

УДК 523.62-726

ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ ОТ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ТЕЧЕНИЙ. 2. ГЛАВНАЯ ФАЗА БУРИ

© 2012 г. Н. С. Николаева, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина

Учреждение РАН Институт космических исследований, г. Москва

e-mail: nnikolae@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 28.09.2010 г.

После доработки 24.06.2011 г.

В работе анализируется развитие главной фазы магнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТл, межпланетным источником которых являются 8 типов течений солнечного ветра: магнитные облака MC (17 бурь), коротирующие области взаимодействия CIR (49 бурь), “поршни” Ejecta (50 бурь), область сжатия перед “поршнем” Sh_E (34 бури), область сжатия перед магнитным облаком Sh_{MC} (6 бурь), все области сжатия перед “телом” ICME, $Sh_E + Sh_{MC}$ (40 бурь), все “тело” ICME, MC + Ejecta (67 бурь), а также неопределенный тип течения IND (34 бури).

Оценки пороговых значений интегрального электрического поля $\sum E_y$ для достижения уровня интенсивности умеренных ($Dst \leq -50$ нТл) и сильных ($Dst \leq -100$ нТл) магнитных бурь указывают на тенденцию их зависимости от типа источника магнитной бури. Можно предположить, что, в среднем, области сжатия перед “телом” ICME имеют пороговые значения в 1.5 раза ниже, чем сами тела ICME.

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением серии наших работ [Ермолаев и др., 2007а, б] и следующей частью недавней работы [Николаева и др., 2011], в которой мы на основе каталога крупномасштабных типов солнечного ветра, созданного с использованием базы OMNI за период 1976–2000 г. [Ермолаев и др., 2009], провели исследование зависимости максимальных значений геомагнитных индексов $|Dst|$ и AE (являющиеся мерами интенсивности кольцевого и аврорального токов), наблюдаемых во время магнитных бурь, от максимальной величины межпланетного электрического поля $E_y = VxVz$, где Vx – скорость солнечного ветра и Vz – компонента межпланетного магнитного поля (ММП). Анализ был сделан отдельно для 8 категорий магнитных бурь, вызванных разными типами течений солнечного ветра: CIR – 86 бури, MC – 43 бури, Sh_{MC} – 8, Ejecta – 95, Sh_E – 56, MC + Ejecta – 138, $Sh_{MC} + Sh_E$ – 64, и неопределенный тип – 75 бурь. Использование (“peak-to-peak”) метода сопоставления “пиковых” значений E_y и $|Dst|$ позволило получить некоторые интересные результаты. В частности, было показано, что почти для всех типов солнечного ветра, кроме MC и MC + Ejecta, связь между индексом $|Dst|$ (Dst в минимуме главной фазы магнитной бури) и электрическим полем E_y хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с высоким коэффициентом корреляции. При этом для магнитных бурь, связанных со

структурами MC и MC+Ejecta, индекс $|Dst|$ выходит на насыщение при больших значениях поля $E_y > 11$ мВ/м, что, возможно, связано с нелинейностью процессов взаимодействия солнечного ветра с ионосферно-магнитосферной системой при сильных электрических полях. На фоне зависимости максимального $|Dst|$ индекса от поля E_y величина $|Dst|$ индекса, по-видимому, не зависит от величины динамического давления Pd и от уровня флуктуаций σB ММП, или эта зависимость слабая.

Характер развития геомагнитных бурь зависит от типа течения солнечного ветра, которым она вызывается. Эти различия проявляются в поведении кольцевого тока, авроры, плазменного слоя Земли, в магнитосферной конвекции и в насыщении потенциала полярной шапки [Borovsky and Denton, 2006]. Большинство предыдущих исследований не проводили селекцию интервалов солнечного ветра по типам течения солнечного ветра (например, обсуждение и ссылки в работах [Ермолаев и др. 2007а, б; Yermolaev et al., 2007; Николаева и др., 2011]). Либо селекция проводилась только по ограниченному типам солнечного ветра: например, по магнитным облакам MC [Wu and Lepping, 2002; Yurchyshyn et al., 2004], по коротирующим областям взаимодействия CIR [Alves et al., 2006; Richardson et al., 2006] или по потокам за межпланетными ударными волнами [Oh and Yi, 2004]. Лишь в некоторых работах проводилось сопоставление этих зависимостей в разных типах

течений, например, в MC и CIR [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007; Ермолаев и др., 2007б]. Полученные нами ранее результаты [Николаева и др., 2011] сопоставления зависимости геомагнитных индексов от величины E_y в минимуме Dst в 8-ми разных типах течений солнечного ветра расширили и дополнили имеющуюся информацию.

Основным недостатком ранее использованного методического (“peak-to-peak”) подхода является то, что при таком подходе анализируются лишь экстремальные значения электрического поля и магнитосферных индексов, взятые в минимуме Dst индекса, и не учитывается их динамика. В то же время в ряде работ было показано, что Dst индекс зависит не только от текущего значения E_y , но от предыдущих значений, т.е. от длительности воздействия E_y [Russell et al., 1974; Gonzalez and Tsurutani, 1987; Tsurutani et al., 1988; Tsurutani et al., 1992; Gonzalez et al., 1994; Tsurutani and Gonzalez, 1995; Yokoyama and Kamide, 1997; Ермолаев и др., 2010б].

В ряде работ были получены эмпирические критерии для возникновения магнитной бури заданной интенсивности (независимо от типа источника в солнечном ветре), исходя из пороговой величины южной компоненты B_s ММП и ее длительности [Russell et al., 1974; Gonzalez and Tsurutani, 1987; Tsurutani et al., 1992; Gonzalez et al., 1994; Tsurutani and Gonzalez, 1995]. В частности, было показано, что для возникновения умеренных магнитных бурь с $Dst_{\min} \leq -50$ нТл необходимо южное поле с величиной $B_s = -B_z \geq 5$ нТл и длительностью более ≥ 2 ч [Russell et al., 1974; Gonzalez et al., 1994]. А причиной сильных магнитных бурь с $Dst \leq -100$ нТл являются электрические поля утро–вечер с $E_y > 5$ мВ/м (что эквивалентно большому южным межпланетным полям $B_s = -B_z \geq 10$ нТл при скорости 500 км/с) с длительностью более 3 ч [Gonzalez and Tsurutani, 1987; Tsurutani et al., 1992; Gonzalez et al., 1994; Tsurutani and Gonzalez, 1995]. В другой работе [Wang et al., 2003] приводится южное поле $B_s \geq 3$ нТл с длительностью $\Delta t \geq 1$ ч для умеренных магнитных бурь ($Dst_{\min} \leq -50$ нТл), и пороговые значения $B_s \geq 6$ нТл длительностью $\Delta t \geq 2$ ч для сильных магнитных бурь ($Dst_{\min} \leq -100$ нТл), которые несколько отличаются от результатов предыдущих авторов [Russell et al., 1974; Gonzalez and Tsurutani, 1987; Gonzalez et al., 1994].

