

УДК 523.62-72

ДИНАМИКА МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ИНИЦИИРОВАННЫХ РАЗНЫМИ ТИПАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2019 г. Л. А. Дремухина¹, *, Ю. И. Ермолаев², **, И. Г. Лодкина²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

²Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: lidadrem@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 01.04.2019 г.

После доработки 22.04.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

На базе архива данных OMNI2 за 1995–2017 гг. анализируется динамика индексов геомагнитной активности (Dst , ap , AE и PC) и межпланетных параметров в периоды магнитных бурь с минимальными $Dst_{\min} \leq -50$ нТл, индуцированных разными межпланетными источниками, а именно: областями взаимодействия разно-скоростных потоков солнечного ветра (СВ) CIR; областями сжатия Sheath перед межпланетными СМЕ; магнитными облаками МС и “поршнями” Ejecta. Была отобрана 181 буря с монотонным ходом Dst -индекса на главных фазах. Аналогично работам [Ермолаев и др., 2010, 2011], выполненным по данным OMNI за 1976–2000 гг., к бурям был применен двойной метод наложенных эпох с двумя опорными моментами во время начала главной фазы и минимума Dst_{\min} . Такой подход позволяет выявить тенденции в динамике индексов магнитной активности и параметров СВ во время бурь с разными длительностями главных фаз и различие в этих тенденциях для бурь, вызванных разными источниками. Показано, что наибольшие средние значения индексов Dst , ap , AE и PC имеют место для Sheath-бурь, а наименьшие для Ejecta-бурь. Динамика AE и ap -индексов подобна, а полярного индекса PC существенно различается во время бурь с разными межпланетными источниками, что свидетельствует о различии в отклике полярной магнитосферы при бурях с разными источниками. Существуют заметные различия в вариациях параметров СВ для разных групп бурь: для Sheath-бурь характерен очень высокий уровень флуктуаций B и B_z ММП, для CIR-бурь он близок к среднему, а для МС и Ejecta существенно ниже среднего.

DOI: 10.1134/S0016794019060063

1. ВВЕДЕНИЕ

Важным моментом в понимании физической картины солнечно-земных связей является исследование геомагнитных бурь и связанных с ними процессов передачи энергии из СВ в магнитосферу, ионосферу и верхнюю атмосферу Земли. Магнитные бури, как правило, развиваются при подходе к Земле возмущенных структур СВ, в которых, в отличие от невозмущенного СВ, формируется южная составляющая B_z межпланетного магнитного поля (ММП). 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 вариациями плазмы СВ и ММП с магни-

тосферной активностью за последние полвека достаточно подробно анализировались многими авторами [Akasofu, 1983; Burton et al., 1975; Gonzalez et al., 1994; Gonzalez and Echer, 2005; Perrault and Akasofu, 1978; Russell et al., 1974 и ссылки в них], вопрос о том, как воздействуют на геомагнитную активность разные крупномасштабные структуры СВ, остается не до конца изученным.

Из-за большого разнообразия в динамике начальной, главной и восстановительной фаз бурь, их разных длительностей, а также наличия или отсутствия внезапного начала SSC [например, Akasofu, 1965; Yokoyama and Kamide, 1997; Vichare et al., 2005; Zhang et al., 2006 и ссылки в них], статистические исследования магнитных бурь затруднены. Однако достаточно плодотворным оказался подход, при котором используется метод наложенных эпох (МНЭ). Этот метод относится к непараметрическим методам, которые

позволяют выделить скрытые тенденции, основываясь на нескольких временных рядах значений, не задавая предположения о форме общего тренда. Одним из ключевых моментов при применении МНЭ является вопрос о выборе реперного (нулевого) времени эпохи, то есть момента, относительно которого проводится процесс совмещения анализируемых временных рядов. Выбор нулевого момента эпохи является важным, так как результаты анализа с использованием МНЭ, строго говоря, применимы только для времени вблизи начала эпохи из-за разной длительности исследуемых рядов. Влияние выбора нулевого момента при применении МНЭ рассматривалось в работе [Ше et al., 2008]. Тем не менее МНЭ был успешно применен в ряде исследований [Taylor et al., 1994; Loewe and Prohls, 1997; Yokoyama and Kamide, 1997; Zhang et al., 2006; Longden et al., 2008; Yermolaev et al., 2015, 2017] с использованием разных нулевых моментов эпохи. В работе [Taylor et al., 1994] в качестве нулевого момента было выбрано время SSC, что позволило исследовать бури с внезапным началом, но исключить из анализа бури с постепенным началом.

Выбор в качестве нулевого момента времени начала главной фазы позволил изучить начальный период главной фазы бури и, в частности, выяснить, что скорость развития главной фазы зависит от ее межпланетного источника [Pulkkinen et al., 2007]. В большей части работ в качестве нулевого момента использовалось время минимума Dst или максимума Kp -индекса [Loewe and Prohls, 1997; Zhang et al., 2006; Longden et al., 2008]. Такой выбор позволил исследовать конец главной фазы и начало фазы восстановления бури, так как средняя длительность главной фазы бури составляет $\sim 7-8$ ч, и совмещение более длинных временных рядов может привести к усреднению параметров, которые относятся как ко времени до начала главной фазы бури, так и ко времени самой главной фазы. Анализ с использованием МНЭ одновременно для всех фаз бури, исключая SSC, был применен впервые в работе [Yokoyama and Kamide, 1997], в которой бури каждой группы, сгруппированные по интенсивности, были приведены к одинаковым длительностям главной и восстановительной фаз. Это позволило проанализировать временные вариации некоторых параметров, характерные для бурь каждой группы. Было, например, показано, что интенсивность магнитной бури пропорциональна длительности интервала южной составляющей ММП $B_z < 0$, и что главная фаза интенсивных бурь имеет двухступенчатый характер. Аналогичные исследования проводились в работах [Ермолаев и др., 2010, 2011; Yermolaev et al., 2010, 2015, 2017], в которых на базе данных за 1976–2000 гг. с применением двойного МНЭ (с двумя опорными моментами эпохи), исследовалось временное поведение

средних значений параметров СВ и ММП и их абсолютных и относительных вариаций в периоды главных фаз магнитных бурь. Двумя опорными моментами эпохи в этих работах были приняты времена начала главной фазы и минимального значения индекса Dst_{min} . Кроме этого, в вышеупомянутых работах анализируемые бури были разделены на группы по их межпланетным источникам.

Установлено, что разнообразие в развитии магнитных бурь обусловлено различием их межпланетных источников с разными физическими характеристиками, размерами и распределением параметров плазмы и ММП внутри них [Ермолаев и др., 2010, 2011; Николаева и др., 2012а, б; Yermolaev et al., 2014]. В большинстве работ рассматриваются геоэффективные межпланетные источники двух типов: высокоскоростные потоки СВ и магнитные облака [Russell and Milligan, 2002; Borovsky and Denton, 2006; Pulkkinen et al., 2007; Longden et al., 2008; Turner et al., 2009; Troshichev and Sormakov, 2017; Boroev, 2019]. Однако в работах [Ермолаев и др., 2009, 2011, 2017; Николаева и др., 2017; Дремухина и др., 2018], было показано и физически обосновано, что в отдельные группы геоэффективных структур СВ можно выделить также области сжатия Sheath, предшествующие межпланетным корональным выбросам массы (ICME), включающим магнитные облака (MC) и “поршни” (Ejecta). Каждый из перечисленных типов СВ, в свою очередь, можно подразделить на подклассы в зависимости от наличия или отсутствия области Sheath перед ICME, наличия или отсутствия ударной волны и т.п.

