

НОВЫЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПЦИЙ

¹И.М. Черток, ²В.В. Гречнев, ¹А.В. Белов, ¹А.А. Абуни

A NEW APPROACH TO THE DIAGNOSTICS OF GEOEFFECTIVENESS OF SOLAR ERUPTIONS

¹I.M. Chertok, ²V.V. Grechnev, ¹A.V. Belov, ¹A.A. Abunin

На материале 23-го цикла показано, что имеет место тесная статистическая связь между количественными параметрами диммингов и аркад, вызываемых солнечными корональными выбросами (СМЕ), с одной стороны и величиной нерекуррентных форбуш-понижений, а также временем распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли – с другой.

By data of the 23rd cycle, it is shown that close statistical relations exist between quantitative parameters of dimmings and arcades caused by coronal mass ejections (CMEs), on the one hand, and values of non-recurrent Forbush-decreases of the background cosmic ray flux, as well as the propagation time of disturbances from the Sun to the Earth, on the other hand.

Введение

Одной из основных и наиболее важных задач солнечно-земной физики и прогнозирования космической погоды является диагностика геоэффективности корональных выбросов (СМЕ/ICMEs), т. е. заблаговременная оценка их способности вызывать нерекуррентные геомагнитные бури (ГМБ) и форбуш-понижения (ФП). Существующие алгоритмы такой диагностики опираются в основном на данные о скорости, угловых размерах и форме СМЕ в картинной плоскости коронографа SOHO/LASCO (см., например, [Gopalswamy et al., 2001; Michalek et al., 2008; Kim et al., 2007]). Мы предложили и реализовали принципиально новый подход к ранней диагностике геоэффективности солнечных эрупций. В качестве основного исходного параметра взят количественный параметр, непосредственно характеризующий мощность самой эрупции, – суммарный магнитный поток диммингов и постэруптивных (ПЭ) аркад продольного поля на уровне фотосферы (Ф). Идея такого метода была предложена в работе [Черток, Гречнев, 2006] и развита в работе [Chertok et al., 2013]. Димминги представляют собой крупномасштабные области пониженной яркости крайнего ультрафиолетового (КУФ) и мягкого рентгеновского излучения, возникающие в короне в результате коронального выброса и имеющие время жизни несколько часов (см., например, [Nitta et al., 2011]). Увеличивающиеся в размерах ПЭ-аркады ярких петель образуются на месте располагавшегося до эрупции магнитного жгута, выброшенного в виде СМЕ [Hudson, Cliver, 2001]. В целом димминги и ПЭ-аркады визуализируют крупномасштабные структуры, вовлеченные в процесс эрупции СМЕ. Это дает основание полагать, что их количественные параметры, в частности магнитные потоки, могут быть полезными для ранних оценок геоэффективности соответствующих ICMEs.

На рис. 1 представлены разностные изображения КУФ-телескопа SOHO/EIT в канале 195 Å, на которых видны темные димминги и яркие аркады в эруптивных источниках самых глубоких ФП 23-го цикла солнечной активности. До сих пор в аспекте космической погоды димминги и аркады использовались в основном как качественный индикатор, который показывал, в каком направлении распространяются ICMEs в межпланетном пространстве:

движется ли выброс к Земле, или эрупция произошла на обратной стороне солнечного диска. В данной работе предлагается и анализируется количественный параметр, характеризующий мощность корональных выбросов по наблюдениям диммингов и аркад.

Данные и методика

Для оценки параметров аркад и диммингов анализировались изображения Солнца в канале 195 Å, полученные на космическом телескопе КУФ-диапазона SOHO/EIT [Delaboudiniere et al., 1995]. Солнечное вращение в анализируемых изображениях компенсировалось, и затем из каждого из них вычитался фиксированный кадр до события. В большинстве случаев охватывалось 3–4 ч с начала эрупции. За это время основные димминги и аркады уже полностью формируются, а эволюционных, не относящихся к делу структур такого рода обычно бывает немного.