Чтобы понять, как интенсивность магнитных бурь связана с их длительностью, авторы [Yokoyama and Kamide, 1997] проанализировали 300 магнитных бурь, разделив их на 4 категории в зависимости от величины Dst в минимуме (но независимо от типа источника солнечного ветра). Было получено, что средняя длительность главной фазы выше для категории интенсивных магнитных

бурь, чем для категории умеренных и слабых магнитных бурь (уменьшается в 3 раза от категории интенсивных магнитных бурь до категории слабых магнитных бурь). Хотя погрешности для каждой серии данных велики, присутствует четкая тенденция роста средней длительности магнитных бурь (ее главной фазы и фазы восстановления), с ростом мощности магнитной бури. Итак, авторы [Yokoyama and Kamide, 1997] подтвердили факт, что южная компонента $B_z < 0$ ММП играет критическую роль не только как триггер главной фазы, но также в определении интенсивности магнитной бури.

Исследование влияния средней величины электрического поля $\langle E_y \rangle$ на главной фазе магнитной бури и длительности главной фазы ΔT на интенсивность магнитной бури показало, что для формирования магнитных бурь величина электрического поля $\langle E_y \rangle$ важнее, чем длительность главной фазы ΔT [Wang et al., 2003].

Однако приведенные выше критерии для умеренных и сильных магнитных бурь относятся не к эволюции главной фазы магнитной бури, а к общему или глобальному поведению южной компоненты B_s ММП, которая при достижении и прохождении пороговой величины южного поля (или эквивалентного электрического поля E_y) в течение определенного временного интервала, с высокой вероятностью вызывает умеренные или интенсивные магнитные бури.

Развитие главной фазы интенсивных магнитных бурь ($Dst < -100$ нТл), вызванных прохождением разных типов межпланетных структур [Vieira et al., 2004], показало, что интенсивные магнитные бури, связанные с областями сжатия Sheath, развиваются примерно в 2 раза быстрее, чем аналогичные бури, вызванные сильными магнитными полями внутри поршня Ejecta или в коротирующих областях взаимодействия CIR. Время необходимое для того, чтобы величина индекса Dst достигла определенного порогового уровня, является важным параметром и зависит от типа межпланетной структуры [Vieira et al., 2004]. Для сильных магнитных бурь, генерированных разными типами солнечного ветра, пороговые значения электрического поля и его длительности различаются в несколько раз. Отметим, что выводы авторов базируются на небольшой статистике событий каждого типа: от 2-х сильных магнитных бурь для событий CIR и MC со структурой поля NS и до 5-ти магнитных бурь для событий Sheath.

Цель данной работы – анализ развития главной фазы преимущественно умеренных и частично сильных магнитных бурь, вызванных разными структурами солнечного ветра. Такой подход позволяет исследовать причинно-следственную связь между источником магнитной бури – развитием конвективного электрического поля внутри каж-

дой структуры, и его откликом – величиной Dst индекса (интенсивностью кольцевого тока). Кроме того, это позволяет оценить пороговые критерии для достижения разных величин Dst индекса на главной фазе магнитных бурь с разным типом источника в солнечном ветре.

С этой целью мы анализируем динамику изменения Dst индекса при изменении суммарного (интегрального) электрического поля $sumEy$ во время главной фазы магнитных бурь с разным типом солнечного ветра, и на фоне этой основной зависимости исследуем возможное влияние динамического давления солнечного ветра Pd и вариаций σB ММП на развитие Dst индекса. В данной статье мы приведем основные характеристики главных фаз магнитных бурь и значения пороговых критериев для умеренных и сильных магнитных бурь, вызванных разными типами течений СВ. Анализ динамики развития главной фазы в зависимости от динамического давления и уровня флуктуаций ММП приводится во 2-й статье [Николаева и др., 2012], являющейся продолжением данной статьи.

2. МЕТОДИКА

Методика идентификации крупномасштабных течений солнечного ветра состоит в сравнении каждой точки базы данных OMNI [King and Papitashvili, 2004] с набором пороговых критериев по ключевым параметрам солнечного ветра и ММП и подробно описана в работе [Ермолаев и др., 2009]. Предполагается, что событие солнечного ветра приводит к магнитной буре, если минимум Dst попадает внутрь интервала межпланетного события или следует за ним в течение не более 2-х часов. Привязка этих событий солнечного ветра к магнитным бурям подробно описана в работе [Ермолаев и др., 2010а]. Для классификации магнитных бурь по интенсивности использовался общепринятый критерий по величине Dst индекса в минимуме главной фазы: $-100 < Dst \leq -50$ нТл для умеренных и $Dst \leq -100$ нТл для сильных магнитных бурь [Gonzalez et al., 1994].

Так как для исследования динамики процесса генерации магнитной бури необходимо анализировать непрерывные наборы параметров Bz и Ey на протяжении всей главной фазы магнитной бури, то нам пришлось исключить из анализа данные базы OMNI для тех магнитных бурь, для которых имелись пропуски в данных. За период 1976–2000 гг. нами было отобрано 190 магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности ($Dst \leq -50$ нТл), источником которых являлись 8 типов течений солнечного ветра (включая 2 комбинированных типа, MC + Ejecta и $Sh_E + Sh_{MC}$, являющихся суммой других типов): магнитные облака MC (17 магнитных бурь), коротящие области взаимодействия CIR (49 магнитных бурь), поршни Ejecta

(50 магнитных бурь), область сжатия перед поршнем Sh_E (34 магнитные бури), область сжатия перед магнитным облаком Sh_{MC} (6 магнитных бурь), сумма областей сжатия Sheath перед магнитными облаками MC и поршнями Ejecta, т.е. перед телом ICME, $Sh_E + Sh_{MC}$ (40 магнитных бурь), сумма тел ICME, MC + Ejecta (67 магнитных бурь), события неопределенного типа IND (34 магнитные бури). К неопределенному типу IND относились события, для которых невозможно было провести надежную идентификацию типа течения, либо из-за отсутствия каких-либо параметров солнечного ветра, либо из-за сложного характера явления.

