

УДК 523.745:550.386

ВЛИЯНИЕ РЕЗКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА КОНВЕКЦИЮ В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ

© 2004 г. Р. Ю. Лукьянова

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, С.-Петербург

e-mail: renata@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 19.12.2003 г.

После доработки 21.06.2004 г.

Внезапное изменение динамического давления солнечного ветра (P_{SW}) вызывает существенное усиление конвекции. Этот процесс ясно виден в вариациях РС-индекса, который определяется транспортным ионосферным током и часто используется для оценки межпланетного электрического поля (E_M), проникающего в магнитосферу из солнечного ветра. Вследствие влияния импульсов P_{SW} нарушается линейная зависимость между величиной E_M и РС-индексом во время магнитных бурь. Ионосферное электрическое поле достигает экстремально больших значений. Кроме того, внезапное изменение P_{SW} вызывает быструю перестройку системы конвекции. Приводятся результаты численного моделирования распределения электрического потенциала в ионосфере полярной шапки в моменты до, во время и после прохождения фронта высокого P_{SW} .

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что вертикальная компонента межпланетного магнитного поля (ММП) является основным параметром, определяющим интенсивность магнитосферной конвекции. В значительно меньшей степени исследовано влияние динамического давления солнечного ветра (P_{SW}) на конвекцию. Сжатие/растяжение магнитосферы под действием резкого изменения P_{SW} является одним из глобальных процессов взаимодействия солнечного ветра (СВ) с магнитосферой Земли, источником возмущений как в магнитосфере, так и в ионосфере. Когда фронт повышенного давления достигает магнитопаузы, достаточно нескольких минут, чтобы усилились токи во всей магнитосферно-ионосферной системе, включая ток в хвосте, продольный ток и ионосферный ток. В работе [Zesta и др., 2000] показано, что во время прохождения импульса P_{SW} в главную фазу магнитной бури 10 января 1997 г., наблюдалось расширение аврорального овала и усиление тока в авроральной зоне, связанное с усилением продольного тока зоны 1. При резком повышении P_{SW} и южной ориентации ММП магнитный эффект продольного тока обнаруживается на дневной стороне в весьма низких широтах. В работе [Lyons и др., 2000], указывается на принципиальное отличие процессов, связанных с реакцией магнитосферы на импульс P_{SW} и процессов развития суббури, в частности на то, что суббуревые возмущения локализованы, тогда как P_{SW} вызывает возмущения во всех MLT-секторах.

Кратковременные импульсы P_{SW} искажают форму магнитопаузы локально. В ионосфере этот

процесс отображается в виде серии вихрей эквивалентных ионосферных токов, перемещающихся от полуденного меридиана на утреннюю или вечернюю сторону [Friis-Christensen и др., 1988]. Большие импульсы (длительностью 0.5–1 ч) либо скачкообразные изменения P_{SW} вызывают резкие изменения геомагнитного поля, регистрируемые по всему земному шару. Сжатие магнитосферы, сопровождающееся усилением DCF-тока на магнитопаузе, ведет к росту H -компоненты, особенно заметному на низкоширотных магнитограммах. Анализ вариаций геомагнитного поля, связанных с внезапным импульсом (SI) или внезапным началом (SC), показал, что росту H -компоненты часто предшествует краткий предварительный импульс (PI), который вызывается продольным током, связанным с альвеновской волной. Главный импульс есть проявление усиления электрического поля в сжатой магнитосфере [Araki, 1994]. В большинстве ранее опубликованных работ основное внимание уделялось эффектам SI/SC , наблюдаемым в низких и средних широтах. Реакция ионосферы полярной шапки рассматривалась в работе [Moretto и др., 2000]. С помощью АМIE процедуры, основанной на обработке большого массива наземных и спутниковых данных, были построены картины конвекции для SI события. Результаты продемонстрировали, что отклик системы конвекции на приход фронта высокого P_{SW} на фоне северного ММП состоит из двух фаз. Сначала развивается двухвихревая система, противоположная по знаку DP2. Спустя несколько минут электрическое поле меняет знак, и возникают две ячейки конвекции с течением плазмы вдоль полуденного мери-

диана в антисолнечном направлении, соответствующие DP2-системе.

В данной работе исследуется реакция системы высокоширотной ионосферной конвекции на резкие изменения P_{SW} . Представлены результаты анализа поведения PC-индекса, который определяется величиной трансполярного тока. Вариации индекса сопоставлены с измерениями и результатами численного моделирования электрического поля в полярной шапке.

2. ОПИСАНИЕ PC-ИНДЕКСА

Fairfield (1967) ввел определение индекса полярной шапки как максимума вариации горизонтальной компоненты магнитного поля на околополюсных станциях. [Troshichev and Andrezen, 1985] предложили PC-индекс магнитной активности, рассчитываемый регулярно по данным одной приполюсной станции: Восток (-83.4°) и Туле (86.5°). Вариация горизонтальной компоненты δF пропорциональна интенсивности трансполярной части DP2-тока, связанного с двухвихревой системой конвекции в ионосфере. Таким образом, PC-индекс можно рассматривать как показатель величины электрического поля, генерируемого при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой. Было показано, что δF хорошо коррелирует с межпланетным электрическим полем (E_M), проникающим в магнитосферу при ее взаимодействии с солнечным ветром [Kan и Lee, 1979]:

$$E_M = v(B_y^2 + B_z^2)^{1/2} \sin^2(\theta/2), \quad (1)$$

где v – скорость солнечного ветра, B_z и B_y – вертикальная и азимутальная компоненты ММП, θ – угол между направлением вектора магнитного поля Земли и полным вектором ММП. Учитывая линейную зависимость между δF и E_M , PC-индекс был определен как безразмерная величина, калиброванная по межпланетному электрическому полю. Вариации PC-индекса, в целом, следуют вариациям E_M . Индекс часто используется для оценки энергии, поступающей в магнитосферу. Поскольку точка наблюдения всегда располагается под областью трансполярной части ионосферной системы DP2, индекс положителен при южной ориентации ММП, а также при $B_z = 0$, когда существует стабильная двухвихревая система DP2. Система конвекции, определяемая действием B_y -компоненты ММП, содержит один вихрь вокруг магнитного полюса, а трансполярный ток комбинационной (B_z и B_y) системы направлен к Солнцу; при этом индекс также положителен. В периоды северной ориентации ММП трансполярный ток направлен от Солнца, следовательно, $PC \leq 0$. Результаты статистического анализа показывают, что PC-индекс достаточно хорошо коррелирует с такими параметрами, как интенсивность

аврорального электроджета, разность потенциалов и диаметр полярной шапки, электрическое поле в приполюсной области [Troshichev и др., 2001]. PC-индекс размещается на сайте Датского метеорологического института (северный PC-индекс, рассчитываемый по магнитным данным обс. Туле) и Арктического и антарктического института (южный PC-индекс – по данным обс. Восток). В связи с некоторыми отличиями в способах вычисления, пиковые значения южного индекса могут превышать значения индекса, рассчитанного по данным обс. Туле [Lukianova и др., 2002]. Однако, при отклике на скачки P_{SW} оба индекса изменяются согласовано.

3. ОТКЛИК PC-ИНДЕКСА НА ИМПУЛЬС P_{SW}

Детальное сравнение изменений параметров ММП и СВ и вариаций PC-индекса показывают, что PC-индекс весьма чувствителен к внезапным изменениям в P_{SW} . Так, в периоды стабильного ММП индекс следует за ростом и падением P_{SW} . Отклик PC-индекса начинается одновременно с моментом контакта фронта давления с дневной магнитопаузой. Достаточно большая база данных по 1-мин значениям PC-индекса (с 1977 г. по обс. Туле и с 1996 г. по обс. Востоку) позволяет найти ряд типичных примеров реакции индекса на импульс P_{SW} . Ниже рассмотрено четыре показательных события, когда импульс P_{SW} происходил при стабильном южном (магнитная буря 10 января 1997 г. и 14 октября 2000 г.) и северном ММП (события 6 сентября 2000 г. и 29 декабря 2011 г.).

