

## ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ ОТ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ТЕЧЕНИЙ. 3. РАЗВИТИЕ 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.

Настоящая статья является продолжением статьи [Николаева и др. 2011a], и в ней анализируется развитие главной фазы 190 магнитных бурь с  $Dst \leq -50$  нТл в зависимости от типа источника в солнечном ветре (магнитные облака MC, коротирующие области взаимодействия CIR, “поршни” Ejecta, область сжатия перед ними  $Sh_E$ , область сжатия перед магнитным облаком  $Sh_{MC}$ , все области сжатия перед “телом” ICME,  $Sh_E + Sh_{MC}$ , все “тела” ICME, MC + Ejecta, а также неопределенный тип течения IND). Показано, что на главной фазе магнитных бурь всех типов индекс  $Dst$  понижается с ростом интегрального электрического поля  $\sum E_y$ . Теснота связи между этими параметрами (коэффициент корреляции) выше для магнитных бурь, вызванных областью сжатия перед “телом” ICME, чем магнитными облаками MC и коротирующими областями взаимодействия CIR. Можно предположить, что высокое динамическое давление усиливает эффективность электрического поля для 4-х типов течений: областей сжатия ( $Sh_E$ ,  $Sh_E + Sh_{MC}$ ), коротирующих областей взаимодействия CIR и неопределенного типа IND. По-видимому,  $Dst$  индекс не зависит от уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП почти для всех типов течений (различия в пределах погрешности) на фоне зависимости  $Dst$  от  $\sum E_y$  главной фазы магнитной бури.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением предыдущей статьи [Николаева и др., 2012], посвященной анализу основных характеристик главной фазы магнитных бурь и оценке пороговых критериев для умеренных и сильных магнитных бурь в зависимости от типа источника в СВ. В данной работе анализируется динамика развития главной фазы магнитной бури для тех же типов структур СВ, ее зависимость от динамического давления СВ и уровня флуктуаций ММП.

В работах [Ермолаев и др., 2010; 2011] двойным методом наложенных эпох было показано, на главной фазе магнитной бури параметры  $B_z$  и  $E_y$  в среднем мало изменяются между началом и концом главной фазы (минимума  $Dst$  и  $Dst^*$ ), в то время как  $Dst$  и  $Dst^*$  монотонно уменьшаются, приблизительно пропорционально интегралу  $B_z$  и  $E_y$  по времени, при этом сравнение “входа” ( $B_z$  и  $E_y$ ) и “выхода” (минимума  $Dst$  и  $Dst^*$ ) процесса показало, что эффективность генерации магнитной бури наиболее высока для Sheath и наиболее низка для MC.

Влияние динамического давления солнечного ветра на развитие кольцевого тока во время магнитной бури рассматривается в работах [Burton et al., 1975; Wang et al., 2003a; Shi et al., 2005]. В работе [Wang et al., 2003a] получена корреляция между силой кольцевого тока и динамическим

давлением солнечного ветра и показано, что скорость инъекции кольцевого тока пропорциональна динамическому давлению солнечного ветра. Авторы [Shi et al., 2005] показали, что сильное динамическое давление на главной фазе сильной магнитной бури привело к сильному возрастанию уже существующего асимметричного кольцевого тока.

Известно, что солнечный ветер носит принципиально турбулентный характер, который оказывает влияние на процессы генерации магнитосферных возмущений (см., например, [Feldstein, 1992; Tsurutani et al., 1995; Goncharova and Maltsev, 2001; Borovsky and Funsten, 2003; D’Amicis et al., 2007; Romanova et al., 2007; Jankovicova et al., 2008; Badruddin, 2009; Ермолаев и др., 2011]). В частности, в работе [Borovsky and Funsten, 2003] показано, что уровень возмущенности магнитосферы, описываемый различными магнитосферными индексами, возрастает при возрастании уровня флуктуаций величины и компонент ММП. В ряде работ было показано, что на развитие магнитной бури помимо величины (или медленных изменений) различных параметров могут оказывать влияния также и быстрые вариации этих параметров (например, недавние работы [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007; D’Amicis et al., 2007; Jankovicova et al., 2008; Badruddin, 2009] и ссылки в них).

В ряде работ высказывается гипотеза, что наличие колебаний некоторых параметров солнечного ветра (плотности, скорости, температуры) и межпланетного магнитного поля может способствовать возбуждению магнитных бурь [Gonzalez et al., 2001; Gonzalez et al., 2002; Borovsky and Funsten, 2003; Seki et al., 2005; Ермолаев и др., 2007]. Анализ поведения параметров СВ и ММП для 625 магнитных бурь с  $Dst < -60$  нТл для периода 1976–2000 годов [Ермолаев и др., 2007] показал: (1) для бурь, связанных с CIR, Sheath и MC, вблизи начала магнитной бури наблюдается небольшое увеличение вариаций (часовых дисперсий) концентрации солнечного ветра, а в Sheath наблюдается еще более высокое возрастание колебаний концентрации за 5–8 ч до начала бури; (2) увеличение вариации модуля ММП наблюдается за 6–10 ч до начала бури только в течениях типа Sheath.

В другой работе [Ермолаев и др., 2011] проводится анализ вариаций параметров плазмы и ММП (среднечасовых дисперсий), взятых из базы данных OMNI. Авторы [Ермолаев и др., 2011] показали, что средние значения, абсолютные и относительные вариации в MC и Ejecta для всех параметров оказываются или средними или ниже среднего (средние значения электрического поля  $E_y$  и  $B_z$  компоненты ММП по модулю выше), а в CIR и Sheath – выше. Высокие значения относительной вариации концентрации  $sN/\langle N \rangle$  наблюдаются в MC. В то же время высокие значения для относительных вариаций скорости,  $B_z$  компоненты и модуля ММП наблюдаются в Sheath и CIR.

Цель данной работы – анализ развития главной фазы преимущественно умеренных и частично сильных магнитных бурь, вызванных разными структурами солнечного ветра.

С этой целью мы анализируем динамику изменения  $Dst$  индекса при изменении суммарного (интегрального) электрического поля  $sumE_y$  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  $\sigma B$  ММП на развитие  $Dst$  индекса. В настоящей работе мы ограничиваемся анализом лишь  $Dst$  индекса и надеемся, что аналогичный анализ  $AE$  индекса будет предметом следующей публикации.

## 2. МЕТОДИКА

Методика обработки данных подробно описана в нашей предыдущей статье [Николаева и др., 2012].

За период 1976–2000 гг. нами было отобрано 190 магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности ( $Dst \leq -50$  нТл), источником кото-

рых 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), коротирующие 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.

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  $sumE_y(i)$ , 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. Следует подчеркнуть, что отдельная магнитная буря в зависимости от длительности основной фазы может давать от 2 до 26 точек в общую зависимость для данного типа солнечного ветра, поэтому на представленных ниже рисунках число анализируемых точек превосходит в 7–10 раз число отдельных событий (магнитных бурь).

### 3.1. Динамика развития $Dst$ индекса главной фазы для разных типов бурь в зависимости от интегрального поля $sumE_y$ и динамического давления

На рисунке 1 представлена зависимость  $Dst$  индекса на главной фазе от электрического поля  $sumE_y$ , просуммированного за предшествующее время от начала магнитной бури (момент  $t_0$ ) до момента  $t$  на главной фазе, для которого берется индекс  $Dst$ , для 2-х типов магнитных бурь, вызванных разными структурами: (а) магнитными облаками MC, (б) коротирующими областями взаимодействия CIR. Общее число точек  $N_p$  на главной фазе магнитных бурь и число самих магнитных бурь каждого типа (в скобках) показано наверху рис. 1.