Типичная магнитная буря имеет 2 фазы: 1) главная фаза (понижение величины Dst , $dDst/dt < 0$), длительностью 2–20 ч, 2) фаза восстановления (постепенное нарастание Dst , $dDst/dt > 0$), длительностью 1–2 дня. В ряде случаев перед главной фазой магнитной бури наблюдается начальная фаза. Поскольку в настоящее время она не рассматривается как существенная часть магнитной бури, так как относится лишь к определенной категории магнитных бурь с внезапным началом (например, [Loewe and Prolss, 1997]), то мы ее не рассматриваем в данной работе. Начало главной фазы магнитной бури (точка $i = 1$) определялось, как момент резкого понижения Dst индекса [Ермолаев и др., 2007а; Yermolaev et al., 2007]. Конец главной фазы (точка $i = n$) определялся, как момент достижения минимального значения Dst индекса.

Для каждого типа источника солнечного ветра были построены зависимости величины индекса $Dst(i)$ в текущий момент главной фазы ($i = 1, 2, \dots, n$) от интегрального электрического поля $sumEy(i)$, просуммированного от начала магнитной бури (точка $i = 1$) до текущей точки главной фазы ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), где последняя точка $i = n$ соответствует концу главной фазы, т.е. минимуму Dst индекса.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Некоторые статистические характеристики для разных источников магнитных бурь

Анализ гистограмм распределений длительности ΔT главных фаз нашей выборки и основных параметров солнечного ветра Pd , Bz , Ey , флуктуаций σB ММП на главных фазах магнитных бурь, связанных с 8-ю разными типами течений солнечного ветра (не приводятся), показал, что полученные средние значения этих параметров на главной фазе магнитных бурь отражают основные характеристики типов течений [Ермолаев и др., 2009]. Для получения статистических характеристик параметров, отражающих основную массу массива точек, была проведена дополнительная

Таблица 1. Средние значения электрического поля $\langle E_y \rangle$, динамического давления $\langle Pd \rangle$, компоненты $\langle B_z \rangle$ ММП, уровня флуктуаций поля $\langle \sigma B \rangle$, длительности главной фазы $\langle \Delta T \rangle$ для магнитных бурь от 8-ми типов течений солнечного ветра

Тип СВ	$\langle E_y \rangle$, мВ/м	$\langle Pd \rangle$, нПа	$\langle B_z \rangle$, нТл	$\langle \sigma B \rangle$, нТл	$\langle \Delta T \rangle$, ч
IND	2.4 ± 1.3	3.1 ± 1.6	-5.1 ± 2.8	3.2 ± 1.6	8.4 ± 3.8
CIR	2.1 ± 2.6	5.8 ± 2.9	-5.0 ± 5.7	5.4 ± 3.0	8.5 ± 3.4
Ejecta	2.8 ± 2.0	4.4 ± 2.7	-5.9 ± 4.1	3.5 ± 2.2	8.7 ± 3.8
MC + Ejecta	3.0 ± 2.1	4.4 ± 2.9	-6.4 ± 4.3	3.4 ± 2.2	8.3 ± 3.8
Sh _E	3.5 ± 3.1	6.3 ± 4.9	-7.1 ± 6.3	5.2 ± 3.5	5.4 ± 2.2
Sh _E + Sh _{MC}	4.0 ± 3.8	7.2 ± 5.6	-7.7 ± 6.8	5.6 ± 3.7	5.7 ± 2.2
MC	4.0 ± 2.1	3.8 ± 2.7	-8.7 ± 3.9	3.1 ± 2.3	7.1 ± 3.4
Sh _{MC}	6.8 ± 5.5	11.6 ± 7.2	-11.0 ± 8.5	7.8 ± 4.8	7.2 ± 1.3

обработка. Во-первых, мы исключили магнитные бури с очень продолжительными, как правило, немонотонными (multistep storm), главными фазами, с длительностью $\Delta T \geq 20$ ч. Это уменьшило статистику магнитных бурь разного типа, кроме Sh_{MC}: на 1 магнитную бурю для CIR, MC, Ejecta и Sh_E, Sh_E + Sh_{MC}, на 2 магнитные бури для MC + Ejecta, и на 4 магнитные бури для событий IND. Во-вторых, были отброшены точки, отстоящие от средних значений на 3 дисперсии в обе стороны. В ре-

зультате уменьшилось число точек главной фазы почти всех типов магнитных бурь (кроме Sh_{MC}). Сильнее всего уменьшилась статистика точек для IND (~35%). Затем для MC (~17%), области сжатия Sh_E (~13%), и Sh_{MC} + Sh_E (~11%), то есть >10%. Сами “тела” ICME – менее <10% (MC + Ejecta – 8%, и Ejecta – 3%).

Полученные средние значения параметров $\langle E_y \rangle$, $\langle Pd \rangle$, $\langle B_z \rangle$, $\langle \sigma B \rangle$ ММП и $\langle \Delta T \rangle$ со среднеквадратичными отклонениями представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Как следует из табл. 1 и рис. 1, в среднем, самое сильное электрическое поле $\langle E_y \rangle \sim 7$ мВ/м наблюдается для событий Sh_{MC}. Примерно в 1.5 раза слабее электрическое поле у магнитных бурь, вызванных MC и областью сжатия Sh_E + Sh_{MC}. Самое слабое поле $\langle E_y \rangle = 2.1\text{--}2.4$ мВ/м у событий CIR и IND, соответственно.

Самые высокие значения среднего динамического давления $\langle Pd \rangle \sim 12\text{--}6$ нПа наблюдаются на главных фазах магнитных бурь, вызванных любыми областями сжатия Sh_{MC}, Sh_E + Sh_{MC}, Sh_E и CIR. Самые низкие значения среднего динамического давления $\langle Pd \rangle \sim 4\text{--}3$ нПа наблюдаются на главных фазах магнитных бурь, вызванных MC и IND. В областях сжатия перед “телом” ICME среднее $\langle Pd \rangle$ в 1.5–3 раза выше, чем в “теле” ICME, с наибольшей разницей в 3 раза между Sh_{MC} и MC.

Наибольшее значение южной компоненты $B_s = -\langle B_z \rangle = 11$ и 8.7 нТл на главной фазе магнитных бурь, вызванных Sh_{MC} и MC, соответственно. Наименьшее среднее значение южной компоненты $B_s = -\langle B_z \rangle = 5.0$ и 5.1 нТл у магнитных бурь от событий CIR и IND, соответственно (т.е. в 2 раза меньше, чем у Sh_{MC}). Более сильная южная компонента B_s ММП в 1.2–3 раза наблюдается на главной фазе магнитных бурь, связанных с областями сжатия перед “телом”, ICME, чем с “телом” ICME.

