

УДК 523-98

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ SOHO/MDI В ОБЛАСТИ ВСПЫШЕК, СВЯЗАННЫХ С КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ ТИПА ГАЛО

Т.Е. Попова, В.Г. Файнштейн, Л.К. Кашапова

### EXAMINING THE MAGNETIC FIELD DYNAMICS FROM SOHO/MDI DATA IN THE REGION OF GENERATION OF HALO CORONAL MASS EJECTIONS AND THEIR ASSOCIATED FLARES

T.E. Popova, V.G. Fainshtein, L.K. Kashapova

По данным SOHO/MDI исследованы вариации магнитного поля в области вспышек, связанных с 20 самыми быстрыми (скорость  $V > 1500$  км/с), 11 умеренными ( $1000$  км/с  $< V < 1500$  км/с) и 20 медленными ( $V < 650$  км/с) корональными выбросами массы типа гало.

SOHO/MDI data have been used to examine magnetic field variations in the region of the flares which are associated with 20 fastest ( $V > 1500$  km/s), 11 moderate ( $1000$  km/s  $< V < 1500$  km/s) and 20 slow ( $V < 650$  km/s) halo coronal mass ejections.

#### Введение

Корональные выбросы массы типа гало (ГКВМ) [Howard et al., 1982] играют важную роль в формировании космической погоды. Именно их воздействие на магнитосферу Земли приводит к самым сильным геомагнитным бурям, что является одним из стимулов к изучению таких выбросов. Чтобы выявить физические механизмы генерации ГКВМ, важно получить ответ на вопрос: что происходит с магнитным полем в области возникновения таких корональных выбросов до их появления и после. Это связано с тем, что, согласно преобладающей сегодня точке зрения, корональные выбросы массы возникают в результате нарушения магнитного равновесия в структурах короны, а энергия выбросов черпается из энергии магнитного поля [Mikic, Lee, 2006]. В то же время точно определить место возникновения ГКВМ часто затруднительно. И здесь следует учесть, что многие корональные выбросы массы связаны со вспышками (т. е. эти два явления возникают в близкие моменты времени и места их появления близки пространственно), положение которых легко определяется. Поэтому на первом этапе изучение вариаций магнитного поля в связи с возникновением ГКВМ можно свести к изучению вариаций фотосферного поля в области солнечных вспышек, связанных с ГКВМ.

Исследованию изменений фотосферного магнитного поля в области солнечных вспышек посвящено много работ (см., например, [Зверева, Северный, 1970; Kosovichev, Zharkova, 2001; Wang et al., 2002; Sudol, Harvey, 2005; Zhang et al., 2008; Petrie, Sudol, 2010] и цитируемую там литературу). Тем не менее многие аспекты изменения магнитного поля в области вспышек, связанных с КВМ, остаются невыясненными. Целью настоящей работы является исследование свойств фотосферного магнитного поля по данным SOHO/MDI в области и в ближайшей окрестности солнечных вспышек, связанных с ГКВМ, до начала этих вспышек и после.

#### Данные и методы исследования

Для исследования свойств магнитного поля в области связанных с ГКВМ вспышек по данным каталога [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/halo/halo.html] были отобраны три группы ГКВМ: самые быстрые со скоростью  $V > 1500$  км/с, с промежуточной скоро-

стью  $1500 > V > 1000$  (только связанные со вспышками рентгеновского класса X) и самые медленные ( $V < 650$  км/с). При этом анализировались ГКВМ, связанные со вспышками, центры которых располагались по долготе в диапазоне  $15^\circ$  E– $45^\circ$  W. Таких событий в этих группах оказалось 20, 16 и 20.

Магнитные поля определялись по данным инструмента SOHO/MDI. Использовались калиброванные магнитограммы полного диска с уровнем 1.8 с интервалом между соседними магнитограммами 96 и 1 мин [ftp://soi-ftp.stanford.edu/]. Угловое разрешение на этих магнитограммах составляет 4". Уровень шума на пиксель составляет 15 Гс для 96-минутных магнитограмм и 30 Гс для 1-минутных магнитограмм [http://soi.stanford.edu/magnetic/Lev1.8/]. Параметры магнитного поля усреднялись в пределах «квадрата» на поверхности Солнца размером  $N$  пикселей по широте и  $N$  пикселей по долготе, центр которого помещался в центр вспышки в момент вспышки. В другие моменты времени положение «квадрата» определялось с учетом дифференциального вращения Солнца. Анализ свойств магнитного поля проводился для  $N=10, 20, 30, 40, 100$  пикселей. В данной работе приводятся результаты для  $N=20$  пикселей. Для анализа использовались следующие параметры измеряемого поля:  $\langle B_l \rangle$  («разбаланс» поля),  $\langle |B_l| \rangle$ . Здесь скобки  $\langle \rangle$  означают усреднение величины внутри скобок по площади «квадрата»,  $B_l$  – измеряемая по лучу зрения компонента магнитного поля. При этом усреднение производилось для полей с  $|B_l| > 100, 500$  и  $800$  Гс. При анализе быстрых изменений магнитного поля в области вспышки по данным MDI с минутным разрешением поведение характеристик магнитного поля сравнивалось с изменением со временем интенсивности  $I_X(t)$  мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн  $1-8 \text{ \AA}$  по данным космического аппарата GOES [http://goes.ngdc.noaa.gov/data/].

