

Отзыв

Официального оппонента Биленко Ирины Антоновны,
научного сотрудника государственного астрономического института имени П. К. Штернберга,
московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.
bilenko@sai.msu.ru, 119992, г. Москва, Университетский пр. 13, тел. +7 495 939 22 45

на диссертацию Егорова Ярослава Игоревича: “Исследование формирования и движения корональных выбросов массы и связанных с ними ударных волн”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 - “Физика Солнца”.

Актуальность темы исследования

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений. Исследование физических процессов закономерностей формирования и особенностей проявления корональных выбросов массы (КВМ) является одной из первостепеннейших задач в исследовании как собственно физики Солнца, так и солнечно-земных связей. Изучение КВМ имеет большое значение для понимания физической природы процессов накопления и высвобождения энергии в солнечной атмосфере. Огромный интерес к изучению КВМ в последнее время вызван тем, что они являются определяющим фактором в формировании космической погоды на орбите Земли. Вынос замагниченной плазмы из солнечной короны формирует межпланетную среду. В настоящее время КВМ считаются главной причиной сильных межпланетных возмущений, определяющих космическую погоду и влияющих на геомагнитную активность. Хорошо известно воздействие КВМ на космическую технику. Однако, ни закономерности формирования КВМ, ни связь их с другими явлениями солнечной активности, ни законы их распространения, до настоящего времени до конца не изучены, что делает невозможным прогнозирование КВМ и их последствий. Актуальность исследования КВМ подчеркивается и тем фактом, что для их изучения разрабатываются целые космические программы и запускаются космические обсерватории, такие, например, как STEREO, SMEI.

Одним из подходов к изучению КВМ является статистическое исследование большого числа событий за определенный период, связанный с какой-либо фазой солнечного цикла или за весь цикл и выявление средних параметров и закономерностей КВМ, а также оценки корреляции их с другими явлениями солнечной активности за выбранный период.

Другим подходом является детальное исследование отдельных конкретных КВМ, выявление их параметров, сопоставление с сопутствующими явлениями, построение моделей данного конкретного события и обобщение полученных результатов на определенный класс КВМ. Этот подход становится все более актуальным, поскольку на сегодняшний день, благодаря запуску ряда космических обсерваторий, таких как SDO, SOHO, STEREO, SMEI, PROBA2, получен беспрецедентный по объему и качеству наблюдательный материал, позволяющий исследовать конкретные КВМ различных типов на самых разных этапах их формирования и распространения в межпланетном пространстве с высоким временным и пространственным разрешением. Это тем более актуально, поскольку из более чем 17000 зарегистрированных с помощью коронографа SOHO/LASCO событий КВМ за период с 1996 по 2013 годы детально изучено только несколько сотен. Следовательно, актуальным является и используемый автором диссертации подход – детального исследования отдельных событий по имеющимся наблюдениям в различных спектральных диапазонах с высоким временным и пространственным разрешением.

Построение трехмерной динамической модели КВМ является одной из важнейших задач в исследовании КВМ. Трехмерную структуру КВМ довольно сложно выявить, поскольку по лучу зрения накладывается излучение из большого объема из-за малой оптической толщины в солнечной короне, и по имеющейся единственной проекции в плоскости изображения невозможно однозначно восстановить реальную трехмерную форму корональных структур. Тем

более, таких динамичных и быстро изменяющихся объектов, как КВМ. Пространственная геометрия солнечных выбросов важна также, поскольку, как было показано в ряде работ (см., например, Anzer 1978, *Solar Phys.*, 57, 111; Muschovias and Poland 1978, *Astrophys. J.*, 110, 11; Dryer 1982 *Space Sci. Rev.*, 33, 233), механизм ускорения выброса зависит от его трехмерной структуры. В связи с этим, определение трехмерных параметров КВМ и связанных с ними ударных волн, представленное в диссертации, приобретает большое научное и практическое значение.

Проблема формирования ударных волн в солнечной короне является, одной из актуальнейших задач современной физики Солнца и солнечно-земных связей. Ударные волны, вызванные КВМ, могут ускорять электроны и ионы, генерируя солнечные энергичные частицы (Reames, 1999, *Astrophys. J.*, 518, 473; Gloeckler и др., 1994, *JGR*, 99, 17637).

Таким образом, выбранное Егоровым Я. И. направление диссертационной работы - исследование формирования и движения КВМ и связанных с ними ударных волн, на основе использования данных наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением, предоставляемых современными космическими обсерваториями, является актуальным не только в смысле познания физики Солнца, но также и для прогнозирования космической погоды, что особенно важно в условиях растущего числа запусков, как обитаемых, так и автоматических, космических систем.

Следует отметить, что получаемые на современных космических обсерваториях базы данных требуют разработки новых современных подходов к обработке и анализу этих данных. Хотя все группы сопровождения космических обсерваторий предоставляют пакеты программ для работы с соответствующими данными, они далеко не всегда бывают достаточными, и не всегда соответствуют проводимым конкретным исследованиям. Часто требуется разработка нового программного обеспечения. Особенно, это касается обработки изображений.

В этой связи представляется важным и актуальным разработка Егоровым Я. И. программного обеспечения отчасти оригинального, а частично и модифицированного на основе уже существующих, алгоритмов и пакетов программ и применение его для обработки и анализа конкретных событий КВМ в данном исследовании.

Оценка проведенного исследования и полученных результатов.

В первой главе рассматривается начальная стадия движения КВМ по данным с высоким временным и пространственным разрешением на основе данных космических обсерваторий SDO/AIA и PROBA/SWAP. Рассматривается класс КВМ связанных с эрупцией протуберанцев с целью детального исследования процессов 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 вспышки связанной с КВМ. Подробно изложен алгоритм обработки данных изображений SDO/AIA, описаны методы анализа кинематических параметров КВМ (раздел 1.1.2.) и определение геометрических параметров КВМ (раздел 1.1.3.).

Детально рассмотрены четыре события: 13.06.2010, 7.06.2011, 8.03.2011, 29.06.2011 (разделы 1.3.1 – 1.3.4). Для них получены временные профили скоростей и ускорения протуберанцев, внутренних структур, КВМ. В этих четырех событиях детально прослеживался следующий сценарий формирования КВМ: появление протуберанца (петлеобразной структуры), затем начинается медленная эрупция протуберанца (волокна, петли), являющегося, по сути, триггером КВМ. Эруптивный протуберанец возмущает находящиеся выше участки короны, и это возмущение в некоторых случаях приводит к возникновению последовательности движущихся вверх с разной скоростью петлеобразных структур. При этом скорость структур, начавших двигаться позднее, оказывается выше, чем структур, которые начали свое движение раньше. В результате, возникшие позднее, внутренние движущиеся структуры, в конце концов, догоняют самую медленную внешнюю структуру и вместе с ней формируют фронтальную структуру КВМ. С этого момента КВМ считается сформировавшимся. 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. После достижения внутренних петель этой квазифронтальной структуры окончательно формируется фронтальная структура КВМ. 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 бобов, движущихся вдоль эруптивного протуберанца и т.д. Предполагается, что наблюдаемые области повышенной яркости – это движущиеся вверх магнитоплазменные структуры.

Следует заметить, что при наблюдениях КВМ на SOHO/LASCO и раньше, рядом исследователей отмечалось, что разные части КВМ могут двигаться с различной скоростью. При этом было показано, что скорость движения фронтальных структур в полтора раза выше, чем скорость движения центрального ядра. Подробное описание кинематики и теоретическое обоснование этого явления приведено в книге Филиппова Б. П. “Эруптивные процессы на Солнце”, 2007, стр. 122-128, 162-166 (Москва, Физматлит). Поэтому, результат, представляемый в данной диссертации свидетельствующий о том, что в рассмотренных случаях внутренние структуры движутся быстрее внешних, и, в конце концов, догоняют самую медленную внешнюю структуру и вместе с ней формируют фронтальную структуру КВМ, представляется очень интересным. Требуются дальнейшие исследования аналогичных случаев, а также теоретическое обоснование этого процесса. Возможно, что на разных этапах формирования и распространения КВМ и на разных высотах соотношение скоростей внутренних и внешних структур может быть различным. Тем более, что в диссертации указывается, 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.