Самый высокий уровень флуктуаций ММП $\langle \sigma B \rangle$ (от 7.8 до 5.2 нТл) на главной фазе магнитных

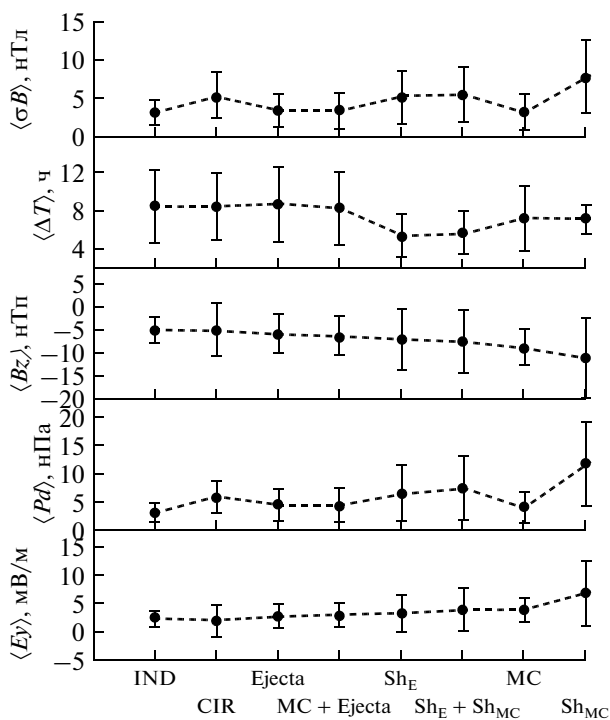


Рис. 1. Зависимость параметров, усредненных по главной фазе магнитных бурь, от типа источника в солнечном ветре. Сверху вниз: флуктуации $\langle \sigma B \rangle$ ММП, длительность главной фазы $\langle \Delta T \rangle$, компонента $\langle B_z \rangle$ ММП, динамическое давление $\langle Pd \rangle$, электрическое поле $\langle E_y \rangle$.

бурь, вызванных областями сжатия Sh_{MC} , $Sh_E + Sh_{MC}$, Sh_E и коротящими областями взаимодействия CIR. Самый низкий уровень флуктуаций поля ($\langle \sigma B \rangle = 3.1$ и 3.2 нТл) на главных фазах магнитных бурь, связанных с MC и IND, соответственно, а также с “телом” MC + Ejecta и Ejecta ($\langle \sigma B \rangle = 3.4$ и 3.5 нТл). Как и для динамического давления, в среднем, уровень флуктуаций σB на главной фазе магнитной бури, связанной с областью сжатия перед “телом” ICME (Sh_E , $Sh_{MC} + Sh_E$) в 1.5–2.5 раза выше, чем на главной фазе магнитных бурь от “тела” ICME (Ejecta, MC + Ejecta).

В среднем, наименьшая длительность главной фазы ($\langle \Delta T \rangle \sim 5.5$ ч) наблюдается у магнитных бурь, связанных с областями сжатия Sh_E и $Sh_{MC} + Sh_E$, а наибольшая длительность главной фазы ($\langle \Delta T \rangle \sim 8.5$ – 9 ч) у магнитных бурь, вызванных их “телами” Ejecta и MC + Ejecta, и коротящими областями взаимодействия CIR. В нашей выборке длительности главных фаз магнитных бурь, источником которых являются MC и Sh_{MC} , приблизительно одинаковые ~ 7 ч. В то время как для остальных типов ICME длительность главной фазы магнитных бурь, вызванных “телами” ICME (Ejecta, MC + Ejecta), в 1.5 раза больше, чем длительность главной фазы магнитных бурь от областей сжатия (Sh_E и $Sh_{MC} + Sh_E$). В нашей выборке магнитные бури от областей сжатия перед “телом” ICME развиваются быстрее, чем магнитные бури от “тела” ICME. Исключением являются бури от Sh_{MC} , время развития которых такое же, как у магнитных бурь от самих MC.

Итак, главные фазы магнитных бурь от всех областей сжатия перед телами ICME имеют более сильную южную компоненту ММП, более сильное конвективное электрическое поле, более сильное динамическое давление и уровень флуктуаций ММП, чем главные фазы магнитных бурь от “тел” ICME. В среднем различие между ними меняется в пределах 1.5–3 раза. В то же время средние длительности главных фаз разного типа магнитных бурь меняются менее сильно (не более чем в 1.5 раза). Как и следовало ожидать, изменения параметров солнечного ветра на главных фазах разных типов магнитных бурь соответствуют их изменениям внутри данных типов течений, связанных с критериями отбора этих структур [Ермолаев и др., 2009]. Однако разбросы велики, и можно говорить лишь о тенденциях.

При используемой нами методике расчета интегрального электрического поля $sum E_y$ на главной фазе, его величина зависит от вклада значений поля любого знака, наблюдаемого во время главной фазы: не только южной компоненты $B_z < 0$ ММП, но и северной компоненты $B_z > 0$ ММП. Поэтому мы оценили возможные вклады северной компоненты $B_z > 0$ ММП (отрицательных значений электрического поля E_y) в

главные фазы магнитных бурь с разными типами источников в солнечном ветре, а также долю положительных значений индекса $Dst > 0$. Большинство исследований исходят из работы [Burton et al., 1975], в которой предполагалось, что электрические поля $V B_s < 0.5$ мВ/м, где B_s – южная компонента ММП, малоэффективны [Burton et al., 1975; Fenrich and Luhmann, 1998; O'Brien and McPherron, 2000; Wang et al., 2003]. Поэтому интервалы с северной $B_z \geq 0$ ММП на главной фазе магнитной бури просто выбрасываются из интегрального E_y (например, [Vieira et al., 2004]). Так как магнитная буря “помнит” предысторию [Yermolaev et al., 2010], то мы такие интервалы с $B_z > 0$ ММП учитывали при анализе. Необходимо отметить, что значения $B_z > 0$ и $Dst > 0$, как правило, невелики по значениям и наблюдаются в начале главной фазы магнитной бури.

В таблице 2 приведены данные о вкладах северной компоненты $B_z > 0$ ММП, а также положительных значений индекса $Dst > 0$ в главную фазу разных типов магнитных бурь (в процентах к общему числу точек главной фазы). Видно, что для всех типов магнитных бурь доля северной компоненты невелика по отношению к южной компоненте и меняется от 1.5% до 19.2% в зависимости от типа магнитной бури.

Из таблицы 2 следует, что северная компонента $B_z > 0$ ММП чаще всего встречается на главной фазе магнитных бурь, связанных с областями сжатия: CIR – 19.2% всех точек данного типа солнечного ветра, Sh_E – 12.1%, $Sh_{MC} + Sh_E$ – 11%, кроме области сжатия перед магнитными облаками Sh_{MC} , для которых получено 4.6% всех точек с северным ММП (то есть, почти в 3 раза меньше, чем в остальных областях сжатия). В то же время внутри поршней Ejecta и всех “тел” ICME (Ejecta + MC) число точек на главной фазе с северной компонентой ММП почти в 2 раза меньше, чем для области сжатия, и составляет 7% и 6%, соответственно. И примерно такой же величины 8% точек главной фазы составляет вклад северной компоненты ММП для событий неопределенного типа IND. Наиболее редко северная компонента $B_z > 0$ ММП наблюдалась во время главной фазы магнитных бурь, связанных с магнитными облаками MC – 1.5%, что связано с более регулярной и стационарной структурой магнитного поля внутри MC, когда преобладает южная компонента ММП над северной компонентой ММП. Возможно, это связано с геометрией пересечения облака MC. Для области сжатия перед магнитными облаками Sh_{MC} вклад северной компоненты ММП составляет только 4.6% всех точек, что почти в 3 раза выше, чем для самих MC (1.5%). Причем почти для всех типов магнитных бурь (кроме IND, Sh_{MC} и MC) северная компонента $B_z > 0$ ММП чаще в 1.3–1.5 раз встреча-

Таблица 2. Число точек (1 ч) с северной компонентой $B_z \geq 0$ и индексом $Dst \geq 0$ на главной фазе каждого типа магнитных бурь, а также в подгруппах с высоким $Pd > P_0$ и низким $Pd < P_0$ динамическим давлением (P_0 – пороговое значение, см. текст)

Тип СВ	$B_z \geq 0$ для всех точек	$B_z \geq 0$ для $Pd \leq P_0$	$B_z \geq 0$ для $Pd > P_0$	$Dst \geq 0$ для всех точек	$Dst \geq 0$ для $Pd \leq P_0$	$Dst \geq 0$ для $Pd > P_0$
Sh _E	26/215 · 100 = = 12.1%	11/107 · 100 = = 10.28%	15/108 · 100 = = 13.89%	12/215 · 100 = = 5.59%	6/107 · 100 = = 5.61%	6/108 · 100 = = 5.56%
Ejecta	33/449 · 100 = = 7.35%	13/222 · 100 = = 5.86%	20/227 · 100 = = 8.81%	8/449 · 100 = = 1.79%	1/222 · 100 = = 0.45%	7/227 · 100 = = 3.09%
Sh _{MC}	2/43 · 100 = 4.6%	1/21 · 100 = 4.8%	1/22 · 100 = 4.5%	4/43 · 100 = 9.3%	2/21 · 100 = 9.6%	2/22 · 100 = 9%
Sh _{MC} + Sh _E	29/263 · 100 = = 11%	11/130 · 100 = = 8.4%	18/133 · 100 = = 13.5%	16/263 · 100 = = 6.1%	6/130 · 100 = = 4.6%	10/133 · 100 = = 7.5%
MC	2/134 · 100 = = 1.5%	0/68 · 100 = 0%	2/66 · 100 = 3%	5/134 · 100 = = 3.7%	1/68 · 100 = 1.5%	4/66 · 100 = 6%
CIR	83/432 · 100 = = 19.2%	30/214 · 100 = = 14%	53/218 · 100 = = 24.3%	28/432 · 100 = = 6.5%	3/214 · 100 = = 1.4%	25/218 · 100 = = 11.5%
MC + Ejecta	35/583 · 100 = = 6%	13/294 · 100 = = 4.4%	22/289 · 100 = = 7.6%	13/583 · 100 = = 2.2%	2/294 · 100 = = 0.7%	11/289 · 100 = = 3.8%
IND	27/346 · 100 = = 7.8%	14/173 · 100 = = 8.1%	13/174 · 100 = = 7.5%	6/346 · 100 = = 1.73%	0/173 · 100 = 0%	6/174 · 100 = = 3.4%

ется в подгруппе точек главной фазы с высоким динамическим давлением $Pd > P_0$, чем с низким давлением $Pd < P_0$. Для магнитных бурь, связанных с IND и Sh_{MC}, наблюдается почти одинаковый процент точек с северным $B_z > 0$ ММП в обеих подгруппах Pd , а для магнитных бурь от MC северная компонента $B_z > 0$ ММП присутствует только в подгруппе точек с высоким давлением $Pd > P_0$ и отсутствует в подгруппе с низким давлением $Pd < P_0$.

Как видно в табл. 2, положительные значения индекса $Dst > 0$ также чаще всего наблюдаются на главной фазе магнитных бурь, связанных с областью сжатия: Sh_{MC} – 9.3% всех точек. Примерно в 1.5–1.7 раз реже положительные значения $Dst > 0$ наблюдаются у областей сжатия Sh_E, Sh_{MC} + Sh_E и CIR. Реже всего $Dst > 0$ наблюдается для событий IND (менее 2%). Для самих “тел” ICME (MC, MC + Ejecta, Ejecta) положительные значения индекса $Dst > 0$ наблюдаются в 3 раза реже, чем для области сжатия перед ними. Почти для всех типов магнитных бурь доля точек главной фазы с положительным значением $Dst > 0$ зависит от величины динамического давления. Так в подгруппе магнитных бурь с высоким динамическим давлением $Pd > P_0$ доля положительных значений индекса $Dst > 0$ в несколько раз выше, чем в подгруппе с низким давлением $Pd < P_0$, и меняется от 2 раз для Sh_{MC} + Sh_E, до 8 раз для CIR. Но для событий Sh_E и Sh_{MC} в каждой из подгрупп с высоким и низким давлением наблюдается примерно одинаковое число точек, имеющих положительную вели-

чину индекса $Dst > 0$. Полученный результат согласуется с тем, что положительные значения $Dst > 0$ могут наблюдаться в начале главной фазы магнитной бури и сопровождаются ростом динамического давления Pd [Tsurutani et al., 1995] из-за высокой плотности плазмы (например, на ударной волне), что чаще наблюдается во время магнитных бурь, вызванных областями сжатия, чем самими телами ICME.

3.2 Зависимость $\langle Dst \rangle$ от интегрального поля $\langle \text{sum} E_y \rangle$ на главных фазах магнитных бурь с разными межпланетными источниками

На рисунке 2 показано, как меняется величина индекса $\langle Dst \rangle$ при изменении интегрального электрического поля $\langle \text{sum} E_y \rangle$ на главной фазе магнитных бурь, вызванных разными типами солнечного ветра: (а) с усреднением по всему диапазону изменения интегрального поля $\langle \text{sum} E_y \rangle$, и (б) усредненных по отдельным интервалам $\text{sum} E_y$ (0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–30 и >30 мВ м⁻¹ ч). Каждый тип магнитных бурь обозначен разными символами (см. наверху рис. 2а). На рисунке 2 точки, относящиеся к разным типам солнечного ветра, соединены прямыми линиями. Вертикальные и горизонтальные отрезки, проведенные через точки, показывают среднеквадратичные отклонения. На оси абсцисс рис. 2б стрелки с цифрами [1], [2], [3], [4] отмечают межпланетные критерии для умеренных $Dst \leq -50$ нТл (серый цвет) и сильных $Dst \leq -100$ нТл (черный цвет) магнитных бурь, взятые из разных работ [Russell et al.,

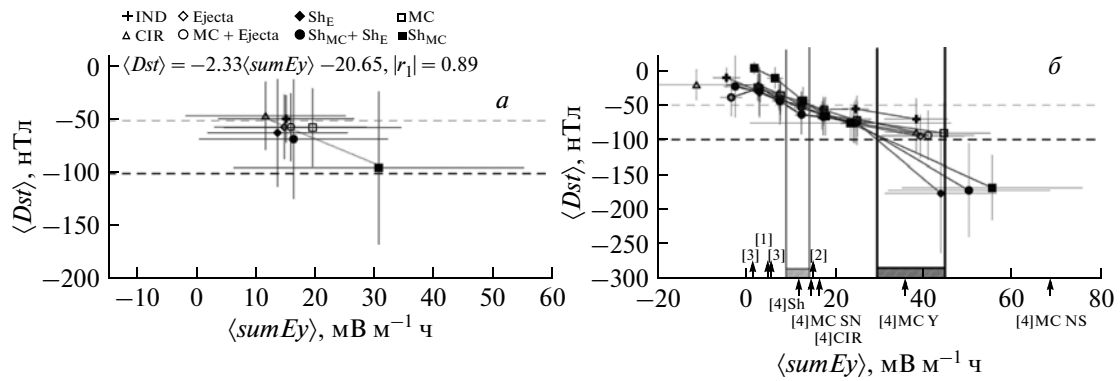


Рис. 2. Зависимость *Dst* от интегрального поля *sumEy*: (а) с усреднением по типу солнечного ветра; (б) с усреднением по интервалам *sumEy* отдельно для разных типов СВ.

1974; Gonzalez and Tsurutani, 1987; Wang et al., 2003; Vieira et al., 2004], соответственно. Вертикальные серые и черные линии со штриховкой внизу показывают аналогичный критерий, но по интегральному полю *sumEy*, для умеренных и сильных магнитных бурь (серый и черный цвет, соответственно), полученный по нашим данным (см. ниже).

Как видно на рис. 2а, различия в усредненных величинах $\langle sumEy \rangle$ и $\langle Dst \rangle$ для разных типов течений невелики и находятся в пределах погрешностей. Только для магнитных бурь, вызванных областью сжатия перед магнитными облаками Sh_{MC} , можно предположить тенденцию роста эффективности бури (понижения *Dst* величины) при больших значениях интегрального поля $\langle sumEy \rangle$. Отметим, что в предыдущей работе [Николаева и др., 2011] наблюдалась более тесная связь между индексом $\langle Dst \rangle$ и электрическим полем $\langle Ey \rangle$ в минимуме *Dst* индекса, и усредненным по типу магнитной бури, и было показано, что средний индекс $\langle Dst \rangle$ в минимуме, возможно, зависит от типа течения солнечного ветра, вызвавшего магнитную бурю. В частности, наблюдалась более выраженная тенденция более сильного понижения $\langle Dst \rangle$ для магнитных бурь, вызванных областями сжатия перед “телом” ICME, чем самим “телом” ICME [Николаева и др., 2011]. На рис. 2а данной работы такая зависимость почти отсутствует из-за малого вклада максимальных значений *Ey* в величину *sumEy* и из-за очень больших погрешностей, связанных с разбросом величин *Dst* и *sumEy* по всей главной фазе в конкретных магнитных бурях разного типа.

Как видно на рис. 2б, для всех 8 типов магнитных бурь наблюдается тенденция понижения индекса *Dst* с ростом интегрального электрического поля *sumEy* во всем диапазоне изменения параметров. Наибольшие различия видны в начале (где *sumEy* от -10 до +10 $MV m^{-1} ch$) и в конце интервала изменения *sumEy* (где *sumEy* более 30 $MV m^{-1} ch$).

Можно предположить, что самые низкие значения *Dst* индекса (более мощные магнитные бури) наблюдаются во время прохождения областей сжатия Sheath (Sh_{MC} , Sh_E , $Sh_{MC} + Sh_E$), при высоких значениях *sumEy* от 44 до 55 $MV m^{-1} ch$. Но, как видно на рис. 2б, погрешности параметров в каждом интервале изменения очень большие и перекрывают разницу между типами. Главные фазы всех типов умеренных магнитных бурь $Dst \leq -50$ нТл развиваются примерно одинаково, но резко различаются при достижении уровня сильных магнитных бурь $Dst \leq -100$ нТл, основным источником которых являются преимущественно области сжатия перед “телом” ICME и MC.

Используя рис. 2б, мы попытались получить пороговые критерии для умеренных и сильных магнитных бурь, отдельно для разных типов течений, и сравнить эти значения с результатами других авторов. Величины порогов оценивались визуально на рис. 2б (как точки пересечения линий для умеренных и сильных магнитных бурь с соответствующей зависимостью *Dst* от *sumEy* для каждого типа течения). Полученные пороговые значения интегрального поля *sumEy*, при которых величина *Dst* индекса главной фазы магнитных бурь разных типов источников достигает значений умеренных $Dst \leq -50$ нТл и сильных $Dst \leq -100$ нТл магнитных бурь, приведены в табл. 3 (2–3 столбцы). Для сравнения в 2-х последних столбцах табл. 3 эти величины пороговых критериев выражены через величину электрического поля *Ey* и его длительность Δt в соответствии с соотношением: $sumEy = Ey \cdot \Delta t$, где в качестве *Ey* мы использовали среднее значение поля $\langle Ey \rangle$ для соответствующего типа магнитных бурь из табл. 1.