#### Результаты

На рис. 1, *a-e* показаны изменения  $|B_l|$  и  $\langle |B_l| \rangle$  со временем по данным с 96-минутным разрешением до начала вспышки ( $t=0$  на графиках) и после ее начала, полученные методом наложенных эпох. Видно, что для двух групп анализируемых ГКВМ в среднем обе характеристики магнитного поля растут в течение более 32 ч до момента вспышки, затем в

течение такого же времени уменьшаются. Заметим, что аналогичный результат для трех вспышек был получен в работе [Зверева, Северный, 1970], но там использовались измерения магнитного поля, проводившиеся раз в сутки. В работе [Zhang et al., 2008] на основе анализа данных MDI был сделан вывод, что в активной области, где возникает выброс, в 60 % рассмотренных случаев появлению ГКВМ в течение 12 ч предшествует рост магнитного потока, в 40 % – уменьшение. В нашей работе сделан, насколько нам известно, самый детальный анализ изменения  $\langle B_l \rangle$  и  $\langle |B_l| \rangle$  в области солнечных вспышек, связанных с корональными выбросами массы, на временном интервале более суток.

В некоторых конкретных событиях изменение анализируемых компонент поля отличается от изменений, приведенных на рис. 1. Приведем результаты статистического анализа поведения характеристик фотосферного магнитного поля в области вспышек, связанных с ГКВМ, на временном масштабе 4–5 сут.

1. Для 80 % быстрых ГКВМ, 50 % ГКВМ с промежуточными скоростями и 72 % медленных ГКВМ началу связанных с ними вспышек в течение 0.2–1.5 сут предшествует немонотонный рост  $\langle B_l \rangle$  и/или  $\langle |B_l| \rangle$  или слабое изменение этих параметров поля, в остальных случаях происходит уменьшение параметров поля.

2. Вспышки в 19 из 20 событий с самыми быстрыми ГКВМ происходят, когда  $\langle B_l \rangle$  превышает 140 Гс, а  $\langle |B_l| \rangle$  – 170 Гс. Средние по таким событиям значения  $\langle B_l \rangle$  и  $\langle |B_l| \rangle$  в момент вспышки равны соответственно 487 Гс и 617 Гс.

3. Для событий со скоростью ГКВМ  $1000 < V < 1500$  км/с эти числа равны 100 (14 из 16 КВМ), 210 (14 из 16 КВМ), 279 и 514 Гс. Для событий с самыми медленными ГКВМ значения этих параметров равны 60 (17 из 19 КВМ), 206 (19 из 20 КВМ), 170 и 322 Гс соответственно. Отсюда следует, что необходимым условием возникновения солнечной вспышки, связанной с ГКВМ, является превышение в области вспышки «разбалансом» магнитного поля и средним модулем поля граничных значений, зависящих от скорости ГКВМ. В тех случаях, когда  $\langle B_l \rangle$  и  $\langle |B_l| \rangle$  в области вспышки меньше граничных значений, эти параметры растут до начала вспышки, в противном случае они до начала вспышки могут не меняться или уменьшаться со временем. Заметим, что эти величины меняются при использовании других размеров «квадрата», в котором усредняются параметры поля.

