

СВЯЗЬ DST – ИНДЕКСА МОЩНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Рассмотрено поведение различных параметров солнечного ветра и напряженности межпланетного магнитного поля в связи с развитием очень сильных и экстремальных геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.). Установлено, что для самых мощных магнитных бурь ($D_{st}^{min} < -200$ нТ) плотность солнечного ветра и южная компонента межпланетного магнитного поля являются наиболее геоэффективными параметрами при условии учета эквивалентной площади профилей изменений этих параметров. Эмпирически определен параметр, значения которого показывают хорошую корреляцию с индексом D_{st}^{min} .

Одной из главных задач исследований в области солнечно-земной физики является разработка методики успешного прогноза возникновения геомагнитных бурь. Для краткосрочного прогноза особенно важно иметь оперативную информацию о значениях параметров солнечного ветра (СВ). К настоящему времени значительно сузилось количество параметров, которые считаются наиболее геоэффективными. Проведенные многочисленные исследования показали, что наиболее геоэффективными параметрами СВ являются динамическое давление и присутствие B_{zs} компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Практически все мощные вспышки на Солнце сопровождаются выбросами корональной массы, передний фронт которых обладает

повышенным динамическим давлением и поэтому при приближении к Земле сжимает магнитосферу, приводя её в возбужденное состояние. B_{zs} компонента ММП, через пересоединения с силовыми линиями магнитосферного поля, передает ей часть энергии, которая является источником развития главной фазы геомагнитной бури.

При сопоставлении изменений значений параметров СВ и ММП со временем развития магнитной бури (МБ) установлено, что перед началом МБ (за 1–2 часа) наблюдается поворот к югу B_z компоненты ММП, возрастание концентрации плазмы и динамического давления СВ [1].

Temerin M. and Li X. [2] вывели многопараметрические эмпирические формулы, которые затем уточнили [3], для расчета хода индекса Dst

с помощью значений параметров СВ и ММП. Эти параметры в реальном масштабе времени со спутника ACE (орбита расположена в 1.5 млн. км от Земли) доступны в интернете. Основная трудность, по нашему мнению, при расчете хода индекса Dst в почти реальном времени, состоит в том, что влияние параметров СВ и ММП, сказывается не мгновенно, а через какое-то неопределенное время и в разной степени. Использование же постоянного времени задержки для каждого из параметров СВ и ММП не всегда приводит к желаемым результатам. Так для экстремальных МБ, произошедших в конце октября и 20 ноября 2003 г., применяемая методика показала наибольшие ошибки (до 30% для D_{st}^{min}). Авторы пришли к выводу, что активность магнитосферы связана соразмерно с квадратным корнем плотности, квадратом скорости СВ и линейно с напряженностью ММП.

Хабарова О. и Руденчик Е. установили, что несмотря на то, что скорость вносит основной вклад в величину давления СВ, основополагающим параметром в определении динамического давления СВ является плотность [4]. По мнению авторов, в подавляющем числе случаев, геоэффективными являются «высокоплотностные» потоки, а не «высокоскоростные».

Если использовать классификацию мощности МБ по минимальным значениям индекса D_{st}^{min} , предложенную Loewe C. and Prolss G. [5], то все МБ можно условно разбить на два класса: к первому - отнести слабые, умеренные и сильные МБ с $D_{st}^{min} > -200$ нТ, ко второму - очень сильные и экстремальные с $D_{st}^{min} < -200$ нТ. Такое разбиение позволяет выделить самые мощные по воздействию на геосферу МБ. При этом для МБ, относящихся к 1-му классу, удалось найти параметр B_z^{min} , который хорошо коррелирует с индексом D_{st}^{min} . Так, в работе [6] найдено значение корреляции $R=0.91$ для 30 МБ с $-138 \text{ нТ} \leq D_{st}^{min} \leq -37 \text{ нТ}$. К сожалению, как показали наши расчеты, использование только одного параметра B_z^{min} для МБ с $D_{st}^{min} < -200$ нТ практически показывает отсутствие корреляции ($R=0.44$).

