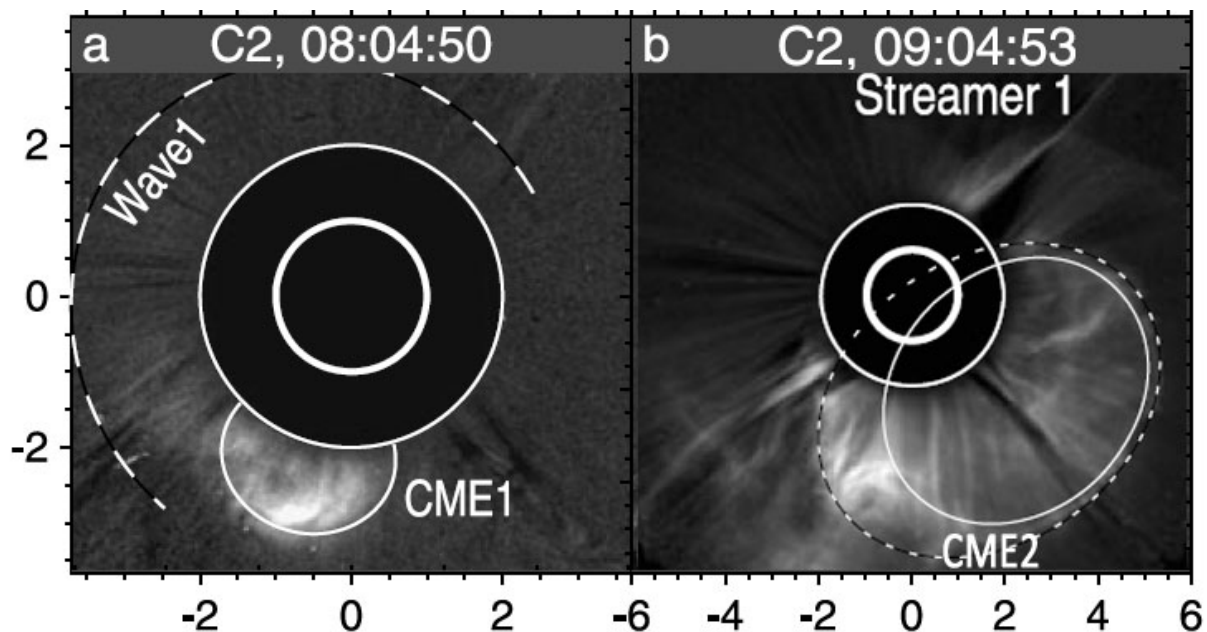


Рисунок 3.12: Событие 18 ноября 2003 года. (а) - граница тела КВМ №1 (СМЕ1) обведена сплошной белой линией. (б) Из-за неопределенности выделения границы тела КВМ №2 были рассмотрены два возможных варианта: СМЕ2 Main, обведенная сплошной белой линией и СМЕ2 Wide, обведенная пунктирной линией.

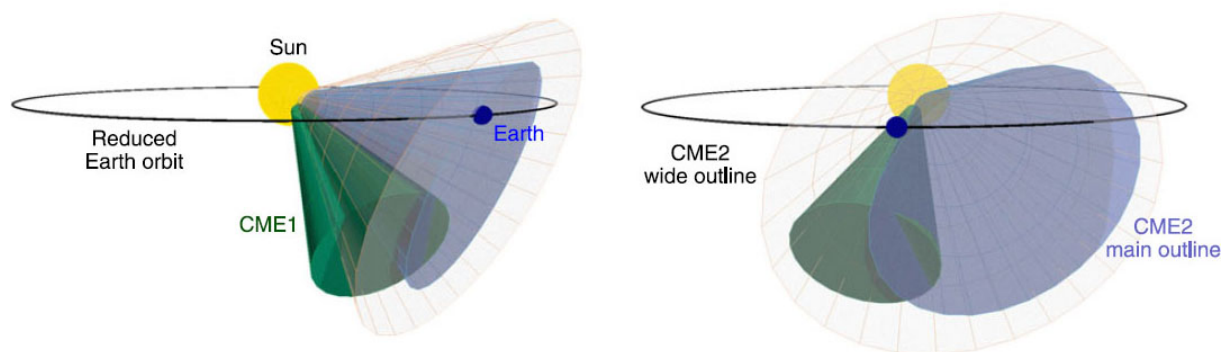


Рисунок 3.13: Иллюстрация ориентации КВМ №1 и КВМ №2, рассчитанная методом “Ice-cream cone” в двух проекциях. Рисунок взят из статьи [146].

- КВМ №1 (СМЕ1) эруптирует в 07:29 из восточной части активной области NOAA 10501, где спиральность магнитного поля отрицательна. КВМ №1 не направлен в сторону Земли.
- КВМ №2 также не направлен в сторону Земли
- КВМ №1 и КВМ №2 двигаются и расширяются близко друг к другу, что приводит к их взаимосжатию, но признаков магнитного пересоединения не наблюдается.
- КВМ №1 и КВМ №2 двигаются в южном направлении относительно плоскости эклиптики и могут произвести только скользящий удар по магнитосфере Земли, с пониженным геомагнитным эффектом.

Исходя из этих выводов, маловероятно, что КВМ №1 или КВМ №2 могли быть причиной мощной геомагнитной бури 20 ноября 2003 года. С другой стороны данные GOES/SXI и радионаблюдения указывают на наличие еще одного КВМ с источником близким к центру солнечного диска. Оценка параметров данного КВМ в работе [75] показала, что выброс

мог расширяться в пределах небольшого $< 14^\circ$ угла и быть невидимым для LASCO (из-за искусственной луны) и сохранить сильное магнитное поле.

3.5 Применение метода “Ice-cream cone” для измерения магнитного поля в солнечной короне вдоль произвольного направления модифицированным методом Gopalswamy and Yashiro (2011)

В отличие от фотосферы, в солнечной короне регулярные измерения магнитного поля не проводятся, хотя отдельные измерения поля, опирающиеся на эффекты Зеемана, Ханле, Фарадея, а также на измерения солнечного радиоизлучения, здесь производились. Разработка надежных и точных методов определения магнитного поля в солнечной короне – одна из ключевых задач, стоящих перед исследователями Солнца. Это связано с тем, что многие свойства короны, в том числе протекающие в ней взрывные, эруптивные процессы тесно связаны с характеристиками магнитного поля на различных пространственных масштабах. В работе [84] предложен и протестирован новый метод нахождения значений магнитного поля в солнечной короне. Метод опирается на свойства корональных выбросов массы (КВМ) и связанных с ними ударных волн и был применен для нахождения радиальных распределений магнитного поля $B(r)$ вблизи плоскости неба. Для нахождения $B(r)$ в этом случае анализировались «лимбовые» КВМ, т.е. выбросы массы, источники которых находятся относительно близко к солнечному лимбу, а сами КВМ движутся под относительно небольшими углами к плоскости неба. В настоящей работе этот метод нахождения величины магнитной индукции во внешней короне применен для корональных выбросов массы типа гало (ГКВМ), движущихся под различными углами к оси Солнце - Земля, в основном - небольшими. Это позволило почти в два раза увеличить расстояние, в пределах которого находилось магнитное поле по сравнению с использованием для нахождения поля лимбовых КВМ.

Наша реализация метода, предложенного (Gopalswamy and Yashiro, 2011 [84]), заключается в следующем.

1) Для каждого рассмотренного КВМ в различные моменты времени его движения в поле зрения коронографа LASCO C3 с использованием метода, предложенного Хае и др. [133], рассчитывается расстояние между ударной волной и телом КВМ ΔR вдоль оси модельного выброса массы, а также радиусом кривизны границы тела КВМ R_c . Заметим, что оси моделей для тела КВМ и связанной с ним ударной волны могут не совпадать. Но в большинстве рассмотренных случаев различие в положениях осей невелико, поэтому при нахождении ΔR мы этим различием пренебрегали и считали, что вершины сферической части модели КВМ и ударной волны находятся на одной прямой. Еще один комментарий касается определения значения R_c . Если угловой размер тела КВМ $\alpha \geq 45^\circ$, то считалось, что R_c равно длине образующей конуса - основы модели тела КВМ. Если $\alpha < 45^\circ$, то R_c полагалась равной радиусу основания модельного конуса. Сопоставление для нескольких тестовых лимбовых выбросов массы полученных нами значений R_c с радиусами кривизны границы тела КВМ, найденным так, как это делалось в работе [84], показало, что различие определенных двумя способами R_c оказывается $< 30\%$.

2) Из соотношения $\Delta R/R_c = 0.81[(\gamma - 1)M^2 + 2]/[(\gamma + 1)(M^2 - 1)]$ [154] находится альфвеновское число Маха M (считалось, что $\gamma = 4/3$).

3) Из формулы $M = (V_{Sh} - V_{SW})/V_A$ находится альфвеновская скорость V_A . Здесь V_{Sh} - скорость ударной волны, V_{SW} - скорость солнечного ветра, по которому распространяется

ударная волна. Как и в работе [84]), скорость солнечного ветра мы находили из соотношения для скорости медленного ветра $V_{SW}^2(R) = 1.75 \times 10^5(1 - \exp(-(R - 4.5)/15.2))$ [155].

4) Из формулы $V_A = 2.18 \times 10^6 n^{-1/2} B$ находится величина магнитной индукции B (в Гс). В этой формуле n (в см^{-3}) - концентрация частиц в корональной плазме, которая полагалась равной концентрации электронов и находилась с помощью соотношения $n(R) = 3.3 \times 10^5 R^{-2} + 4.1 \times 10^6 R^{-4} + 8.0 \times 10^7 R^{-6}$ [156]. Здесь R - расстояние в плоскости неба из центра солнечного диска до точки наблюдения. Это распределение концентрации электронов получено для плоскости эклиптики и, по существу, отражает ход $n(R)$ вне быстрого солнечного ветра в минимуме солнечной активности.

Для анализа были отобраны следующие быстрые корональные выбросы массы: 18.11.03 (08:50:05), 1660 км/с, N00E18, M3.9; 06.04.04 (13:31:43), 1368 км/с, S18E15, M2.4; 03.11.04 (16:54:05), 1759 км/с, N09W17, X2.0; 07.11.04 (16:54:05), 1759 км/с, N09W17, X2.0; 15.01.05 (23:06:50), 2861 км/с, N15W05, X2.6; 17.01.05 (09:30:05), 2094 км/с, N13W19, X2.2; 30.07.2005 (06:50:28), 1968 км/с, N12E60X1.3; 05.09.05 (19:48:05), = 2257 км/с, источник за лимбом; 13.09.05 (20:00:05), 1866 км/с, S09E10, X1.5. Для каждого события в скобках указано время первой регистрации ГКВМ в поле зрения коронографа LASCO C2, далее указаны линейная скорость выброса массы, координаты и рентгеновский балл связанной с ГКВМ вспышки.

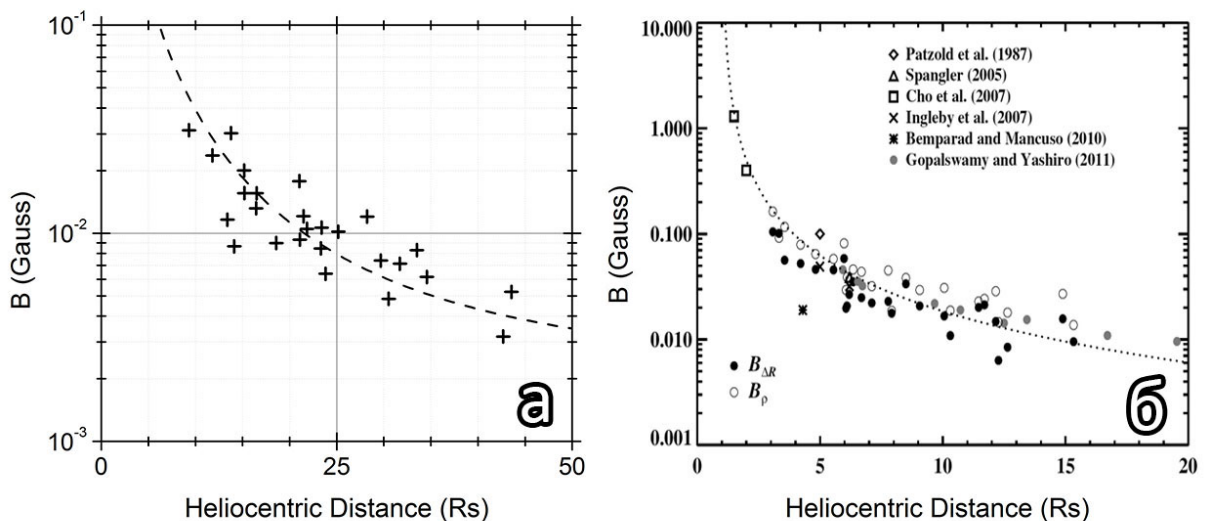


Рисунок 3.14: (а) - Крестики - значения $B(R)$, полученные с помощью расчетов 3-М параметров ГКВМ в разные моменты времени для каждого рассмотренного события. Линия, пересекающая квадраты - $B_r(R) = 8 \times 10^5(215.5/(R/R_o))^2 + 0.002$ Гс. - среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в горизонтальном участке медленного солнечного ветра (Файнштейн, 1991) в зависимости от расстояния. Слагаемое 0.002 - корректирующая добавка для улучшения соответствия между $B_r(R)$ и рассеянием измеренных значений $B(R)$. (б) - Рисунок взят из статьи [84]. Черные точки - альфвеновское число Маха находилось с использованием значений $\Delta R/R_c$, открытые круги - с использованием скачка плотности на фронте ударной волны $\rho d/\rho u$

На Рис 3.14(а) приведены результаты расчетов магнитного поля, полученные с использованием расчетов 3-М параметров ГКВМ. Из этого рисунка следует, что полученная зависимость $B(R)$ (крестики) вполне удовлетворительно согласуется с ожидаемыми значениями магнитного поля в медленном солнечном ветре (сплошная линия, проходящая через точки).

Выбор B_r на орбите Земли именно в горизонтальном участке пояса стримеров связан с тем, что в этом случае можно пренебречь взаимодействием быстрого и медленного потоков солнечного ветра в межпланетном пространстве, приводящего в иных случаях к заметному возмущению магнитного поля в поясе стримеров на орбите Земли [157]. Это означает, что восстанавливая магнитное поле в короне по значениям поля в горизонтальном участке пояса стримеров, мы получаем более правдоподобные значения $B_r(R)$, чем, если бы мы восстанавливали это поле по данным в наклоненном к экватору участке пояса стримеров.

На Рис 3.14(б) для сравнения показаны результаты расчета магнитного поля из работы [158]. В этой работе для нахождения альфвеновского числа Маха M использовался не только связанный с M параметр $\Delta R/R_c$, но и скачок плотности на фронте ударной волны $\rho d/\rho u$, величина которого, как оказалось, связана с $\Delta R/R_c$.

Таким образом, в данном разделе с использованием метода нахождения магнитного поля в солнечной короне, предложенного в работе [84], получены радиальные распределения магнитного поля в короне в диапазоне расстояний $R \approx (6 - 43)R_o$ в направлениях вне плоскости неба, а в большинстве случаев близких к оси Солнце - Земля. Найденные значения магнитного поля находятся в согласии с ожидаемыми и полученными из оценок значениями магнитного поля в медленном солнечном ветре. Полученные результаты в диапазоне $R = (6 - 20)R_o$ согласуются с результатами работы [158].

3.6 Основные результаты исследования, представленные в Главе 3.

1. Предложено находить трехмерные параметры отдельно для границы тела КВМ и отдельно для ударной волны с использованием модели “Ice-cream cone”.
2. Использованы два способа проверки точности нахождения 3D параметров границы тела КВМ и УВ методом, предложенным в работе [133].
3. Для 9 быстрых выбросов массы типа гало сопоставлены зависимости от времени положений и скорости границы тела КВМ и связанной ударной волны. Сделан вывод, что в среднем скорость тела КВМ уменьшается быстрее, чем связанной с ним ударной волны.
4. Исследованы зависимости изменения расстояния между границей тела КВМ и ударной волной от времени и положения границы тела КВМ.
5. Показано, что существует две группы КВМ с различными зависимостями. Предложено объяснение существования двух групп зависимостей.
6. Расчеты траектории движения и скоростей двух КВМ, которые считались причиной самой мощной геомагнитной бури 23 солнечного цикла, показали, что эти КВМ с большой вероятностью не являются источниками бури 20 ноября 2003 года.
7. Используя расчеты 3D параметров КВМ типа гало с помощью “Ice-cream cone” модели, были получены радиальные распределения магнитного поля в солнечной короне вдоль направлений, близких к оси Солнце-Земля.

Заключение

Проведенные исследования по данным инструментов с высоким временным и пространственным разрешением позволили рассмотреть формирование и начальную стадию движения лимбовых КВМ, которым предшествует эрупция протуберанца. Анализ событий проводился в нескольких спектральных каналах инструментов SDO/AIA и в канале 174 \AA инструмента PROBA2/SWAP, который также обладает хорошим пространственным и временным разрешением, а также большим по сравнению с SDO/AIA полем зрения. Эта характеристика инструмента позволила для нескольких событий наблюдать формирование КВМ, которое не видно в поле зрения SDO/AIA. Изучение данных в горячей линии 131 \AA ($\sim 10^7 \text{ K}$) показало наличие медленного поступательного движения протуберанца или эмиссионной петлевой структуры за несколько минут до начала вспышки. Обнаружена диффузная область перед фронтом тела КВМ в каналах 193 \AA и 211 \AA , граница которой в некоторых случаях оказалась ударной волной. Данные с высоким временным разрешением позволили более точно построить временные профили скорости эруптивного протуберанца и КВМ и сравнить эти профили с изменением интенсивности мягкого рентгеновского излучения I_{SXR} из связанной с КВМ вспышки, а временные профили ускорения сравнить с профилями интенсивности жесткого рентгеновского излучения I_{HXR} из области вспышки и/или с dI_{SXR}/dt .

Разработана методика выделения ударных волн с использованием сканов яркости по данным SDO/AIA. Определены положения фронта ударной волны для нескольких событий. Найденные экспериментально положения ударной волны сравнивались с теоретической зависимостью изменения положения взрывной ударной волны от времени в предположении о расширении волны в автомоделном режиме.

Впервые была применена модель “Ice-cream cone” для нахождения трехмерных параметров отдельно для КВМ и отдельно для связанной ударной волны по данным LASCO C2 и C3. Для нескольких событий были определены кинематические характеристики границы тела КВМ и связанной ударной волны в зависимости от времени (расстояния). Данная методика использовалась для определения направления движения и скорости двух КВМ с целью выяснения их возможной роли в генерации самой мощной в 23 солнечном цикле геомагнитной бури 20 ноября 2003 года.

Другим применением расчетов трехмерных параметров КВМ и ударной волны с помощью “Ice-cream cone”-модели стал расчет магнитного поля вдоль радиальных направлений, близких к оси Солнце-Земля, по методике, предложенной Gopalswamy and Yashiro (2011).

Основные результаты выполненной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Установлены физические и морфологические особенности формирования десяти лимбовых КВМ, связанных с эрупцией протуберанца:
 - (a) Формирование КВМ начинается с эрупции протуберанца или горячей эмиссионной петли.
 - (b) Эруптивный протуберанец (эмиссионная петля) возмущает вышележащие структуры короны, что в некоторых случаях приводит к возникновению по-

следовательности движущихся вверх с разной скоростью петлеобразных структур. При этом, для нескольких событий петлеобразные структуры, возникающие позднее имеют темп набора скорости выше, чем структуры, которые начинают свое движение раньше.

- (с) Еще одним следствием возмущения эруптивным протуберанцем вышележащих слоев короны является возникновение на определенной высоте прообраза будущей фронтальной структуры. Такая квазифронтальная структура с самого начала своей визуализации вовлекается в движение.
- (d) После достижения внутренних петель этой квазифронтальной структуры окончательно формируется фронтальная структура КВМ.
- (e) В то же время формирование практически каждого рассмотренного КВМ характеризуется различными особенностями. К таким особенностям относятся форма и вид квазифронтальной структуры, характер проявления воздействия эруптивного протуберанца на вышележащие области короны, начальная высота эруптивного протуберанца, возникновение блобов, движущихся вдоль эруптивного протуберанца и т.д.

2. Исследование кинематики рассмотренных КВМ показало, что:

- (a) Движение протуберанца с небольшой скоростью начинается за несколько минут до начала вспышки.
- (b) Начальное движение фронтальной структуры КВМ удалось зафиксировать лишь после начала вспышки.
- (с) Показано, что временной профиль скорости КВМ (фронтальной структуры КВМ) может быть двух типов. В одном случае скорость быстро достигает максимума, затем достаточно быстро уменьшается до определенного значения и далее меняется слабо. Во втором случае скорость КВМ начинает слабо меняться практически сразу после достижения максимума.
- (d) Временные профили скорости протуберанца и фронтальной структуры КВМ до достижения максимума скорости синхронизованы с нарастанием интенсивности мягкого рентгеновского излучения I_{SXR} из области связанной с КВМ вспышки. Ускорение КВМ до достижения максимального значения оказывается синхронизованным с нарастанием потока жесткого рентгеновского излучения, а также с нарастанием производной dI_{SXR}/dt .

3. Анализ геометрических характеристик рассмотренных КВМ показал, что:

- (a) Для всех рассмотренных КВМ угловой размер L_w растет со временем. Диапазон изменения L_w составил для отдельных выбросов примерно 0.5-6. Характерный масштаб времени изменения углового размера КВМ в полтора раза в среднем составляет ~ 4.5 минуты.
- (b) Показано, что ось движения всех рассмотренных КВМ отклоняется от радиального направления в диапазоне значений от 5.5 до 67 градусов. Сама траектория движения КВМ со временем меняется слабо в поле зрения SDO/AIA и не превышает 2.5% от среднего.
- (с) Для всех рассмотренных событий отношение продольного размера тела КВМ к поперечному в начальные моменты меняется слабо. Затем это отношение постепенно уменьшается в среднем на 0.2 за 6 минут. Для 3 событий этот параметр

выходит на единицу в поле зрения SDO/AIA. Это можно интерпретировать как выход на автомодельный (или самоподобный) режим расширения КВМ, когда форма границы выброса не меняется со временем.

4. Исследована кинематика и природа ударных волн, связанных с КВМ.

- (a) Предложен метод выделения ударных волн, связанных с КВМ в поле зрения инструментов с высоким пространственным разрешением SDO/AIA.
- (b) Найдены кинематические характеристики для нескольких ударных волн, связанных с КВМ.
- (c) Для двух событий (13 июня 2010 года и 7 декабря 2012 года) были сопоставлены временные профили положения и скорости границы тела КВМ и ударной волны. Сделан вывод, что временные профили скорости границы тела КВМ и ударной волны существенно различаются.
- (d) Для событий, указанных в пункте 3, временные профили положения и скорости ударной волны были сопоставлены с теоретическими зависимостями соответствующих кинематических характеристик, полученных для взрывной ударной волны, движение которой описывается автомодельным приближением. Показано, что существует очень хорошее согласие между временными профилями положений ударной волны, полученных из наблюдений, а также из теории.
- (e) На основании результатов, отмеченных в пунктах 3 и 4, сделан вывод о том, что исследованные ударные волны являются взрывными на начальном этапе их движения.
- (f) Высказано предположение, что механизмом генерации взрывных ударных волн, в данном случае, является сильное воздействие эруптивного протуберанца, движущегося с большим ускорением, на вышележащие слои короны.
- (g) С использованием найденных положений ударной волны и сведений о радиовсплесках II типа для события 13 июня 2010 года были получены пространственные распределения концентрации электронов в поле зрения инструментов SDO/AIA, а также величины скачка плотности электронов на фронте ударной волны, которые оказались в очень хорошем согласии с аналогичными зависимостями, полученными ранее в работе Gopalswamy et al. (2012).

5. Изучены особенности движения тела КВМ и связанной с ним ударной волны в трехмерном пространстве.

- (a) Предложено находить трехмерные параметры отдельно для границы тела КВМ и отдельно для ударной волны с использованием модели “Ice-cream cone”.
- (b) Используются два способа проверки точности нахождения 3D параметров границы тела КВМ и УВ методом, предложенным в работе Hue et al. (2005).
- (c) Для 9 быстрых выбросов массы типа гало сопоставлены зависимости от времени положений и скорости границы тела КВМ и связанной ударной волны. Сделан вывод, что в среднем скорость тела КВМ уменьшается быстрее, чем связанной с ним ударной волны.
- (d) Исследованы зависимости изменения расстояния между границей тела КВМ и ударной волной от времени и положения границы тела КВМ.
- (e) Показано, что существует две группы КВМ с различными зависимостями. Предложено объяснение существования двух групп зависимостей.

- (f) Расчеты траектории движения и скоростей двух КВМ, которые считались причиной самой мощной геомагнитной бури 23 солнечного цикла, показали, что эти КВМ с большой вероятностью не являются источниками бури 20 ноября 2003 года.
- (g) Используя расчеты 3D параметров КВМ типа гало с помощью “Ice-stream cone” модели, были получены радиальные распределения магнитного поля в солнечной короне вдоль направлений, близких к оси Солнце-Земля.

Результаты диссертации опубликованы в 13 статьях, в том числе три из списка ВАК и Web of Science.

В заключение автор выражает благодарность и признательность своему научному руководителю д. ф.-м. н. В.Г. Файнштейну за интересную постановку целей и задач диссертации, обсуждение физических аспектов изучаемых явлений и физических процессов на Солнце, а также ценные замечания и помощь на всех этапах подготовки диссертации.

Автор высоко ценит сотрудничество с д. ф.-м. н. В.В. Гречневым, в соавторстве с которым опубликована часть результатов работы, и выражает благодарность за полезные дискуссии и интересные подходы к решению поставленных задач. Автор признателен также всему коллективу соавторов совместных работ.

Наконец, автор считает своим долгом выразить большую благодарность всему коллективу Отдела солнечной физики ИСЗФ СО РАН, в том числе зав. Лаборатории солнечной активности д.ф.-м.н. А.В. Мордвинову и чл.-кор. РАН В.М. Григорьеву за созданную творческую атмосферу и предоставленные возможности апробации результатов исследований на Всероссийских и международных конференциях.

Список рисунков

1	Примеры КВМ в поле зрения разных инструментов. а - КВМ в спектральной линии 171 Å инструмента SDO/AIA. б - КВМ в спектральной линии 211 Å инструмента SDO/AIA. в - КВМ в поле зрения инструмента SWAP/PROBA2. г - КВМ в поле зрения инструмента Mark IV. д - КВМ в поле зрения инструмента LASCO/C2. На рисунке видна трехчастная структура КВМ (яркое ядро, темная полость и яркая фронтальная часть.) е - гало КВМ, окруженный диффузной областью - ударной волной. Рисунки (д) и (е) взяты с ресурса http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list .	5
1.1	КВМ 13 июня 2010 года. Изображения в канале 171 Å по данным SDO/AIA. (а-в) - показаны изображения без предварительной обработки перед выводом на экран: оригинальное, разностное и разностное с делением на первый кадр временной серии. (г-е) - соответствующие изображения с предварительной обработкой перед выводом на экран.	18
1.2	Определение положения фронтальной части КВМ вдоль выбранного направления (отмечено черным крестиком).	19
1.3	а - определение углового размера (L_w) КВМ. Центр угла L_w помещался в центр солнечного диска, а стороны угла проводились к крайним точкам фронтальной структуры КВМ. б - определение отклонения (α) траектории движения КВМ (D_{CME}) от радиального направления (D_{rad}). Направления движения КВМ D_{CME} определяется как вектор, выходящий из источника КВМ и делящий пополам угловой размер КВМ (с центром в источнике КВМ). в - определение отношения продольного размера (L_h) КВМ к поперечному (L_w). L_h - отсчитывается от источника КВМ.	20
1.4	Событие 13 июня 2010 начинается с эрупции горячей эмиссионной петли (стрелка 1) в линии 131 Å. Данная эрупция возмущает и приводит в движение вышележащие петлевые структуры (стрелка 2)	23
1.5	КВМ 13 июня 2010 года. (а,г) - разностные изображения в канале 193 Å. (б,д) - разностные изображения в канале 131 Å. (в,е) - разностные изображения в канале 171 Å. Стрелкой 1 отмечена горячая эмиссионная петля. Стрелкой 2 отмечена внутренняя петлевая структура.	24
1.6	Событие 13 июня 2010. (а) - горячая эмиссионная петля (стрелка 1) в линии 171 Å. (б-в) - Данная эрупционная петля возмущает и приводит в движение вышележащие петлевые структуры (стрелка 2) и формирует фронтальную структуру КВМ (стрелка 3).	24
1.7	Событие 13 июня 2010 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и эмиссионной петли (черная линия). Синей пунктирной линией показана интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. б - ускорение КВМ (красная линия) и эмиссионной петли (черная линия). Синяя пунктирная линия - производная интенсивности мягкого рентгеновского излучения	25
1.8	Событие 13 июня 2010 года. На изображениях показана временная серия в трех спектральных каналах 131, 171 и 211 Å, состоящая из узкой полосы 13 на 200 пикселей. Белые линии - это гиперболические функции, описывающие изменение положения со временем горячей эмиссионной петли (1), внутренней петлевой структуры (2), фронтальной структуры КВМ (3) и ударной волны (4).	25