В настоящей работе продолжено исследование возможного различия в развитии магнитных бурь, индуцированных разными межпланетными источниками, с применением двойного МНЭ с целью: (1) используя новые, более полные, данные за 1995–2017 гг., подтвердить (или опровергнуть) результаты, полученные ранее на данных за 1976–2000 гг., так как имеющиеся большие пропуски в данных базы OMNI до 1995 г. (до 50%) могли повлиять на полученный результат; (2) включить в анализ, кроме обычно используемых Dst и AE , линейный среднеширотный индекс ap вместо квазилогарифмического Kp ; (3) впервые для подобного анализа использовать полярный индекс PC [Troshichev et al., 1988], чтобы получить усредненную динамику поступления энергии СВ в приполюсную область во время разных групп бурь; (4) изучить различие в динамике скорости инъекции энергии в кольцевой ток Q во время бурь с разными источниками.

Изложение результатов для удобства восприятия построено следующим образом: после описания средних характеристик отобранных групп бурь сначала анализируются полученные для этих

групп средние временные профили индекса Dst и связанных с ним величин Q и интеграла электрического поля CB ($\text{sum}E_y$), затем динамика индексов PC , AE и ap (от приполюсных до средних широт) и в конце усредненные распределения параметров CB .

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для анализа был использован архив данных о среднечасовых значениях параметров плазмы CB и ММП и индексов Dst , ap , AE и PC базы OMNI2 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [King and Papitashvili, 2004], а для определения межпланетных источников магнитных бурь — идентификация типов течений CB , обоснованная и описанная в работе [Ермолаев и др., 2009]. Каталог идентифицированных типов CB представлен на сайте (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>). За период 1995–2017 гг. была отобрана 181 магнитная буря, достаточно изолированная для того, чтобы однозначно определить ее межпланетный источник, и имеющая близкий к монотонному ход индекса Dst в течение главной фазы. Сложные бури с многоступенчатой главной фазой, для которых было трудно определить их межпланетный источник, или он определялся как составной из нескольких типов CB , из анализа были исключены (как правило, это интенсивные бури с $Dst_{\min} < -200$ нТл). Из-за небольшой статистики не проводилось разделение на бури, инициированные событиями Sheath перед MC и Sheath перед Ejecta, а также не проводился учет наличия или отсутствия внезапного начала SSC бури. Начало главной фазы магнитной бури определялось, как первая часовая точка резкого понижения Dst -индекса, а ее окончание, как часовая точка минимального значения индекса Dst_{\min} [Yermolaev et al., 2010]. Все отобранные бури были сгруппированы в зависимости от их межпланетного источника в 4 группы согласно работ [Ермолаев и др., 2009, Yermolaev et al., 2015, 2017]: области сжатия CIR (74 события), образующейся в результате взаимодействия высокоскоростного потока CB из корональной дыры с медленным потоком из пояса стримеров; магнитного облака MC (31 событие), представляющего из себя область с низкими концентрацией и температурой и высоким значением ММП (плазменный параметр $\beta < 1$), в которой ММП испытывает плавный поворот вектора в течение ~ 1 дня [Burlaga et al., 1981]; области Ejecta (33 события), похожей на MC , но с менее организованной структурой ММП; и области Sheath (43 события), представляющей из себя область компрессии перед быстрыми MC и Ejecta. Магнитная буря считалась инициированной данным конкретным источником (событием), если она началась в течение этого события и достигала ми-

нимума Dst_{\min} в интервале этого же события или не позднее, чем через 1–2 ч после его окончания [Ермолаев и др., 2010]. 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.

Данные о длительностях главных фаз каждой группы бурь обрабатывались МНЭ с двумя опорными моментами: временем начала главной фазы, за которое принималась часовая точка (в UT), соответствующая началу резкого понижения индекса Dst (время $t_0 = 0$), и час, когда индекс Dst достигал минимального значения Dst_{\min} (время $t = t_m$). За нормализованную длительность главной фазы бури была принята минимальная средняя длительность $\langle \Delta T \rangle$ из табл. 1, т.е. 8 ч (и, следовательно, в нашем анализе время $t_m = 7$). Первая и последняя 1 ч точки всех временных рядов данных совмещались, а интервал между временами t_0 и t_m подразделялся на 7 подинтервалов с равной 1 ч длительностью. Для временных рядов, более длинных, чем 8 ч, временная шкала сжималась до 8 ч, а в рядах короче 8 ч временная шкала растягивалась. Физически проведенная процедура означает, что для реальных данных временная шкала в интервале времен $t_0 = 0$ и $t_m = 7$ изменялась линейным образом. Временные шкалы для данных до момента $t_0 = 0$ (длительностью 12 ч) и после момента $t_m = 7$ (длительностью 24 ч) оставались неизменными. Преимуществом использования двойного МНЭ является возможность сравнения общей (усредненной) динамики магнитосферных и межпланетных параметров в течение магнитных бурь, имеющих разные длительности. Необходимо отметить, что, так как используемый метод предполагает определенные допущения, можно говорить лишь о тенденциях в тех или иных временных вариациях исследуемых параметров.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа представлены на рис. 1–6 и в табл. 1–2. Рисунки 1–5 имеют одинаковый формат и показывают усредненную динамику, соответственно, индекса Dst , скорости инжекции энергии в кольцевой ток Q и интеграла электрического поля CB $\text{sum}E_y$, индексов PC , AE и ap в течение магнитных бурь с разными межпланетными источниками (сверху вниз: CIR, Sheath, MC и Ejecta). За исключением рис. 1a, где на левой панели приведены индивидуальные распределения Dst для всех бурь каждой группы, на остальных

Таблица 1. Средние значения (со стандартными отклонениями) индекса $\langle |Dst_{\min}| \rangle$, длительности главной фазы бури $\langle \Delta T \rangle$, скорости роста главной фазы $\langle |\Delta Dst / \Delta T \rangle$ для бурь, инициированных 4-мя разными межпланетными источниками, и для всех бурь

Тип СВ	Число событий	$\langle Dst_{\min} \rangle$, нТл	$\langle \Delta T \rangle$, ч	$\langle \Delta Dst / \Delta T \rangle$, нТл/ч
CIR	74	80.9 ± 37.7	9.2 ± 3.5	9.7 ± 5.4
Sheath	43	120.2 ± 82.8	8.3 ± 3.6	17.6 ± 14.5
MC	31	98.3 ± 29.7	11.1 ± 3.0	10.1 ± 8.3
Ejecta	33	76.7 ± 20.7	11.8 ± 5.4	6.9 ± 4.2
Все	181	92.5 ± 52.2	9.8 ± 4.2	11.1 ± 9.6

Таблица 2. Средние значения (со стандартными отклонениями) параметров СВ для четырех групп выбранных событий (CIR, Sheath, MC и Ejecta) в начальный момент эпохи $t = t_0$ и момент максимума главной фазы $t = t_m$