Обработка данных выполнялась разработанной для этой цели программой IDL, с помощью которой производятся:

- калибровка исходных fits-файлов EIT;
- компенсация солнечного вращения и формирование разностных изображений;
- выделение диммингов и ПЭ-аркады, образующихся в области эрупции анализируемого СМЕ;
- измерение по выбранным критериям площадей и потоков излучения (суммарной яркости) в областях диммингов и аркад;
- совмещение полученных изображений диммингов и аркад с магнитограммами SOHO/MDI [Scherrer et al., 1995] и вычисление магнитных потоков на фотосфере, соответствующих этим образованиям.

На первом этапе проанализированы около 70 крупных событий 23-го цикла (1997–2008 гг.), в которых, по данным CDAW [Zhang, 2007], наряду с ФП имели место геомагнитные бури с индексом $|D_{st}| > 100$ нТл, с большой долей вероятности отождествленные с эрупцией конкретных СМЕs из центральной зоны видимой полусферы Солнца в пределах $\pm 45^\circ$ от центрального меридиана. Большинство этих эрупций происходило в активных областях, но некоторая часть событий была связана с эрупцией волокон вне активных областей. В ходе рассмотрения производились проверка и некоторые уточнения привязки геомагнитных бурь (ФП) к соответствующим источникам.

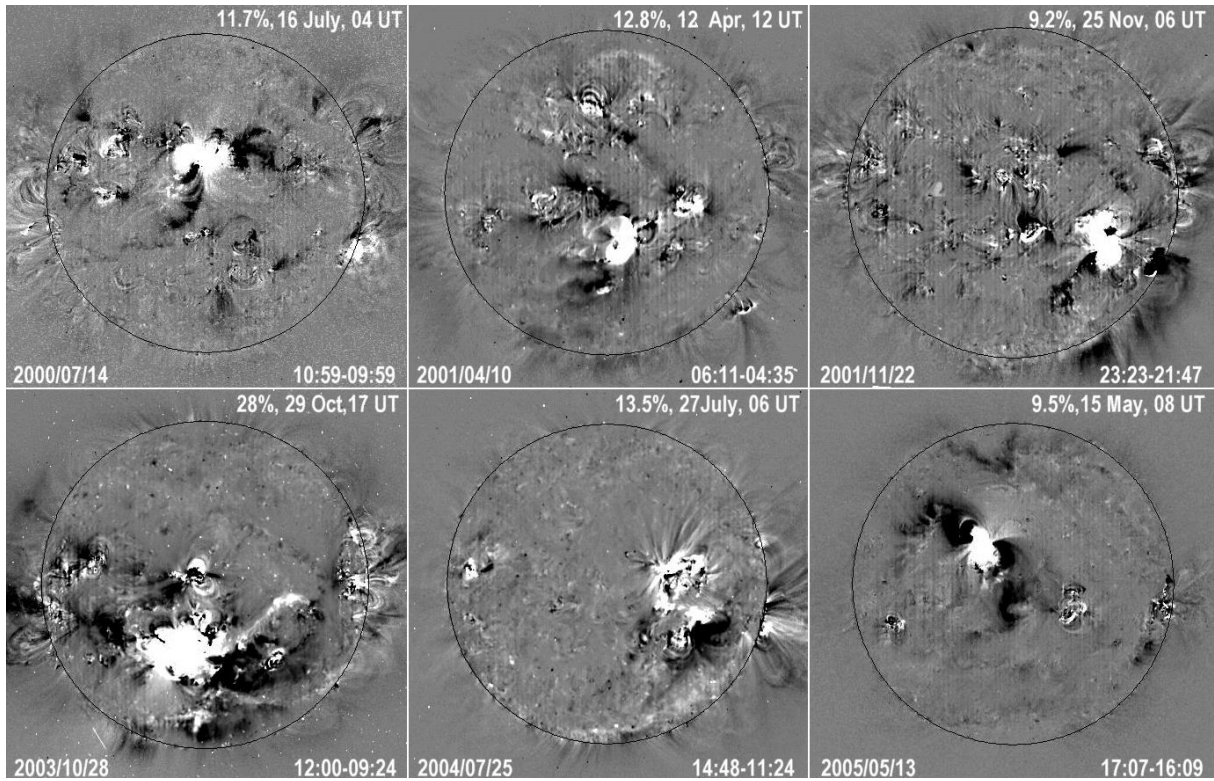


Рис. 1. Димминги и постэруптивные аркады в источниках крупнейших форбуш-понижений 23-го цикла солнечной активности.

