

УДК 523.62-72

## РАЗЛИЧИЯ В ДИНАМИКЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ЧАСТИ МАГНИТНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ИНДУЦИРОВАННЫХ РАЗНЫМИ МЕЖПЛАНЕТНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

© 2020 г. Л. А. Дремухина<sup>1</sup>, \*, Ю. И. Ермолаев<sup>2</sup>, \*\*, И. Г. Лодкина<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, Россия<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

\*e-mail: lidadrem@yandex.ru

\*\*e-mail: yermol@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 14.03.2020 г.

После доработки 28.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Анализируются различия в динамике асимметричной части геомагнитного возмущения на средних и низких широтах в интервалы магнитных бурь, инициированных разными межпланетными источниками. Для анализа используются значения индексов  $SYM-H$ ,  $ASY-H$  и  $Dst$  из базы данных OMNI в периоды 58 интенсивных магнитных бурь с  $-270 \leq Dst_{\min} \leq -90$  нТл, зарегистрированных в 1995–2017 гг. и инициированных одной из структур солнечного ветра: области сжатия во взаимодействующих разно-скоростных потоках CIR; межпланетные СМЕ (ICME), включающие магнитные облака MC и “поршни” Ejecta; области сжатия Sheath перед ICME. Идентификация межпланетных источников проводилась на основе Каталога крупномасштабных структур солнечного ветра (см. сайт (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>)). Для анализа был использован двойной метод наложенных эпох с опорными моментами в начале бури и во время  $Dst_{\min}$ . Показано, что при бурях, инициированных Sheath, значения  $ASY-H$ , в среднем, на 40% выше, чем для бурь остальных групп, а его максимум опережает наступление  $Dst_{\min}$  на ~3 ч при Sheath-бурях и на 1–2 ч при MC-бурях, что может свидетельствовать о более интенсивном и неравномерном поступлении энергии в эти периоды. Предполагается, что такое поступление энергии может обеспечиваться потоком протонов с энергиями >10 МэВ, наблюдаемых на геостационарных КА GOES, возрастающим более чем на два порядка в интервалы Sheath-бурь по сравнению с бурями остальных групп.

DOI: 10.31857/S0016794020060036

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование магнитных бурь и связанных с ними процессов передачи энергии из солнечного ветра (СВ) в магнитосферу, ионосферу и верхнюю атмосферу Земли является важным для понимания физической картины солнечно-земных связей. Установлено, что магнитные бури развиваются при подходе к Земле возмущенных структур СВ, в которых может формироваться южная составляющая межпланетного магнитного поля (ММП)  $B_z$ . С поворотом  $B_z$  ММП к югу в результате процесса пересоединения межпланетного и геомагнитного полей происходит усиление поступления энергии СВ в магнитосферу и, как следствие этого, усиление имеющихся и генерация новых токовых систем, приводящих к возмущению спокойного геомагнитного поля [Dungey, 1961]. Несмотря на то, что общие связи между параметрами плазмы СВ и ММП и магнитосферной активностью за последние полвека достаточно

хорошо изучены [Russell et al., 1974; Burton et al., 1975; Perrault and Akasofu, 1978; Akasofu, 1983; Gonzalez et al., 1994; Gonzalez and Echer, 2005], остается не до конца ясным вопрос о зависимости геомагнитной возмущенности, в частности магнитных бурь, от типа их межпланетных источников (драйверов).

Согласно каталога крупномасштабных структур СВ [Ермолаев и др., 2009], в нем можно выделить геоэффективные (возмущенные) структуры двух видов: ICME (магнитные облака MC и “поршни” Ejecta) и сжатые потоки СВ, включающие области сжатия между медленным и быстрым потоками СВ (CIR) и области компрессии Sheath перед быстрыми MC и Ejecta. Эти типы СВ обладают геоэффективностью, так как могут включать в себя длительную южную  $B_z$  ММП [Gonzalez et al., 1999; Gosling and Pizzo, 1999; Crooker, 2000; Bothmer, 2004]. Уже не подлежит сомнению, что различия межпланетных источни-

ков, приводящих к магнитным бурям, с разными физическими характеристиками, размерами и распределением параметров плазмы и ММП внутри них могут приводить к различию в магнитосферном отклике, в том числе в развитии магнитных бурь [Vorovsky et al., 2006; Huttunen et al., 2006; Pulkkinen et al., 2007; Ермолаев и др., 2007, 2010, 2011; Николаева и др., 2012а, 2012б, 2017; Yermolaev et al., 2014; Despirak et al., 2018; Дремухина и др., 2019; Бороев и Васильев, 2020, и ссылки в них].

Различия в отклике магнитосферы на разные геоэффективные межпланетные источники обычно рассматриваются на основе анализа геомагнитных индексов, характеризующих интенсивность разных магнитосферных токовых систем. Чаще анализируются различия в зависимости между геоэффективными параметрами СВ и высокоширотными ( $AE$ ,  $AU$ ,  $AL$ ) и низкоширотными ( $Dst$ ,  $Kp$ ) индексами для пар межпланетных источников, таких как CME- и CIR-события [см., например, Vorovsky et al., 2006; Plotnikov and Barkova, 2007; Longden et al., 2008; Boroev and Vasiliev, 2018; Boroev, 2019; Бороев и Васильев, 2020 и ссылки в них]. При этом используются разные критерии при определении источников магнитных бурь. Так в работе [Vorovsky et al., 2006], в которой обсуждается 21 различие в магнитосферных проявлениях при MC- и CIR-бурях, такие как плотность и температура плазменного слоя, формирование новых радиационных поясов, степень искажения (вытягивания) дипольного геомагнитного поля в хвостовой части магнитосферы и т.п., к MC-бурям отнесены все бури, связанные со структурами MC, Ejecta и Sheath, а к CIR-бурям – с рекуррентными высокоскоростными потоками. В работе [Plotnikov and Barkova, 2007] рассматриваются бури, инициированные только магнитными облаками MC и высокоскоростными потоками CIR, и получена линейная зависимость максимальных значений  $|Dst|$  и  $AE$  от электрического поля СВ ( $E_y$ ) на главной фазе для CIR-бурь и нелинейная для MC-бурь. В отличие от упомянутой выше, в работе [Boroev, 2019] была получена линейная зависимость средних (за главную фазу) значений  $AE$  от среднего  $E_y$  как для CIR- так и для MC-бурь. При этом к MC были отнесены транзиентные события ICME, а к CIR – высокоскоростные потоки. В работе [Despirak et al., 2018] были проанализированы магнитосферные суббури разных видов, развивающиеся на широтах от авроральных  $\sim 70^\circ$  и выше (так называемые “expanded”), и наблюдаемые на геомагнитных широтах  $>70^\circ$  (“polar”) и было установлено, что первые наблюдаются преимущественно в интервалы высокоскоростных потоков и областей сжатия CIR, а вторые – в интервалы медленных потоков и при пересечениях гелиосферного токового слоя. В работе [Дремухина и др., 2019]

были проанализированы четыре группы бурь с разными межпланетными источниками, определенными на основе каталога крупномасштабных структур СВ [Ермолаев и др., 2009], и показано, что для всех групп бурь существуют заметные различия в динамике индексов геомагнитной активности, характеризующих разные широтные зоны земной поверхности ( $Dst$ ,  $ap$ ,  $AE$  и  $PC$ ). При этом различия в абсолютных значениях геомагнитных индексов при развитии магнитных бурь, инициированных разными источниками, больше для низкоширотных индексов, в то время как динамика более разнообразна для высокоширотных индексов.

Кроме обычно используемых индексов  $AE$ ,  $Dst$ ,  $Kp$  в отдельных работах анализируются также долгопериодно-асимметричный  $ASY-H$  и симметричный  $SYM-H$ -индексы, введенные относительно недавно для описания среднеширотной возмущенности геомагнитного поля с высоким временным разрешением (1 или 5-минут) [Yemogi T., 1990]). Значения этих индексов определяются по одноминутным значениям компонент геомагнитного поля, полученных на 6-ти магнитных станциях, равномерно распределенных по долготе в интервале геомагнитных широт от  $-46.22^\circ$  до  $49.75^\circ$  (включая 4 станции, по данным которых вычисляется индекс  $Dst$ ). В физическом смысле индекс  $SYM-H$  аналогичен индексу  $Dst$  [Sugiura and Poros, 1971] и рассчитывается как среднее значение возмущений на всех 6-ти станциях, полученных после вычитания из них значений главного магнитного поля Земли и спокойной солнечно-суточной вариации  $Sq$  (которые определяются по 5 спокойным дням каждого месяца). Различие состоит в том, что индекс  $SYM-H$  имеет 1-минутное разрешение и определяется по данным другого набора станций. Аналогично индекс  $ASY-H$  подобен предложенной в работе [Kawasaki and Akasofu, 1971] среднечасовой  $DS$ -вариации и определяется как разность между максимальным и минимальным значениями возмущений, зарегистрированными на выбранных станциях, после вычитания из них симметричной части  $SYM-H$ . Таким образом, индексы  $SYM-H$  и  $ASY-H$  являются количественными характеристиками симметричной и несимметричной частей наблюдаемого среднеширотного магнитного возмущения.

Индексы  $SYM-H$  и  $ASY-H$  чаще используются при анализе отдельных бурь без учета их межпланетного источника [Фельдштейн и др., 1993; Feldstein et al., 1994; Соловьев и др., 2005; Бархатов и др., 2008]. Авторы [Фельдштейн и др., 1993; Feldstein et al., 1994] на примере нескольких бурь пришли к выводу, что долгопериодная асимметрия вариаций поля, наблюдаемых во время магнитных бурь ( $ASY-H$ ), обусловлена эффектами продольных токов и величина  $ASY-H$  более чувствительна к вариациям геоэффективных параметров СВ,

**Таблица 1.** Список магнитных бурь с  $-271 < Dst_{\min} < -90$  нТл с указанием даты, время UT начала главной фазы (ГФ), максимальной интенсивности  $Dst_{\min}$  и длительности ГФ для 4-х типов межпланетных источников

Sheath				МС			
дата	UT	$Dst_{\min}$ , нТл	длит. ГФ, ч	дата	UT	$Dst_{\min}$ , нТл	длит. ГФ, ч
06.11.1997	23	-110	6	18.10.1995	20	-127	4
26.05.2000	01	-147	8	21.04.1997	12	-107	12
19.09.2000	19	-201	5	13.11.1998	05	-131	17
12.11.2000	07	-95	6	22.09.1999	20	-173	4
11.04.2001	15	-271	9	29.10.2000	20	-126	8
18.04.2001	01	-114	6	22.04.2001	03	-102	13
17.08.2001	13	-105	9	01.09.2004	06	-129	17
30.09.2001	22	-148	11	07.01.2005	14	-93	13
21.10.2001	16	-187	6	29.05.2005	22	-113	16
28.10.2001	03	-157	9	12.06.2005	17	-106	8
24.11.2001	06	-221	11	14.12.2006	21	-162	11
23.03.2002	16	-100	18	25.04.2012	17	-120	12
01.08.2002	23	-102	7	07.01.2015	08	-99	4
17.01.2005	23	-103	10	08.09.2015	22	-98	15
15.05.2005	03	-247	6	15.10.2016	07	-103	11
24.08.2005	07	-184	5	27.05.2017	22	-125	10
05.08.2011	19	-115	9	08.09.2017	11	-124	7
Еjecta				CIR			
дата	UT	$Dst_{\min}$ , нТл	длит. ГФ, ч	дата	UT	$Dst_{\min}$ , нТл	длит. ГФ, ч
14.03.1995	23	-90	11	26.03.1995	06	-107	12
25.06.1998	11	-101	6	07.04.1995	02	-149	17
09.11.1998	00	-142	18	24.10.1996	21	-105	8
12.08.2000	20	-105	11	10.03.1998	10	-116	11
20.08.2002	17	-106	14	13.01.1999	11	-112	13
03.10.2002	11	-146	22	11.05.2002	11	-110	9
12.02.2004	10	-93	8	23.05.2002	17	-109	6
15.10.2012	01	-90	7	03.09.2002	19	-109	11
28.06.2013	14	-102	17	14.10.2002	04	-100	10
18.02.2014	16	-119	17	21.11.2002	02	-128	8
				31.08.2005	12	-122	8
				01.06.2013	01	-124	8
				07.10.2015	02	-124	21
				08.03.2016	16	-98	6

особенно к  $B_z$  ММП, чем симметричная часть кольцевого тока. Статистически исследовались различия в отклике в  $SYM-H$  и  $ASY-H$  во время магнитных бурь, инициированных МС и Sheath-областями, в работах [Huttunen et al., 2006; Pulkkinen et al., 2007]. В них на основании поведения магнитных индексов  $SYM-H$  и  $ASY-H$  в периоды 28 бурь, (по 14 для каждого источника), зарегистрированных с 1997 по 2002 гг., авторы пришли к

выводу, что бури, вызванные Sheath-событиями, связаны с большей асимметричностью кольцевого тока, чем магнитные бури, вызванные МС-событиями. С использованием тех же данных в работе [Huttunen et al., 2006] было установлено, что области Sheath приводят к более сильной авральной активности, в то время как драйверы типа МС вызывают более интенсивное развитие кольцевого тока. Однако, в работе [Бороев и Ва-

сильев, 2020] на основе корреляционного анализа связи индекса *ASY-H* с межпланетными параметрами в периоды бурь, индуцированных CIR и MC, сделан вывод, что тип межпланетного источника бури никак не влияет на динамику *ASY-H*.

Таким образом, вопрос о влиянии типа межпланетного источника бури на ее развитие до настоящего времени ясен не до конца.

Цель настоящей работы – установить возможные различия в развитии главной фазы магнитных бурь в зависимости от их межпланетного источника на основе среднеширотных индексов *SYM-H* и *ASY-H*, характеризующих симметричную и асимметричную части геомагнитных возмущений, а также проанализировать возможные причины таких различий. В работе мы используем классификацию возмущенных структур СВ, основанную на данных Каталога (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>) и статьи [Ермолаев и др., 2009].

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

В таблице 1 приведен список используемых для анализа магнитных бурь, в котором указаны дата и время UT их начала, максимальная интенсивность  $Dst_{min}$  и длительность главных фаз. Таблица 1 состоит из двух частей, из которых верхняя содержит данные для бурь, инициированных Sheath- и MC-областями СВ, а нижняя относится к Ejecta- и CIR-бурям.

Для анализа были использованы среднечасовые значения индексов *ASY-H*, *SYM-H*, *Dst*, и *AL*, *Bz* ММП, а также потоков протонов с энергиями >10 МэВ (*F*), полученные по данным геостационарных КА GOES, представленные в базе данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [King and Papitashvili, 2004]. Среднечасовые значения *ASY-H*, *SYM-H* и *F* были получены усреднением 5-мин данных. 58 отобранных для анализа интенсивных магнитных бурь с  $-271 \leq Dst_{min} \leq -90$ , зарегистрированных за период 1995–2017 гг., были разделены на четыре группы в зависимости от их межпланетного источника: области CIR; ICME, включающие MC и Ejecta; области сжатия Sheath. Сложные бури с многоступенчатой главной фазой, для которых трудно определяется их межпланетный источник, или он определяется как составной из нескольких типов СВ, из анализа были исключены (как правило, это интенсивные бури с  $Dst_{min} < -200$  нТл). Из-за небольшого числа соответствующих критериям отбора бурь в анализ было включено несколько бурь с  $Dst_{min}$  от  $-90$  до  $-100$  нТл и одна с  $Dst_{min} = -271$  нТл. По той же причине при анализе не проводилось разделение на бури, инициированные событиями Sheath перед MC и Sheath перед Ejecta, и учет наличия или отсутствия внезапного начала SSC на предварительной фазе бури. Источник считался однознач-

но определенным, если магнитная буря начиналась в его интервале и ее главная фаза заканчивалась не ранее, чем за 2 часа до окончания интервала этого источника. В настоящей работе мы используем только *Dst*-индекс, не рассматривая отдельно, из-за ограниченного объема статьи, исправленный на вклад токов магнитопаузы индекс  $Dst^*$ , который, как правило, повторяет временной ход *Dst*. Как показано в работе [Yermolaev et al., 2010], результаты по динамике параметров не обнаруживают заметных различий при использовании *Dst* и  $Dst^*$ , хотя и отличаются по величине.

К выбранным данным был применен двойной метод наложенных эпох (ДМНЭ) с двумя опорными моментами в часы UT начала резкого понижения  $Dst(t_0)$  и достижения  $Dst_{min}(t_m)$  [Yermolaev et al., 2010]. Моменты начала и окончания главных фаз бурь определялись на основе динамики *Dst*. Нормализованная длительность главной фазы бури полагалась равной 8 ч, что соответствует средней длительности главной фазы для бурь, инициированных Sheath-событиями. Моменты  $t_0$  и  $t_m$  всех временных рядов совмещались, а интервал между временами  $t_0$  и  $t_m$  подразделялся на 7 под-интервалов. Во временных рядах с длительностью более 8 ч временная шкала сжималась до 8 ч, а в рядах с длительностью меньше 8 ч растягивалась. Проведенная процедура означает, что для реальных данных временная шкала в интервале времен  $t_0 = 0$  и  $t_m = 7$  изменилась линейным образом. Временные шкалы для данных до момента  $t_0$  и после момента  $t_m$  оставались неизменными. Использование ДМНЭ позволило получить усредненную динамику анализируемых параметров для магнитных бурь, имеющих разные длительности главных фаз. Однако, так как используемый метод предполагает определенные допущения, можно говорить лишь о тенденциях в тех или иных временных вариациях исследуемых параметров.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты представлены ниже на 6 рисунках и обсуждаются в разделах 3.1–3.4.

### 3.1. Временные профили 5-мин индексов *SYM-H* и *ASY-H* и потоков протонов с энергиями >10 МэВ

На рисунке 1 представлены примеры типичных временных профилей 5-мин значений индексов *SYM-H* и *ASY-H* и потоков *F* в интервалах магнитных бурь 21.11.2002 г., 24.11.2001 г., 29.10.2000 г. и 12.02.1004 г., инициированных структурами CIR, Sheath, MC и Ejecta, соответственно. Нижние панели представлены в логарифмическом масштабе. Вертикальные линии на

каждом рисунке показывают момент  $Dst_{\min}$ . Характер вариаций  $SYM-H$  и  $ASY-H$  для всех 4-х бурь похож, но во время Sheath-бури (рис. 1б) вариации  $ASY-H$  имеют сильно изрезанный вид и их возрастание заметно опережает понижение  $SYM-H$ . Существенные различия можно видеть в вариациях потоков энергичных протонов: во время бури 24.11.2001 г., вызванной Sheath-структурой, этот поток почти на 4 порядка выше, чем во время остальных трех бурь. Незначительное возрастание потока протонов наблюдалось и во время бури 29.10.2000 г., инициированной MC. По нашим оценкам такие возрастания регистрировались в ~82% случаев (14 из 17) Sheath-бурь, в ~12% случаев (2 из 17) MC-бурь, в ~7% (1 из 14) CIR- бурь и отсутствовали при Ejecta-бурях.

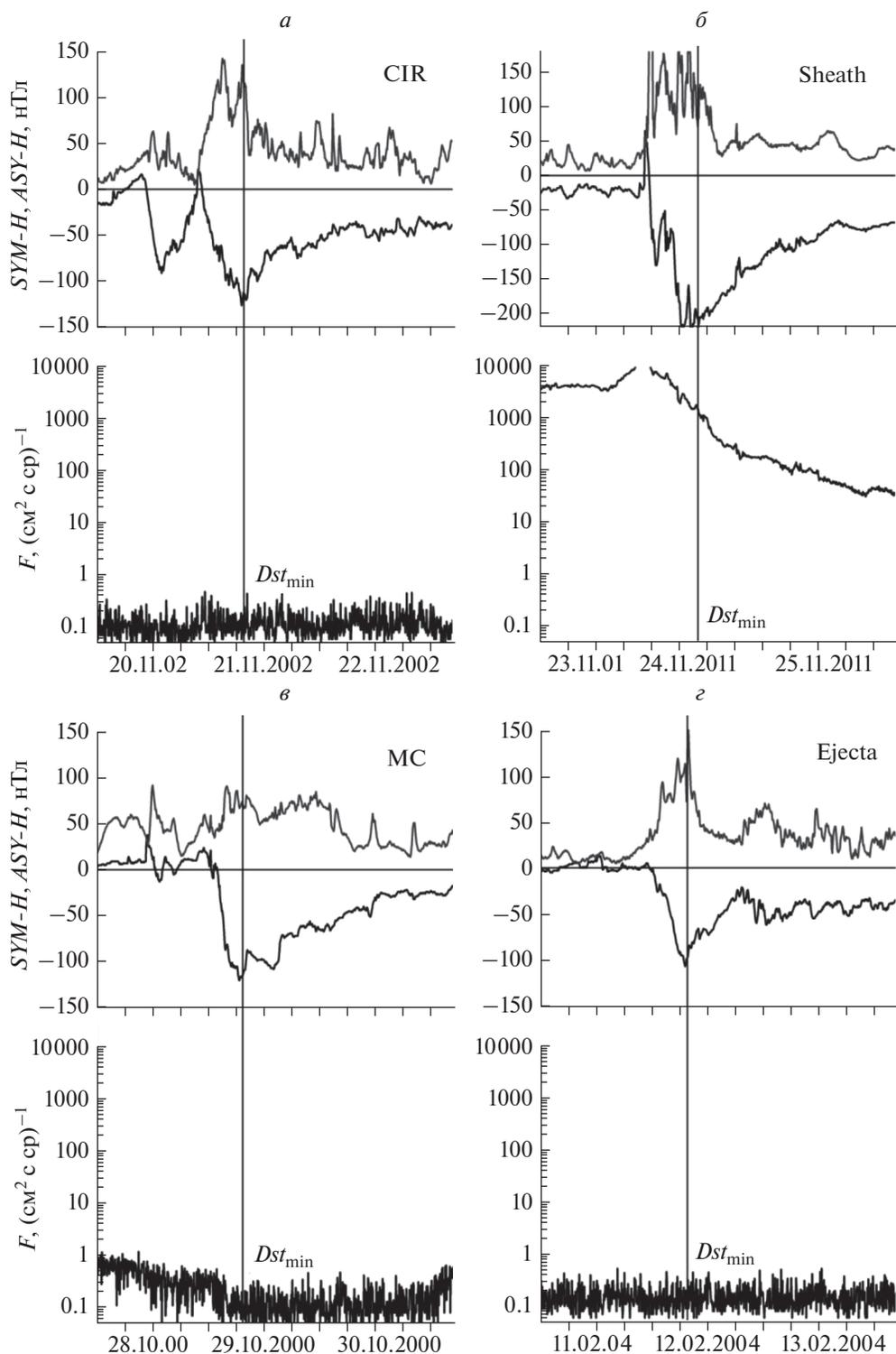
### 3.2. Временные профили индексов $ASY-H$ и $SYM-H$

На рисунке 2 представлены временные профили среднечасовых индексов  $ASY-H$  и  $SYM-H$ , приведенные к одинаковой длительности главной фазы бури (8 ч). Серыми линиями показаны распределения для индивидуальных бурь, а черной жирной линией – профили  $ASY-H$  и  $SYM-H$ , усредненные по всем бурям в каждой группе согласно их межпланетным источникам: CIR, Sheath, MC и Ejecta. Вертикальными линиями отмечены моменты начала  $t_0$  и окончания  $t_m$  главной фазы. По оси абсцисс отложено время эпохи  $t_s$  от момента  $t_0$ . В целом динамика  $ASY-H$  и  $SYM-H$  индексов для всех групп бурь аналогична, за исключением того, что “средняя” Sheath-буря почти в полтора раза интенсивнее остальных по  $SYM-H$  и по  $ASY-H$  индексам. Нарастание асимметрии (индекса  $ASY-H$ ) в течение главной фазы Sheath-бури происходит быстрее и заметно опережает рост поля симметричного тока по сравнению с бурями остальных групп. Интенсивность как асимметричной, так и симметричной частей магнитного поля кольцевого тока тесно связана с потоком энергии, поступающей в магнитосферу из СВ, который определяется величиной электрического поля СВ  $E_y = vB_z$  [Gonzalez et al., 1994; Kane, 2005]. Несмотря на то, что MC-структуры обладают более интенсивной  $B_z$ -составляющей ММП по сравнению с Sheath и близкими значениями скорости, поступление энергии в магнитосферу может усиливаться при Sheath-событиях за счет возрастания динамического давления и уровня флуктуаций плазмы СВ и ММП, и усиления ускорения и спорадической асимметричной инжекции энергичных ионов из плазменного слоя во внутреннюю магнитосферу.

### 3.3. Сопоставление $Dst$ , $ASY-H$ и $SYM-H$ с $B_z$ ММП и $AL$

На рисунках 3 и 4 приводится сопоставление усредненных значений  $B_z$ -составляющей ММП, как геоэффективного параметра СВ, индекса  $AL$ , характеризующего авроральную возмущенность, и индексов  $Dst$ ,  $ASY-H$  и  $SYM-H$  для тех же 4-х групп бурь, объединенных по их межпланетным источникам. CIR- и Sheath-события представлены на рис. 3, а MC- и Ejecta-события на рис. 4. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты начала  $t_0$  и окончания  $t_m$  главной фазы. Вертикальными отрезками показаны стандартные отклонения. На нижних панелях обоих рисунков приведены временные профили значений потоков протонов с энергиями  $E > 10$  МэВ, регистрируемые на геосинхронных КА GOES в интервалах анализируемых бурь. Тонкими линиями показаны профили для индивидуальных бурь, а жирной черной линией – “средние” профили. Значения  $B_z$  ММП близки для выбранных наборов бурь, за исключением MC-событий, при которых он незначительно интенсивнее (на ~3 нТл). Тем не менее, при Sheath-бурях авроральная активность (индекс  $AL$ ) начинает возрастать почти сразу с началом главной фазы бури и достигает более высоких значений по сравнению с другими бурями. Исключение составляют MC-бури, при которых рост  $AL$  происходит почти также как при Sheath. При практически одинаковых значениях  $B_z$  ММП ~10 нТл (для MC-бурь несколько больших) индексы  $Dst$ ,  $ASY-H$  и  $SYM-H$  при Sheath-событиях на ~40% превосходят их значения для трех остальных наборов бурь. Динамика индексов  $Dst$  и  $SYM-H$  практически идентична для всех бурь. Их максимальные значения наступают одновременно и близки по амплитуде. Это свидетельствует о том, что оба индекса характеризуют один и тот же физический процесс, но на разных временных масштабах, и согласно современным представлениям характеризуемое ими буревое возмущение ( $Dst$ ) может быть представлено в виде суммы вкладов кольцевого тока  $DR$ , токового слоя хвоста магнитосферы  $DT$  и токов на магнитопаузе  $DCF$  [например, Калегаев, 2010].

Такой вывод отличается от полученного в работе [Соловьев и др., 2005], в которой рассматриваются интенсивные сложные бури 29, 30 октября и 20 ноября 2003 г. и сделан вывод, что  $SYM-H$  характеризует возмущенность геомагнитного поля на более высоких по сравнению с  $Dst$  широтах и его источником скорее всего является не кольцевой ток, а восточные токи на магнитопаузе и замыкающие их ионосферные токи DP2 токовой системы. Возможно, это справедливо для очень интенсивных бурь с  $Dst < -300$  нТл, во время которых магнитопауза на дневной стороне приближается к Земле на близкие расстояния.



**Рис. 1.** Примеры временных профилей индексов  $SYM-H$  и  $ASY-H$  и потоков протонов с энергией  $> 10$  МэВ в интервалы магнитных бурь 21.11.2002 г. (а), 24.11.2011 г. (б), 29.10.2000 г. (в) и 12.02.2004 г. (г), инициированных структурами CIR, Sheath, MC и Ejecta.

Из нижних панелей рис. 3 и 4 следует, что потоки энергичных протонов  $F$  в интервалы Sheath-бурь возрастают, в среднем, на несколько поряд-

ков (достигая значений  $\sim 10^3$   $\text{p} (\text{cm}^2 \text{ с ср})^{-1}$  и более). Более слабые возрастания потоков (в среднем, до  $\sim 10$   $\text{p} (\text{cm}^2 \text{ с ср})^{-1}$ ) регистрируются в интервалы

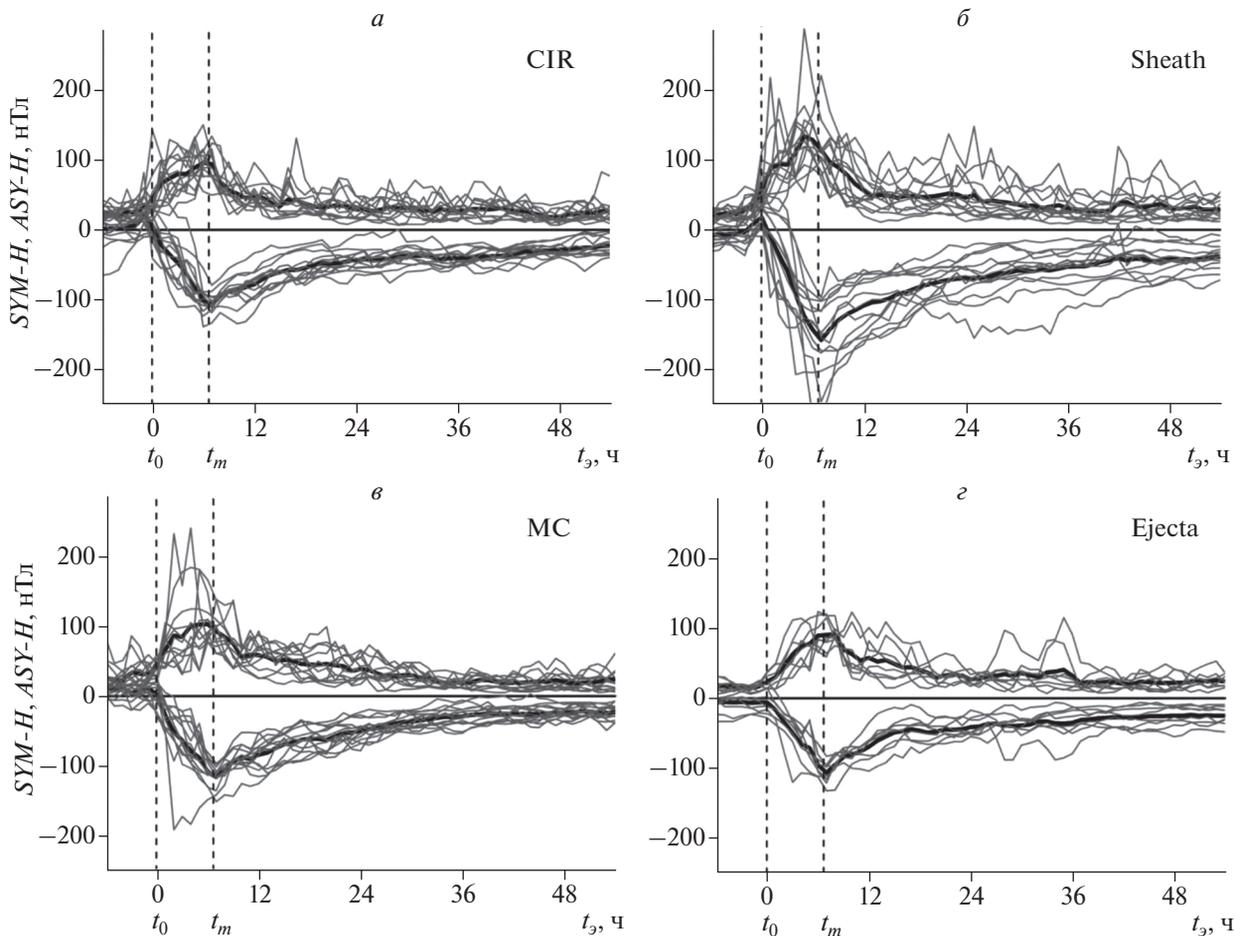
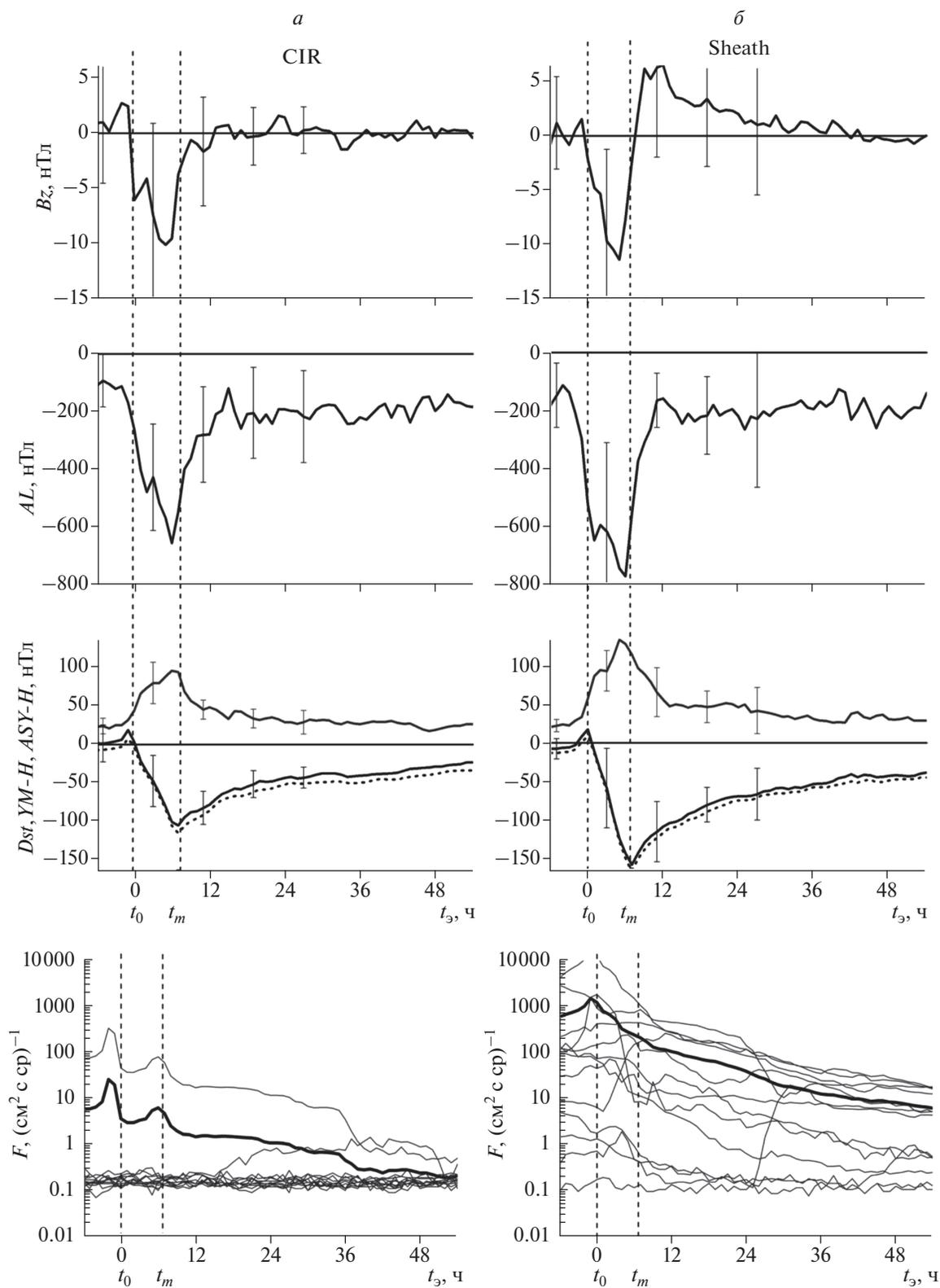


Рис. 2. Временные профили индексов  $SYM-H$  и  $ASY-H$  для индивидуальных бурь (серые линии) и после применения ДМЭ (черная линия) для магнитных бурь, инициированных источниками CIR (а), Sheath (б), MC (в) и Ejecta (г).

MC- и CIR-бурь и отсутствуют при Ejecta- бурях. Как было указано в разделе 3.1, возрастания  $F$  регистрировались в  $\sim 82\%$ ,  $\sim 12\%$  и  $\sim 7\%$  случаев Sheath-, MC- и CIR- бурь, соответственно. Регистрируемые во внутренней магнитосфере потоки энергичных протонов преимущественно в интервалы Sheath-бурь могут быть связаны с проникновением в магнитосферу СКЛ, ускоренных как во вспышке, так и в ударной волне и на неоднородностях быстро распространяющегося во фронте коронального выброса Sheath.

Сравнительная средняя динамика индекса  $ASY-H$  для всех типов бурь приведена на рис. 5, из которого хорошо видно, что  $ASY-H$  ведет себя поразному в зависимости от типа межпланетного источника бури. При Sheath-бурях  $ASY-H$  достигает своих максимальных значений и начинает уменьшаться при еще развивающемся кольцевом токе за  $\sim 3$  ч до момента  $Dst_{min}$ . Отчасти это относится и к MC-бурям, но для них максимум  $ASY-H$  имеет пологий характер и спад значений  $ASY-H$  начинается приблизительно за  $\sim 1-2$  ч до  $Dst_{min}$ .

При CIR- и Ejecta- бурях максимумы  $ASY-H$  и  $Dst$  совпадают. Подобное опережение в развитии асимметричной части по сравнению с симметричным кольцевым током было отмечено ранее [см. например, Feldstein et al., 1993; Бархатова, 2013 и ссылки в них], но без учета типа источника бури. Из проведенного нами анализа следует, что такое опережение зависит от типа межпланетного источника бури. По мнению авторов [Pullkinen et al., 2007] в результате перестройки силовых линий геомагнитного поля (его сильного вытягивания) при скачках динамического давления СВ, характерных для Sheath-структур, ионы, дрейфующие к Земле из плазменного слоя, попадают в зону квазизахвата на незамкнутые силовые линии и не попадают на круговую орбиту кольцевого тока. Возможно, в результате этого формируются (или усиливаются) локальные токовые системы, в том числе частичный кольцевой ток, связанный с токами авроральной зоны системой продольных токов в вечерне-полуночном секторе. Этим объясняется и возрастание авроральной активности



**Рис. 3.** Временные профили  $B_z$ -составляющей ММП, индексов  $AL$ ,  $Dst$ ,  $SYM-H$ ,  $ASY-H$  и потока протонов с энергиями  $>10$  МэВ для интервалов магнитных бурь, инициированных структурами CIR (а) и Sheath (б).

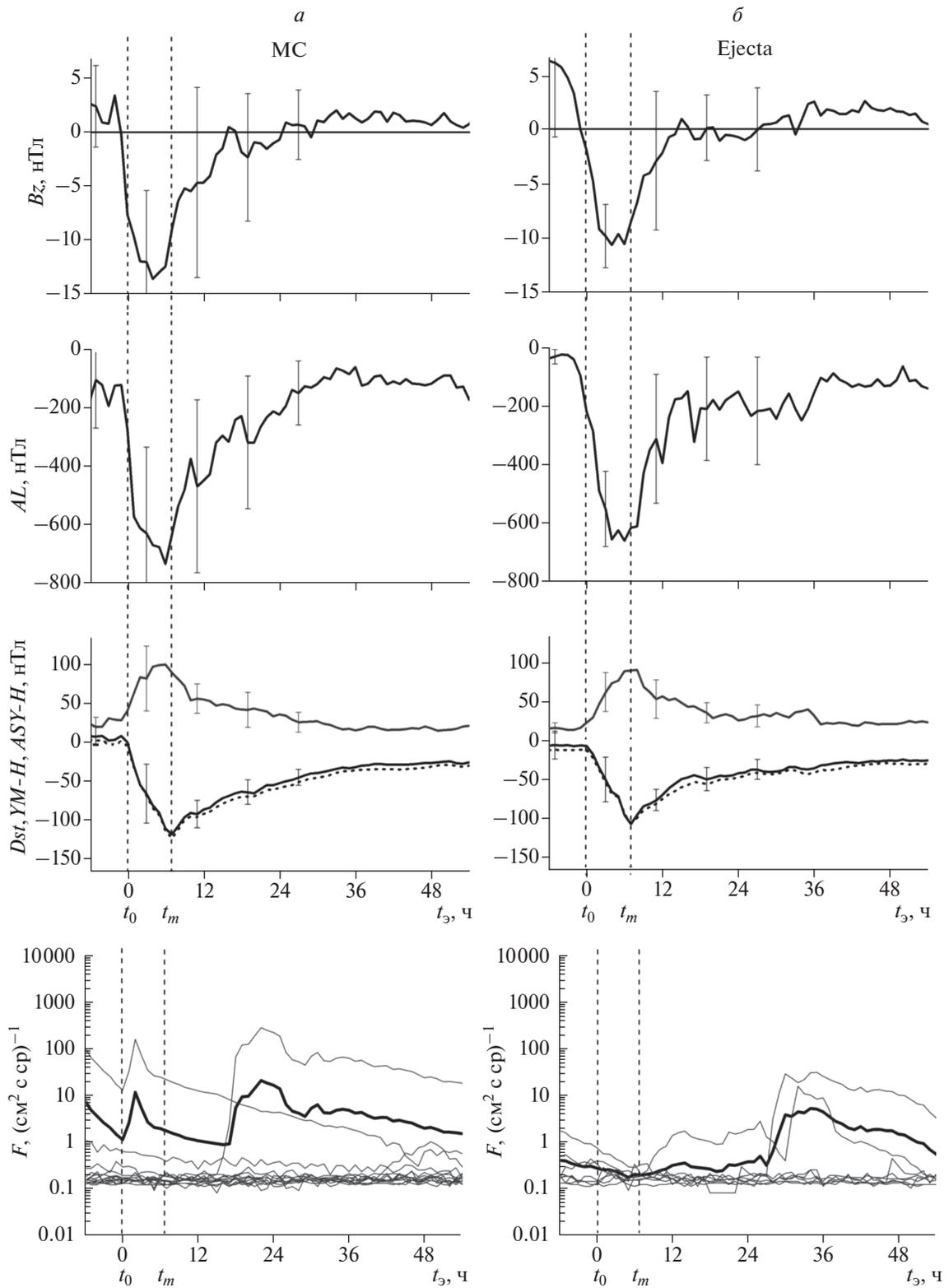


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для магнитных бурь, инициированных МС и Еjecta.

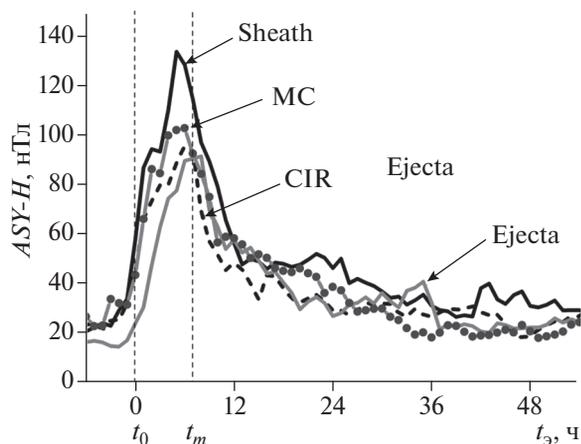


Рис. 5. Усредненная динамика индекса  $ASY-H$  для четырех групп магнитных бурь с источниками Sheath (сплошная черная линия), MC (линия с кружками), CIR (штриховая линия) и Ejecta (серая линия).

раньше начала главной фазы бури, и отражение его в динамике индекса  $ASY-H$ .

### 3.4. Относительные вклады $ASY-H$ и $SYM-H$

Для оценки динамики в ходе бури относительного вклада асимметричной части в симметричный кольцевой ток для всех наборов бурь были рассчитаны отношения  $R = |ASY-H|/|SYM-H|$  за 5 ч, предшествующих минимуму  $Dst_{min}$ . Результаты представлены на рис. 6, где по оси абсцисс отложено время в часах, отсчитываемое от  $Dst_{min}$  (время  $t_m$ ) назад.

Оценки показали, что для всех бурь число точек со значениями  $R > 1$ , составляет  $\sim(49-57)\%$  (значения  $R$  приведены на рис. 6 в правом нижнем углу каждой панели). Аналогичные оценки, проведенные в работе [Huttunen et al., 2006] с использованием 14 Sheath- и 14 MC-бурь, показали, что во время MC-бурь преимущественно  $R < 1$  (83% событий), в то время как в интервалы

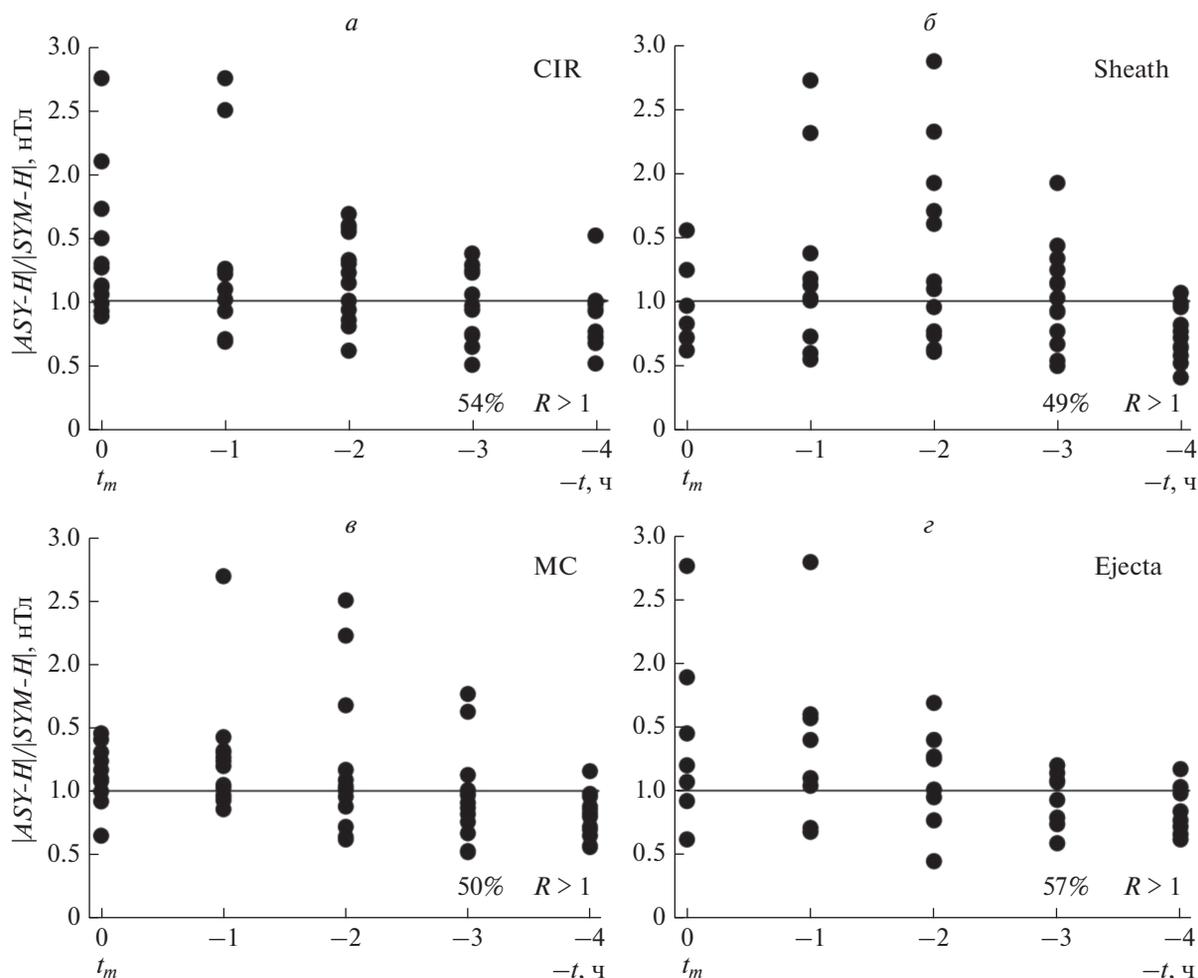


Рис. 6. Распределения отношения  $|ASY-H|/|SYM-H|$  во время главных фаз магнитных бурь с источниками CIR (а), Sheath (б), MC (в) и Ejecta (г). На оси абсцисс отложено время в часах, предшествующее минимуму  $Dst_{min}$  (время  $t_m$ ).

Sheath-бурь преимущественно  $R > 1$  (68% событий). Расхождение между результатами можно объяснить как недостаточной статистикой, так и особенностями идентификации межпланетных источников магнитных бурь. Несмотря на то, что по нашим оценкам соотношение между асимметричной и симметричной частями бурового магнитного возмущения практически не зависит от типа бури, из рис. 6 следует, что имеются различия в динамике этого соотношения. Для более интенсивных бурь, инициированных Sheath и MC, количество точек с  $R > 1$  начинает возрастать за 3 ч до максимума бури, а для бурь, инициированных CIR и Ejecta, это происходит на два часа позже, почти в максимуме бури. Такая динамика  $R = |ASY-H|/|SYM-H|$  отражает динамику  $ASY-H$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ динамики индексов  $SYM-H$  и  $ASY-H$ , определяющих степень симметрии и асимметрии геомагнитного возмущения на средних широтах, для 58 интенсивных магнитных бурь с  $-271 < Dst_{min} < -90$  нТл, зарегистрированных за 1995–2017 гг., инициированных разными межпланетными источниками. При анализе был использован двойной МНЭ с опорными временами в моменты начала главной фазы бури и минимума  $Dst_{min}$ . В качестве источников магнитных бурь рассматривались следующие крупномасштабные типы солнечного ветра: CIR (14 событий); Sheath перед MC и Ejecta, объединенные в одну группу (17 событий); MC (17 событий) и Ejecta (10 событий). В результате анализа было установлено следующее.

Для всех групп магнитных бурь, независимо от их межпланетного источника, индекс  $SYM-H$  ведет себя аналогично индексу  $Dst$ , их максимумы наступают одновременно, а амплитуды имеют близкие значения, что свидетельствует о едином источнике магнитных возмущений, характеризующихся этими индексами.

Динамика индекса  $ASY-H$ , характеризующего асимметричную часть средне- и низкоширотного геомагнитного возмущения, зависит от типа межпланетного источника магнитной бури. Рост индекса  $ASY-H$  опережает понижение  $Dst$  индекса и достигает максимума на  $\sim 3$  ч раньше  $Dst_{min}$  при Sheath-событиях и на  $\sim 1-2$  ч раньше при MC-событиях, в то время как при CIR- и Ejecta-событиях время максимума индекса  $ASY-H$  совпадает с  $Dst_{min}$ . Такая динамика индекса  $ASY-H$  может быть результатом сильного вытягивания силовых линий геомагнитного поля при скачках динамического давления СВ, характерного для Sheath-структур, и в меньшей степени для MC, при котором ионы, дрейфующие к Земле из плазменного слоя, попадают в зону квазизахвата на незамкну-

тые силовые линии и не участвуют в формировании кольцевого тока, а формируют частичный кольцевой ток, связанный продольными токами вечерне-полуночного сектора с токами авроральной зоны. При этом возрастание авроральной активности происходит раньше начала главной фазы бури, что отражается в динамике индекса  $ASY-H$ .

Значения индекса  $ASY-H$  в интервалы магнитных бурь, инициированных Sheath-событиями, в среднем, на  $\sim 40\%$  превышают его значения в интервалы бурь от трех других межпланетных источников при аналогичных геоэффективных условиях в СВ, что свидетельствует о более интенсивном поступлении энергии во внутреннюю магнитосферу при бурях, инициированных Sheath-событиями. Такое поступление может быть следствием усиленного ускорения ионов в плазменном слое магнитосферы на неоднородностях проникающей в магнитосферу плазмы Sheath-структур, и неравномерной по долготе инъекции ускоренных ионов во внутреннюю магнитосферу. Это подтверждается возрастаниями потоков энергичных протонов, регистрируемых преимущественно в интервалы Sheath-индуцированных бурь.

Распределения отношения  $R = |ASY-H|/|SYM-H|$ , характеризующего относительные вклады асимметричной и симметричной частей возмущения, в предшествующий максимуму бури 5-часовой интервал, не зависит от типа межпланетного источника бури и имеет значения  $R > 1$  и  $R < 1$  приблизительно равное число часов.

Однако в динамике  $R$  имеются различия в зависимости от типа бури: при более интенсивных бурях, инициированных Sheath и MC, количество точек с  $R > 1$  начинает возрастать за 3 ч до максимума бури, а для бурь, инициированных CIR и Ejecta, это происходит на два часа позже, перед максимумом бури. Этот результат отличается от полученного в работе [Huttunen et al., 2006] для аналогичной оценки отношения  $R = |ASY-H|/|SYM-H|$  для Sheath- и MC-бурь, которое для MC-бурь преимущественно  $R < 1$ , а для Sheath-бурь преимущественно  $R > 1$ . Возможно, что такое расхождение связано с разным подходом при отборе бурь по их источникам.

Резкие возрастания (до двух и более порядков) потоков протонов с энергией  $> 10$  МэВ регистрировались на КА GOES в интервалы, соответствующие в  $\sim 82\%$  случаев Sheath-бурям, в  $\sim 12\%$  случаев MC-бурям, в  $\sim 7\%$  случаев CIR-бурь и отсутствовали в интервалы Ejecta-бурь, что свидетельствует о более интенсивном ускорении ионов и их инъекции из плазменного слоя во внутреннюю магнитосферу преимущественно при подходе к Земле Sheath-структур СВ, для которых характерен высокий уровень флуктуаций магнитного поля и плазменных параметров.

Полученные результаты показывают, что при развитии главной фазы магнитной бури, когда имеется значительная асимметрия кольцевого тока, динамика индекса *ASY-H* обнаруживает заметные различия в зависимости от типа межпланетного источника бури: инжекция частиц в кольцевой ток при подходе к Земле Sheath-структур начинается раньше и имеет более неравномерный вид, чем для остальных межпланетных драйверов.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за полезные замечания, позволившие улучшить качество статьи. Авторы также выражают благодарность за возможность использования базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00177а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Церковнюк О.М. Анализ связи индексов, характеризующих симметричный *SYM* и асимметричный *ASY* кольцевого тока, с индексами активности авроральных электроструй *AE (AU, AL)* // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 4. С. 520–525. 2008.
- Бархатова О.М. Нелинейная связь авроральных (*AU, AL*) и среднеширотных (*SYM-H* и *ASY-H*) индексов геомагнитной активности на главной фазе магнитной бури // Солнечно-земная физика. Вып. 23. С. 100–108. 2013.
- Бороев Р.Н., Васильев М.С. Связь индекса *ASY-H* с параметрами межпланетной среды и авроральной активности на главных фазах магнитных бурь во время событий CIR и ICME // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 1. С. 43–50. 2020.
- Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Динамика межпланетных параметров и геомагнитных индексов в периоды магнитных бурь, инициированных разными типами солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 6. С. 683–695. 2019.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Николаева Н.С., Лодкина И.Г. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. Т. 45. № 6. С. 489–498. 2007.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури // Космич. исслед. Т. 48. № 6. С. 499–515. 2010.
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури. 2. Вариации параметров // Космич. исслед. Т. 49. № 1. С. 24–37. 2011.
- Калегаев В.В. Динамические модели геомагнитного поля // Солнечно-земная физика. Вып. 16. С. 60–69. 2010.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений. 2. Главная фаза бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 1. С. 31–40. 2012а.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений. 3. Развитие бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 1. С. 41–52. 2012б.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависит ли генерация магнитной бури от типа солнечного ветра? // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 57. № 25. С. 555–561. 2017.
- Соловьев С.И., Бороев Р.Н., Баишев Д.Г., Макарова Е.С., Моисеев А.В., Потапов А.С., Енгелбетсон М., Юмото К. Развитие суббуревых и низкоширотных геомагнитных возмущений в периоды супермагнитных бурь 29, 30 октября 2003 г. и 20 ноября 2003 г. // Солнечно-земная физика. Вып. 8. С. 132–134. 2005.
- Фельдштейн Я.И., Дремухина Л.А., Вещезерова У.Б., Гольшев С.А., Кизирия Л.В., Графе А. Моделирование вариаций геомагнитного поля в период интенсивной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 6. С. 58–66. 1993.
- Akasofu S.-I. Solar-wind disturbances and the solar wind-magnetosphere energy coupling function // Solar Space Sci. Rev. V. 34. P. 173–183. 1983.
- Borovsky J. E., Denton M.H. Differences between CME-Driven Storms and CIR-Driven Storms // J. Geophys. Res. V. 28. P. 121–190. 2006.
- Boroyev R.N. Relationship between substorm activity and the interplanetary medium parameters during the main phase of strong magnetic field // Adv. Space Res. V. 63. P. 302–308. 2019.
- Boroyev R.N., Vasiliev M.S. Substorm activity during the main phase of magnetic storms induced by the CIR and ICME events // Adv. Space Res. V. 61. P. 348–354. 2018.
- Bothmer V. The solar and interplanetary causes of space storms in solar cycle 23 // IEEE Transactions on Plasma Science. V. 32. № 4. P. 1411–1414. 2004.
- Burton R. K., McPherron R. L., Russell C. T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst* // J. Geophys. Res. V. 80. P. 4204–4214. 1975.
- Crooker N.U. Solar and heliospheric geoeffective disturbances // J. Atmosp. Solar-Ter. Physics. V. 62. P. 1071–1085. 2000.
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G. High-latitudes magnetic substorms under different types of the solar wind large-scale structure // Sun and Geosphere. V. 13. № 1. P. 57–61. 2018.
- Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zone // Phys. Rev. Lett. № 6. P. 47–48. 1961.

- *Feldstein Ya.I., Levinin A.E., Golyshev S.A., Dremukhina L.A., Vestchezerova U.B., Valtchuk T.E., Grafe A.* Ring current and auroral electrojets in connection with interplanetary medium parameters during magnetic storms // *Ann. Geophys.* V. 12. № 7. P. 602–611. 1994.
- *Gonzalez W.D., Jozelyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., Vasyliunas V.M.* What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.* V. 899. № A4. P. 5771–5777. 1994.
- *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 88. P. 529–562. 1999.
- *Gonzalez W.D., Echer E.* A study on the peak *Dst* and peak negative *Bz* relationship during intense geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L18103. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005GL023486>
- *Gosling J.T., Pizzo V.J.* Formation and evolution of corotating interaction regions and their three-dimensional structure // *Space Sci. Rev.* V. 89. P. 21–52. 1999.
- *Huttinen K.E.J., Koskinen H.E.J., Karinen A., Mursula K.* Asymmetrical development of magnetic storms during magnetic clouds and sheath regions // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. L06107. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005GL024894>
- *Iyemori T.* Storm-time magnetospheric currents inferred from midlatitude geomagnetic field variation // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 42. P. 1249–1265. 1990.
- *Kane R.P.* How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? // *J. Geophys. Res.* V. 110. A022B. 2005. doi JA010799. <https://doi.org/10.1029/2004>
- *Kawasaki K., Akasofu S.-I.* Low-latitude DS component of geomagnetic storm field // *J. Geophys. Res.* V. 76. P. 2396–2405. 1971.
- *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *J. Geophys. Res.* V. 110. A02209. 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JA010804>
- *Longden N., Denton M. H., Honary F.* Particle precipitation during ICME-driven and CIR-driven geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 113. A06205. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JA012752>
- *Perreault P., Akasofu S.-I.* A study of geomagnetic storms // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* V. 54. P. 547–573. 1978. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb05494.x>
- *Plotnikov I.Y., Barkova E.S.* Nonlinear dependence of *Dst* and *AE* indices on the electric field of magnetic clouds // *Adv. Space Res.* V. 40. P. 1858–1862. 2007.
- *Pulkkinen T.I., Partamies N., Huttunen K.E.J., Reeves G.D., Koskinen H.E.J.* Differences in geomagnetic storms driven by magnetic clouds and ICME sheath regions // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L02105. 2007. <https://doi.org/10.1029/2006GL027775>
- *Russell C.T., McPherron R.L., Burton R.K.* On the Cause of Magnetic Storms // *J. Geophys. Res.* V. 79. P. 1105–1109. 1974.
- *Sugiura M., Poros D.J.* Hourly Values of Equatorial *Dst* for the Years 1957 to 1970 // *Rep. GSFC. Greenbelt. Maryland.* 1971. 16 p.
- *Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y.* Specific interplanetary conditions for CIR-induced, Sheath-induced, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis // *Ann. Geophys.* V. 28. P. 2177–2186. 2010.
- *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y.* Influence of the interplanetary driver type on the durations of the main and recovery phases of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 119. № 10. P. 8126–8136. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014JA019826>