Событие 10 января 1997 г. На рис. 1а представлено (сверху вниз): B_z и B_y компоненты ММП по данным спутника WIND; величины E_M и P_{SW} , рассчитанные по (1) и (2), соответственно; PC-индекс по данным обс. Туле и Восток; AE-индекс. Около 5 UT B_z -компонента ММП поворачивает на юг и остается отрицательной (≈ -10 нТл) в течение 6 ч. Величина E_M , составляющая ~ 5 мВ/м, также стабильна в течение этого времени. Во время главной фазы магнитной бури, характеризующейся общим падением $D_{st} = -200$ нТл, в период 10.50–11.20 UT наблюдается импульс P_{SW} с повышением давления с 2 до 6 нПа. Соответствующая вариация PC-индекса, наблюдаемая в 11.00–11.20 UT, в точности совпадает с формой импульса P_{SW} . Под действием повышенного P_{SW} PC-индекс увеличивается с 2 до 13 (южный) и с 2 до 8 (северный). Одновременно наблюдается резкое увеличение AE-индекса с 200 до 2000 нТл, что свидетельствует о значительной интенсификации авроральной части системы высокоширотных ионосферных токов.

Событие 14 октября 2000 г. На рис. 1б представлено (сверху вниз): B_z и B_y компоненты ММП по измерениям спутника ACE в точке L1; величины E_M и P_{SW} ; PC- и AE-индексы. B_z -компонента ММП отрицательна (-12 нТл), а B_y -компонента

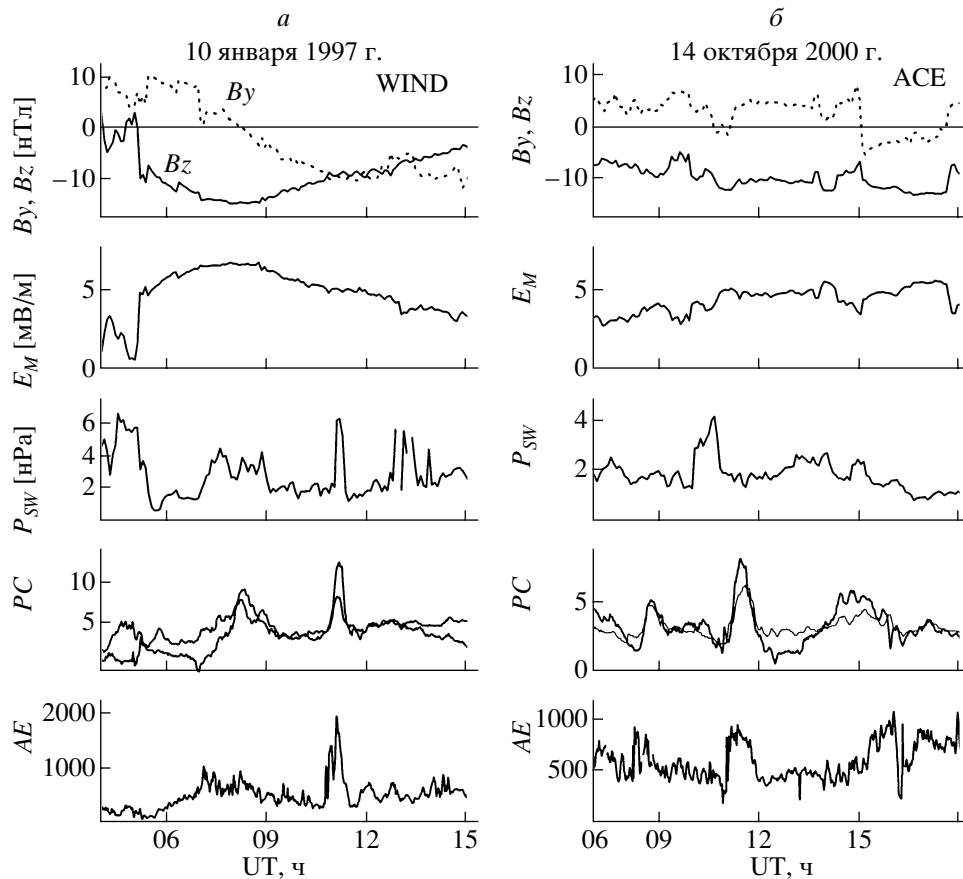


Рис. 1. (сверху вниз) Межпланетное магнитное поле, межпланетное электрическое поле, динамическое давление солнечного ветра, PC -индекс по данным обс. Туле и Восток, AE -индекс для 10 января 1997 г. (а) и 14 октября 2000 г. (б).

положительна в течение всего рассматриваемого периода с 6 до 15 UT. Величина E_M равна ~ 5 мВ/м. Повышение P_{SW} с 1 до 5 нПа, наблюдаемое в 9.05–9.45 UT, вызывает увеличение PC -индекса с 2 до 8 в 10.00–10.40 UT, форма вариации которого совпадает с формой импульса P_{SW} . Подобной же формы вариация видна в AE -индексе. Время распространения структуры СВ от точки $L1$ до магнитопаузы составляет 55 мин. Время начала роста PC - и AE -индексах соответствует моменту достижения фронтом P_{SW} подсолнечной точки дневной магнитопаузы.

Событие 6 сентября 2000 г. Это событие, классифицируемое как внезапный импульс (SI), иллюстрирует отклик PC -индекса на резкое увеличение P_{SW} при северной ориентации ММП. На рис. 2а, который скомпонован подобно рис. 1а, представлены: Bz - и B_y -компоненты ММП, величины E_M и P_{SW} , PC - и AE -индексы с 14 до 19 UT. $Bz \approx 5$ нТл в течение нескольких часов, что определяет низкий уровень $E_M \approx 0.5$ мВ/м. В 16.20 UT P_{SW} резко возрастает с 2 до 15 нПа, а PC -индекс повышается с 0 до 7 в 17.0–17.40 UT (время распространения структуры СВ от точки $L1$ до магнитопаузы составляет 50 мин). Особенностью поведения PC -

индекса является краткий выброс противоположного направления (17.06–17.09 UT), предшествующий основному повышению. Выброс наблюдается и в AE -индексе. Это явление, связанное с быстрой перестройкой конвекции, будет более подробно рассмотрено ниже.

Событие 29 декабря 2001 г. Данное SI событие также иллюстрирует отклик PC -индекса на резкое увеличение P_{SW} при северной ориентации ММП. Из рис. 2б (сверху вниз) можно видеть, что Bz -компонента ММП положительна (>5 нТл), E_M мало (<0.5 мВ/м), а его флуктуации незначительны. В 05 UT наблюдается скачкообразный рост P_{SW} с 2 до 20 нПа. Скачок P_{SW} вызывает повышение PC -индекса с 0 до 3 в период с 5.40 до 6.00 UT. В это же время AE -индекс также резко растет с 0 до 200 нТл.

Приведенные примеры демонстрируют усиление как трансполярной, так и авроральной частей токовой системы DP2. Значительная интенсификация DP2-тока, отражающая соответствующее усиление конвекции, не связана с увеличением межпланетного электрического поля (южной компоненты ММП). В данном случае усиление конвекции вызвано прохождением фронта повышен-

