

РАДИАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕДЕНИЙ О БЫСТРЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСАХ МАССЫ ТИПА ГАЛО

В.А. Пичуев, В.Г. Файнштейн, Я.И. Егоров

RADIAL MAGNETIC FIELD DISTRIBUTIONS IN THE SOLAR CORONA BASED ON HALO FAST CME DATA

V.A. Pichuev, V.G. Fainshtein, Y.I. Egorov

С помощью метода нахождения радиальных профилей величины магнитного поля в солнечной короне $B(R)$, описанном в работе [Gopalswamy, Yashiro, 2011] и применявшегося для направлений вблизи плоскости неба, определены радиальные распределения величины магнитного поля вдоль направлений, близких к оси Солнце–Земля. Для этого с использованием метода [Xue et al., 2005] 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 [Gopalswamy, Yashiro, 2011]. Сделан вывод о том, что в некоторых случаях метод нахождения поля [Gopalswamy, Yashiro, 2011] приводит к ошибочным результатам и должен быть модифицирован. Предложены пути такой модификации.

We determined the radial distributions of magnetic field along directions close to that of the Sun – Earth axis using the method of finding the radial profiles of magnetic field in the solar corona $B(R)$ suggested in [Gopalswamy, Yashiro's, 2011] paper. To do this we found the 3D parameters of a CME and related shock using the «Ice-cream cone model» [Xue et al., 2005]. Using the thus obtained data we found the distribution of $B(R)$ at distances of up to 43 solar radii, which is about twice as far as was found in the paper by [Gopalswamy, Yashiro, 2011]. It is concluded that in some cases the [Gopalswamy, Yashiro's, 2011] method leads to erroneous results, and should be modified. The ways of modification have been suggested.

Введение

До настоящего времени регулярные измерения солнечного магнитного поля проводились только на уровне фотосферы. В короне Солнца проводились лишь отдельные измерения магнитного поля, опирающиеся на эффекты Зеемана, Ханле, Фарадея, а также на измерения солнечного радиоизлучения. Разработка надежных и точных методов определения магнитного поля в солнечной короне – одна из ключевых задач, стоящих перед исследователями. 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 [Gopalswamy, Yashiro, 2011; Kim et al., 2012] предложен и протестирован новый метод нахождения значений магнитного поля в солнечной короне. Метод, опирающийся на свойства корональных выбросов массы (КВМ) и связанных с ними ударных волн, был применен для нахождения радиальных распределений магнитного поля $B(r)$ в плоскости неба. Для нахождения $B(r)$ в этом случае анализировались «лимбовые» КВМ, т. е. выбросы массы, источники которых находятся относительно близко к солнечному лимбу. В настоящей работе этот метод нахождения величины магнитной индукции во внешней короне применен для корональных выбросов массы типа гало (ГКВМ), движущихся под небольшим углом к оси Солнце–Земля. 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 [Gopalswamy, Yashiro, 2011] должен быть модифицирован. Предложены пути такой модификации.

Данные и методы исследования

Для анализа были отобраны следующие быстрые ГКВМ: 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;
30.07.05 (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.

Для нахождения 3D-параметров ГКВМ мы использовали метод, предложенный в работе [Xue et al., 2005], в которой в качестве модели выброса использовалась так называемая Ice Cream Cone Model. 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 ($\varphi_0=[0^\circ; 360^\circ]$). Кроме направления движения этот метод позволяет рассчитать на оси модельного КВМ скорость его движения v_p , а также угловой размер выброса массы α .

В работе [Xue et al., 2005] при расчете 3D-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 [Xue et al., 2005] для расчетов 3D-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.

Наша реализация метода, предложенного [Gopalswamy, Yashiro, 2011], заключается в следующем:

1. Для каждого рассмотренного ГКВМ в различные моменты времени его движения в поле зрения коронографа LASCO C3 с использованием метода [Xue et al., 2005] рассчитывается расстояние между ударной волной и телом КВМ ΔR вдоль оси модельного выброса массы, а также радиус кривизны границы тела КВМ R_c .