Тип СВ	CIR		Sheath		MC		Ejecta	
	$t = t_0$	$t = t_m$	$t = t_0$	$t = t_m$	$t = t_0$	$t = t_m$	$t = t_0$	$t = t_m$
$\langle B \rangle / sB$, нТл	10.7 ± 4.3	10.1 ± 4.8	12.4 ± 5.5	14.3 ± 9.2	12.8 ± 5.0	12.9 ± 4.9	8.2 ± 3.1	9.7 ± 2.9
$\langle Bx \rangle / sBx$, нТл	0.6 ± 4.9	1.8 ± 5.8	2.3 ± 4.9	-0.2 ± 8.2	0.0 ± 5.5	0.8 ± 6.3	1.0 ± 3.4	1.0 ± 3.6
$\langle By \rangle / sBy$, нТл	-0.5 ± 7.7	-0.8 ± 7.4	2.8 ± 9.1	1.4 ± 12.3	0.4 ± 9.3	-0.2 ± 7.3	-0.6 ± 6.2	0.3 ± 5.5
$\langle Bz \rangle / sBz$, нТл	-4.3 ± 5.6	-2.0 ± 5.5	-4.4 ± 6.7	-2.5 ± 7.7	-5.5 ± 6.5	-8.5 ± 4.9	-3.4 ± 3.4	-6.8 ± 3.1
$\langle n \rangle / sn$, см ⁻³	22.5 ± 13.3	9.6 ± 5.8	21.4 ± 11.3	11.2 ± 7.9	15.6 ± 10.0	8.5 ± 4.8	$9. \pm 87.2$	8.7 ± 4.2
$\langle V \rangle / sV$, км/с	425.1 ± 81.1	511.2 ± 100.0	504.8 ± 137.4	540.7 ± 135.4	446.6 ± 110.6	426.3 ± 91.1	425.7 ± 68.5	421.8 ± 70.2
$\langle P_d \rangle / sP_d$, нПа	7.4 ± 4.1	4.7 ± 2.7	11.4 ± 9.4	6.8 ± 6.9	6.2 ± 5.1	2.9 ± 1.9	3.5 ± 2.7	2.9 ± 1.3
$\langle Ey \rangle / sEy$, мВ/м	1.9 ± 2.7	1.1 ± 2.6	2.3 ± 4.4	1.3 ± 4.5	2.4 ± 3.1	3.5 ± 2.2	1.3 ± 1.5	2.8 ± 1.3
$\langle \sigma B \rangle / s\sigma B$, нТл	6.3 ± 4.6	5.7 ± 3.0	9.7 ± 6.6	6.7 ± 6.0	3.7 ± 2.8	2.9 ± 1.8	3.0 ± 2.6	2.7 ± 2.3
$\langle \sigma Bz \rangle / s\sigma Bz$, нТл	4.1 ± 2.6	4.1 ± 2.6	6.4 ± 4.6	4.5 ± 4.1	2.1 ± 2.1	1.6 ± 1.4	1.9 ± 1.8	1.4 ± 1.1

панелях рис. 1–5 сплошной жирной линией показано распределение одного индекса для каждой группы бурь, а сплошной тонкой линией – его значения, полученные для всех бурь независимо от их межпланетного источника (“средней” бури). Вертикальные отрезки показывают среднеквадратичное отклонение. По осям абсцисс приведено время эпохи, которое начинается за 12 ч до начала главной фазы бури и заканчивается через 24 ч после ее окончания, с нулевым моментом в начале нормализованной главной фазы. Вертикальные пунктирные линии показывают интервал главной фазы бури с момента $t_0 = 0$ до $t_m = 7$. Рисунок 6 имеет несколько отличный формат, который будет описан ниже.

3.1. Средние характеристики магнитных бурь

Средние характеристики отобранных магнитных бурь представлены в табл. 1. Из нее следует, что средние длительности главных фаз магнитных бурь $\langle \Delta T \rangle$ в отобранных группах изменяются в интервале от 8.3 ч для Sheath до 11.8 ч для Ejecta, что несколько выше полученных в работах [Николаева и др., 2012а, б] по данным за 1976–2000 г., но вполне согласуется со значением ~ 10 ч, приве-

денным в работе [Gonzales and Echer, 2005]. Вероятно, такое расхождение в значениях обусловлено различиями в выборках данных, связанных с методикой отбора бурь и их источников, а также с анализируемыми интервалами времени. Различия для CIR, Sheath и ICME лежат в пределах среднеквадратичного разброса $\sigma(\Delta T)$, но близки или меньше статистической ошибки $\sigma(\Delta T)/\sqrt{N}$ (где N – число событий). Ни в одной группе бурь не было обнаружено зависимости ΔT от интенсивности бури в отличие от работы [Yokoyama and Kamide, 1997] и в согласии с выводами, полученными в работе [Vichare et al., 2005].

Из таблицы 1 следует также, что наибольшие по модулю значения Dst -индекса и скорости его понижения на главной фазе $\langle |\Delta Dst / \Delta T \rangle$ характерны для Sheath-бурь, а наименьшие для Ejecta-бурь. Это наблюдение не противоречит общеизвестному факту, что “наибольшие бури генерировались магнитными облаками”, так как экстремальные бури, как правило, имеют сложный многоступенчатый характер и инициируются комплексами в СВ, включающими ударную волну, Sheath и магнитное облако, или несколькими такими комплексами, взаимодействующими между собой

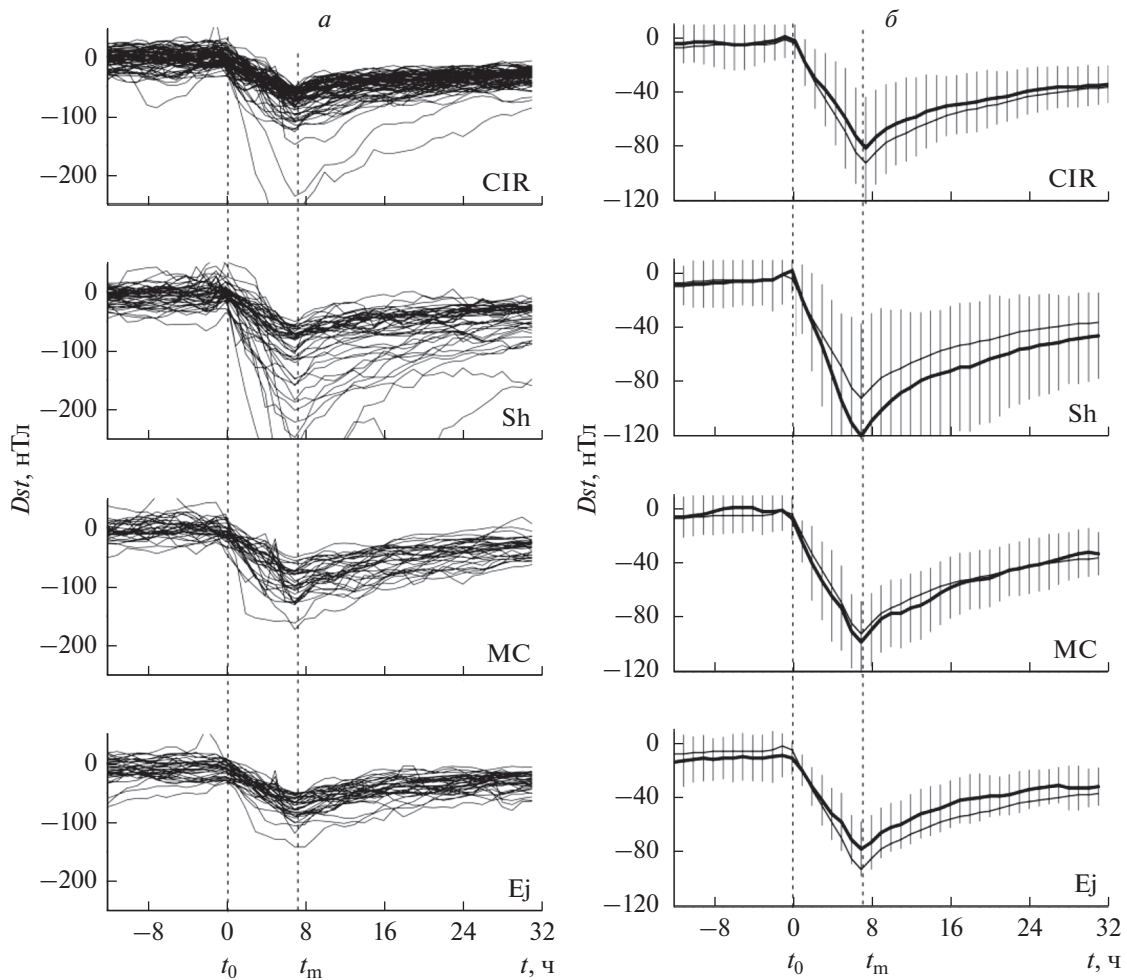


Рис. 1. Временные профили индекса Dst после применения двойного МНЭ для групп бурь, инициированных CIR, Sheath (Sh), MC и Ejecta (Ej) (a); то же для “усредненной” бури (б) каждого источника (сплошная жирная линия), и группы из всех бурь, независимо от их источника (сплошная тонкая линия). Вертикальные пунктирные линии показывают моменты начала и окончания главной фазы бури.