В соответствии с рис. 2б можно предположить (вертикальные линии со штриховкой внизу), что критерий умеренных магнитных бурь выполняется в диапазоне изменения интегрального поля $sumEy =$ от 9 до 14 $MV m^{-1} ch$, а критерий сильных магнитных бурь соответствует изменению инте-

Таблица 3. Пороговый критерий интегрального электрического поля $sumEy$ для уровня умеренных $Dst \leq -50$ и сильных $Dst \leq -100$ нТл магнитных бурь во время развития главной фазы магнитных бурь, вызванных разными структурами солнечного ветра (см. рис. 2б)

Тип структуры СВ	Порог $sumEy$ (мВ м ⁻¹ ч)		Порог Ey (мВ м ⁻¹) и длительность Δt (ч)	
	$Dst \leq -50$ нТл	$Dst \leq -100$ нТл	$Dst \leq -50$ нТл	$Dst \leq -100$ нТл
MC	14	45	$Ey = 4.0 \quad \Delta t = 3.5$	$Ey = 4.0 \quad \Delta t = 11$
CIR	14	39	$Ey = 2.1 \quad \Delta t = 6.6$	$Ey = 2.1 \quad \Delta t = 18.5$
Sh _E	9	29	$Ey = 3.5 \quad \Delta t = 2.5$	$Ey = 3.5 \quad \Delta t = 8.3$
Ejecta	12	40	$Ey = 2.8 \quad \Delta t = 4.3$	$Ey = 2.8 \quad \Delta t = 14.3$
Sh _{MC}	13	32	$Ey = 6.8 \quad \Delta t = 1.9$	$Ey = 6.8 \quad \Delta t = 4.7$
Sh _{MC} + Sh _E	9	32	$Ey = 4.0 \quad \Delta t = 2.2$	$Ey = 4.0 \quad \Delta t = 8$
MC + Ejecta	12	41	$Ey = 3.0 \quad \Delta t = 4$	$Ey = 3.0 \quad \Delta t = 13.6$
IND	14	—	$Ey = 2.4 \quad \Delta t = 5.8$	—

грального поля $sumEy$ от 29 до 45 мВ м⁻¹ ч. (его конкретная величина в зависимости от типа солнечного ветра указана в табл. 3). Анализ рис. 2б показывает, что по нашим данным пороговые критерии умеренных и сильных магнитных бурь, в среднем, выше, чем критерии для магнитных бурь, полученные независимо от типа течения солнечного ветра [Russell et al., 1974; Gonzalez and Tsurutani, 1987; Wang et al., 2003; Vieira et al., 2004]. Наши значения порогов для конкретных типов течений CIR, Sheath, и MC также несколько отличаются от значений для тех же типов течения (CIR, Sheath, и MC с разной ориентацией ММП), приведенных в работе [Vieira et al., 2004] (ср. стрелки на рис. 2б, и цифры в табл. 3). Из таблицы 3 видно, что по нашим данным пороговый критерий для сильных магнитных бурь, вызванных событиями CIR, составляет в среднем $sumEy = 39$ мВ м⁻¹ ч, что в 2 раза выше, чем $sumEy = 16.7$ мВ м⁻¹ ч в работе авторов [Vieira et al., 2004]. Аналогично для магнитных бурь, вызванных Sheath, в работе [Vieira et al., 2004] $sumEy = 12.2$ мВ м⁻¹ ч против наших данных $sumEy = 29-32$ мВ м⁻¹ ч для бурь, связанных с Sh_E, Sh_{MC} + Sh_E, Sh_{MC}. Только для сильных магнитных бурь, вызванных магнитными облаками MC, наш результат $sumEy = 45$ мВ м⁻¹ ч близок по величине с аналогичным критерием $sumEy = 36.0$ мВ м⁻¹ ч для типа MC Y (поле внутри MC под углом к плоскости эклиптики), и почти в 2 отличается от критерия $sumEy = 69.1$ мВ м⁻¹ ч для магнитных облаков MC NS (внутри которых магнитное поле MC меняет направление с северного на южное).

С другой стороны, по нашим данным (рис. 2б) разброс точек в зависимости Dst от интегрального поля $sumEy$ для каждого типа событий большой, и приведенные нами значения в качестве критериев умеренных и сильных магнитных бурь, имеют большие погрешности. С некоторой долей веро-

ятности значения $sumEy$, указанные в качестве критерия сильных магнитных бурь, могут наблюдаться как при более высоких значениях Dst индекса (т.е. в более слабых магнитных бурях), так и при более низких значениях (т.е. в более сильных магнитных бурях).

Отметим, что пороговые критерии для умеренных и сильных магнитных бурь, полученные в работе [Wang et al., 2003] реально оказались меньше, чем в работах [Russell et al., 1974; Gonzalez and Tsurutani, 1987], что, возможно, связано с разной методикой анализа главной фазы магнитной бури.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Результатом нашего анализа является оценка пороговых значений суммарного электрического поля $sumEy$ для достижения умеренной $Dst \leq -50$ нТл и сильной $Dst \leq -100$ нТл интенсивности на главной фазе магнитных бурь, вызванных разными типами солнечного ветра. В зависимости от типа источника магнитных бурь эта пороговая величина меняется незначительно между 9 и 14 мВ м⁻¹ ч для умеренных магнитных бурь и между 29 и 45 мВ м⁻¹ ч для сильных магнитных бурь. Визуально на рис. 1б средние квадратичные отклонения для всех интервалов во всех типах велики. И с учетом этих погрешностей наши данные мало отличаются от результатов других авторов. Более того, можно предположить, что пороговые критерии не зависят от типа магнитных бурь или эта зависимость слабая. В то же время все пороговые значения $sumEy$ для сильных магнитных бурь в 3 раза выше, чем для умеренных магнитных бурь. То есть, при фиксированном значении интегрального электрического поля $sumEy$ для достижения уровня сильных магнитных бурь (в 2 раза более сильное понижение Dst по сравнению с умеренными магнитными бурями) длительность

электрического поля E_y должна быть в 3.2–3.5 раза больше, чем для умеренных магнитных бурь.

Выводы:

Анализ развития главных фаз 190-ми магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности, источником которых являлись 8 разных типов течений солнечного ветра: MC (17 магнитных бурь), CIR (49 магнитных бурь), Ejecta (50 магнитных бурь), Sh_E (34 магнитные бури), Sh_{MC} (6 магнитных бурь), $Sh_E + Sh_{MC}$ (40 магнитных бурь), MC + Ejecta (67 магнитных бурь), IND (34 магнитные бури), позволил получить следующие результаты.

