

УДК 523.98

Радиальные распределения величины магнитного поля в солнечной короне, полученные с использованием сведений о быстрых гало КВМ

В.Г. Файнштейн¹, Я.И. Егоров¹, В.А. Пичуев²

¹ ИСЗФ СО РАН, ул. Лермонтова, 126-а, а/я 291, г. Иркутск, 664033
vfain@iszf.irk.ru

² ИГУ, бул. Гагарина, 20, г. Иркутск, 664003

Поступила в редакцию 25 октября 2013 г.

Аннотация. Опираясь на метод нахождения радиальных профилей величины магнитного поля в солнечной короне $B(r)$, описанный в работе (Гопалсвами, Яширо, 2011) и применявшийся для направлений вблизи плоскости неба, определены радиальные распределения величины магнитного поля вдоль направлений, близких к оси Солнце – Земля. Для этого с использованием модели “Ice-cream cone model” по данным SOHO/LASCO найдены трехмерные характеристики быстрых КВМ типа гало и связанных с ними ударных волн. С помощью этих данных удалось получить распределения $B(r)$ до расстояния от центра Солнца ≈ 43 радиусов Солнца, что примерно в два раза дальше, чем в работе (Гопалсвами, Яширо, 2011). Сделан вывод о том, что, в некоторых случаях метод нахождения поля (Гопалсвами, Яширо, 2011) приводит к ошибочным результатам и должен быть модифицирован. Предложены пути такой модификации.

RADIAL MAGNETIC FIELD DISTRIBUTIONS IN THE SOLAR CORONA BASED ON FAST HALO CME DATA, *by V.G. Fainshstein, Ya.I. Egorov, V.A. Pichuev.* We determined the radial distributions of magnetic field along directions close to that of the Sun – Earth axis using the method of finding radial profiles of magnetic field in the solar corona $B(R)$ suggested by Gopalswamy, Yashiro (2011). To do this we found 3D parameters of CME and related shock using the “Ice-cream cone model”. Using the obtained data we found distribution of $B(R)$ at distances up to 43 solar radii. It is about twice as far as it was found in (Gopalswamy, Yashiro, 2011). It is concluded that in some cases the Gopalswamy and Yashiro’s method leads to erroneous results, and should be modified. The ways of modification have been suggested.

Ключевые слова: солнечная корона, магнитное поле, корональный выброс массы, ударная волна

1 Введение

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 работах (Гопалсвами, Яширо, 2011; Ким и др., 2012) 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. Сделан вывод, что в некоторых случаях метод (Гопалсвами, Яширо, 2011) должен быть модифицирован. Предложены пути для такой модификации.

2 Данные и методы исследования

Для нахождения трехмерных (3-М) параметров ГКВМ мы использовали метод, предложенный в работе (Хае и др., 2005), в которой в качестве модели выброса использовалась так называемая “Ice cream cone” модель. В этой модели корональный выброс массы представляется в виде конуса с вершиной в центре Солнца, опирающегося на часть сферической поверхности радиусом, равным длине образующей конуса. Направление движения ГКВМ определяется положением в пространстве оси модельного конуса, которое описывается двумя углами: θ_0 и ϕ_0 . Угол θ_0 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 ($\phi_0 = [0^\circ; 360^\circ]$). Кроме направления движения этот метод позволяет рассчитать на оси модельного КВМ скорость ее движения V_p , а также угловой размер выброса массы α . В работе (Хае и др., 2005) при расчете 3-М 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 (Хае и др., 2005) для расчетов 3-М параметров отдельно для тела КВМ и для ударной волны. Для нахождения значений магнитной индукции мы модифицировали этот метод для расчета не только скорости тела КВМ и ударной волны вдоль их осей, но и положений этих структур вдоль их осей в разные моменты времени. Важным является вопрос о том, связана ли с анализируемым КВМ ударная волна, и если связана, то как ее выделить? Последние 10 лет были временем интенсивных коронографических и спектроскопических исследований ударных волн, связанных с КВМ (Воурлидас, Бемпорад, 2012). Идентификация ударной волны по наблюдениям свечения короны в поле зрения коронографа LASCO C2 и C3 – довольно сложная проблема. Считается, что ударная волна – это граница диффузной области в поле зрения LASCO, окружающая (не всегда полностью) более яркое тело КВМ (рис. 1).

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. В поле зрения коронографа LASCO C3 практически на всех расстояниях $V_{MS} \approx V_A$ – альфвеновской скорости. Другой способ выделить ударную волну в короне – получить распределения яркости вдоль прямой линии, пересекающей границу диффузной области в перпендикулярном к ней направлении. Если на скане яркости возникнет резкий скачок яркости на границе диффузной области, есть основание считать такой скачок ударной волной (Онтиверос, Воурлидас, 2009). Здесь основная проблема заключается в том, что выделить такие скачки удастся, как правило, в небольших по широте участках границы диффузной области (их может быть несколько для одного КВМ). В настоящее время отсутствие таких скачков на некоторых участках границы диффузной области

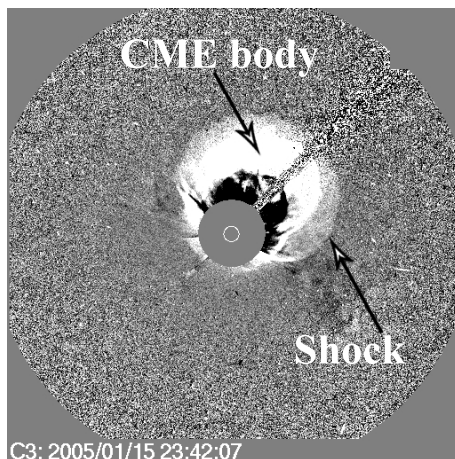


Рис. 1. Иллюстрация ГКВМ, связанного с ударной волной. Разностное изображение короны (скользящая разность). Более яркая область – тело КВМ, граница диффузной области вокруг тела КВМ – ударная волна

мы связываем с тем, что шумовая амплитуда яркости в этих участках границы диффузной области сравнима или больше амплитуды скачка яркости – ударной волны. Другими словами, в этих местах отношение сигнал-шум мал. Кроме коронографических наблюдений в белом свете, наличие ударных волн в короне определяется по радиовсплескам II типа, а также по наблюдениям в некоторых линиях крайнего ультрафиолета, позволяющих оценить наличие скачков плотности, температуры и др. (Бемпорад, Манкусо, 2010). В этой работе мы будем предполагать, что все участки границы диффузной области, движущиеся со скоростью $V > V_A + V_{SW}$, являются ударными волнами, в том числе и те участки границы, в которых не удалось выделить резкие скачки яркости. Для анализа мы отобрали ГКВМ, для 8 из которых линейные скорости в плоскости неба превышают 1650 км/с. Скорость одного ГКВМ была равна 1368 км/с. Чтобы оценить характерное значение альфвеновской скорости $V_A(R)$ в быстром солнечном ветре в поле зрения коронографа LASCO C3, мы использовали следующий подход. Среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в быстром потоке солнечного ветра на орбите Земли $Br \approx 3 \times 10^5$ Гс, а средняя концентрация протонов $n \approx 3$ см³. Полагая, что на расстояниях $10R_o < R < 215.5R_o$ (орбита Земли) $Br \approx 1/R^2$, $n \approx 1/R^2$, можно показать, что на расстоянии $R > 10R_o$ (R_o – радиус Солнца) в быстром солнечном ветре характерное значение альфвеновской скорости $V_A < 750$ км/с. Даже для максимальной скорости быстрого солнечного ветра $V_{SW} \approx 850$ км/с скорость 8 КВМ в плоскости неба превышает $V_A + V_{SW} = 1600$ км/с. То есть для 8 рассмотренных событий условие $V > V_A + V_{SW}$ выполняется в быстром солнечном ветре при $R > 10R_o$. Для 9-го события это условие выполняется на $R > (12 - 13)R_o$. Аналогично можно показать, что это условие выполняется и для медленного ветра. Таким образом, мы будем считать, что граница диффузной области вокруг тела КВМ для всех рассмотренных событий является ударной волной на расстоянии $R > (12 - 13)R_o$, а для 8 событий на расстоянии $R > 10R_o$. В действительности, для нескольких рассмотренных ГКВМ с самыми большими скоростями ударные волны существуют в быстром солнечном ветре, начиная как минимум с $R \approx 5R_o$.