[Ермолаев и др., 2017]. В данной работе такие случаи были исключены из рассмотрения.

3.2. Усредненные временные профили индекса Dst , скорости инжекции Q и интеграла электрического поля E_y ($sum E_y$)

3.2.1. Усредненные временные профили индекса Dst для всех бурь, отобранных в группы по их межпланетным источникам, приведены на рис. 1a. Результат обработки этих бурь двойным МНЭ представлен на рис. 1б, из которого можно видеть, что, в среднем, интенсивность (модуль минимального значения Dst_{min}) бурь, индуцированных событиями Sheath, выше средних значений, полученных для всех бурь, а интенсивность бурь, индуцированных Ejecta-событиями, наоборот, ниже средних значений. CIR- и MC-бури имеют интенсивности, близкие к средней. Ана-

логичный результат для Sheath-бурь был получен в работах [Ермолаев и др., 2010, 2011; Yermolaev et al., 2010, Николаева и др., 2017], однако в них самый слабый отклик в Dst -индексе был получен для MC-, а не для Ejecta-бурь. Возможно, это связано с разными наборами бурь, которые были отобраны для анализа. На основании рис. 1б можно также предположить, что для областей сжатия Sheath и CIR значения интенсивности бурь имеют более высокий разброс, чем для ICME. Таким образом, проведенный расчет подтверждает полученный ранее на данных за 1976–2000 гг. вывод, что Sheath-события являются самостоятельными, не связанными с собственно ICME, источниками интенсивных магнитных бурь [Ермолаев и др., 2010, 2011; Yermolaev et al., 2010].

3.2.2. Из вариаций Dst -индекса можно провести оценку скорости инжекции энергии в кольцевой ток Q , с точностью до нормировочного мно-

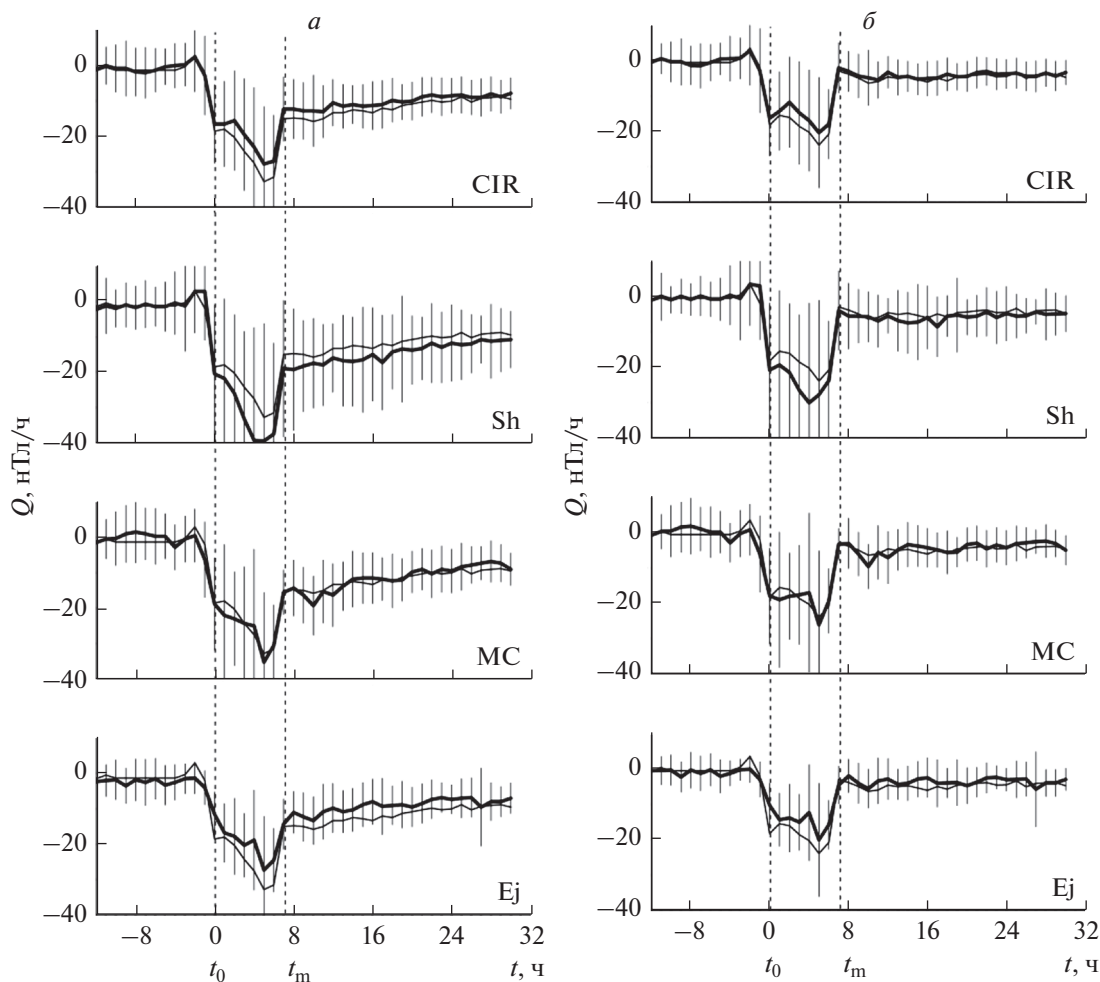


Рис. 2. Усредненные временные профили скорости инъекции энергии в кольцевой ток Q при постоянной распаде $\tau = 4$ ч (а) и $\tau = 8$ ч (б) для магнитных бурь, инициированных разными источниками: CIR, Sheath (Sh), MC, Ejecta (Ej) (сплошная жирная линия), и для всех бурь (сплошная тонкая линия).

жителя, основываясь на уравнении баланса инъекции и диссипации энергии в кольцевой ток [Burton et al., 1975; Yakoyama and Kamide, 1997]:

$$dE/dt = Q(t) - E/\tau, \quad (1)$$

где E – энергия кольцевого тока, которая, согласно соотношения Десслера–Паркера–Скопке [Dessler and Parker, 1959; Sckopke, 1966], пропорциональна Dst , а τ – постоянная распада кольцевого тока. Из (1) следует выражение для скорости инъекции:

$$Q(t) = \Delta Dst/\Delta t + Dst/\tau, \quad (2)$$

где ΔDst равно изменению Dst в единичном временном интервале Δt , равному в данном случае 1 ч. Из (2) получается выражение для оценки Q :

$$Q(t_i) = [Dst(t_{i+1}) - Dst(t_i)]/(t_{i+1} - t_i) + Dst(t_i)/\tau. \quad (3)$$

В общем случае величина τ изменяется в течение бури, однако на главной фазе можно принять

ее постоянной [Yokoyama and Kamide, 1997]. С использованием (3) были получены усредненные временные профили Q , представленные на рис. 2 для $\tau = 4$ ч (слева) и для $\tau = 8$ ч (справа) для бурь, индуцированных разными событиями в СВ, и для группы из всех бурь. Величина Q , приведенная на рис. 2, имеет отрицательные значения, так как вычисляется из значений Dst . Полученные для двух разных τ распределения Q имеют похожий двухступенчатый характер, наименее ярко выраженный для более интенсивных Sheath-бурь. Однако имеются и некоторые различия: значения Q при $\tau = 8$ ч приблизительно на 25% ниже по модулю, чем для $\tau = 4$ ч, при этом с ростом τ становится более выраженным первый пик в распределении Q . Второй пик в распределении Q возрастает с ростом интенсивности бури и имеет максимальные значения для наиболее интенсивной усредненной Sheath-бури и минимальные для Ejecta-бури. Наличие второго пика означает, что скорость

поступления энергии в кольцевой ток возрастает перед точкой Dst_{\min} . Это возрастание носит кратковременный характер для CIR-, MC- и Ejecta-бурь и более растянуто во времени (~ 3 ч) для Sheath-бурь. При этом поступление энергии в кольцевой ток начинается за ~ 1 ч до начала главной фазы и заканчивается также за ~ 1 ч до ее окончания во время Sheath-бурь, в то время как для остальных трех групп бурь этот интервал составляет ~ 2 ч. Аналогичные оценки Q для бурь различных интенсивностей проводились в работе [Yokoyama and Kamide, 1997], в которой также был получен двухступенчатый характер распределения Q для разных τ , уменьшение Q с увеличением τ и возрастание второго пика с ростом интенсивности бури. Однако, так как в вышеупомянутой работе не проводилось разделения бурь по их межпланетным источникам, то более подробное сравнение результатов двух работ затруднительно. Полученные временные профили Q показывают их различие для бурь от разных источников и свидетельствуют о более интенсивном и длительном поступлении энергии в кольцевой ток в конце главной фазы бурь, индуцированных Sheath-событиями в СВ.

3.2.3. На рисунке 3 показаны усредненные временные профили, полученные для интеграла электрического поля $\text{sum}E_y$ за время главной фазы бури. Интеграл знакопеременной величины E_y до момента $t = t_0$ и после момента $t = t_m$ имеет значения, близкие к нулю. После поворота B_z ММП к югу она становится отрицательной и модуль ее (с отрицательными абсолютными значениями) растет пропорционально значению индекса Dst . Аналогичный результат получен в работе [Ермолаев и др., 2010], где было указано, что такой ход индекса Dst предполагает, что процесс генерации бури не просто связан с текущим значением E_y , а обладает памятью о предыстории. Если сопоставить значения Dst_{\min} из табл. 1 (они также приведены на рис. 3 справа) и значения $\text{sum}E_y$ на рис. 3, то можно увидеть, что коэффициенты пропорциональности между Dst_{\min} и $\text{sum}E_y$ для Sheath- и CIR-бурь приблизительно в полтора раза выше, чем для MC- и Ejecta-бурь. То есть на равные возрастания $\text{sum}E_y$ отклик в Dst в полтора раза больше для Sheath- и CIR-бурь по сравнению с бурями, инициированными MC и Ejecta. Это свидетельствует в пользу того, что Sheath-области являются самостоятельными, более геоэффективными межпланетными источниками магнитных бурь по сравнению с ICME, которым они предшествуют. Полученные результаты согласуются с выводами работ [Николаева и др., 2012а, 2017], выполненными по данным за 1976–2000 гг.

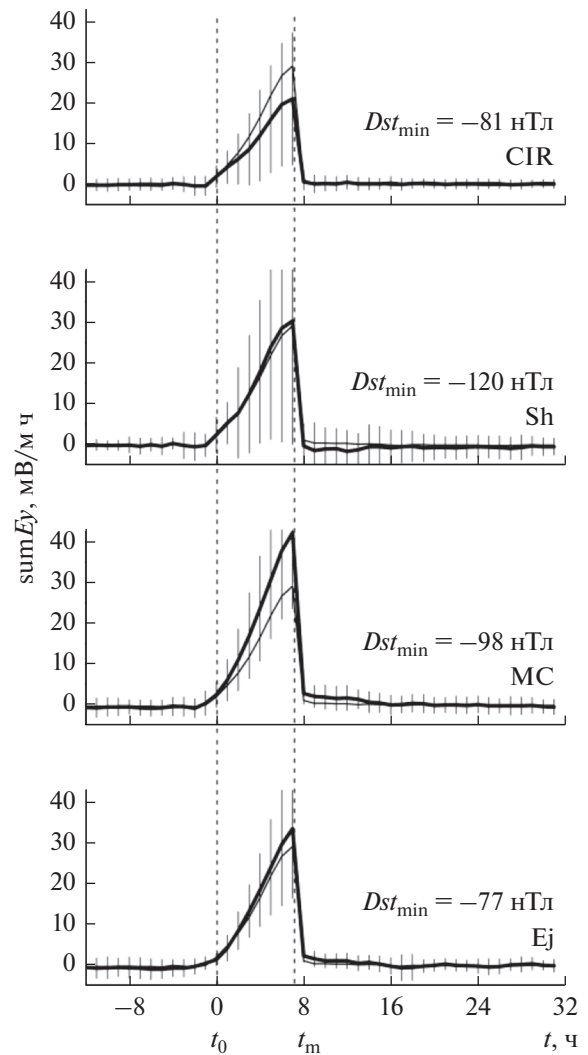


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для интеграла электрического поля $\text{sum}E_y$. Справа на панели указаны минимальные значения Dst_{\min} для каждой группы бурь.

3.3. Усредненные временные профили индексов PC и AE

3.3.1. Усредненные временные профили индекса полярной шапки PC приведены на левой панели рис. 4, из которого следует, что они значительно различаются для бурь с разными источниками как по абсолютным значениям, так и по временной динамике. Высокие абсолютные значения PC-индекса очень коротковременно наблюдаются при MC-бурях (до ~ 6 мВ/м) и Ejecta-бурях (до ~ 5 мВ/м). Для CIR-событий характерны более низкие значения PC-индекса (~ 4 мВ/м и меньше). В отличие от них во время Sheath-бурь высокие значения PC-индекса (до ~ 5 мВ/м) сохраняются в течение почти всей главной фазы. Возрастание PC-индекса во время Sheath-бурь начинается приблизительно за ~ 2 ч, а во время остальных групп бурь за ~ 1 ч, до начала главной фазы бури и

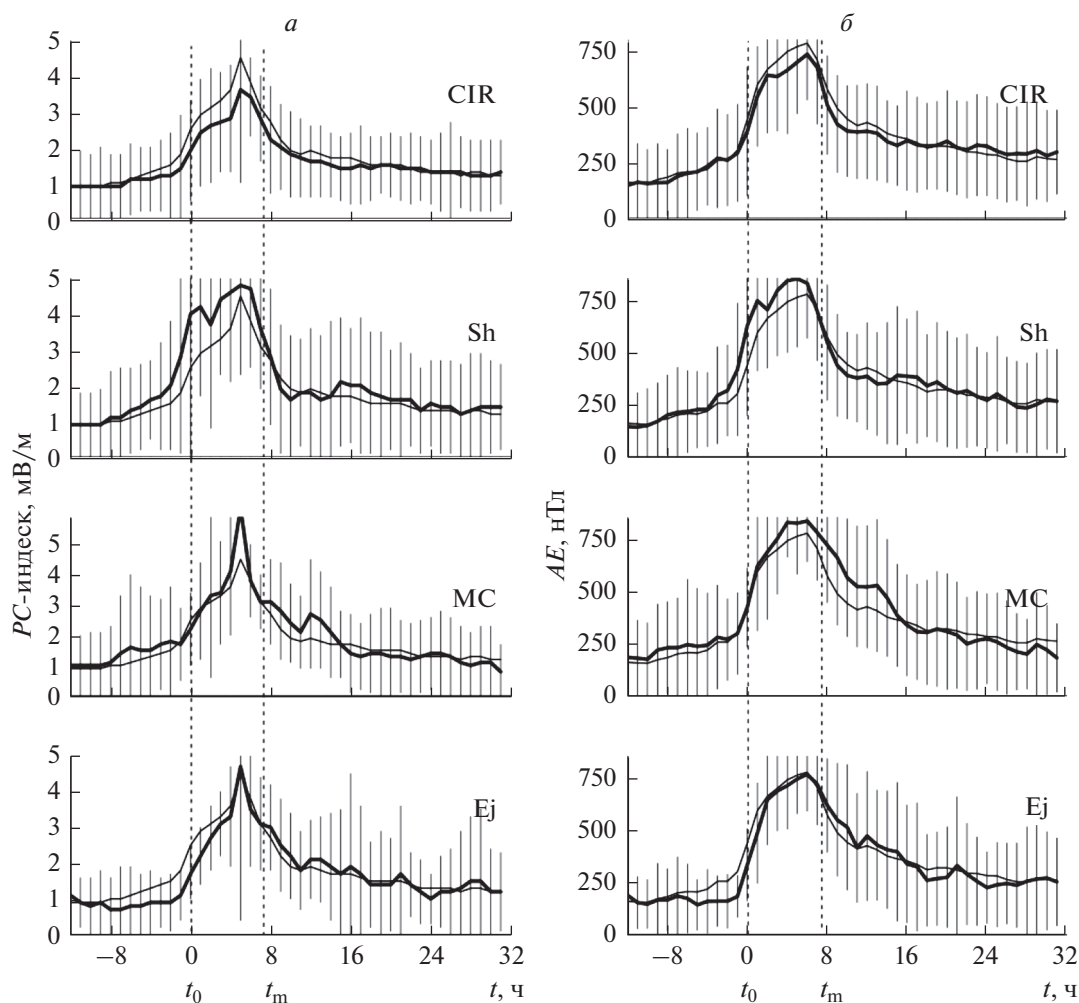


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для индекса полярной шапки PC (а) и аврального индекса AE (б).

для Sheath-событий остается на высоком уровне до начала спада также за $\sim 1-2$ ч до окончания главной фазы. В трех остальных группах бурь PC -индекс резко возрастает во второй половине главной фазы и также резко спадает за ~ 2 ч до ее окончания, что говорит о кратковременном характере возрастания активности в полярной шапке. PC -индекс является индикатором поступления энергии СВ в полярные области магнитосферы [Troshichev and Sormakov, 2017] и интенсивности электрического поля, генерируемого при взаимодействии СВ с магнитосферой, и его возрастание свидетельствует об усилении трансполярного тока, связанного с двух-вихревой системой конвекции $DP2$. Таким образом, полученные временные профили индекса PC свидетельствуют о том, что при бурях, индуцированными разными межпланетными источниками, геомагнитная активность в полярной шапке различается. Во время Sheath-бурь, она возрастает до начала главной фазы и сохраняется на высоком уровне до ее окончания. Во

время MC- и Ejecta-индуцированных бурь она усиливается кратковременно (в течение $\sim 1-2$ ч) во второй половине главной фазы. Во время бурь, вызванных CIR-событиями, наблюдается самое слабое кратковременное усиление активности в полярной зоне.

Связь PC -индекса с 30 мин индексом $SymH$ в периоды бурь, разделенных на “классические” и “пульсирующие” (CME или CIR-индуцированные), а также “композитные” (индуцированные комплексами CME/CIR), анализировалась в работе [Troshichev and Sormakov, 2017] с применением МНЭ с нулевым моментом времени в минимуме $SymH$. Было показано, что независимо от интенсивности и категории бурь, понижение $SymH$ начинается после возрастания PC -индекса до значений ~ 1.5 мВ/м за время $\Delta T \sim 1 \pm 0.5$ ч (что согласуется с нашими результатами, полученными для Dst -индекса), а в “классических” бурях после начала главной фазы PC -индекс либо возрастает кратковременно (до значений ~ 10 мВ/м) за

~2–3 ч до $SymH_{\min}$ с последующим резким спадом, либо после подъема длительно держится на высоком уровне (>4 мВ/м) почти в течение всей главной фазы. Так как “классические” бури в указанной работе не подразделялись на Sheath- и MC-индуцированные, как в нашем анализе, а рассматривались в одной группе, можно заключить, что полученные результаты не противоречат нашему выводу о существенном различии в динамике PC-индекса во время MC- и Sheath-бурь.

3.3.2. Усредненная динамика индекса AE приведена на правой панели рис. 4, из которого следует, что она отличается от динамики PC-индекса. Значения AE незначительно превышают средний уровень для Sheath- и MC-событий (максимальные абсолютные значения ≥ 800 нТл) и близки к средним во время Ejecta- и CIR-бурь (≤ 750 нТл). Временные профили индекса AE имеют похожий вид для всех групп бурь: начало роста за ~0.5–1 ч до начала главной фазы (для Sheath-бурь за ~2 ч), достижения максимума приблизительно за ~1 ч до ее окончания для CIR- и Ejecta-бурь и за ~2 ч для Sheath- и MC-бурь, с последующим постепенным спадом к добуриевым значениям через 2–3 ч после начала фазы восстановления. Эти выводы подтверждают результаты, полученные для AE-индекса в работе [Yermolaev et al., 2010] с использованием данных за 1976–2000 гг., что позволяет сделать вывод об устойчивости результатов к выборке данных.

3.4. Усредненная динамика индекса ap

Усредненные временные профили среднеширотного индекса ap для всех групп бурь представлены на рис. 5. Аналогично Dst абсолютные значения ap -индекса для Sheath-событий значительно выше средних и составляют ≥ 100 нТл в максимуме. Для Ejecta-событий они существенно ниже средних (~50 нТл в максимуме) и близки к средним для CIR- и MC-бурь (~75 нТл в максимуме). Временной ход ap -индекса различается для бурь разных групп. Значения ap -индекса начинают возрастать за ~2–3 ч до момента t_0 , достигая максимума за ~2 ч до момента Dst_{\min} при Sheath-бурях и в максимум бури при CIR-, MC- и Ejecta-бурях. Нарастание ap в Sheath-событиях происходит очень резко и еще до начала главной фазы ap достигает уровня значений, характерных для максимума средней бури (~75 нТл), а после начала главной фазы темп нарастания ap снижается. Понижение ap -индекса начинается до момента окончания главной фазы. Для остальных трех групп бурь временные профили ap подобны и характеризуются плавным монотонным возрастанием в течение главной фазы и последующим плавным спадом после ее окончания. Учитывая, что максимум ap индекса в Sheath-событиях, ана-

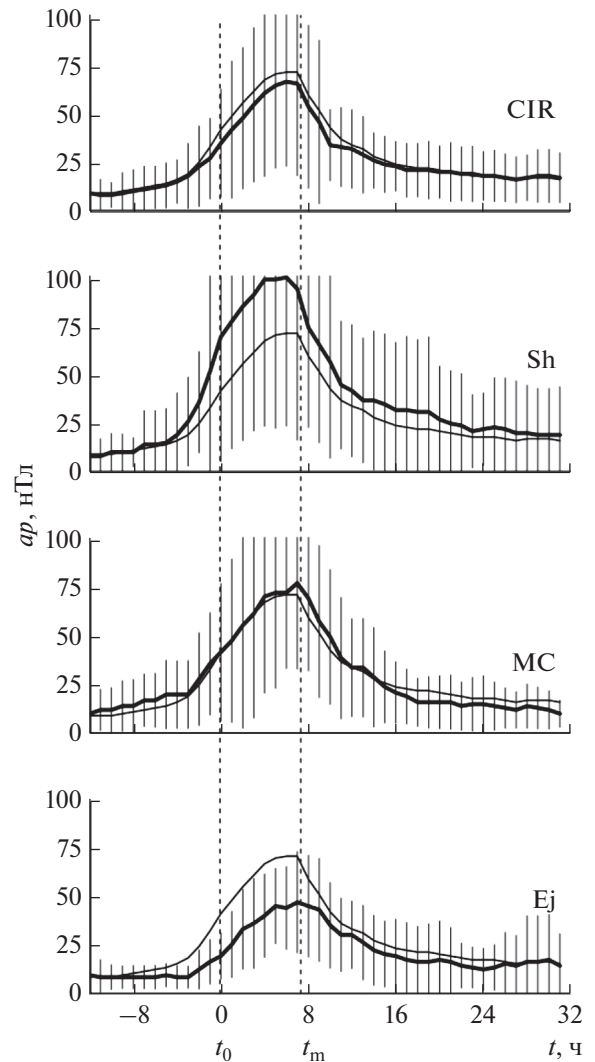


Рис. 5. То же, что на рис. 2, для индекса ap .

логично максимуму AE, достигается на 1–2 ч раньше Dst_{\min} , (и максимума в остальных группах бурь), можно предположить, что во время таких событий существенный вклад в среднеширотную и экваториальную активность вносят субавральные токи, которые усиливаются до начала главной фазы бури. Динамика индекса ap была проанализирована с применением двойного МНЭ, по-видимому, впервые, и полученные результаты показывают, что динамика этого индекса различна при развитии бурь с разными межпланетными источниками.

3.5. Средние временные профили параметров плазмы и ММП

Усредненные временные вариации 10 параметров СВ, включающих модуль B , составляющие B_x , B_y , B_z и вариальности (уровни флукту-

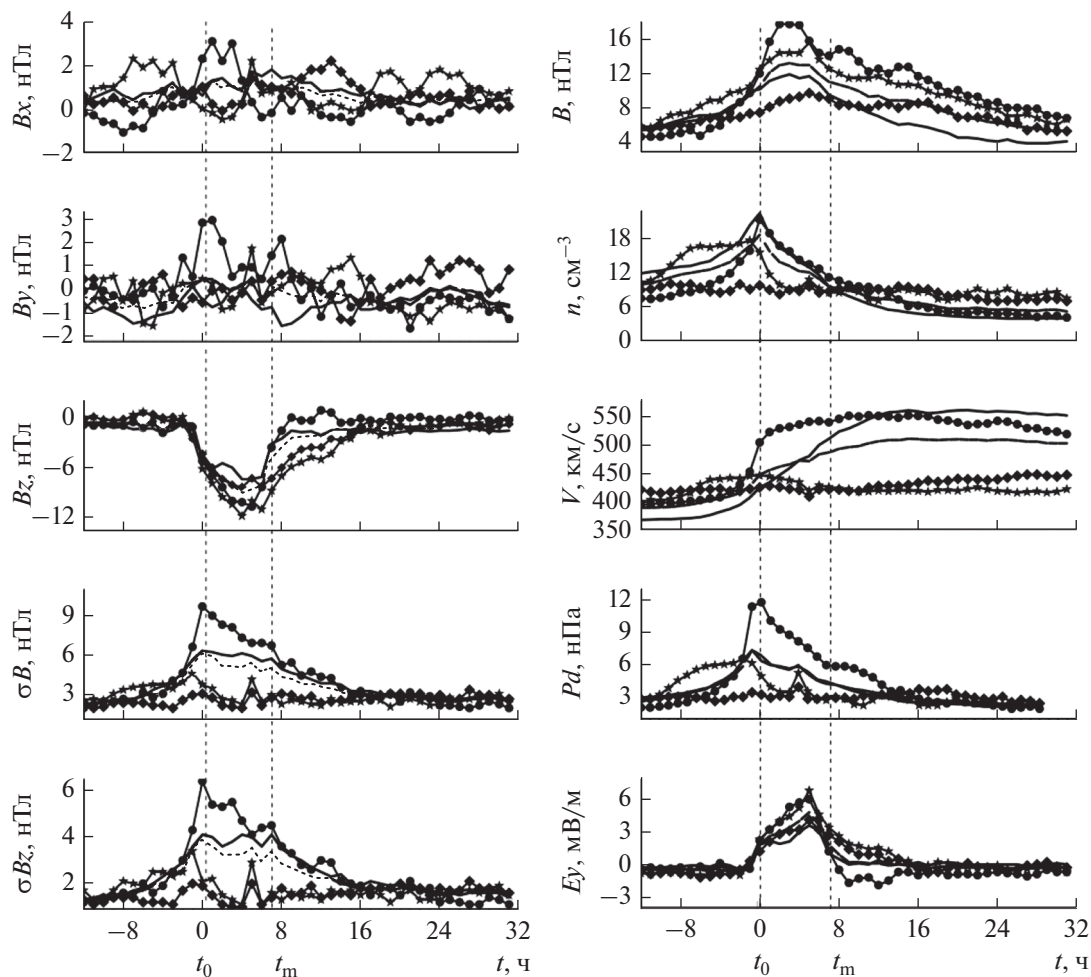


Рис. 6. Динамика усредненных значений 10 параметров СВ (указаны на панелях слева) для бурь с источниками CIR (сплошная жирная линия), Sheath(Sh) (линия с кружками), MC (линия со звездочками) и Ejecta (Ej) (линия с ромбами) и средних для всех бурь (штриховая линия).

аций) σB , σB_z ММП, концентрацию n , потоковую скорость V , динамическое давление P_d и электрическое поле СВ E_y , представлены на рис. 6 для 4-х групп бурь и средней бури. На каждой панели, слева и справа, представлено по пять параметров СВ в виде графиков, содержащих пять кривых для CIR-, Sheath-, MC-, Ejecta- и средней бурь. Среднеквадратичные отклонения на рис. 6 не указаны из-за перегруженности графиков и представлены в табл. 2 для моментов $t = t_0$ и $t = t_m$. Из рисунка 6 следует, что вариации B_y и B_x ММП имеют неупорядоченный характер с амплитудами в несколько нТл, при этом амплитуды вариаций B_y возрастают в начале главной фазы бури и остаются высокими до ее окончания. Составляющая B_z за $\sim 2-3$ ч до начала главной фазы поворачивается к югу, возрастая до середины главной фазы, а затем, за $\sim 2-3$ ч до ее окончания, начинает уменьшаться, при этом в Sheath- и CIR-событиях ее снижение имеет более крутой характер. В це-

лом, для Sheath- и MC-событий модули значения B_z выше средних, а для CIR и Ejecta ниже. В MC- и Ejecta-событиях наблюдается двухпиковое распределение B_z в течение главной фазы (что было отмечено в [Yokoyama and Kamida, 1997]). Уровень флуктуаций σB и σB_z ММП значительно выше среднего уровня для Sheath- и CIR-событий (при этом их рост начинается до начала главной фазы), и существенно ниже для MC и Ejecta. Значения модуля B изменяются похожим образом для всех групп бурь, постепенно нарастая в первой половине главной фазы бури и спадая к ее окончанию. Для Sheath и MC они в полтора раза выше, чем для CIR и Ejecta. Значения концентрации плазмы n возрастают к началу главной фазы, а затем медленно спадают к ее окончанию в Sheath- и CIR-событиях, оставаясь выше средних значений. В MC возрастание n начинается задолго до начала бури и резко спадает после начала главной фазы. Значения n на главных фазах MC- и Ejecta-

бурь в 2–3 раза ниже средних. Скорость плазмы V в Sheath-событиях резко возрастает к началу главной фазы и сохраняет высокие значения надолго после ее окончания. Скорость в CIR- событиях начинает возрастать с началом главной фазы бури, достигает максимальных значений к ее окончанию и продолжает оставаться высокой. В событиях MC и Ejecta V на протяжении всей бури имеет значения ниже среднего. Динамическое давление P_d изменяется подобно n , однако относительное ее превышение над средними значениями в Sheath-событиях обусловлено вкладом V . Электрическое поле E_y следует за вариациями Bz ММП (с противоположным знаком), показывая значения для Sheath и MC выше средних, а для CIR и Ejecta ниже средних. Таким образом, динамика и значения основных параметров ММП и плазмы СВ значительно различаются при бурях, индуцированных разными межпланетными источниками. Полученные временные профили этих параметров находятся в хорошем согласии с полученными в работах [Yermolaev et al., 2010; Ермолаев и др., 2011] по данным за 1976–2000 гг.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ 181 магнитной бури с $Dst_{\min} < -50$ нТл и их межпланетных источников, наблюдаемых за 1995–2017 гг., с использованием двойного 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 (43 события); Sheath перед MC и Ejecta, объединенные в одну группу (43 события); MC (31 событие) и Ejecta (33 события). В результате проведенного анализа получены следующие результаты.

1. Наиболее эффективная генерация магнитной бури с самым крутым понижением Dst имеет место для бурь, индуцированных Sheath-событиями в СВ, а скорость понижения индекса Dst в ходе главной фазы бури происходит пропорционально интегралу E_y ($\text{sum}E_y$), что подтверждает выводы работ [Николаева и др., 2017; Yermolaev et al., 2010; Ермолаев и др., 2011], выполненных на данных 1976–2000 гг. Результаты вышеуказанных работ подтверждает и полученная нами для разных групп бурь динамика индекса AE и интеграла $\text{sum}E_y$, а также параметров ММП и плазмы СВ. Такой вывод свидетельствует об устойчивости результата анализа к выборке данных. Показано, что самый слабый отклик в индексе Dst характерен для Ejecta- событий в СВ, а коэффициент пропорциональности между скоростью роста Dst индекса и величиной $\text{sum}E_y$ различно для бурь, индуцированных разными межпланетными источниками.

2. Существуют заметные различия в динамике среднеширотного индекса геомагнитной активности ap для бурь, индуцированных разными межпланетными источниками: максимальные значения ap -индекса при Sheath-бурях имеют место за ~ 2 ч до Dst_{\min} и в два раза превышают средние значения, в то время как в остальных группах бурь максимум ap совпадает с Dst_{\min} и имеет значения близкие к средним для CIR- и MC-бурь и в два раза меньше средних для Ejecta-бурь. Такая динамика ap -индекса означает, что во время Sheath-бурь существенный вклад в среднеширотную и экваториальную активность вносят субавроральные токи, усиливающиеся до начала главной фазы бури.

3. Динамика индекса полярной шапки PC имеет значительные различия при бурях, индуцированных разными межпланетными источниками: во время Sheath-бурь значения PC резко возрастают за ~ 2 ч до начала главной фазы бури и остаются на высоком уровне в течение почти всей главной фазы, а при CIR-, MC- и Ejecta-бурях он начинает возрастать за ~ 1 ч до начала главной фазы и имеет только кратковременное ~ 1 – 2 ч усиление во второй половине главной фазы бури. Такая динамика PC -индекса свидетельствует о длительном, в течении почти всей главной фазы, усилении трансполярной конвекции при Sheath-бурях и только кратковременном усилении полярных токов при бурях остальных трех групп.

4. Оценка скорости инжекции энергии в кольцевой ток Q имеет двухступенчатый характер для всех бурь (аналогичный вывод был получен в работе [Yakoyama and Kamide, 1997] для бурь, независимо от их источника), однако ее динамика отличается для бурь, индуцированных разными межпланетными источниками: для Sheath-бурь наблюдается минимальный первый пик и максимальный и длительный второй пик в распределении Q , что означает, что поступление энергии в кольцевой ток не замедляется с началом развития главной фазы, и усиливается к ее окончанию в течение длительного времени (~ 3 ч), в то время как для CIR-, MC- и Ejecta-бурь наблюдается замедление поступления энергии в кольцевой ток в начале главной фазы, а ее ускорение перед Dst_{\min} носит кратковременный характер по сравнению с Sheath-бурями.

Полученные результаты показывают, что использованный двойной МНЭ может быть успешно использован для изучения магнитных бурь, имеющих различные длительности главной и восстановительной фаз, и могут оказаться полезными при on-line прогнозе магнитосферных индексов и геомагнитной обстановки на разных широтах на основе измерений межпланетных параметров.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за возможность использования базы данных OMNI2 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00177а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дремухина Л.А., Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И. Статистическое исследование воздействия солнечного ветра разных типов на генерацию магнитных бурь в период 1995–2016 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 6. С. 768–775. 2018.
<https://doi.org/10.1134/S0016794018060032>
- 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.
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю., Рязанцева М.О. Некоторые вопросы идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в физике магнитосферы // Космич. исслед. Т. 55. № 3. С. 189–200. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S0023420617030025>
- 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.
- Akasofu S.-I. The development of magnetic storms without a preceding enhancement of the solar plasma pressure // Planet. Space. Sci. V. 13. P. 297–301. 1965.
- 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. 300–308. 2019.
- Burlaga L.F., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. V. 86. P. 6673–6684. 1981.
- 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.
- Dessler A.J., Parker E.N. Hydromagnetic theory of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 64. P. 2239–2252. 1959.
- Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zone // Phys. Rev. Lett. № 6. P. 47–48. 1961.
- Gonzalez W.D., Jozelyn J.A., Kamide Y. et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 899. № A4. P. 5771–5777. 1994.
- 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>
- Ilie R., Liemohn M.W., Thomsen M.F. et al. Influence of epoch time selection on results of superposed epoch analysis using ACE and MPA data // J. Geophys. Res. V. 113. A00A14. 2008.
<https://doi.org/10.1029/200813241>
- 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(A2). P. A02209. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010804>
- Loewe C.A., Prolls G.V. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 102. P. 14209. 1997.
- 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>
- 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.
- Russell C.T., Milligan T. The true dimensions of interplanetary coronal mass ejections // Adv. Space Res. V. 29. P. 301–306. 2002.
- Skopke N.A. A general relation between the energy of trapped particles and the distribution field near the Earth // J. Geophys. Res. V. 71. P. 3125–3130. 1966.
- Taylor J.R., Lester M., Yeoman T.K. A superposed epoch analysis of geomagnetic storms // Ann. Geophys. V. 12. P. 612–624. 1994.
- Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrom S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index // Planet. Space Sci. V. 36. H. 1095–1102. 1988.
- Troshichev O.A., Sormakov D.A. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere:

3. Development of magnetic storms // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.012>
- *Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A.* Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 71. P. 1023–1031. 2009.
- *Vichare G., Alex S., Lakhina G.S.* Some characteristics of intense geomagnetic storms and their energy budget // *J. Geophys. Res.* V. 110. A03204. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010418>
- *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>
- *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y.* Dynamics of large-scale solar wind streams obtained by the double superposed epoch analysis // *J. Geophys. Res.* V. 120. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021274>
- *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S. et al.* Dynamics of Large-Scale Solar-Wind Streams Obtained by the Double Superposed Epoch Analysis: 2. Comparisons of CIRs vs. Sheaths and MCs vs. Ejecta // *Solar Phys.* V. 292. P. 193. 2017.
<https://doi.org/10.1007/s11207-017-1205-1>
- *Yokoyama N., Kamide Y.* Statistical nature of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 102. A7. P. 14215–14222. 1997.
- *Zhang J., Liemohn M.W., Kozira J.U., Thomsen M.F., Elliott H.A., Weygand J.M.* A statistic comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum // *J. Geophys. Res.* V. 111. A01104. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011065>