В представленной ниже работе рассматривается поведение параметров СВ и ММП в период возникновения и развития очень сильных и экстремальных МБ 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.). Целью работы является поиск параметров хорошо коррелирующих с индек-

сом D_{st}^{min} . Всего за этот период произошло 17 МБ с $D_{st}^{min} < -200$ нТ, причем началу всех МБ предшествовал приход фронта ударной волны (Shock) от корональных выбросов массы. Shocks обладали различной мощностью, но всегда присутствовали резкие подъемы значений напряженности ММП, плотности, скорости СВ. Лишь 2 МБ: 6 апреля и 17 сентября 2000 г. не имели внезапного начала (SSC).

Значения параметров СВ и ММП взяты на сайте *omni web*, для заполнения пропусков в данных и для описания Shocks использованы результаты наблюдений со спутников ACE, WIND, SOHO. В таблице 1 в столбцах 2 и 7 представлены основные характеристики МБ с $D_{st}^{min} < -200$ нТ, а в столбцах 3,4 - максимальные значения плотности на ударном фронте и минимальные - для южной компоненты магнитного поля.

Естественно, что все параметры СВ, в том числе скорость, плотность, температура, давление, магнитные и электрические поля, заряженные частицы, которые ускоряются на ударном фронте, а также магнитные облака, оказывают влияние на возникновение и развитие МБ в разной степени. Было проведено сопоставление вышеперечисленных физических и структурных характеристик плазмы СВ со значениями D_{st}^{min} - мерой мощности МБ. В результате установлено, что возникновение МБ связано с динамическим воздействием СВ, которое определяется, в основном, через резкое увеличение значений плотности плазмы. Для дальнейшего развития МБ обязательно присутствие южной компоненты ММП. Причем важны не только экстремальные значения N_p и B_{zs} , но и время существования этих и близких к ним значений. Интенсивность самых мощных МБ связана с совокупностью эквивалентных площадей, занимаемых профилями изменения плотности плазмы в период прохождения Shock - $S_{экв}(N_p)$ и южной компонентой ММП во время развития главной фазы МБ - $S_{экв}(B_{zs})$.

В качестве примера эти профили, выделенные серым цветом, показаны на рисунках 1-3. Значение каждой из эквивалентных площадей получается в результате умножения полуширины профиля ΔT_{Bz} на значение B_{zs}^{min} и соответственно - ΔT_{Np} на значение N_p^{max} . Полуширины рассматриваемых профилей соответствуют промежуткам времени в часах. В таблице 1 в столбцах 5,6 представлены рассчитанные значения

Таблица 1. Характеристики МБ и значения параметров СВ

№	Начало МБ	N_p^{\max} 1/cm ³	B_{zs}^{\min} nT	$S(N_p)$	$S(B_{zs})$	D_{st}^{\min} nT	$S_{Bz,Np}$
1	3.05.98 17h43m	20.8	-19.5	64.5	49	-205	113.5
2	24.09.98 23h45m	14.6	-18.4	60	57	-207	117
3	21.10.99 2h25m	49.0	-28.2	98	113	-237	211
4	6.04.00 16h39m	12.8	-22.1	51	132	-288	183
5	15.07.00 14h37m	20.1	-49.3	76	164	-301	240
6	11.08.00 18h46m	5.0	-26.4	25	105	-235	130
7	17.09.00 17h19m	12.7	-23.0	64	46	-201	110
8	31.03.01 0h52m	37.8	-46.2	151	171	-387	322
9	11.04.01 13h43m	24.7	-17.7	111	61	-271	172
10	6.11.01 1h52m	26.7	-61.0	53	183	-292	236
11	24.11.01 5h56m	43.9	-33.0	132	46	-221	178
12	29.10.03 6h11m	23.0	-24.6	115	172	-353	287
13	20.11.03 8h03m	18.0	-45.9	67	322	-422	389
14	7.11.04 2h57m	12.0	-44.6	36	268	-373	304
15	9.11.04 9h30m	5.5	-27.8	22	198	-289	220
16	15.05.05 2h38m	19.1	-41.2	67	82	-263	149
17	24.08.05 6h13m	27.9	-40.9	84	82	-216	166

эквивалентных площадей и в столбце 8 их совокупность.