Наша реализация метода, предложенного (Гопалсвами, Яширо, 2011), заключается в следующем. 1) Для каждого рассмотренного ГКВМ в различные моменты времени его движения в поле зрения коронографа LASCO C3 с использованием метода (Хае и др., 2005) рассчитывается расстояние между ударной волной и телом КВМ ΔR вдоль оси модельного выброса массы, а также радиус кривизны границы тела КВМ R_c . Заметим, что оси моделей для тела КВМ и связанной 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

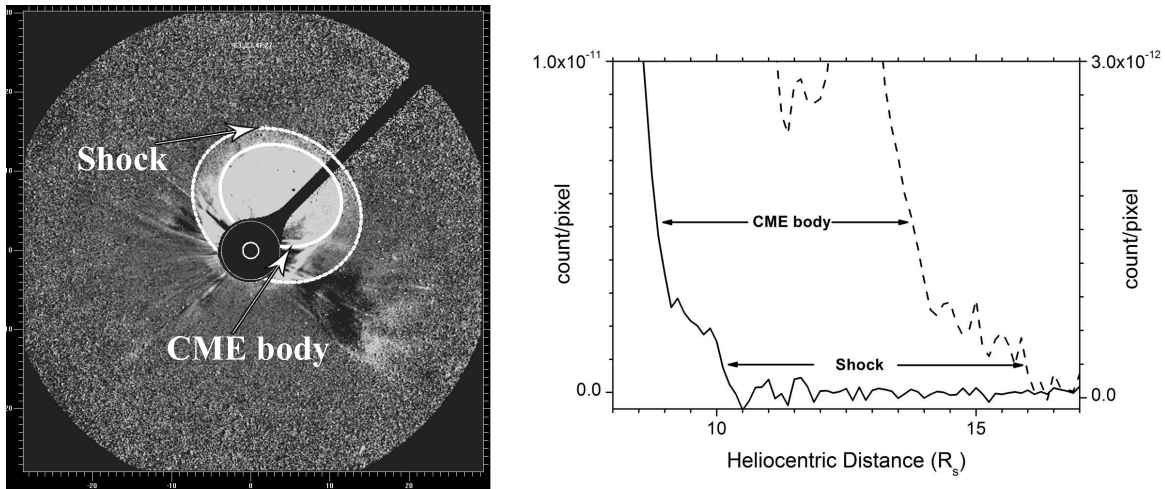


Рис. 2. Слева – ГКВМ, зарегистрированный 15.01.2005 (23:41:27). Белыми линиями показаны обводки участками эллипсов границы тела выброса массы (яркая внутренняя область) и ударной волны (граница внешней диффузной области). Справа – распределения яркости вдоль широты $30NW$ для трех моментов времени. Отчетливо выделяются скачки яркости с пространственным размером $[1 - 2]\delta R$, где $\delta R \approx 0.125R_o$ – пространственное разрешение коронографа LASCO C3, R_o – радиус Солнца. Предполагается, что это бесстолкновительная ударная волна. Заметим, что сканы яркости, аналогичные показанным на рисунке справа, впервые для этого события были получены в работе (Файнштейн, Загайнова, 2012). Используя такие графики, в этой работе были найдены и сопоставлены радиальные распределения скорости тела КВМ и ударной волны