Вариации магнитного поля в области вспышки по данным MDI с временным разрешением 1 мин были исследованы только для событий с самыми быстрыми ГКВМ. Событий, для которых были такие данные, оказалось 9. На рис. 2, а–г приведены примеры быстрых изменений  $\langle B_l \rangle$  и  $\langle |B_l| \rangle$  после начала вспышки для события 28.10.2003 г. Первый тип вариаций параметров поля наблюдался в «квадрате», центр которого совпадал с центром вспышки, второй тип был зарегистрирован в «квадрате», центр которого смещен на  $3^\circ$  к северу. Ранее такого рода быстрые вариации параметров поля в области вспышек уже наблюдались (см. цитированную литературу во введении). В то же время мы зарегистрировали более широкий спектр быстрых изменений поля

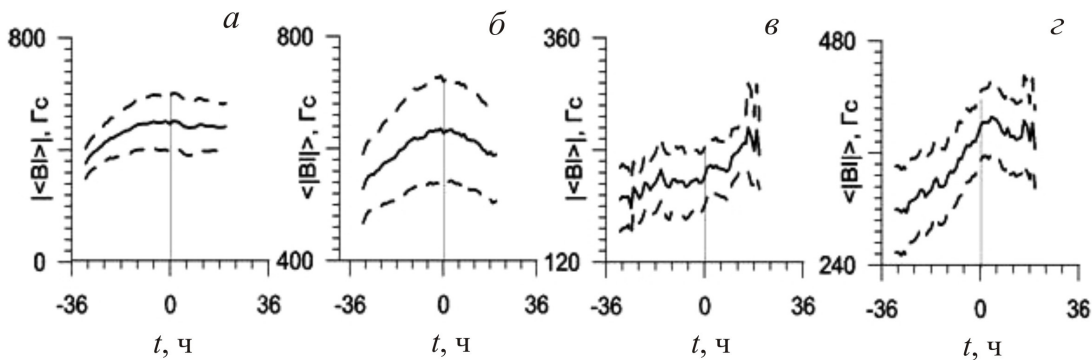


Рис. 1. Изменения  $\langle B_l \rangle$  и  $\langle |B_l| \rangle$  со временем в области вспышки по данным с 96-минутным разрешением до начала вспышки ( $t=0$  на графиках) и после ее начала, полученные методом наложенных эпох:  $V > 1500$  км/с (а, з);  $100 < V < 1500$  км/с (б, д);  $V < 650$  км/с (в, е).

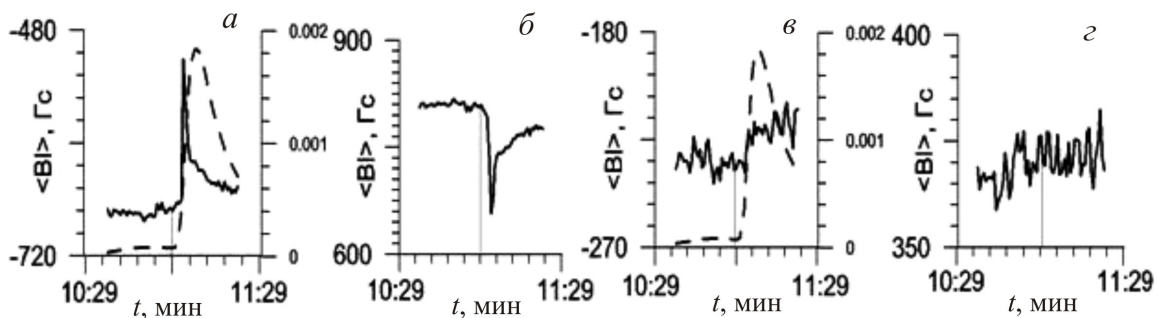


Рис. 2. Примеры быстрых изменений  $\langle B_l \rangle$  и  $\langle |B_l| \rangle$  после начала вспышки (показано тонкой вертикальной линией) для события 28.10.2003 г.: импульсное (а, б) и ступенчатое (в, з). В первом случае координаты центра «квадрата» усреднения S16E08, во втором случае – S13E08. Пунктиром показано изменение со временем интенсивности мягкого рентгеновского излучения по данным GOES.

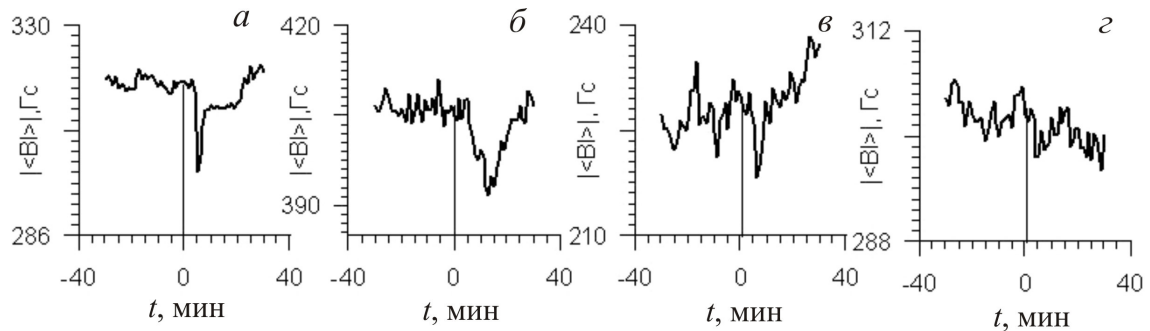


Рис. 3. Изменения со временем «разбаланса» поля, полученные методом наложенных эпох ( $t=0$  – начало вспышки), для области центра вспышки (а) и областей, смещенных в различные стороны на  $\sim 3^\circ$  (б–г).

после начала вспышки (рис. 3). Сравнение быстрых изменений параметров поля с временным ходом  $I_X(t)$  свидетельствует о близости длительности изменений магнитного поля и времени нарастания интенсивности мягкого рентгеновского излучения до максимального значения.

На рис. 3, а–г приведены изменения со временем «разбаланса» поля, полученные методом наложенных эпох, для области центра вспышки (а) и областей, смещенных в различные стороны на  $\sim 3^\circ$  (б–г). Наш анализ показал, что при дальнейшем смещении от центра вспышки практически не наблюдается заметных изменений параметров магнитного поля после начала вспышки. Приведем некоторые обобщающие выводы нашего исследования быстрых вариаций магнитного поля в области вспышек, связанных с ГКВМ.

1. Начало мощных вспышек, связанных с самыми быстрыми ГКВМ, сопровождается быстрыми (с масштабом от нескольких минут) изменениями  $\langle |B| \rangle$  и  $\langle |B| \rangle$  в области вспышки и в ее ближайшей окрестности.

2. Временной ход «разбаланса» и модуля поля в одном и том же месте может иметь один и тот же вид (рис. 3, в, г)).

3. В деталях временной ход «разбаланса» поля может различаться для поля с  $|B| > 100$  и 500 Гс.

4. Усредненный ход модуля поля со временем после начала вспышки в области вспышки и в ее ближайшей окрестности подтверждает представление о том, что энергия вспышки черпается из энергии

магнитного поля.

5. Часть активной области с наиболее сильными изменениями  $\langle |B| \rangle$  и  $\langle |B| \rangle$  сконцентрирована в окрестности центра вспышки размером примерно  $4.5^\circ$  от центра вспышки. Мы также получили первые результаты, связывающие свойства поля в области вспышек и параметры ГКВМ. Из рис. 4 следует, что существует положительная корреляция между скоростью ГКВМ и  $\langle |B| \rangle$  в момент вспышки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зверева А.М., Северный А.Б. Магнитное поле и протонные вспышки 7 июля и 2 сентября 1966 г. // Изв. КрАО. 1970. Т. XLI–XLII. С. 97–157.

Howard R.A., Michels D.J., Sheeley N.R.Jr., Koomen M.J. The observation of a coronal transient directed at earth // Astrophys. J. 1982. V. 263. P. L101–L104.

Kosovichev A.G., Zharkova V.V. Magnetic energy release and transients in the solar flare of 2000 July 14 // Astrophys. J. 2001. V. 550. P. 105.

Mikic Z., Lee M.A. An introduction to theory and models of CMEs, shocks, and solar energetic particles // Space Sci. Rev. 2006. V. 123, Iss 1–3. P. 57–80.

Petrie G.J.D., Sudol J.J. Abrupt longitudinal magnetic field changes in flaring active regions // Astrophys. J. 2010. V. 724. P. 1218.

Sudol J.J., Harvey J.W. Longitudinal magnetic field changes accompanying solar flares // Ibid. 2005. V. 635. P. 647.

Wang H., Spirock T.J., Qiu J., et al. Rapid changes of magnetic fields associated with six X-class flares // Ibid. 2002. V. 576. P. 497.

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

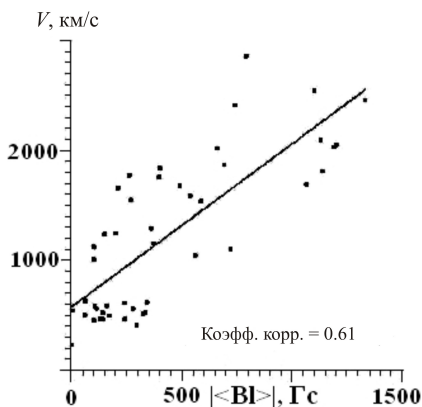


Рис. 4. Связь между скоростью ГКВМ и «разбалансом» поля в области связанной с ГКВМ вспышки в момент ее начала.