

ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ФОТОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ КВМ 7 ИЮНЯ 2011 г.

Я.И. Егоров, В.Г. Файнштейн, В.Г. Руденко, С.А. Анфиногентов

PHOTOSPHERIC MAGNETIC FIELD VARIATIONS IN 2011 JUNE 7 CME SOURCE

Ya.I. Egorov, V.G. Fainstein, G.V. Rudenko, S.A. Anfinogentov

Для КВМ, возникшего 07.11.2011 г. и связанного с эрупцией волокна и вспышкой, в области возникновения КВМ по векторным измерениям поля инструментом SDO/HMI проведено детальное исследование изменений фотосферного магнитного поля, сопровождающих появление выброса массы. Изучены изменения со временем модуля магнитного поля B , радиальной компоненты поля B_r и угла α между направлением поля и радиальным направлением из центра Солнца в месте измерения поля. Показано, что в нескольких выделенных участках источника КВМ началу вспышки и эрупции волокна предшествует увеличение B и $|B_r|$, а также уменьшение α , а после начала вспышки и эрупции волокна характер временных вариаций этих параметров поля резко изменяется. В некоторых участках области возникновения КВМ изменение поля обусловлено всплытием нового магнитного потока, в том числе в виде поры.

We study with SDO/HMI vector magnetogram the photospheric magnetic flux variations accompanying a coronal mass ejection (CME) which occurred on 2011 June 7 and was associated with an flare and filament eruption. We analyze the time profiles of absolute magnetic field (B), field radial component (B_r) and angle (α) between magnetic field direction and radial direction from the Sun centre. It was found that the B and B_r are increasing (α is decreasing) before flare onset and after that the parameter variations changes dramatically in several places of CME source. We also found that in some places of CME source field change have been caused by a new magnetic flux emergence.

Введение

Считается, что генерация коронального выброса массы (КВМ) сопровождается трансформацией магнитного поля в области возникновения выброса массы с преобразованием части энергии поля в энергию КВМ [Chen, 2011]. Эта трансформация поля, как показывают наблюдения, может проявляться в вариациях поля в фотосфере.

В работе [Feunman, 1995] приведены экспериментальные доказательства того, что эрупция спокойного волокна и возникновение связанного КВМ происходит в результате дестабилизации крупномасштабной корональной аркады новым всплывающим магнитным потоком (НВМП). Авторы работы [Zhang, 2008] обнаружили, что в 60 % рассмотренных случаев магнитный поток в области источников КВМ увеличивался в течение 12 ч перед появлением КВМ, а в 40 % случаев – уменьшался. Был сделан вывод, что связь между НВМП и возникновением КВМ носит сложный характер, и всплытие нового магнитного потока не является единственной причиной инициации КВМ. И, наконец, в работе [Fainshtein, 2012] было показано, что в небольшой области фотосферы в центре мощной вспышки, связанной с быстрым КВМ типа гало, в течение 1–1.5 сут до начала вспышки возрастают $\langle |B| \rangle$ – модуль усредненной по этой области измеряемой компоненты магнитной индукции по лучу зрения B_l и усредненное значение $|B|$. По измерениям магнитного поля с высоким временным разрешением ~ 1 мин обнаружено, что начало мощной вспышки, связанной с быстрым КВМ, сопровождается резким импульсным или ступенчатым изменением B_l и $|B|$ в окрестности центра вспышки.

Несмотря на результаты цитированных и других работ, вопрос об особенностях изменения фотосферного магнитного поля, сопровождающих возникновение КВМ, во многом остается открытым. В настоящей работе детально изучены вариации

фотосферного магнитного поля в области возникновения КВМ 07.06.2011 г.

Данные и методы исследования

Использовались векторные измерения фотосферного магнитного поля магнитографом SDO/HMI [http://jsoc.stanford.edu/HMI/Vector_products.html]. Анализировались временные изменения в области возникновения КВМ, зарегистрированного 7 июня 2011 г. и связанного с эрупцией волокна и вспышкой, следующих характеристик поля: модуля магнитной индукции B , радиальной компоненты магнитной индукции B_r и угла α между направлением поля и радиальным направлением из центра Солнца в точке измерения поля. В случае отрицательной полярности поля ($B_r < 0$) $\alpha = 180^\circ - \alpha_{mes}$, где α_{mes} – измеренный угол между направлением поля и радиальным направлением. При расчетах B_r использовался метод очень быстрого и точного устранения азимутальной неопределенности, предложенный в работе [Rudenko, 2014]. При определении характеристик поля в участках, находящихся на разных широтах, для точного определения положения этих участков в разные моменты времени, учитывалось дифференциальное вращение Солнца.

Результаты

На рис. 1, *a* на изображении Солнца, полученном SDO/AIA в канале 171 Å, показан уже сформировавшийся КВМ на начальной стадии своего движения. Там же отмечено эруптивное волокно (ЭВ). На рис. 1, *б* приведены временные профили скорости ЭВ, КВМ и интенсивности мягкого рентгеновского излучения, позволяющие оценить временные масштабы основных этапов эрупции ЭВ, развития связанной с КВМ вспышки и движения КВМ для сравнения этих масштабов с временем изменением магнитного поля в области формирования КВМ. На рис. 1, *в* прямоугольниками отмечены выбранные места для ана-

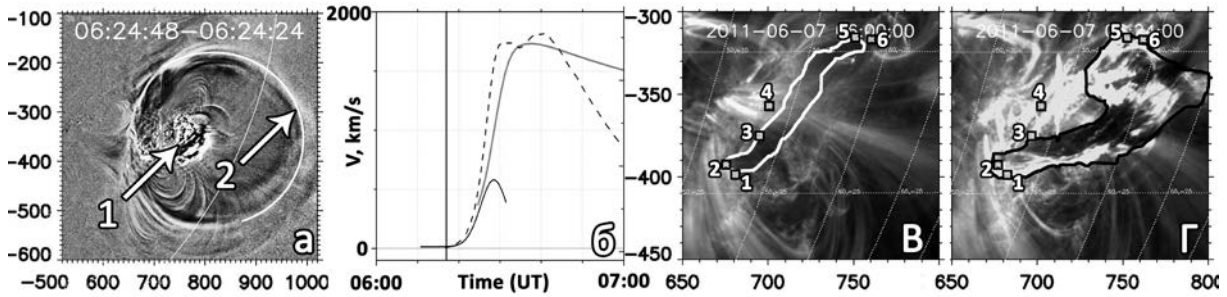


Рис 1. На разностном изображении Солнца в канале 171 Å стрелкой № 1 указан ЭВ, стрелкой № 2 – КВМ (а); временные профили скорости ЭВ (черная линия), КВМ (серая линия) и интенсивности мягкого рентгеновского излучения (штриховая линия) (б); черными прямоугольниками отмечены выбранные места для анализа вариаций магнитного поля в два момента времени (в, г).

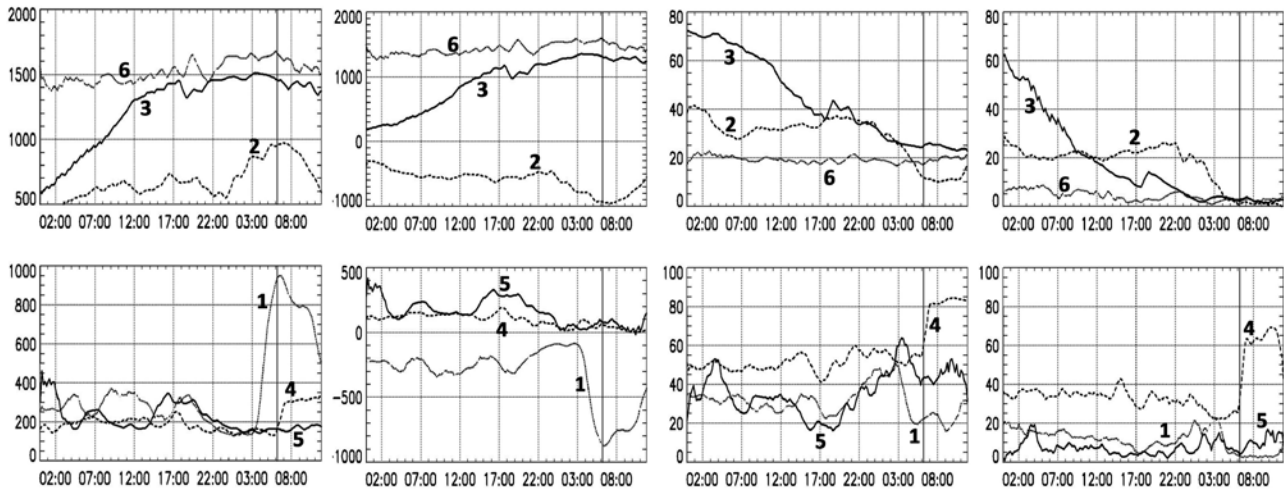


Рис. 2. Изменения со временем B , B_r , α , усредненных в пределах выделенных участков на фотосфере, а также минимального угла α_{\min} на каждом участке соответственно. Начало вспышки показано вертикальной линией.

лиза вариаций магнитного поля. Два прямоугольника (№ 2 и № 5) расположены в основании «ног» ЭВ, области № 1 и № 6 – вне оснований «ног» ЭВ, но рядом с ними (№ 6 – в поре), участок № 3 расположен вне ЭВ в поре и № 4 – в центре вспышки. Двух ленточная вспышка с участком № 4 отдельно показана на рис. 1, г в момент времени, когда вспышка оказалась достаточно развитой.

Наш анализ показал, что появление КВМ сопровождается изменениями магнитного поля в пределах АО с источником КВМ на нескольких масштабах времени, начиная от более, чем сутки, и заканчивая близким к временному разрешению вектор – магнитографа (12 мин). Вспышке и ЭВ предшествуют, а затем сопровождают их изменения магнитного поля в многочисленных участках активной области (АО), в которой возник КВМ. В тоже время в АО есть места (например, участок № 5), в которых магнитное поле в течение 4 ч до вспышки и два часа после нее не меняется и в течение почти суток оказывается в пределах 100–300 Гс. Мы исследовали изменения фотосферного магнитного поля в нескольких участках АО (рис. 1, в), в которых вариации поля имели характерные особенности.

На рис. 2, а–д показаны изменения со временем на каждом участке B , B_r , α , усредненных в пределах выделенных участков на фотосфере, а также угла α_{\min} .

На всех участках, кроме участка № 5 в основании верхней «ноги» ЭВ, внутри и вне оснований «ног» протуберанца магнитная индукция возрастает от 30 до 300 % на масштабах времени от 3 до 12 ч в пределах ближайших суток до начала вспышки. В некоторых случаях эти увеличения можно интерпретировать как всплытие нового магнитного потока. В участке фотосферы № 1 вблизи нижней «ноги» эруптивного волокна рост B и $|B_r|$ перед началом вспышки был обусловлен возникновением на несколько часов маленького пятна с отрицательной полярностью поля (рис. 3).

Учитывая нахождение рядом с этим пятном участка с интенсивным полем положительной полярностью, появление пятна можно рассматривать как возникновение условия для магнитного пересоединения, приводящего к эрупции волокна и последующему формированию КВМ. После достижения максимума в участках № 3, 6, магнитная индукция слабо уменьшается до начала вспышки. Оказалось, что в пределах менее 20 мин относительно начала вспышки во всех рассмотренных участках фотосферы, кроме № 5, наблюдается резкое изменение характера временного хода B и B_r . В участках фотосферы в пределах основания нижней «ноги» ЭВ и в некоторых ближайших участках вне «ног» волокна (№ 2, 3, 6) изменение B и $|B_r|$ проявляется в виде уменьшения

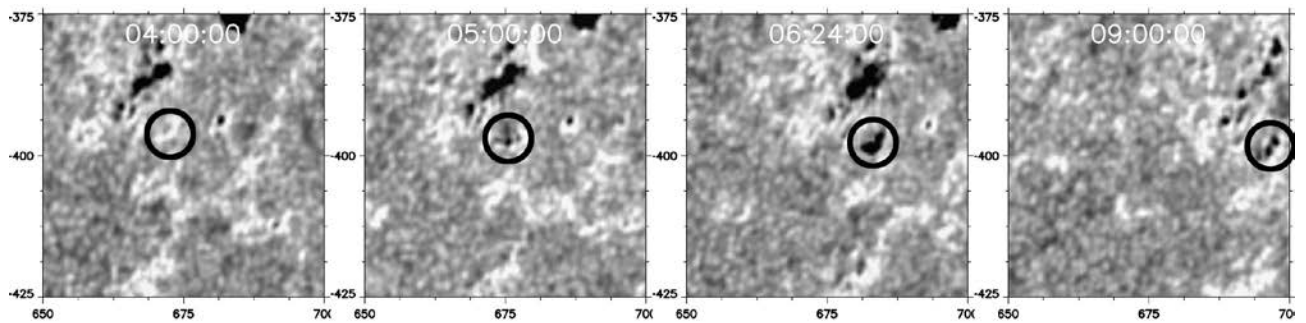


Рис 3. Изображения участка Солнца в континууме в разные моменты времени. Черным кругом показано появление поры.

этих характеристик поля. В центре вспышки наоборот, наблюдается резкое увеличение магнитной индукции на ~ 150 Гс. Угол α_{\min} на всех участках внутри основания «ног» волокна и в ближайшей его окрестности за несколько часов до момента вспышки (начала эрупции волокна) уменьшается от 3 до 10 раз, а в центре вспышки и в участке № 5 сразу после начала вспышки в ~ 2 раза. При смещении выделенных участков во все стороны на 3, 6, 9 пикселей характер изменения модуля магнитной индукции перед началом вспышки в отдельных участках может заметно меняться, но почти во всех участках характер изменения со временем магнитной индукции в пределах ~ 20 мин относительно начала вспышки резко меняется.

Выводы

1) В рассмотренных участках АО (№ 1–6), в которой возник КВМ 7 июня 2011 г., связанным с КВМ вспышке и эрупции волокна в промежутке времени от нескольких часов до одних суток, предшествуют заметные изменения модуля магнитной индукции B , а также B_r и углов α и α_{\min} . В некоторых участках АО (№ 1, 3, 4, 5, 6) начало вспышки (эрупции волокна) сопровождаются резким изменением характера вариаций параметров поля, наблюдавшегося до вспышки.

2) В участке № 1 рядом с основанием эруптивного волокна, за ~ 1.5 ч до начала вспышки возникает пора с отрицательным полем. Возникновение поры создает условие для магнитного пересоединения вблизи основания ЭВ и последующей эрупции волокна.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-02-01077. Авторы благодарят команду SDO/HMI, SDO/AIA за возможность свободно использовать данные этих инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chen P.F. Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis // *Living Reviews in Solar Physics*. 2011. V. 8. P. 1.
- Fainshtein V.G., Popova T. E., Kashapova L. K. Magnetic field dynamics based on SOHO/MDI data in the region of flares related to halo coronal mass ejections // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. V. 52. P. 1075–1086.
- Feynman J., Martin S.F. The initiation of coronal mass ejections by newly emerging magnetic flux // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 3355–3367.
- Rudenko G.V., Anfinogentov S.A. Very Fast and Accurate Azimuth Disambiguation of Vector Magnetograms // *Solar Phys.* 2014. V. 289, N 5. P. 1499–1516.
- Zhang Y., Zhang M., Zhang H. On the Relationship between Flux Emergence and CME Initiation // *Solar Phys.* 2008. V. 250. P. 75–88.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия