

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УСЛОВИЙ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ

© 2010 г. Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев

Институт космических исследований РАН, г. Москва

yermol@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.08.2009 г.

На основе архива данных OMNI для периода 1976–2000 годов выполнен анализ 798 геомагнитных бурь с $D_{st} < -50$ нТ и их межпланетных источников – крупномасштабных типов солнечного ветра: CIR (145 магнитных бурь), Sheath (96); магнитные облака MC (62); Ejecta (161), источник остальных 334 магнитных бурь оказался неопределенным. Для анализа был использован двойной метод наложенных эпох, в котором за опорные времена взяты моменты начала магнитной бури и минимума D_{st} индекса. Подтвержден известный факт, что независимо от вида межпланетного источника начало магнитной бури наступает через 1–2 часа после поворота ММП к югу ($B_z < 0$), и окончание главной фазы бури и начало восстановительной фазы наблюдаются через 1–2 часа после исчезновения южной компоненты ММП. Также подтвержден ранее полученный результат, что наиболее эффективная генерация магнитной бури наблюдается для Sheath перед MC. На главной фазе бури параметры B_z и E_y в среднем мало изменяются между началом и концом главной фазы (минимума D_{st} и D_{st}^*), в то время как D_{st} и D_{st}^* монотонно уменьшаются, приблизительно пропорционально интегралу B_z и E_y по времени. Такое поведение индексов согласуется с предположением, что процесс генерации бури связан не просто с текущим значением B_z и E_y , а обладает памятью о предыстории. Полученные результаты показывают, что использованный двойной метод наложенных эпох может быть успешно применен для изучения динамики параметров на главной фазе магнитных бурь, имеющих разные длительности.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение механизмов передачи энергии от солнечного ветра внутрь магнитосферы и возбуждения магнитосферных возмущений является одним из ключевых вопросов солнечно–земной физики. Как показали прямые космические эксперименты в начале 70–х годов прошлого века, основным параметром, приводящим к возмущениям магнитосферы, является отрицательная (южная) B_z компонента межпланетного магнитного поля (ММП) (или электрическое поле $E_y = V_x B_z$) [1–4], так как в ее присутствии в магнитосферу начинает поступать энергия солнечного ветра, которая приводит к изменению существующих и генерации новых магнитосферно–ионосферных токов, изменяющих распределение магнитного поля [5].

Как показали многочисленные исследования, в невозмущенном солнечном ветре ММП лежит в плоскости эклиптики, т.е. B_z близка к 0, и только в возмущенных типах течений солнечного ветра B_z может составлять заметную величину. К таким типам солнечного ветра относятся межпланетные СМЕ (ICME) с областью сжатия перед ними Sheath и область сжатия между медленным и быстрым потоком солнечного ветра (Corotating Interaction Re-

gion, CIR). Поэтому во многих работах было показано, что крупномасштабными межпланетными источниками магнитосферных возмущений являются эти явления (см., например, работы [6–19] и ссылки в них).

Подклассами ICME являются Ejecta и магнитные облака (Magnetic Cloud, MC), различия между которыми состоит в том, что MC обладают высоким и более регулярным ММП [20]. Помимо интенсивности СМЕ на Солнце обнаруженные различия между MC и Ejecta могут быть связаны и с траекторией космического аппарата относительно оси ICME [21]. Разделение MC и Ejecta зависит также от выбора критериев селекции, которые достаточно условны. Несмотря на все эти неоднозначности определения различия параметров в MC и Ejecta существенны [22], например, модуль магнитного поля в MC в среднем в 2 раза, а концентрация и динамическое давление в 1.5 раза, выше, чем в Ejecta. Важно отметить, что, так как размеры ICME в несколько десятков миллионов километров [17, 23] заметно превышают поперечные размеры магнитосферы и расстояния от околоземных космических аппаратов до магнитосферы Земли в несколько десятков тысяч километров, то маловероятна ситуация, когда существенно различались бы гелиосфер-

ные условия, которые были зарегистрированы на космическом аппарате и которые воздействовали на магнитосферу. В подавляющем большинстве работ, посвященных генерации магнитных бурь при разных условиях в солнечном ветре, такого разделения на MC и Ejecta не делается. Мы провели разделение (в период 1976–2000 года наблюдалось 101 MC и 1128 Ejecta [23]) и в настоящей работе анализируем эти явления раздельно.

Хотя в литературе достаточно часто указывалось, что Sheath может генерировать магнитную бурю (см., например, обзор [7] и ссылки в нем), лишь сравнительно недавно Sheath стало предметом отдельного, глубокого изучения (см. [11, 15, 16, 22, 24–28] и ссылки в них). Более того, в ряде работ [9, 15, 16, 29] было получено, что во время Sheath процесс генерации бури оказывается более эффективным, чем во время магнитного облака. Тем не менее, во многих работах (см. например, [12, 13, 30, 31]) разделение на ICME и Sheath перед ICME не делается, поэтому их выводы относятся не ICME, а к смеси ICME + Sheath, причем с неизвестной пропорцией между компонентами. В настоящей работе мы не только изучаем роль Sheath в генерации магнитных бурь, но делаем это раздельно для Sheath перед MC и перед Ejecta.

Экспериментальные результаты свидетельствуют, что магнитосферная активность отличается для различных межпланетных типов течений, послуживших источником этих возмущений [12–14, 18, 30–33]. Это может быть связано с необходимостью учитывать влияние других (помимо B_z компоненты ММП и электрического поля E_y) параметров солнечного ветра, динамику изменения параметров, а так же разные механизмы генерации магнитосферных возмущений при разных типах солнечного ветра.

Во многих работах предпринимались попытки сопоставить экстремальные значения D_{st} и K_p индексов с минимальными значениями B_z компоненты ММП и конвективного электрического поля E_y , однако обнаружить заметные различия в указанных зависимостях для разных типов солнечного ветра не удалось [17]. Этот “peak-to-peak” подход сравнивает только отдельные, экстремальные, точки при развитии процесса и не учитывает саму динамику процесса генерации магнитной бури. Поэтому более плодотворными оказались подходы, использующие метод наложенных эпох (МНЭ), так как он позволяет исследовать наиболее характерные изменения параметров во времени (см. табл. 1). При использовании этого метода часто имеются те же недостатки, которые были указаны выше: (1) не производится селекция по типам межпланетных источников [34–37], (2) не делается разделение на ICME и Sheath

[12, 13, 30, 31] и (3) не делается разделение ICME на MC и Ejecta [12, 13, 30, 31]. В некоторых работах не учитывается тот факт, что длительности геоэффективных типов течений солнечного ветра значительно короче длительности магнитной бури (например, в недавней работе [17] показано, что длительности Sheath, MC и CIR, генерирующих магнитные бури с $D_{st} < -60$ нТ в период 1976–2000 годов, составили 9 ± 4 (для 22 событий), 28 ± 12 (113) и 20 ± 8 (121) часов, соответственно), и приводят параметры солнечного ветра для CIR, Sheath and MC/Ejecta на интервалах 4–10 суток [19, 31, 33, 38, 39]. На наш взгляд такие подходы некорректны и приводят к некорректным выводам, так как полученные результаты относятся не к указанному типу течения солнечного ветра, а к смеси (обычно с неизвестной пропорцией) нескольких типов. Все указанные недостатки использованных методических подходов мы постарались учесть в нашей работе.

Одним из ключевых вопросов использования МНЭ является выбор опорной точки (время “0” или начало эпохи), т.е. того момента процесса, относительно которого совмещаются временные ряды нескольких однородных явлений [11, 17, 37]. Этот выбор существенно влияет на результат исследования, так как, строго говоря, результаты применения МНЭ справедливы лишь вблизи начала эпохи из-за того, что длительности процессов даже для отобранных однородных явлений могут существенно различаться. В большинстве работ, применяющих МНЭ для изучения магнитных бурь (см. табл. 1), в качестве нулевого времени использовался минимум D_{st} (максимум K_p) индекса [31, 35, 41, 44]. Этот выбор позволяет исследовать конец главной фазы бури и начало фазы восстановления, однако с его помощью нельзя исследовать межпланетные причины начала магнитной бури (onset), так как длительность между началом и окончанием главной фазы бури может меняться от 2 до 15 часов со средней длительностью около 7 часов [11, 16, 47, 48], и при совмещении временных рядов по минимуму D_{st} (максимуму K_p) индекса внутри интервала длительностью несколько часов около –7 часов от нулевого времени будут усредняться параметры, относящиеся как к параметрам до начала бури, так и к параметрам после начала. Тем не менее, такой подход был использован в ряде работ (см. табл. 1). Выбор в качестве нулевого времени для МНЭ времени начала бури (onset) позволяет исследовать причины магнитных бурь и начальную фазу развития бури вблизи ее начала. Этот подход, например, показал, что бури, генерированные Sheath, имеют более крутую главную фазу бури, чем бури, генерированные другими типами солнечного ветра [16, 18].

Таблица 1. Список работ с использованием метода наложения эпох и полученные в них результаты по межпланетным условиям, приводящим к магнитным бурям

N	Число (Годы)	Нулевое время	Селекция	СВ и ММП	Ссылка
1	538(1963–1991)	начало бури	нет	$B, B_x, B_y, B_z, V, T, n, P_d$	[40]
2	120(1979–1984)	минимум D_{st}	нет	B_z, n, V	[41]
3	150(1963–1987)	поворот B_z	нет	B_z, P_d	[42]
4	305(1983–1991)	начало бури	нет	B_z, P_d	[43]
5	1085(1957–1993)	минимум D_{st}	D_{st}	B_z, P_d	[44]
6	130(1966–2000)	начало бури	нет	$B, B_x, B_y, B_z, B_x , B_y , B_z , V, n, P_d$	[45]
7	623(1976–2000)	начало бури и минимум D_{st}	типы ^a СВ	$B, B_x, B_y, B_z, V, T, n, P_d, nkT, \beta, T/T_{ex}$	[11, 15, 16, 46]
8	78(1996–2004)	минимум D_{st}	типы ^b СВ	$B, B_z, dB/B, V, T, n$	[38]
9	549(1974–2002)	минимум D_{st}	да ^b	$B, B_x, B_y, B_z, B_x , B_y , B_z , B_s, VB_s, V, T, n, P_d$	[35]
10	623(1976–2000)	начало бури	типы ^a СВ	$\sigma B, \sigma V, \sigma T, \sigma n$	[17]
11	28(1997–2002)	начало бури и минимум D_{st}	типы ^г СВ	B_z, P_d, V, E_y	[18]
12	10(2004)	начало бури	нет	$B_x, B_y, B_z, B, \varepsilon, V, n, P_d, M_a, E_y$	[19]
13	71(2000–2006)	минимум D_{st}	типы ^b СВ	B_z, V_x, V_y, P_d	[31]
14	29(1999–2002)	начало бури, главная фаза, минимум D_{st}	нет	B_z, P_d	[37]

^a – (1) CIR, (2) Sheath и (3) MC;

^b – (1) CIR и (2) MC (Sheath + MC);

^b – (1) умеренная буря на солнечном минимуме, (2) умеренная буря на солнечном максимуме, (3) сильная буря на солнечном минимуме и (4) сильная буря на солнечном максимуме;

^г – (1) MC и (2) Sheath.

Настоящая работа носит определенный методический характер, так как для исследования динамической связи между развитием параметров в межпланетных источниках и в магнитосферных индексах в данной работе мы применяем двойной метод наложенных эпох (ДМНЭ). В этом методе используется 2 опорных времени: мы совмещаем временные ряды по времени начала бури (время “0”) и времени минимума D_{st} индекса (время “6”), данные между ними сжимаем или растягиваем таким образом, чтобы длительности главных фаз всех магнитных бурь были равны между собой (в условиях неполного описания методики можно предположить, что в работе [43] используется близкий подход). В качестве начала бури мы берем первую одночасовую точку, в которой наблюдается резкий спад D_{st} индекса, а для анализа берем все бури с $D_{st} \leq -50$ нТ

(а не только бури с $D_{st} \leq -60$ нТ, как мы поступали в предыдущих аналогичных работах [11, 15–17]). Такой подход позволяет одновременно исследовать межпланетные условия, приводящие к началу и окончанию главной фазы бури, а также их динамику на протяжении всей главной фазы бури.

Таким образом, в отличие от предыдущих работ настоящая работа содержит следующие новые элементы методики:

1) Используется большее число типов межпланетных источников магнитных бурь, в том числе отдельный анализ Sheath и ICME и разделение ICME на Ejecta и магнитные облака (MC), а также два типа Sheath перед ними.

2) Использован двойной метод наложения эпох, в котором за опорные времена взяты моменты начала магнитной бури и минимума D_{st} индекса.

МЕТОДИКА

Всего за весь период времени 1976–2000 годов было зарегистрировано 798 умеренных и сильных магнитных бурь с интенсивностью $D_{st} \leq -50$ нТ. Но только для 464 магнитных бурь (т.е. 58% всех магнитных бурь) было найдено соответствующее событие в солнечном ветре. Источник остальных 334 магнитных бурь (т.е. 42% из 798 бурь) оказывается неопределенным, и, в основном, это связано с отсутствием данных по плазме и ММП, и невозможностью идентификации типа солнечного ветра для этого интервала. Методика идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра подробно описана в нашей работе [22] и состоит в сравнении каждой точки базы данных OMNI с набором пороговых критериев по ключевым параметрам солнечного ветра и ММП. Предполагается, что событие солнечного ветра приводит к магнитной буре, если минимум D_{st} попадает внутрь интервала события или следует за ним в течение не более 2-х часов. Анализ показал, что 145 магнитных бурь были вызваны событиями CIR, 96 магнитных бурь – Sheath (12 магнитных бурь генерированы областью Sheath перед MC, Sh_{MC} , и 84 магнитные бури – областью Sheath перед Ejecta, Sh_E); 62 магнитные бури связаны с магнитными облаками MC (причем 50 бурь вызваны MC с Sheath и 12 MC без Sheath); 161 магнитные бури связаны с событиями Ejecta (115 – Ejecta с Sheath, 46 – Ejecta без Sheath).

Данные для интервалов, отсеleetированных по типам солнечного ветра, обрабатывались методом наложенных эпох с двумя контрольными временами: время начала магнитной бури (время “0”) и время минимума D_{st} индекса (время “6”). Интервал от времени “0” до “6” содержит искусственно измененные длительности событий, поэтому эти времена были выделены кавычками, чтобы они отличались от реально измеренного времени. В качестве “начала” магнитной бури бралась первая 1-часовая точка резкого уменьшения D_{st} индекса [15–17]. Для всех событий (интервалов) временная шкала между этими временами разделялась на 5 подинтервалов с равной относительной длительностью, и данные, попавшие в один подинтервал, усреднялись в соответствии с числом точек, попавших в данный подинтервал (их число может быть разным в разных подинтервалах). Данная процедура означает, что для реальных данных временная шкала в диапазоне между точками “0” и “6” менялась линейным образом, но это изменение было небольшим (для 2/3 событий длительность изменилась не более чем на 1/3), так как длительность главной фазы бури в среднем составляет 7 ± 4 часа [15–17]. Временная шкала до времени “0” и после времени “6” осталась

без изменений. Преимуществом данного метода является возможность сравнения динамики межпланетных и магнитосферных параметров во время главной фазы магнитных бурь, имеющих разную длительность.

В соответствии с МНЭ данные усреднялись в интервалах от –12 до +24 часов, при этом учитывалась длительность каждого интервала данного типа солнечного ветра. Согласно нашим результатам длительности различных типов солнечного ветра для интервала 1976–2000 годы составили: 20.6 ± 12.2 часов для CIR, 29.8 ± 20.5 для Ejecta, 28.2 ± 13.4 для MC и 15.7 ± 10.1 для Sheath [22] и близки к средним длительностям этих типов солнечного ветра, приведших к магнитным бурям [15–17]. Поэтому число точек в интервалах усреднения заметно падает (соответственно, ошибка возрастает) к концам выбранного интервала от –12 до +24, особенно для Sheath. Низкая статистика для некоторых частей представленных на рисунках кривых проявляется в заметной их изрезанности. Ошибки (среднеквадратичные отклонения) в интервале от –12 до +12 близки к приведенным в нашей работе [17]. Поэтому мы провели проверку статистической значимости для сформулированных ниже утверждений, а в ряде случаев при обсуждении результатов, для которых гипотеза не обладает нужной статистической значимостью, мы говорим лишь о возможных тенденциях, которые требуют дальнейших исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты нашего анализа представлены в виде 16 рисунков (каждый для одного из 16 различных параметров солнечного ветра и магнитосферных индексов) и табл. 2–4, которые показывают для каждого типа солнечного ветра средние значения с дисперсиями для 16 параметров в моменты времени “0” и “6” и позволяют оценить их градиенты в этом временном интервале. Различия между табл. 2–4 состоят в том, что в табл. 2 данные приводятся для полного диапазона значений D_{st} индекса менее –50 нТ, а в табл. 3 и 4 данные разделены на умеренные бури с $-100 < D_{st} \leq -50$ и сильные бури с $D_{st} \leq -100$ нТ. Из-за ограниченности места мы не приводим рисунки с селекцией данных по величине D_{st} индекса. Все рис. 1–16 имеют одинаковую структуру и показывают динамику 16 параметров на 8 панелях для 8 различных типов солнечного ветра: магнитные облака MC, Ejecta, сумма для двух типов MC + Ejecta, CIR, Sheath перед MC, Sheath перед Ejecta, сумма для обоих типов Sheath и “неопределенного” типа. Число событий, вошедших в обработку для каждого типа солнечного ветра, показано на рисунке. Сплошной черной центральной линией показано поведе-

Таблица 2. Средние значения и отклонения для всех событий $D_{st} \leq -50$ нТ

Параметр	IND		CIR		Ejecta		MC		Sheath		MC+Ejecta	
	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$
D_{st} , нТ	-20.4 ± 23.4	-89.2 ± 48.5	-9.2 ± 20.2	-85.5 ± 39.8	-27.9 ± 22.4	-92.2 ± 39.4	-23.5 ± 34.2	-116.3 ± 54.8	-14.3 ± 26.2	-104.9 ± 55.2	-26.4 ± 26.5	-100.0 ± 47.8
D_{st}^* , нТ	-29.7 ± 17.2	-81.8 ± 24.9	-25.7 ± 20.5	-95.8 ± 34.9	-39.7 ± 26.6	-99.3 ± 41.8	-35.7 ± 29.2	-124.2 ± 59.4	-39.0 ± 28.2	-118.1 ± 60.0	-38.5 ± 27.2	-107.7 ± 52.0
$K_p \cdot 10$	46 ± 14	53 ± 12	47 ± 12	54 ± 11	42 ± 13	52 ± 12	50 ± 18	57 ± 15	54 ± 15	59 ± 13	44 ± 15	54 ± 14
B_x , нТ	1.2 ± 5.2	0.1 ± 5.0	0.5 ± 6.3	-0.2 ± 6.1	0.02 ± 4.9	0.7 ± 5.1	-1.3 ± 5.5	-0.9 ± 5.8	0.1 ± 6.3	0.7 ± 7.2	-0.4 ± 5.1	0.2 ± 5.4
B_y , нТ	-0.5 ± 6.7	0.5 ± 5.5	-0.1 ± 7.5	0.4 ± 7.5	-0.5 ± 6.0	-0.3 ± 6.9	0.6 ± 10.6	-0.6 ± 8.3	-0.2 ± 8.7	-0.4 ± 8.4	-0.3 ± 7.8	-0.4 ± 7.3
B_z , нТ	-4.6 ± 4.0	-3.4 ± 3.7	-5.5 ± 5.346	-2.8 ± 5.7	-5.1 ± 3.9	-4.4 ± 5.9	-9.1 ± 5.8	-7.4 ± 7.9	-4.5 ± 6.7	-2.8 ± 7.1	-6.4 ± 5.0	-5.3 ± 6.7
n , см ⁻³	12.5 ± 9.6	8.2 ± 5.4	23.5 ± 16.4	13.3 ± 8.7	13.4 ± 7.5	9.0 ± 6.4	14.6 ± 10.6	11.5 ± 8.8	24.3 ± 21.3	14.3 ± 12.1	13.6 ± 8.4	9.7 ± 7.2
V , км/с	496 ± 120	499 ± 121	448 ± 93	494 ± 91	470 ± 100	494 ± 103	498 ± 153	469 ± 115	541 ± 148	558 ± 138	476 ± 117	487 ± 107
P_k , нПа	4.7 ± 3.3	3.1 ± 1.6	7.2 ± 4.7	5.0 ± 2.5	5.0 ± 4.1	3.5 ± 3.3	7.0 ± 6.9	4.2 ± 3.7	11.6 ± 10.7	7.9 ± 9.3	5.5 ± 5.0	3.7 ± 3.4
T , К, 10^5	1.2 ± 1.0	1.1 ± 0.8	1.3 ± 1.1	1.8 ± 1.1	0.5 ± 0.6	0.7 ± 0.8	0.8 ± 1.1	0.4 ± 0.5	1.7 ± 1.3	1.9 ± 1.2	0.6 ± 0.8	0.6 ± 0.8
P_t , 10^{-2} нПа	2.1 ± 3.6	1.3 ± 2.0	3.8 ± 0.041	3.7 ± 4.8	0.9 ± 0.010	0.6 ± 0.7	1.2 ± 1.3	0.7 ± 1.0	7.0 ± 11.0	3.6 ± 3.6	1.0 ± 1.1	0.7 ± 0.8
β	0.48 ± 0.44	0.40 ± 0.33	0.58 ± 0.566	0.68 ± 0.5	0.21 ± 0.18	0.20 ± 0.22	0.14 ± 0.13	0.16 ± 0.34	0.96 ± 2.09	0.78 ± 1.89	0.19 ± 0.17	0.19 ± 0.27
T/T_{ex}	1.20 ± 1.44	1.11 ± 0.84	1.67 ± 1.11	1.96 ± 1.20	0.65 ± 0.63	0.68 ± 0.69	0.94 ± 1.25	0.57 ± 0.73	1.67 ± 1.22	1.70 ± 1.05	0.74 ± 0.85	0.65 ± 0.70
E_y , мВ/м	-1.99 ± 1.88	-1.57 ± 1.49	-2.28 ± 2.40	-1.05 ± 2.47	-2.43 ± 2.0	-2.02 ± 2.87	-4.63 ± 3.69	-3.58 ± 4.39	-2.51 ± 3.67	-1.40 ± 3.72	-3.06 ± 2.78	-2.48 ± 3.46
AE , нТ	529.2 ± 291.5	707.9 ± 230.4	516.1 ± 253.2	674.1 ± 227.4	518.2 ± 316.3	622.1 ± 225.6	598.5 ± 398.0	705.8 ± 264.3	619.8 ± 345.8	671.2 ± 224.9	543.2 ± 345.8	646.2 ± 240.4

Таблица 3. Средние значения и отклонения для $-100 < D_{st} \leq -50$ нТ

Параметр	IND		CIR		Ejecta		MC		Sheath		MC + Ejecta	
	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$
D_{st} , нТ	-18.1 ± 19.6	-71.1 ± 13.5	-6.3 ± 17.6	-70.2 ± 12.6	-24.8 ± 16.7	-71.2 ± 13.4	-9.1 ± 21.8	-72.8 ± 12.9	-11.0 ± 22.2	-73.7 ± 13.6	-21.0 ± 19.1	-71.5 ± 13.2
D_{st}^* , нТ	-30.1 ± 16.6	-76.0 ± 17.5	-22.8 ± 15.3	-82.9 ± 15.0	-33.2 ± 18.2	-76.6 ± 19.3	-24.0 ± 17.3	-77.6 ± 16.7	-31.7 ± 21.9	-89.2 ± 18.7	-31.1 ± 18.4	-76.8 ± 18.7
$K_p \cdot 10$	43 ± 12	49 ± 10	45 ± 11	51 ± 9	39 ± 10	47 ± 10	38 ± 12	46.3 ± 10.2	49 ± 13	54 ± 11	39 ± 11	47 ± 10
B_x , нТ	1.1 ± 4.8	0.1 ± 4.5	0.4 ± 5.8	-0.4 ± 6.2	0.3 ± 5.0	0.5 ± 5.3	-1.9 ± 3.8	-1.0 ± 5.7	0.3 ± 5.9	2.1 ± 6.7	-0.2 ± 4.8	0.1 ± 5.4
B_y , нТ	-0.7 ± 6.0	0.007 ± 4.6	0.3 ± 7.2	0.5 ± 6.6	-1.4 ± 5.2	-0.6 ± 5.7	3.4 ± 6.5	-1.1 ± 6.5	-0.4 ± 7.0	-2.3 ± 6.7	-0.4 ± 6.0	-0.8 ± 5.9
B_z , нТ	-4.1 ± 3.3	-3.2 ± 3.6	-5.0 ± 5.3	-2.4 ± 5.2	-5.3 ± 3.0	-3.5 ± 5.6	-5.4 ± 3.9	-5.8 ± 5.2	-5.0 ± 6.3	-1.6 ± 5.4	-5.3 ± 3.3	-4.1 ± 5.6
n , см $^{-3}$	10.8 ± 7.4	7.7 ± 5.2	23.5 ± 17.1	12.7 ± 9.0	11.7 ± 6.9	7.6 ± 4.7	9.7 ± 3.6	8.7 ± 4.1	21.9 ± 20.2	11.5 ± 7.4	11.2 ± 6.3	7.9 ± 4.6
V , км/с	496 ± 119	500 ± 122	444 ± 88	488 ± 90	448 ± 81	476 ± 89	411 ± 75	432 ± 77	502 ± 114	521 ± 99	437 ± 82	466 ± 88
P_k , нПа	4.0 ± 2.2	2.9 ± 1.5	6.9 ± 3.6	4.6 ± 2.3	3.8 ± 2.4	2.6 ± 1.4	2.8 ± 1.8	2.7 ± 1.3	8.7 ± 7.8	5.0 ± 2.8	3.6 ± 2.4	2.6 ± 1.4
T , К, 10^5	1.0 ± 0.85	1.2 ± 0.88	1.4 ± 1.12	1.8 ± 1.0	0.5 ± 0.51	0.8 ± 0.95	0.6 ± 0.60	0.5 ± 0.58	1.7 ± 1.38	2.0 ± 1.25	0.5 ± 0.53	0.7 ± 0.89
P_p , 10^{-2} нПа	1.4 ± 1.3	1.0 ± 1.0	3.9 ± 4.2	3.7 ± 5.2	0.7 ± 0.7	0.6 ± 0.7	0.7 ± 0.7	0.7 ± 1.0	4.5 ± 5.1	2.9 ± 2.4	0.7 ± 0.7	0.6 ± 0.7
β	0.47 ± 0.43	0.37 ± 0.26	0.63 ± 0.59	0.65 ± 0.55	0.20 ± 0.17	0.22 ± 0.25	0.14 ± 0.11	0.15 ± 0.20	0.65 ± 0.83	0.61 ± 0.77	0.18 ± 0.16	0.20 ± 0.24
T/T_{ex}	0.96 ± 0.65	0.97 ± 0.55	1.79 ± 1.17	1.98 ± 1.23	0.61 ± 0.47	0.73 ± 0.67	1.19 ± 1.51	0.79 ± 0.94	1.50 ± 0.81	1.69 ± 0.95	0.77 ± 0.88	0.74 ± 0.74
E_y , мВ/м	-1.78 ± 1.63	-1.47 ± 1.44	-2.07 ± 2.35	-0.97 ± 2.45	-2.51 ± 1.51	-1.56 ± 2.89	-2.62 ± 1.32	-3.05 ± 1.55	-2.39 ± 3.26	-0.73 ± 2.93	-2.52 ± 1.45	-1.91 ± 2.71
AE , нТ	492.6 ± 270.2	697.2 ± 228.5	482.4 ± 230.7	654.3 ± 224.2	462.6 ± 266.7	608.3 ± 226.1	314.7 ± 208.8	587.1 ± 193.1	523.1 ± 254.2	650.2 ± 207.5	422.7 ± 258.2	603.6 ± 217.5

Таблица 4. Средние значения и отклонения для $D_{st} \leq -100$ нТ

Параметр	IND		CIR		Ejecta		MC		Sheath		MC + Ejecta	
	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$	$t=0$	$t=6$
D_{st} , нТ	-27.9 ± 31.8	-147.9 ± 69.8	-20.6 ± 25.5	-145.4 ± 51.6	-34.9 ± 30.9	-136.2 ± 39.6	-37.9 ± 38.1	-158.1 ± 46.5	-20.7 ± 31.5	-157.8 ± 58.7	-36.1 ± 34.1	-146.9 ± 47.1
D_{st}^* , нТ	-27.6 ± 20.3	-134.0 ± 20.6	-38.6 ± 32.0	-151.0 ± 41.4	-53.6 ± 35.1	-148.1 ± 34.7	-55.2 ± 34.2	-178.6 ± 42.9	-55.2 ± 33.5	-173.8 ± 71.8	-54.0 ± 34.9	-162.3 ± 46.9
$K_p \cdot 10$	56.1 ± 14.2	64.4 ± 10.8	53.4 ± 12.6	64.4 ± 10.0	48.0 ± 14.9	62.2 ± 11.1	62.9 ± 13.3	67.2 ± 11.1	62.8 ± 12.4	66.8 ± 11.0	54.3 ± 16.0	64.4 ± 11.6
B_x , нТ	2.4 ± 6.9	0.05 ± 7.1	0.7 ± 7.7	0.6 ± 5.7	-0.8 ± 4.4	1.2 ± 4.6	-0.7 ± 7.0	-0.9 ± 6.0	-0.4 ± 7.1	-1.7 ± 7.5	-0.8 ± 5.7	0.3 ± 5.3
B_y , нТ	1.1 ± 9.8	3.9 ± 9.2	-1.9 ± 8.2	0.2 ± 10.3	1.9 ± 7.3	0.4 ± 8.9	-2.7 ± 13.1	-0.01 ± 9.7	0.3 ± 11.4	2.7 ± 9.8	-0.1 ± 10.5	0.2 ± 9.3
B_z , нТ	16.8 ± 6.6	14.8 ± 5.197	16.1 ± 4.5	14.9 ± 5.9	12.4 ± 3.1	13.4 ± 5.2	21.1 ± 5.0	17.8 ± 4.7	19.0 ± 6.7	16.9 ± 6.5	16.3 ± 5.9	15.2 ± 5.4
B_z , нТ	-7.1 ± 6.3	-4.9 ± 4.1	-7.4 ± 5.1	-4.2 ± 6.8	-4.7 ± 5.7	-6.5 ± 5.9	-13.5 ± 4.5	-9.1 ± 9.6	-3.5 ± 7.3	-4.9 ± 8.9	-8.6 ± 6.796	-7.5 ± 7.781
n , см ⁻³	22.4 ± 13.7	12.1 ± 5.3	23.6 ± 12.8	15.5 ± 6.9	16.8 ± 7.6	11.5 ± 8.1	21.3 ± 13.0	14.6 ± 11.3	30.2 ± 22.5	18.9 ± 16.2	18.2 ± 9.9	12.5 ± 9.4
V , км/с	496 ± 127	490 ± 114	466 ± 108	520 ± 93	516 ± 119	525 ± 119	615 ± 153	509 ± 135	628 ± 175	620 ± 168	548 ± 139	519 ± 125
P_k , нПа	8.2 ± 5.5	4.4 ± 1.8	8.6 ± 7.4	6.6 ± 2.5	7.5 ± 5.4	5.1 ± 4.8	12.5 ± 7.3	5.9 ± 4.6	18.0 ± 13.3	12.8 ± 13.4	9.1 ± 6.5	5.3 ± 4.8
T , К, 10^5	1.8 ± 1.4	0.99 ± 0.5	0.9 ± 0.7	2.0 ± 1.3	0.6 ± 0.7	0.6 ± 0.5	1.1 ± 1.5	0.3 ± 1.9	1.9 ± 1.1	1.7 ± 0.1	0.8 ± 1.0	0.5 ± 0.5
P_p , 10^{-2} нПа	6.0 ± 7.3	3.7 ± 4.3	3.5 ± 3.6	3.9 ± 2.5	1.3 ± 1.3	0.8 ± 0.9	1.9 ± 1.6	0.7 ± 1.0	13.1 ± 17.5	4.9 ± 5.0	1.5 ± 1.4	0.7 ± 0.9
β	0.57 ± 0.52	0.70 ± 0.66	0.38 ± 0.41	0.77 ± 0.53	0.26 ± 0.22	0.15 ± 0.13	0.14 ± 0.16	0.16 ± 0.44	1.88 ± 3.79	1.10 ± 3.05	0.21 ± 0.20	0.15 ± 0.31
T/T_{ex}	2.49 ± 2.94	2.03 ± 1.53	1.27 ± 0.75	1.88 ± 1.07	0.72 ± 0.87	0.59 ± 0.72	0.56 ± 0.41	0.35 ± 0.26	2.09 ± 1.82	1.72 ± 1.21	0.67 ± 0.77	0.50 ± 0.60
E_y , мВ/м	-3.42 ± 2.69	-2.68 ± 1.58	-3.09 ± 2.41	-1.34 ± 2.52	-2.21 ± 2.93	-3.02 ± 2.55	-7.65 ± 4.03	-4.15 ± 6.04	-2.81 ± 4.54	-2.53 ± 4.54	-4.28 ± 4.30	-3.46 ± 4.30
AE , нТ	648.5 ± 325.2	742.9 ± 233.2	675.8 ± 291.1	762.5 ± 220.7	667.0 ± 382.4	651.3 ± 226.2	913.9 ± 311.5	824.4 ± 272.5	795.9 ± 414.3	708.2 ± 248.4	772.8 ± 374.3	718.8 ± 259.4