1. Значения пороговых критериев умеренных ($Dst \leq -50$ нТл) и сильных магнитных бурь ($Dst \leq -100$ нТл), вызванных разными типами течений солнечного ветра, находятся в диапазонах изменения интегрального электрического поля $sum E_y = 9-14$ мВ м⁻¹ ч и $sum E_y = 29-45$ мВ м⁻¹ ч, соответственно. Для всех типов пороговая величина интегрального электрического поля сильных магнитных бурь примерно в 3 раза больше, чем для умеренных магнитных бурь. Из-за большого разброса параметров можно говорить лишь о тенденции зависимости величины порогового критерия от типа солнечного ветра, генерирующего магнитные бури.

2. Для умеренных магнитных бурь самый низкий пороговый уровень ($sum E_y = 9$ мВ м⁻¹ ч) имеют области сжатия Sh_E и $Sh_{MC} + Sh_E$, в то время как их “тела” Ejecta и MC + Ejecta имеют пороговый критерий в ~1.5 раза выше ($sum E_y = 12$ мВ м⁻¹ ч). Самая большая величина порогового критерия умеренных магнитных бурь у событий MC, CIR, IND ($sum E_y = 14$ мВ м⁻¹ ч) и Sh_{MC} ($sum E_y = 13$ мВ м⁻¹ ч).

3. Для сильных магнитных бурь самое низкое пороговое значение имеют области сжатия Sh_E , Sh_{MC} , $Sh_{MC} + Sh_E$ ($sum E_y = 29, 32, 32$ мВ м⁻¹ ч, соответственно). В то время как для “тел” Ejecta, MC, MC + Ejecta пороговый критерий сильных магнитных бурь в ~1.5 раза выше, чем для области сжатия ($sum E_y = 40, 45, 41$ мВ м⁻¹ ч, соответственно). События CIR имеют пороговый критерий сильных магнитных бурь, близкий к областям сжатия ($sum E_y = 39$ мВ м⁻¹ ч).

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI. Данные OMNI получены из GSFC/SPDF OMNIWeb на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>. Работа поддержана грантами РФФИ № 07-02-00042, № 10-02-00277а, а также Программой ОФН № 15 “Плазменные процессы в солнечной системе” и Программой РАН № П 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. Т. 45. № 1. С. 3–11. 2007а.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям, 2 часть // Космич. исслед. Т. 45. № 6. С. 489–498. 2007б.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 г. // Космич. исслед. № 2. Р. 99–113. 2009.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 48. № 1. С. 3–32. 2010а.
- 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. 543–555. 2010б.
- Кершенгольц С.З., Баркова Е.С., Плотников И.Я. Зависимость геомагнитных возмущений от экстремальных значений E_y -компоненты солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронавтомия. Т. 46. № 2. С. 1–9. 2007.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // Геомагнетизм и аэронавтомия. Т. 51. № 1. С. 51–67. 2011.
- 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 аэронавтомия. Т. 52. № 1. С. 42–53. 2012.
- Alves M.V., Echer E., Gonzalez W.D. Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index // J. Geophys. Res. V. 111. A07S05. 2006. A07S05. doi:10.1029/2005JA011379. 2006.
- Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. V. 111. 2006. A07S08. doi:10.1029/2005JA011447. 2006.
- 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.
- Fenrich F.R., Luhmann J.G. Geomagnetic response to magnetic clouds of different polarity // Geophys. Res. Lett. V. 25. P. 2999–3002. 1998.
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT) // Planet. Space Sci. V. 35. P. 1101–1109. 1987.
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 99. V. A4. P. 5771–5792. 1994.
- 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. 2004. A02209. doi:10.1029/2004JA010804. 2004.
- *Loewe C.A., Pröls G.W.* Classification and mean behavior of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V.102. № A7. P. 14209–14213. 1997.
- *O'Brien T.P., McPherron L.R.* Forecasting the ring current index Dst in real time // *J. Atmos. Solar.-Terr. Phys.* V. 62. P. 1295–1299. 2000.
- *Oh S.Y., Yi Y.* Relationships of the solar wind parameters with the magnetic storm magnitude and their association with the interplanetary shock // *J. The Korean Astronomical Society.* V. 37. P. 151–157. 2004.
- *Plotnikov I.Ya., Barkova E.S.* Advances in space research nonlinear dependence of Dst and AE indices on the electric field of magnetic clouds // *Adv. Space. Res.* V. 40. P. 1858–1862. 2007.
- *Richardson I.G., Webb D.F., Zhang J. et al.* Major geomagnetic storms ($Dst < -100$ nT) generated by corotating interaction regions // *J. Geophys. Res.* V. 111. 2006. A07S09. doi:10.1029/2005JA011476. 2006.
- *Russell C.T., McPherron R.L., Burton R.K.* On the cause of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 79. P. 1105–1109. 1974. doi:10.1029/JA079i007p01105.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Akasofu S.I., Smith E.J.* Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978–1979) // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A8. P. 8519–8531. 1988.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Lee Y.Te.* Great magnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* № 19. P. 73–76. 1992.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D.* The future of geomagnetic storm predictions: implications from recent solar and interplanetary observations // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. № 12. P. 1369–1384. 1995.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Tang F., Arballo J.K., Okada M.* Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle // *J. Geophys. Res.* V.100. № A11. P. 21717–21734. 1995.
- *Vieira L.E.A., Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T.* Storm-intensity criteria for several classes of the driving interplanetary structures // *Solar. Phys.* V. 223. P. 245–258. 2004.
- *Wang Y., Shen C.L., Wang S., Ye P.Z.* An empirical formula relating the geomagnetic storm's intensity to the interplanetary parameters: $-VB_z$ and Δt // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. № 20. 2039. 2003. doi:10.1029/2003GL017901. 2003.
- *Wu C.-C., Lepping R.P.* Effect of solar wind velocity on magnetic cloud-associated magnetic storm intensity // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A11. P. 1346. 2002. doi:10.1029/2002JA009396. 2002.
- *Yurchyshyn V., Wang H., Abramenko V.* Correlation between speeds of coronal mass ejections and the intensity of geomagnetic storms // *Space Weather.* V. 2. 2004. S02001. doi:10.1029/2003SW000020. 2004.
- *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G.* Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms // *Bulg. J. Phys.* V. 34. P. 128–135. 2007.
- *Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu.* Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis // *Ann. Geophys.* V. 28. № 12. P. 2177–2186. 2010.
- *Yokoyama N., Kamide Y.* Statistical nature of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A7. P. 14215–14222. 1997.