В разделе 1.4 рассматриваются возможные источники эрупции волокна. Особое внимание уделяется моделям со всплывающим магнитным потоком в области канала волокна и за его пределами. Однако, из пяти выбранных событий только в одном автором и его соавторами удалось обнаружить заметные изменения магнитного поля на фотосфере. Сделано предположение о наличии другого механизма эрупции волокна для остальных четырех событий. Конкретно никакой механизм или модель не предлагается. Дальнейшее исследование этих и аналогичных им событий представляет интерес с целью выявления механизма эрупции, так как в очень большом числе работ показано, что именно динамика мелкомасштабных магнитных полей, такая как всплывание нового магнитного потока или исчезновение “cancellation” магнитного потока являются причиной эрупции волокон и формирования КВМ.

В разделе 1.5 на основе уже существующих моделей рассматривается вопрос о связи эрупции волокна (протуберанца) с солнечными вспышками.

Исследование кинематики, рассмотренных в данной диссертации 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 скорости синхронизованы с нарастанием интенсивности мягкого рентгеновского излучения I_{sxr} из области вспышки связанной с КВМ. Ускорение КВМ до достижения максимального значения оказывается синхронизованным с нарастанием потока жесткого рентгеновского излучения, а также с нарастанием производной dI_{sxr}/dt .

Эти результаты хорошо согласуются с проводившимися ранее исследованиями других авторов и находятся в хорошем согласии с существующими моделями. Определенный интерес представляло бы исследование, проведенное на большом современном наблюдательном материале, детального сопоставления со вспышечными процессами с реальным высоким пространственным и временным разрешением для выявления последовательности событий, установления взаимосвязи между эруптивными процессами и выявления физических процессов энерговыделения и ускорения частиц.

В разделе 1.6 исследуется изменение геометрических характеристик КВМ, таких как угловой размер, траектория движения КВМ, отношение продольного размера КВМ к поперечному в зависимости от времени. Для анализа было отобрано 8 событий: 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, со скоростями от 490 до 1869 км/сек.

Проведенный анализ геометрических характеристик рассмотренных КВМ показал, что:

1. Для всех рассмотренных КВМ угловой размер растет со временем. Диапазон изменения углового размера составил для отдельных выбросов примерно 0.5-6. Характерный масштаб времени изменения углового размера КВМ в полтора раза, в среднем, составляет порядка 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 трех событий этот параметр выходит на единицу в поле зрения SDO/AIA. Это можно интерпретировать как выход на автомоделный (или самоподобный) режим расширения КВ, т.е., когда форма границы выброса не меняется со временем.

Интересным представляется результат исследования событий 29 июня 2011 года и 8 марта 2011 года позволивший сделать вывод о наличии корреляция между высотой эруптирующего протуберанца, перед началом его эрупции, и высотой фронтальной структуры КВМ. Но, как отмечает и сам автор, требуются дополнительные исследования на большем статистическом материале. Этот результат может быть очень важен для прогнозирования КВМ.

Во второй главе на основе данных наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением проведено исследование формирования и распространения ударных волн, связанных с КВМ. Подчеркнута роль ударных волн связанных с КВМ в формировании космической погоды. Основной вопрос при рассмотрении ударных волн связанных с КВМ - это являются ли они поршневыми с телом КВМ в качестве поршня, либо это взрывные волны. Вопрос о том, начинается ли раньше движение протуберанца или ему предшествуют изменения в короне, является дискуссионным. Ряд исследователей полагают, что эруптирующий протуберанец воздействует на вышележащие слои коронального вещества и, как поршень, выталкивает корональную плазму, образуя КВМ. Другие придерживаются мнения, что сначала происходит удаление корональных структур над протуберанцем и это является причиной его эрупции.