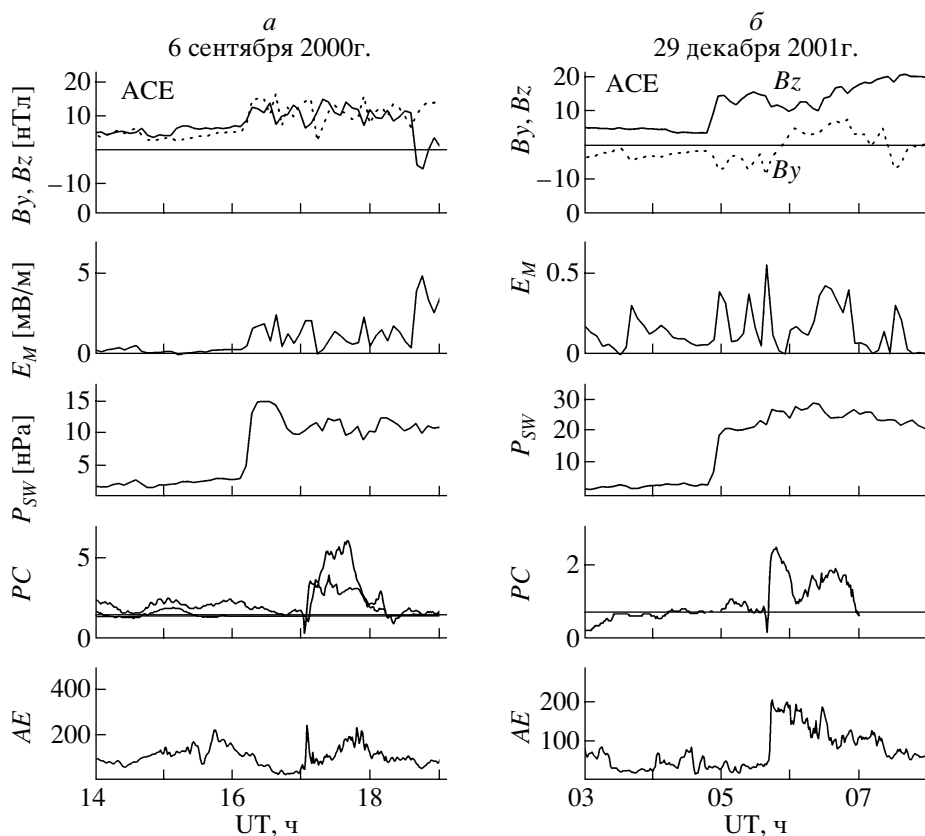


Рис. 2. То же для 6 сентября 2000 г. (а) и 29 декабря 2001 г. (б).

ного P_{SW} вдоль магнитопаузы от подсолнечной точки к хвосту, которое является причиной усиления электрического поля и продольных токов зоны 1.

4. СВЯЗЬ PC -ИНДЕКСА С МЕЖПЛАНЕТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ

Столкновение магнитосферы с межпланетным облаком, как правило, сопровождается развитием магнитной бури. ММП, скорость и плотность СВ в облаке резко изменяются в широких пределах и могут варьироваться независимо друг от друга. На переднем фронте облака обычно наблюдается одновременный скачок ММП и P_{SW} однако, один из параметров часто доминирует. Примером такого рода является магнитная буря 15 июля 2000 г. На рис. 3 (сверху вниз) представлены следующие параметры, характеризующие эту бурю: PC -индекс, E_M и P_{SW} , рассчитанные по данным спутника ACE. Из рис. 3 видно, что фронт P_{SW} пересек орбиту Земли на один час раньше, чем фронт повышенного E_M . Первое увеличение PC -индекса до 33 в 15 UT связано с откликом на резкий рост P_{SW} до 60 нПа, тогда как E_M остается низким. Второе увеличение PC до 31 в 20.30 UT свя-

зано с ростом E_M до 55 мВ/м, тогда как P_{SW} в это время уже снизилось в несколько раз. В соответствии с определением PC -индекса, приведенном в разделе 2, следовало бы ожидать линейной связи между индексом и межпланетным электрическим полем E_M . Однако, в рассмотренном примере PC -индекс достигает пиковых значений как при высоком, так и при низком уровне E_M , что в последнем случае обусловлено именно действием импульса P_{SW} . Для данной магнитной бури на рис. 4 представлена статистическая зависимость между значениями PC -индекса и E_M за полные сутки 15 июля. Использовались усредненные пятиминутные значения. Учтено временное смещение отклика на Земле на 35 мин, равное времени перемещения структуры СВ от точки $L1$ до магнитопаузы. Из рис. 4 видно отсутствие корреляции между PC -индексом и E_M в ходе бури. Такое же явление наблюдалось в других магнитных бурях, вызванных межпланетными облаками с резкими изменениями параметров СВ, особенно плотности СВ. Импульсы P_{SW} , приходящие на фоне низкого E_M , являлись причиной соответствующих повышений PC -индекса.

Периоды высокой магнитной активности 1998, 2000 и 2001 гг., когда PC -индекс достигал достаточно больших значений ($PC > 10$), перечислены

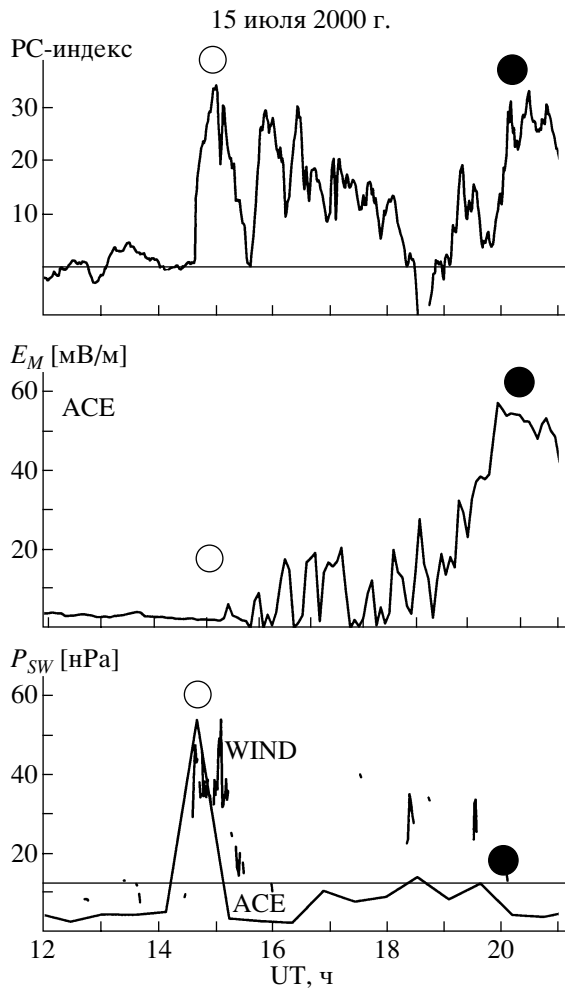


Рис. 3. (сверху вниз) PC -индекс, межпланетное электрическое поле E_M , динамическое давление солнечного ветра P_{SW} для 15 июля 2000 г.

в таблице. Для выявления роли P_{SW} связь между значениями PC и E_M была проанализирована следующим образом. Для каждого события выбирались два момента времени: момент максимального P_{SW} и момент максимального E_M . Как пример, на графиках рис. 3 первый момент обозначен белыми кружками, второй – черными. Таким образом, для каждого события получена пара точек, соответствующая пиковым значениям параметров. На рис. 5 представлена зависимость между E_M и PC -индексом для всех событий, перечисленных в таблице: белые точки соответствуют отклику PC -индекса на максимальное P_{SW} , черные точки – отклику на максимальное E_M . Пары точек для двух магнитных бурь 15 июля 2000 г. и 25 сентября 1998 г., соединенные штриховой линией – два показательных примера того, что импульс P_{SW} ведет к увеличению PC -индекса в такой же степени, что и рост E_M . На рис. 5 жирная линия представляет линейную зависимость между E_M и

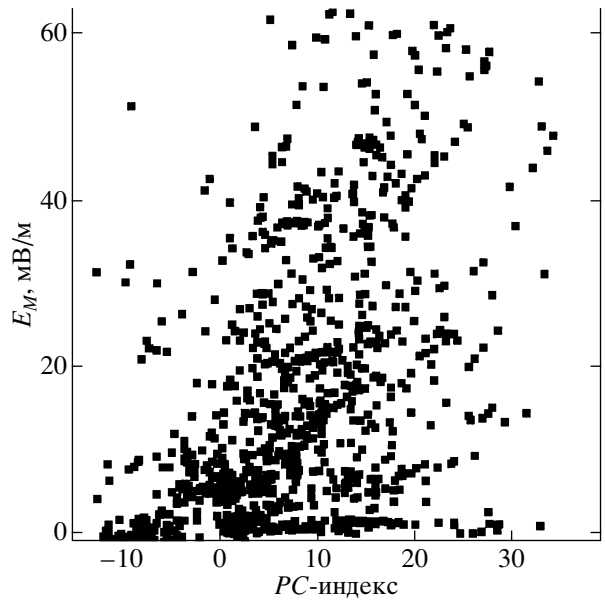


Рис. 4. Статистическая зависимость между PC -индексом и E_M в ходе магнитной бури 15 июля 2000 г.

PC , полученную в работе [Troshichev и Andrezen, 1985]. В этой работе суббуревые периоды были исключены из рассмотрения, поэтому PC не превышает 5. Из статистической зависимости, представленной на рис. 5, можно сделать вывод, что в ходе магнитной бури наблюдается нарушение линейной связи между межпланетным электрическим полем, которое определяет электромагнитную энергию, поступающую в магнитосферу из солнечного ветра, и интенсивностью конвекции, которая определяет величину PC -индекса. Очевидно, конвекция резко усиливается под действием изменения P_{SW} . Этот эффект накладывается на эффект, обусловленный влиянием ММП. Степень усиления конвекции зависит от знака и величины ММП, на фоне которого происходит изменение P_{SW} . На рис. 6 для скачков P_{SW} , происшедших в 2000–2001 гг., представлена зависимость между пиковыми значениями P_{SW} и соответству-

Периоды прохождения межпланетных облаков

1998	2000	2001
10 марта	6 апреля	31 марта
3 мая	23–24 мая	11 апреля
29 мая	8 июня	18 апреля
6 августа	23 июля	28 апреля
26–27 августа	15 июля	17 августа
24–25 сентября	17–18 сентября	6 ноября
8 ноября	28 октября	24 ноября
13 ноября	10 ноября	

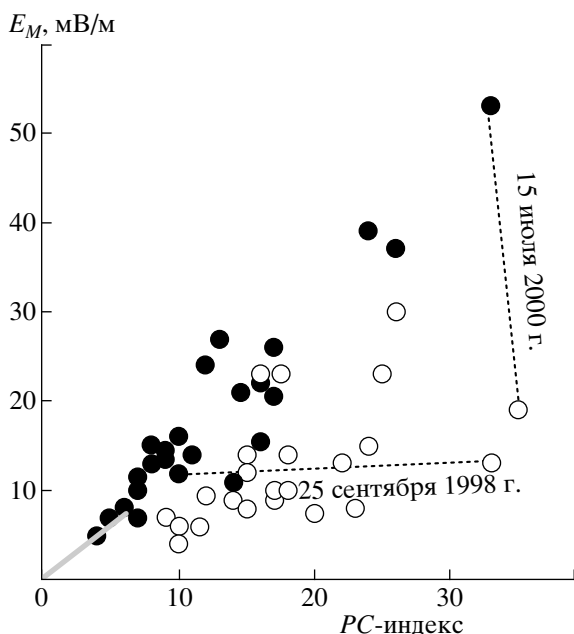


Рис. 5. Зависимость между E_M и пиковыми значениями PC -индекса, которые определяются либо импульсами P_{SW} (светлые точки), либо и максимальными значениями межпланетного электрического поля (черные точки).

ющими значениями PC -индекса (исключены события 15.07.2000 и 31.03.2001, когда P_{SW} было экстремально высоким). Из рис. 6 можно видеть, что однозначная связь между P_{SW} и PC отсутствует, однако, повышение PC при условии $B_z < 0$ значительно больше, чем повышение при $B_z > 0$.

5. ИОНОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Усиление ионосферного электрического поля под влиянием резкого изменения P_{SW} также свидетельствует о более интенсивной конвекции. Данные измерений скорости дрейфа плазмы спутниками DMSP и рассчитанного по ним электрического потенциала (данные предоставлены д-ром F. Rich, Air Force Research Lab., USA) позволяют провести оценку ионосферного электрического поля в полярной шапке и сравнить его с PC -индексом, обращая особое внимание на моменты прохождения импульсов P_{SW} . Сравнение может быть проведено для некоторых периодов, относящихся к магнитным бурям 2000 г. Были отобраны 92 траектории, когда спутник, пересекая широту $Mlat = 85^\circ$ в северном и южном полушарии в направлении утро–вечер, попадал в полосу 04–08 и 16–20 MLT. Как правило, эти траектории проходили через две ячейки конвекции так, что наблюдалось изменение знака электрического потенциала. Напряженность электрического поля вычислялась как разность потенциалов в точках входа и

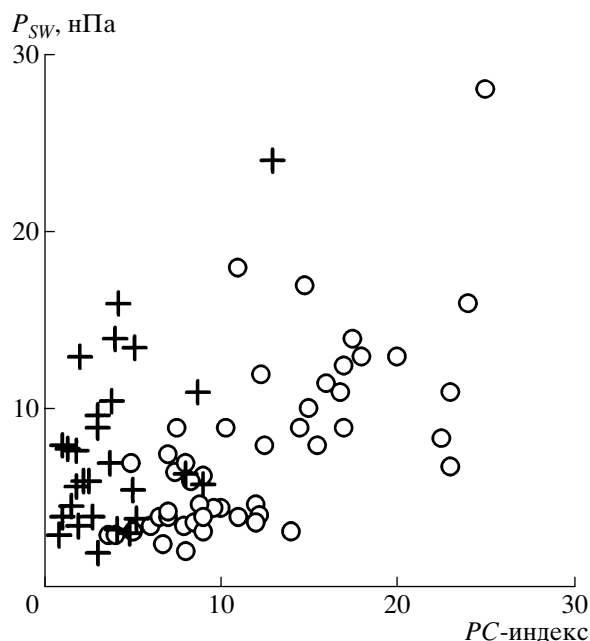


Рис. 6. Статистическая зависимость между PC -индексом и ионосферным электрическим полем по данным спутника DMSP. Точки, соответствующие пролетам при прохождении импульсов P_{SW} , обведены рамкой.

выхода из $Mlat = 85^\circ$, деленная на длину соответствующего отрезка траектории. На рис. 7 представлена статистическая зависимость между ионосферным электрическим полем и PC -индексом. В спокойных условиях величина электрического поля (E_I) не превышает 10 мВ/м; при высоком уровне магнитной активности E_I возрастает до нескольких десятков мВ/м. В целом зависимость между PC -индексом и E_I может быть аппроксими-

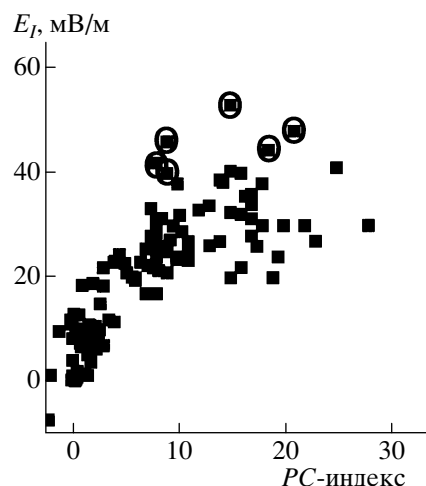


Рис. 7. Статистическая зависимость между PC -индексом и пиковыми значениями импульсов P_{SW} в 2000–2001 гг. при $B_z > 0$ (крестики) и $B_z < 0$ (точки).

рована квадратичным полиномом, что находится в согласии с работой [Troshichev и др., 2001]. Однако, при больших значениях E_I и PC наблюдается значительный разброс точек. Траектории были проанализированы с целью выделить измерения E_I в периоды прохождения импульсов P_{SW} . Среди общего числа пролетов удалось выделить шесть, а именно, 6 апреля (16–20 UT) и 15 июля (14–16 UT). Этим пролетам соответствуют точки, отмеченные на рис. 7 черной рамкой. Видно, что наибольшие значения электрического поля, превышающие 40 мВ/м, наблюдаются именно в периоды повышенного P_{SW} . В литературе представлены противоречивые результаты по вопросу о “насыщении” разности потенциалов полярной шапки (Φ_{PC}). Так, в [Wugant и др., 1983] показано, что асимптота Φ_{PC} равна ~ 120 кВ. Авторы работы [Boyle и др., 1997], использовавшие большую базу данных спутника DMSP, отрицали наличие “насыщения”. В работе [Nagatsuma, 2002] отмечалось, что PC -индекс иногда растет значительно быстрее, чем соответствующее межпланетное электрическое поле, однако причины этого явления не рассматривались. Результаты данной работы показывают, что под действием импульса P_{SW} одновременно увеличиваются как E_I , так и ионосферный ток. Зависимость между PC -индексом и E_I приближается к линейной или, по крайней мере, отсутствует асимптота E_I при больших значениях PC , что требовало бы объяснения появления повышенной проводимости в полярной шапке. Такое повышение вполне вероятно вследствие воздействия высокоэнергичных солнечных протонов, вызывающих поглощение в полярной шапке (ППШ), однако, известно, что не все бури сопровождаются ППШ (например, событие 25 сентября 1998 г.). В дальнейшем выводы предполагается подтвердить на большем статистическом материале.

6. ПОВЕДЕНИЕ PC -ИНДЕКСА КАК ИНДИКАТОР РЕКОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ КОНВЕКЦИИ

При резком повышении P_{SW} основному увеличению PC -индекса, отражающему усиление конвекции, часто непосредственно предшествует краткий отрицательный выброс, соответствующий трансполярному току антисолнечного направления. Резкое падение P_{SW} вызывает положительный выброс. Проиллюстрируем это на примере событий SC , SI и события понижения P_{SW} .

Событие 6 апреля 2000 г. Внезапное начало магнитной бури (SC), которая произошла на максимуме 23-го солнечного цикла, демонстрирует “двухфазный” отклик на приход фронта повышенного P_{SW} . На рис. 8 представлено (сверху вниз): B_z -, B_y -компоненты ММП и P_{SW} по данным спутника ACE; PC -, AE - и $HSYM$ -индексы. Изменения всех параметров даны без временного сдвига относи-

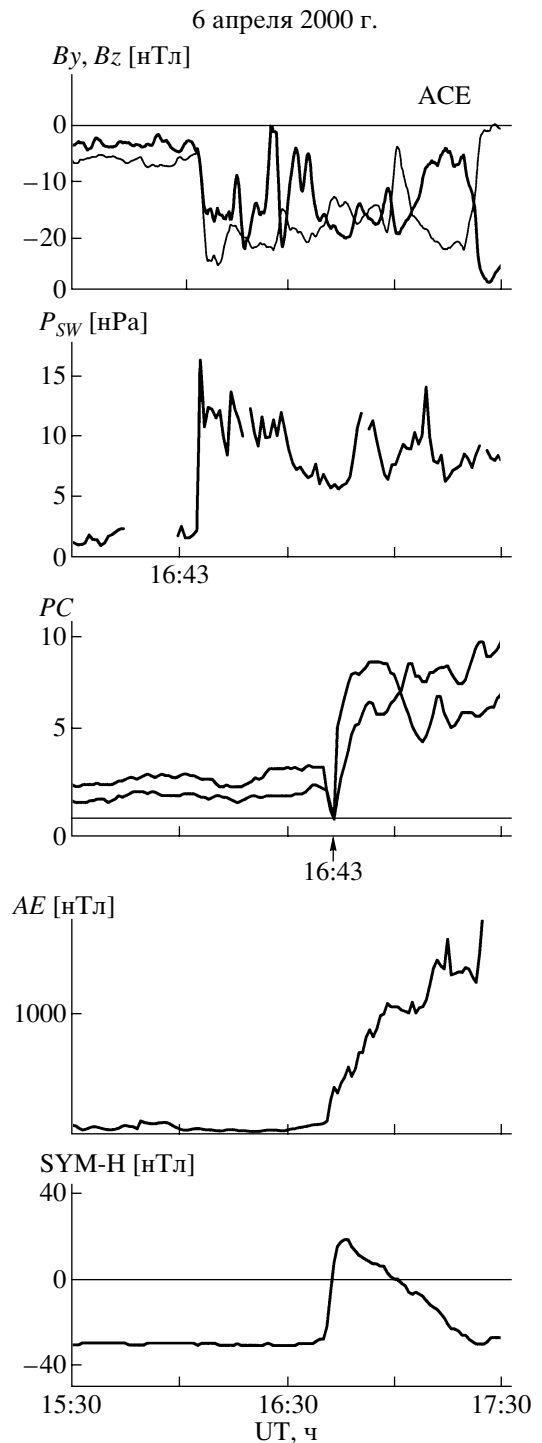


Рис. 8. Изменение B_z - и B_y -компонент ММП, P_{SW} и соответствующие изменения индексов геомагнитной активности: PC , AE и $HSYM$ для SC события 6 апреля 2000 г.

тельно друг друга. Расчетное время движения структуры СВ от точки $L1$ до подсолнечной магнитопаузы составляет ~ 40 мин, что соответствует началу сжатия в 16.40 UT. Приблизительно с 15 UT ММП имело южное направление ($B_z \approx -3$ нТл).

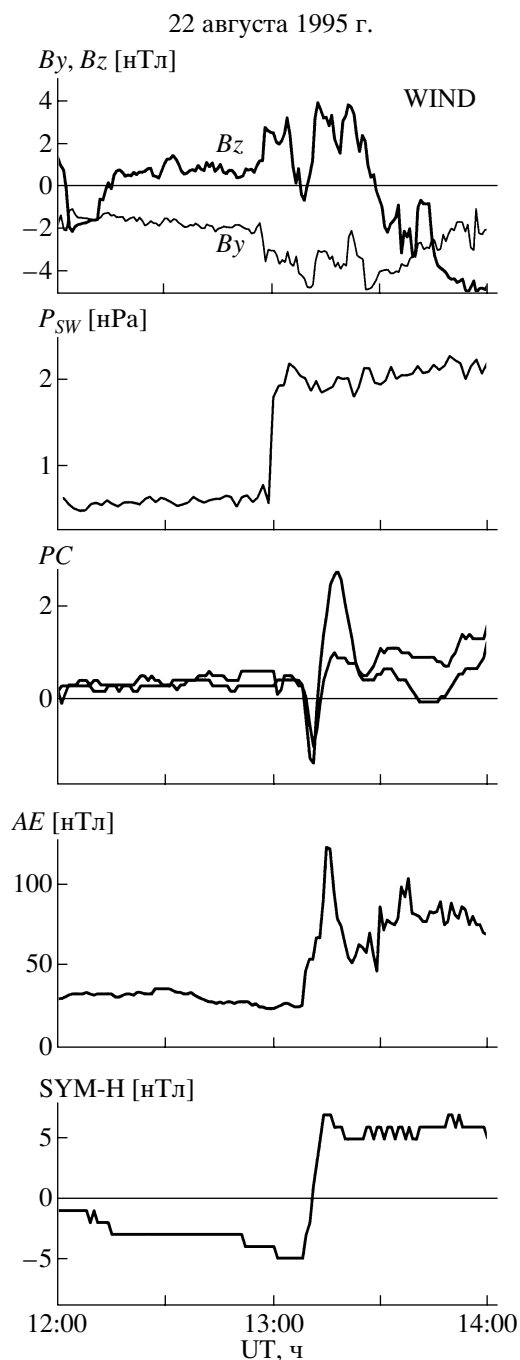


Рис. 9. То же, но для *SI* события 22 августа 1995 г.

Межпланетная ударная волна с большой отрицательной B_z -компонентой ММП ($B_z \approx -18$ нТл) и высоким фронтом P_{sw} (≈ 20 нПа) прошла точку $L1$ в 16.05 UT. В 16.40–16.43 UT наблюдается отрицательный выброс PC -индекса от уровня $PC = 2$ до $PC = -0.5$. Непосредственно за этим следует быстрый рост до $PC = 8$. Так как при $B_z < 0$ генерируется $DP2$ -система, то PC -индекс положителен вплоть до 16.40 UT. Однако, в 16.40–16.43 UT резкое уменьшение PC до отрицательного значения означает

возникновение достаточно мощной системы, противоположной $DP2$. Момент отрицательного отклонения PC совпадает с моментом увеличения AE , т.е. интенсификацией аврорального электроджета, и моментом увеличения $HSYM$, регистрирующего начало сжатия магнитосферы. В 16.44 UT PC -индекс начинает резко возрастать, что свидетельствует о восстановлении и усилении $DP2$ -системы.

Событие 22 августа 1995. Это событие внезапного импульса (*SI*) подробно рассматривалось в работе [Moretto и др., 2000]. Использовалась *AMIE*-процедура, и были построены картины распределения потенциала в ионосфере северной полярной области с 1-мин разрешением. Поведение PC -индекса подтверждает результаты [Moretto и др., 2000] и адекватно отражает экстремально быструю реконфигурацию системы конвекции в связи со скачками P_{sw} . На рис. 9 (сверху вниз) представлено: ММП и P_{sw} по данным спутника *WIND*; PC -, AE - и $HSYM$ -индексы за период времени с 12 до 14 UT. Все параметры даны без временного сдвига относительно друг друга. В 13 UT P_{sw} повышается в три раза в течение трех мин. Сжатие магнитосферы регистрируется как скачок $HSYM$ в 13.09 UT. В 13.09–13.12 UT PC -индекс обоих полушарий падает до -1.5 , что соответствует первой, переходной противоположной $DP2$. В 13.12–13.25 UT наблюдается увеличение PC , что соответствует второй, основной фазе отклика, когда под действием импульса P_{sw} происходит усиление $DP2$ системы.

Событие 22 июня 2000 г. Данное событие показывает отклик на резкое понижение P_{sw} . Эффект, вызываемый резким понижением P_{sw} противоположен эффекту повышения P_{sw} , а именно отмечается краткий положительный выброс в PC , после которого PC остается на низком уровне. На рис. 10 (сверху вниз) представлено: ММП и P_{sw} по данным спутника *ACE*; PC -, AE - и $HSYM$ -индексы. Все параметры даны без временного сдвига относительно друг друга. В течение всего периода ММП имеет северное направление, а значения PC -индекса близки к нулю. В 9.30 UT P_{sw} резко падает с 9 до 3 нПа, а северная компонента ММП еще увеличивается. В 10.34 UT расширение магнитосферы регистрируется в $HSYM$. В 10.34–10.37 UT в PC -индексе обоих полушарий наблюдается положительный выброс, соответствующий быстрому развитию $DP2$ -системы и усилению трансполярного тока. Усиление авроральной части $DP2$ одновременно регистрируется в AE -индексе. После 10.37 UT оба индекса возвращаются к невозмущенному уровню. Следует отметить, что обычно структуры солнечного ветра имеют резкий передний фронт P_{sw} и затем постепенное понижение. Резкое падение P_{sw} встречаются в солнечном ветре достаточно редко. Так, за период с 1997 г. по 2002 г. удалось обнаружить

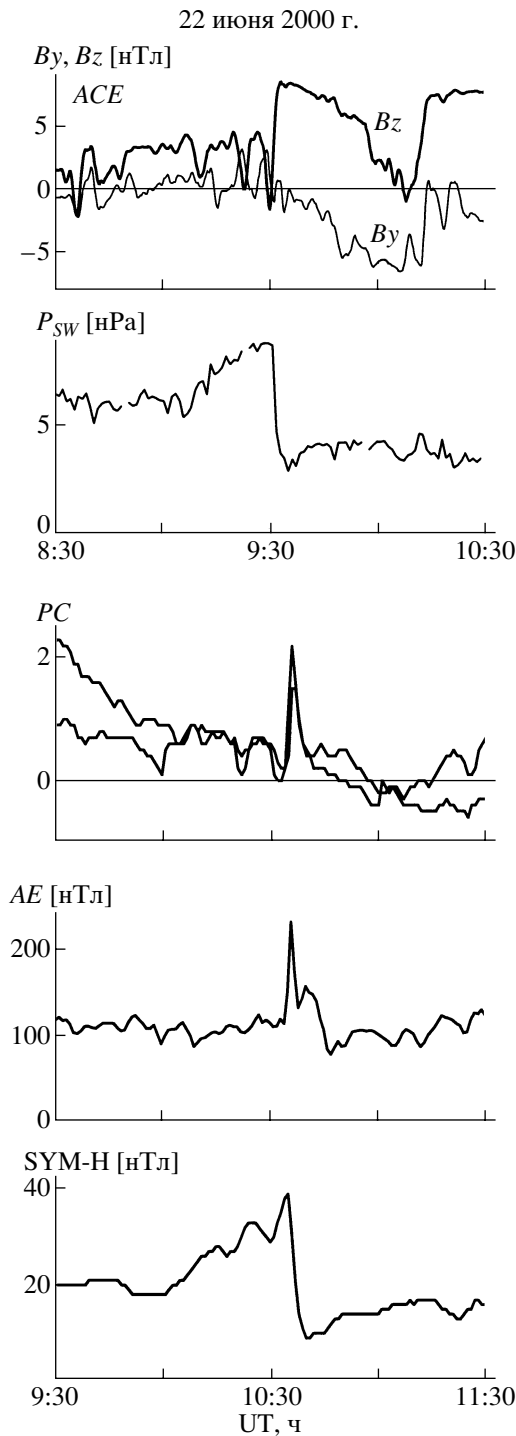


Рис. 10. То же, но для случая резкого уменьшения P_{SW} 22 июня 2000 г.

пять событий. Критерием отбора являлось соблюдение следующих условий: $D_{st} > -50$ нТл; $P_{SW} > 2$ нПа; падение P_{SW} не менее, чем в два раза в течение $t < 3$ мин. Несмотря на небольшое число случаев резкого падения P_{SW} , в каждом из них наблюдалась соответствующая вариация PC -индекса.

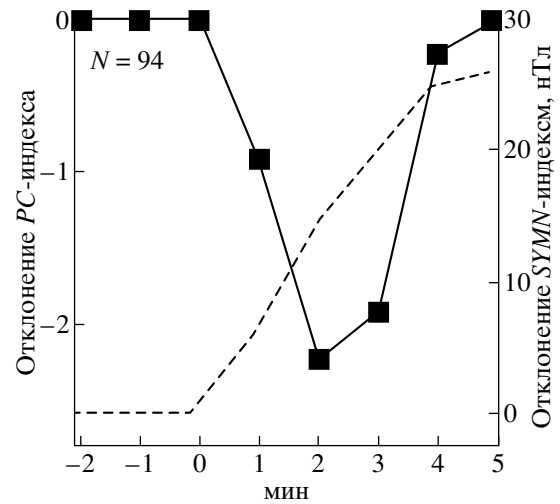


Рис. 11. Усредненные характеристики отрицательных импульсов в PC -индексе (сплошная линия) и соответствующих повышений $HSYM$ -индекса (штриховая линия).

7. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

PC -индекс северного полушария рассчитывается с 1978 г., а южного – с 1992 г. Специфические вариации, состоящие из краткого отрицательного выброса, за которым непосредственно следует повышение, встречаются довольно часто. Сравнение с параметрами солнечного ветра показывает, что такая вариация всегда связана с резким скачком P_{SW} , который регистрируется на Земле в $HSYM$ -индексе. Так, в 2000–2001 гг. было 94 события, которые удовлетворяли следующему критерию: P_{SW} повышалось не менее чем в два раза за 3 мин. При этом периоды, когда P_{SW} не превышало 2 нПа, исключались. На рис. 11 представлена характеристика этой вариации PC -индекса, полученная по методу наложения эпох. На этом же рисунке внизу приведена характеристика $HSYM$ -индекса. За момент T_0 принималось начало SI/SC регистрируемое по $HSYM$. Временной профиль с окном ± 5 минут вокруг T_0 рассчитывался для PC - и $HSYM$ -индексов с одноминутным разрешением. Из рис. 11 видно, что длительность отрицательного импульса в PC составляет 3 мин, а средняя амплитуда ≈ 2 . Такая амплитуда соответствует ионосферному электрическому полю около 10 мВ/м, направленному с вечерней на утреннюю сторону. По длительности выброс в PC совпадает со временем роста $HSYM$. Это свидетельствует о том, что соответствующая система продольных токов генерируется именно в период возрастания DCF-тока.

Так как на переднем фронте межпланетного облака внезапный рост P_{SW} часто сопровождается изменением ММП, выбранные 94 события были

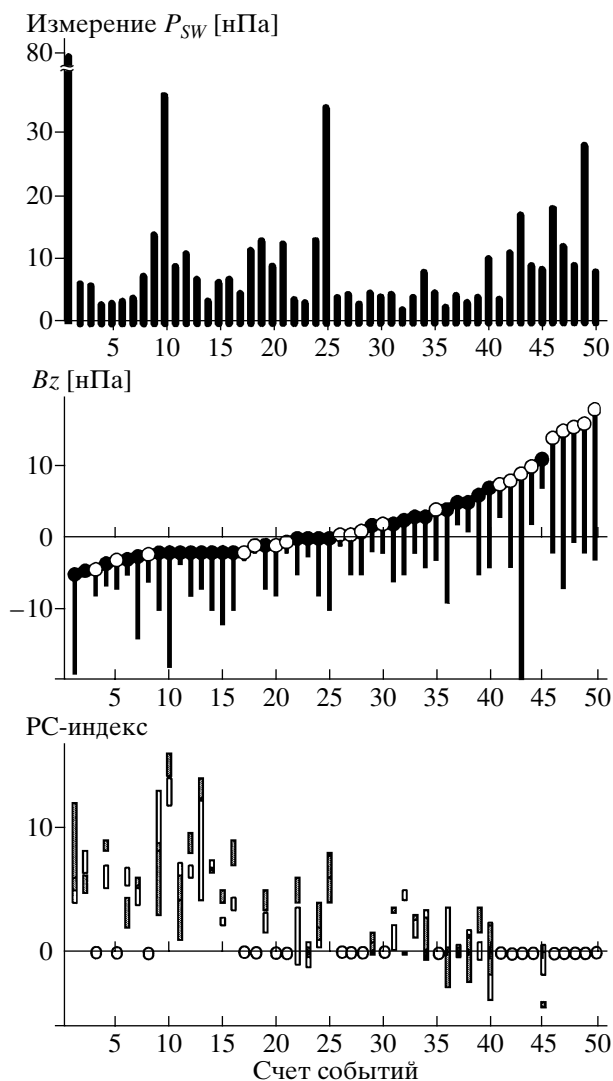


Рис. 12. Сверху вниз: высота фронта P_{SW} , величина B_z ММП непосредственно перед фронтом P_{SW} (светлые кружки – периоды главной фазы магнитной бури) и величина скачка B_z ММП (черная линия); амплитуда отрицательного выброса в северном (серая линия) и южном PC -индексе (светлая линия).

разделены на две группы: сопровождающиеся поворотом B_z -компоненты ММП на юг (54 события) и на север (40 событий). События, не сопровождавшиеся изменением ММП, включались в первую группу, если $B_z < 0$ и во вторую, если $B_z > 0$. На рис. 12 (сверху вниз) представлено для событий первой группы, упорядоченных по значению B_z , которое было непосредственно перед фронтом P_{SW} : изменение P_{SW} и B_z , а также величина выброса PC -индекса. На рис. 13 представлено то же, но для северной ориентации ММП. Счет событий обозначен на нижней оси каждого графика, так что три параметра (P_{SW} , B_z и PC), характеризующие одно событие, представлены один над другим. Высота фронта P_{SW} (в нПа) обозначена точ-

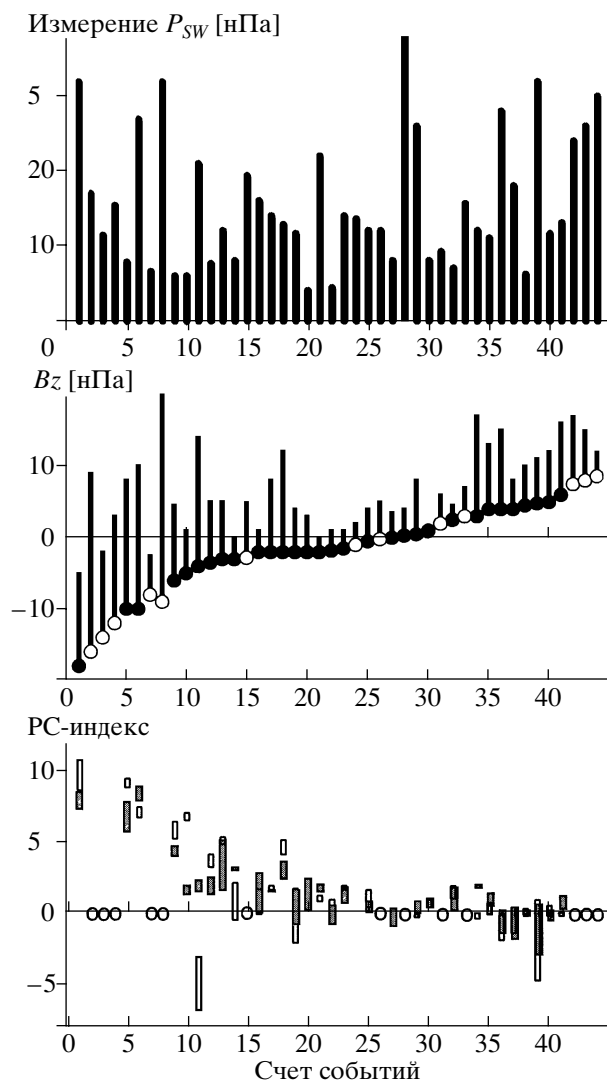


Рис. 13. То же, но при повороте B_z -компоненты ММП на север.

ками на верхних графиках рис. 12 и 13. На средних графиках значениям B_z -компоненты ММП непосредственно перед фронтом соответствуют черные точки (события без D_{st} понижения) и белые точки (события в период главной фазы магнитной бури). Величина скачка B_z обозначена черными линиями (на рис. 12 вниз, а на рис. 13 вверх от стартовой точки). На нижних графиках представлены отрицательные выбросы PC -индекса северного (вертикальная линия серого цвета) и южного полушария (вертикальная белая линия). Верхняя точка линии соответствует значению PC непосредственно перед отклонением, нижняя точка – минимальной величине, которая достигается в течение 3-мин отрицательного выброса. Отсутствие отрицательного выброса PC обозначается большой белой точкой на оси $PC = 0$. Из рис. 12 и 13 можно видеть, что начальная фаза отклика на

скачок P_{SW} появляется как при северном, так и при южном ММП. При южном ММП выброс PC -индекса в отрицательном направлении происходит от более высокого уровня. Важно отметить, что, если скачок P_{SW} происходит при развитии кольцевого тока, начальная фаза отклика отсутствует. Можно предположить, что электромагнитный эффект кольцевого тока демпфирует переходные процессы, связанные с резким смещением магнитопаузы, хотя этот вопрос также требует дополнительного исследования.

8. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКЦИИ В ИОНОСФЕРЕ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ

Численная модель распределения электрического потенциала в ионосфере [Лукьянова и др., 1996], параметризованная в данном случае по величине PC -индекса, позволяет рассчитать картины конвекции, соответствующие периоду до, в момент и после сжатия магнитосферы, и оценить изменение продольных токов. Проведем такую оценку для северного полушария для SC -события 6 апреля 2000 г. Параметры ММП и СВ для этого события представлены на рис. 8. При $B_z > -5$ нТл существует практически линейная зависимость между PC -индексом и ионосферным электрическим полем E_I , а также разностью потенциалов в полярной шапке Φ_{PC} . Для события 6 апреля 2000 г. до прихода межпланетного облака параметрам $B_z \approx -3$ нТл, $B_y \approx 5$ нТл, $PC = 3$ соответствует $E_I \approx 15$ мВ/м и $\Phi_{PC} \approx 20$ кВ. Схема продольных токов, при которой возбуждается двухвихревая конвекция, представлена на рис. 14а. Интенсивность продольных токов выбрана такой, чтобы в 16 UT в месте нахождения приполюсной станции $E_I \approx 15$ мВ/м. Параметры модели проводимости, используемой при расчете, соответствуют равноденствию. Рассчитанная картина конвекции представлена на рис. 14а. Эта картина соответствует периоду до 16.40 UT. В 16.40–16.43 UT PC -индекс падает с 3 до -0.5 , что соответствует PI и отражает изменение направления конвективного движения в полярной шапке. Генерация PI связана, вероятно, с высыпанием электронов, при котором происходит локальное увеличение проводимости ионосферы. Скорость электронов превышает скорость распространения магнитозвуковой волны, возникающей при сжатии магнитосферы. В работе [Сафаргалеев и Мальцев, 1987] указывалось, что система эквивалентных токов PI имеет двухвихревую структуру с направлением токов противоположным $DP2$. Для расчета картины конвекции расположим центр локализации втекающего продольного тока в диапазоне 9–12 MLT, а вытекающего – в диапазоне 12–15 MLT на широтах 80 – 84° Nlat (рис. 14б). Варьируя интенсивность тока, рассчитаем распределение потенциала, при ко-