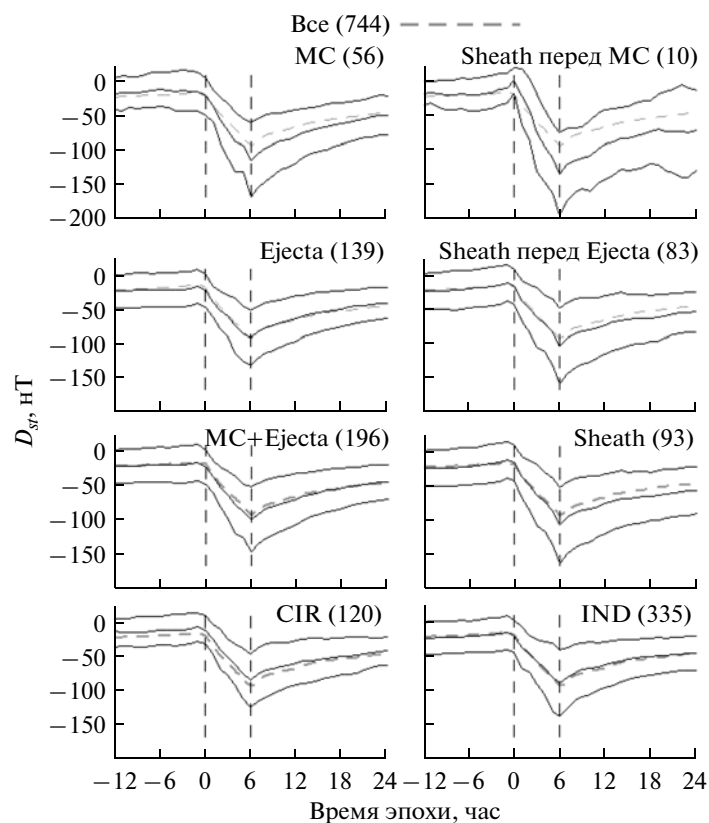


Рис. 1. Динамика поведения D_{st} индекса для различных типов солнечного ветра (см. текст).

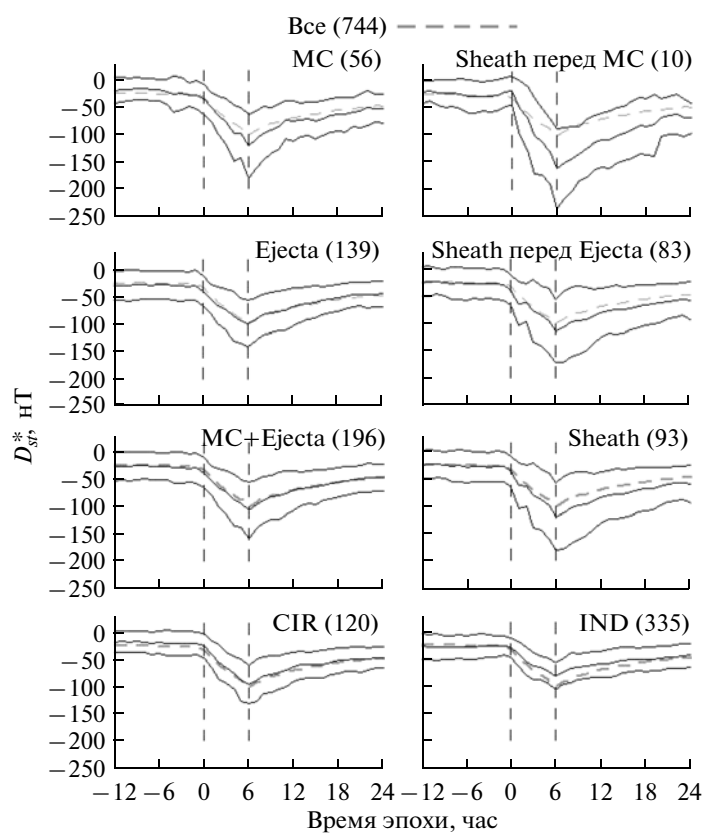
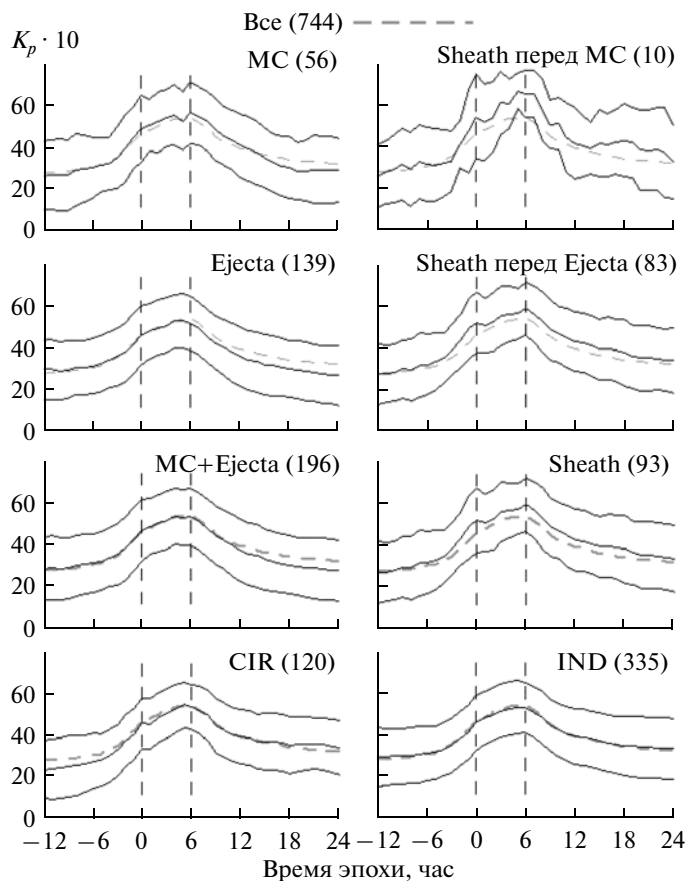
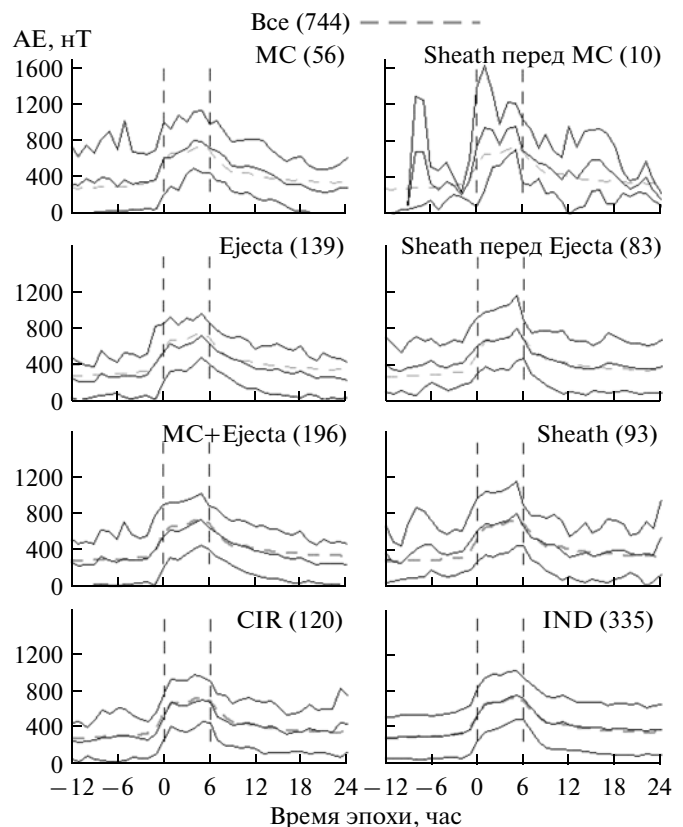


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для скорректированного D_{st}^* индекса.

Рис. 3. То же, что на рис. 1, для K_p индекса.

ние средней величины, а верхней и нижней (для некоторых параметров эта линия, представленная в логарифмическом масштабе, может быть прерывающейся или отсутствовать вовсе) линиями — среднее значение с прибавленной или вычтенной дисперсией. Штриховой серой линией показано поведение параметра для “всех” типов солнечного ветра (т.е. без селекции по типам солнечного ветра), и эта линия позволяет сравнить поведение параметра для данного типа солнечного ветра относительно некоторого “среднего” поведения.

На рис. 1 и 2 представлена динамика простого D_{st} и скорректированного D_{st}^* индексов, соответственно. Так как именно по D_{st} индексу мы отбирали события, то для всех типов солнечного ветра в диапазоне времен “0–6” наблюдается монотонное уменьшение обоих индексов. Наиболее крутое изменение индексов наблюдается для Sheath перед MC. Для MC и Sheath перед MC индекс D_{st} проходит ниже, чем кривая для “всех”, а для CIR выше, т.е. магнитные бури, генерированные MC и Sheath перед MC, в среднем сильнее, а генерированные CIR, слабее,

Рис. 4. То же, что на рис. 1, для AE индекса.

чем в среднем. Поведение D_{st}^* такое же, как для D_{st} , но в целом отличия от “всех” стали меньше.

На рис. 3 и 4 показан временной ход K_p и AE индексов. В отличие от D_{st} и D_{st}^* индексов K_p и AE индексы для всех типов солнечного ветра начинают расти за 3–5 часов до времени “0” и медленно спадают после времени “6”. Активность по обоим индексам для всех типов солнечного ветра слабо растет внутри интервала “0–6” и достигает максимума вблизи времени “6”. По K_p индексу активность для MC и Sheath выше, чем для “всех” типов, а по AE индексу активность выше только для Sheath перед MC.

Поведение переносной скорости солнечного ветра V показано на рис. 5. Для всех типов солнечного ветра скорость растет вблизи времени “0”. Для MC, Ejecta и “неопределенного” типа V не изменяется в диапазоне “0–6”, а для CIR и Sheath растет. Для MC, Ejecta и Sheath скорость падает после времени “6”, для “неопределенного” типа не изменяется, а для CIR растет. В диапазоне “0–6” для MC, Ejecta и “неопределенного” типа V близка по величине к кривой для “всех”, для CIR — ниже и Sheath — выше.

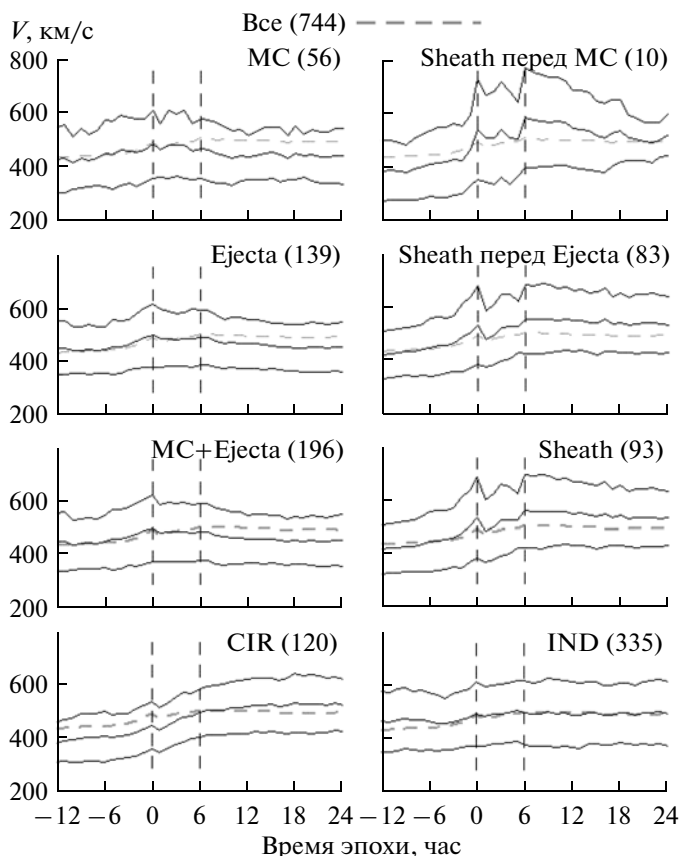


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для переносной скорости солнечного ветра V .

Поведение температуры протонов T и относительной температуры T/T_{ex} (T_{ex} является температурой, оцененной по скорости на основании средней зависимости температуры и скорости солнечного ветра [22]), показаны на рис. 6 и 7. Абсолютная и относительная температуры для CIR и всех типов Sheath растут за 3–5 часов до времени “0” и не изменяются для остальных типов солнечного ветра. В диапазоне “0–6” T падает для MC и Ejecta, а для всех остальных типов растет, T/T_{ex} также падает для MC и Ejecta, для CIR — растет, а для остальных меняется мало. Для времен более времени “6” обе температуры падают для CIR и всех типов Sheath и мало изменяются для остальных типов солнечного ветра. Обе температуры ниже средней кривой для MC и Ejecta, выше для CIR и всех типов Sheath и мало отличаются для “неопределенного” типа.

На рис. 8 представлен временной ход концентрации ионов солнечного ветра n . Для всех типов солнечного ветра n начинает расти за несколько часов до времени “0”, после времени “6” для MC, Ejecta и “неопределенного” типа n сохраняется неизменной, а для CIR и Sheath продолжает уменьшаться.

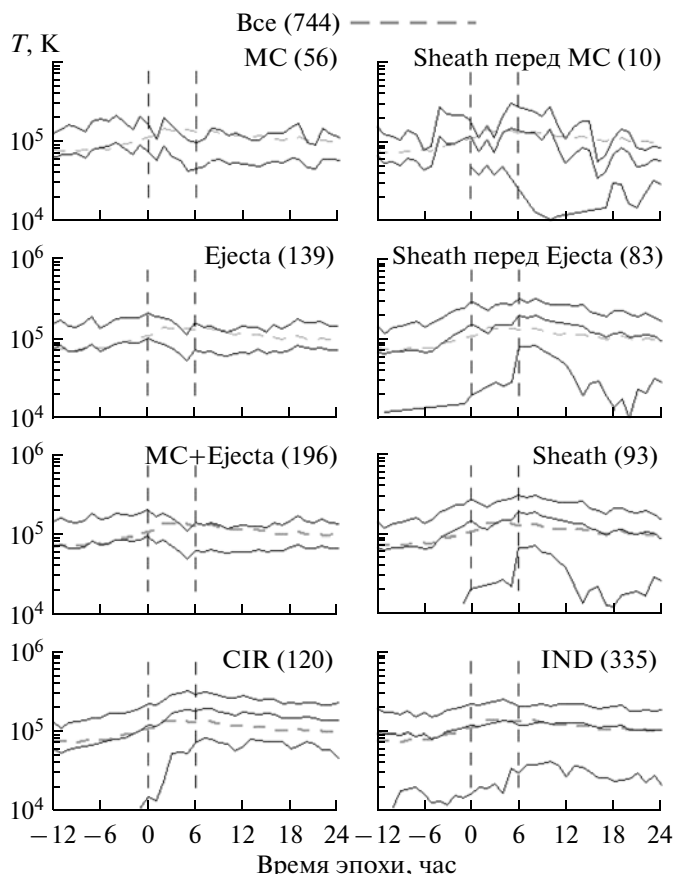


Рис. 6. То же, что на рис. 1, для температуры протонов солнечного ветра T .

Концентрация n достигает максимума около времени “0” и падает к времени “6” для всех типов солнечного ветра. Для MC, Ejecta и “неопределенного” типа n ниже кривой для “всех”, для CIR и Sheath — выше.

Временной ход динамического P_k и теплового P_t давления солнечного ветра представлен на рис. 9 и 10. Поведение динамического давления полностью повторяет поведение концентрации n на рис. 8. Тепловое давление также ведет себя аналогично динамике концентрации за одним исключением: для CIR тепловое давление не изменяется в диапазоне времен “0–6”.

На рис. 11 показана динамика модуля межпланетного магнитного поля B . Для всех типов солнечного ветра B начинает расти за несколько часов до времени “0” (для Sheath перед MC за 1 час до времени “0” наблюдается сильное возрастание на 10 нТ), достигает максимума в диапазоне “0–6” и далее медленно убывает с ростом времени. Для типов CIR, всех Sheath, “неопределенных” и “все” в диапазоне “0–6” имеется тенденция к уменьшению B с ростом

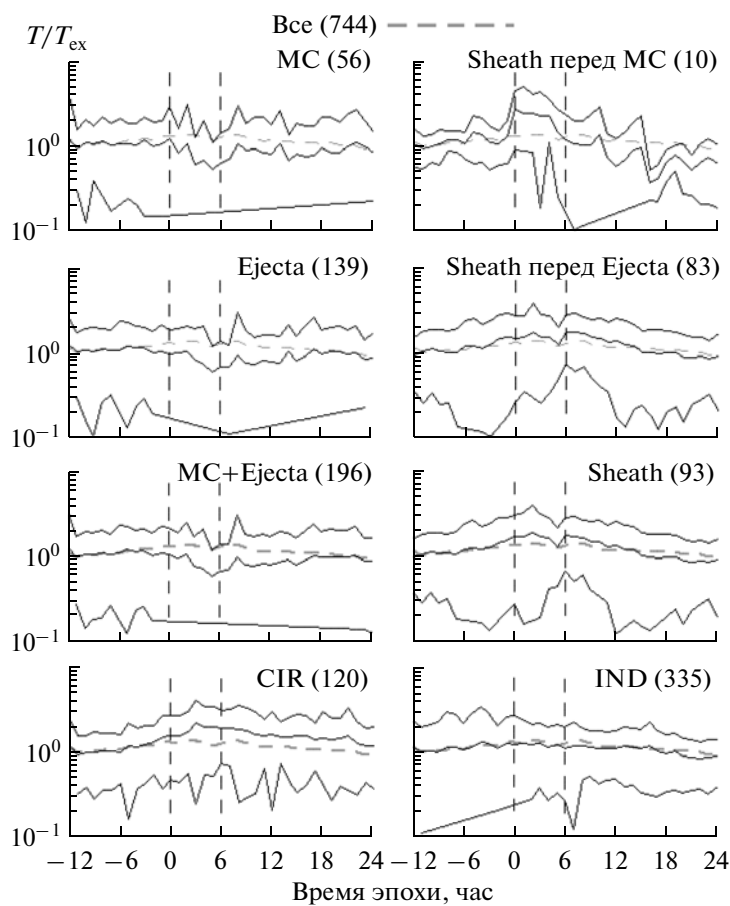


Рис. 7. То же, что на рис. 1, для относительной температуры солнечного ветра T/T_{ex} .

времени. Кривые для MC, CIR и всех Sheath B выше, чем для типа “все”, а “неопределенных” — ниже.

На рис. 12 и 13 показаны B_x и B_y компоненты ММП. За исключением Sheath перед MC во всех типах солнечного ветра B_x и B_y меняются мало вблизи нулевых значений на всем протяжении от -12 до 24 . Для Sheath перед MC B_x сильно падает за 1 час до времени “0”, а затем возрастает вблизи времени “6” до величины как у типа “все” и после этого времени колеблется с большой амплитудой в отрицательной области значений. Компонента B_y для этого типа ветра при -6 часов принимает положительные значения, при -2 часа — отрицательные значения, около времени “0” принимает нулевые значения и далее растет до величины около 10 нТ вблизи времени “6” и далее в течение 12 часов медленно спадает до нулевых значений.

Как хорошо известно, наиболее критичными для возбуждения магнитных бурь являются B_z компонента ММП и E_y компонента электрического поля, которые показаны на рисунках 14 и 15. Для всех типов солнечного ветра оба эти параметра задолго до времени “0” имеют нулевые значения, за $1-3$ ча-

са принимают отрицательные значения, мало изменяются в диапазоне “1–5”, в диапазоне “5–6” начинают расти и достигают нулевых значений и далее сохраняются (только для Sheath перед MC они имеют положительные значения для времени более “6”). Для MC и Sheath перед MC B_z и E_y имеют значения ниже, чем для типа “все”, для остальных типов — значения такие же, как и для типа “все”.

На рис. 16 показано поведение β -параметра (отношение теплового и магнитного давлений). За $1-2$ часа до времени “0” β падает для MC и Ejecta и растет для CIR и Sheath. В интервале времени “0–6” для MC и Ejecta β уменьшается с ростом времени, для CIR и Sheath перед MC растет и для остальных типов не изменяется. Для MC и Ejecta β ниже кривой для “всех”, для CIR и Sheath перед MC — выше.

