СВЯЗЬ СКОРОСТИ КВМ С БЫСТРОТОЙ СПАДА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ ВЫБРОСА МАССЫ

Загайнова Ю.С.¹, Файнштейн В.Г.², Руденко Г.В.²

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

CME VELOCITY VS MAGNETIC FIELD DECAY RATE IN THE MASS EJECTION GENERATION REGION

Zagainova Iu.S.¹, Fainshtein V.G.², Rudenko G.V.²

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia

The fastest CME in activity cycle 24 and a slow CME with an average velocity that were registered in the LASCO coronagraph field of view were taken as an example to demonstrate, based on field calculation data in a three-dimensional space, both in the non-linear force-free and the potential approximation, that, at relatively small heights, a higher magnetic-field decay rate above the polarity inversion line (PIL) of the photospheric field corresponds to a fast CME as compared to a slow CME, in their formation area in the active region. It is shown, for a sample of CMEs with different values of linear mapped velocity V_{lin} , that three-dimensional field calculations using the potential approximation reveal a positive trend between V_{lin} and the rate of magnetic field decay with height h , as measured using the field decay rate $n(h) = -(h/B_t)(dB_t/dh)$, where B_t is the transverse field component.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-179-182

Введение

По наблюдениям в поле зрения коронографов *LASCO* скорости корональных выбросов массы (КВМ) варьируются в широком диапазоне: от десятков км/с до скоростей более 3000 км/с [1]. В то же время, несмотря на уже десятилетия изучения КВМ (см. обзор в [2]) и большое количество предложенных механизмов формирования КВМ [3], до настоящего времени, как правило, не удается выяснить, от чего зависит скорость конкретного КВМ.

Тем не менее, в ряде работ обсуждались факторы, которые могут влиять на скорость КВМ. Так, например, авторы работы [4] пришли к выводу, что КВМ, связанные с солнечными вспышками, в среднем более быстрые, чем КВМ, связанные с эрупцией волокон. Согласно результатам работы [5] (1999) можно выделить две группы КВМ: (1) КВМ со скоростью (400–600) км/с, скорость которых в поле зрения коронографа увеличивается до максимального значения постепенно и которые связаны с эрупцией волокон («постепенные КВМ»); (2) КВМ со скоростью $V_{max} > 750$ км/с, которые связаны с солнечными вспышками и скорость которых резко достигает максимального значения («импульсные КВМ»). В настоящее время уста-

новлено, что медленные КВМ могут оказаться импульсными и связанными со вспышками; быстрые КВМ могут оказаться постепенными и связанными с эрупцией волокна.

Авторы работы [6] провели расчеты движения модельного бессилового магнитного жгута во внешнем поле с дипольной и квадрупольной конфигурацией. Ими показано, что в первом случае жгут оказывается более медленным, чем во втором случае. Отсюда можно сделать вывод, что быстрота спада магнитного поля перед магнитным жгутом влияет на его максимальную скорость.

В настоящей работе сделана попытка ответить на вопрос: влияет ли быстрота спада магнитного поля в активной области (АО), в которой возник реальный КВМ, на его скорость? На первом этапе этого многопланового исследования мы попытались выяснить, нет ли связи скорости КВМ с быстротой спада магнитного поля на малых высотах $h \leq 0.3 R_{\text{Sun}}$, которые, в основном, ниже высот формирования фронтальной структуры КВМ.

Данные и методы их анализа

Для обеспечения большей точности обработки изображений Солнца в каналах крайнего ультрафиолетового излучения и 3D расчетов магнитного поля мы отобрали для исследования по данным каталога https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/index.html КВМ типа «гало» (ГКВМ) с источниками в пределах 45° относительно центра солнечного диска. Измеряемая проекционная скорость таких КВМ представляет из себя, в основном, скорость расширения КВМ в поперечном направлении V_e . Всего были отобраны три группы КВМ по 9 событий в каждой: медленные КВМ с линейной проекционной скоростью $V_{\text{lin}} = (400\text{--}600)$ км/с, быстрые КВМ с $V_{\text{lin}} > 1300$ км/с и КВМ с промежуточной скоростью $V_{\text{lin}} = (600\text{--}1300)$ км/с («промежуточные КВМ»).

Для 3D расчетов магнитного поля в активной области (АО) использовались векторные измерения фотосферного поля инструментом *Helioseismic and Magnetic Imager (HMI)* [7] на борту *SDO*. Это позволило определить три компоненты магнитного поля: B_x , B_y (горизонтальные компоненты поля) и B_z (вертикальная компонента поля). 3D расчеты поля проводились с использованием нелинейного бессилового приближения (NLFFF приближения) и в потенциальном приближении. Для восстановления магнитного поля в NLFFF приближении применялась эффективная реализация оптимизационного метода [8], предложенная в работе [9]. Для всех отобранных событий из расчетов магнитного поля в NLFFF и в потенциальном приближении над линией раздела полярности (ЛРП) фотосферного магнитного поля АО были построены изменения с высотой поперечной компоненты магнитной индукции $B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$, а также распределения индекса спада магнитного поля с высотой $\langle n \rangle(h)$, где значения n были усреднены в пределах различных участков ЛРП поля. 3D расчеты магнитного

поля проводились в боксе с основанием $[0.316 \times 0.316](R_{\text{Sun}})^2$ и высотой $h=0.316 R_{\text{Sun}}$. Для иллюстрации связи $n(h)$ с V_{lin} были отобраны: (1) самый быстрый в 24 цикле активности KBM, возникший в АО NOAA 11429 и зарегистрированный LASCO C2 7.03.2012 (00:24:06 UT) с $V_{\text{lin}} = 2684$ км/с; (2) медленный KBM, возникший в АО NOAA 11875, зарегистрированный LASCO C2 22.10.2013 (21:48:06 UT) с $V_{\text{lin}} = 459$ км/с.

Результаты

На рис. 1а показаны 2D распределения радиальной компоненты фото-сферного поля $B_r \sim$ за 1 час до начала связанной с KBM вспышки в АО, в которой возник быстрый KBM 07.03.2012, на рис. 1б – медленный KBM 22.10.2013. На рисунках пунктиром нанесены ЛРП поля (т.е. линии, где $B_r = 0$); сплошная белая линия – «главная» ЛРП АО длиной L_1 ; место формирования KBM выделено окружностью, ограничивающей участок ЛРП длиной L_2 ($L_1 > L_2$).

Рис. 1.

На рис. 2а показаны распределения с высотой усредненных вдоль L_2 значений быстроты спада $\langle n \rangle$ поперечной компоненты магнитного поля B_t над ЛРП, полученные по 3D расчетам поля в потенциальном приближении. Сплошная линия соответствует быстрому KBM, штриховая линия – медленному KBM. На рис. 2б то же самое, что и на рис. 2а, но для расчетов поля в NLFFF приближении. Видно, что в обоих случаях примерно до высоты $0.25 R_{\text{Sun}}$ для расчетов поля в потенциальном приближении $\langle n \rangle$ для быстрого KBM принимают большие значения, чем для медленного. В NLFFF приближении это справедливо на диапазоне высот от 0 до $0.2 R_{\text{Sun}}$.

Рис. 2.

Далее выполнено усреднение значений $\langle n \rangle$ еще и по высоте ($\langle n \rangle_h$) в диапазоне от 0.05 до 0.3 R_{Sun} . Предположительно, уменьшение интервала усреднения по высоте позволяет исключить вклад в эти значения магнитного поля мелкомасштабных структур АО на высотах $h < 0.05 R_{\text{Sun}}$. В итоге для расчетов поля в потенциальном приближении получили: для быстрого КВМ $\langle n \rangle_h = 2.44$, для медленного КВМ $\langle n \rangle_h = 2.17$. Для соответствующих расчетов поля в NLFFF приближении получили: для быстрого КВМ $\langle n \rangle_h = 3.01$, для быстрого КВМ $\langle n \rangle_h = 2.78$. Аналогичные расчеты были проведены и для остальных отобранных для нашего исследования КВМ.

На рис. 3 показана связь скорости КВМ V_{lin} с быстротой спада $\langle n \rangle_h$ поперечной компоненты B_t магнитного поля с высотой над ЛРП из расчетов поля в потенциальном приближении, где n усредняется вдоль ЛРП в пределах области формирования КВМ и по высоте в интервале от 0.05 до 0.31 R_{Sun} . Видно, что, в среднем, бóльшим значениям скорости V_{lin} соответствуют бóльшие значения быстроты спада поперечной компоненты поля B_t над ЛРП фотосферного поля. Оказалось, что такой же тренд (с меньшим коэффициентом корреляции $r = 0.5$) существует для связи V_{ss} с $\langle n \rangle$, где V_{ss} – скорость движения модельного КВМ вдоль его оси, найденная с использованием данных о КВМ в поле зрения LASCO C2 (см. столбец «space speed» в каталоге https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/index.html).

Рис. 3.

Авторы благодарят команды SOHO/LASCO, SDO/AIA, SDO/HMI за возможность свободного использования данных этих инструментов.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Литература

1. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., et al. // Earth Moon Planet. 2009. V. 104. P. 295.
2. Webb D.F., Howard T.A. // Physics. 2012. V. 9. Issue 1. P. 1.
3. Chen P. // F. Living Rev. Solar Phys. 2011. V. 8. P. 1.
4. MacQueen R.M., Fisher R.R. // Solar Phys. 1983. V. 89. P. 89.
5. Sheeley N.R., Jr., Walters J.H., Wang Y.-M., Howard R.A. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 24767.
6. Török T., Kliem B. // Astron. Nachrich. 2007. V. 328. P.743.
7. Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., et al. // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 229.
8. Wheatland, M.S., Sturrock, P.A., Roumeliotis, G. // Astrophys. J. 2000. V. 540, P. 1150.
9. Rudenko G.V., Myshyakov I.I. // Solar Phys. 2009. V. 257. P. 287.