1.9	Событие 07 июня 2011. а - волокно (протуберанец) по наблюдению в канале 131 Å в начальный период эрупции. б - этот же протуберанец в период импульсного ускорения в канале 304 Å. в - этот же протуберанец в линии H α	26
1.10	Событие 7 июня 2011 г. Последовательность изображений участка Солнца по наблюдениям инструментом SDO/AIA в канале 171 Å (а-с; е). 1 – эруптивный протуберанец; 2 – внутренние движущиеся структуры; 3 – внешняя структура, впоследствии – часть фронтальной структуры КВМ отмеченной цифрой 4. d– исходное изображение участка Солнца для лучшего выделения эруптивного протуберанца. f – разностное изображение участка Солнца в канале 211 Å. Цифрой 5 обозначена граница диффузной области впереди яркой области (отмечена цифрой 4), предположительно ударная волна.	27
1.11	Событие 7 июня 2011 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синей пунктирной линией показана интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. б - ускорение КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синяя пунктирная линия - производная интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Интенсивность жесткого рентгеновского излучения по данным RHESSI показано зеленой линией. Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки.	28
1.12	Событие 7 июня 2011 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Внутренняя петлевая структура показана синей линией. б - ускорение КВМ (красная линия), протуберанца (черная линия) и внутренней петлевой структуры (синяя линия). Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки.	29
1.13	Событие 08 марта 2011. а-в - инвертированные изображения SDO/AIA в спектральном диапазоне 131 Å. г-е - инвертированные изображения SDO/AIA в спектральном диапазоне 171 Å. Стрелкой №1 показан магнитный жгут. Вышележащая аркада петель отмечена стрелкой №2. Стрелкой №3 показано место “прорыва” магнитного жгута. Место прорыва соответствует группе петель (стрелка №4), лежащих выше относительно остальной аркады петель.	30
1.14	Событие 08 марта 2011. а - слабое возмущение в поле зрения LASCO C2 после “failed eruption”. б - нарастание интенсивности мягкого рентгеновского излучения, соответствующая первому этапу (стрелка №2) и второму этапу (стрелка №3).	31
1.15	Событие 08 марта 2011. Первый этап. Событие начинается 8 марта 2011 с эрупции протуберанца (стрелка 1) в линии 171 Å. Данная эрупция возмущает и приводит в движение вышележащую аркаду петель (стрелка 2). Подъем аркады продолжается до примерно 18:52 (UT)	31
1.16	Событие 08 марта 2011. Второй этап. а - начало движения эруптировавшего и оставившегося ранее протуберанца (стрелка 1). Аркада петель над протуберанцем указана стрелкой 2. б - Протуберанец (1) частично раздвигает над собой аркаду петель (2). в - на разностном изображении SWAP/PROBA2 видно образование фронтальной структуры КВМ (стрелка 3).	32
1.17	Событие 08 марта 2011. а - Стример (3) в поле зрения LASCO C2. б - протуберанец (1) и фронтальная структура КВМ (2) в поле зрения LASCO C2. Заметна деформация выпуклой формы фронтальной структуры КВМ. в - Разностное изображение LASCO C3. Деформация усиливается с расстоянием.	33

- 1.18 Событие 08 марта 2011. (а) - временной профиль положения (height) протуберанца и КВМ на первом и втором этапах. Серыми крестиками показаны положения, линиями - би-сплайн аппроксимации этих положений. Черная линия - положения протуберанца на первом и втором этапах. Красная линия - положение аркады петель на первом этапе и КВМ (фронтальная структура) на втором этапе. Черной вертикальной линией на графиках отмечены моменты начала вспышки по данным GOES. Временной промежуток между двумя этапами составляет примерно 30 минут. (б) - Этап №1. Временной профиль скорости протуберанца в 131 Å (черная линия), протуберанца в линии 171 Å (синяя сплошная линия) и аркады петель (красная линия). Синяя пунктирная линия показывает профиль интенсивности мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. (в) - Этап №2. Временной профиль скорости протуберанца (черная линия) и КВМ (красная линия). Синяя пунктирная линия показывает профиль интенсивности мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. 34
- 1.19 Событие 29 июня 2011. а - появлению КВМ предшествует эрупция двух протуберанцев (1) и (2). б и с - наложение протуберанца (2) в линии 304 Å на формирование фронтальной структуры КВМ (3) в линии 171 Å. Расширение фронтальной структуры КВМ соответствует расширению протуберанца (2). f - разностное изображение фронтальной структуры КВМ по данным LASCO/C2. 35
- 1.20 КВМ 29 июня 2011 года. а - профиль скорости для КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синей пунктирной линией показана интенсивность мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки. б - ускорение КВМ (красная линия) и протуберанца (черная линия). Синяя пунктирная линия - производная интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки. 36
- 1.21 КВМ 29 июня 2011 года. а - профиль скорости для внутреннего протуберанца (синяя линия) и внешнего (черная линия). б - ускорение для внутреннего протуберанца (синяя линия) и внешнего (черная линия). Черная вертикальная линия на графиках - начало связанной с КВМ вспышки. 36
- 1.22 Схематичное изображение всплывающего магнитного потока как триггера эрупции КВМ. (а) - всплытие магнитного потока в области канала волокна приводит к перестройке существующего магнитного поля, что приводит к уменьшению магнитного давления данной структуры. Давление плазмы по бокам приводит к образованию токового слоя. (б) - всплытие магнитного потока за пределами канала волокна. В этом случае происходит магнитное пересоединения всплывающего потока с корональной петлей, отмеченной на рисунке жирной линией, что приводит к расширению этой петли. Вследствие этого, нижележащий магнитный жгут поднимается, образуя под собой токовый слой вблизи нейтральной линии магнитного поля. Рисунок и описание рисунка взято из работ [109] 39
- 1.23 Событие 08 марта 2011. а-в - магнитограммы HMI/SDO. г-е - изображения SDO/AIA в спектральном диапазоне 1700 Å. Стрелками отмечены места появления пор на изображениях в канале 1700 Å и соответствующие места на магнитограммах, в которых наблюдается всплытие магнитного потока. 40

1.24	Иллюстрация взаимосвязи вспышечных процессов с динамическими процессами КВМ и магнитного жгута. КВМ, движущийся в направлении от поверхности Солнца, вытягивает силовые линии и уносит часть вещества с собой, создавая разрежение в области образования КВМ. Более плотная плазма по бокам от места эрупции устремляется в это место, еще больше поджимая вытянутые силовые линии, что приводит к образованию токового слоя и магнитному пересоединению. Чем больше вещества с вмороженным в нее магнитным полем придет в место магнитного пересоединения, тем сильнее будет вспышка. Последующее пересоединение силовых линий приводит к усилению полоидального поля в эруптирующем магнитном жгуте, что приводит к появлению силы, направленной от поверхности Солнца (Сила Лоренца). Рисунок взят из статьи Temmer и др. (2010) [48]	42
1.25	Параметры КВМ. а - зависимость углового размера КВМ от времени. б - зависимость отклонения траектории движения КВМ от радиального направления от времени. По углу наклона точек можно оценить, как сильно меняется траектория движения КВМ со временем. Для всех рассмотренных событий траектории движения меняются слабо. в - зависимость отношения продольного размера КВМ к поперечному от времени.	44
1.26	Прямая линия - линия регрессии. г - коэффициент корреляции.	45
2.1	Событие 13 июня 2010 года. (а) - разностное изображение. Стрелками указаны границы тела КВМ и связанной ударной волны. Окружность описана по границе диффузной области. Сканирование ведется вдоль прямой с началом в центре окружности и параллельным оси x . Черная прямая - линия сканирования. (б) - распределение яркости вдоль линии сканирования в области скачка яркости. Красная стрелка указывает на скачок яркости (фронт УВ) и соответствует концу красного отрезка на Рис 2.1(а). (в) - распределение яркости, что и на Рис 5(б) но в большем диапазоне по оси x . Пунктирная линия - среднее по 4 изображениям в ранние моменты времени вдоль линии сканирования.	50
2.2	Иллюстрация метода сканирования. Пусть OA - линия сканирования профиля яркости, проведенная из центра окружности, описанной по границе диффузной области. BC - дуга окружности с заданной для конкретного момента времени длиной $l(t)$. Усредненное значение яркости $b(r)$ вдоль дуги BC присваивается точке $x(r)$ на линии сканирования. Подобное усреднение по дуге окружности фиксированной длины $l(t)$ производится в каждой точке линии сканирования OA	51
2.3	Событие 13 июня 2010 года. (а-в) - показаны три изображения в разные моменты времени для КВМ, зарегистрированного 13 июня 2010 г. (г-е) - показаны сканы яркости в соответствующие моменты времени. Красная стрелка указывает на скачок яркости, который соответствует фронту ударной волны. Угол (Angle) отсчитывается от горизонтальной белой линии, проведенной из центра окружности.	53
2.4	Событие 13 июня 2010 года. Сканы яркости в разные моменты времени вдоль выбранного направления, показанного на (а).	55
2.5	Событие 13 июня 2010 года. (а) - Зависимость положения от времени ударной волны (сплошная линия), полученная с использованием теоретической зависимости $r(t) = (r_1 - r_0)[(t - t_0)/(t - t_1)]^{2/(5-\delta)} + r_0$ и фронтальной структуры КВМ (пунктирная линия) в направлении параллельно оси X из фиксированного центра окружности в координатах [894;-438] arcsec. (б) - скорость тела КВМ (пунктирная линия) и ударной волны (сплошная линия) вдоль выбранного направления. (в) - Зависимость расстояния между телом КВМ и связанной с ним ударной волной ΔR от времени. (г) - зависимость скорости изменения ΔR со временем.	56
2.6	Событие 13 июня 2010. (а,б) - Приведены зависимости положения от времени ударной волны (сплошная линия), полученные с использованием теоретической зависимости по измененному набору точек измеренных положений ударной волны. . .	57