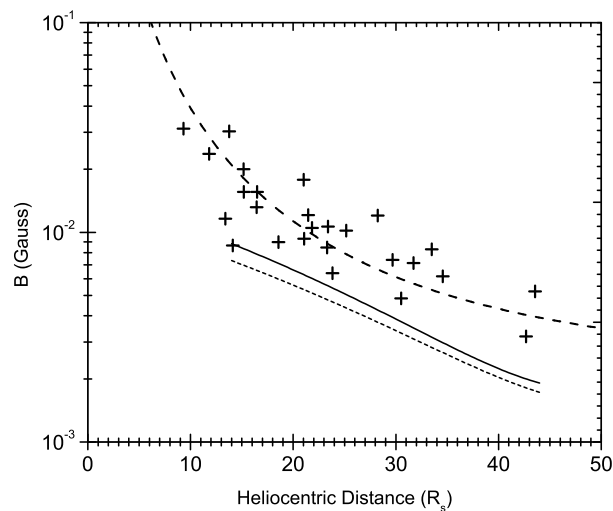


Рис. 3. Крестики – значения $B(R)$, полученные с помощью расчетов 3-М параметров ГКВМ в разные моменты времени для каждого рассмотренного события. Линия, пересекающая квадраты $B_r(R) = 8 \times 10^5 (215.5 / (R/R_o))^2 + 0.002$ Гс, – среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в горизонтальном 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 $B(R)$

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 (Гопалсвами, Яширо, 2011), показало, что различие определенных двумя способами R_c оказывается $< 30\%$. 2) Из соотношения $\Delta R/R_c = 0.81[(\gamma - 1)M^2 + 2]/[(\gamma + 1)(M^2 - 1)]$ (Рассел, Маллиган, 2002) находится альфвеновское число Маха (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 (Гопалсвами, Яширо, 2011), скорость солнечного ветра мы находили из соотношения для скорости медленного ветра $V_{SW}^2(R) = 1.75 \times 10^5(1 - \exp(-(R - 4.5)/15.2))$ (Шилей и др., 1997). 4) Из формулы $V_A = 2.18 \times 10^6 n^{-1/2} B$ находится величина магнитной индукции (в Гс). В этой формуле n (в см^{-3}) – концентрация частиц в корональной плазме, которая полагалась равной концентрации электронов и находилась с помощью соотношения $n(R) = 3.3 \times 10^5 R^{-2} + 4.1 \times 10^6 R^{-4} + 8.0 \times 10^7 R^{-6}$ (Лебланк и др., 1998). 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. Обратим внимание на то, что в методе (Гопалсвами, Яширо, 2011) неявно предполагается, что приосевые части анализировавшихся КВМ располагались в медленном ветре (об этом свидетельствуют $V_{SW}(R)$, п. 3), и $n(R)$, п.4). Это, по-видимому, не всегда так, и к этому вопросу мы вернемся в конце статьи.

3 Результаты

На рис. 2 показан пример ГКВМ в поле зрения коронографа LASCO C3 с обводками границы тела КВМ и ударной волны участками эллипса. Заметим, что обводка указанных структур не всегда производилась с их полным охватом по широте в пределах 360° . Мы обводили только те участки структур, которые надежно могли идентифицировать как тело ГКВМ или ударную волну. Наш анализ показал, что различие трехмерных параметров, рассчитанных для одних и тех же событий с неполной и полной (360°) обводками относительно невелико.

На рис. 3 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 (Файнштейн, 1991). 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.

Две линии ниже рассеяния точек – расчеты поля в предположении, что приосевая область всех рассмотренных КВМ движется в быстром солнечном ветре (СВ), скорость которого $V_{SW} = 600$ км/с (верхняя кривая) и 800 км/с (нижняя кривая) независимо от расстояния и с зависимостью концентрации протонов от расстояния, характерной для быстрого СВ: $N_p = 3(215.5/(R/R_o))^2$ (см^{-3}). Здесь приведены только линии регрессии. Более детально эти зависимости будут обсуждаться ниже.

Ниже (рис. 4) для сравнения показаны результаты расчета магнитного поля из работы (Ким и др., 2012). 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 $\Delta R/R_c$. В работе (Гопалсвами и Яширо, 2011) неявно предполагалось, что приосевые участки всех КВМ, свойства которых использовались для нахождения

величины магнитного поля, движутся в области медленного ветра. Это следует из использовавшейся зависимости скорости СВ от расстояния из работы (Шилей и др., 1997).

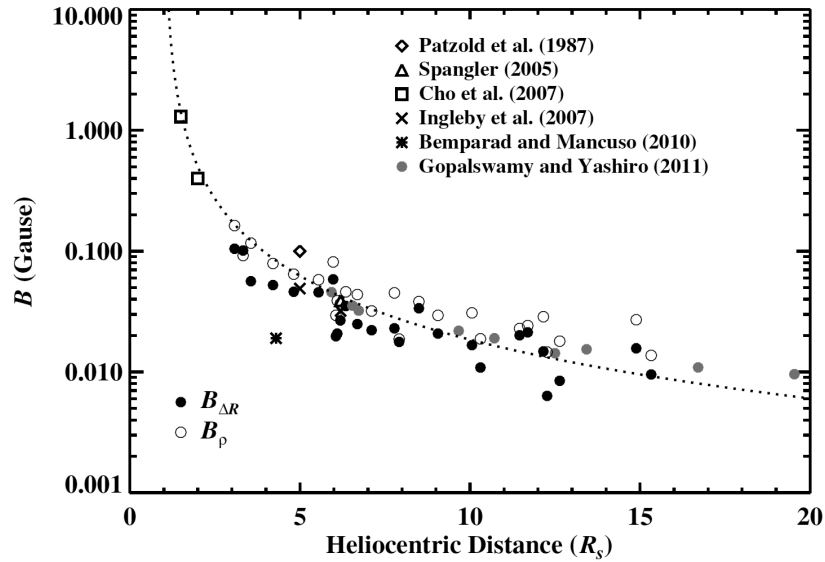


Рис. 4. Черные точки – альфвеновское число Маха, находилось с использованием значений $\Delta R/R_c$, открытые круги – с использованием скачка плотности на фронте ударной волны $\rho d/\rho i$

Рис. 5 иллюстрирует диапазон изменения основных параметров, которые использовались при нахождении величины магнитного поля с использованием данных гало КВМ. Рассеяния точек на рис. 5 и на аналогичных рисунках в работе (Гопалсвами и Яширо, 2011) довольно “похожи”: практически совпадают диапазоны изменения всех трех параметров.

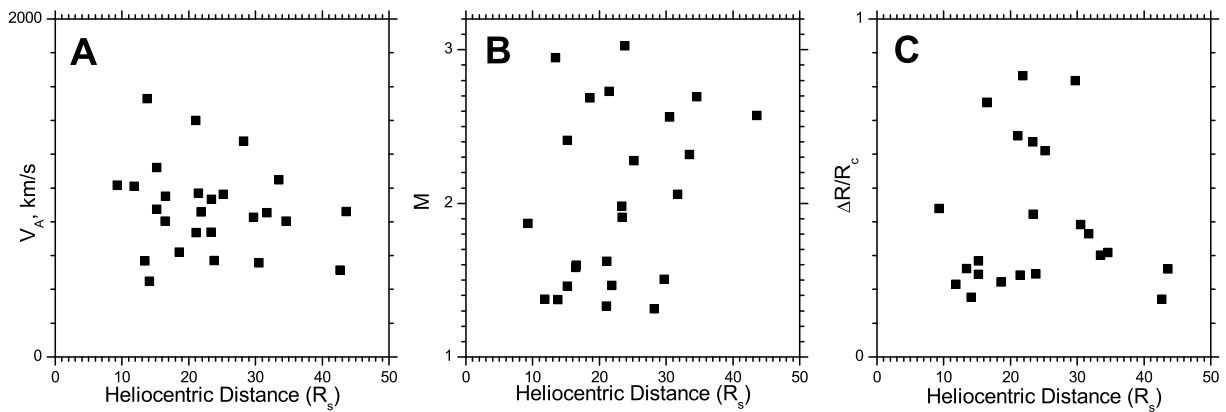


Рис. 5. Рассеяние альфвеновской скорости (A), значений альфвеновского числа Маха (B) и параметра $\Delta R/R_c$ (C) для рассмотренных событий в различные моменты времени