2. Из соотношения $\Delta R/R_c = 0.81[(\gamma-1)M^2+2]/[(\gamma+1)(M^2-1)]$ [Russell, Mulligan, 2002] 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 [Gopalswamy, Yashiro, 2011], скорость солнечного ветра мы находили из соотношения $V_{sw}^2(R)=1.75 \cdot 10^5(1-\exp(-(R-4.5)/15.2))$ [Sheeley et al., 1997].

4. Из формулы $V_A=2.18 \cdot 10^6 n^{-1/2} B$ 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 $n(R)=3.3 \cdot 10^5 R^{-2}+4.1 \cdot 10^6 R^{-4}+8.0 \cdot 10^7 R^{-6}$ [Leblanc et al., 1998]. Здесь R – расстояние в плоскости неба от центра солнечного диска до точки наблюдения.

Результаты

На рис. 1 показан пример ГКВМ в поле зрения коронографа LASCO C3 с обводками границы тела КВМ и ударной волны. Граница диффузной области считалась ударной волной, так как скорость этой границы относительно окружающего солнечного ветра превышала альфвеновскую скорость и на отдельных участках этой границы на сканах яркости вдоль направлений, перпендикулярных границе, удается обнаружить скачки яркости пространственным размером $(1-2)\delta R$, где $\delta R \approx 0.125 R_\odot$ – пространственное разрешение коронографа, R_\odot – радиус Солнца. 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. 2 приведены результаты расчетов магнитного поля, полученные с использованием расчетов 3D-параметров ГКВМ. Круги – значения $B(R)$, полученные с помощью расчетов 3D-параметров

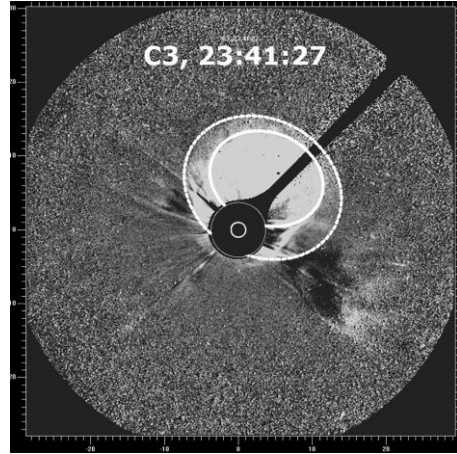


Рис. 1. ГКВМ, зарегистрированный 15.01.2005 г. (07:42:07). Белыми линиями показаны границы тела выброса массы (яркая внутренняя область) и ударной волны (граница внешней диффузной области).

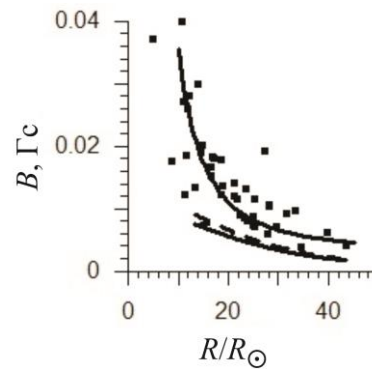


Рис. 2. Результаты расчетов магнитного поля, полученные с использованием расчетов 3D-параметров ГКВМ.

ГКВМ в разные моменты времени для каждого рассмотренного события. Жирная линия, пересекающая квадраты, – среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в горизонтальном участке медленно-го солнечного ветра [Fainshtein, 1991] в зависимости от расстояния: $B_r(R)=8 \cdot 10^{-5}(215.5/(R/R_\odot))^2+0.002$ (в Гс). Слагаемое 0.002 – корректирующая добавка для улучшения соответствия между $B_r(R)$ и рассеянием измеренных значений $B(R)$. Две линии ниже: расчеты поля в предположении, что приосевая область КВМ движется в быстром солнечном ветре (СВ), скорость которого независимо от расстояния $V_{sw}=600$ км/с (верхняя кривая) и 800 км/с (нижняя кривая), с зависимостью концентрации протонов от расстояния, характерной для быстрого СВ: $N_p=3(215.5/(R/R_\odot))^2$. Здесь приведены только линии регрессии. Из этого рисунка следует, что полученная зависимость $B(R)$ (круги) вполне удовлетворительно согласуется с ожидаемыми значениями магнитного поля в медленном СВ.