Данные, представленные на рис. 1–16, суммированы в табл. 2. В этой таблице для различных межпланетных источников магнитных бурь с $D_{st} \leq -50$ нТ показаны средние значения и дисперсии в моменты времени “0” и “6” (см. колонки, обозначенные как “0” и “6”) для ряда параметров солнечного ветра, ММП и магнитосферных индексов. Величины, со-

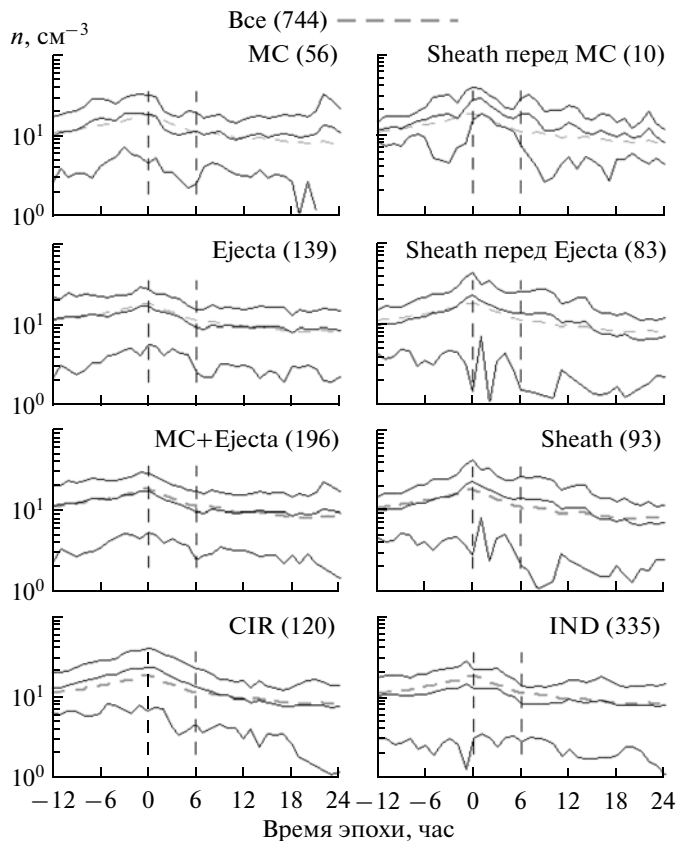


Рис. 8. То же, что на рис. 1, для концентрации ионов солнечного ветра n .

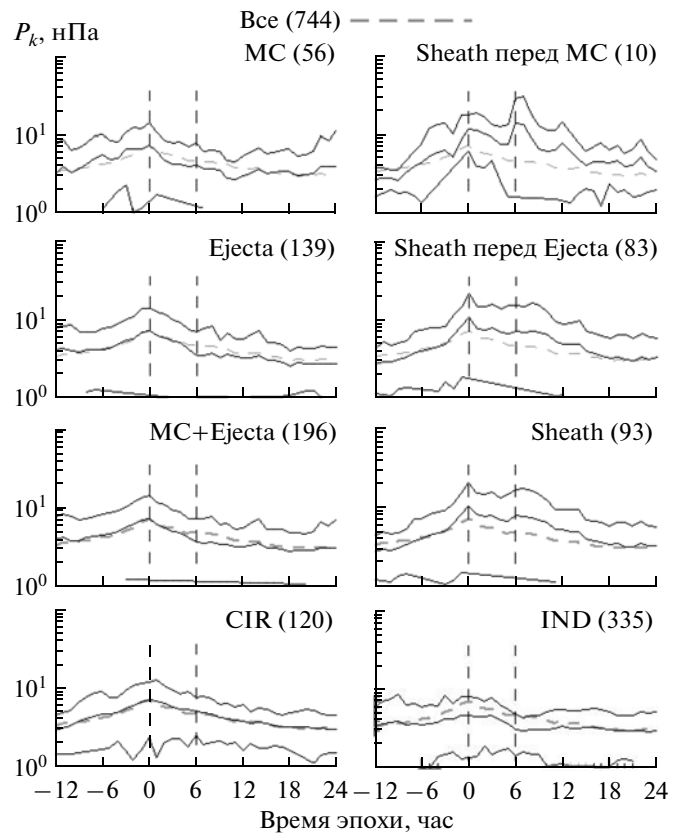


Рис. 9. То же, что на рис. 1, для динамического давления солнечного ветра P_k .

державшиеся в табл. 2, дают количественные оценки тех особенностей, которые качественно обсуждались выше при анализе рисунков.

Мы провели аналогичный анализ отдельно для умеренных ($-100 < D_{st} \leq -50$ нТ) и сильных ($D_{st} \leq -100$ нТ) бурь. Из-за недостатка места мы не приводим все рисунки, однако полученные данные представлены в табл. 3 и 4. Структура табл. 3 и 4 аналогична структуре табл. 2. Качественно табл. 3 и 4 повторяют результаты табл. 2 и рис. 1–16. Однако нужно отметить, что способность более эффективной генерации магнитных бурь областью Sheath по сравнению с другими межпланетными источниками проявляется более сильно для сильных магнитных бурь с $D_{st} \leq -100$ нТ (более высокий градиент для Sheath). Также обращает на себя внимание тот факт, что при генерации более сильных бурь большинство параметров сильнее отклоняется от средних параметров, чем для слабых и умеренных бурь, независимо от типа межпланетного источника. Этот вывод в общем виде звучит тривиально, но вопрос о том, какие конкретно параметры на это влияют, остается открытым. Эта тенденция будет более

подробно описана в наших последующих публикациях.

ОБСУЖДЕНИЕ

Так как статья во многом носит методический характер, необходимо отметить, что методика двойного МНЭ, по-видимому, впервые использованная для подобного анализа, позволяет воспроизвести ранее полученные результаты. Это, прежде всего факт, что независимо от вида межпланетного источника начало магнитной бури наступает через 1–2 часа после поворота ММП к югу ($B_z < 0$), и окончание главной фазы бури и начало восстановительной фазы наблюдаются через 1–2 часа после исчезновения южной компоненты ММП. Так как использованная методика не изменяет временную шкалу данных до начала магнитной бури для МНЭ со временем эпохи равным началу бури, то полученные в этом интервале времен данные хорошо согласуются, как с предыдущими результатами, полученными другими авторами при соответствующей селекции данных по типам межпланетных источников или без такой селекции (см. соответствующую

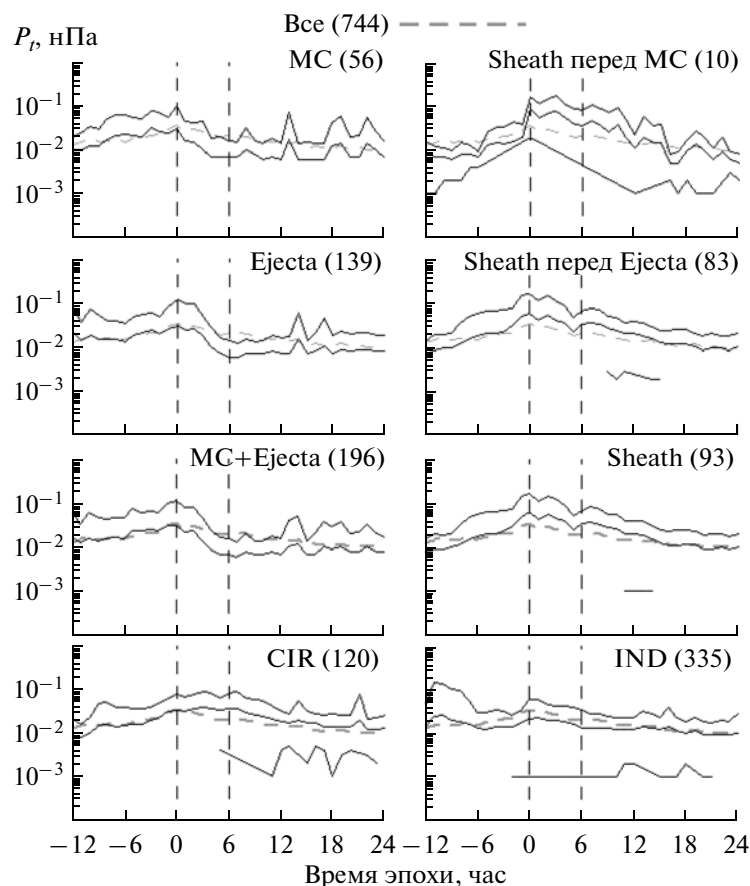


Рис. 10. То же, что на рис. 1, для теплового давления солнечного ветра P_s .

щие ссылки в табл. 1), так и с предыдущими нашими результатами [15–17]. По аналогичным причинам полученные результаты согласуются с соответствующими предыдущими результатами и в интервале после минимума D_{st} индекса на фазе восстановления. В области времен “0–6” наиболее крутое изменение индексов D_{st} и D_{st}^* наблюдается для Sheath перед MC, т.е. наиболее эффективная генерация магнитной бури наблюдается для Sheath перед MC, что согласуется с более ранними результатами [9, 15, 16, 29]. Небольшие отличия от наших предыдущих результатов связаны с несколько иными критериями селекции типов солнечного ветра (прежде всего разделение ICME на MC и Ejecta), а также с тем, что вместо критерия $D_{st} < -60$ нТ для магнитных бурь в предыдущих работах мы в данной работе использовали традиционный критерий $D_{st} \leq -50$ нТ. Это совпадение представленных выше результатов с ранее полученными результатами является надежной верификацией использованной методики. В то же время используемая методика ДМНЭ позволила получить некоторые новые результаты.

Разделение ICME на MC и Ejecta показало, что упомянутая выше более высокая эффективность Sheath по сравнению с MC наблюдается исключительно в Sheath перед MC, а в Sheath перед Ejecta она приблизительно такая же, как и в Ejecta. Так как число MC приблизительно на порядок меньше числа Ejecta [22], то для ICME (т.е. без селекции ICME на MC и Ejecta) различия эффективности Sheath и ICME не обнаруживаются. Параметры в Sheath перед MC и Sheath перед Ejecta отличаются сравнительно мало, поэтому нельзя исключить возможность того, что упомянутый факт связан с различиями параметров в MC и Ejecta. Этот вопрос будет предметом дальнейших исследований.

Обычным поведением параметров $B_z(E_y)$ во времени (с характерным масштабом наблюдений – часы) при возбуждении магнитной бури является достаточно резкое уменьшение до заметной отрицательной величины и затем резкое возрастание с характерным временем уменьшения и нарастания несколько часов. По такому же временному сценарию развивается и поведение D_{st} (D_{st}^*) индекса на

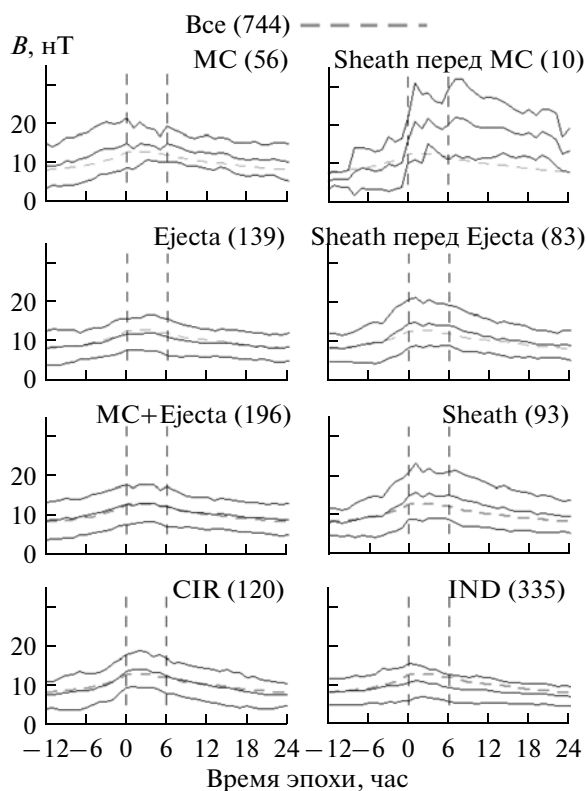


Рис. 11. То же, что на рис. 1, для модуля межпланетного магнитного поля B .