В действительности, приосевая область некоторых КВМ в поле зрения коронографов LASCO движется в области быстрого СВ. В качестве примера такого выброса массы отметим лимбовый КВМ, наблюдавшийся в поле зрения LASCO 29.06.2011 (00:48:06), рис. 6(A), с позиционным углом 267° и линейной скоростью 481 км/с. Этот КВМ был относительно медленным и, скорее всего, не связанным с ударной волной. Внизу КВМ воздействует на пояс корональных стримеров, вверху – на цепочку стримеров.

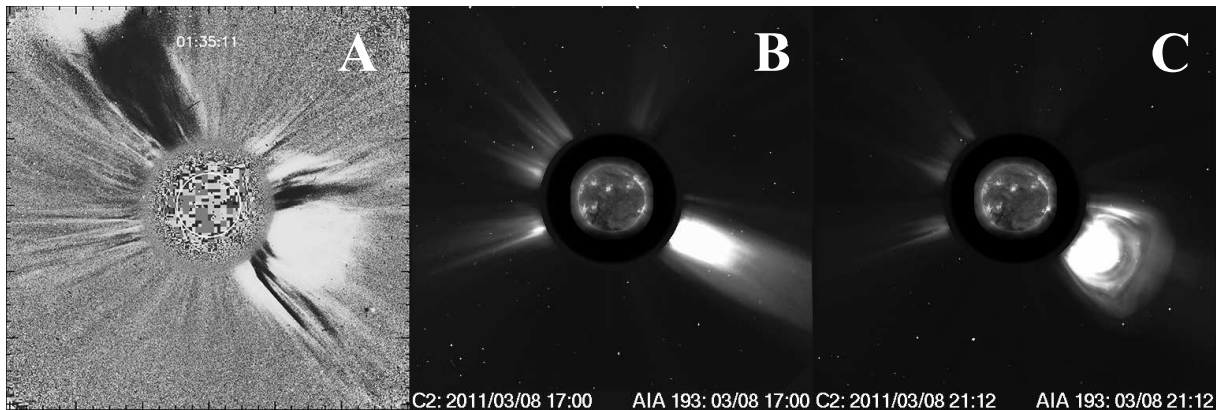


Рис. 6. А – КВМ, приосевая часть которого движется в быстром солнечном ветре. В – стример до появления КВМ. С – КВМ, приосевая часть которого движется вдоль стримера на рисунке В

Яркий пример КВМ, приосевая часть которого движется вдоль пояса стримеров, т. е. в медленном ветре, является КВМ, зарегистрированный в поле зрения коронографа 08.03.2011 (20:12), рис. 6(С). Линейная скорость этого КВМ составила 702 км/с, позиционный угол равен 236° . Можно показать, что яркий стример в юго-западной части изображения короны на рисунке (В) – это свечение протяженного участка пояса стримеров, почти перпендикулярного плоскости неба. Особенностью этого КВМ оказалось заметное различие в скорости приосевой части (≈ 520 км/с) и части, движущейся в быстром ветре ($\approx 600 - 700$ км/с). Этот КВМ тоже, скорее всего, не сопровождался ударной волной.

