

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 РАН, 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, коротящие области взаимодействия CIR, “поршни” Ejecta, область сжатия перед ними Sh_E , область сжатия перед магнитным облаком Sh_{MC} , все области сжатия перед ICME, $Sh_E + Sh_{MC}$, все 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 $sumE_y$. Теснота связи между этими параметрами (коэффициент корреляции) выше для магнитных бурь, вызванных областью сжатия перед ICME, чем магнитными облаками MC и коротящими областями взаимодействия CIR.

Можно предположить, что высокое динамическое давление усиливает эффективность электрического поля для 4-х типов течений: областей сжатия (Sh_E , $Sh_E + Sh_{MC}$), коротящих областей взаимодействия CIR и неопределенного типа IND.

По-видимому, Dst индекс не зависит от уровня флуктуаций σB ММП почти для всех типов течений (различия в пределах погрешности) на фоне зависимости Dst от $sumE_y$ главной фазы магнитной бури.

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением предыдущей статьи [Николаева и др., 2011a], 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., 2010б; 2011] двойным методом наложенных эпох было показано, на магнитной $B_z E_y$ ($Dst Dst^*$), $Dst Dst^*$, $B_z E_y$, при этом сравнение “входа” ($B_z E_y$) и “выхода” ($Dst Dst^*$) 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 силь-

ное 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., 2007б]. Анализ поведения параметров СВ и ММП для 625 магнитных бурь с $Dst < -60$ нТл для периода 1976–2000 годов [Ермолаев и др., 2007б] 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 σB 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., 2011а].

За период 1976–2000 г 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), 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 всеми ICME, $Sh_E + Sh_{MC}$ (40 магнитных бурь), сумма всех межпланетных корональных выбросов 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, разделяющего все точки на 2 примерно равные по числу точек подгруппы. Величина порогового значения P_0 и

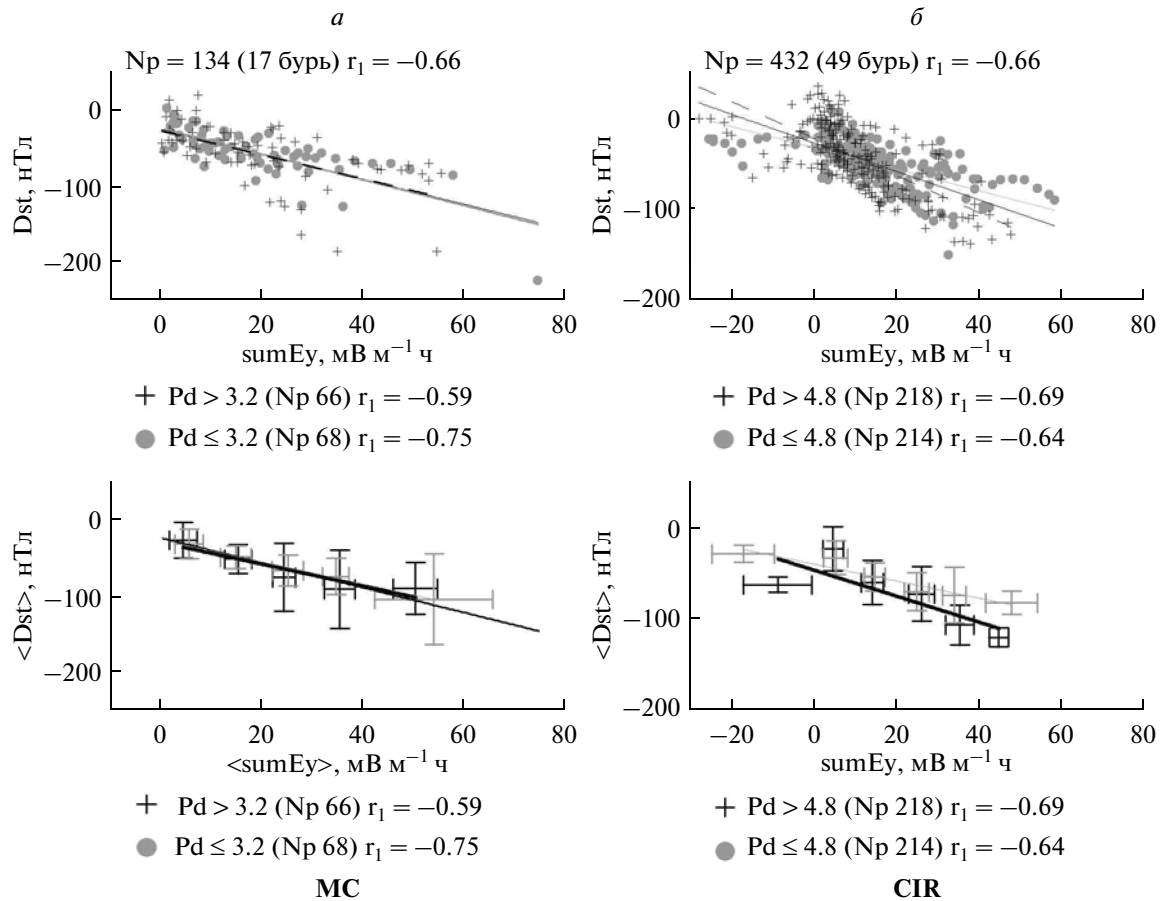


Рис. 1. Зависимость Dst индекса от интегрального электрического поля $sumEy$, для подгрупп с низким (серые кружки и линии) и высоким (черные крестики и линии) Pd : (а) для событий MC, (б) для событий CIR.

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 MC и CIR 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 MC и $r_1 = -0.66$ для CIR). Для области сжатия CIR, 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 подгруппы CIR 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 MC обе подгруппы с высоким давлением $Pd > 4.8$ нПа и низким давлением $Pd \leq 3.2$ нПа имеют близкие линии регрессии. Этот факт позволяет предположить, что для MC зависимость Dst от Pd (на фоне зависимости от интегрального электрического поля $sumEy$) отсутствует.

Отметим, что для событий CIR 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 MC 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 MC отсутствие зависимости Dst от Pd на фоне зависимости от интегрального поля $sumEy$ может быть вызвано недостаточно высокими значениями самого давления внутри MC для нашей

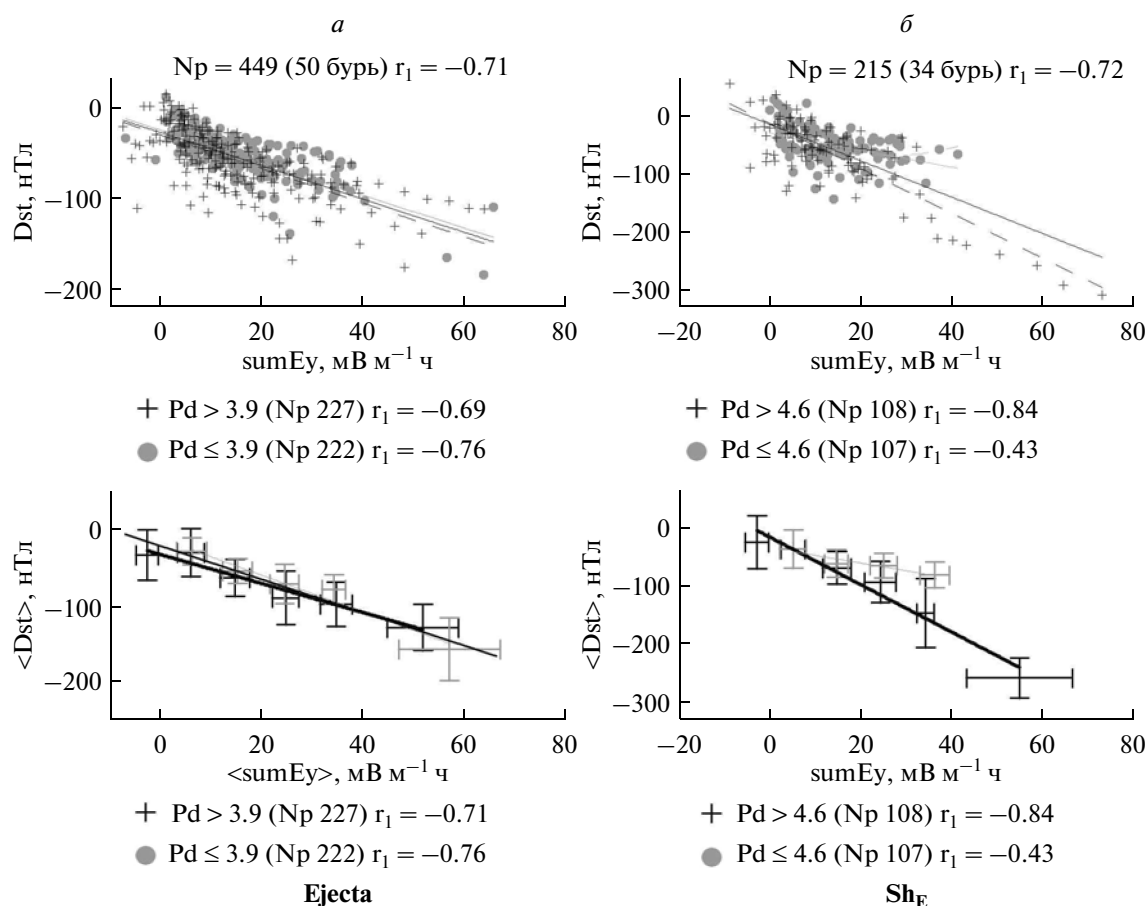


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для событий Ejecta и ShE.

выборки. Как видно из табл. 1, приведенной в предыдущей статье [Николаева и др., 2011a], величина среднего давления $\langle Pd \rangle$ в 1.5 раза ниже у MC, 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 MC 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 MC 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 MC зависимость Dst 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 Dst от $sumEy$ индекс Dst 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 ShE.

Для обоих типов событий на главной фазе Dst индекс от $sumEy$ также хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с одинаково высоким коэффициентом корреляции (для событий Ejecta: $r_1 = -0.71$ и для ShE: $r_1 = -0.72$). 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 Dst 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 ShE в подгруппе точек с низким динамическим давлением $Pd \leq 4.6$ нПа индекс Dst 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 Dst заметно понижается с ростом интегрального поля $sumEy$ (коэффициент линейной

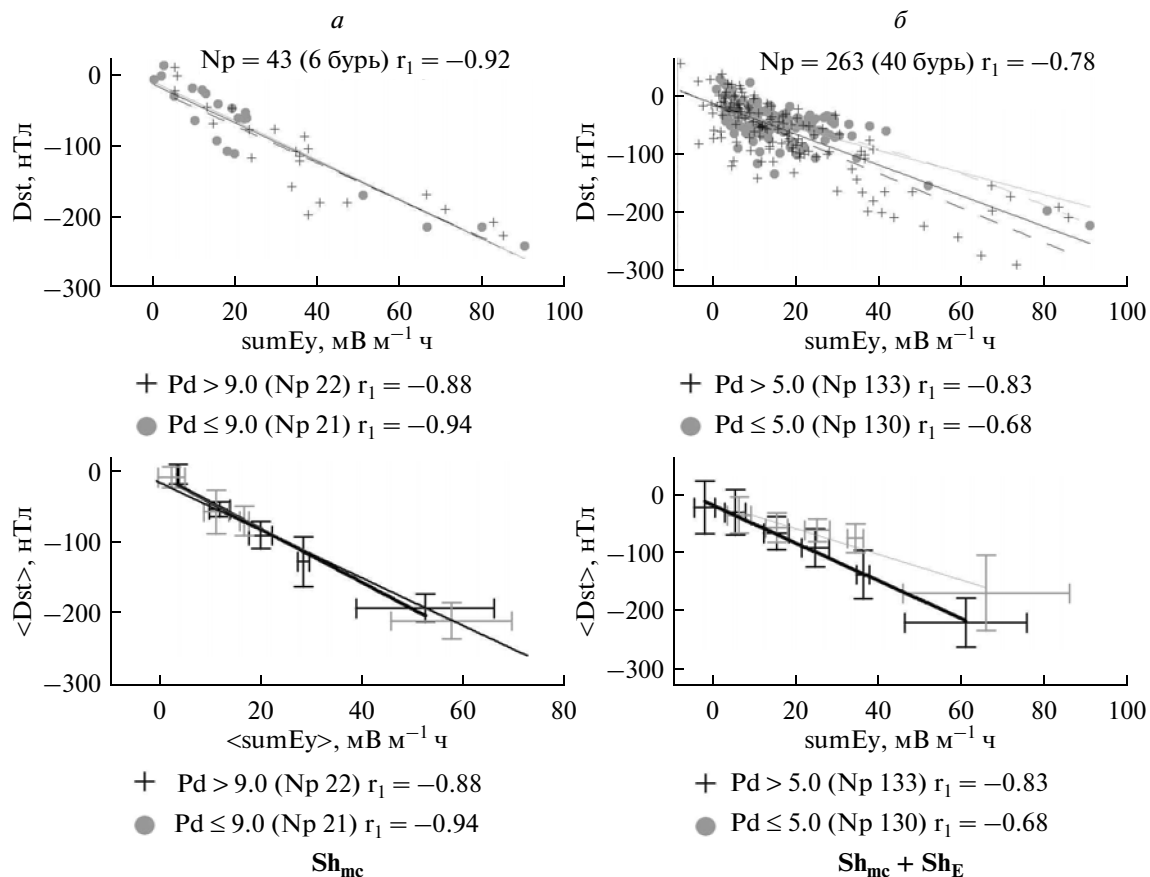


Рис. 3. То же, что на предыдущих рис. 1–2, но для событий Sh_{MC} и $Sh_{MC} + Sh_E$.

корреляции $r_1 = -0.84$). Отметим, что для событий 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_E . Хотя погрешности достаточно велики, статистика говорит в пользу гипотезы, что мощность бури, вызванной событиями Sh_E , 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_{MC} , (б) событиями $Sh_{MC} + Sh_E$. 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 ($Sh_{MC} + Sh_E$) 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_E). Отметим, что для событий Sh_{MC} во всех интервалах число точек усреднения <10 (меняется от 3 до 7 точек). Для событий $Sh_{MC} + Sh_E$ 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-

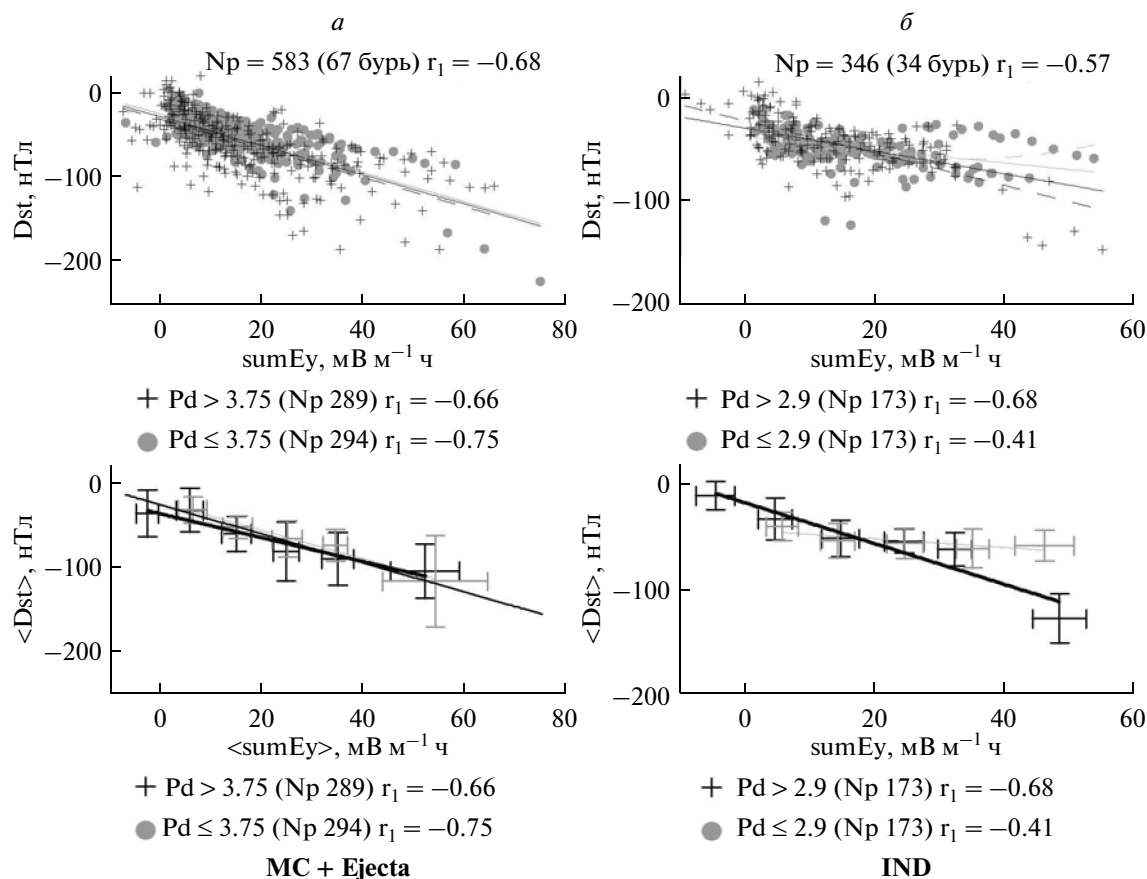


Рис. 4. То же, что на предыдущих рис. 1–3, но для событий МС + Ejecta и IND.

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 P_d ($r_1 = -0.66$ и $r_1 = -0.75$, соответственно). Для магнитных бурь, связанных с событиями неопределенного типа IND, в подгруппе точек с низким давлением $P_d \leq 2.9$ нПа наблюдается очень слабая зависимость Dst от sumEy (низкий коэффициент корреляции $|r_1| < 0.5$). Но в подгруппе точек с высоким динамическим давлением $P_d > 2.9$ 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 $\text{sumEy} > 40$ мВ м⁻¹ ч подгруппы точек с низким давлением. Для событий IND также мало точек в интервалах с $\text{sumEy} > 40$ мВ м⁻¹ 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 σB 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 σB 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 σB 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 интенсивно-

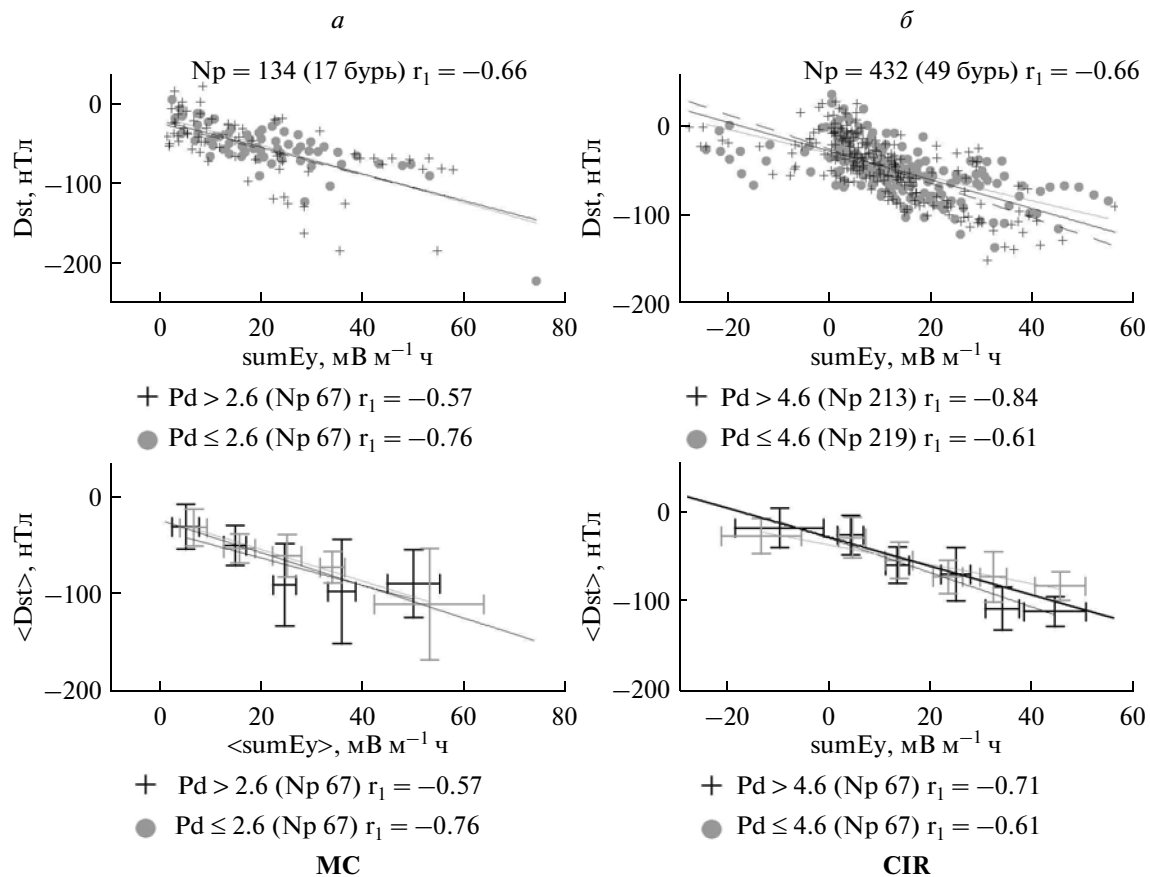


Рис. 5. Зависимость Dst индекса от интегрального электрического поля $sumEy$, для подгрупп с низким (серые кружки и линии) и высоким (черные крестики и линии) уровнем флуктуаций σB ММП: (а) для событий MC, (б) для событий CIR.

сти магнитной бури для подгруппы точек с высоким уровнем флуктуаций σB ММП в событиях CIR (в пределах погрешности). Для MC число точек усреднения в интервалах для разных подгрупп σB меняется от 12 до 29, кроме 2-х последних интервалов для $sumEy > 30$ мВ м⁻¹ 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⁻¹ 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 Ejecta 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 σB ММП как для Ejecta, так и для Sh_E (для области сжатия Sh_E зависимость от Pd присутствовала, см. рис. 2б). Для событий Ejecta число точек усреднения в разных интервалах меняется

между 13 и 90, кроме 1-го интервала для $sumEy = -10-0$ мВ м⁻¹ ч в подгруппе точек с низким уровнем флуктуаций $\sigma B \leq 2.9$ нТл, где 7 точек 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⁻¹ 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⁻¹ 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 σB ММП. На фоне зависимости Dst от $sumEy$ отсутствует зависимость от уровня флуктуаций магнитного поля σB для обоих типов течений, включая все области сжатия перед 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

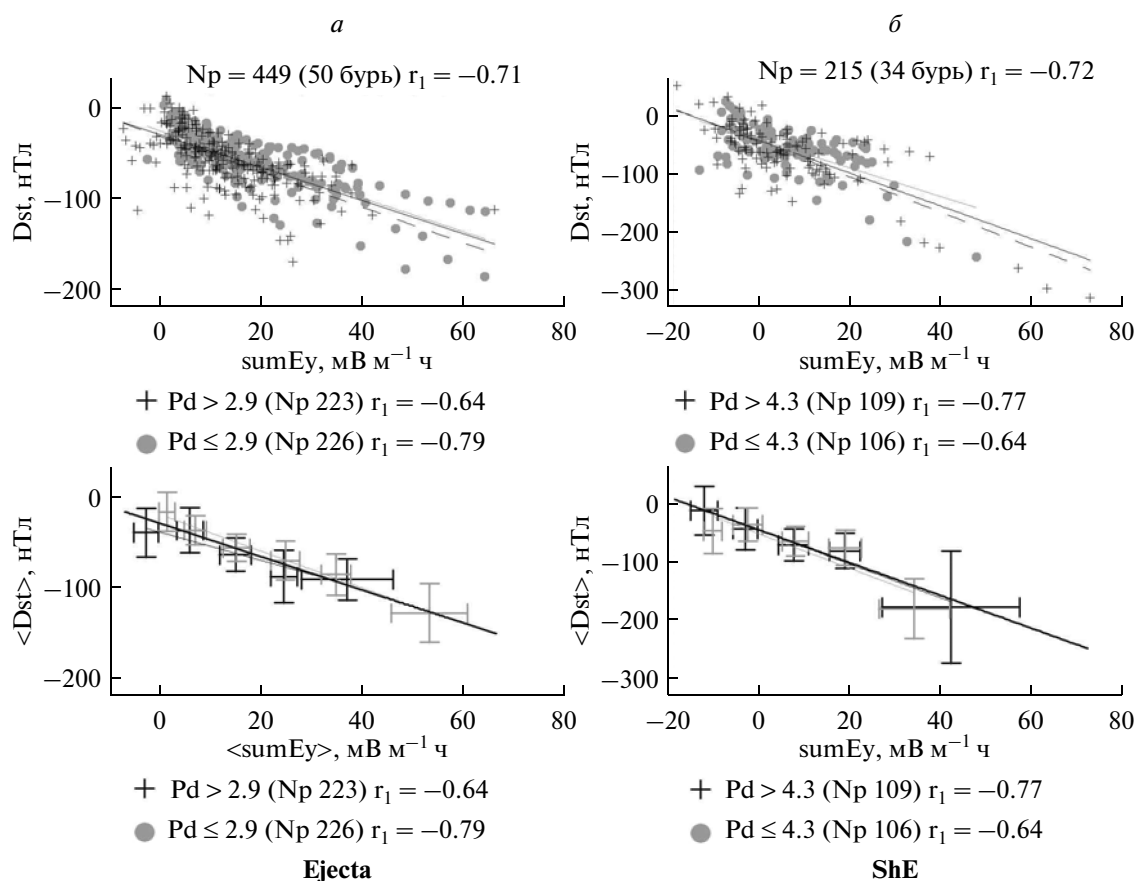


Рис. 6. То же, что на предыдущем рис. 5, но для событий Ejecta и ShE.

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) наблюдается в 1-м интервале $sumEy = -10-0$ мВ м $^{-1}$ ч и предпоследнем интервале ($sumEy = 30-40$ мВ м $^{-1}$ ч) в обеих подгруппах с разным σB и последнем интервале ($sumEy > 40$ мВ м $^{-1}$ 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 σB ММП. Для событий IND на фоне зависимости Dst от $sumEy$ присутствует тенденция роста интенсивности магнитной бури при высоком уровне флуктуаций σB ММП (как и для зависимости от Pd на рис. 4б). 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 $^{-1}$ ч) интервала с 3-мя точками усреднения и последнего ($sumEy > 40$ мВ м $^{-1}$ ч) с 5 и 7 точками усреднения для низкого и высокого уровня флуктуа-

ций σB ММП, и предпоследнего интервала $sumEy = 30-40$ мВ м $^{-1}$ ч с 8-ю точками усреднения 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., 2011а], самый маленький разброс уровня флуктуаций поля σB 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_{MC} , $Sh_E + Sh_{MC}$, Sh_E и CIR (4.8, 3.7, 3.5, 3.0 нТл, соответственно).

Возможно, что зависимость от динамического давления Pd и вариаций поля σB 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

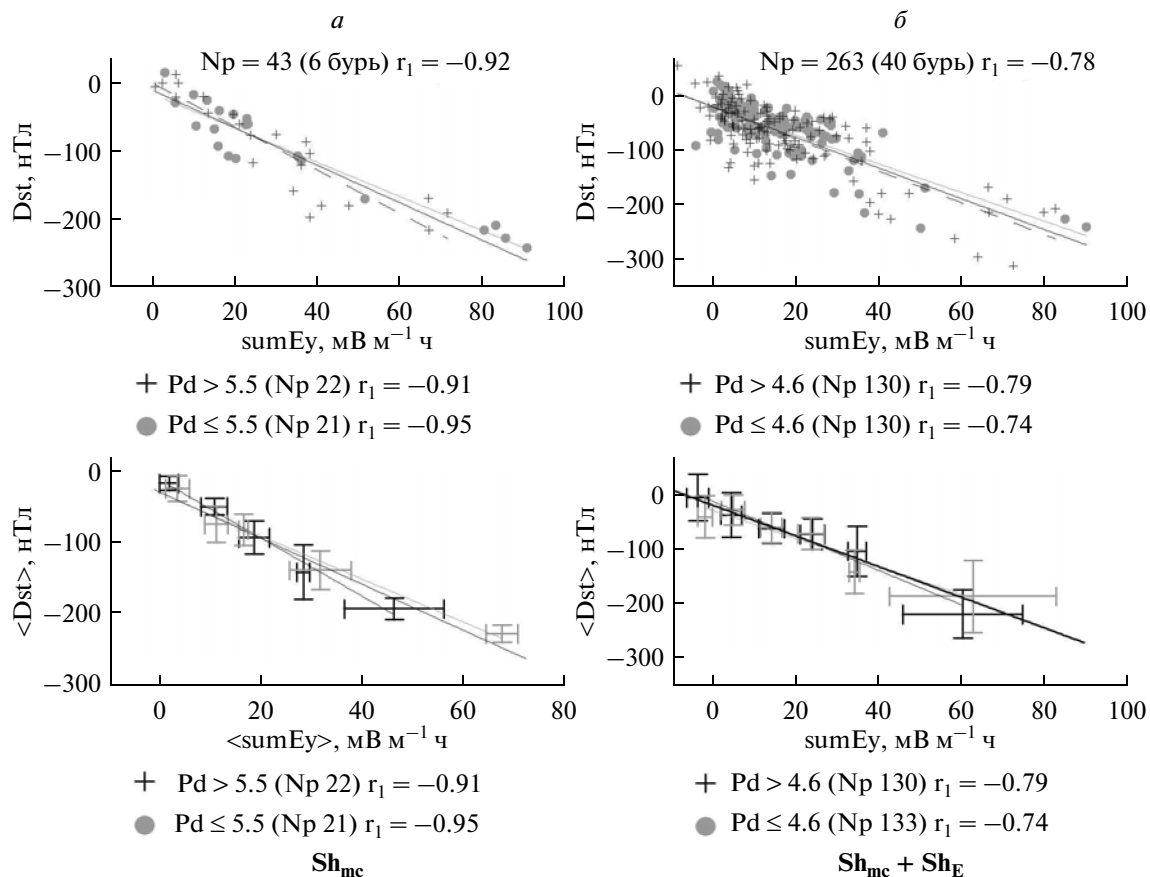


Рис. 7. То же, что на предыдущих рис. 5–6, но для событий Sh_{MC} и Sh_{MC} + Sh_E.

типа солнечного ветра зависимость от вариаций 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_E 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_{MC}. Вклад точек с сильным $Ey > 10$ мВ/м в несколько раз выше для магнитных бурь, связанных с областями сжатия Sheath (7% – Sh_E + Sh_{MC}, 4.2% – Sh_E, 21% – Sh_{MC}), чем с “телами” ICME (<1% – MC + Ejecta, 2.2% –

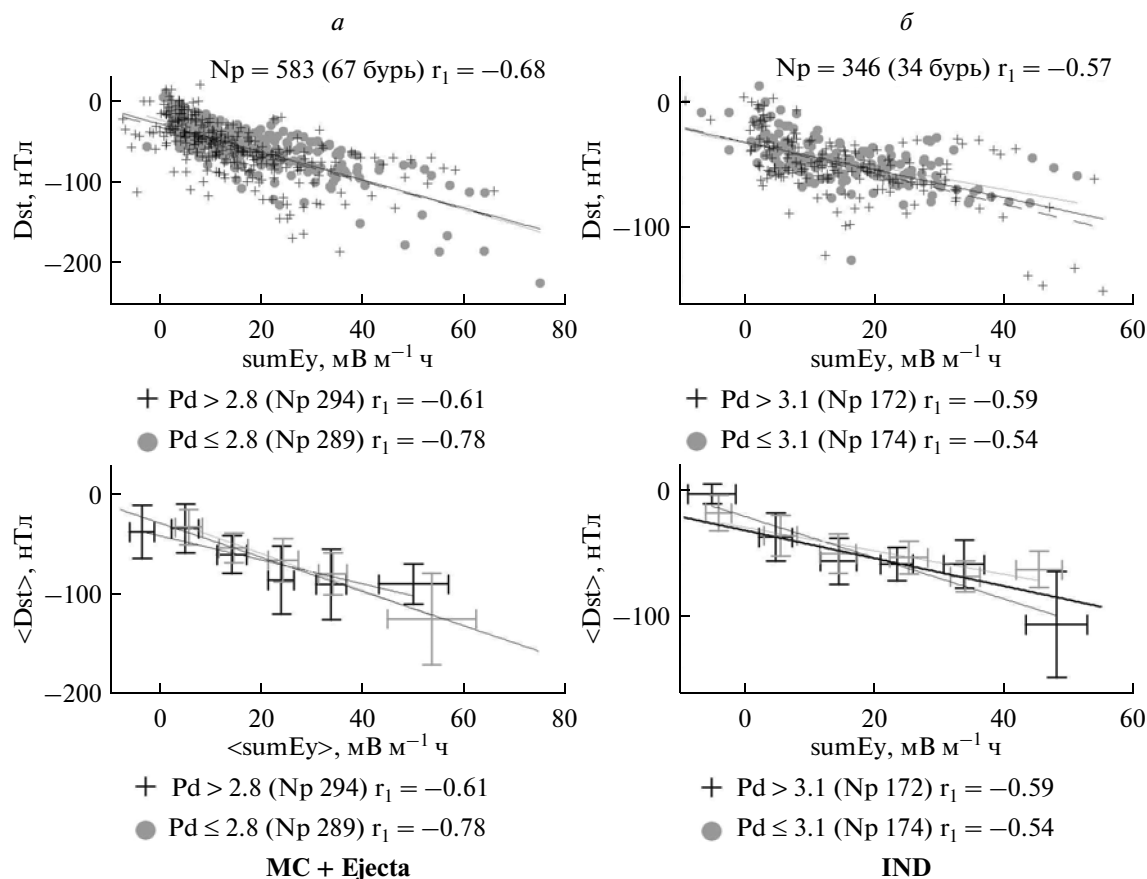


Рис. 8. То же, что на предыдущих рис. 5–7, но для событий MC + Ejecta и IND.

Ejecta, 3% – MC). Сильные поля $Ey > 10$ мВ/м полностью отсутствуют в магнитных бурях от событий CIR.

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, $Dst \sim \int Ey f(t) dt$, 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 Δt [Wang et al., 2003].

Для каждого типа магнитных бурь нами были построены зависимости величины интегрально-го электрического поля $\sum Ey$ от текущего момента фазы t на главной фазе (t – отсчитывается от начала главной фазы) (графики не приводятся). 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 MC 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 MC + 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 $\sum Ey$ 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 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 σB ММП не

влияют на зависимость $|Dst|$ индекса во время магнитных бурь (минимум Dst главной фазы бури) от электрического поля E_y или это влияние слабое.

В данной работе на фоне зависимости Dst индекса главной фазы бури от интегрального поля $sumE_y$ 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 $sumE_y$ (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 $sumE_y$) или эта зависимость слабая. Давление Pd усиливает связь между Dst и $sumE_y$ 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 E_y 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 $sumE_y$ 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 $sumE_y$. В то время как для остальных типов связь между Dst и $sumE_y$ 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 $sumE_y$ ниже, чем для пиковых значений Dst и E_y , что возможно связано с влиянием длительности главной фазы на величину интегрального поля $sumE_y$ и учетом влияния малых значений E_y 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 $sumE_y$ не наблюдается.

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

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

гравитного электрического поля главной фазы магнитной бури.

Итак, индекс *Dst* понижается с ростом величины магнитного потока *sumE_y* 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 *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 *sumE_y* 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. 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., 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.
- 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 *E_y*-компоненты солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронавтика. 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 аэронавтика. 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 аэронавтика. Т. 52. № 1. 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: $-VB_z$ and Δt // 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.