С помощью значений эквивалентных площадей можно оценить относительный вклад каждого из параметров N_p и B_{zs} в результирующую мощность магнитной бури D_{st}^{\min} . Сопоставление показало, что в 47% случаев вклад обоих параметров примерно равный (рис.2), в 41% - преобладает влияние B_{zs} (рис.3) и лишь в 12% случаев - N_p (рис.1). Это указывает на то, что основным поставщиком энергии для развития МБ является южная компонента магнитного поля. В подтверждение этого можно привести и такой факт: в большинстве случаев, вид профилей изменения B_{zs} и индекса D_{st} – очень похож.

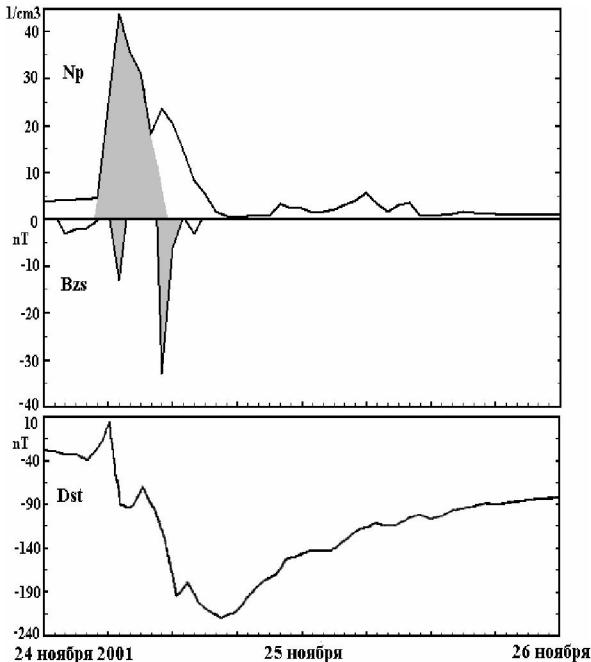


Рис. 1. Изменение значений параметров N_p , B_{zs} и индекса Dst в период развития магнитной бури 24 - 25 ноября 2001 г. Серым цветом показаны эквивалентные площади, занятые профилем плотности $S_{\text{Экв}}(N_p)$, в период внезапного начала МБ, и южной компонентой магнитного поля – $S_{\text{Экв}}(B_{zs})$ в период главной фазы МБ. Заметен преобладающий вклад $S_{\text{Экв}}(N_p)$, по сравнению с $S_{\text{Экв}}(B_{zs})$, в совместную эквивалентную площадь.

На примере развития магнитной бури 15 мая 2005 г. показан примерно равный вклад плотности N_p и южной компоненты магнитного поля B_{zs} в значение совместной эквивалентной площади

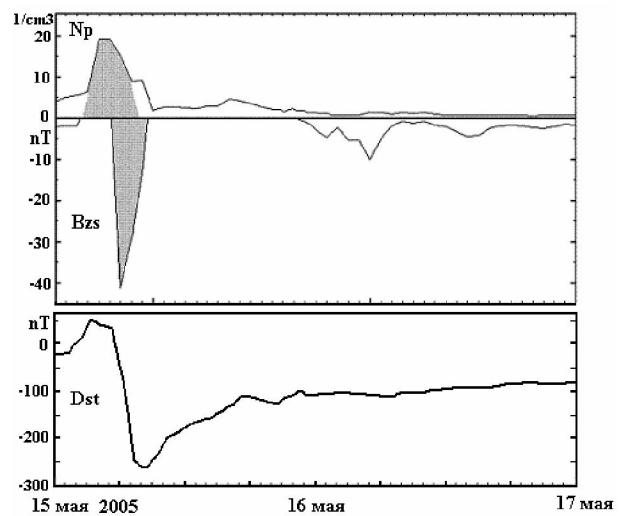


Рис. 2. На примере развития магнитной бури 15 мая 2005 г. показан примерно равный вклад плотности N_p и южной компоненты магнитного поля B_{zs} в значение совместной эквивалентной площади

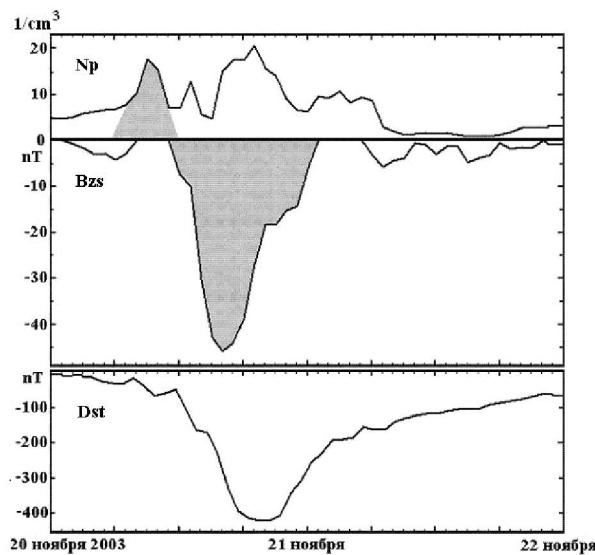


Рис. 3. Пример преобладающего вклада B_{zs} в развитии магнитной бури 20 ноября 2003 г.

В работе [3] в эмпирических формулах расчета индекса D_{st} использовались следующие интервалы времени задержки влияния: -1.6 мин. для P_g , и 23.1 мин. для B_z . Если влияние давления определять через плотность, то нашими расчетами подтверждается минимальная разница во времени между приходом Shock и началом МБ. Резкое увеличение плотности СВ на фронте ударной волны является источником возникновения самых интенсивных МБ. Причем наиболее эффективное влияние имеет первичный всплеск значений, связанный непосредственно с пере-

дним фронтом. Начало МБ практически сразу следует за прибытием Shock к магнитосфере Земли. Усреднение значений начала МБ, по данным нескольких геомагнитных станций, может привести к несовпадению по времени в 3-5 минут. Если же взять интервалы времени между B_{zs}^{\min} и D_{st}^{\min} для рассмотренных нами МБ, то они лежат в пределах от 1 до 7 часов. Среднее время задержки составляет 3.1 часа, что существенно превышает значение, принятое в [3].

Для всех МБ с $D_{st}^{\min} < -200$ нТ, характерно присутствие B_{zs} компоненты непрерывно в течение от 3-х до 12-ти часов. Причем B_{zs} принимает минимальные значения всегда до наступления максимума в развитии МБ.

На рисунке 4 приведена статистическая зависимость между минимальными значениями индекса D_{st} и совокупным вкладом B_z и N_p . Достаточно высокий коэффициент корреляции $R=0.95$ свидетельствует об очень сильном влиянии на мощность МБ южной компоненты поля и плотности с учетом времени их существования.

Таким образом, наиболее геоэффективными параметрами СВ для самых мощных магнитных бурь ($D_{st}^{\min} < -200$ нТ) являются плотность и южная компонента поля с учетом эквивалентной площади профилей изменений этих параметров.

Типичным поведением параметров СВ при возникновении и развитии мощных МБ является резкий подъем значений N_p , и, далее, с запаздыванием, в среднем, в 3-4 часа начинается пово-

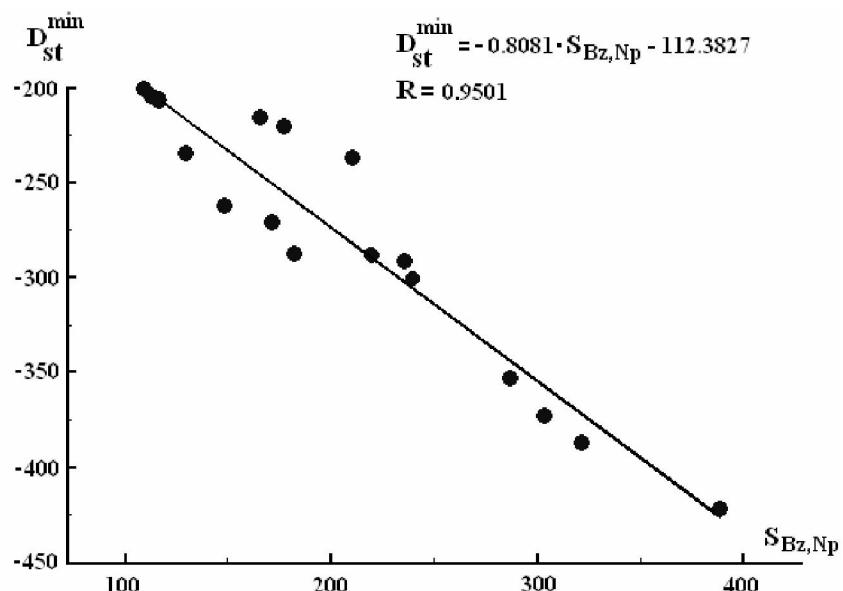


Рис.4. Сопоставление значений совместных эквивалентных площадей $S_{Bz,Np}$ и индекса D_{st}^{\min} для 17 самых мощных магнитных бурь 23-го цикла.

рот к югу B_z компоненты магнитного поля. Причем обычно её ход повторяется в изменениях индекса D_{st} при развитии главной фазы МБ.

Момент начала МБ, её продолжительность и мощность определяются временем прибытия переднего фронта, его плотностной структурой, и свойствами магнитного поля в основном теле коронального выброса массы. И от того, с какой заблаговременностью мы будем обладать необходимой информацией, зависят свойства и качество прогноза магнитных бурь.

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yermolaev Yu.I. and Yermolaev M. Yu. Statistic study on the geomagnetic storm effectiveness of solar and interplanetary events//Advances in Space Research. 2006. V.37. №6. P. 1175-1181

2 Temerin M. and X. Li . A new model for the prediction of Dst on the basis of the solar wind. // J. Geophys. Res. 2002. V.107(A12). 1472. doi: 10.1029/2001JA007532.

3. Temerin M. and Li X. Dst model for 1995–2002 // J.Geophys. Res. 2006.V.111. A04221. doi:10.1029/2005JA011257.

4. Хабарова О.В., Руденчик Е.А. О возможности прогноза магнитных бурь по результатам мониторинга осцилляторного режима солнечного ветра//Препринт ИЗМИРАН. №1(1154). Троицк, апрель 2003.

5. Loewe C.A. and Prolls G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms// J. Geophys. Res. 1997. V.102. №A7. P.14209-14213.

6. Khabarova O.V. Current problems of magnetic storm prediction and possible ways of their solving// Sun and Geosphere. 2007. V.2.№1. P. 33-38.

Резюме

23-ші циклдің (1996-2008 ж.) Күннің активтігінің ең күшті мен экстремалдық геомагниттік дауылдарының дамуының салдарынан Күн желінің әртүрлі параметрлерінің және планетааралық магниттік өрістің кернеулігінің жүріс-тұрысы қарастырылды. Аса құатты магниттік дауылдар ($D_{st}^{min} < -200$ nT) үшін ен геоэффективті Күн желінің тығыздығы және планетааралық магниттік өрістің онтүстік құраушысы болады деп тауып көрсетіледі, осы параметрлердің өзгерістерінің профилдерінің баламалы ауданы есепке алғанда. Эмпирикалық параметр анықталды, оның мәні D_{st}^{min} индекспен жақсы корреляцияны көрсетеді.

Summary

The behavior of different parameters of the solar wind and interplanetary magnetic field in connection with development of the very strong and extreme geomagnetic storms of 23-th cycle of solar activity (1996-2008) are considered. It was established that for the most powerful magnetic storms ($D_{st}^{min} < -200$ nT) a density of the solar wind and the south component of the interplanetary magnetic field are the most geoeffective parameters if the equivalent area of the profiles of these parameters variations are taken into account. The parameter, which shows a good correlation with the index D_{st}^{min} , was determined empirically.

Астрофизический институт
им.Б.Г.Фесенкова МОН РК
г. Алматы

Поступила 20.04.2009 г.