В разделе 2.1 подробно описана методика обработки данных с целью выявления ударных волн, порядок и критерии выбора событий для детального исследования (раздел 2.2). В разделе 2.3 подробно исследуется природа и закономерности распространения ударных волн на основе событий 13 июня 2010 года и 7 декабря 2012 года. Наличие ударной волны в событии 13 июня 2010 года подтверждаются аналогичными результатами, полученными в работах других авторов (Ma и др., 2011, *Astrophys. J.*, 738, 160; Gopalswamy и др., 2012, *Astrophys. J.*, 744, 72). Найденны кинематические характеристики для ударных волн, связанных с рассматриваемыми КВМ. Полученные временные профили скорости ударной волны и границы тела КВМ свидетельствуют о том, что на начальном этапе характер изменения скорости ударной волны и тела КВМ существенно различается, что, по мнению автора, не согласуется с моделью поршневой ударной волны с телом КВМ в виде поршня. 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 и из теории. По мнению автора, механизмом генерации взрывной ударной волны является воздействие эруптивного протуберанца, движущегося с большим ускорением, на вышележащие слои солнечной короны. Импульсное ускорение протуберанца могло привести к образованию волны, которая, предположительно, возникает ниже места формирования фронтальной структуры КВМ. Сделан вывод, что исследованные ударные волны являются взрывными на начальном этапе их движения.

На основе анализа положений ударной волны и данных о радиовсплеске II типа получено пространственное распределение концентрации электронов в поле зрения инструментов SDO/AIA, а также величина скачка плотности электронов на фронте ударной волны для события 13 июня 2010. Эти результаты оказались в хорошем согласии с аналогичными зависимостями, полученными в работе Gopalswamy и др. (*Astrophys. J.* 2012, 744, 72).

В третьей главе рассматриваются характеристики КВМ и связанных с ними ударных волн в трехмерном пространстве.

Предложен метод нахождения трехмерных параметров отдельно для границы тела КВМ и отдельно для ударной волны с использованием модели "Ice-cream cone". Дано подробное описание определения трехмерных характеристик КВМ и связанных с ними ударных волн с помощью метода "Ice-cream cone", предложенного Hue и др. (*JGR*, 2005, 110, 8103) (раздел 3.1), показано отличие применяемого метода от исходного, имеется в виду очерчивание формы тела КВМ или ударной волны эллипсом, что позволяет получать большее число точек для определения положения соответствующих структур.

В разделе 3.2 приведена подробная оценка точности метода, составившая 0.4 радиуса Солнца. Оценка проводилась на основе двух подходов: сравнение измеренных и рассчитанных по модели "Ice-cream cone" трехмерных параметров границы тела КВМ и ударной волны для лимбового события 18 августа 2010 года и второй подход - сравнение расчетных параметров предлагаемой модели с расчетами полученными методом "stereoscopy" для события 7 марта 2011 года. Показано хорошее согласие результатов полученных разными методами.

В разделе 3.3 исследована динамика трехмерных параметров КВМ и связанных с ними ударных волн. Исследование проводилось для 9 КВМ типа гало, при этом, были отобраны высокоскоростные КВМ, со скоростью превышающей 1400 км/сек. Были сопоставлены зависимости от времени положения и скорости границы тел КВМ и связанных с ними ударных волн. Сделан вывод, что, в среднем, скорость тела КВМ уменьшается быстрее, чем скорость связанной с ним ударной волны. Исследованы зависимости изменения расстояния между границей тела КВМ и ударной волной от времени и положения границы тела КВМ. Показано, что существует две группы КВМ с различными зависимостями.

По рассчитанным трехмерным параметрам тела КВМ и ударной волны была проведена оценка изменения разности их положения в зависимости от времени и расстояния. Угловой размер ударной волны во всех случаях в 1.2-1.9 раза больше чем угловой размер тела КВМ. Кроме того, зависимости явно разделились на две группы с корреляционными коэффициентами 0.77 и 0.93. Автор связывает это разделение с разницей в направлениях тела КВМ и ударной волны. В первой группе это отклонение доходит до примерно 5 градусов по долготе, а для второй может достигать 11 градусов. По изображениям КВМ выявлено, что для второй группы характерно меньшее расхождение осей эллипсов, чем для первой группы.

Применяемый метод был использован для исследования геоэффективности события 18 ноября 2003 года. Проведенные 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. Результат очень важен в плане применения разработанного метода для прогнозирования геоэффективных событий и геомагнитной активности.

Используя расчеты трехмерных параметров КВМ типа гало с помощью модифицированной "Ice-cream cone" модели, были получены радиальные распределения магнитного поля в солнечной короне вдоль направлений близких к оси Солнце-Земля. Этот результат особенно ценен в плане определения магнитного поля в солнечной короне, так как измерение величины магнитного поля в солнечной короне до настоящего времени остается сложной задачей. На сегодняшний день нет регулярных или, хотя бы, продолжительных наблюдений магнитного поля в солнечной короне.

В заключении перечислены основные результаты и выводы.

Оценка научной новизны результатов диссертации

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. 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. Обнаружены и исследованы отличительные особенности возникновения таких КВМ в конкретных случаях.

К принципиально новым результатам следует отнести новый подход в изучении КВМ – это рассмотрение структуры и динамики отдельно тела КВМ и ударной волны на основе анализа данных с высоким временным и пространственным разрешением, что позволило получить новые результаты. Предложен новый метод выделения ударных волн, связанных с КВМ в поле зрения инструментов с высоким пространственным разрешением (SDO/AIA). 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 на начальном этапе их движения.

К новым результатам диссертации Егорова Я. И. следует отнести разработку метода построения трехмерной структуры КВМ и оценку трехмерных параметров КВМ и связанных с ними ударных волн что, безусловно, является одним из важнейших вопросов в изучения КВМ. Предложен новый подход для изучения отдельного класса быстрых КВМ, при котором отдельно определяются трехмерные параметры тела КВМ и связанных с ним ударных волн на основе модификации метода "Ice-cream cone", предложенного Хуе и др. (JGR, 2005, 110, 8103).

Новым результатом, также, является и определение магнитного поля в солнечной короне с помощью модификации метода Gopalswamy, Yashiro (Astrophys. J. Letters, 2011, 736, L17). Для восьми высокоскоростных КВМ (18.11.03, 1660 км/с; 06.04.04, 1368 км/с; 03.11.04, 1759 км/с; 07.11.04, 1759 км/с; 15.01.05, 2861 км/с; 17.01.05, 2094 км/с; 30.07.05, 1968 км/с; 05.09.05, 2257 км/с) получены радиальные распределения магнитного поля в солнечной короне вдоль направлений близких к оси Солнце – Земля. Этот результат является особенно важным, поскольку на сегодняшний день нет постоянных, прямых наблюдений магнитного поля в солнечной короне и получение значений магнитного поля в солнечной короне является не тривиальной задачей.

Оценивая новизну полученных результатов, хотелось бы отметить, что новые результаты получены во многом благодаря применению новых методов и разработке новых программ обработки данных наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением. В современных условиях, часто, именно новые подходы и методы с максимальным использованием возможностей компьютерной обработки наблюдательных данных позволяют получить новые интересные результаты. Следует отметить, что при использовании уже существующих известных методов эти методы были модифицированы. Для проведения исследований Егоровым Я. И. были разработаны и применены к конкретным данным:

1. методы и программное обеспечение для исследования формирования и движения KBM, связанных с эруптивными волокнами, по данным инструментов SDO/AIA, PROBA2/SWAP, STEREO/EUVI, STEREO/COR1, MARK IV (MLSO);
2. методы и программное обеспечение для выделения ударных волн, связанных с KBM, и исследования их кинематики на начальном этапе движения. Разработан оригинальный пакет интерактивных программ, позволяющий получать графики профилей яркости вдоль выбранного направления и сопоставлять скачок яркости с его положением на изображении KBM, что позволило детально проанализировать положение ударной волны;
3. метод и программное обеспечение для нахождения в трехмерном пространстве геометрических и кинематических характеристик отдельно для тела KBM и связанной с KBM ударной волны.