Здесь и далее на рис. 1–4 серые точки относятся к моментам главной фазы с низким динамическим давлением – подгруппа точек с  $Pd \leq P_0$ , черные крестики – для подгруппы с высоким динамическим давлением  $Pd > P_0$ , где  $P_0$  – пороговое значение динамического давления, разделяюще-

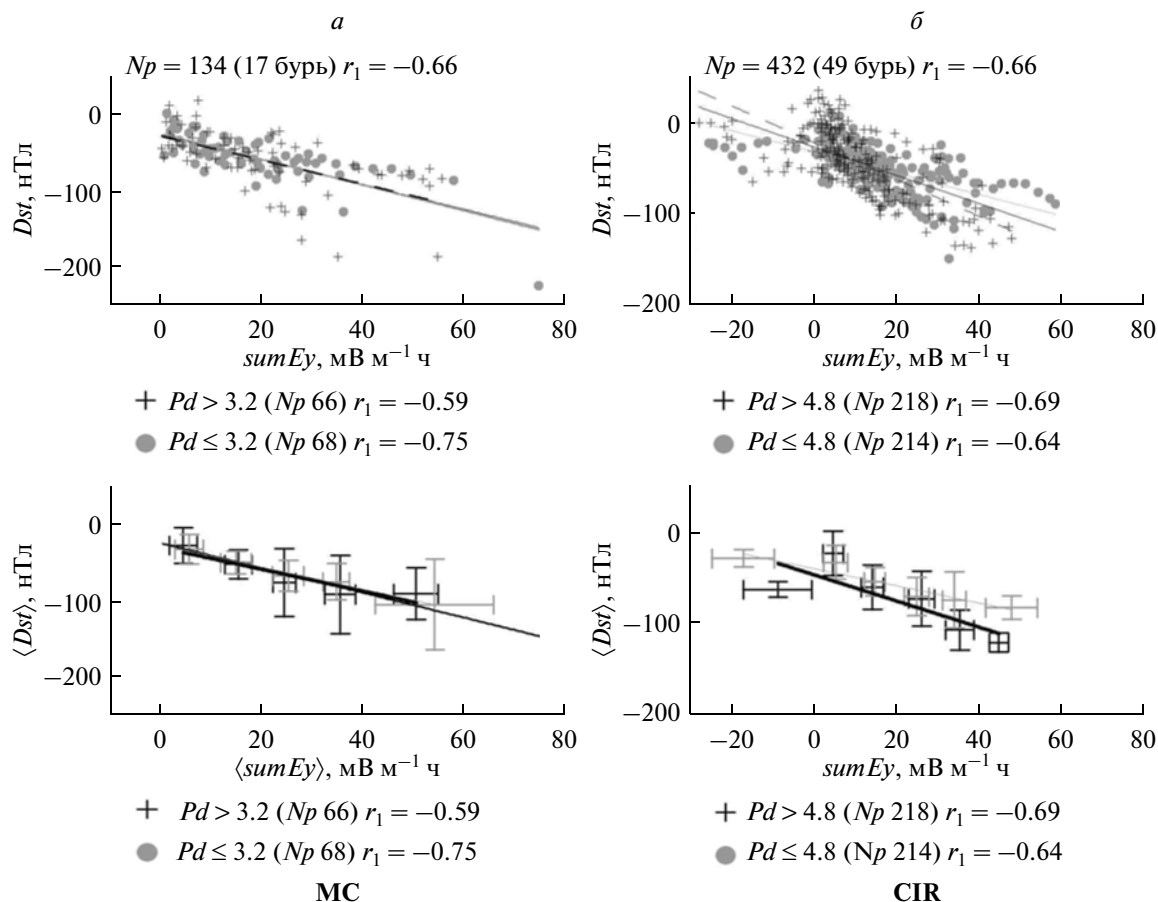


Рис. 1. Зависимость  $Dst$  индекса от интегрального электрического поля  $sumEy$ , для подгрупп с низким (серые кружки и линии) и высоким (черные крестики и линии)  $Pd$ : (а) для событий МС, (б) для событий СIR.

го все точки на 2 примерно равные по числу точек подгруппы. Величина порогового значения  $P_0$  и число точек  $Np$  в каждой подгруппе, а также коэффициент линейной корреляции  $r_1$  приведены под осью абсцисс каждого рисунка. На нижних панелях рис. 1(а, б) показано то же самое, что на верхних, но с усреднением точек по интервалам  $sumEy$ . Вертикальные и горизонтальные отрезки через точки показывают средние квадратичные отклонения.

Для обоих типов течений МС и СIR значения хорошо аппроксимируются линейной зависимостью  $Dst$  индекса от  $sumEy$  на главной фазе магнитных бурь в каждой из подгрупп с высоким и низким динамическим давлением (с высокими коэффициентами корреляции, например, для всех магнитных бурь:  $r_1 = -0.66$  для МС и  $r_1 = -0.66$  для СIR). Для области сжатия СIR, возможно, существует разная зависимость  $Dst$  главной фазы от  $sumEy$  в подгруппах с высоким  $Pd > P_0$  и низким  $Pd < P_0$  динамическим давлением. Данные показывают, что с увеличением интегрального поля  $sumEy$  главной фазы магнитных бурь (при  $sumEy > 30$ ) для под-

группы СIR с высоким  $Pd > 4.8$  нПа величина индекса  $Dst$  ниже, т.е. магнитная буря сильнее, чем для подгруппы с низким  $Pd \leq 4.8$  нПа. В то время как для событий МС обе подгруппы с высоким давлением  $Pd > 3.2$  и низким давлением  $Pd \leq 3.2$  нПа имеют близкие линии регрессии. Этот факт позволяет предположить, что для МС зависимость  $Dst$  от  $Pd$  (на фоне зависимости от интегрального электрического поля  $sumEy$ ) отсутствует.

Отметим, что для событий СIR почти во всех интервалах усредняется от 10 до 96 точек, кроме последнего интервала  $sumEy > 40$  в подгруппе с высоким давлением  $Pd > 4.8$  нПа, где количество точек усреднения  $< 10$  (4 точки). Для магнитных облаков МС количество точек усреднения в разных интервалах меняется от 15 до 23 точек, кроме 2-х последних интервалов усреднения при высоких значениях интегрального поля  $sumEy > 30$  с низким  $< 10$  числом точек (5–9 точек).

Можно было бы предположить, что наблюдаемое для МС отсутствие зависимости  $Dst$  от  $Pd$  на фоне зависимости от интегрального поля  $sumEy$

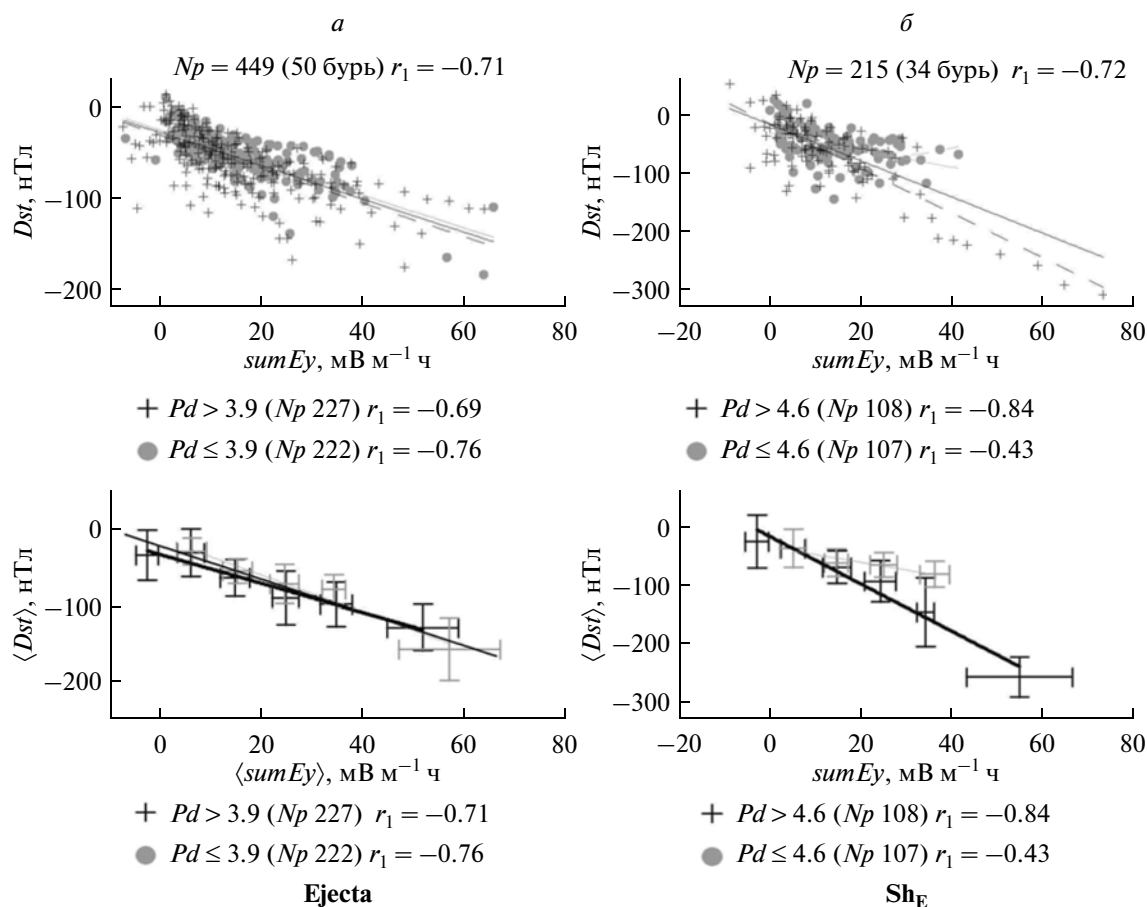


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для событий Ejecta и Sh<sub>E</sub>.

может быть вызвано недостаточно высокими значениями самого давления внутри МС для нашей выборки. Как видно из табл. 1, приведенной в предыдущей статье [Николаева и др., 2011а], величина среднего давления ( $\langle Pd \rangle$ ) в 1.5 раза ниже у МС, чем у CIR, а разброс или среднее квадратичное отклонение почти одинаковые ( $\langle Pd \rangle = 3.8 \pm 2.7$  нПа и  $\langle Pd \rangle = 5.8 \pm 2.9$  нПа, соответственно). С другой стороны, более низкое давление внутри МС по сравнению с областью сжатия CIR является одной из характеристик этих событий, отличающих их от областей сжатия CIR [Ермолаев и др., 2009]. Например, среднее значение давления для всех МС и CIR, представленных в нашем каталоге, составляет  $\langle Pd \rangle = 3.3 \pm 3.2$  нПа и  $\langle Pd \rangle = 4.4 \pm 2.8$  нПа, соответственно [Ермолаев и др., 2009]. Поэтому можно предположить тенденцию, что для нашей выборки событий МС зависимость  $D_{st}$  главной фазы от  $Pd$  на фоне зависимости от интегрального поля отсутствует или очень слабая.

Отметим, что приведенные данные ничего не говорят о зависимости интегрального электрического поля  $sumEy$  от давления  $Pd$ , а только о том, что для CIR на фоне зависимости  $D_{st}$  от  $sumEy$  индекс  $D_{st}$  еще зависит от  $Pd$ .

На рисунке 2 представлены те же зависимости, что на предыдущем рис. 1, но для магнитных бурь, вызванных (а) поршнями Ejecta, (б) областью сжатия перед поршнем Sh<sub>E</sub>.

Для обоих типов событий на главной фазе  $D_{st}$  индекс от  $sumEy$  также хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с одинаково высоким коэффициентом корреляции (для событий Ejecta:  $r_1 = -0.71$  и для Sh<sub>E</sub>:  $r_1 = -0.72$ ). Если сравнить подгруппы точек с низким  $Pd \leq P_0$  и высоким  $Pd > P_0$  динамическим давлением, то для событий Ejecta обе подгруппы характеризуются близкой линейной зависимостью  $D_{st}$  от  $sumEy$  с одинаково высокими коэффициентами корреляции ( $r_1 = -0.69$  для высокого давления  $Pd > 3.9$  нПа и  $r_1 = -0.76$  для низкого давления  $Pd \leq 3.9$  нПа). В то время как для событий Sh<sub>E</sub> в подгруппе точек с низким динамическим давлением  $Pd \leq 4.6$  нПа индекс  $D_{st}$  не зависит от интегрального поля  $sumEy$  (низкий коэффициент корреляции  $r_1 = -0.43$ ), то в подгруппе точек с высоким давлением  $Pd > 4.6$  нПа индекс  $D_{st}$  заметно понижается с ростом интегрального поля  $sumEy$  (коэффициент линейной корреляции  $r_1 = -0.84$ ). Отметим, что для собы-

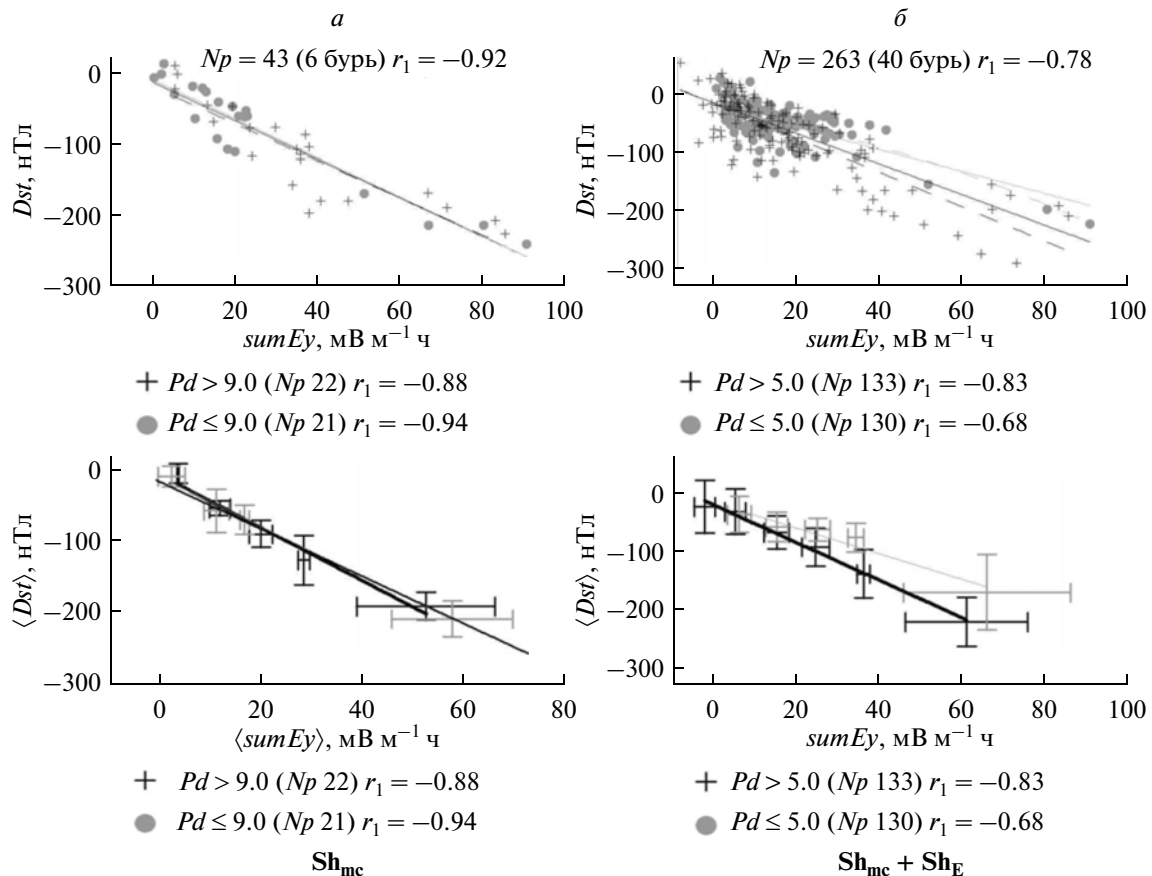


Рис. 3. То же, что на предыдущих рис. 1–2, но для событий Sh<sub>MC</sub> и Sh<sub>MC</sub> + Sh<sub>E</sub>.

тий Ejecta число точек усреднения в разных интервалах выше 10-ти, кроме последнего интервала  $sumEy > 40$   $МВ м^{-1} ч$  в подгруппе с высоким давлением  $Pd > 3.9$  нПа, в котором только 4 точки, и 1-го интервала с  $sumEy < 10$ , в котором было 7 точек. Также мало точек усреднения (4 и 6) в последних интервалах  $sumEy > 30$   $МВ м^{-1} ч$  усреднения в каждой из подгрупп с высоким и низким давлением для событий Sh<sub>E</sub>. Хотя погрешности достаточно велики, статистика говорит в пользу гипотезы, что мощность бури, вызванной событиями Sh<sub>E</sub>, увеличивается ( $Dst$  понижается) с ростом интегрального поля  $sumEy$  сильнее в подгруппе точек фазы магнитной бури с высоким давлением  $Pd > 4.6$  нПа.

Стоит отметить, что у магнитных бурь, связанных с MC и Ejecta, самый маленький разброс (среднеквадратичное отклонение)  $Pd$  (см. табл. 1 в [Николаева и др., 2011a]). Поэтому, возможно, что мы принципиально не можем выявить зависимость от  $Pd$  этим методом с этими наборами данных из-за малого диапазона изменения параметра  $Pd$ .