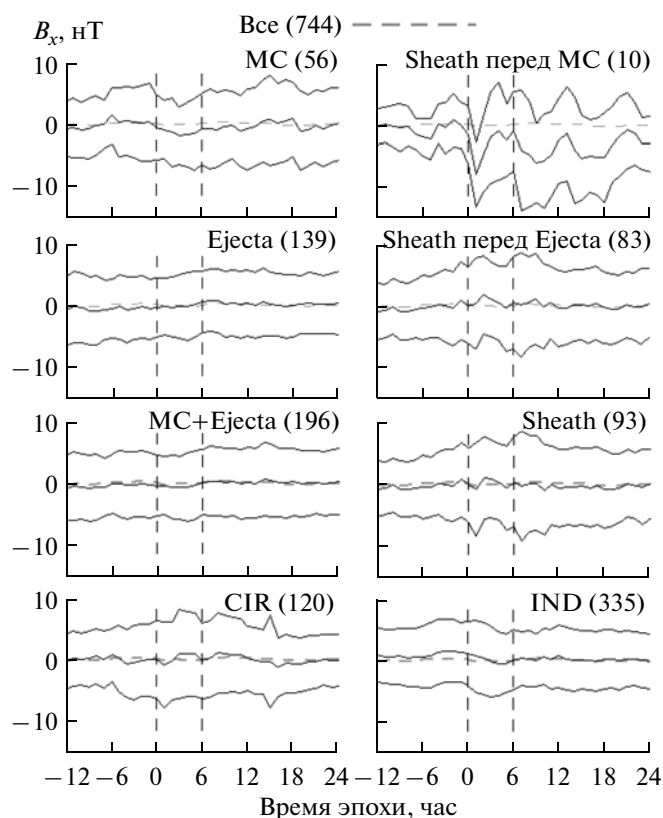


Рис. 12. То же, что на рис. 1, для B_x компоненты межпланетного магнитного поля.

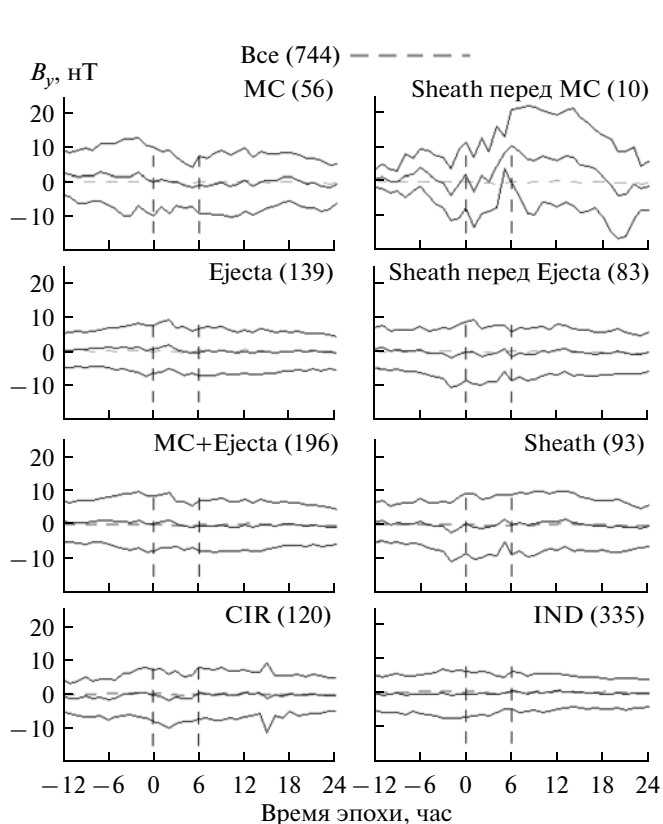


Рис. 13. То же, что на рис. 1, для B_y компоненты межпланетного магнитного поля.

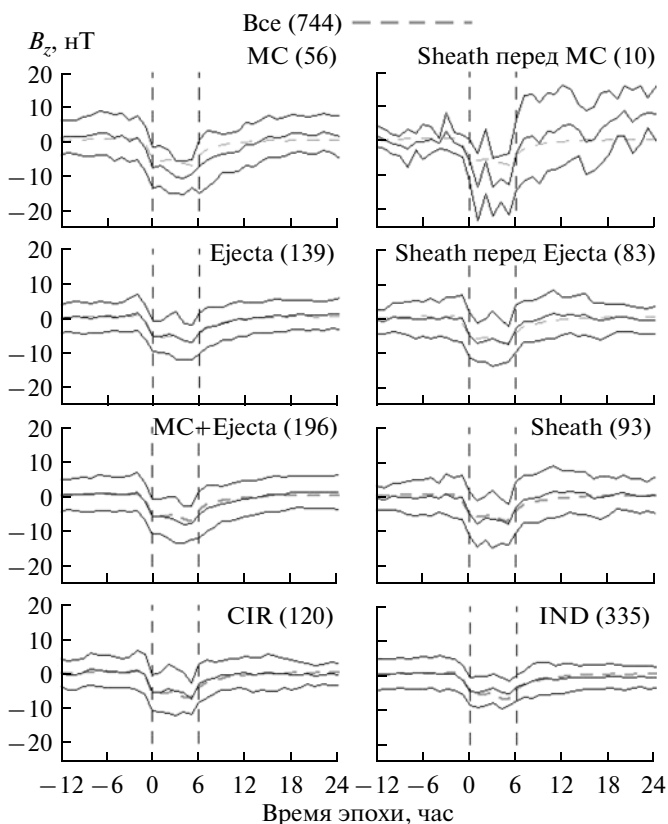


Рис. 14. То же, что на рис. 1, для компоненты B_z межпланетного магнитного поля.

главной фазе бури, но с более пологим возрастанием индекса на восстановительной фазе. Поэтому складывается впечатление, что развитие магнитной бури (поведение D_{st} (D_{st}^*) индекса) на главной фазе повторяет поведение B_z (E_y) во времени с некоторым временным сдвигом. Однако сравнение среднего поведения этих параметров (см. рисунки 1, 2, 14 и 15) показывает, что изменение B_z (E_y) во времени практически отсутствует для всех типов межпланетных источников, тем не менее, наблюдается почти линейное уменьшение D_{st} (D_{st}^*) индекса. Это означает, что поведение D_{st} (D_{st}^*) индекса не повторяет (с возможным сдвигом) поведение B_z (E_y), а уменьшается при наличии отрицательного B_z (E_y) вне зависимости от величины или изменяется пропорционально интегралу B_z (E_y) по времени. Последнее означает, что процесс генерации бури при отрицательном B_z (E_y) обладает “памятью” о предыстории. Тот факт, что после “выключения” отрицательной B_z (E_y) через 1–2 часа наступает фаза восстановления, говорит о том, что эта “память” должна составлять не менее 2 часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы выполнили анализ межпланетных источников 798 магнитных бурь с $D_{st} \leq -50$ нТл на основе архива данных OMNI для периода 1976–2000 годов. В качестве источников бурь были рассмотрены следующие крупномасштабные типы солнечного ветра: 145 магнитных бурь были вызваны событиями CIR, 96 магнитных бурь – Sheath (12 магнитных бурь генерированы областью Sheath перед MC, Sh_{MC} , и 84 магнитные бури – областью Sheath перед Ejecta, Sh_E); 62 магнитные бури связаны с магнитными облаками MC (причем 50 бурь вызваны MC с Sheath и 12 MC без Sheath); 161 магнитные бури связаны с событиями Ejecta (115 – Ejecta с Sheath, 46 – Ejecta без Sheath), источник остальных 334 магнитных бурь (т.е. 42% из 798 бурь) оказался неопределенным. Для анализа нами был, по-видимому, впервые использован двойной метод наложения эпох, в котором за опорные времена взяты моменты начала магнитной бури и минимума D_{st} индекса. Были получены следующие результаты.

1. На большой статистике подтвержден известный факт, что независимо от вида межпланетного источника начало магнитной бури наступает через 1–2 часа после поворота ММП к югу ($B_z < 0$), и окончание главной фазы бури и начало восстановительной фазы наблюдаются через 1–2 часа после исчезновения южной компоненты ММП.

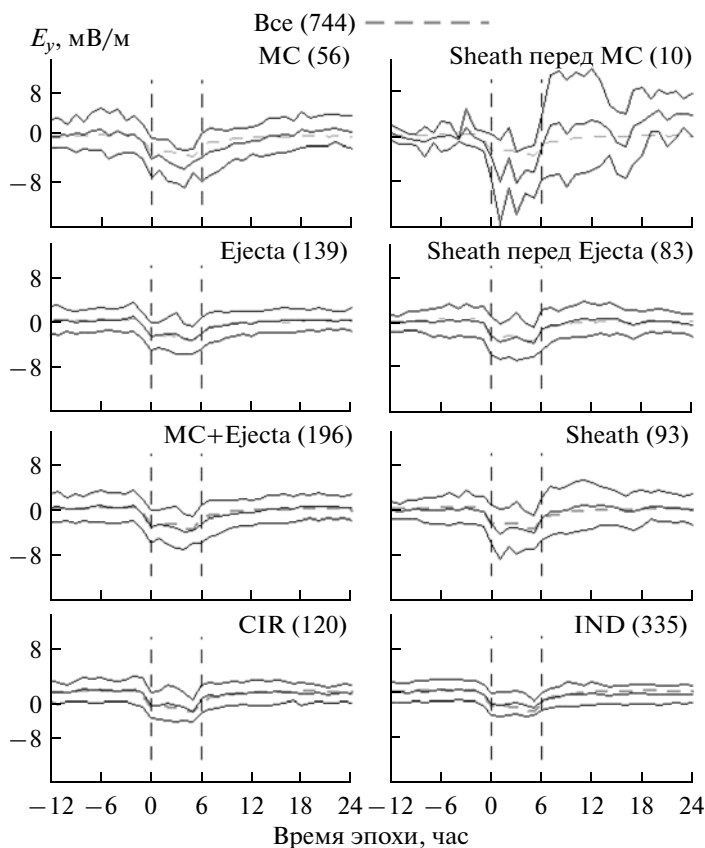


Рис. 15. То же, что на рис. 1, для электрического поля E_y .

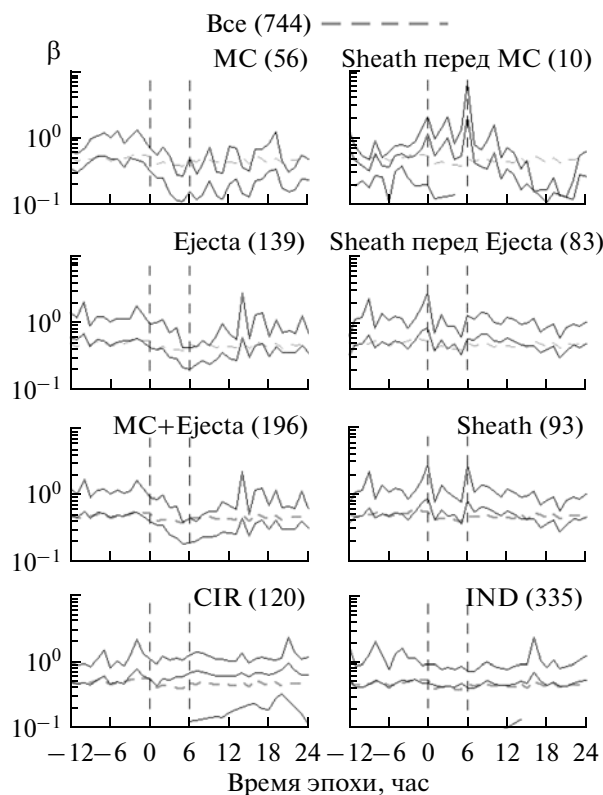


Рис. 16. То же, что на рис. 1, для параметра β (отношение теплового и магнитного давлений).

2. Подтвержден ранее полученный результат, что на главной фазе бури наиболее крутое изменение индексов D_{st} и D_{st}^* наблюдается для Sheath перед MC, т.е. наиболее эффективная генерация магнитной бури наблюдается для Sheath перед MC [9, 15, 16, 29]. Этот эффект более заметен для более сильных магнитных бурь. Для Sheath перед Ejecta этот эффект не обнаружен, и так как число Ejecta значительно превосходит число MC, то для ICME (т.е. без селекции на Ejecta и MC) этот эффект маскируется и не наблюдается.

3. Существуют заметные отличия между параметрами солнечного ветра и ММП для различных межпланетных источников магнитных бурь, в том числе и для Ejecta и MC. Этими отличиями могут объясняться различия в реакции магнитосферы на различные типы межпланетных источников. Подчеркнем, что различия в эффективности MC и Ejecta, а также Sheath перед ними, в данной работе исследованы впервые.

4. На главной фазе бури параметры B_z и E_y уменьшаются вблизи начала бури, возрастают вблизи конца главной фазы (минимума D_{st} и D_{st}^*) и мало изменяются между этими изменениями, в то время как D_{st} и D_{st}^* монотонно уменьшаются, приблизительно пропорционально интегралу B_z и E_y по времени. Такое поведение индексов согласуется с предположением, что процесс генерации бури связан не просто с текущим значением B_z и E_y , а обладает памятью о предыстории. Таким образом, факт, что “память о предыстории” процесса генерации магнитной бури существует, был убедительно показан нами независимым методом.

Полученные результаты показывают, что использованный двойной метод наложенных эпох может быть успешно применен для изучения динамики параметров на главной фазе магнитных бурь, имеющих разные длительности. Обнаруженная тенденция того, что ряд параметров солнечного ветра и ММП во время сильных бурь демонстрирует более заметное отклонение от их средних значений по сравнению с малыми и умеренными бурями, может помочь выявить дополнительные геоэффективные параметры и дать дополнительную информацию о механизмах генерации магнитных бурь. Этот вопрос будет предметом дальнейших публикаций.

Авторы выражают свою благодарность авторам базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) за возможность ею пользоваться. Работа поддержана грантами РФФИ N 04-02-16131, 07-02-00042, а также Программой ОФН РАН №15 “Плазменные процессы в солнечной системе”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Russell C.T., McPherron R.L., Burton R.K. On the Cause of Magnetic Storms // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 1105.
2. Perreault P., Akasofu S.-J. A study of geomagnetic storms // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1978. №. 54. P. 547.
3. Akasofu S.-J. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1981. V. 28. P. 121–190.
4. Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y. et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № A4. P. 5771.
5. Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. 1961. № 6. P. 47–48.
6. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D. The interplanetary causes of magnetic storms // Magnetic Storms. Geophys. Monogr. Ser. 1997. V. 98. P. 77. AGU. Washington. D. C.
7. Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 529.
8. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976–2000 гг. // Космич. исслед. 2002. Т. 40. № 1. С. 3–16. (Cosmic. Research. P. 1).
9. Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J. Importance of post-shock streams and sheath region as drivers of intense magnetospheric storms and high-latitude activity // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1729.
10. Alves M.V., Echer E., Gonzalez W.D. Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by D_{st} index // J. Geophys. Res. 2006. 111. A07S05, doi:10.1029/2005JA011379.
11. Yermolaev Yu.I.; Yermolaev M.Yu., Lodkina I.G. Comment on “A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum” by J.-C. Zhang, M.W. Liemohn, J.U. Kozyra, M.F. Thomsen, H.A. Elliott, and J.M. Weygand // Препринт 2006. <http://arxiv.org/abs/physics/0603251>.
12. Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A07S08. doi:10.1029/2005JA011447.
13. Denton M.H., Borovsky J.E. et al. Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR dominated solar wind // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A07S07. doi:10.1029/2005JA011436.
14. Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Karinen A., Mursula K. Asymmetric development of magnetospheric storms during magnetic clouds and sheath regions // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L06107. doi:10.1029/2005GL024894.
15. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. 2007. Т. 45. № 1. С. 3–11. (Cosmic Research. P. 1–8).
16. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям. 2 // Космич. исслед. 2007. Т. 45. № 6. С. 489–498. (Cosmic Research. P. 461–470).
17. Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Nikolaeva N.S., Lodkina L.G. Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms // Bulg. J. Phys. 2007. V. 34. P. 128–135.

18. *Pulkkinen T.I., Partamies N. et al.* Differences in geomagnetic storms driven by magnetic clouds and ICME sheath regions // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L02105. doi:10.1029/2006GL027775.
19. *Pulkkinen T.I., Partamies N., McPherron R.L. et al.* Comparative statistical analysis of storm time activations and sawtooth events // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A01205. doi:10.1029/2006JA012024.
20. *Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R.* Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 6673–6684.
21. *Russell C.T., Mulligan T.* The true dimensions of interplanetary coronal mass ejections // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29. P. 301.
22. *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113. (Cosmic Research. P. 81–94).
23. *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра // *Космич. исслед.* 2010. Т. 48. № 1. (Cosmic Research. P. 1–30).
24. *Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Schwenn R.* Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. doi:10.1029/2001JA900171.
25. *Wu C.-C., Lepping R.P.* Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 4 years of Wind // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1314. doi:10.1029/2001JA000161.
26. *Zhang J., et al.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($D_{st} < -100$ nT) during 1996–2005 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A10102. doi:10.1029/2007JA012321.
27. *Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., C. Gonzalez A.L.* Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($D_{st} < -100$ nT) during solar cycle 23 (1996–2006) // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A05221. doi:10.1029/2007JA012744.
28. *Badruddin, Singh Y.P.* Geoeffectiveness of magnetic cloud, shock/sheath, interaction region, high-speed stream and their combined occurrence // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. P. 318–331.
29. *Vieira L.E.A., Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T.* Storm-intensity criteria for several classes of the driving interplanetary structures // *Sol. Phys.* 2004. V. 223. № 1–2. P. 245–258.
30. *Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A.* Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms // *J. of Atmosph. and Sol.-Terrest. Phys.* 2009. V. 71. P. 1023–1031.
31. *Longden N., Denton M.H., Honary F.* Particle precipitation during ICME-driven and CIR-driven geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A06205. doi:10.1029/2007JA012752
32. *Despirak I.V.; Lubchich A.A.; Yahnin A.G. et al.* Development of substorm bulges during different solar wind structures // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. № 5. P. 1951–1960.
33. *McPherron R.L., Kepko L., Pulkkinen T.I. et al.* Changes in the response of the AL Index with solar cycle and epoch within a corotating interaction region // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 3165–3178.
34. *Denton M.H., Thomsen M.F., Korth H. et al.* Bulk plasma properties at geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A07223. doi:10.1029/2004JA010861.
35. *Zhang J.-C., Liemohn M.W., Kozyra, J.U., et al.* A Statistical Comparison of Solar Wind Sources of Moderate and Intense Geomagnetic Storms at Solar Minimum and Maximum // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. doi:10.1029/2005JA011065.
36. *Liemohn M.W., Zhang J.-C., Thomsen M.F. et al.* Plasma properties of superstorms at geosynchronous orbit: How different are they? // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L06S06, doi:10.1029/2007GL031717.
37. *Ilie R., Liemohn M.W., Thomsen M.F. et al.* Influence of epoch time selection on the results of superposed epoch analysis using ACE and MPA data // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A00A14, doi:10.1029/2008JA013241.
38. *Miyoshi Y., Kataoka R.* Ring Current Ions and Radiation Belt Electrons during Geomagnetic Storms Driven by Coronal Mass Ejections and Corotating Interaction Regions // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. (L21105, doi: 10.1029/2005GL024590).
39. *Badruddin.* Transient perturbations and their effects in the heliosphere, the geo-magnetosphere and the earth's atmosphere: space weather perspective // *J. Astrophys. Astron.* 2006. № 27. P. 209.
40. *Taylor J.R., Lester M., Yeoman T.K.* A superposed epoch analysis of geomagnetic storms // *Ann. Geophys.* 1994. V. 12. P. 612–624.
41. *Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al.* Magnetic Flux Redistribution in the Storm Time Magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 7697.
42. *Davis C.J., Wild M.N., Lockwood M., Tulunay Y.K.* Ionospheric and geomagnetic responses to changes in IMF BZ: a superposed epoch study // *Ann. Geophys.* 1997. V. 15. P. 217–230.
43. *Yokoyama N., Kamide Y.* Statistical nature of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № A7. P. 14215.
44. *Loewe C.A., Prolss G.W.* Classification and Mean Behavior of Magnetic Storms // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 14209.
45. *Lyatsky W., Tan A.* Solar Wind Disturbances Responsible for Geomagnetic Storms // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A3. P. 1134. doi:10.1029/2001JA005057.
46. *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N. et al.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review // *Planet. and Space Science.* 2005. V. 53. № 1/3. P. 189–196.
47. *Vichare G., Alex S., Lakhina G.S.* Some characteristics of intense geomagnetic storms and their energy budget // *J. Geophys. Res.* 2005. V.110. A03204. doi:10.1029/2004JA010418.
48. *Gonzalez W.D., Echer E.* A Study on the Peak Dst and Peak Negative Bz Relationship during Intense Geomagnetic Storms // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. № 18. doi:10.1029/2005GL023486.