2.7	КВМ 13 июня 2010 года. (а) - Радиовсплеск II типа по данным Hiraio Radio Observatory. (б) - эрупция горячей эмиссионной петли (цифра 1) в канале 131 Å по данным SDO/AIA.	58
2.8	КВМ 13 июня 2010 года. (а) - Найденная по радиоизлучению зависимость концентрации электронов от времени (крестики). Сплошная линия проведена по гиперболическому закону $n(t) = 0.05t/(t - 2.4 \times 10^6)$; (б) - Зависимость концентрации электронов от расстояния R (крестики). Сплошная линия проведена по экспоненциальному закону $n(R) = 9.2 \times 10^{14} \times \exp(-13R) + 2.9 \times 10^7$	59
2.9	Событие 7 декабря 2012 года. На нижней панели приведены сканы яркости в три момента времени вдоль направлений, показанных на верхней панели красными линиями. Красные стрелки указывают на ударную волну.	60
2.10	Событие 7 декабря 2012 года. (а) - Зависимость положения от времени ударной волны (сплошная линия), полученная с использованием теоретической зависимости $r(t) = (r_1 - r_0)[(t - t_0)/(t - t_1)]^{2/(5-\delta)} + r_0$ и фронтальной структуры КВМ (пунктирная линия) в направлении, указанном на Рис 2.9 из фиксированного центра окружности. (б) - скорость тела КВМ (пунктирная линия) и ударной волны (сплошная линия) вдоль выбранного направления. (в) - Радиовсплеск II типа по данным Culgoora.	61
3.1	Иллюстрация “Ice-cream cone” модели и соотношение между системой координат конуса и гелиоцентрической системой координат. Здесь α - угловой размер конуса, θ_0 - широтный угол, ϕ_0 - долготный угол, ось x_h - соответствует оси Солнце-Земля, ось z_c соответствует оси конуса и описывает направление движения КВМ. Рисунок взят из работы [133]	65
3.2	а - определение положений (черные квадраты) фронтальной структуры КВМ вдоль радиальных прямых (серые линии). б - реконструкция трехмерных параметров КВМ (черная линия) по распределению экспериментальных точек положения фронтальной структуры КВМ (треугольники) вдоль угла ψ . Пунктирная линия - результат расчетов модели, предложенной авторами статьи [133] в их предыдущей работе. Рисунок взят из работы [133]	66
3.3	а - определение положений (сплошная белая линия) фронтальной структуры КВМ с помощью описывания границы эллипсом; пунктирной линией описана граница ударной волны. б - зависимость удаленности границы тела КВМ от угла ψ по данным наблюдений (сплошная линия) и с использованием расчетов (пунктирная линия)	67
3.4	Событие 18 августа 2010 года. а - разностное изображение в поле зрения LASCO/C3. Сплошной кривой линией очерчена граница тела КВМ. Пунктиром показан солнечный экватор. Сплошной прямой линией, проведенной из центра солнечного диска под углом θ к экватору, показана ось КВМ (линия, проходящая через наиболее удаленную точку границы КВМ). б - разностное изображение в поле зрения коронографа STEREO-A/COR2. Пунктиром показана линия, соединяющая центр солнечного диска с космическим аппаратом. Сплошной линией показана ось КВМ. Угол ϕ практически совпадает с долготой оси КВМ относительно картинной плоскости LASCO/C3. в - положение аппаратов STEREO-A и STEREO-B 18 августа 2010 года.	68
3.5	Окно интерфейса процедуры “scc_measure.pro”. Слева направо приведены изображения КВМ в поле зрения инструментов COR2 космических аппаратов STEREO-B и STEREO-A для события 7 марта 2011 года.	69
3.6	Событие 7 марта 2011 года. (а) - изображение КВМ в поле зрения LASCO/C2. Сплошной линией очерчена граница тела КВМ, пунктирной линией - ударная волна. (б) - приведены результаты расчетов (сплошная линия) положения отдельных точек на границе тела КВМ и на ударной волне в зависимости от угла ψ	69

3.7	Результаты расчетов положений тела КВМ и ударной волны в трехмерном пространстве. Синим цветом показаны зависимости положения от времени фронта ударной волны по методу “Ice-cream cone” (сплошная линия) и методом стереоскопии (пунктирная линия). Те же зависимости, но для фронта тела КВМ показаны на рисунки черным цветом.	70
3.8	Разностные изображения LASCO/C3 для 9 изученных событий. Сплошной белой линией участком эллипса выделена граница тела КВМ, пунктирной линией - ударная волна.	71
3.9	Событие 7 марта 2011 года. (а) - график зависимости рассчитанного положения КВМ (крестики) и УВ (круги) от времени. Сплошная и пунктирная линии - аппроксимация полиномом II степени положений КВМ и ударной волны соответственно. (б) - график скорости КВМ (сплошная линия) и УВ (пунктирная линия).	73
3.10	(а) - график зависимости рассчитанного положения КВМ (крестики) и УВ (круги) от времени. Сплошная и пунктирная линии - аппроксимация полиномом II степени положений КВМ и ударной волны соответственно. (б) - график скорости КВМ (сплошная линия) и УВ (пунктирная линия).	73
3.11	(а,б) - зависимость изменения ΔR от расстояния до центра Солнца (в качестве такого расстояния взято положение границы тела КВМ R_{CME}) и от времени соответственно. За начало отсчета для всех событий выбран момент начала связанной с КВМ вспышки. Первая группа точек отмечена кругами. Красная линия - линия регрессии этих точек. Вторая группа - крестики с линией регрессии, показанной черной прямой. (в) - соотношение угловых размеров КВМ (выделено красным цветом) и ударной волны (синий цвет).	74
3.12	Событие 18 ноября 2003 года. (а) - граница тела КВМ №1 (CME1) обведена сплошной белой линией. (б) Из-за неопределенности выделения границы тела КВМ №2 были рассмотрены два возможных варианта: CME2 Main, обведенная сплошной белой линией и CME2 Wide, обведенная пунктирной линией.	76
3.13	Иллюстрация ориентации КВМ №1 и КВМ №2, рассчитанная методом “Ice-cream cone” в двух проекциях. Рисунок взят из статьи [146].	76
3.14	(а) - Крестики - значения $B(R)$, полученные с помощью расчетов 3-М параметров ГКВМ в разные моменты времени для каждого рассмотренного события. Линия, пересекающая квадраты - $B_r(R) = 8 \times 10^5 (215.5/(R/R_o))^2 + 0.002$ Гс. - среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в горизонтальном участке медленного солнечного ветра (Файнштейн, 1991) в зависимости от расстояния. Слагаемое 0.002 - корректирующая добавка для улучшения соответствия между $B_r(R)$ и рассеянием измеренных значений $B(R)$. (б) - Рисунок взят из статьи [84]. Черные точки - альфвеновское число Маха находилось с использованием значений $\Delta R/R_c$, открытые круги - с использованием скачка плотности на фронте ударной волны $\rho d/\rho u$	78

Литература

1. Webb D. F., Howard T. A. Coronal Mass Ejections: Observations // Living Reviews in Solar Physics. 2012. jun. Т. 9. с. 3.
2. Chen P. F. Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis // Living Reviews in Solar Physics. 2011. apr. Т. 8. с. 1.
3. Gopalswamy N. The CME link to geomagnetic storms // IAU Symposium / под ред. А. G. Kosovichev, А. Н. Andrei, J.-P. Rozelot. Т. 264 из *IAU Symposium*. 2010. feb. С. 326–335.
4. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst = -100$ nT) during 1996–2005 / J. Zhang, I. G. Richardson, D. F. Webb [и др.] // Journal of Geophysical Research (Space Physics). 2007. oct. Т. 112, № A11. с. 10102.
5. Tousey R. The solar corona. // Space Research Conference / под ред. М. J. Rycroft, S. K. Runcorn. 1973. С. 713–730.
6. The High Altitude Observatory Coronagraph/Polarimeter on the Solar Maximum Mission / R. M. MacQueen, A. Csoeke-Poeckh, E. Hildner [и др.] // *Solar Phys.*. 1980. feb. Т. 65. С. 91–107.
7. Hundhausen A. Coronal Mass Ejections // The many faces of the sun: a summary of the results from NASA's Solar Maximum Mission. / под ред. К. Т. Strong, J. L. R. Saba, В. М. Haisch [и др.]. 1999. с. 143.
8. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) / G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen et al. // Solar Physics. 1995. Vol. 162. P. 357–402.
9. Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI) / R. A. Howard, J. D. Moses, A. Vourlidas [и др.] // *Space Sci. Rev.*. 2008. apr. Т. 136. С. 67–115.
10. New Mauna Loa coronagraph systems / R. R. Fisher, R. H. Lee, R. M. MacQueen [и др.] // *Applied Optics*. 1981. mar. Т. 20. С. 1094–1101.
11. Demastus H. L., Wagner W. J., Robinson R. D. Fast Transient Events Observed in the Green Coronal Emission Line // Bulletin of the American Astronomical Society. Т. 5 из *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1973. mar. с. 270.
12. The NOAA GOES-12 Solar X-ray Imager (SXI) / S. M. Hill, V. J. Pizzo, D. C. Wilkinson [и др.] // AGU Spring Meeting Abstracts. 2001. may. с. 61.
13. EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO Mission / J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud [и др.] // *Solar Phys.*. 1995. dec. Т. 162. С. 291–312.
14. EUVI: the STEREO-SECCHI extreme ultraviolet imager / J.-P. Wuelser, J. R. Lemen, T. D. Tarbell [и др.] // Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics / под ред. S. Fineschi, M. A. Gummin. Т. 5171 из *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. 2004. feb. С. 111–122.
15. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) / J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin et al. // Solar Physics. 2012. Vol. 275. P. 17–40.

16. SWAP onboard PROBA 2, a new EUV imager for solar monitoring / D. Berghmans, J. F. Hochedez, J. M. Defise [и др.] // *Advances in Space Research*. 2006. jan. T. 38. C. 1807–1811.
17. The SWAP EUV Imaging Telescope Part I: Instrument Overview and Pre-Flight Testing / D. B. Seaton, D. Berghmans, B. Nicula [и др.] // *Solar Phys.*. 2013. aug. T. 286. C. 43–65.
18. SWAP onboard PROBA 2, a new EUV imager for solar monitoring / D. Berghmans, J. F. Hochedez, J. M. Defise et al. // *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 38. P. 1807–1811.
19. The Solar Mass Ejection Imager (Smei) / C. J. Eyles, G. M. Simnett, M. P. Cooke [и др.] // *Solar Phys.*. 2003. nov. T. 217. C. 319–347.
20. The Heliospheric Imagers Onboard the STEREO Mission / C. J. Eyles, R. A. Harrison, C. J. Davis [и др.] // *Solar Phys.*. 2009. feb. T. 254. C. 387–445.
21. Illing R. M. E., Hundhausen A. J. Disruption of a coronal streamer by an eruptive prominence and coronal mass ejection // *J. Geophys. Res.*. 1986. oct. T. 91. C. 10951–10960.
22. Fainshtein V. G., Zagaynova Y. S. The beginning of halo coronal mass ejection // ArXiv e-prints. 2012. aug.
23. A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO / N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek [и др.] // *Sun and Geosphere*. 2010. nov. T. 5. C. 7–16.
24. Fainshtein V. G. Method for determining the parameters of full halo coronal mass ejections // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2006. may. T. 46. C. 339–349.
25. A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft / S. Yashiro, N. Gopalswamy, G. Michalek [и др.] // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2004. jul. T. 109. c. 7105.
26. Narrow Coronal Mass Ejections / H. R. Gilbert, E. C. Serex, T. E. Holzer [и др.] // *Astrophys. J.*. 2001. apr. T. 550. C. 1093–1101.
27. The SOHO/LASCO CME Catalog / N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek [и др.] // *Earth Moon and Planets*. 2009. apr. T. 104. C. 295–313.
28. Hudson H. S., Webb D. F. Soft X-ray signatures of coronal ejections // Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. 1997. T. 99. C. 27–38.
29. Coronal dimming and the coronal mass ejection onset / R. A. Harrison, P. Bryans, G. M. Simnett [и др.] // *Astron. Astrophys.*. 2003. mar. T. 400. C. 1071–1083.
30. The Posteruptive Evolution of a Coronal Dimming / S. W. McIntosh, R. J. Leamon, A. R. Davey [и др.] // *Astrophys. J.*. 2007. may. T. 660. C. 1653–1659.
31. SOHO/EIT observations of an Earth-directed coronal mass ejection on May 12, 1997 / B. J. Thompson, S. P. Plunkett, J. B. Gurman [и др.] // *Geophys. Res. Lett.*. 1998. T. 25. C. 2465–2468.
32. Thompson B. J., Myers D. C. A Catalog of Coronal "EIT Wave" Transients // *The Astrophysical Journal Supplement*. 2009. aug. T. 183. C. 225–243.
33. CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences / N. Gopalswamy, P. Mäkelä, H. Xie [и др.] // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2009. mar. T. 114. c. 0.
34. Vršnak B., Cliver E. W. Origin of Coronal Shock Waves. Invited Review // *Solar Phys.*. 2008. dec. T. 253. C. 215–235.

35. The association of coronal mass ejection transients with other forms of solar activity / R. H. Munro, J. T. Gosling, E. Hildner [и др.] // *Solar Phys.*. 1979. feb. T. 61. C. 201–215.
36. Impulsive Acceleration of Coronal Mass Ejections. II. Relation to Soft X-Ray Flares and Filament Eruptions / B. M. Bein, S. Berkebile-Stoiser, A. M. Veronig [и др.] // *Astrophys. J.*. 2012. aug. T. 755. c. 44.
37. Role of projection effects on solar coronal mass ejection properties: 1. A study of CMEs associated with limb activity / J. T. Burkepile, A. J. Hundhausen, A. L. Stanger [и др.] // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2004. mar. T. 109. c. 3103.
38. Vršnak B., Sudar D., Ruždjak D. The CME-flare relationship: Are there really two types of CMEs? // *Astron. Astrophys.*. 2005. jun. T. 435. C. 1149–1157.
39. Relation between the Coronal Mass Ejection Acceleration and the Non-thermal Flare Characteristics / S. Berkebile-Stoiser, A. M. Veronig, B. M. Bein [и др.] // *Astrophys. J.*. 2012. jul. T. 753. c. 88.
40. Gallagher P. T., Lawrence G. R., Dennis B. R. Rapid Acceleration of a Coronal Mass Ejection in the Low Corona and Implications for Propagation // *The Astrophysical Journal, Letters*. 2003. may. T. 588. C. L53–L56.
41. On the Temporal Relationship between Coronal Mass Ejections and Flares / J. Zhang, K. P. Dere, R. A. Howard [и др.] // *Astrophys. J.*. 2001. sep. T. 559. C. 452–462.
42. Zhang J., Dere K. A Statistical Study of Main and Residual Accelerations of Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.* 2006. Vol. 649. p. 1100–1109.
43. Acceleration Phase of Coronal Mass Ejections: II. Synchronization of the Energy Release in the Associated Flare / D. Maričić, B. Vršnak, A. L. Stanger [и др.] // *Solar Physics*. 2007. mar. T. 241. C. 99–112.
44. Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G. The Genesis of an Impulsive Coronal Mass Ejection Observed at Ultra-high Cadence by AIA on SDO // *The Astrophysical Journal, Letters*. 2010. dec. T. 724. C. L188–L193.
45. Fainshtein V. G., Egorov Y. I. Investigation of CME properties using the data of SDO and PROBA2 spacecraft // *Cosmic Research*. 2013. jan. T. 51. C. 1–12.
46. Bąk-Stęślicka U., Kołomański S., Mrozek T. Coronal Mass Ejections Associated with Slow Long Duration Flares // *Solar Physics*. 2013. apr. T. 283. C. 505–517.
47. Acceleration in Fast Halo CMEs and Synchronized Flare HXR Bursts / M. Temmer, A. M. Veronig, B. Vršnak [и др.] // *The Astrophysical Journal, Letters*. 2008. jan. T. 673. C. L95–L98.
48. Combined STEREO/RHESSI Study of Coronal Mass Ejection Acceleration and Particle Acceleration in Solar Flares / M. Temmer, A. M. Veronig, E. P. Kontar [и др.] // *The Astrophysical Journal*. 2010. apr. T. 712. C. 1410–1420.
49. Lin J. CME-Flare Association Deduced from Catastrophic Model of CMEs // *Solar Phys.*. 2004. jan. T. 219. C. 169–196.
50. Neupert W. M. Comparison of Solar X-Ray Line Emission with Microwave Emission during Flares // *The Astrophysical Journal, Letters*. 1968. jul. T. 153. c. L59.
51. Simultaneous observations of a prominence eruption followed by a coronal arcade formation in radio, soft X-rays, and H(alpha) / Y. Hanaoka, H. Kurokawa, S. Enome [и др.] // *Pub. Astron. Soc. Japan*. 1994. apr. T. 46. C. 205–216.

52. Hot-Plasma Ejections Associated with Compact-Loop Solar Flares / K. Shibata, S. Masuda, M. Shimojo [и др.] // *Astrophys. J. Letters*. 1995. oct. T. 451. с. L83.
53. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) / R. P. Lin, B. R. Dennis, G. J. Hurford et al. // *Solar Physics*. 2002. Vol. 210. P. 3–32.
54. Maričić D., Vršnak B., Roša D. Relative Kinematics of the Leading Edge and the Prominence in Coronal Mass Ejections // *Solar Physics*. 2009. nov. T. 260. C. 177–189.
55. Impulsive Acceleration of Coronal Mass Ejections. I. Statistics and Coronal Mass Ejection Source Region Characteristics / B. M. Bein, S. Berkebile-Stoiser, A. M. Veronig [и др.] // *The Astrophysical Journal*. 2011. sep. T. 738. с. 191.
56. Forbes T. G. A review on the genesis of coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.*. 2000. oct. T. 105. C. 23153–23166.
57. CME Theory and Models / T. G. Forbes, J. A. Linker, J. Chen [и др.] // *Space Sci. Rev.*. 2006. mar. T. 123. C. 251–302.
58. Moore R. L., Labonte B. J. The filament eruption in the 3B flare of July 29, 1973 - Onset and magnetic field configuration // *Solar and Interplanetary Dynamics* / под ред. M. Dryer, E. Tandberg-Hanssen. Т. 91 из *IAU Symposium*. 1980. C. 207–210.
59. van Ballegoijen A. A., Martens P. C. H. Formation and eruption of solar prominences // *Astrophys. J.*. 1989. aug. T. 343. C. 971–984.
60. Coronal Mass Ejection: Initiation, Magnetic Helicity, and Flux Ropes. I. Boundary Motion-driven Evolution / T. Amari, J. F. Luciani, J. J. Aly [и др.] // *Astrophys. J.*. 2003. mar. T. 585. C. 1073–1086.
61. Coronal Mass Ejection: Initiation, Magnetic Helicity, and Flux Ropes. II. Turbulent Diffusion-driven Evolution / T. Amari, J. F. Luciani, J. J. Aly [и др.] // *Astrophys. J.*. 2003. oct. T. 595. C. 1231–1250.
62. Antiochos S. K., DeVore C. R., Klimchuk J. A. A Model for Solar Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.*. 1999. jan. T. 510. C. 485–493.
63. Chen P. F., Shibata K. An Emerging Flux Trigger Mechanism for Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.*. 2000. dec. T. 545. C. 524–531.
64. Feynman J., Martin S. F. The initiation of coronal mass ejections by newly emerging magnetic flux // *J. Geophys. Res.*. 1995. mar. T. 100. C. 3355–3367.
65. Chen J. Theory of prominence eruption and propagation: Interplanetary consequences // *J. Geophys. Res.*. 1996. dec. T. 101. C. 27499–27520.
66. Kliem B., Török T. Torus Instability // *Physical Review Letters*. 2006. jun. T. 96, № 25. с. 255002.
67. Sakurai T. Magnetohydrodynamic interpretation of the motion of prominences // *Pub. Astron. Soc. Japan*. 1976. T. 28. C. 177–198.
68. Török T., Kliem B. Confined and Ejective Eruptions of Kink-unstable Flux Ropes // *Astrophys. J. Letters*. 2005. sep. T. 630. C. L97–L100.
69. Initiation of Coronal Mass Ejection and Associated Flare Caused by Helical Kink Instability Observed by SDO/AIA / P. Kumar, K.-S. Cho, S.-C. Bong [и др.] // *The Astrophysical Journal*. 2012. feb. T. 746. с. 67.
70. Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G. Direct Evidence for a Fast Coronal Mass Ejection Driven by the Prior Formation and Subsequent Destabilization of a Magnetic Flux Rope // *The Astrophysical Journal*. 2013. feb. T. 764. с. 125.