На следующем рис. 3 показано то же самое, что на предыдущих рис. 1–2, но для магнитных бурь, вызванных: (а) событиями Sh<sub>MC</sub>, (б) событиями Sh<sub>MC</sub> + Sh<sub>E</sub>. Для обоих типов событий зависимость  $Dst$  индекса от интегрального электрического поля  $sumEy$  хорошо аппроксимируется линейным законом с высокими коэффициентами корреляции, как для всех точек главной фазы, так и для подгрупп с разным динамическим давлением  $Pd$  (см. рис. 3 и подписи под ними). Кроме того, для суммы областей сжатия (Sh<sub>MC</sub> + Sh<sub>E</sub>) видна тенденция усиления интенсивности главной фазы бури (понижения  $Dst$  индекса) с ростом интегрального электрического поля  $sumEy$  для подгруппы точек с высоким давлением  $Pd > 5.0$  нПа (тенденция, отмеченная на рис. 2 для Sh<sub>E</sub>). Отметим, что для событий Sh<sub>MC</sub> во всех интервалах число точек усреднения  $< 10$  (меняется от 3 до 7 точек). Для событий Sh<sub>MC</sub> + Sh<sub>E</sub> низкое число точек усреднения (по 4 точки) в 2-х последних интервалах  $sumEy > 30$  в подгруппе точек с низким давлением.

На следующем рис. 4 представлено то же, что на предыдущих рис. 1–3, но для событий: (а) сум-

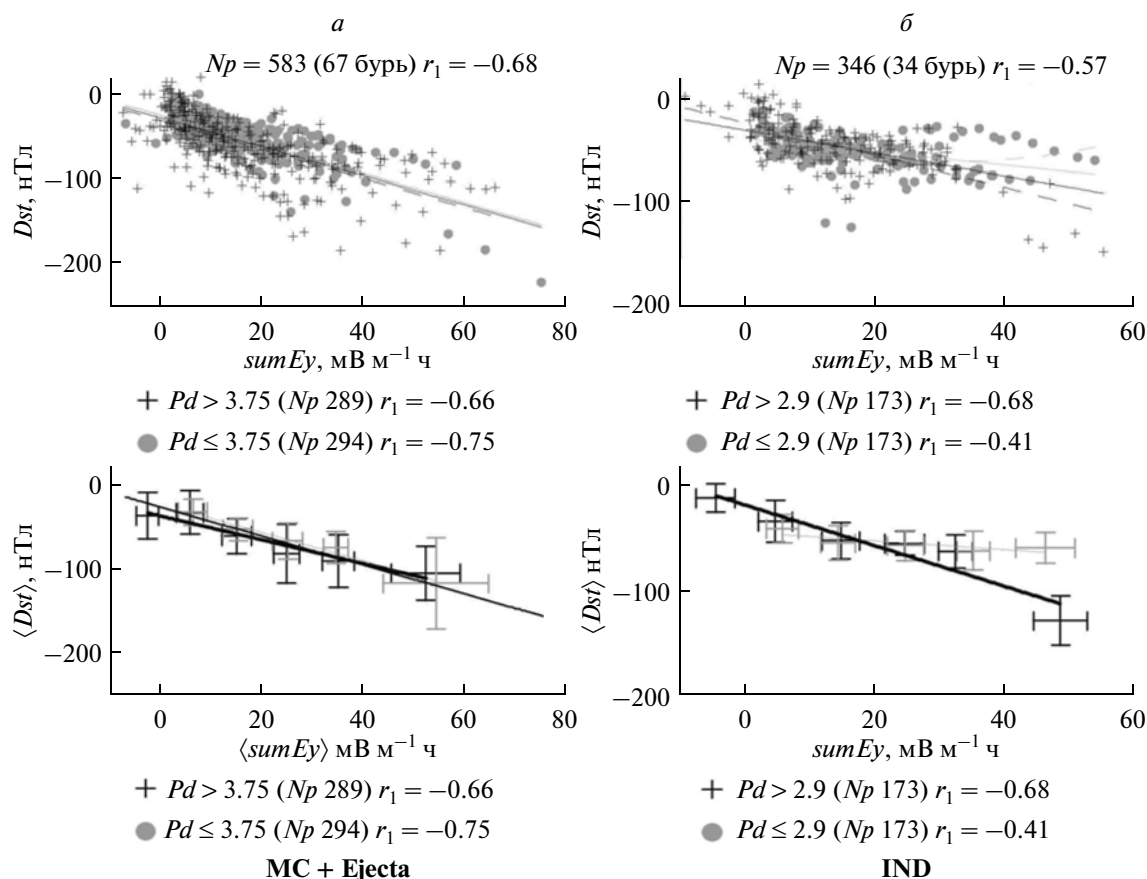


Рис. 4. То же, что на предыдущих рис. 1–3, но для событий МС + Ejecta и IND.

мы МС + Ejecta, (б) IND. Видно, что для магнитных бурь, связанных с событиями МС + Ejecta,  $Dst$  от  $sumEy$  хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с высокими коэффициентами корреляции, как для всех точек, так и для подгрупп с разными  $Pd$  ( $r_1 = -0.66$  и  $r_1 = -0.75$ , соответственно). Для магнитных бурь, связанных с событиями неопределенного типа IND, в подгруппе точек с низким давлением  $Pd \leq 2.9$  нПа наблюдается очень слабая зависимость  $Dst$  от  $sumEy$  (низкий коэффициент корреляции  $|r_1| < 0.5$ ). Но в подгруппе точек с высоким динамическим давлением  $Pd > 2.9$  нПа регистрируется тенденция нарастания интенсивности магнитной бури (понижение  $Dst$  индекса) с ростом величины интегрального электрического поля  $sumEy$ . Для событий МС + Ejecta низкое  $< 10$  число точек усреднения (9 точек) только в последнем интервале  $sumEy > 40$  мВ м<sup>-1</sup> ч подгруппы точек с низким давлением. Для событий IND также мало точек в интервалах с  $sumEy > 40$  мВ м<sup>-1</sup> ч для подгрупп с высоким и низким давлением (5 и 7 точек, соответственно).

### 3.4. Динамика развития $Dst$ индекса главной фазы для разных типов магнитных бурь в зависимости от интегрального поля $sumEy$ и уровня флуктуаций $\sigma B$ ммп

Ниже на рис. 5–8 приводится зависимость  $Dst$  индекса от интегрального поля  $sumEy$  во время развития главной фазы магнитной бури, вызванной теми же типами течений солнечного ветра, но в отличие от рис. 1–4 разделение по подгруппам точек главной фазы сделано в зависимости от уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП.

Коэффициенты линейной корреляции между индексом  $Dst$  и интегральным электрическим полем  $sumEy$  на главной фазе магнитной бури, вызванной событиями МС и CIR, высокие ( $|r_1| > 0.5$ ). Также на рис. 5 видно, что для обоих типов магнитных бурь (МС и CIR) на фоне зависимости  $Dst$  от  $sumEy$  отсутствует зависимость от уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП, так как линии регрессии для разных подгрупп точек (высокий и низкий уровень флуктуаций поля) очень близки, и различие между ними в пределах погрешности. Можно отметить слабую тенденцию роста интенсивности магнитной бури для подгруппы точек с высоким уровнем флуктуаций  $\sigma B$  ММП в событиях

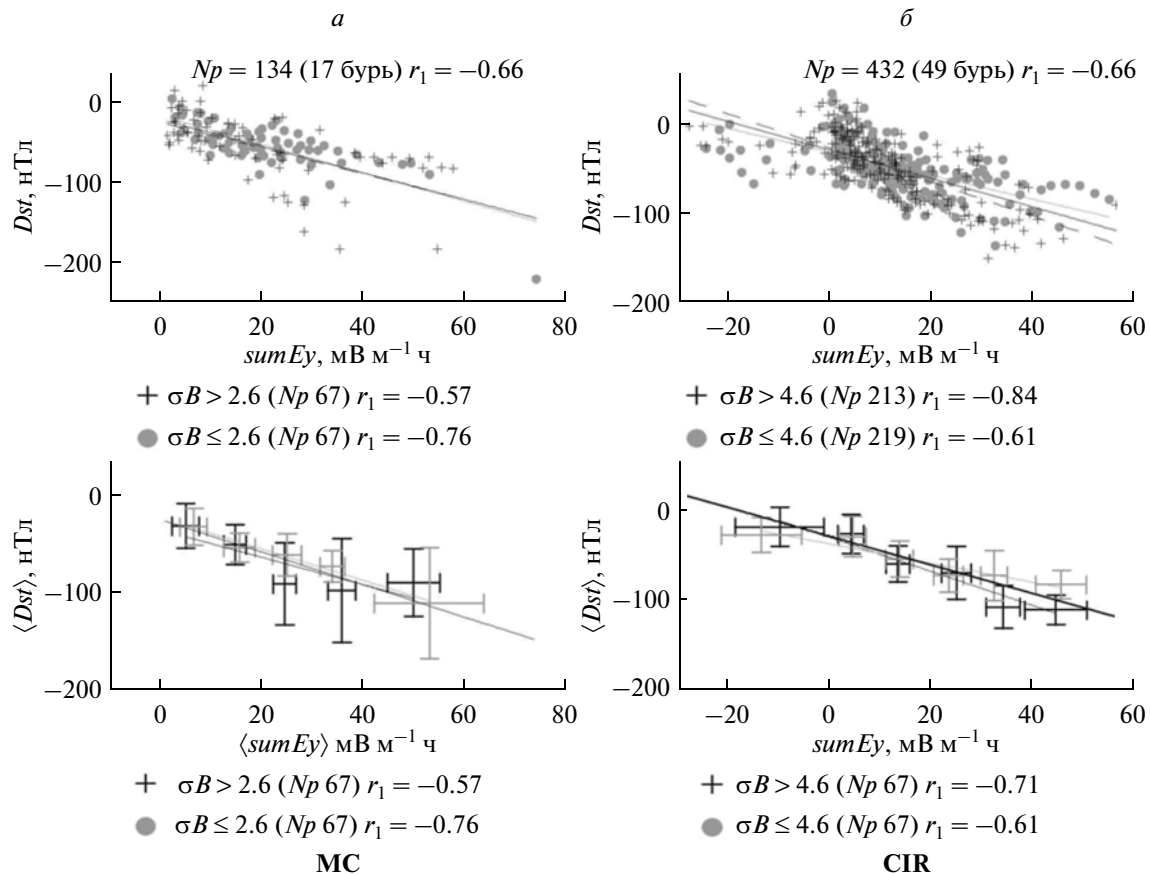


Рис. 5. Зависимость  $Dst$  индекса от интегрального электрического поля  $sumEy$ , для подгрупп с низким (серые кружки и линии) и высоким (черные крестики и линии) уровнем флуктуаций  $\sigma_B$  ММП: (а) для событий МС, (б) для событий CIR.

CIR (в пределах погрешности). Для МС число точек усреднения в интервалах для разных подгрупп  $\sigma_B$  меняется от 12 до 29, кроме 2-х последних интервалов для  $sumEy > 30$  МВ м<sup>-1</sup> ч, где число точек усреднения от 5 до 9. Для событий CIR число точек в разных интервалах усреднения меняется между 13 и 90, кроме последнего для  $sumEy > 40$  МВ м<sup>-1</sup> ч, где число точек усреднения 5 и 9 в подгруппах точек с высоким и низким уровнем флуктуаций, соответственно.

Как видно на рис. 6, для обоих типов течений  $E_{jct}$  и области сжатия  $Sh_E$  зависимость  $Dst$  (мощности магнитной бури) от интегрального электрического поля  $sumEy$  главной фазы хорошо аппроксимируется линейным законом с высоким коэффициентом корреляции ( $|r_1| > 0.5$ ). На фоне зависимости  $Dst$  от интегрального электрического поля  $sumEy$  отсутствует зависимость от уровня флуктуаций  $\sigma_B$  ММП как для  $E_{jct}$ , так и для  $Sh_E$  (для области сжатия  $Sh_E$  зависимость от  $Pd$  присутствовала, см. рис. 2б). Для событий  $E_{jct}$  число точек усреднения в разных интервалах меняется между 13 и 90, кроме 1-го интервала для  $sumEy = -10-0$  МВ м<sup>-1</sup> ч в подгруппе точек с низким уровнем флуктуаций  $\sigma_B \leq 2.9$  нТл, где 7 то-

чек усреднения. Аналогично для событий  $Sh_E$  число точек усреднения в разных интервалах меняется между 13 и 90, кроме 1-го интервала для  $sumEy = -20-0$  МВ м<sup>-1</sup> ч, где 4 и 7 точек усреднения в подгруппах точек с низким и высоким уровнем флуктуаций ММП, и последнего интервала с  $sumEy = 30-70$  МВ м<sup>-1</sup> ч в подгруппе точек с низким уровнем флуктуаций ММП, где усреднялось только 4 точки.

На рисунке 7 видно, что зависимость  $Dst$  индекса главной фазы от интегрального поля  $sumEy$  хорошо аппроксимируется линейным законом с высоким коэффициентом корреляции ( $|r_1| > 0.5$ ) для обоих типов течений ( $Sh_{MC}$ ,  $Sh_{MC} + Sh_E$ ) вне зависимости от уровня флуктуаций  $\sigma_B$  ММП. На фоне зависимости  $Dst$  от  $sumEy$  отсутствует зависимость от уровня флуктуаций магнитного поля  $\sigma_B$  для обоих типов течений, включая все области сжатия перед “телом” ICME,  $Sh_{MC} + Sh_E$ , хотя для событий  $Sh_{MC} + Sh_E$  наблюдалась тенденция зависимости от  $Pd$  (см. рис. 5б). Для событий  $Sh_{MC}$  число точек усреднения во всех интервалах  $<10$  (меняется между 3 и 7). Для событий  $Sh_{MC} + Sh_E$  низкое число точек усреднения (между 4 и 8) наблюда-

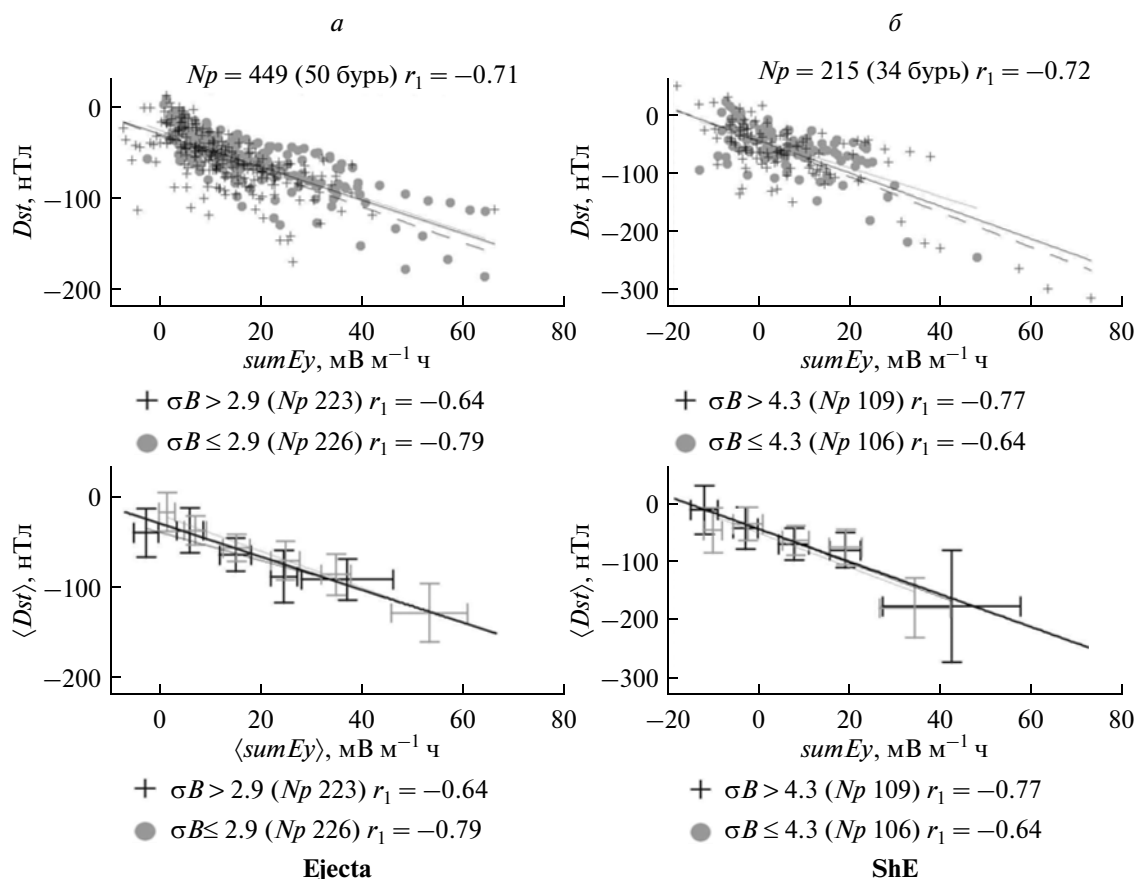


Рис. 6. То же, что на предыдущем рис. 5, но для событий Ejecta и ShE.

ется в 1-м интервале  $sumEy = -10-0$  мВ м<sup>-1</sup> ч и предпоследнем интервале ( $sumEy = 30-40$  мВ м<sup>-1</sup> ч) в обеих подгруппах с разным  $\sigma B$  и последнем интервале ( $sumEy > 40$  мВ м<sup>-1</sup> ч) в подгруппе с низким уровнем флуктуаций ММП  $\sigma B \leq 4.6$  нТл.

На рисунке 8 видно, что зависимость  $Dst$  от  $sumEy$  хорошо аппроксимируется линейным законом с высоким коэффициентом корреляции ( $|r_1| > 0.5$ ) для обоих типов течений (МС + Ejecta и IND) вне зависимости от уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП. Для событий IND на фоне зависимости  $Dst$  от  $sumEy$  присутствует тенденция роста интенсивности магнитной бури при высоком уровне флуктуаций  $\sigma B$  ММП (как и для зависимости от  $Pd$  на рис. 46). Для событий МС + Ejecta во всех интервалах большое число точек усреднения (между 12 и 119). Для событий IND почти для всех интервалов число точек усреднения меняется между 17–67, кроме 1-го ( $sumEy = -10-0$  мВ м<sup>-1</sup> ч) интервала с 3-мя точками усреднения и последнего ( $sumEy > 40$  мВ м<sup>-1</sup> ч) с 5 и 7 точками усреднения для низкого и высокого уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП, и предпоследнего интервала  $sumEy = 30-40$  мВ м<sup>-1</sup> ч с 8-ю точками усредне-

ния в подгруппе с низким уровнем флуктуаций поля  $\sigma B \leq 3.1$  нТл.

Как видно из табл. 1, приведенной в предыдущей работе [Николаева и др., 2012], самый маленький разброс уровня флуктуаций поля  $\sigma B$  наблюдается для магнитных бурь, связанных с IND, МС, Ejecta, МС + Ejecta (величина среднеквадратичного отклонения 1.6, 2.3, 2.2 нТл, соответственно), наибольший разброс уровня флуктуаций наблюдается для области сжатия Sh<sub>МС</sub>, Sh<sub>Е</sub> + Sh<sub>МС</sub>, Sh<sub>Е</sub> и CIR (4.8, 3.7, 3.5, 3.0 нТл, соответственно).

Возможно, что зависимость от динамического давления  $Pd$  и вариаций поля  $\sigma B$  в “неопределенном” типе IND солнечного ветра наблюдается исключительно благодаря тому, что этот тип представляет смесь разных типов. Если это так, то наличие реальной зависимости (или ее отсутствие) от давления в остальных типах солнечного ветра может быть связано с разбросом давления в нашем наборе данных: где разброс достаточно большой, там зависимость видна, а там, где разброс мал, там не видна. По-видимому, внутри каждого типа солнечного ветра зависимость от вариаций



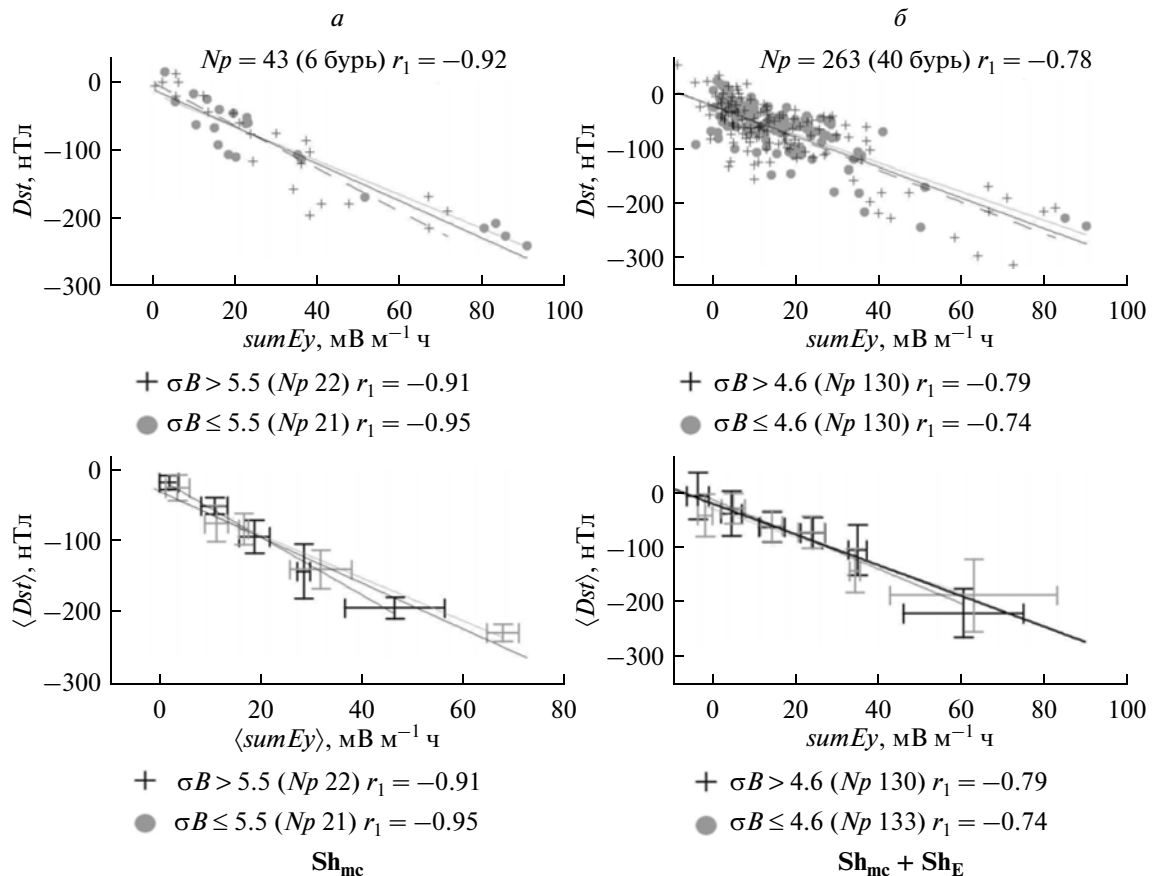


Рис. 7. То же, что на предыдущих рис. 5–6, но для событий Sh<sub>MC</sub> и Sh<sub>MC</sub> + Sh<sub>E</sub>.

поля не наблюдается (по крайней мере, предложенным методом обнаружить ее невозможно).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Исследование динамики главной фазы для магнитных бурь разных типов показало, что для всех типов межпланетных источников умеренных и сильных магнитных бурь  $Dst$  индекс на главной фазе магнитной бури понижается (усиливается интенсивность магнитной бури) с ростом интегрального электрического поля  $sumEy$  (высокий коэффициент корреляции между параметрами  $|r_1| > 0.5$ ). Причем корреляция между этими параметрами такая же высокая и в разных подгруппах точек главной фазы с высоким  $Pd > P_0$  и низким  $Pd < P_0$  динамическим давлением (кроме событий Sh<sub>E</sub> и IND, для которых корреляция мала в подгруппе с низким давлением). По сравнению с нашей предыдущей работой [Николаева и др., 2011], в которой для тех же 8-ми типов течений исследовалась корреляция между минимальным  $Dst$  индексом магнитной бури и  $Ey$  компонентой ММП в минимуме  $Dst$ , теснота связи между  $Dst$  и  $sumEy$  хуже (коэффициент корреляции ниже). Кроме

того, ранее для 2-х типов магнитных бурь (Ejecta и MC + Ejecta) зависимость  $Dst$  от  $Ey$  в минимуме главной фазы носила нелинейный характер: при больших значениях  $Ey > 10$  мВ/м величина минимума  $Dst$  выходила на насыщение (постоянный уровень). В то время как в данной работе зависимость  $Dst$  главной фазы от  $sumEy$  носит линейный характер, и аппроксимация квадратичной зависимостью почти не усиливает тесноту связи между  $Dst$  и  $sumEy$  (коэффициент корреляции меняется слабо). Отметим, что анализ гистограмм распределений поля  $Ey$  на главной фазе магнитных бурь, вызванных разными типами течений, показал, что в нашей выборке магнитных бурь число точек главной фазы, имеющих большую компоненту электрического поля ( $Ey > 10$  мВ/м), невелико. Доля таких точек ( $Ey > 10$  мВ/м) меняется от 0.8% для магнитных бурь от (MC + Ejecta) до 21% для магнитных бурь от Sh<sub>MC</sub>. Вклад точек с сильным  $Ey > 10$  мВ/м в несколько раз выше для магнитных бурь, связанных с областями сжатия Sheath (7% – Sh<sub>E</sub> + Sh<sub>MC</sub>, 4.2% – Sh<sub>E</sub>, 21% – Sh<sub>MC</sub>), чем с “телами” ICME (<1% – MC + Ejecta, 2.2% – Ejecta, 3% – MC). Сильные поля  $Ey > 10$  мВ/м полностью отсутствуют в магнитных бурях от событий CIR.

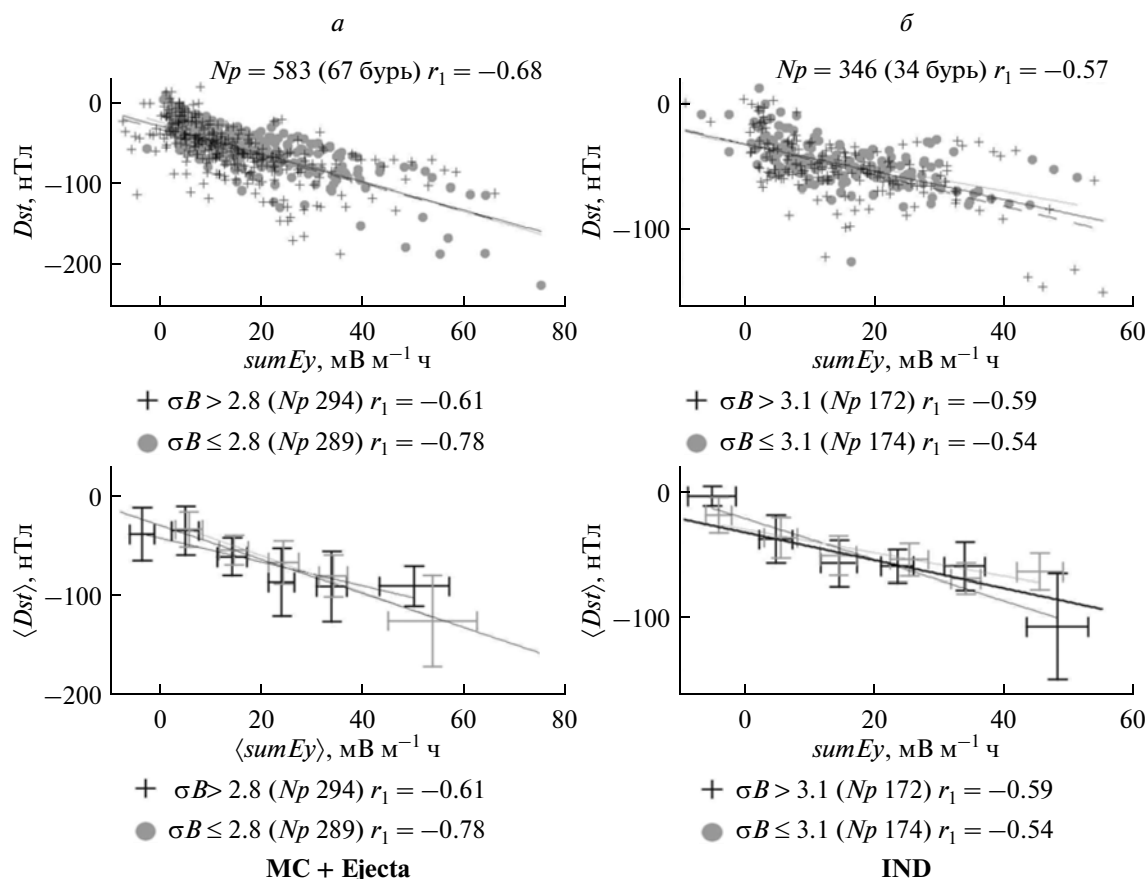


Рис. 8. То же, что на предыдущих рис. 5–7, но для событий МС + Ejecta и IND.

Для объяснения этих фактов можно предложить гипотезы: (1) для больших значений  $Ey$  (южное поле  $Bz < 0$ ) зависимость  $Dst$  от  $Ey$  сильнее, чем для маленьких  $Ey$ ; тогда включение в статистику промежуточных точек для сильных магнитных бурь приведет к ослаблению корреляции; (однако этот вариант противоречит эффекту насыщения  $Dst$  при больших значениях поля  $Ey$  утром–вечер;) (2) “память” процесса генерации магнитной бури ослабевает по мере удаления от текущих значений  $Ey$  к более ранним, то есть,  $Dst \sim \int Eyf(t)dt$ , где  $f(t)$  – убывающая функция, учитывающая ослабление зависимости от  $t$  (времени от начала магнитной бури). Это может быть связано не только с процессом генерации, но и с возрастанием роли распада кольцевого тока во времени. Причиной ослабления корреляции между интегральным электрическим полем и  $Dst$ , возможно, является нелинейная связь между индексом  $Dst$  и длительностью  $\Delta t$  [Wang et al., 2003].

Для каждого типа магнитных бурь нами были построены зависимости величины интегрального электрического поля  $sumEy$  от текущего момента фазы  $t$  на главной фазе ( $t$  – отсчитывается от начала главной фазы) (графики не приводят-

ся). Эти зависимости хорошо аппроксимируются линейными законами. Почти для всех типов магнитных бурь коэффициент корреляции между ними  $r_1 > 0.5$ , кроме магнитных бурь от событий  $Sh_{MC} + Sh_E$ . Величина коэффициента корреляции меняется от самого высокого значения  $r_1 = 0.80$  для IND и  $r_1 = 0.78$  для МС до самого низкого значения  $r_1 = 0.55$  для  $Sh_E$  (и отсутствие корреляции  $r_1 = 0.40$  для  $Sh_{MC} + Sh_E$ ). Для остальных типов магнитных бурь:  $r_1 = 0.73$  для Ejecta,  $r_1 = 0.71$  для МС + Ejecta,  $r_1 = 0.59$  для  $Sh_{MC}$ ,  $r_1 = 0.58$  для CIR,  $r_1 = 0.55$  для  $Sh_E$ . Теснота связи между параметрами  $sumEy$  и  $t$  выше на главных фазах магнитных бурь, вызванных “телами” ICME и неопределенным типом IND ( $r_1 = 0.80$ – $0.71$ ), чем областями сжатия перед “телом” ICME и CIR ( $r_1 = 0.59$ – $0.40$ ).

В предыдущей работе [Николаева и др., 2011] было получено, что величины динамического давления  $Pd$  и уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП не влияют на зависимость  $|Dst|$  индекса во время магнитных бурь (минимум  $Dst$  главной фазы бури) от электрического поля  $Ey$  или это влияние слабое.

В данной работе на фоне зависимости  $Dst$  индекса главной фазы бури от интегрального поля  $sumEy$  для некоторых типов солнечного ветра наблюдается также зависимость  $Dst$  индекса от динамического давления  $Pd$ . Высокое динамическое давление  $Pd$  увеличивает интенсивность главной фазы (понижает  $Dst$ ) особенно при больших значениях интегрального поля  $sumEy$  (т.е. с приближением к минимуму  $Dst$ ) только для 4-х типов магнитных бурь, связанных с областями сжатия (кроме  $Sh_{MC}$ ) и неопределенным типом (CIR,  $Sh_E$ ,  $Sh_E + Sh_{MC}$ , IND). В то время как для магнитных бурь, связанных с “телами” ICME, включая область сжатия  $Sh_{MC}$  (MC, Ejecta,  $Sh_{MC}$ , MC + Ejecta), во время развития главной фазы магнитной бури отсутствует зависимость  $Dst$  от величины динамического давления  $Pd$  (на фоне зависимости от  $sumEy$ ) или эта зависимость слабая. Давление  $Pd$  усиливает связь между  $Dst$  и  $sumEy$  на главных фазах магнитных бурь, вызванных областями сжатия (кроме  $Sh_{MC}$ ) и неопределенным типом (CIR,  $Sh_E$ ,  $Sh_E + Sh_{MC}$ , IND).

Сам факт зависимости  $Dst$  от  $Pd$  не является неожиданным, поскольку начиная с работы [Burton et al., 1975] вместо  $Dst$  часто используется скорректированный индекс  $Dst^* = Dst - b(Pd)^{1/2} + c$ , т.е. исправленный на вклад динамического давления. В соответствии с этой формулой, различие между подгруппами с высоким и низким давлением должно увеличиться при переходе к  $Dst^*$ .

Важный результат нашей работы состоит в том, что эффект высокого  $Pd$  проявляется в конце главной фазы магнитных бурь, вызванных областями сжатия, когда электрическое поле  $Ey$  максимальное. Факт роста динамического давления с ростом интенсивности магнитной бури (ее мощности по  $Dst_{min}$ ) был показан в работе [Yokoyama and Kamide, 1997] путем анализа методом наложения эпох. Кроме того, они получили, что динамическое давление имеет 2 пика на главной фазе — в начале и в минимуме  $Dst$  (рис. 6, в работе [Yokoyama and Kamide, 1997]). С другой стороны, главные фазы магнитных бурь от области сжатия Sheath не являются полностью изолированными и всегда сопровождаются второй ступенью главной фазы, вызванной самим “телом” ICME, на границе которого также возможны скачки давления, что, возможно, влияет на величину и распределение  $Pd$  в разных подгруппах. Данный вопрос требует отдельного исследования.

## 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. На главной фазе всех типов магнитных бурь  $Dst$  индекс хорошо аппроксимируется линейной зависимостью от интегрального электрического поля  $sumEy$  с высоким коэффициентом корреляции для всех точек фазы (меняется от  $r_1 = -0.66$  для MC и CIR до  $r_1 = -0.78$  для  $Sh_{MC} + Sh_E$ ). Аналогично и в подгруппе точек с высоким давлением  $Pd > P_0$  (коэффициент линейной корреляции меняется от  $r_1 = -0.59$  для MC до  $r_1 = -0.84$  для  $Sh_E$ ). Однако в подгруппе с низким давлением  $Pd \leq P_0$  для 2-х типов магнитных бурь, связанных с  $Sh_E$  и IND, индекс  $Dst$  не зависит или слабо зависит от величины  $sumEy$ . В то время как для остальных типов связь между  $Dst$  и  $sumEy$  аппроксимируется линейной зависимостью с высоким коэффициентом корреляции (меняется от  $r_1 = -0.64$  для CIR до  $r_1 = -0.76$  для Ejecta).

2. По сравнению с предыдущей работой [Николаева и др., 2011] коэффициенты корреляций между  $Dst$  и  $sumEy$  ниже, чем для пиковых значений  $Dst$  и  $Ey$ , что возможно связано с влиянием длительности главной фазы на величину интегрального поля  $sumEy$  и учетом влияния малых значений  $Ey$  на  $Dst$  на начальной стадии развития магнитной бури.

3. Для 4-х типов магнитных бурь, связанных с областями сжатия (кроме  $Sh_{MC}$ ) и неопределенным типом (CIR,  $Sh_E$ ,  $Sh_E + Sh_{MC}$ , IND), интенсивность во время главной фазы магнитной бури ( $Dst$  понижение) сильнее растет в подгруппе с высоким динамическим давлением  $Pd > P_0$ , чем в подгруппе с низким давлением  $Pd \leq P_0$ . Для 4-х других типов магнитных бурь, связанных в основном с событиями ICME (MC, Ejecta,  $Sh_{MC}$ , MC + Ejecta) зависимость  $Dst$  от давления  $Pd$  на фоне зависимости от  $sumEy$  не наблюдается.

4. Зависимость  $Dst$  от  $sumEy$  на главной фазе магнитных бурь для всех типов течений хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с высоким коэффициентом корреляции вне зависимости от уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП.

5. На фоне зависимости  $Dst$  от  $sumEy$  на главной фазе магнитных бурь почти для всех типов течений не наблюдается зависимость от уровня флуктуаций  $\sigma B$  ММП (различия в пределах разброса при сравнительно небольшом диапазоне изменения параметра  $\sigma B$  ММП). Возможно, что только для событий IND есть тенденция нарастания мощности бури ( $Dst$  понижения) с ростом уровня флуктуаций поля на фоне роста интегрального электрического поля главной фазы магнитной бури.

Итак, индекс *Dst* понижается с ростом величины магнитного потока *sumEu* для всех типов магнитных бурь, источником которых являлись разные течения, вне зависимости от величины давления *Pd*. Для всех типов областей сжатия (кроме малочисленной  $Sh_{MC}$ ), т.е. для CIR и Sheath перед “телом” ICME ( $Sh_E$ ,  $Sh_{MC} + Sh_E$ ), высокое динамическое давление как бы “усиливает эффективность магнитной бури”, т.е. увеличивает ее мощность в терминах *Dst* индекса. В то время как для самих “тел” ICME ( $MC$ ,  $Ejecta$ ,  $MC + Ejecta$ ) величина *Pd* не влияет на зависимость *Dst* от *sumEu* на главной фазе.

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, 2 часть // Космич. исслед. Т. 45. № 6. С. 489–498. 2007.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 г. // Космич. исслед. № 2. Р. 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. 543–555. 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.
- Кершенгольц С.З., Баркова Е.С., Плотников И.Я. Зависимость геомагнитных возмущений от экстремальных значений *Eu*-компоненты солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрномия. 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 аэрномия. 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. 2. Главная фаза бури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 1. С. 32–41. 2012.
- Badruddin. Interplanetary structures and solar wind behaviour during major geomagnetic perturbations // J. Atmos. Terr. Phys. V. 71. P. 885–896. 2009.
- Borovsky J.E., Funsten H.O. Role of solar wind turbulence in the coupling of the solar wind to the Earth’s magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 108. № A6. 1246. 2003. doi:10.1029/2002JA009601. 2003.
- 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.
- D’Amicis R., Bruno R., Bavassano B. Is geomagnetic activity driven by solar wind turbulence? // Geophys. Res. Lett. V. 34. 2007. L05108. doi:10.1029/2006GL028896. 2007.
- Feldstein Y. I. Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters // Space Sci. Rev. V. 59. P. 83–165. 1992.
- Goncharova M.Yu., Maltsev Yu.P. Correlation of the Kp index with the solar-wind parameter // Geomagnetism and Aeronomy. V. 41. № 3. P. 305–309. 2001. (Geomagnetizm i Aeronomiya. V. 41. № 3. P. 317–321. 2001.)
- Gonzalez W.D., Clua de Gonzalez A.L., Sobral J.H.A., Dal Lago A., Vieira L.E. Solar and interplanetary causes of very intense geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. P. 403–412. 2001.
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lepping R.P., Schwenn R. Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. P. 173–181. 2002.
- Jankovicova D., Voros Z., Simkanin J. The influence of solar wind turbulence on geomagnetic activity // Nonlin. Processes Geophys. V. 15. P. 53–59. 2008.
- 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.
- Romanova N., Pilipenko V., Crosby N., Khabarova O. ULF wave index and its possible applications in space physics // Bulg. J. Phys. V. 34. P. 136–148. 2007.
- Seki T., Morioka A., Miyoshi Y. S. et al. Auroral kilometric radiation and magnetosphere–ionosphere coupling process during magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 110. A05206. 2005. doi:10.1029/2004JA010961. 2005.
- Shi Y., Zesta E., Lyons L.R., Boudouridis A., Yumoto K., Kitamura K. Effect of solar wind pressure enhancements on storm time ring current asymmetry // J. Geophys. Res. V. 110. № A10. 2005. A10205, doi:10.1029/2005JA011019. 2005.
- 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.
- Wang Y., Shen C.L., Wang S., Ye P.Z. An empirical formula relating the geomagnetic storm’s intensity to the interplanetary parameters:  $-VBz$  and  $\Delta t$  // Geophys. Res. Lett. V. 30. № 20. 2039. 2003. doi:10.1029/2003GL017901. 2003.
- Wang C.B., Chao J.K., Lin C.-H. Influence of the solar wind dynamic pressure on the decay and injection of the ring current // J. Geophys. Res. V. 108. № A9. P. 1341–1352. 2003a. doi:10.1029/2003JA009851. 2003.
- Yokoyama N., Kamide Y. Statistical nature of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14215–14222. 1997.