Обсуждение результатов

Чтобы оценить информативность суммарного магнитного потока диммингов и аркад Φ , анализировалась его взаимосвязь с величиной ФП (A_F), поскольку плотность КЛ не зависит от знака B_z -компоненты магнитного поля в ICMEs, в отличие от величины ГМБ. На рис. 2 показаны зависимости величины ФП A_F от суммарного магнитного потока диммингов и аркад Φ для разных групп событий. Здесь и далее все события являются однозначно отождествленными и одиночными и делятся на два типа: произошедшие в АО (■) и произошедшие вне АО (▲). Из рисунка видно, что для данных событий имеет место вполне определенная линейная зависимость A_F от Φ . В аналитическом виде эта зависимость выглядит следующим образом:

$$A_F [\%] = -0.3 + 0.03\Phi.$$

Коэффициент корреляции между A_F и Φ достигает $r \approx 0.94$. Из рис. 2 видно, что события, связанные с эрупцией волокон вне АО (▲ и △), характеризуются небольшими значениями магнитного потока ($\Phi < 75 \cdot 10^{20}$ Мкс) и сосредоточены в основном в области небольших величин ФП. Очевидно, причина этого заключается в том, что такие эрупции происходят в слабых магнитных полях.

Описанная зависимость величины ФП от суммарного магнитного потока диммингов и аркад дает основания ожидать аналогичную зависимость между интенсивностью ГМБ (D_{st}) и эруптивным магнитным потоком Φ (рис. 3). При этом рассматривались по данным CDAW: интенсивные ГМБ, в которых заведомо присутствовала отрицательная B_z -компонента. Выяснилось, что даже при простом

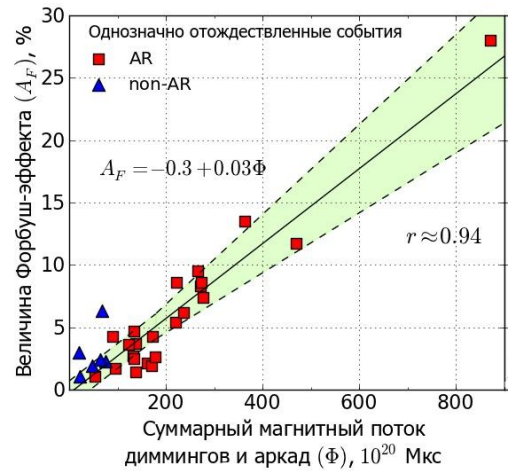


Рис. 2. Зависимость величины форбуш-понижения (A_F) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад (Φ) на уровне фотосферы.

анализе (без дополнительного учета факторов, определяющих B_z) наблюдается отчетливая зависимость величины D_{st} -индекса от эруптивного параметра Φ . Чем больше величина суммарного магнитного потока диммингов и аркад, тем интенсивнее соответствующая ГМБ. В аналитическом виде эта зависимость выглядит как

$$D_{st} [\text{нТл}] = 30 - 13\sqrt{\Phi + 5.3}.$$

Коэффициент корреляции между наблюдаемыми величинами D_{st} и рассчитанными по формуле достигает $r \approx 0.67$.

Используя эруптивный магнитный поток Φ , можно также оценить транзитные времена и, следо-

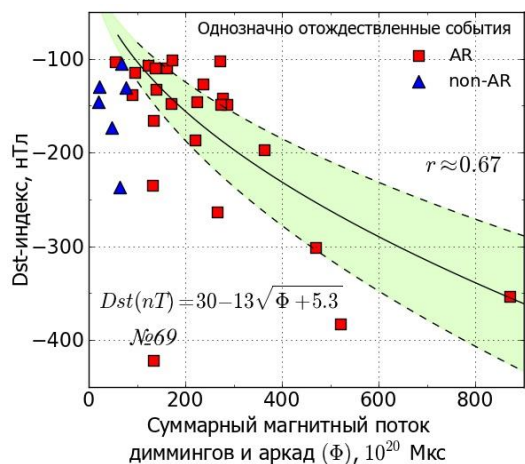


Рис. 3. Зависимость интенсивности геомагнитной бури (D_{st}) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы (Φ). Все события взяты из каталога CDAW.

вательно, транзитную скорость ICMEs. В данной работе исследовались два транзитных времени: время начала возмущения (ΔT_0) и время пика ГМБ (ΔT_p). Транзитные времена отсчитываются от момента максимума соответствующей вспышки в мягком рентгене.

В ходе анализа выявилась отчетливая связь между эруптивным параметром Φ и транзитным временем начала ΔT_0 и пика ΔT_p соответствующих возмущений:

$$\Delta T_0 [ч] = 98 / (1 + 0.0044 \Phi),$$

$$\Delta T_p [ч] = 118 / (1 + 0.0044 \Phi).$$

Коэффициент корреляции для транзитного времени начала возмущения составляет $r \approx 0.84$, для транзитного времени пика ГМБ – $r \approx 0.81$.

Таким образом, результаты настоящего анализа дают инструмент для диагностики геоэффективности солнечных эрупций и краткосрочного прогнозирования нерекуррентных возмущений космической погоды. По изображениям КУФ-диапазона и магнитограммам солнечного диска можно определять количественные параметры диммингов, включая их суммарный магнитный поток на уровне фотосферы, и по нему с заблаговременностью от 1 до 4 сут оценивать ожидаемые величину и время начала ФП и геомагнитных бурь.

Авторы благодарны коллективам SOHO/EIT и MDI, а также CDAW за данные, использованные при анализе. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 09-02-00115, 11-02-00757, 12-02-00037), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 22, интеграционного проекта СО РАН № 4, гранта Минобрнауки РФ по госконтракту 16.518.11.7065.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Черток И.М., Гречнев В.В. Корональные выбросы массы в аспекте космической погоды. II. Ультрафиолетовые димминги и геомагнитные бури // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70, № 10. С. 1498–1500.

Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A. Magnetic flux of EUV arcade and dimming regions as a relevant parameter for early diagnostics of solar eruptions – sources of non-recurrent geomagnetic storms and Forbush decreases // Solar Phys. 2013. V. 282. P. 175–199.

Delaboudiniere J.-P., Artzner G.E., Brunaud J., et al. EIT: extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO mission // Ibid. 1995. V. 162. P. 291–312.

Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S., et al. Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 29207–29218.

Harra L.K., Mandrini C.H., Dasso S., et al. Determining the solar source of a magnetic cloud using a velocity difference technique // Solar Phys. 2011. V. 268. P. 213–230.

Hudson H.S., Cliver E.W. Observing coronal mass ejections without coronagraphs // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 25199–25214.

Kim K.-H., Moon Y.-J., Cho K.-S. Prediction of the 1-AU arrival times of CME-associated interplanetary shocks: Evaluation of an empirical interplanetary shock propagation model // Ibid. 2007. V. 112. A05104. doi:10.1029/2006JA011904.

Michalek G., Gopalswamy N., Yashiro S. Space weather application using projected velocity asymmetry of halo CMEs // Solar Phys. 2008. V. 248. P. 113–123.

Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I., et al. The solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager // Ibid. 1995. V. 162. P. 129–188.

Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F., et al. Correction to “Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($D_{st} \leq -100$ nT) during 1996–2005” // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A12103. doi:10.1029/2007JA012891.

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия