

УДК 523.62-726

ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ ОТ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ТЕЧЕНИЙ

© 2011 г. Н. С. Николаева, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина

Учреждение РАН Институт космических исследований, Москва
e-mail: nnikolae@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 10.12.2009 г.
После доработки 10.08.2010 г.

На основе каталога крупномасштабных типов солнечного ветра, созданного с использованием базы OMNI за период 1976–2000 гг. [Ермолаев и др., 2009], проводится исследование зависимости максимальных значений геомагнитных индексов $|Dst|$ и AE , наблюдаемых во время магнитных бурь, от величины межпланетного электрического поля E_y . Анализ выполнен для 8 категорий магнитных бурь, вызванных разными типами течений солнечного ветра: CIR – 86 бури, MC – 43 бури, Sh_{MC} – 8, Ejecta – 95, Sh_{Ejecta} – 56, MC + Ejecta – 138, $Sh_{MC} + Sh_{Ejecta}$ – 64, и неопределенный тип – 75 бурь. Показано, что величина $|Dst|$ индекса увеличивается с ростом электрического поля E_y для всех 8-ми типов течений. При сильных электрических полях $E_y > 11$ мВ/м внутри магнитных облаков MC и, возможно, внутри всех ICME (MC + Ejecta), величина $|Dst|$ индекса выходит на насыщение. Величина AE индекса во время магнитных бурь не зависит от величины электрического поля E_y почти для всех течений, кроме магнитных облаков MC и, возможно, области сжатия перед ними Sh_{MC} . Наблюдается линейный рост AE индекса внутри MC при низких значениях поля $E_y < 11$ мВ/м, и спад при сильных полях $E_y > 11$ мВ/м. Так как во всех типах солнечного ветра динамическое давление Pd и флуктуации σB ММП коррелируют с величиной E_y , то оба геомагнитных индекса $|Dst|$ и AE не показывают дополнительной зависимости от Pd и σB ММП. Нелинейная связь интенсивности $|Dst|$ и AE индексов с E_y компонентой электрического поля, наблюдаемая при сильных электрических полях E_y внутри MC и, возможно, всех ICME, согласуется с моделированием магнитосферно-ионосферной токовой системы зоны I в условиях насыщения потенциала полярной шапки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как показали многочисленные эксперименты, главной причиной магнитных бурь является южная ориентация межпланетного магнитного поля (ММП) (см. например, работы [Russell et al., 1974; Burton et al., 1975; Akasofu et al., 1985; Gonzalez et al., 1999; O'Brien and McPherron, 2000; Vennerstroen, 2001; Ермолаев и Ермолаев, 2002; Lyatsky and Tan, 2003; Huttunen and Koskinen, 2004; Русанов и Петрукович, 2004; Maltsev, 2004; Веселовский и др., 2004; Gonzalez and Echer, 2005; Yermolaev et al., 2005a; Yermolaev et al., 2005b; Dmitriev et al., 2005; Ермолаев и др., 2007a] и ссылки в них). Эффективность B_z компоненты ММП в возбуждении магнитных бурь и суббурь определяется процессами взаимодействия индуцированного электрического поля $E_y = V_x B_z$ (V_x – радиальная компонента скорости солнечного ветра при южной $B_z < 0$ компоненте ММП) с магнитосферно-ионосферной системой. В результате этих процессов происходят изменения в распределении токов внутри этой системы (например, [Gonzalez et al., 1994; O'Brien and McPherron, 2000; Siscoe et al., 2005; Zhu et al., 2006] и ссылки в них), что влияет на величину магнитного поля на поверхности

Земли, и приводит к изменениям величины геомагнитных индексов.

Интенсивность магнитосферного возмущения оценивается геомагнитными индексами Dst и AE . Высокоширотный индекс AE характеризует интенсивность аврорального тока и является индикатором суббуревой активности [Davis and Sugiura, 1966]. Низкоширотный индекс Dst используется для оценки интенсивности кольцевого тока во время магнитных бурь, и является мерой геоэффективности межпланетных возмущений [Sugiura, 1964; Burton et al., 1975]. Подчеркнем, что мы изучаем авроральную активность во время магнитных бурь. Возможно, что суббури без магнитных бурь развиваются по другим законам, например, альвеновские волны могут вызвать суббури, но не могут вызвать бури (см. статью [McPherron et al., 2009] и ссылки в ней). Кроме того, во время магнитных бурь авроральные электроджеты сдвигаются на более низкие широты по отношению к широте станций, используемых для определения AE индекса, что может приводить к искажению результатов [Feldstein, 1992].

Электрическое поле E_y является главным параметром солнечного ветра для возбуждения маг-

нитных бурь и суббурь. В то же время на интенсивность магнитной бури также влияют вариации других параметров солнечного ветра — динамического давления и флуктуаций σB ММП [Burton et al., 1975; Gonzalez et al., 2001; Gonzalez et al., 2002; Borovsky and Funstein, 2003; Seki et al., 2005; Yermolaev et al., 2007a, б]. Относительный вклад динамического давления Pd в величину Dst -индекса не является постоянной величиной, как это следует из работы [Burton et al., 1975]. Влияние Pd на величину Dst -индекса зависит от величины E_y компоненты электрического поля, и при больших значениях поля E_y , наблюдаемых обычно на главных фазах бурь, вклад Pd оказывается незначительным [Siscoe et al., 2002; Siscoe et al., 2005].

Обычный квазистационарный солнечный ветер не содержит значительной и длительной B_z компоненты ММП, достаточной для возбуждения магнитной бури. В то время как некоторые возмущенные типы течений солнечного ветра могут содержать большую и длительную B_z компоненту ММП, в том числе и южной ориентации, которая приводит к магнитной буре [Tsurutani et al., 1988; Tsurutani et al., 1995; Ермолаев и Ермолаев, 2002; Huttunen and Koskinen, 2004; Huttunen et al., 2002; Richardson et al., 2002; Vieira et al., 2004; Echer and Gonzalez, 2004; Yermolaev et al., 2005a; Ермолаев и др., 2010a].

Можно выделить несколько геоэффективных течений солнечного ветра, при прохождении которых наблюдаются магнитные бури разной интенсивности. Главными из них являются межпланетные проявления корональных выбросов СМЕ (события ICME, включающие 2 подтипа — магнитные облака MC и поршни Ejecta) и области взаимодействия высокоскоростных течений солнечного ветра с медленными течениями CIR. Как показали исследования, перед передним фронтом ICME может наблюдаться область сжатия плазмы Sheath (перед магнитным облаком MC — Sh_{MC} или перед поршнем Ejecta — Sh_E). Природа образования области сжатия Sheath близка к CIR, но только вместо быстрого потока солнечного ветра роль поршня в этом случае играет само ICME. Каждый тип течений имеет свой определенный набор параметров солнечного ветра, отличающийся от других типов течения. Например, в области сжатия на фронте быстрого и медленного течений (события CIR) и перед передним фронтом поршня (события Sheath) плазма имеет повышенные значения плотности, температуры, а тепловое давление преобладает над магнитным давлением $\beta > 1$. Магнитное облако MC является подклассом событий ICME и отличается от Ejecta более высоким (>10 нТл) и более регулярным магнитным полем. Оба подтипа событий ICME (MC + Ejecta — магнитные облака MC, и “поршни” Ejecta) имеют структуру магнитного поля в виде жгута, и внутри них магнитное давление

преобладает над тепловым давлением ($\beta \ll 1$). Отметим, что мы не рассматриваем класс очень сильных магнитных бурь, которые генерируются несколькими ICME, взаимодействующими между собой [Yermolaev and Yermolaev, 2008]. Методика идентификации разных типов течений солнечного ветра на основе плазменных и магнитных данных базы OMNI за 1976–2000 гг. подробно описана в работе [Ермолаев и др., 2009]. Полная статистика событий солнечного ветра и оценка их геоэффективности, как вероятности появления магнитной бури (т.е. отношение числа событий, вызвавших магнитную бурю, к полному числу событий данного типа), приведена в работе [Ермолаев и др., 2010a]. Известно, что развитие геомагнитных бурь и суббурь существенно различается в зависимости от того, каким типом течения они вызваны [Borovsky and Denton, 2006; Despirak et al., 2009]. В частности 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 работ, посвященных связи между минимумом Dst -индекса и B_z компонентой ММП, не учитывает, какими именно типами межпланетных возмущений были генерированы магнитные бури (например, [Akasofu et al., 1985; O'Brien and McPherron, 2000] и ссылки в них). Аналогичная ситуация с зависимостью AE индекса от E_y (например, [Weimer et al., 1990]). Лишь в некоторых работах связь между этими параметрами рассматривалась в конкретных типах течений солнечного ветра: в магнитных облаках MC [Wu and Lepping, 2002; Yurchyshyn et al., 2004; Ермолаев и др., 2007б], в коротящих областях взаимодействия CIR [Alves et al., 2006; Richardson et al., 2006; Ермолаев и др., 2007б] или в потоках за межпланетными ударными волнами [Oh and Yi, 2004].

Еще меньше работ, в которых проводится сопоставление этих зависимостей в разных типах течений с разной внутренней структурой. Характеристики вариаций электрического поля E_y во время прохождения 2-х основных типов солнечного ветра — MC и высокоскоростных течений сравнивались в работах [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007]. Авторы показали, что для MC наблюдается нелинейная зависимость индексов AE и $|Dst|$ от E_y . При низких значениях поля $E_y < 12$ мВ/м индексы $|Dst|$ и AE растут линейно с ростом электрического поля, а при высоких значениях поля $E_y > 12$ мВ/м, наблюдается эффект насыщения индекса $|Dst|$, и спад величины AE индекса [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007]. В то время как для высокоскоростных течений CIR оба индекса меняются линейно во всем диапазоне E_y . Авторы также исследовали связь индексов с динамическим давлением и уровнем флуктуаций ММП, которые на-

блюдались в MC и CIR. При этом сопоставлялись максимальные часовые значения индексов $|Dst|$ и AE внутри MC и CIR с величиной Pd и уровнем флуктуаций ММП. Авторы получили, что связи между индексами и параметрами переходных областей значимы для CIR (коэффициент корреляции $r > 0.5$) и не значимы для MC ($r < 0.5$). Фактически в этих работах [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007] при исследовании зависимости индексов от Ey не учитывалась внутренняя структура самих MC, их возможное разделение на 2 подтипа – область сжатия Sheath перед MC и само тело MC, что естественно может приводить к искажению результата.

В своей предыдущей работе [Ермолаев и др., 2007б] мы рассматривали область самого ICME (т.е. суммы магнитных облаков MC и Ejecta) и область сжатия перед ними Sheath ($Sh_{MC} + Sh_E$), как два разных типа течения солнечного ветра. В этой работе [Ермолаев и др., 2007б] были сопоставлены зависимости минимума Dst -индекса от Ey компоненты электрического поля для 4-х типов событий солнечного ветра: межпланетных корональных выбросов ICME (MC + Ejecta), коротящих течений солнечного ветра CIR, области сжатия Sheath ($Sh_{MC} + Sh_E$) и событий неопределенного типа. Кроме того, полученные результаты также сравнивались с результатами других авторов [Wu and Lepping, 2002; 2005; Alves et al., 2006; Srivastava and Venkatakrisnan, 2004; Kane, 2005]. Однако в работе [Ермолаев и др., 2007б] нами использовались только линейные зависимости для линий регрессий, и никаких числовых оценок тесноты связи (коэффициентов корреляции) не проводилось.

Данная работа является продолжением предыдущей [Ермолаев и др., 2007б], но для увеличения статистики магнитных бурь был снижен порог на Dst в минимуме бури с -60 нТл до -50 нТл, то есть мы включили в анализ все умеренные магнитные бури. Во-вторых, все магнитные бури были разделены на 8 групп (вместо 4-х) в зависимости от того, каким типом течения солнечного ветра была вызвана магнитная буря. Основной целью данной работы является исследование корреляционных связей между интенсивностями магнитной бури (минимум Dst индекса, используется $|Dst|$) и суббуревой активностью (AE индексом) во время бури и основными параметрами солнечного ветра – Ey компонентой электрического поля солнечного ветра, динамическим давлением Pd , и уровнем флуктуаций σB ММП. Для анализа мы используем значения геомагнитных индексов и параметров солнечного ветра, наблюдаемых на пике главной фазы магнитной бури. Основная новизна нашей статьи состоит в сравнении отклика магнитосферы на различные межпланетные драйверы, список которых в статье представлен наиболее полно на современном уровне развития науки.

Этот подход естественно сначала проверить на наиболее простом способе сопоставления межпланетных и магнитосферных условий, а затем развивать с использованием более физически развитых подходов (работа по этому направлению нами ведется, и некоторые результаты по исследованию динамики развития геомагнитных индексов и параметров солнечного ветра за весь период главной фазы магнитных бурь направлены в печать [Ермолаев и др., 2010б]). Используемый нами метод характеристики бури по минимальному отрицательному значению индекса Dst один из простых способов сопоставления магнитных бурь и их геоэффективности с солнечным ветром, хотя и очень упрощенный. Например, для характеристики полной интенсивности магнитной бури лучше проводить сопоставление суммарного геомагнитного индекса за период бури с суммарным электрическим полем солнечного ветра за период бури, или индексом Акасофу, но это тема выходит за рамки данного исследования. Наш метод анализа неявно предполагает, что время отклика магнитосферы на солнечный ветер не более 1 час. В то же время исследование динамики развития геомагнитных индексов и параметров солнечного ветра за весь период главной фазы магнитных бурь показывает, что магнитная буря обладает “памятью” о предыдущих значениях Bz (и Ey) [Ермолаев и др., 2010б]. В принципе геомагнитные индексы могут коррелировать со многими параметрами солнечного ветра, но так как эти параметры связаны между собой, то независимых параметров, влияющих на индексы, может быть немного. Сколько их, и какие именно параметры – задача данного исследования.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Исходными данными для изучения взаимосвязи между геомагнитными Dst и AE индексами и параметрами солнечного ветра – Ey компонентой электрического поля, Pd динамическим давлением солнечного ветра и уровнем флуктуаций σB ММП – является список магнитных бурь с минимумом $Dst \leq -50$ нТл за период с 1976 по 2000 гг., для которых был найден источник в солнечном ветре [Ермолаев и др., 2009]. Методика идентификации разных типов течения солнечного ветра, а также их привязка к магнитным бурям подробно описана в работах [Ермолаев и др., 2009; 2010а]. Список магнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТл был дополнен информацией о следующих величинах: динамического давления Pd , уровне флуктуаций σB ММП и значении AE -индекса на момент минимума Dst -индекса магнитной бури (то есть, использовалось не максимальное значение AE , а величина AE индекса во время минимума Dst , усредненная за 1 час). Усредненные за 1 час значения AE -индекса были взяты из базы данных OMNI 2

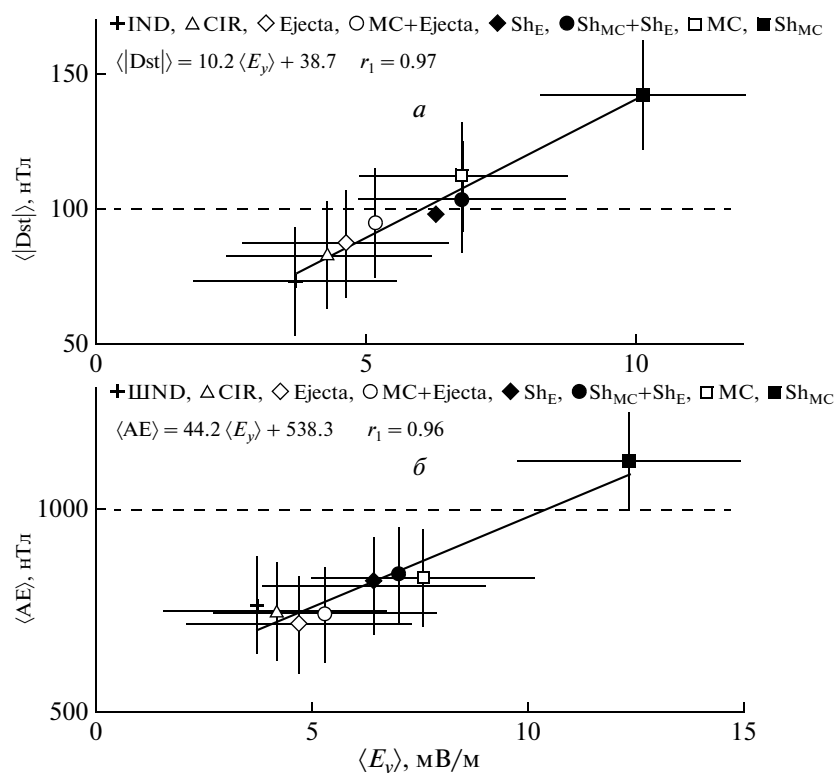


Рис. 1. Зависимость индексов (а) $\langle |Dst| \rangle$, и (б) $\langle AE \rangle$ от поля $\langle E_y \rangle$, усредненных по типу солнечного ветра, которые обозначены разными символами: IND, CIR, Ejecta, MC + Ejecta, Sh_E , $Sh_{MC} + Sh_E$, MC, Sh_{MC} . Вертикальные и горизонтальные отрезки, проходящие через каждую точку, показывают среднее квадратичное отклонение. Сплошные линии показывают линии регрессии. Наверху каждой панели приведены уравнения регрессии и коэффициенты линейной корреляции r_1 .

(<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) [King and Papitashvili, 2004]. Кроме того, на момент минимума Dst -индекса оценивалась E_y компонента конвективного электрического поля: $E_y = V \times B_z$, где V — радиальная компонента скорости солнечного ветра при отрицательной B_z -компоненте ММП.

Все умеренные и сильные магнитные бури с $Dst \leq -50$ нТл, зарегистрированные за период 1976–2000 гг., были разделены на 8 групп в зависимости от того, каким типом течения они вызывались. В результате было получено, что 43 магнитные бури связаны с магнитными облаками MC, 86 бурь — с коротирующей областью взаимодействия CIR, 95 магнитных бурь — с поршнями Ejecta, 56 бурь — с областью сжатия Sheath перед Ejecta (Sh_E), 8 бурь — с областью сжатия Sheath перед MC (Sh_{MC}), 64 бури — со всеми событиями Sheath перед ICME ($Sh_{MC} + Sh_E$), 138 бурь — со всеми межпланетными корональными выбросами ICME (MC + Ejecta), и 75 магнитных бурь — с неопределенным типом течения солнечного ветра (IND). К неопределенному типу (IND) относились события, для которых невозможно было провести надежную идентификацию типа течения, либо из-за отсутствия каких-либо параметров, либо из-за сложного характера явления.

Отметим, что из соображений надежности при малом числе событий менее 10 мы не проводили линейной аппроксимации (например, для Sh_{MC} при анализе зависимости AE и Dst от E_y , Pd , σB ММП). А при количестве событий менее 30 не проводили квадратичной аппроксимации (например, для событий MC при анализе зависимости AE от E_y). Также в случаях квадратичной эмпирической зависимости, когда отклонение от линейной зависимости определяется малым числом точек (например, одной точкой, далеко отстоящей от основного массива), мы проводили аппроксимацию ломаной линией из 2-х линейных участков: 1-й участок, там, где много точек, 2-й участок включал две последние точки 1-го участка плюс эти одиночные точки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 представлена зависимость от среднего электрического поля $\langle E_y \rangle$ для геомагнитных индексов, усредненных по каждому типу солнечного ветра: (а) $\langle |Dst| \rangle$ и (б) $\langle AE \rangle$. Разные типы течения солнечного ветра показаны разными символами (соответствующие обозначения приведены наверху каждого рисунка). Вертикальные и гори-

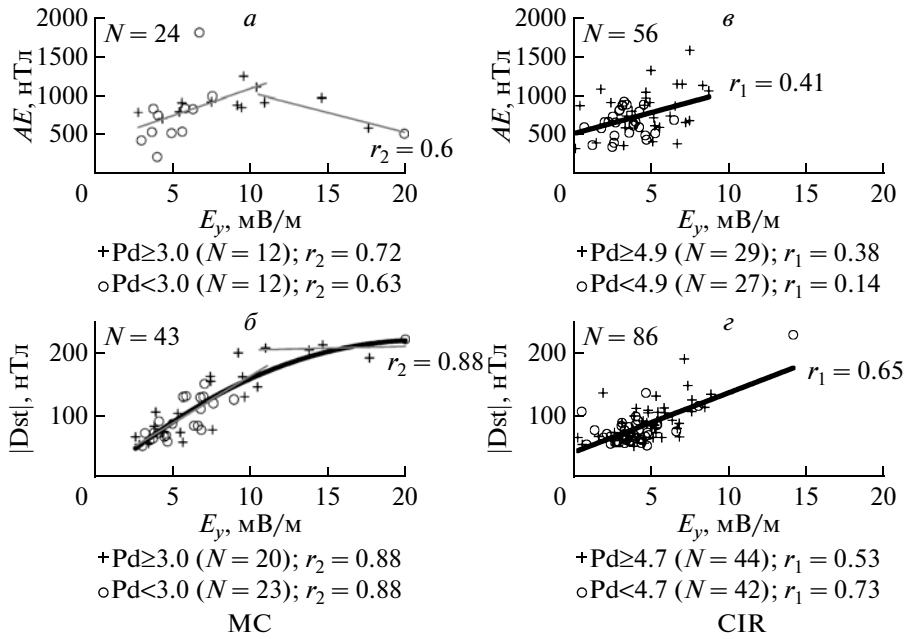


Рис. 2. Зависимость от величины электрического поля E_y геомагнитных индексов (б, г) $|Dst|$ и (а, в) AE для событий: (а, б) MC, (в, г) CIR.

горизонтальные отрезки, проходящие через точки, показывают среднее квадратичное отклонение. Вверху каждой панели приведены коэффициент линейной корреляции r_1 и уравнение регрессии (показано сплошной линией).

Рис. 1 показывает, какую среднюю интенсивность имеют магнитные бури и суббури во время бурь, вызванные разными течениями солнечного ветра, и как она связана со средней величиной электрического поля $\langle E_y \rangle$. Можно предположить, что с точки зрения средней величины индексов AE и Dst , самыми геоэффективными течениями солнечного ветра являются Sh_{MC} , так как они приводят в основном к интенсивным магнитным бурям $|Dst| > 100$ нТл и сильным авроральным токам $AE > 1000$ нТл [Echer et al., 2006]. Эти же события Sh_{MC} имеют самые высокие значения электрического поля $\langle E_y \rangle$ больше 10 нТл. Также сильные магнитные бури с $Dst < -100$ нТл, но с умеренными авроральными токами $500 < AE < 1000$ нТл вызываются областями сжатия как перед $Ejecta$ (Sh_E), так и перед ICME ($Sh_{MC} + Sh_E$), а также самими магнитными облаками MC. Эти 3 типа событий имеют более низкие (в 1.5–2 раза) средние значения электрического поля $\langle E_y \rangle = 6–8$ мВ/м. События (MC + $Ejecta$) находятся на границе геоэффективности между сильными и умеренными магнитными бурями с умеренными авроральными токами $500 < AE < 1000$ нТл. События $Ejecta$ и особенно CIR преимущественно связаны с умеренными магнитными бурями и с умеренными авроральными токами. Оба типа событий имеют еще более низкое значение $\langle E_y \rangle$: выше 4 и ниже 5 мВ/м, соответственно. Наименьшую геоэффективность с

точки зрения величин индексов, имеют события неопределенного типа IND, которые преимущественно связаны с умеренными бурями и умеренными авроральными токами. Этому типу событий соответствует самое низкое среднее значение электрического поля $\langle E_y \rangle \sim 4$ мВ/м. Таким образом, возможно, что каждый тип солнечного ветра имеет свои, характерные для него, средние значения электрического поля E_y , и значения $|Dst|$ и AE индексов.

Зависимость геомагнитных индексов AE и $|Dst|$ от величины электрического поля E_y отдельно для каждой группы магнитных бурь, связанной с конкретным типом течения солнечного ветра, приведена на рис. 2–5. Сплошные линии показывают аппроксимацию зависимости или линии регрессии с указанием величины коэффициента корреляции, где r_1 – коэффициент линейной корреляции, r_2 – коэффициент квадратичной корреляции.

На рис. 2 показана зависимость индексов AE (а, в) и $|Dst|$ (б, г) от E_y : для магнитных облаков MC (а, б), для событий CIR (в, г), соответственно. Как видно на рис. 2а, 2б, для магнитных облаков MC оба индекса AE и Dst нелинейно зависят от электрического поля E_y (высокие коэффициенты квадратичной корреляции: $r_2 = 0.6$, $r_2 = 0.88$, соответственно). Можно предположить, что величины обоих индексов AE и $|Dst|$ растут линейно при низких значениях поля $E_y < 11$ мВ/м. Но при высоких значениях $E_y > 11$ мВ/м индекс AE уменьшается, а индекс $|Dst|$ не меняется, т.е. выходит на насыщение. Для наглядности на рис. 2а показана аппроксимация зависимости AE от E_y ломаной

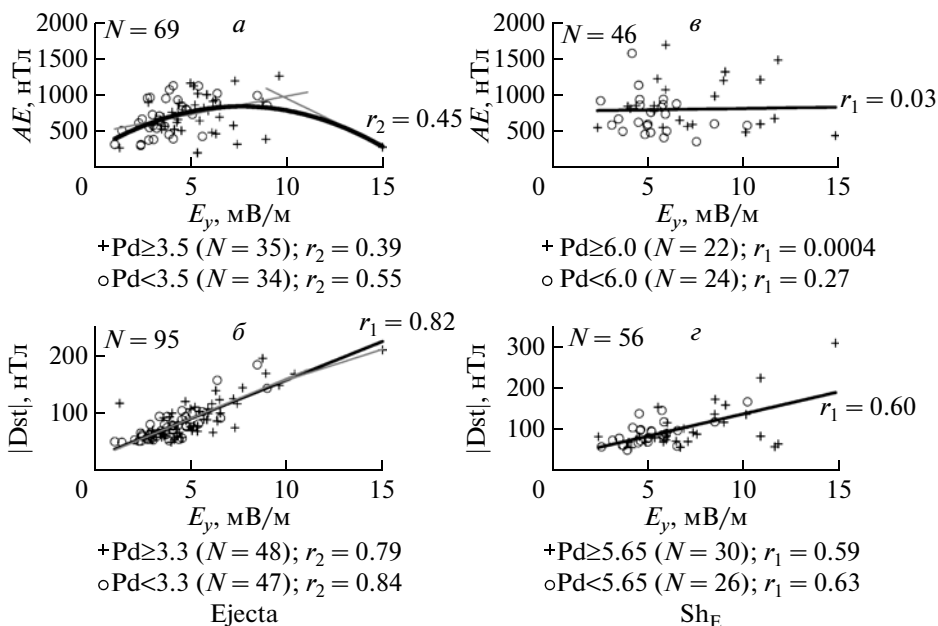


Рис. 3. Зависимость индексов $|Dst|$ (б, з) и AE (а, в) от величины электрического поля E_y для событий: (а, б) Ejecta, (в, з) области сжатия Sheath перед Ejecta, Sh_E .

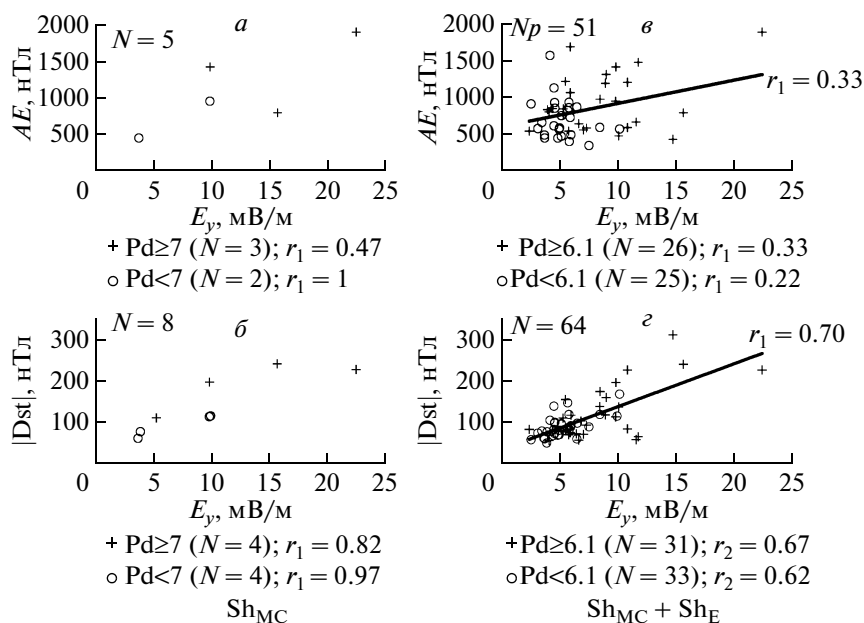


Рис. 4. Зависимость индексов $|Dst|$ (б, з) и AE (а, в) от величины электрического поля E_y для событий: (а, б) область сжатия Sheath перед магнитным облаком, Sh_{MC} , (в, з) все области сжатия Sheath, $Sh_E + Sh_{MC}$.

линией из 2-х линейных участков (тонкие линии): 1-й участок в диапазоне поля $E_y < 11$ мВ/м (линия регрессии по 21-ой точке $AE = 67.8E_y + 429.3$), 2-й участок с $E_y > 10.5$ мВ/м (линия регрессии по 4-м точкам $AE = -50.9E_y + 1568.4$). Аналогично на рис. 2б показана аппроксимация зависимости $|Dst|$ от E_y ломаной линией, состоящей из 2-х линейных участков (тонкие линии): 1-й участок с $E_y < 11$ мВ/м (линия регрессии по 39-ти точкам $|Dst| = 15.1E_y + 14.7$), 2-й участок с

$E_y > 10.5$ мВ/м (линия регрессии по 5-и точкам $|Dst| = 0.59E_y + 200.9$). Для событий CIR индекс AE не зависит от величины электрического поля E_y (низкий коэффициент линейной корреляции $r_1 = 0.41$), в то время как индекс $|Dst|$ растет с ростом электрического поля E_y по линейному закону с коэффициентом корреляции $r_1 = 0.65$, что свидетельствует о тесноте связи между ними (рис. 2в, 2з).

На рис. 3 показана зависимость индексов AE (а, в) и $|Dst|$ (б, з) от величины E_y поля, наблюдае-

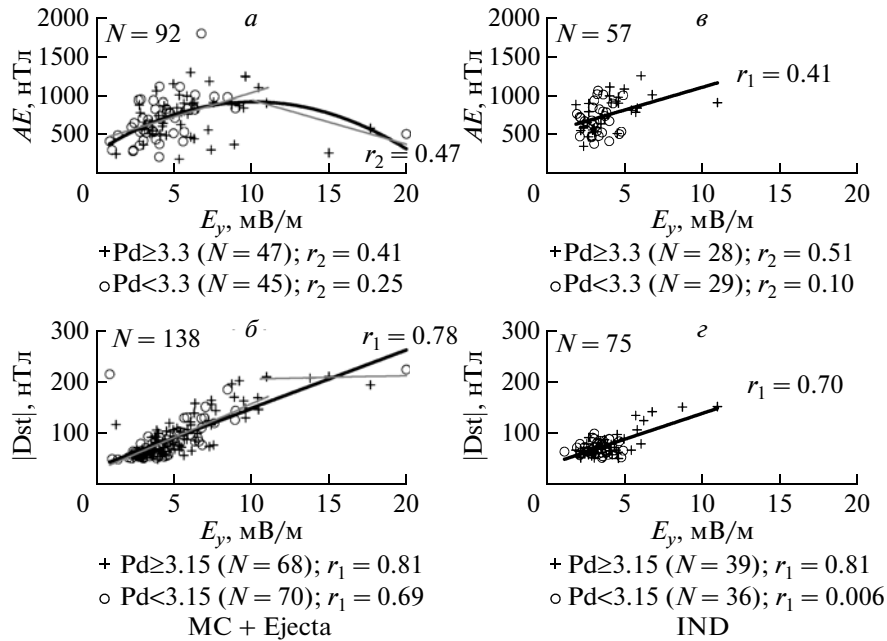


Рис. 5. Зависимость индексов $|Dst|$ (б, г) и AE (а, в) от величины электрического поля E_y для событий: (а, б) всех межпланетных корональных выбросов массы ICME, MC + Ejecta, (в, г) для неопределенного типа солнечного ветра, IND.

мой в событиях Ejecta (а, б) и области сжатия Sheath перед ними, Sh_E (в, г). Как видно на рис. 3а, для событий Ejecta индекс AE не зависит от величины электрического поля (низкий коэффициент корреляции $r_2 = 0.45$). В то время как $|Dst|$ индекс линейно растет с ростом поля E_y , причем коэффициент линейной корреляции высокий $r_1 = 0.82$ (см. рис. 3б). Для наглядности тонкие прямые линии на рис. 3а показывают линейную аппроксимацию на 2-х интервалах электрического поля: 1-й участок для $E_y < 11$ мВ/м с линией регрессии $AE = 50.6E_y + 493.56$ по 68-ми точкам, 2-й участок для $E_y > 9$ мВ/м с линией регрессии $AE = -130.1E_y + 2255.4$ по 3-м точкам. Видна тенденция уменьшения AE индекса с ростом $E_y > 11$ мВ/м, как и для MC, но статистика таких событий Ejecta слишком мала, а коэффициент корреляции низкий $r_2 < 0.5$. Как видно на рис. 3в, г, сильные электрические поля с $E_y > 11$ мВ/м чаще регистрируются внутри области сжатия Sheath перед Ejecta, Sh_E , чем внутри Ejecta (7 событий против 1-го, соответственно). Для событий Sh_E индекс AE не зависит от величины поля E_y (низкий коэффициент корреляции $r_1 = 0.03$), в то время как $|Dst|$ индекс линейно растет с ростом поля E_y , и коэффициент корреляции высокий $r_1 = 0.6$ (см. рис. 3в, г).

На рис. 4а, б показана зависимость AE и $|Dst|$ индексов от электрического поля E_y для событий Sheath перед MC, Sh_{MC} . Хотя коэффициенты линейной корреляции высокие, $r_1 = 0.76$ и $r_1 = 0.86$, соответственно, однако статистическая значимость результата низкая из-за малого числа таких событий. На рис. 4в, г то же самое показано для

Sheath перед всеми ICME, т.е. для суммы $Sh_{MC} + Sh_E$. Видно, что для суммы событий ($Sh_{MC} + Sh_E$) индекс AE не зависит от поля E_y (низкий коэффициент корреляции $r_1 = 0.33$), как и для событий Sh_E . В то же время для них наблюдается рост индекса $|Dst|$ с ростом электрического поля E_y по линейному закону (высокий коэффициент корреляции $r_1 = 0.7$).

На рис. 5а, б то же самое показано для всех событий ICME, т.е. для суммы событий MC + Ejecta. Видно, что AE индекс не зависит от электрического поля E_y (коэффициент квадратичной корреляции $r_2 = 0.47$). Аппроксимация зависимости AE индекса ломаной линией, состоящей из 2-х линейных участков: 1-й участок для $E_y < 11$ мВ/м с линией регрессии $AE = 60.9E_y + 455.0$ по 89-ти точкам; 2-й участок для $E_y > 10$ мВ/м с линией регрессии $AE = -57.5E_y + 1545.6$ по 5-ти точкам, указывает на тенденцию роста индекса AE при $E_y < 10-11$ мВ/м с последующим его спадом при увеличении $E_y > 11$ мВ/м, аналогично событиям MC. В то же время для тех же событий MC + Ejecta наблюдается линейный рост индекса $|Dst|$ с увеличением поля E_y (коэффициент линейной корреляции $r_1 = 0.78$). Для иллюстрации на рис. 5б показана также аппроксимация ломаной линией из 2-х линейных участков (серые линии): 1-й участок с $E_y < 11$ мВ/м (линия регрессии по 134-м точкам $|Dst| = 12.9E_y + 29.1$), 2-й участок с $E_y > 10.5$ мВ/м (линия регрессии по 5-и точкам $|Dst| = 0.67E_y + 198.8$). Статистика событий с $E_y > 11$ мВ/м невелика (8 событий MC + Ejecta имеют поле E_y больше 10 мВ/м), поэтому можно говорить лишь о тенденции к насыщению интен-

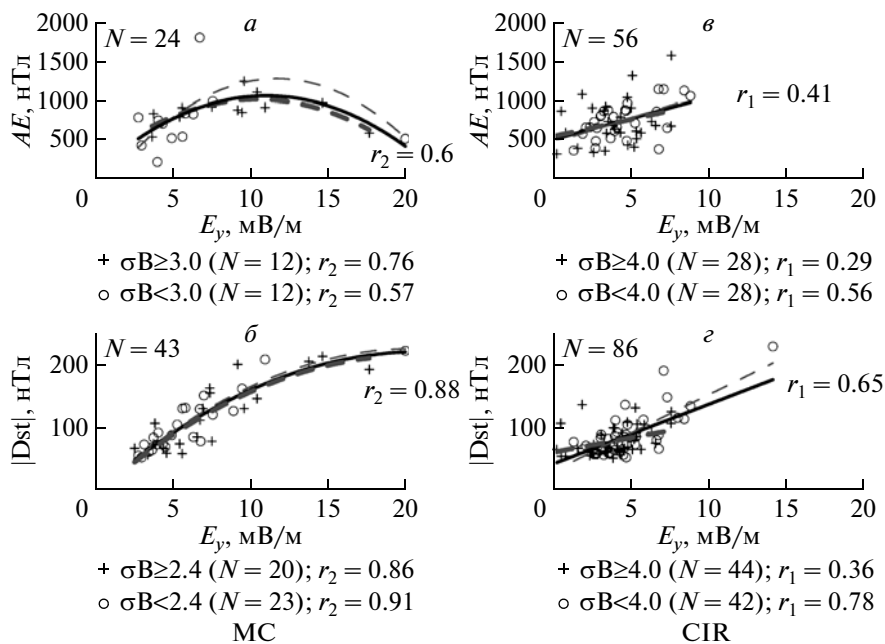


Рис. 6. То же, что на рис. 2, но разбиение точек по уровню флуктуаций σB ММП.

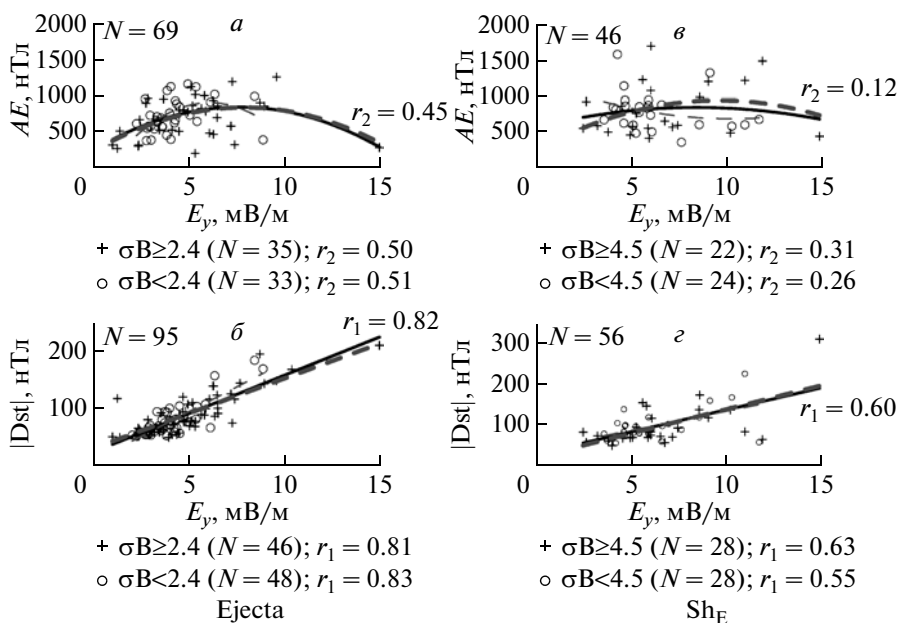


Рис. 7. То же, что на рис. 3, но разбиение точек по уровню флуктуаций σB ММП.

сивности кольцевого тока при больших электрических полях E_y . На рис. 5в, г то же самое показано для событий неопределенного типа, IND. Для этих событий величина AE индекса не зависит от поля E_y , в то время как для индекса $|Dst|$ видна линейная зависимость от электрического поля E_y с высоким коэффициентом корреляции $r_1 = 0.70$.

Для проверки возможного влияния вариаций динамического давления солнечного ветра Pd и уровня флуктуаций σB ММП на зависимость ин-

дексов от поля E_y , мы разделили каждый тип событий на 2 подгруппы в зависимости от величины Pd (кружки для низкого динамического давления $Pd < P_0$ и крестики для высокого давления $Pd \geq P_0$, где P_0 – пороговое значение динамического давления, указанное в подписи под каждым рис. 2–5), и отдельно в зависимости от величины σB ММП (кружки для слабого уровня флуктуаций $\sigma B < \sigma B_0$ и крестики для сильных флуктуаций $\sigma B \geq \sigma B_0$, где σB_0 – пороговое значение уровня флуктуаций ММП, приведенное под каждым рис. 6–9, см. ни-

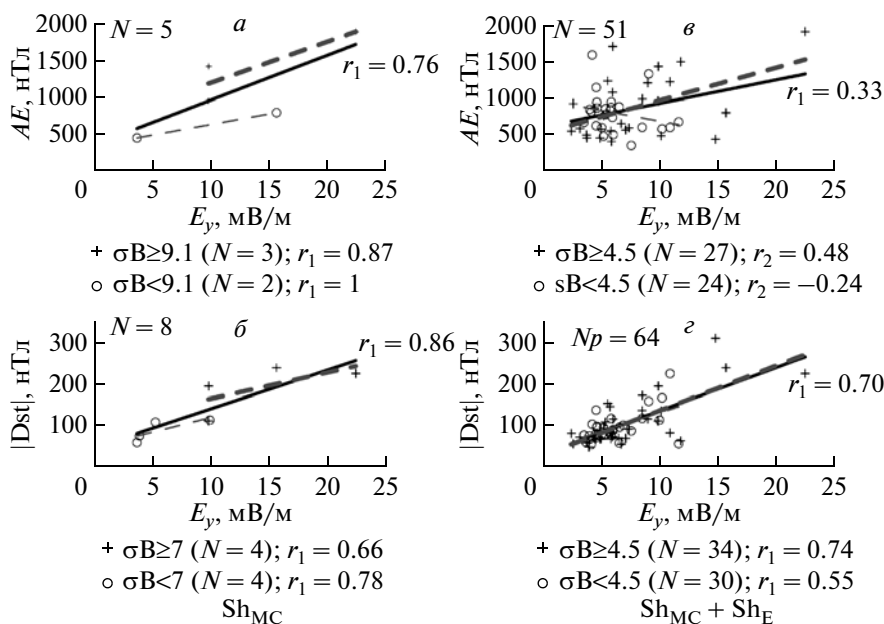


Рис. 8. То же, что на рис. 4, но разбиение точек по уровню флуктуаций σB ММП.

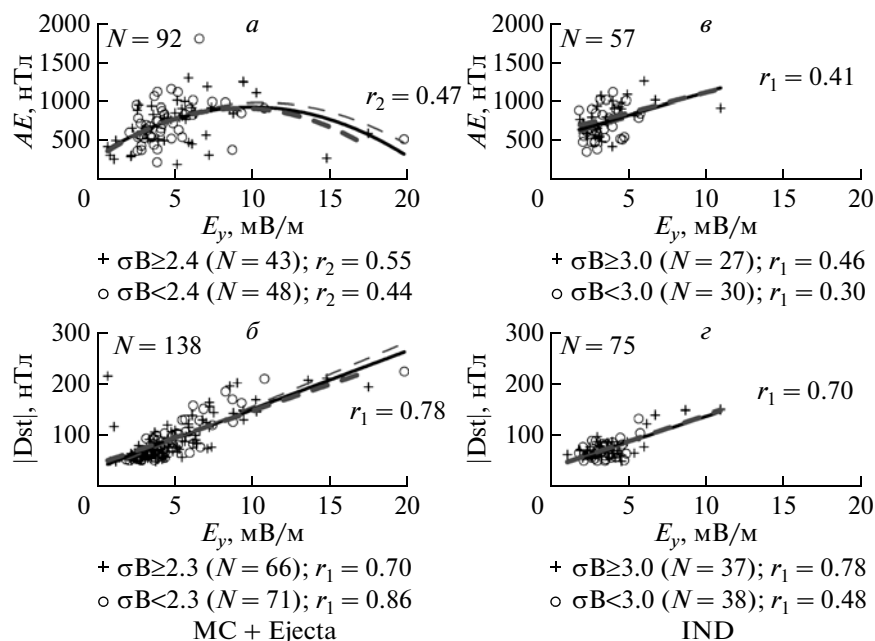


Рис. 9. То же, что на рис. 5, но разбиение точек по уровню флуктуаций σB ММП.

же). Пороговые значения P_0 и σB_0 , по которым разбивался интервал, определялись приблизительно так, чтобы количество точек в каждой подгруппе было одинаковым или различалось незначительно.

Для каждой подгруппы с высоким (крестики) и низким (кружки) давлением Pd были определены линии регрессий (для экономии места линии не показаны), а также сделаны оценки коэффициентов корреляции, величины которых приведены внизу каждого рис. 2–5. Анализ подгрупп с

разными величинами динамического давления показывает, что во-первых, почти для всех типов течений (например, MC, Sh_{MC}, Ejecta, Sh_E, MC + Ejecta, Sh_{MC} + Sh_E, IND), кроме CIR, при сильных электрических полях $E_y > 10$ мВ/м преимущественно наблюдается более высокое динамическое давление $Pd > P_0$ (ср. кружки и крестики на рис. 2–5). В то время как при более слабых полях $E_y < 10$ мВ/м наблюдаются любые значения Pd , как низкие, так и высокие. Во-вторых, для некоторых типов событий (CIR, Ejecta, Sh_E, Sh_{MC}) ко-

эффицент корреляции между индексом $|Dst|$ и полем E_y выше для подгруппы с низким давлением $Pd < P_0$, чем для подгруппы с высоким давлением $Pd > P_0$ или для всей выборки. Напротив, для других типов событий $Sh_{MC} + Sh_E$, $MC + Ejecta$, IND корреляция выше в подгруппе с высоким давлением ($Pd > P_0$).

Аналогичный анализ для каждого типа событий сделан по отдельным подгруппам с высоким $\sigma B \geq \sigma B_0$ и низким $\sigma B < \sigma B_0$ уровнем флуктуаций σB ММП. На следующих рис. 6–9 сплошные линии показывают линии регрессии для всех событий (т.е. повтор рис. 2–5), а пунктирные линии показывают линии регрессии для подгруппы с высоким $\sigma B \geq \sigma B_0$ ММП (жирный пунктир) и низким $\sigma B < \sigma B_0$ уровнем (тонкий пунктир) флуктуаций σB ММП. Визуально видно, что для событий MC , Sh_{MC} , $MC + Ejecta$, $Sh_{MC} + Sh_E$ сильные электрические поля $E_y > 10$ мВ/м сопровождаются более высоким уровнем флуктуаций. Сопоставление коэффициентов корреляций для подгрупп с разными уровнями флуктуаций σB ММП показывает, что сильные флуктуации σB ММП несколько усиливают тесноту связи между AE индексом и полем E_y для отдельных типов событий (например, MC , Sh_E , $Sh_{MC} + Sh_E$, $MC + Ejecta$, IND) и между индексом $|Dst|$ и E_y (для событий Sh_E , $Sh_{MC} + Sh_E$, IND).

Для количественной проверки высказанных предположений о возможном влиянии высокого давления ($Pd \geq P_0$) и сильных флуктуаций ($\sigma B \geq \sigma B_0$) ММП на зависимость геомагнитных индексов во время магнитных бурь от поля E_y , мы оценили отклонения от линий регрессии индексов AE и Dst для каждой из подгрупп с высоким и низким Pd , а также с высоким и низким уровнем флуктуаций σB ММП. Результаты этих расчетов и число событий в каждой из подгрупп представлены на рис. 10: (а, б, в) для $|Dst|$ индекса и (г, д, е) AE индекса.

Рис. 10б, д показывает отклонения от линии регрессии для $|Dst|$ и AE индексов для подгрупп с большими $\sigma B \geq \sigma B_0$ и малыми $\sigma B < \sigma B_0$ флуктуациями поля ММП, соответственно. Рис. 10в, е то же самое показывает для подгрупп с высоким $Pd > P_0$ и низким $Pd < P_0$ динамическим давлением, соответственно. Из анализа рис. 10 видно, что средние отклонения каждой из подгрупп от основной зависимости для обоих индексов существенно меньше, чем величина среднеквадратичного отклонения для всех типов течений, кроме событий Sh_{MC} , число которых слишком мало.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Корреляционный анализ между параметрами солнечного ветра и геомагнитными индексами проводился во многих работах [Snyder et al., 1963;

Gonzalez et al., 1998; Badruddin, 1998; Wang et al., 2003; Kane, 2005, см. также Ермолаев и др., 2007б и ссылки в ней]. Но лишь в некоторых работах учитывался тип течения солнечного ветра, вызвавшего бурю.

Полученные нами результаты подтверждают, что во время умеренных и сильных магнитных бурь главным определяющим фактором, влияющим на величину $|Dst|$ и AE индексов (т.е. главным геоэффективным параметром), является E_y компонента электрического поля, направленная с утренней на вечернюю сторону. В среднем, поле E_y может различаться для разных типов течений солнечного ветра, что определяется, как физической, так и критериями отбора для разных типов течений. Зависимость индекса $|Dst|$ от давления в каких-то типах солнечного ветра связана с прямой корреляцией между давлением и полем E_y в этих типах солнечного ветра. То есть, возможно, что индекс реально зависит только от одного независимого параметра E_y , а зависимость от давления является косвенной.

Вся полученная нами информация о зависимостях AE и $|Dst|$ индексов от электрического поля E_y , включая уравнения регрессий и коэффициенты линейной r_1 и квадратичной r_2 корреляций, для 8-ми типов геоэффективных событий солнечного ветра, представлена в таблицах 1 и 2, соответственно. Отдельной строкой (с пометкой*) в таблицах приведены результаты (линейные и квадратичные аппроксимации с коэффициентами корреляций), полученные в работе [Кершенгольц и др., 2007]. Отметим, что авторы этой работы включали в события MC все ICME и области Sheath перед ними. Тем не менее, видно сходство их аппроксимаций с нашими зависимостями $|Dst|$ от E_y для обоих типов течений CIR и MC .

Анализ корреляционных связей подтверждает, что для всех 8-ми типов течений солнечного ветра величина индекса $|Dst|$ во время магнитной бури зависит от величины электрического поля E_y : величина коэффициента корреляции значима (>0.5) и меняется между 0.6 для событий Sh_E до 0.86 для событий MC и Sh_{MC} . Поскольку число анализируемых нами событий Sh_{MC} слишком мало (5 событий, см. табл. 2), то надежность полученного для этих событий коэффициента корреляции между интенсивностью бури $|Dst|$ и электрическим полем E_y низкая, несмотря на большую величину самого коэффициента корреляции $r_1 = 0.86$. Для остальных типов течения можно предположить, что наиболее тесная связь между $|Dst|$ индексом и электрическим полем E_y наблюдается для событий ICME: для MC ($r_1 = 0.86$), поршней Ejecta ($r_1 = 0.82$) и их суммы $MC + Ejecta$ ($r_1 = 0.78$). Менее тесная связь между E_y и $|Dst|$ для всех областей сжатия, включая Sheath и CIR, и неопределенного типа IND: для всех Sheath, $Sh_E + Sh_{MC}$ ($r_1 = 0.7$),

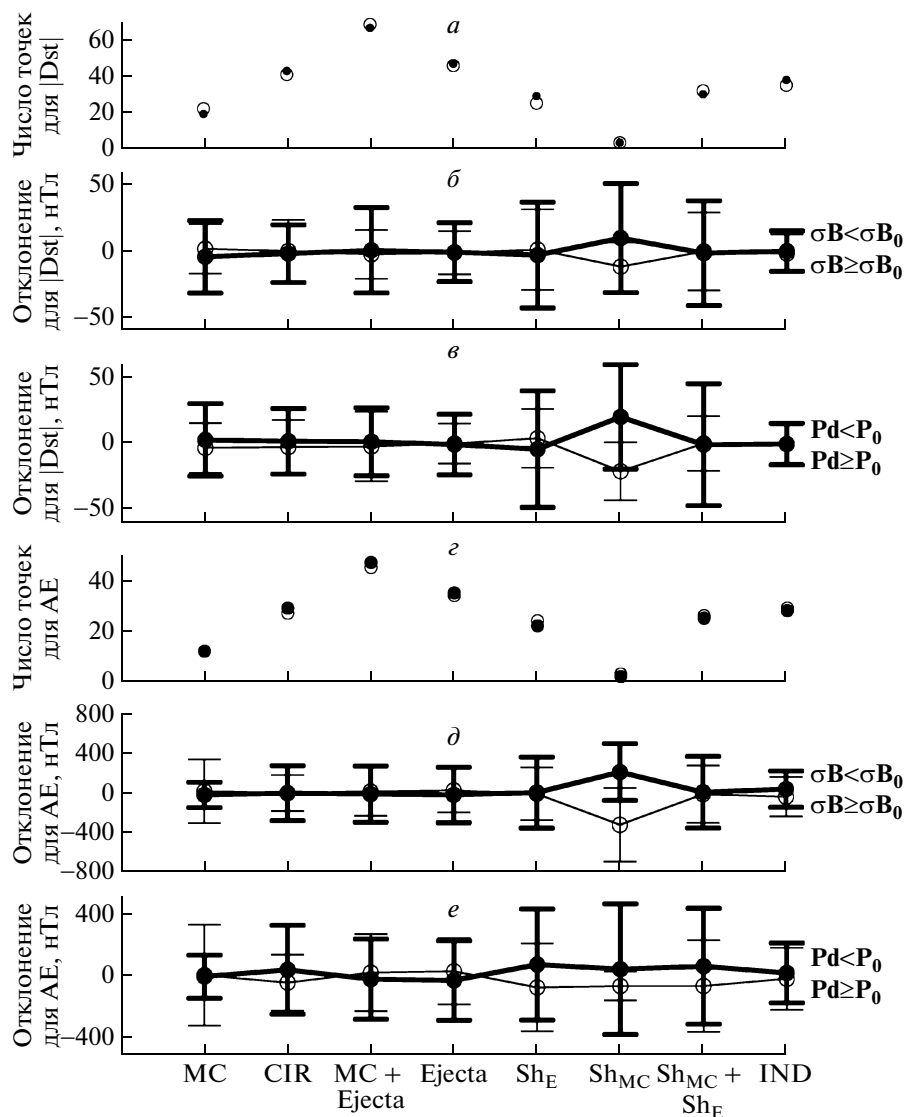


Рис. 10. Число точек и отклонение от линий регрессий для индексов $|Dst|$ (a, б, в), AE (г, д, е) для разных подгрупп событий $Pd < P_0$ (тонкая линия) и $Pd \geq P_0$ (жирная линия) (в, е), и для подгрупп событий $\sigma B < \sigma B_0$ (тонкая линия) и $\sigma B \geq \sigma B_0$ (жирная линия) (б, д). Вертикальные отрезки показывают средние квадратичные отклонения. Панели (а, г) показывают число точек в каждой подгруппе для $|Dst|$ индекса и для AE индекса, соответственно.

для неопределенного типа IND ($r_1 = 0.7$), для событий CIR ($r_1 = 0.65$) и Sh_E ($r_1 = 0.6$). Хотя различия между величинами коэффициентов корреляции незначительные, можно предположить, что наблюдаемый эффект связан с более регулярным поведением Bz (и Ey) в ICME, так как магнитная буря “обладает памятью” о предыдущих значениях Bz (и Ey) [Ермолаев и др., 2010б].

Полученные нами значения коэффициентов корреляций для отдельных типов событий согласуются с имеющимися в литературе данными. Например, в работе [Kane, 2005] рассматривалась связь между минимумом Dst индекса и электрическим полем VBs для умеренных и сильных магнитных бурь (всего 59 магнитных бурь за период

1973–2003 гг., шкала Dst от -50 до -500 нТл). В результате анализа, сделанного независимо от типа течения в солнечном ветре, был получен коэффициент корреляции, равный 0.67 [Kane, 2005], что близко к нашим значениям, полученным для областей сжатия Sheath и CIR и событий неопределенного типа.

Анализ 64-х интенсивных магнитных бурь ($Dst \leq -85$ нТл), зарегистрированных спутником ACE за период 1997–2002 гг., и сделанный независимо от типа источника в солнечном ветре, показал, что пики электрического поля Ey коррелируют с минимумом Dst индекса с коэффициентом корреляции $r = 0.87$ [Gonzalez and Echer, 2005], что близко к нашему результату, полученному для

Таблица 1. Уравнения регрессий между AE и Ey и коэффициенты линейной r_1 и квадратичной r_2 корреляций для разных типов геоэффективных событий солнечного ветра

Тип С.В.	Число точек	Уравнения регрессий	Коэф. корр. r_1	Коэф. корр. r_2
MC	24	$AE = 110.5 + 176.8Ey - 8.04Ey^2$	0.1	0.6
MC*)	35	$AE = 780.0 + 6.8Ey$ $AE = 137.7 + 186.9Ey - 7.4Ey^2$	0.4	0.7
CIR	56	$AE = 526.5 + 53.7Ey$ $AE = 610.2 + 6.56Ey + 5.3Ey^2$	0.41	0.42
CIR*)	38	$AE = 819.5 + 34.3Ey$	0.6	0.4
MC + Ejecta	92	$AE = 309.9 + 126.8Ey - 6.3Ey^2$ $AE = 646.3 + 18.3Ey$	0.20	0.47
Ejecta	69	$AE = 266.3 + 155.4Ey - 10.28Ey^2$ $AE = 612.5 + 22.3Ey$	0.19	0.45
Sh _E	46	$AE = 576.4 + 66.2Ey - 3.96Ey^2$ $AE = 785.5 + 3.87Ey$	0.03	0.12
Sh _{MC}	5	$AE = 364.8 + 60.99Ey$	0.76	
Sh _{MC} + Sh _E	51	$AE = 618.1 + 31.7Ey$ $AE = 803.4 - 13.87Ey + 2.39Ey^2$	0.33	0.38
IND	57	$AE = 545.4 + 58.4Ey$ $AE = 353.3 + 143.9Ey - 7.87Ey^2$	0.41	0.45

Примечание. Знак *) показывает, что данные на этой строке взяты из работы [Кершенгольц и др., 2007].

Таблица 2. Уравнения регрессий между $|Dst|$ и Ey и коэффициенты корреляций r_1 и r_2 для разных типов геоэффективных событий солнечного ветра

Тип С.В.	Число точек	Уравнения регрессий	Коэф. корр. r_1	Коэф. корр. r_2
MC	43	$ Dst = -2.19 + 21.45Ey - 0.51Ey^2$	0.86	0.88
MC*)	35	$ Dst = 35.78 + 11.27Ey$ $ Dst = -83.1 + 31.9Ey - 0.8Ey^2$	0.8	0.9
CIR	86	$ Dst = 66.81 - 1.29Ey + 0.96Ey^2$ $ Dst = 42.11 + 9.57Ey$	0.65	0.72
CIR*)	38	$ Dst = 31.8 + 9.8Ey$	0.7	0.5
MC + Ejecta	138	$ Dst = 30.1 + 13.4Ey - 0.12Ey^2$ $ Dst = 36.39 + 11.32Ey$	0.78	0.78
Ejecta	95	$ Dst = 25.63 + 13.39Ey$ $ Dst = 32.01 + 10.92Ey + 0.19Ey^2$	0.82	0.83
Sh _E	56	$ Dst = 30.1 + 10.8Ey$ $ Dst = 13.44 + 19.04 - 0.84Ey^2$	0.60	0.64
Sh _{MC}	8	$ Dst = 48.21 + 9.28Ey$	0.86	
Sh _{MC} + Sh _E	64	$ Dst = 33.85 + 10.32Ey$ $ Dst = 36.96 + 9.51Ey - 0.03Ey^2$	0.70	0.70
IND	75	$ Dst = 37.0 + 9.92Ey$ $ Dst = 57.19 + 0.71Ey + 0.86Ey^2$	0.70	0.73

Примечание: Знак *) показывает, что данные на этой строке взяты из работы [Кершенгольц и др., 2007].

магнитных облаков MC. В другой работе [Vivek Gupta, Badruddin, 2009] анализировались 88 интенсивных магнитных бурь $Dst < -100$ нТл (до -370 нТл) 23-го цикла солнечной активности, источником которых были 5 разных типов течений солнечного ветра. Однако зависимость Dst индекса от Ey приводится для всех мощных бурь, независимо от типа течения, являющегося источни-

ком этой бури. Эта зависимость между пиками Dst и Ey описывается линейным законом $Dst = -77.40Ey - 7.85$ с высоким коэффициентом корреляции 0.84, что тоже почти совпадает с нашими значениями, полученными для MC. Следует отметить, что около 18 событий из 88-ми имели высокое значение электрического поля $Ey > 10$ мВ/м. Однако, авторы [Vivek Gupta, Badruddin, 2009]

рассматривают только линейную связь между полем E_y и Dst индексом (не квадратичную или кусочно-линейную, как для МС у нас и в работах [Кершенгольц и др., 2007]). Возможно, что это связано с тем, что источником сильных магнитных бурь являлись не отдельные типы течения, а их “смесь”, т.е. взаимодействующие между собой ICME [Yermolaev and Yermolaev, 2008].

Связь между Dst индексом и E_y для высокоскоростных течений CIR исследуется в работах [Alves et al., 2006; Zhang et al., 2008]. Показано, что индекс Dst зависит от E_y по линейному закону $Dst = -11.1E_y - 11.3$ [Zhang et al., 2008], то есть линия регрессии близка к нашей для CIR (см. табл. 2). Коэффициент корреляции $r_1 = 0.66$, полученный в работе [Alves et al., 2006] для событий CIR, практически совпадает с нашим значением $r_1 = 0.65$ для этих событий. Также линейная зависимость между максимальным южным ММП и индексом Dst с коэффициентом корреляции $r = -0.74$ была получена для событий Ejecta вместе с областью сжатия Sheath перед ними (Ejecta + Sheath) в работе [Cane et al., 2000], что близко к значению коэффициента корреляции 0.78, полученному нами для всех ICME (МС + Ejecta). Зависимость между интенсивностью магнитной бури (минимумом Dst) и E_y компонентой электрического поля для 34-х магнитных облаков МС за период 1995–1998 исследовалась в работе [Wu and Lepping, 2002]. Авторы использовали только линейную связь между интенсивностью бури и электрическим полем внутри магнитных облаков МС, и получили коэффициент корреляции между ними, равный $r_1 = -0.79$, что несколько ниже нашего значения для МС ($r_1 = 0.86$), но почти совпадает с величиной корреляции $r = 0.78$, полученной нами для всех ICME (Ejecta + МС). Отметим, что около 5 МС имели сильное поле $E_y > 10$ мВ/м, однако, связь между параметрами описывалась только линейной зависимостью [Wu and Lepping, 2002]. Возможно, этим фактом объясняется более низкое значение коэффициента корреляции для МС по сравнению с полученным нами.

Результаты нашего анализа показывают, что для магнитных облаков МС и, возможно, всех ICME (суммы МС + Ejecta) можно предположить нелинейную зависимость интенсивности кольцевого тока $|Dst|$ от E_y компоненты электрического поля (высокие коэффициенты квадратичной корреляции для этих типов событий). А именно, при низких значениях поля $E_y < 11$ мВ/м кольцевой ток растет линейно с ростом электрического поля, но при высоких значениях поля $E_y > 11$ мВ/м, наблюдается эффект насыщения индекса $|Dst|$, когда интенсивность кольцевого тока не меняется. Подобный характер изменения индекса $|Dst|$ от E_y для магнитных облаков МС (которые включали также область сжатия перед ними, $Sh_{МС}$) был получен ранее в работах [Кершенгольц и др.,

2007; Plotnikov and Barkova, 2007]. Наши результаты для самих МС и возможно всех ICME подтверждают их вывод о поведении индексов при больших электрических полях $E_y > 12$ мВ/м. Как видно из таблиц 1 и 2, для магнитных облаков МС оба индекса AE и $|Dst|$ связаны с E_y квадратичной зависимостью, близкой к линиям регрессий в работе [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007], и с близкими коэффициентами корреляции для AE индекса $r_2 = 0.7$ (у нас: $r_2 = 0.6$) и для $|Dst|$ индекса $r_2 = 0.9$ (у нас: $r_2 = 0.88$), соответственно. Аналогично для событий CIR характерна похожая линейная зависимость индекса Dst от E_y с близкими коэффициентами корреляций $r_1 = 0.65$ против нашего значения $r_1 = 0.7$. Существенное различие между нашими результатами и авторов [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007] в отсутствии связи между индексом AE и полем E_y для событий CIR: низкий коэффициент корреляции $r_1 = 0.41$ у нас, против высокого значения $r_1 = 0.6$ в работе [Кершенгольц и др., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007]. Более того, по нашим данным почти для всех типов событий, кроме многочисленных событий $Sh_{МС}$, т.е. включая CIR, индекс AE не зависит от E_y компоненты электрического поля или эта зависимость слабая. Возможное объяснение различий в разных критериях отбора событий CIR.

Важным результатом нашей работы является обнаружение того факта, 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 . Можно предположить, что оба геомагнитных индекса не зависят от величины динамического давления и уровня флуктуаций ММП, но, возможно, они влияют на разброс точек (величину неопределенности). Для окончательного вывода необходимы дополнительные исследования.

Этот вывод частично согласуется с другими работами, в которых показано, что вклад Pd в индекс Dst уменьшается с ростом геоэффективной компоненты электрического поля E_y [O'Brien and McPherron, 2000; McPherron and O'Brien, 2001; O'Brien and McPherron 2002]. В частности, коэффициент перед динамическим давлением $b(E)$, используемый для расчета скорректированного индекса Dst^* в формуле [Burton et al., 1975], не является постоянным. Его величина уменьшается в 5 раз, когда электрическое поле E_y увеличивается от 0 до 18 мВ/м [O'Brien and McPherron, 2000; McPherron and O'Brien, 2001; O'Brien and McPherron 2002; Siscoe et al., 2005]. Следовательно, поправка в Dst , связанная с ростом динамического давления, во время главных фаз магнитных бурь, возможно, меньше, чем обычно предполагается в формуле [Burton et al., 1975; Siscoe et al., 2005], что косвенно согласуется с полученными нами ре-

зультатами. Причина этого в изменении структуры токов внутри магнитосферно-ионосферной системы. Как показывает МГД моделирование [Siscoe et al., 2002a; White et al., 2001], когда ММП имеет сильную южную компоненту и большое электрическое поле ($B_z \sim 20$ нТл, $E_y > 10$ мВ/м), токовая система Чепмана–Ферраро (Ч–Ф) заменяется системой токов зоны I. При больших электрических полях E_y с ростом давления солнечного ветра P_d растет ток зоны I [Siscoe et al., 2002b]. Фактически мы имеем 2 моды взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой: 1-я мода, когда доминирует солнечный ветер и преобладают токи Ч–Ф, и 2-я мода, когда доминирует ионосфера и преобладают токи зоны I [Vasyliunas, 2004]. Параметром, определяющим это разделение, является безразмерная величина $\mu_0 \Sigma_p V_A \varepsilon$, которая может быть больше 1 или меньше 1. Здесь Σ_p – педерсеновская проводимость ионосферы, V_A – альвеновская скорость, ε – эффективность пересоединения на магнитопаузе, определяемая, как отношение потенциала пересоединения к максимальному скачку потенциала, который может наложиться на магнитосферу солнечный ветер [Siscoe et al., 2005]. Магнитосфера проявляет оба типа взаимодействия. Большую часть времени взаимодействие с магнитосферой определяется солнечным ветром, то есть динамическим давлением. Однако во время магнитных бурь, когда велика альвеновская скорость V_A и эффективность пересоединения на магнитопаузе ε максимальна, то при взаимодействии с магнитосферой преобладает ионосферная мода, т.е. преобладают токи зоны I. То есть, когда ММП имеет сильную южную компоненту (поле $E_y > 10$ мВ/м), что происходит на пике основной фазы магнитной бури (в минимуме Dst индекса), токовая система Ч–Ф, которая увеличивает величину Dst (делает его менее отрицательным), заменяется на систему токов зоны I, которая нейтральна по отношению к величине Dst индекса [White et al., 2001; Siscoe et al., 2002a; Vasyliunas, 2004; Siscoe et al., 2005].

Подчеркнем, что исследование суббуревой активности AE во время магнитных бурь в зависимости от величины электрического поля солнечного ветра E_y для большого числа разных типов течений солнечного ветра ранее не проводилось. Результаты исследований 8-ми разных типов течений солнечного ветра показывают, что только для магнитных облаков MC и области сжатия перед ними Sh_{MC} интенсивность аврорального тока (AE индекс) зависит от величины электрического поля E_y (коэффициент корреляции >0.5). Для всех остальных типов течений солнечного ветра авроральный ток (AE индекс) не зависит от величины электрического поля E_y или эта зависимость слабая (коэффициент корреляции <0.5).

Связь между AE индексом (авроральной активностью) и B_z компонентой ММП также давно из-

вестна [Arnoldy, 1971; Meng et al., 1973; Baker et al., 1983; Weimer et al., 1990]. Статистическое сопоставление значений AE индекса с компонентой B_z ММП во время мощных геомагнитных бурь (независимо от типа источника бури) показало, что индекс AE стремится к насыщению (фиксированному значению $AE \sim 1100$ нТл) при сильных электрических полях $E_y > 10$ мВ/м [Weimer et al., 1990]. По нашим данным для событий MC индекс AE во время магнитных бурь сначала до $E_y < 11$ мВ/м монотонно растет до некоторого максимального значения $AE = 1000–1100$ нТл, что совпадает с результатом работы [Weimer et al., 1990]. Но после выхода на насыщение при дальнейшем росте поля $E_y > 11$ мВ/м мы наблюдаем спад величины AE индекса, что отличается от результата работы [Weimer et al., 1990]. Возможно, наблюдаемый нами спад AE связан с тем, что во время магнитных бурь авроральный электроджет смещается к экватору и полярные станции, используемые для определения AE индекса, не регистрируют его.

Причина насыщения AE индекса в насыщении потенциала полярной шапки из-за нелинейной природы процесса магнитосферно-ионосферной связи [Weimer et al., 1990]. Результаты моделирования магнитосферно-ионосферной связи показывают, что уровень насыщения потенциала полярной шапки понижается, когда возрастает проводимость авроральной ионосферы, вызванная диффузным высыпанием [Weimer et al., 1990].

5. ВЫВОДЫ

На основе нашего Каталога солнечного ветра, созданного по данным базы OMNI за период 1976–2000 гг., мы проанализировали зависимость геомагнитных индексов Dst и AE (интенсивности кольцевого и аврорального токов) от величины электрического поля солнечного ветра E_y , а также от динамического давления P_d и уровня магнитных флуктуаций σ_B ММП на главной фазе умеренных и сильных магнитных бурь, вызванных разными типами течений солнечного ветра: CIR, MC, Sh_{MC} , Ejecta, Sh_E , MC + Ejecta, $Sh_{MC} + Sh_E$, IND.

Были выделены 363 магнитные бури умеренной и сильной интенсивности $Dst \leq -50$ нТл, для которых был найден источник в солнечном ветре. Из них: 86 магнитных бурь вызваны областью сжатия перед высокоскоростными течениями CIR, 43 магнитные бури – магнитными облаками MC, 95 магнитных бурь были связаны с поршнями Ejecta, 138 магнитных бурь вызваны всеми событиями ICME (MC + Ejecta); 8 магнитных бурь вызваны областью сжатия перед магнитными облаками Sh_{MC} , 56 магнитных бурь – с областями сжатия перед поршнем Sh_E , 64 магнитные бури – со всеми областями сжатия Sheath перед магнитными облаками и поршнями ($Sh_{MC} + Sh_E$), и

75 магнитных бурь были связаны с событиями неопределенного типа IND.

Для каждого типа событий были получены линии регрессий и сделаны оценки коэффициентов корреляций между $|Dst|$ и AE индексами (интенсивностью кольцевого и аврорального токов) и электрическим полем E_y .

Анализ $|Dst|$ индекса на главной фазе магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности в зависимости от параметров солнечного ветра показал:

1. Для всех 8-ми типов событий наблюдается значимая линейная связь (с высокими коэффициентами корреляций $r_1 > 0.5$) между $|Dst|$ индексом и электрическим полем E_y .

2. Только для магнитных облаков MC (и, возможно, для суммы MC + Ejecta) $|Dst|$ индекс выходит на насыщение (т.е. приближается к предельному значению) при высоких значениях поля $E_y > 11$ мВ/м.

3. На фоне зависимости Dst индекса от поля E_y величина Dst индекса, по-видимому, не зависит от величины динамического давления Pd и от уровня флуктуаций σB ММП.

Анализ AE индекса на главной фазе магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности в зависимости от параметров солнечного ветра показал:

1. AE индекс не зависит от величины электрического поля E_y или эта зависимость слабая (низкий коэффициент корреляции $r < 0.5$) почти для всех течений солнечного ветра, кроме MC и Sh_{MC} .

2. Величина AE индекса увеличивается с ростом E_y по нелинейному закону (коэффициент квадратичной корреляции $r_2 = 0.6$) для событий MC и по линейному закону ($r_1 = 0.76$) для событий Sh_{MC} (5-ти событий). Можно предположить, что для MC индекс AE линейно растет с ростом поля E_y при слабых полях $E_y < 11$ мВ/м, но при сильных электрических полях $E_y > 11$ мВ/м AE индекс, возможно, выходит на насыщение и плавно уменьшается. Насыщение AE является результатом ограничения потенциала полярной шапки из-за нелинейной природы ионосферно-магнитосферного взаимодействия [Weimer et al., 1990].

3. На фоне зависимости AE индекса от поля E_y величина AE индекса не зависит от величины динамического давления Pd и от уровня флуктуаций σB ММП или эта зависимость слабая.

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, а также Программой ОФН № 15 “Плазменные процессы в солнечной системе”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: Причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 453–508. 2004.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Статистические связи между солнечными, межпланетными и геомагнитосферными возмущениями, 1976–2000 // Космич. исслед. Т. 40. № 1. С. 3–16. 2002.
- 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 гг. // 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. 1–31. 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. 461–474. 2010б.
- Кершенгольц С.З., Баркова Е.С., Плотников И.Я. Зависимость геомагнитных возмущений от экстремальных значений E_y -компоненты солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 2. С. 1–9. 2007.
- Русанов А.А., Петрукович А.А. Влияние параметров солнечного ветра на уровень флуктуаций геомагнитного поля // Космич. исслед. Т. 42. № 4. С. 368–375. 2004.
- Akasofu S.-I., Olmsted N., Smith E.J., Tsurutani B., Okida R., Baker D. Solar wind variations and geomagnetic storms: a study of individual storms based on high time resolution ISEE-3 data // J. Geophys. Res. V. 90. № A1. 1985. doi:10.1029/JA090iA01p00325, 1985.
- 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.
- Arnoldy R.L. Signature in the interplanetary medium for substorms // J. Geophys. Res. V. 76. № 22. P. 5189–5201. 1971. doi:10.1029/JA076i022p05189, 1971.
- Baker D.N., Zwickle R.D., Bame S.J., Hones E.W., Jr., Tsurutani B.T., Smith E.J., Akasofu S.-I. An ISEE 3 high time resolution study of interplanetary parameter correlations with magnetospheric activity // J. Geophys. Res. V. 88. № A8. P. 6230–6242. 1983. doi:10.1029/JA088iA08p06230, 1983.
- 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. 2003. doi:10.1029/2002JA009601, 2003.

- *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.
- *Cane H.V., Richardson I.G., Cyr O.C.St.* Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 21. P. 3591–3594. 2000.
- *Davis T.N., Sugiura M.* Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // *J. Geophys. Res.* V. 71. P. 785–803. 1966.
- *Despirak I.V., Lubchich A.A., Yahnin A.G., Kozelov B.V., Biernat H.K.* Development of substorm bulges during different solar wind structures // *Ann. Geophys.* V. 27. P. 1951–1960. 2009.
- *Dmitriev A.V., Crosby N.B., Chao J.-K.* Interplanetary sources of space weather disturbances in 1997 to 2000 // *Space Weather.* V. 3. № 3. S03001. doi:10.1029/2004SW000104. 2005.
- *Echer E., Gonzalez W.D.* Geoeffectiveness of interplanetary shocks, magnetic clouds, sector boundary crossings and their combined occurrence // *Geophys. Res. Lett.* V. 31. № 9. L09808. (doi: 10.1029/2003GL019199). 2004.
- *Echer E., Gonzalez W.D., Alves M.V.* On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures // *Space Weather.* V. 4. 2006. S06001. doi:10.1029/2005SW000200. 2006.
- *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.
- *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.
- *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., de Gonzalez A.L.C.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 88. P. 529–562. 1999.
- *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. 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. Terr. Phys.* V. 64. P. 173–181. 2002.
- *Gonzalez W.D., Echer E.* A study on the peak Dst and peak negative Bz relationship during intense geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. № 18. L18103. 2005. doi:10.1029/2005GL023486. 2005.
- *Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Schwenn R.* Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A7. 2002. doi:10.1029/2001JA900171. 2002.
- *Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J.* Importance of post-shock streams and sheath region as drivers of intense magnetospheric storms and high-latitude activity // *Ann. Geophys.* V. 22. P. 1729–1738. 2004.
- *Kane R.P.* How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? // *J. Geophys. Res.* V. 110. № A2. A02213. 2005. doi:10.1029/2004JA010799. 2005.
- *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.* 2004. V. 110. № A2. A02209. doi:10.1029/2004JA010804. 2004.
- *Lyatsky W., Tan A.* Solar wind disturbances responsible for geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A3. P. 2003. doi:10.1029/2001JA005057. 2003.
- *Maltsev Y.P.* Points of controversy in the study of magnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 110. № 3. P. 227–277. 2004.
- *McPherron R.L., O'Brien T.P.* Predicting geomagnetic activity: The Dst index // *Space Weather. Geophys. Monogr. Ser.* V. 155. Ed. by P. Song, G.L. Siscoe, and H. Singer. AGU. Washington D. C. P. 339–345. 2001.
- *McPherron R.L., Kepko L., Pulkkinen T.I., Hsu T.S., Weygand J.W., Bargatze L.F.* Changes in the response of the AL Index with solar cycle and epoch within a corotating interaction region // *Ann. Geophys.* V. 27. P. 3165–3178. 2009.
- *Meng C.I., Tsurutani D., Kawasaki K., Akasofu S.-I.* Cross-correlation analysis of the AE index and the interplanetary magnetic field Bz component // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 4. P. 617–629. 1973.
- *O'Brien T.P., McPherron R.L.* An empirical phase space analysis of ring current dynamics: solar wind control of injection and decay // *J. Geophys. Res.* V. 105. № A4. P. 7707–7719. 2000.
- *O'Brien T.P., McPherron R.L.* Seasonal and diurnal variations of Dst dynamics // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A11. 2002. doi:10.1029/2002JA009435. 2002.
- *Oh S.Y., Yi Y.* Relationships of the solar wind parameters with the magnetic storm magnitude and their association with the interplanetary // *J. of 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., Cane H.V., Cliver E.W.* Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972–2000) // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A8. 2002. doi:10.1029/2001JA000504. 2002.
- *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.
- *Russell C.T., McPherron R.L., Burton R.K.* On the cause of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 79. № 7. P. 1105–1109. 1974.
- *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. 2005. A05206, doi:10.1029/2004JA010961. 2005.
- *Siscoe G.L., Crooker N.U., Siebert K.D.* Transpolar potential saturation: roles of region 1 current system and solar wind ram pressure // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A10. 2002a. doi:10.1029/2001JA009176. 2002a.
- *Siscoe G.L., Erickson G.M., Sonnerup B.U.O., Maynard N.C., Schoendorf J.A., Siebert K.D., Weimer D.R., White W.W., Wilson G.R.* Hill model of transpolar potential saturation: Comparisons with MHD

- simulations // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A6. 2002b. doi:10.1029/2001JA000109. 2002b.
- *Siscoe G.L., McPherron R.L., Jordanova V.K.* Diminished contribution of ram pressure to Dst during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 110. A12227. 2005. doi:10.1029/2005JA011120. 2005.
- *Srivastava N., Venkatakrishnan P.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms during 1996–2002 // *J. Geophys. Res.* V. 109. № A10. A10103. doi:10.1029/2003JA010175. 2004.
- *Sugiura M.* Hourly values of equatorial Dst for the IGY // *Annals of the International Geophysical Year.* Elsevier. New York. V. 35. P. 945–948. 1964.
- *Vasyliunas V.M.* Comparative magnetospheres: lessons for Earth // *Adv. Space Res.* V. 33. 2004. doi:10.1016/j.asr.2003.04.051. 2004.
- *Vasyliunas V.M.* Reinterpreting the Burton-McPherron-Russell equation for predicting Dst // *J. Geophys. Res.* V. 111. A07S04. 2006. doi:10.1029/2005JA011440. 2006.
- *Vasyliunas V. M.* The mechanical advantage of the magnetosphere: solar-wind-related forces in the magnetosphere-ionosphere-Earth system // *Ann. Geophys.* V. 25. P. 255–269. 2007.
- *Veira L.E.A., Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T.* Storm-intensity criteria for several classes of the driving interplanetary structures // *Sol. Phys.* V. 223. № 1–2. P. 245–258. 2004. (doi: 10.1007/s11207-004-1163-2). 2004.
- *Vennerstroem S.* Interplanetary sources of magnetic storms: a statistical study // *J. Geophys. Res.* V. 106. № A12. P. 29175–29184. 2001.
- *Vivek Gupta, Badruddin.* Interplanetary structures and solar wind behaviour during major geomagnetic perturbations // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 71. P. 885–896. 2009.
- *Weimer D.R., Reinleitner L.A., Kan J.R., Zhu L., Akasofu S.-I.* Saturation of the auroral electrojet current and the polar cap potential // *J. Geophys. Res.* V. 95. № A11. P. 18981–18987. 1990.
- *White W.W., Schoendorf J.A., Siebert K.D., Maynard N.C., Weimer D.R., Wilson G.L., Sonnerup B.U.Ö., Siscoe G.L., Erickson G.M.* MHD simulation of magnetospheric transport at the mesoscale // *Space Weather. Geophys. Monogr. Ser.* V. 125. ed. by P. Song, H.J. Singer, and G.L. Siscoe. AGU. Washington D.C. P. 229–240. 2001.
- *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.
- *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Sauvaud J.-A.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: A review // *Planet. Space Sci.* V. 53. № 1–3. P. 189–196. 2005a.
- *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Nikolaeva N.S.* Comparison of interplanetary and magnetospheric conditions for CIR-induced and ICME-induced magnetic storms // *EGU. Geophys. Res. Abstr.* V. 7. (№ 01064). 2005b.
- *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu.* Comment on “Interplanetary origin of intense geomagnetic storms (Dst < –100 nT) during solar cycle 23” by W.D. Gonzalez et al. // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L01101. 2008. doi:10.1029/2007GL030281. 2008.
- *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.
- *Zhang Y., Sun W., Feng X.S., Deehr C.S., Fry C.D., Dryer M.* Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23 // *J. Geophys. Res.* V. 113. 2008. A08106, doi:10.1029/2008JA013095. 2008.
- *Zhu D., Billings S.A., Balikhin M., Wing S., Coca D.* Data derived continuous time model for the Dst dynamics // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. 2006. L04101, doi:10.1029/2005GL025022. 2006.