Замечания

Во **введении** (стр.9) при обсуждении теоретических моделей KBM в качестве одной из проблем, решение которых должны включать в себя наиболее адекватные наблюдениям модели указано на теоретическую проблему Али-Старрока (Aly, 1991, *Astrophys. J.*, 375, L61; Sturrock, 1991, *Astrophys. J.*, 380, 655). Однако, последующие работы как этих, так и других авторов показали, что модели KBM на основе конфигурации эруптирующего протуберанца в виде жгута, получивших в настоящее время очень большое распространение, позволяют решить данную проблему. Отказ от бессилового поля, идеальной проводимости, включение сопротивления, также позволяют обойти теоретический тупик, связанный с теоремой Али-Старрока (подробно см. в книге Филиппова Б. П. “Эруптивные процессы на Солнце”, 2007, стр. 148-149, (Москва, Физматлит)). Кроме того, переход к трехмерным моделям автоматически разрешает эту проблему.

Замечания к 1 главе

SDO/AIA получает изображения Солнца с пространственным разрешением 0.6 угловых секунды каждые 12 сек, однако реальное временное разрешение при выборе и обработке изображений в данном исследовании составило одну минуту (раздел 1.1.1 стр. 19).

Для анализа автором отобрано 10 событий (раздел 1.2, Таблица 1.1., стр. 21). Однако событие 2012-06-23 приведенное в таблице нигде в дальнейшем в тексте диссертации не упоминается. В последующих разделах, например, разделы 1.4, 1.5, а также во всех выводах, обобщения делаются на основании 10 явлений, хотя реально рассмотрено только 4 (в разделах 1.3.1 - 1.3.4 это KBM: 13 июня 2010 года, 7 июня 2011 года, 8 марта 2011 года и 29 июня 2011 года и восемь (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) в разделе 1.6. В разделе 1.6 стр. 42 среди перечисленных (дважды на странице) рассматриваемых событий есть событие 8 августа 2010 года, тогда, как на рис. 1.25(а-в) такого события нет, но есть 2010-08-14. И далее на той же странице скорость KBM приведена в км/ч, тогда как скорость KBM измеряется в км/сек.

Кроме того, на стр. 25 - в тексте речь идет о горячей эмиссионной петле, а на рисунке 1.7 показаны графики скорости и ускорения волокна; на стр. 27 – на рис. 1.10 (а-в) отсутствуют обозначения стрелок, в автореферате - это рис. 1 стр.11; на стр. 25, 28 и 36, на рис 1.7, 1.11 и 1.20 соответственно, нет обозначений правой шкалы (в автореферате стр. 12, рис. 2); на стр. 28 - по тексту: “Какова природа движущихся возмущений яркости, обозначенных на Рис. 1 цифрами 2 и 3?” и далее по тексту на той же странице: “Отметим также, что область повышенной яркости, отмеченная на Рис. 1 цифрой 4, не может быть ударной волной”, но в диссертации нет рис. 1; на стр. 31 несоответствие обозначений на графике (рис. 1.14(б)) и в тексте, скорее всего речь идет о стрелке номер 3. На стр. 32 подпись к рис. 1.16: “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).”, но на рис. 1.16(a) нет стрелки 2, а стрелка 3 на рис. 1.16 отсутствует совсем. На стр. 72 - не совсем понятно, что за группы – обозначений на графике больше, чем указано событий в тексте. Если для каждого события показано по несколько измерений, то как идентифицируются измерения принадлежащие к каждому конкретному КВМ.

Ряд графиков следовало бы представить в большем масштабе, например, рис. 1.7(a), рис. 1.11 (а, б), рис. 1.20 (а, б), рис. 1.21 (а, б) для более четкого выделения сопоставляемых зависимостей.

Замечания ко 2 главе

Детально рассмотрено только два события 13 июня 2010 года и 7 декабря 2012 года. Для них были сопоставлены временные профили положения и скорости границы тела КВМ и ударной волны и сделан вывод, что временные профили скорости границы тела КВМ и ударной волны существенно различаются. Следовательно, и выводы относятся только к этим двум событиям. Для обобщения вывода о природе ударных волн на какой-либо класс КВМ и подтверждения вывода о том, что ударные волны являются взрывными на начальном этапе, необходимы дополнительные исследования на большем числе КВМ. Ударные волны – это довольно частое явление в солнечной короне. Следует отметить, что ударные волны наблюдаются не только при высокоскоростных КВМ.

Рассмотренные события КВМ 13 июня 2010 года и 7 декабря 2012 были связаны со вспышками M1.0 и C3.9 соответственно. Автор считает, что более предпочтительным механизмом генерации взрывной ударной волны является воздействие эруптивного протуберанца, движущегося с большим ускорением, на выпшележащие слои солнечной короны. Не показан процесс, вызвавший резкое ускорение протуберанца и не рассмотрена роль наблюдаемых вспышек в этих событиях. Для более основательного подтверждения предположения автора следовало бы рассмотреть еще и КВМ не связанные со вспышками.

В первой главе детально рассмотрен следующий сценарий эрупции протуберанца и формирования КВМ: эрупция протуберанца и возмущение им находящихся выше участков короны; возникновение последовательности движущихся вверх с разной скоростью петлеобразных структур, причем, ряд структур, начавших двигаться позднее, имеют большую скорость, чем структуры, которые начали свое движение раньше; в результате чего, возникшие позднее, внутренние движущиеся структуры, догоняют самую медленную внешнюю структуру и вместе с ней формируют фронтальную структуру КВМ. Этот сценарий представляется некоторой модификацией поршневого модели.

Имеются ошибки в написании формул: стр. 54, 55, 58, 60, 77, 86, 87.

Замечания к 3 главе

При исследовании зависимости изменения расстояния между границей тела КВМ и ударной волной от времени и положения границы тела КВМ показано, что существует две группы КВМ с различными зависимостями. Предложено объяснение существования этих двух групп зависимостей – различием величины отклонения направлений тела КВМ и ударной волны, 5 и 11 градусов соответственно, а также отличием ориентации эллипсов описывающих контуры структур КВМ и ударной волны. Не показано, какими физическими причинами могут быть вызваны эти различия. Возможно, что это все-таки эффект видимой проекции изображений.

Имеются ошибки в написании формул: стр. 76, 77.

Общие замечания.

Следует отметить, что все рассматриваемые в диссертации события КВМ так или иначе связаны со вспышками, хотя основное внимание в работе уделяется связи КВМ с эрупцией

волокон/протуберанцев, и одной из целей данной работы заявлено исследование КВМ связанных с эруптивными волокнами (стр. 12). Диссертация сильно выиграла бы, если бы были рассмотрены еще и КВМ связанные с эрупцией волокон/протуберанцев, но при отсутствии вспышек.

К сожалению, следует отметить, что в тексте диссертации содержится довольно большое число грамматических и стилистических ошибок, и просто опечаток, которые существенно не влияют на суть изложения научного исследования, но портят впечатление от хорошей научной работы.

Сокращения ряда терминов приводятся до их расшифровки. Иногда расшифровка сокращений повторяется несколько раз, и, часто, приведенные сокращения в дальнейшем тексте не используются.

В списке литературы для части перечня используемой литературы даются как начальные, так и конечные страницы, а для части либо только начальные страницы, либо не приводятся совсем.

Часть указанных в тексте ссылок не приведена, или они не соответствуют, например, на стр. 8 – [ссылка];

стр. 8 - в тексте: “(по первым буквам фамилий авторов Carmichael 1964; Sturrock 1966; Hirayama 1974; Kopp & Pneuman 1976) [52–54]”, однако ссылки в круглых скобках не соответствуют ссылкам в квадратных скобках. Ссылок на публикации Carmichael 1964; Sturrock 1966; Hirayama 1974 - нет совсем;

стр. 11 - “(Cliver et al., 1999; Gopalswamy et al., 2005) [74] – ссылка 74 относится только к Cliver et al., 1999;

стр. 26 - Файнштейн и Егоров (2013) [46, 108]. 108 – Egorov, Fainshtein, 2013.

Нет указания на ссылки: стр. 6 “((Гополсвами и др. 2009a Earth Moon Planet)”; стр 77 и 88 - “Файнштейн, 1991”; стр. 79 – “Gopalswamy and Yashiro (2011)”.