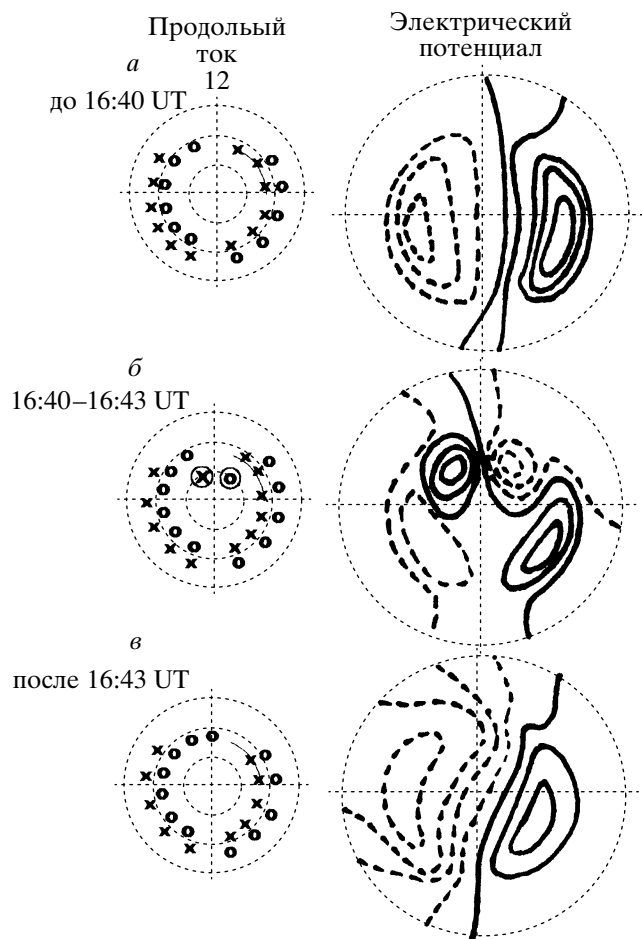


Рис. 14. Картина эквипотенциалей и схема продольных токов для SC события 6 апреля 2000 г.: (а) до прихода фронта повышенного P_{SW} (б) в момент сжатия магнитосферы; (в) после прохождения фронта P_{SW} .

тором величина E_I соответствует $PC = -0.5$. Картина конвекции, имеющая четыре вихря, представлена на рис. 14б. Интенсивность продольных токов, локализованных в полуденном секторе на широтах 78 – 80° и обеспечивающих изменение электрического поля с 15 мВ/м (16.40 UT) до -3 мВ/м (16.40–16.43 UT), составляет ~ 1 А/м, что значительно превышает среднюю величину токов зоны 1. На рис. 14в представлены картина конвекции и схема продольных токов, соответствующие времени 16.50 UT (т.е. после прохождения фронта высокого давления), параметрам ММП $B_z = -15$ нТл, $B_y = -25$ нТл и значению $PC = 8$. Эта картина имеет двухвихревую структуру с преобладанием вечернего вихря. Таким образом, можно видеть, что в течение короткого промежутка времени (< 10 мин) происходит резкая перестройка системы конвекции, перераспределение электрического потенциала и продольных токов.

9. ВЫВОДЫ

На примерах событий прохождения импульсов динамического давления солнечного ветра (P_{SW}) в периоды стабильного ММП как южного, так и северного направления показано, что повышение P_{SW} ведет к увеличению PC -индекса, который является мерой трансполярной части ионосферного DP2-тока. Вариация PC -индекса имеет такую же длительность и форму, как импульс P_{SW} ; увеличение индекса начинается в момент достижения фронтом P_{SW} дневной магнитопаузы. Во время магнитной бури линейная связь между проникающим в магнитосферу межпланетным электрическим полем и PC -индексом нарушается вследствие усиления конвекции под действием импульсов P_{SW} . Увеличение электрического поля, наблюдаемое в ионосфере приполюсной области под влиянием импульсов P_{SW} , также как и отклик PC -индекса указывают на то, что электрические поля и магнитосферная конвекция контролируются как ММП, так и P_{SW} . Резкое изменение P_{SW} вызывает быструю перестройку системы конвекции в полярной шапке. Характерная вариация PC -индекса в ответ на рост P_{SW} состоит из краткого (3 мин) отрицательного выброса, за которым непосредственно следует увеличение индекса. Внезапное понижение P_{SW} ведет к появлению положительного выброса. Такой отклик проявляется как при северной, так и при южной ориентации ММП. Однако, в главную фазу магнитной бури при мощном кольцевом токе система ионосферных токов с направлением противоположным DP2 не развивается. Численный расчет распределения электрического потенциала в полярной шапке проведен для SC события в следующие моменты времени: до сжатия магнитосферы, в минимуме отрицательного отклонения PC и при повышении PC . Картина конвекции в течение менее 10 мин изменяется последовательно от двухвихревой к четырехвихревой и опять к двухвихревой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лукьянова Р.Ю., Самокиш Б.А., Уваров В.М. Глобальная картина ионосферной конвекции, обусловленной DPY и трехслойной MTS системами продольных токов. Численная модель // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 2. С. 28–32. 1996.
- Сафаргалеев В.В., Мальцев Ю.П. Генерация предварительного импульса и долгопериодных пульсаций во время SI // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 2. С. 247–252. 1987.
- Araki T. A physical model of geomagnetic sudden commencement // Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves, ed. by M.J. Engebretson, K., Takahashi, and M. Scholer, Geophys. Monogr. Ser. V. 81. AGU. Washington, D.C. P. 124–141. 1994.
- Boyle C.B., Reiff P.H., Hairston M.R. Empirical polar cap potential // J. Geophys. Res. V. 102. P. 2111–2134. 1997.
- Fairfield D.H. Polar magnetic disturbances and the interplanetary magnetic field // Space Res. V. 107. P. 698–711. 1967.
- Friis-Christensen E., McHenry M.A., Clauer C.R. Ionospheric convection vortices observed near the polar cleft: A triggered response to sudden changes in the solar wind // Geophys. Res. Lett. V. 15. P. 253–265. 1988.
- Ksn J.R., Lee C.L. Energy coupling function and solar wind-magnetosphere dynamo // Geophys. Res. Lett. V. 6. P. 577–587. 1979.
- Lukianova R., Troshichev P.A., Lu G. The polar cap magnetic activity indices in the southern (PCS) and northern (PCN) polar caps: consistency and discrepancy // Geophys. Res. Lett. V. 18. P. 2308–3218. 2002.
- Lyons L.R., Zesta E., Samson S.C. Auroral Disturbances During the January 10, 1997 Magnetic Storm // Geophys. Res. Lett. V. 27. P. 3237–3254. 2000.
- Moretto T., Ridley A.J., Engebretson M.J. High-latitude ionospheric response to a sudden impulse event during northward IMF conditions // J. Geophys. Res. V. 105. P. 2521–2530. 2000.
- Nagatsuma T. Saturation of polar cap potential by intense solar wind electric fields // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 10. 10.1029/2001GL014202. P. 568–575. 2002.
- Troshichev P.A., Andrezen V.G. The relationship between interplanetary quantities and magnetic activity in the southern polar cap // Planet. Space. Sci. V. 33. P. 415–419. 1985.
- Troshichev O.A., Lukianova R., Papitashvili V., Rich F. PC index as a proxy of electric field in the polar region ionosphere // Geophys. Res. Lett. V. 27. P. 3809–3813. 2001.
- Wygant J.R., Torbert R.B., Mozer F.S. Comparison of S3-3 polar cap potential drops with the interplanetary magnetic field and models of magnetopause reconnection // J. Geophys. Res. V. 88. P. 5727–5731. 1983.
- Zesta E., Singer H., Lummerzheim D. The effect of the January 10, 1997 pressure pulse on the magnetosphere-ionosphere current system // Magnetospheric Current Systems, ed. by S. Ohtani and R. Lysak. AGU. Washington, D.C. P. 217–223. 2000.