71. Vourlidas A., Bemporad A. A decade of coronagraphic and spectroscopic studies of CME-driven shocks // American Institute of Physics Conference Series / под ред. J. Heerikhuisen, G. Li, N. Pogorelov [и др.]. Т. 1436 из *American Institute of Physics Conference Series*. 2012. may. С. 279–284.
72. Ontiveros V., Vourlidas A. Quantitative Measurements of Coronal Mass Ejection-Driven Shocks from LASCO Observations // *Astrophys. J.*. 2009. mar. Т. 693. С. 267–275.
73. Bemporad A., Mancuso S. First Complete Determination of Plasma Physical Parameters Across a Coronal Mass Ejection-driven Shock // *The Astrophysical Journal*. 2010. sep. Т. 720. С. 130–143.
74. Cliver E. W., Webb D. F., Howard R. A. On the origin of solar metric type II bursts // *Solar Phys.*. 1999. jun. Т. 187. С. 89–114.
75. A Challenging Solar Eruptive Event of 18 November 2003 and the Causes of the 20 November Geomagnetic Superstorm. I. Unusual History of an Eruptive Filament / V. V. Grechnev, A. M. Uralov, V. A. Slemzin [и др.] // *Solar Phys.*. 2014. jan. Т. 289. С. 289–318.
76. Eselevich M. V., Eselevich V. G. Relations estimated at shock discontinuities excited by coronal mass ejections // *Astronomy Reports*. 2011. apr. Т. 55. С. 359–373.
77. Eselevich M. V., Eselevich V. G. Some properties of the development of the perturbed zone and shock preceding a coronal mass ejection // *Astronomy Reports*. 2011. nov. Т. 55. С. 1038–1050.
78. Eselevich V., Eselevich M. Disturbed Zone and Piston Shock Ahead of Coronal Mass Ejection // *Astrophys. J.*. 2012. dec. Т. 761. с. 68.
79. Fainshtein V.G., Egorov Ya.I. Initiation of CMEs associated with filament eruption, and the nature of CME related shocks // *Advances in Space Research*. 2014. № 0. С. –. doi:10.1016/j.asr.2014.05.019.
80. Reames D. V. Quiet-Time Spectra and Abundances of Energetic Particles During the 1996 Solar Minimum // *Astrophys. J.*. 1999. jun. Т. 518. С. 473–479.
81. Improved input to the empirical coronal mass ejection (CME) driven shock arrival model from CME cone models / H. Xie, N. Gopalswamy, L. Ofman [и др.] // *Space Weather*. 2006. oct. Т. 4. с. 10002.
82. Properties and geoeffectiveness of halo coronal mass ejections / G. Michalek, N. Gopalswamy, A. Lara [и др.] // *Space Weather*. 2006. Т. 4, № 10. С. n/a–n/a. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2005SW000218>.
83. Howard T. A., Nandy D., Koepke A. C. Kinematic properties of solar coronal mass ejections: Correction for projection effects in spacecraft coronagraph measurements // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2008. Т. 113, № A1. С. n/a–n/a. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012500>.
84. Gopalswamy N., Yashiro S. The Strength and Radial Profile of the Coronal Magnetic Field from the Standoff Distance of a Coronal Mass Ejection-driven Shock // *Astrophys. J. Letters*. 2011. jul. Т. 736. с. L17.
85. Vainio R., Khan J. I. Solar Energetic Particle Acceleration in Refracting Coronal Shock Waves // *Astrophys. J.*. 2004. jan. Т. 600. С. 451–457.
86. Fainshtein V. G., Egorov Y. I. Investigation of CME properties using the data of SDO and PROBA2 spacecraft // *Cosmic Research*. 2013. jan. Т. 51. С. 1–12.
87. On the Magnetic Flux Budget in Low-Corona Magnetic Reconnection and Interplanetary Coronal Mass Ejections / J. Qiu, Q. Hu, T. A. Howard [и др.] // *The Astrophysical Journal*. 2007. apr. Т. 659. С. 758–772.

88. Chertok I. M., Grechnev V. V. Large-scale Dimmings Produced by Solar Coronal Mass Ejections According to SOHO/EIT Data in Four EUV Lines // *Astronomy Reports*. 2003. nov. Т. 47. С. 934–945.
89. Filippov B., Koutchmy S. Causal relationships between eruptive prominences and coronal mass ejections // *Annales Geophysicae*. 2008. oct. Т. 26. С. 3025–3031.
90. An Extreme Solar Event of 20 January 2005: Properties of the Flare and the Origin of Energetic Particles / V. V. Grechnev, V. G. Kurt, I. M. Chertok [и др.] // *Solar Phys.*. 2008. oct. Т. 252. С. 149–177.
91. Slemzin V., Kuzin S., Bogachev S. Temporal and Spatial Dynamics of Cme-Related Solar Structures from EUV Observations with the Coronas-F and Soho/eit Telescopes // *The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations*. Т. 600 из *ESA Special Publication*. 2005. dec.
92. Fainshtein V. G., Ivanov E. V. Relationship between CME Parameters and Large-Scale Structure of Solar Magnetic Fields // *Sun and Geosphere*. 2010. nov. Т. 5. С. 28–33.
93. Coronal Mass Ejections and the Index of Effective Solar Multipole / V. N. Obridko, E. V. Ivanov, A. Özgüç [и др.] // *Solar Phys.*. 2012. dec. Т. 281. С. 779–792.
94. Spatial distribution of solar flares in 23rd solar cycle / Z. S. Akhtemov, V. G. Fainshtein, N. N. Stepanian [и др.] // *Bulletin Crimean Astrophysical Observatory*. 2012. jun. Т. 108. С. 4–12.
95. Microwave and EUV Observations of an Erupting Filament and Associated Flare and Coronal Mass Ejections / C. E. Alissandrakis, A. A. Kochanov, S. Patsourakos [и др.] // *Pub. Astron. Soc. Japan*. 2013. dec. Т. 65. с. 8.
96. Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. 1967. с. 368.
97. Otruba W., Pötzi W. The new high-speed H α imaging system at Kanzelhöhe Solar Observatory // *Hvar Observatory Bulletin*. 2003. Т. 27. С. 189–195.
98. Observations and Interpretation of a Low Coronal Shock Wave Observed in the EUV by the SDO/AIA / S. Ma, J. C. Raymond, L. Golub [и др.] // *Astrophys. J.*. 2011. sep. Т. 738. с. 160.
99. Coronal Magnetic Field Measurement from EUV Images Made by the Solar Dynamics Observatory / N. Gopalswamy, N. Nitta, S. Akiyama [и др.] // *Astrophys. J.*. 2012. jan. Т. 744. с. 72.
100. Understanding SDO/AIA Observations of the 2010 June 13 EUV Wave Event: Direct Insight from a Global Thermodynamic MHD Simulation / C. Downs, I. I. Roussev, B. van der Holst [и др.] // *Astrophys. J.*. 2012. may. Т. 750. с. 134.
101. Egorov Y. I., Fainshtein V. G. Study of CME Properties Using High Resolution Data // *Central European Astrophysical Bulletin*. 2013. Т. 37. С. 619–630.
102. Observations of the Failed Eruption of a Filament / H. Ji, H. Wang, E. J. Schmahl [и др.] // *Astrophys. J. Letters*. 2003. oct. Т. 595. С. L135–L138.
103. Филиппов Б. П. Эруптивные процессы на Солнце // Москва, Физматлит. 2007.
104. Kippenhahn R., Schlüter A. Eine Theorie der solaren Filamente. Mit 7 Textabbildungen // *Zeitschrift für Astrophysik*. 1957. Т. 43. с. 36.
105. Kuperus M., Raadu M. A. The Support of Prominences Formed in Neutral Sheets // *Astron. Astrophys.*. 1974. mar. Т. 31. с. 189.

106. The role of condensation and heat conduction in the formation of prominences - an MHD simulation / S. T. Wu, J. J. Bao, C. H. An [и др.] // *Solar Phys.*. 1990. feb. T. 125. С. 277–293.
107. Antiochos S. K., Dahlburg R. B., Klimchuk J. A. The magnetic field of solar prominences // *Astrophys. J. Letters*. 1994. jan. T. 420. С. L41–L44.
108. DeVore C. R., Antiochos S. K. Dynamical Formation and Stability of Helical Prominence Magnetic Fields // *Astrophys. J.*. 2000. aug. T. 539. С. 954–963.
109. Chen P. F. Initiation and propagation of coronal mass ejections // *Journal of Astrophysics and Astronomy*. 2008. mar. T. 29. С. 179–186.
110. Kopp R. A., Pneuman G. W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // *Solar Phys.*. 1976. oct. T. 50. С. 85–98.
111. Vršnak B. Processes and mechanisms governing the initiation and propagation of CMEs // *Annales Geophysicae*. 2008. oct. T. 26. С. 3089–3101.
112. Chen J. Effects of toroidal forces in current loops embedded in a background plasma // *Astrophys. J.*. 1989. mar. T. 338. С. 453–470.
113. Direct Detection of a Coronal Mass Ejection-Associated Shock in Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment White-Light Images / A. Vourlidas, S. T. Wu, A. H. Wang [и др.] // *Astrophys. J.*. 2003. dec. T. 598. С. 1392–1402.
114. Vourlidas A., Ontiveros V. A Review of Coronagraphic Observations of Shocks Driven by Coronal Mass Ejections // *American Institute of Physics Conference Series* / под ред. X. Ao, G. Z. R. Burrows. Т. 1183 из *American Institute of Physics Conference Series*. 2009. nov. С. 139–146.
115. Eselevich V. G., Eselevich M. V., Zimovets I. V. Blast-wave and piston shocks connected with the formation and propagation of a coronal mass ejection // *Astronomy Reports*. 2013. feb. T. 57. С. 142–151.
116. Priest E. R. *Solar magneto-hydrodynamics*. 1982. с. 74Р.
117. Ландау Л. Д., Лифшиц В. М. *Гидродинамика* // Москва, Наука. 1988. (in Russian).
118. Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З. *Физика плазмы для физиков* // Москва, Атомиздат. 1979.
119. Balogh A., Treumann R. A. *Physics of Collisionless Shocks*. 2013.
120. Gopalswamy N. Corona Mass Ejections: a Summary of Recent Results // 20th National Solar Physics Meeting / под ред. I. Dorotic. 2010. dec. С. 108–130.
121. Draine B. T., McKee C. F. Theory of interstellar shocks // *Annual review of astronomy and astrophysics*. 1993. T. 31. С. 373–432.
122. Coronal Shock Waves, EUV Waves, and Their Relation to CMEs. I. Reconciliation of "EIT Waves", Type II Radio Bursts, and Leading Edges of CMEs / V. V. Grechnev, A. M. Uralov, I. M. Chertok [и др.] // *Solar Physics*. 2011. nov. T. 273. С. 433–460.
123. Newkirk Jr. G. The Solar Corona in Active Regions and the Thermal Origin of the Slowly Varying Component of Solar Radio Radiation. // *Astrophys. J.*. 1961. may. T. 133. с. 983.
124. A non-spherical axisymmetric model of the solar K corona of the minimum type. / K. Saito, M. Makita, K. Nishi [и др.] // *Annals of the Tokyo Astronomical Observatory*. 1970. T. 12. С. 53–120.
125. Dryer M. Interplanetary Shock Waves Generated by Solar Flares // *Space Sci. Rev.*. 1974. feb. T. 15. С. 403–468.

126. Smerd S. F., Sheridan K. V., Stewart R. T. On Split-Band Structure in Type II Radio Bursts from the Sun (presented by S.F. Smerd) // *Coronal Disturbances* / под ред. G. A. Newkirk. T. 57 из *IAU Symposium*. 1974. с. 389.
127. Vršnak B., Magdalenic J., Zlobec P. Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts. III. Physical conditions in the upper corona and interplanetary space // *Astron. Astrophys.*. 2004. jan. T. 413. C. 753–763.
128. The observation of a coronal transient directed at earth / R. A. Howard, D. J. Michels, N. R. Sheeley, Jr. [и др.] // *Astrophys. J. Letters*. 1982. dec. T. 263. C. L101–L104.
129. Gopalswamy N. Halo coronal mass ejections and geomagnetic storms // *Earth, Planets, and Space*. 2009. may. T. 61. C. 595–597.
130. Large-scale structures and multiple neutral lines associated with coronal mass ejections / D. F. Webb, S. W. Kahler, P. S. McIntosh [и др.] // *J. Geophys. Res.*. 1997. oct. T. 102. C. 24161–24174.
131. Michałek G., Gopalswamy N., Yashiro S. A New Method for Estimating Widths, Velocities, and Source Location of Halo Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.*. 2003. feb. T. 584. C. 472–478.
132. Xie H., Ofman L., Lawrence G. Cone model for halo CMEs: Application to space weather forecasting // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2004. mar. T. 109. с. 3109.
133. Xue X. H., Wang C. B., Dou X. K. An ice-cream cone model for coronal mass ejections // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2005. aug. T. 110. с. 8103.
134. Thernisien A. F. R., Howard R. A., Vourlidas A. Modeling of Flux Rope Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.*. 2006. nov. T. 652. C. 763–773.
135. Thernisien A., Vourlidas A., Howard R. A. Forward Modeling of Coronal Mass Ejections Using STEREO/SECCHI Data // *Solar Phys.*. 2009. may. T. 256. C. 111–130.
136. Kim T., Moon Y., Na H. Comparison of CME radial velocities from a flux rope model and an ice cream cone model // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2011*, abstract SH51A-1992. 2011. dec.
137. de Koning C. A., Pizzo V. J., Biesecker D. A. Geometric Localization of CMEs in 3D Space Using STEREO Beacon Data: First Results // *Solar Phys.*. 2009. may. T. 256. C. 167–181.
138. Morphological Evolution of a Three-dimensional Coronal Mass Ejection Cloud Reconstructed from Three Viewpoints / L. Feng, B. Inhester, Y. Wei [и др.] // *Astrophys. J.*. 2012. may. T. 751. с. 18.
139. Moran T., Davila J. Polarimetric Three-Dimensional Imaging of Coronal Mass Ejections // *American Astronomical Society Meeting Abstracts #204*. T. 36 из *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2004. may. с. 683.
140. Dere K. P., Wang D., Howard R. Three-dimensional Structure of Coronal Mass Ejections from LASCO Polarization Measurements // *Astrophys. J. Letters*. 2005. feb. T. 620. C. L119–L122.
141. On 3D Reconstruction of Coronal Mass Ejections: I. Method Description and Application to SECCHI-COR Data / M. Mierla, B. Inhester, C. Marqué [и др.] // *Solar Phys.*. 2009. oct. T. 259. C. 123–141.
142. Feng L., Inhester B., Mierla M. Comparisons of CME Morphological Characteristics Derived from Five 3D Reconstruction Methods // *Solar Phys.*. 2013. jan. T. 282. C. 221–238.

143. First Three-Dimensional Reconstructions of Coronal Loops with the STEREO A and B Spacecraft. I. Geometry / M. J. Aschwanden, J.-P. Wülser, N. V. Nitta [и др.] // *Astrophys. J.*. 2008. may. T. 679. C. 827–842.
144. Aschwanden M. J. The 3D Geometry, Motion, and Hydrodynamic Aspects of Oscillating Coronal Loops // *Space Sci. Rev.*. 2009. dec. T. 149. C. 31–64.
145. Inhester B. Stereoscopy basics for the STEREO mission // ArXiv Astrophysics e-prints. 2006. dec.
146. A Challenging Solar Eruptive Event of 18 November 2003 and the Causes of the 20 November Geomagnetic Superstorm. II. CMEs, Shock Waves, and Drifting Radio Bursts / V. V. Grechnev, A. M. Uralov, I. M. Chertok [и др.] // *Solar Phys.*. 2014. apr. T. 289. C. 1279–1312.
147. Solar source of the largest geomagnetic storm of cycle 23 / N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek [и др.] // *Geophys. Res. Lett.*. 2005. may. T. 32. c. 12.
148. A Year Later: Solar, Heliospheric, and Magnetospheric Disturbances in November 2004 / Y. I. Yermolaev, L. M. Zelenyi, G. N. Zastenker [и др.] // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2005. nov. T. 45. c. 681.
149. Yurchyshyn V., Hu Q., Abramenko V. Structure of magnetic fields in NOAA active regions 0486 and 0501 and in the associated interplanetary ejecta // *Space Weather*. 2005. aug. T. 3. c. 8.
150. Ivanov K. G., Romashets E. P., Kharshiladze A. F. Solar-terrestrial storm of November 18 20, 2003. 1. Near-Earth disturbances in the solar wind // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2006. may. T. 46. C. 275–293.
151. How Can a Negative Magnetic Helicity Active Region Generate a Positive Helicity Magnetic Cloud? / R. Chandra, E. Pariat, B. Schmieder [и др.] // *Solar Phys.*. 2010. jan. T. 261. C. 127–148.
152. Kumar P., Manoharan P. K., Uddin W. Multiwavelength Study on Solar and Interplanetary Origins of the Strongest Geomagnetic Storm of Solar Cycle 23 // *Solar Phys.*. 2011. jul. T. 271. C. 149–167.
153. Solar and interplanetary triggers of the largest Dst variations of the solar cycle 23 / Y. Cerrato, E. Saiz, C. Cid [и др.] // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2012. may. T. 80. C. 111–123.
154. Russell C. T., Mulligan T. On the magnetosheath thicknesses of interplanetary coronal mass ejections // *Planetary Space Science*. 2002. apr. T. 50. C. 527–534.
155. Measurements of Flow Speeds in the Corona between 2 and 30 R sub sun / N. R. Sheeley, Jr., Y.-M. Wang, S. H. Hawley [и др.] // *Astrophys. J.*. 1997. jul. T. 484. c. 472.
156. Leblanc Y., Dulk G. A., Bougeret J.-L. Tracing the Electron Density from the Corona to 1au // *Solar Phys.*. 1998. nov. T. 183. C. 165–180.
157. Fainshtein V. G. The interaction effect of fast and slow solar wind streams in interplanetary space on wind characteristics at the earth's orbit // *Solar Phys.*. 1991. nov. T. 136. C. 169–189.
158. Magnetic Field Strength in the Upper Solar Corona Using White-light Shock Structures Surrounding Coronal Mass Ejections / R.-S. Kim, N. Gopalswamy, Y.-J. Moon [и др.] // *Astrophys. J.*. 2012. feb. T. 746. c. 118.