В списке литературе указана одна и та же публикация под номерами 16 и 18.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов определяется использованием современных официальных данных, предоставляемых космическими и наземными обсерваториями и тщательным отбором событий КВМ для исследования.

Проводилась тщательная оценка предлагаемых новых методов. Используемые новые методы и результаты, получаемые при помощи созданного программного обеспечения, сопоставлялись с уже известными методами и результатами полученными другими авторами.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается публикациями по теме диссертации. Всего с участием автора диссертации опубликовано 13 статей, 3 из которых опубликованы в журналах входящих в список ВАК. 13 докладов были представлены на российских и международных конференциях.

Общий вывод

В диссертации Егорова Я. И. исследованы следующие ключевые проблемы:

- формирование КВМ, связанных с эруптивными волокнами/протуберанцами;
- закономерности формирования и распространения ударных волн для КВМ связанных с эруптивными волокнами/протуберанцами;
- закономерности движения быстрых КВМ и связанных с ними ударных волн в трехмерном пространстве.

В целом, диссертация Егорова Я. И. представляется цельным законченным научным исследованием. Достоинством данной работы является использование современных данных с высоким временным и пространственным разрешением и использование современных методов их обработки на основе собственных разработанных пакетов программ. Полученные результаты

представляют научный интерес и способствуют расширению нашего понимания процессов формирования КВМ. Они, также, имеют и практическое значение для прогнозирования геоэффективности КВМ.

Отмеченные выше недостатки не являются решающими при оценке научной ценности диссертации Егорова Я. И. Они не влияют на суть проведенного научного исследования и достоверность полученных результатов и не снижают ценность научной работы Егорова Я. И. Большая часть замечаний может расцениваться как рекомендации для продолжения и расширения данного исследования, тем более что методы и программное обеспечение уже разработаны и апробированы.

Диссертация Егорова Я. И. выполнена на хорошем научном уровне, содержит новые подходы к обработке данных наблюдений КВМ, позволяющих получить новые результаты. Работа хорошо и четко структурирована в соответствии с логикой изложения, каждый раздел представляет собой обоснованное законченное исследование. Каждая глава сопровождается выводами.

Как несомненное достоинство данной работы, следует отметить то, что диссертация Егорова Я. И. хорошо оформлена, несмотря на отмеченные выше недостатки. Рассмотрение конкретных событий КВМ проиллюстрировано наблюдательным материалом. Четко описаны применяемые для обработки данных методы и алгоритмы, которые сопровождаются подробным иллюстративным материалом. Графики, полученных результатов, выполнены на высоком современном уровне, несмотря на отмеченные выше недочеты. В диссертации содержится достаточное количество ссылок на работы других авторов, работающих в этой области.

Автореферат диссертации и список публикаций автора достаточно полно отражают содержание работы. В автореферате отмечена новизна, актуальность, достоверность и практическая ценность полученных в диссертации результатов. Текст автореферата хорошо проиллюстрирован соответствующими графиками. Все основные результаты полностью представлены. Приведена соответствующая литература.

Егоров Я. И. принимал участие во всех исследованиях, представленных в данной диссертации, что подтверждается его соавторством в опубликованных статьях, явившихся основой данной диссертации. Всего, с участием автора диссертации, опубликовано 13 статей, 3 из которых опубликованы в журналах входящих в список ВАК. 13 докладов были представлены на российских и международных конференциях. Автор лично докладывал результаты, изложенные в данной диссертации на ряде конференций.

В целом диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, пункты 9-14 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а ее автор, Егоров Ярослав Игоревич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 - "Физика Солнца".

Кандидат физико-математических наук,

Биленко И. А.

Подпись Биленко заверяю,
Директор Государственного астрономического
института имени П. К. Штернберга, Московского
государственного университета имени М. В. Ломоносова,
119992, г. Москва, Университетский пр. 13,
т. +7 495 939 2858, факс +7 495 932 8841
e-mail director@sai.msu.ru
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор



Черепашук А. М.