Рис. 3 иллюстрирует диапазон изменения основных параметров, которые использовались при нахождении величины магнитного поля с использованием данных ГКВМ.

В работе [Gopalswamy, Yashiro, 2011] неявно предполагалось, что приосевые участки всех КВМ, свойства которых использовались для нахождения величины магнитного поля, движутся в области медленного СВ.

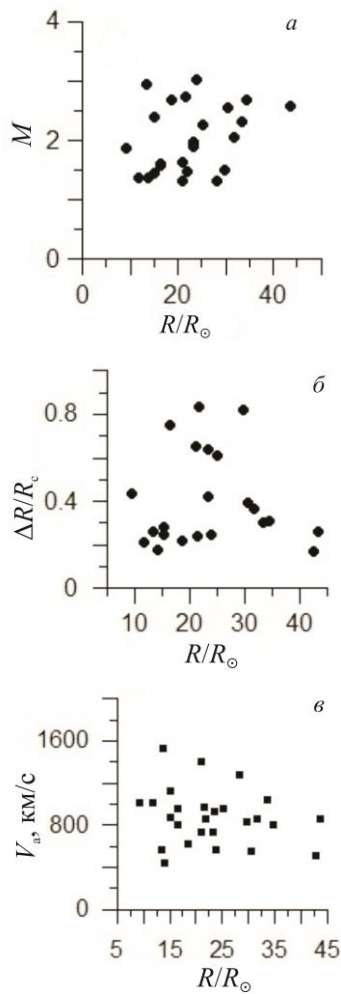


Рис. 3. Рассеяние значений альфвеновского числа Маха (а), параметра $\Delta R/R_c$ (б) и альфвеновской скорости (в) для рассмотренных событий в различные моменты времени.

Это следует из использовавшейся зависимости скорости СВ от расстояния из работы [Sheeley et al., 1997]. В действительности приосевая область некоторых КВМ движется в области быстрого СВ. В качестве примера проведем лимбовый КВМ, наблюдавшийся в поле зрения LASCO 29.06.2011 г. [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?date=20110629&img1=lasc2rdf]. Это означает, что прежде, чем находить значения магнитного поля методом [Gopalswamy, Yashiro, 2011], необходимо выяснить, в каком потоке СВ (быстром или медленном) движется ось выброса массы. В общем случае это требует разработки специальной

методики. Использование в качестве скорости быстрого СВ не зависящего от расстояния значения (см. рис. 2) – довольно грубое приближение. Получить зависимость $V_{sw}(R)$ можно, используя, например, модель равноускоренного движения СВ до $R \approx 20R_\odot$ и движение с постоянной (максимальной) скоростью при $R > 20R_\odot$. Максимальную скорость СВ можно оценить как скорость истечения СВ из соответствующей корональной дыры, опираясь на свойства этой дыры.

Авторы благодарны команде LASCO за возможность свободного использования данных коронографа. Работа выполнена при поддержке ГК № 02.740.11.0576 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. Lett.* 2011. V. 736. P. L17.
- 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. V. 136, N 1. P. 169–189.
- Kim R.-S., Gopalswamy N., Moon Y.-J., et al. Magnetic field strength in upper solar corona using white-light shock structures surrounding coronal mass ejections // *Astrophys. J.* 2012. V. 746. P. 118.
- Leblanc Y., Dulk G.A., Bougeret J.-L. Tracing the electron density from the corona to 1 au // *Solar Phys.* 1998. V. 183. P. 165.
- Mann G., Klassen A., Estel C., Thompson B.J. Coronal transient waves and coronal shock waves // 8th SOHO Workshop “Plasma Dynamics and Diagnostics in the Solar Transition Region and Corona”: Proc. of the Conference, Paris, France. 1999. P. 477.
- Russell C.T., Mulligan T. On the magnetosheath thicknesses of interplanetary coronal mass ejections // *Planet. Space Sci.* 2002. V. 50. P. 527.
- Sheeley N.R., Wang Y.-M., Hawley S.H., et al. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and 30 R_\odot // *Astrophys. J.* 1997. V. 484. P. 472.
- Xue X.H., Wang C.B., Dou X.K. An Ice Cream Cone Model for coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A08103.
- http://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?date=20110629&img1=lasc2rdf.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия