ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2011, том 75, № 6, с. 845–847

УДК 523.985-125

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ ОТ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПЦИЙ

© 2011 г. И. М. Черток[1], А. В. Белов[1], В. В. Гречнев[2]

E-mail: ichertok@izmiran.ru

По материалам 23-го солнечного цикла показано, что имеет место тесная статистическая связь между количественными параметрами диммингов и аркад, вызываемых солнечными корональными выбросами (CMEs), с одной стороны, и величиной нерекуррентных форбуш-понижений потока галактических космических лучей, а также временем распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли – с другой. Параметры диммингов и аркад, в частности их суммарный магнитный поток продольного поля на уровне фотосферы, определялись по данным телескопа крайнего ультрафиолетового диапазона SOHO/EIT в канале 195 Å и магнитограммам SOHO/MDI. Полученные результаты означают, что характеристики и время распространения межпланетных возмущений до Земли в значительной мере определяются измеряемыми параметрами солнечных эрупций и могут оцениваться заблаговременно по наблюдениям диммингов и аркад в крайнем УФ-диапазоне.

ВВЕДЕНИЕ

Нерекуррентные возмущения космической погоды в виде геомагнитных бурь и форбуш-понижений (ФП) потока галактических космических лучей вызываются солнечными выбросами (coronal mass ejections; CMEs), которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные облака (ICMEs) (см., например, [1, 2]). Эрупция крупных CMEs на Солнце сопровождается формированием постэруптивных (ПЭ) аркад и диммингов (рис. 1). Увеличивающиеся в размерах аркады ярких петель образуются на месте располагавшегося до эрупции магнитного жгута, выброшенного в виде CME. Диминги (или транзиентные, т.е. временные, корональные дыры) – это крупномасштабные области пониженной яркости крайнего УФ (КУФ) и мягкого рентгеновского излучения, которые возникают в короне в результате коронального выброса и отождествляются с основаниями эруптировавших магнитных структур. В качестве основной предпосылки принято, что диминги и ПЭ-аркады визуализируют корональные структуры, вовлеченные в CMEs.

До сих пор в аспекте космической погоды использовалась только качественная информация о диммингах и аркадах как средство выделения CMEs, образующихся в результате эрупции на видимом солнечном диске. Между тем, исходя из природы диммингов и аркад, можно ожидать статистическую связь их количественных параметров с интенсивностью геомагнитных бурь и ФП [3]. Анализ такой связи логично начать именно с ФП, поскольку интенсивность геомагнитных бурь зависит от величины и знака B_z-компоненты магнитного поля в ICMEs, а глубина ФП не зависит от знака B_z и определяется напряженностью магнитного поля в облаке, а также его скоростью и размерами [4]. В данной статье представлены предварительные результаты сопоставления величин ФП, вызываемых CMEs/ICMEs, с количественными параметрами соответствующих диммингов и аркад, а также результаты анализа связи между этими параметрами и временем распространения межпланетных облаков от Солнца до Земли (так называемым транзитным временем).

1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Для оценки параметров аркад и диммингов анализировались изображения Солнца в канале 195 Å (преобладающая линия Fe XII, характеристическая температура 1.3 МК), полученные на космическом телескопе КУФ диапазона SOHO/EIT [5]. Обработ-

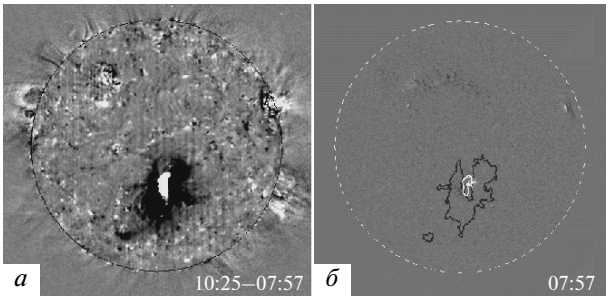

Рис. 1. Эрупция 3 апреля 2010 г.: *а* – разностное изображение Солнца в канале 195 Å с диммингами (темные области) и ПЭ-аркадой (яркая структура); *б* – контуры выделенных диммингов и аркады на фоне магнитограммы MDI.

[1] Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк.

[2] Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, Иркутск.

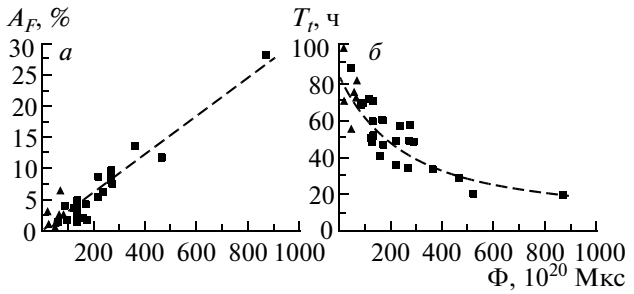

Рис. 2. Зависимость величины форбуш-понижения (A_F) (*а*) и транзитного времени (T_t) (*б*) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы (Ф) для одиночных событий, уверенно отождествленных с конкретной солнечной эрупцией из центрального сектора солнечного диска. Квадраты относятся к эрупциям в активных областях, треугольники – к эрупциям волокон вне активных областей.

ка данных выполнялась разработанной для этой цели программой IDL, с помощью которой проводятся: калибровка исходных FITS-файлов EIT; компенсация солнечного вращения и формирование разностных изображений [6]; выделение диммингов и ПЭ-аркад, образующихся в области эрупции анализируемого CME; 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 [7] и вычисление магнитных потоков на фотосфере, соответствующих этим образованиям. В ходе анализа выявлены пороги относительных изменений яркости, оптимальные для оценки параметров диммингов и аркад. Критерием выделения существенных диммингов считалось снижение яркости вследствие эрупции более чем на 40%. Для ПЭ-аркад оптимальным оказался критерий, выделяющий площадку над центром эрупции, в которой яркость КУФ-излучения превышает 5% от максимальной в данный момент времени.

На первом этапе проанализированы около 70 крупных событий 23-го цикла (1997–2008 гг.), в которых, по данным Coordinated Data Analysis Workshop (CDAW; см. [8]), наряду с ФП имели место геомагнитные бури с индексом $|\mathrm{Dst}| > 100$ нТл, с большой долей вероятности отождествленные с эрупцией конкретных CMEs из центральной зоны видимой полусферы Солнца в пределах ±45° от центрального меридиана. Большинство этих эрупций происходило в активных областях, но некоторая часть событий была связана с эрупцией волокон вне активных областей. В качестве характеристики ФП принималась его максимальная величина, соответствующая жесткости 10 ГВ, которая определялась по данным мировой сети станций с использованием метода глобальной съемки [9, 10].

2. ВЕЛИЧИНА ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ И ТРАНЗИТНОЕ ВРЕМЯ

Наиболее информативным для данного анализа параметром диммингов и аркад является их суммарный магнитный поток продольного поля на уровне фотосферы (Ф). Результаты его сопоставления с величиной ФП (A_F) представлены на рис. 2*а*. Видно, что для надежно отождествленных событий имеет место вполне определенная зависимость величины ФП от суммарного магнитного потока диммингов и аркад. При увеличении Ф от $3 \cdot 10^{21}$ до 10^{23} Мкс ожидаемая амплитуда ФП A_F возрастает от 0.8 до 30%. Коэффициент корреляции между Ф и A_F составляет 0.94. Зависимость между суммарным магнитным потоком диммингов и аркад и величиной ФП описывается следующим соотношением линейной регрессии: $A_F(\%) = -0.08 + 0.03\Phi$ (10^{20} Мкс).

Как показал настоящий анализ, параметры диммингов и аркад, в том числе суммарный магнитный поток продольного поля на уровне фотосферы Ф, содержат информацию и о скорости эруптировавших CMEs и, следовательно, о транзитном времени распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли. В данном случае транзитное время (T_t) рассчитывалось как интервал между моментом максимума мягкого рентгеновского всплеска, связанного с рассматриваемой эрупцией, и временем прихода к Земле соответствующей ударной волны, которое определялось в том числе по внезапному началу геомагнитной бури (SC). Рисунок 2*б* демонстрирует отчетливую связь между суммарным магнитным потоком Ф и транзитным временем T_t, которая имеет место для одиночных, надежно отождествленных событий. При увеличении Ф в интервале $(30–300) \cdot 10^{20}$ Мкс T_t резко уменьшается в среднем от 75 до 40 ч. При дальнейшем росте магнитного потока транзитное время продолжает постепенно уменьшаться и при самых больших ожидаемых значениях магнитного потока $\Phi \approx 10^{23}$ Мкс достигает $T_t \approx 18–20$ ч. В целом зависимость между Ф и T_t может быть описана следующим соотношением (штриховая линия на рис. 2*б*): T_t (ч) $= 85/(1+ 0.004\Phi)$, здесь Ф в 10^{20} Мкс. При этом коэффициент корреляции между расчетными и наблюдаемыми величинами T_t составляет 0.73. Тот факт, что между T_t и Ф имеет место вполне определенная зависимость, позволяет заключить, что при сопоставлении величины ФП с магнитным потоком диммингов и аркад нет необходимости привлекать дополнительную информацию о скорости CME/ICMEs. Заметим, что события, связанные с эрупцией волокон вне активных областей (треугольники на рис. 2), характеризуются небольшими значениями магнитного потока и сосредоточены в основном в области небольших величин ФП и больших транзитных времен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты показывают, что величина нерекуррентных ФП и транзитное время распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли в значительной степени определяются характером и параметрами солнечных эрупций. Оказывается, что и величина ФП, и транзитное время тесно связаны, в частности, с таким комплексным параметром диммингов и ПЭ-аркад, как их суммарный магнитный поток на уровне фотосферы. Эти результаты важны для понимания природы солнечных эрупций и их межпланетных и геофизических последствий. Зависимость транзитного времени от эруптивного потока, конечно, применима не только к ФП, но и к другим нерекуррентным возмущениям космической погоды, в частности к геомагнитным бурям. Это подтверждается уже проведенным предварительным анализом, результаты которого будут опубликованы отдельно.

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 и ПЭ-аркад, 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. Следует только иметь в виду, что приведенные здесь зависимости получены по значительным эрупциям, с которыми были связаны геомагнитные бури с индексом $|\mathrm{Dst}| > 100$ нТл.

В качестве эксперимента такое краткосрочное прогнозирование возмущений космической погоды по результатам диагностики солнечных эрупций проводилось в 2010 г. в реальном времени в Центре прогнозов космической погоды ИЗМИРАН. Были рассмотрены эрупции начавшегося 24-го цикла из центральной зоны солнечного диска. По параметрам диммингов и аркад большинство из них были относительно небольшими и, согласно оценкам, должны были приводить к довольно слабым возмущениям космической погоды, что и подтвердилось. Одна из самых крупных эрупций 2010 г. произошла 3 апреля. На рис. 1 показаны димминги и аркада, наблюдавшиеся именно в этой эрупции. Суммарный магнитный поток в данном случае был $\Phi \approx 1.1 \cdot 10^{22}$ Мкс. Такому потоку соответствуют ожидаемое транзитное время $T_t \approx 59$ ч, значение ФП $A_F \approx 3\%$ и интенсивность геомагнитной бури Dst ≈ -90 нТл. Реально наблюдавшиеся значения оказались достаточно близкими к прогнозировавшимся: $T_t \approx 47$ ч, $A_F \approx 2.9\%$, Dst ≈ -73 нТл. Примерно такое же совпадение ожидаемых и наблюдаемых величин T_t, A_F и Dst получилось при диагностике другой крупной эрупции из центрального сектора солнечного диска, которая произошла 1 августа 2010 г.

Авторы благодарны коллективам SOHO EIT и MDI, а также CDAW за данные, использованные при анализе (SOHO – проект международного сотрудничества ESA и NASA). Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-02-00115) и программ фундаментальных исследований РАН “Плазменная гелиофизика” и “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bothmer V., Zhukov A.* // Space Weather – Physics and Effects / Ed. Bothmer V., Daglis I.A. Berlin: Springer, 2007. P. 31.
2. *Gopalswamy N.* // Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium / Ed. Tsuda T., Fujii R., Shibata K., Geller M.A. TERRAPUB, Tokyo, 2009. P. 77.
3. *Черток И.М., Гречнев В.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. № 10. С. 1498.
4. *Belov A.V.* // Proc. IAU Symp. No. 257. Universal Heliophysical Processes. 2009. P. 439.
5. *Delaboudiniére J.-P., Artzner G.E., Brunaud J. et al.* // Solar Phys. 1995. V. 162. P. 291.
6. *Chertok I.M., Grechnev V.V.* // Solar Phys. 2005. V. 229. P. 95.
7. *Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I. et al.* // Solar Phys. 1995. V. 162. P. 129.
8. *Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al.* // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, A12103, doi: 10.1029/2007JA012891.
9. *Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др.* Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.
10. *Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E. et al.* // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, A09S20; doi:10.1029/2005JA011067.