Таким образом, прежде чем находить значения магнитного поля методом (Гопалсвами и Яширо, 2011), необходимо выяснить, в каком потоке СВ (быстром или медленном) движется ось выброса массы. В приведенных примерах определение типа солнечного ветра, в пределах которого движется приосевая часть КВМ, не вызвало у нас трудностей. Тем не менее, для решения этой задачи мы использовали разные данные, и все детали нашего метода мы здесь не обсуждаем. Но в общем случае для решения этой задачи требуется создание специальной методики. Такую методику мы сейчас разрабатываем. И еще один комментарий, касающийся двух линий регрессии на рис. 3 в нижней части рисунка. Использование при расчетах магнитного поля в быстром солнечном ветре в качестве скорости солнечного ветра $V_{SW}(R)$ постоянной величины (600 или 800 км/с в нашем случае), не зависящей от расстояния, является грубым приближением. Здесь следует использовать модельные зависимости $V_{SW}(R)$, включающие в себя промежутки нарастания скорости, например, до $R \approx (10 - 20)R_o$. На расстоянии $R > (10 - 20)R_o$ скорость быстрого солнечного ветра в первом приближении можно считать постоянной. Максимальную скорость СВ можно оценить как скорость истечения СВ из соответствующей корональной дыры, опираясь на свойства этой дыры (см., например, Еселевич и др., 2009).

4 Выводы

Кратко сформулируем основные выводы работы:

1. С использованием метода нахождения магнитного поля в солнечной короне, предложенного в работе (Гопалсвами и Яширо, 2011), 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 (Ким и др., 2012).

2. Найденны значения альфвеновской скорости, альфвеновского числа Маха и параметра $\Delta R/R_c$ на различных расстояниях, которые согласуются со значениями соответствующих параметров из работы (Ким и др., 2012).

3. Сделан вывод, что метод, предложенный в работе (Гопалсвами и Яширо, 2011) должен быть модифицирован. Это связано с тем, что приосевые части фронта некоторых КВМ могут двигаться в быстром солнечном ветре, а некоторых – в медленном ветре. Определение типа потока солнечного ветра (быстрый или медленный), в котором движется приосевая часть КВМ, должно предшествовать проведению расчетов магнитного поля. При нахождении значения альфвеновской скорости перед фронтом ударной волны нужно учитывать, что пространственные профили скорости и плотности плазмы в быстром потоке солнечного ветра и в медленном ветре различаются.

Работа выполнена при частичной поддержке ГК № 02.740.11.0576 Федеральной программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”. Авторы благодарны команде LASCO за возможность свободно использовать данные этих инструментов.

Литература

- Бемпорад, Манкусо (Bemporad A. and Mancuso S.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 720. P. 130.
 Воурлидас, Бемпорад (Vourlididas A., Bemporad A.) // *AIP Conf. Proc.* 2012. V. 1436. P. 279. doi: 10.1063/1.4723620.
 Гопалсвами, Яширо (Gopalswamy N., Yashiro S.) // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 736. P. L17.
 Еселевич В.Г., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Еселевич М.В., Кашапова Л.К. // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. С. 1.
 Ким и др. (Kim R.-S., Gopalswamy N., Moon Y.-J., Cho K.-S., Yashiro S.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 746. P. 118.
 Лебланк и др. (Leblanc Y., Dulk G.A., Bougeret J.-L.) // *Solar Phys.* 1998. V. 183. P. 165.
 Онтиверос, Воурлидас (Ontiveros V., Vourlididas A.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 693. P. 267.
 Рассел, Маллиган (Russell C.T., Mulligan T.) // *Planet. Space Sci.* 2002. V. 50. P. 527.
 Файнштейн (Fainshtein V.G.) // *Solar. Phys.* 1991. V. 136. P. 169.
 Файнштейн, Загайнова (Fainshtein V.G., Zagainova Yu.S.) // *eprint arXiv:1208.5890.* 2012.
 Хае и др. (Xue X.H., Wang C.B., Dou X.K.) // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A08103.
 Шилей и др. (Sheeley N.R., Jr., Wang Y.-M., Hawley S.H., et al.) // *Astrophys. J.* 1997. V. 484. P. 472.