

УДК: 523.62-726

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ ПО ДАННЫМ Cluster/EDI

© 2013 г. М. Фёрстер<sup>1</sup>, Я. И. Фельдштейн<sup>2</sup>, Л. И. Громова<sup>2</sup>, Л. А. Дремухина<sup>2</sup>,  
А. Е. Левитин<sup>2</sup>, С. Е. Хааланд<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Центр Гельмгольца в Потсдаме, Немецкий исследовательский центр наук о Земле, г. Потсдам, Германия

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк (Московская обл.)

<sup>3</sup>Факультет физики и технологии, Университет Берген, Норвегия

e-mail: gromova@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.07.2011 г.

После доработки 07.06.2012 г.

Кратко описаны измерения на спутниках Cluster, лежащие в основе определения интенсивности и направления электрического поля в магнитосфере. Целью данной статьи является описание 1) методики вычисления потенциала на высотах ионосферы и результатов построения пространственно-временных распределений конвекции для различной ориентации в системе GSM вектора ММП в плоскости  $YZ$ ; 2) выделения базового распределения потенциала (БРП), позволяющего определить конвекцию ионосферной плазмы в высоких широтах при произвольных значениях  $B_z$  и  $B_y$  компонент ММП (статистическая модель конвекции) с использованием различных наборов независимых исходных данных; 3) следствия увеличения объема вовлеченных в анализ данных; 4) результатов расчета потенциала с использованием различного количества описывающих его сферических гармоник; 5) определения значений разности потенциала через полярную шапку в секторах с изменяющимся угловым растровом конуса  $\alpha$  от 45 до 10°; 6) результатов предпринятых попыток определения существования конвекции, контролируемой  $V_x$  компонентой ММП.

DOI: 10.7868/S0016794013010094

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Группа из четырех спутников проводит плазменные измерения в обширных областях магнитосферы и вне ее, начиная с февраля 2001 г. Прибором EDI (Electron Drift Instrument) на борту спутника Cluster измеряется двумерная скорость дрейфа электронов поперек локального геомагнитного поля. Метод EDI использует инъекцию двух мало интенсивных пучков электронов с энергией 1 кэВ и их регистрацию после одного или нескольких гирооборотов в окружающем магнитном поле. Вследствие циклоидального движения пучков электронов может вернуться к соответствующим детекторам только при инъекции в направлениях, однозначно определяемых величиной и направлением скорости дрейфа плазмы. Измерения предполагают непрерывное слежение за изменениями таких направлений инъекции. Дрейфовая скорость рассчитывается или триангуляцией направления двух пучков, или по времени их запаздывания [Paschmann et al., 2001].

Наблюдаемое минимальное значение скорости дрейфа  $\sim 1$  км/с, что соответствует электрическому полю  $\sim 0.1$  мВ/м при напряженности магнитного поля в магнитосфере  $\sim 100$  нТл. Существенным преимуществом метода EDI при

измерениях на больших высотах является его невосприимчивость к кильватерным эффектам, которые влияют на результаты зондовых измерений электрического поля при низких плотностях плазмы во внешней магнитосфере [Eriksson et al., 2006]. Измерения напряженности электрического поля EDI возможны с временным разрешением  $\leq 10$  Гц (зависящим от возвращения пучка). В данной статье используются только 1-минутные средние значения.

Спутники первоначально двигались по эксцентричной полярной орбите с перигеем  $\sim 4 R_E$  и апогеем  $\sim 19.6 R_E$ , периодом обращения  $\sim 57$  ч. Прецессия орбиты спутника такова, что все значения MLT (Magnetic Local Time – местное магнитное время) покрываются измерениями в обеих полярных шапках (исправленная геомагнитная широта  $\Phi > \sim 74^\circ$ ) дважды за один календарный год. Скорость спутников  $\sim 3\text{--}4$  км/с для типичного пролета над полярной шапкой. Проведенные в магнитосфере измерения электрического поля, используемые для проектирования в ионосферу на высоту  $\sim 400$  км, отстоят друг от друга в ионосфере по широте на  $\sim 2$  км и по долготе на  $\sim 20$  км. В связи с ограничением, накладываемым прецессией орбит спутников, покрытие измерениями по местному вре-

мени при проектировании данных в ионосферу на  $\Phi < 74^\circ$  меняется с сезоном года. В северном полушарии летом (июнь–август) покрыт дневной/послеполуденный сектор, зимой (декабрь–февраль) – ночной/ранний утренний сектор. Для глобального покрытия по MLT необходимо использовать, по крайней мере, данные за полный календарный год.

Вектор магнитного поля на спутниках Cluster измерялся 3-компонентными феррозондовыми флюкстейт магнитометрами (FGM), которые находились на радиальных штангах длиной 5 м. Диапазон измерений магнитного поля  $\pm 4000$  нТл с погрешностью  $\pm 0.1$  нТл [Balogh et al., 2001]. Для переноса измеренных векторов скорости дрейфа плазмы из магнитосферы на высоты ионосферы использовалась модель внешнего магнитного поля Цыганенко T01 [<http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>]. Входные параметры этой модели учитывают не только текущие значения скорости, плотности солнечного ветра и компонент вектора межпланетного магнитного поля (ММП), но и их значения за предшествующий час.

В разделе 2 кратко изложена методика определения пространственно-временных распределений электрических полей для разных ориентаций ММП, детально описанная в работах Naaland et al. [2007], Förster et al. [2007, 2008], а в разделе 3 приведены такие распределения. В разделе 4 представлены некоторые оценки приближений, использованных при создании статистической модели ионосферной конвекции, контролируемой компонентами  $B_y$  и  $B_z$  ММП [Förster et al., 2009], в разделе 5 обсуждается существование составляющей конвекции, контролируемой  $B_x$  компонентой вектора ММП, в интервалы, когда ММП направлено к северу ( $B_z > 0$ ). Основные выводы статьи сформулированы в заключении (раздел 6).

## 2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИОНОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Параметры солнечного ветра и вектор ММП измерялись спутником ACE между Солнцем и Землей около точки либрации  $L1$  и переносились к дневной магнитопаузе на расстояние  $X_{GSM} = 10 R_E$ . Временная поправка при переносе ММП определялась методом “фазовых фронтов” [Weimer et al., 2003; Naaland et al., 2006]. Фронт может образовывать любой угол к скорости солнечного ветра, и прилегающие к нему силовые линии ММП переносятся к Земле параллельно фронту.

Измерения прибором Cluster/EDI проводились на больших расстояниях от ионосферы. Выявление закономерностей ионосферной конвекции предполагает проектирование результатов наблюдений на высоты ионосферы. Обычно та-

кая процедура осуществляется с помощью модели геомагнитного поля в предположении эквипотенциальности магнитных силовых линий [Baker, et al., 2004].

Пусть космический зонд располагается в магнитосфере в точке  $X_1^m$ , а ее проекция в ионосферу вдоль магнитной силовой линии на высоту 400 км – в точке  $X_1^i$ , однозначно определяемой моделью. Тогда разность потенциалов между положениями зонда  $X_1^m$  и  $X_1^i$ , который располагается на расстоянии  $d^m$  в направлении вектора магнитосферного дрейфа  $V^m$ , составляет  $\Delta\Phi^m = E^m d^m = V^m B^m d^m$ , где  $E^m$  – электрическое поле в магнитосфере, которое постоянно на отрезке  $d^m$ , а  $B^m$  есть напряженность магнитного поля. Точность определения электрического поля инструментом EDI в магнитосфере составляет  $\sim(0.1–0.2)$  мВ/м.

Расстояние  $d^m \sim 10^3$  км принималось в зависимости от отношения напряженностей магнитных полей в магнитосфере  $B^m$  и в ионосфере  $B^i$ , что в результате дает величину  $d^i \sim 50$  км. Проекция  $X_1^m$  в точку  $X_1^i$  в ионосфере определяет величину отрезка  $d^i$ , который есть проекция  $d^m$  в ионосферу по величине и ориентации. Разность потенциалов на отрезке  $d^i$  составляет  $\Delta\Phi^m = E^m d^m = V^m B^m d^m$ . В предположении эквипотенциальности вдоль геомагнитных силовых линий имеем  $\Delta\Phi^m = \Delta\Phi^i$ , так что электрическое поле на высоте ионосферы  $E^i = E^m d^m / d^i E^i$ .

Электрическое поле на высотах ионосферы может быть получено из измерений EDI в предположении, что геомагнитные силовые линии вморожены в поток плазмы [Naaland et al., 2007]. Интервал времени  $t^m$  переноса магнитной силовой линии в магнитосфере из точки  $X_1^m$  на расстояние  $d^m$  в точку  $X_2^m$  составляет  $t^m = d^m / V^m$ , где  $V^m$  – скорость конвекции в магнитосфере по измерениям EDI. Время конвекции потока плазмы на расстоянии  $d^m$  между точками  $X_1^i$  и  $X_2^i$  в ионосфере, являющимися соответственно проекциями точек  $X_1^i$  и  $X_2^i$ , составляет  $t^i = d^i / V^i$ . При условии вмороженности поля в плазму  $t^i = t^m$  и, следовательно,  $V^i = V^m (d^i / d^m)$ . Ниже в описанных в статье расчетах использовались значения скорости конвекции в ионосфере  $V^i$ , полученные из наблюдений EDI в магнитосфере, определенные в предположении условия вмороженности в потоке плазмы.

## 3. КОНВЕКЦИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ММП

Измеренные EDI вектора электрического поля, спроектированные на высокоширотную ионо-

сферу, были рассортированы и осреднены в 784-х ячейках в пределах геомагнитной кошироты 32° в зависимости от ориентации вектора ММП в системе GSM в плоскости ZY по 8-ми секторам шириной 45°. Размеры ячеек составляют 2° по широте и изменяются по MLT таким образом, что площадь ячеек сохраняется примерно одинаковой по площади ~5 × 10<sup>4</sup> км<sup>2</sup>. Поэтому сетка электрических полей однородна по магнитной широте (MLAT) и неоднородна по MLT.

Картина глобальной конвекции на основе данных об электрических полях на высотах ионосферы  $E_i$  обычно представляется через распределение электрического потенциала  $U_i$ , который связан с электрическим полем конвекции соотношением

$$\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B} = -\text{grad}\Phi. \quad (1)$$

Распределение вектора скорости дрейфа плазмы в таком случае соответствует сглаженному распределению потенциала  $U_i$  путем минимизации величины  $\chi^2$  по соотношению

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N |\vec{E}_i + \text{grad}\Phi|^2. \quad (2)$$

Для аналитического представления потенциала в области высоких широт, ограниченной со стороны экватора геомагнитной параллелью 58°, был использован сферический гармонический анализ (СГА) в форме, описанной в работе [Haines, 1985]. Это аналитическое представление было получено в каждом секторе как функция геомагнитной кошироты  $\theta$  и MLT (через азимутальный угол  $\varphi$ )

$$U(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^L A_{l0} P_l^0(\cos \theta) + \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^l (A_{lm} \cos m\varphi + B_{lm} \sin m\varphi) P_l^m(\cos \theta), \quad (3)$$

где  $P_l^m$  — присоединенные полиномы Лежандра степени  $l$  и порядка  $m$  для сферических гармонических полиномов,  $A_{lm}$  и  $B_{lm}$  — реальные значения коэффициентов, однозначно определяемых матрицей  $N \times K$ . В этой матрице  $N$  — число ячеек,  $K$  — число коэффициентов, определяемое количеством используемых сферических функций  $L$  (8 или 10); в нашем случае  $K = (L + 1)^2$ .

Пространственно-временное распределение электрического потенциала в высоких широтах определялось по мере накопления данных за все более продолжительные временные интервалы с устойчивой ориентацией ММП (см. [Haaland et al., 2007]). На рисунке 1 приведены такие распределения для восьми ориентаций (секторов) ММП на магнитопаузе за интервал с февраля 2001 г. по апрель 2009 г., а в табл. 1 — медианные значения ком-

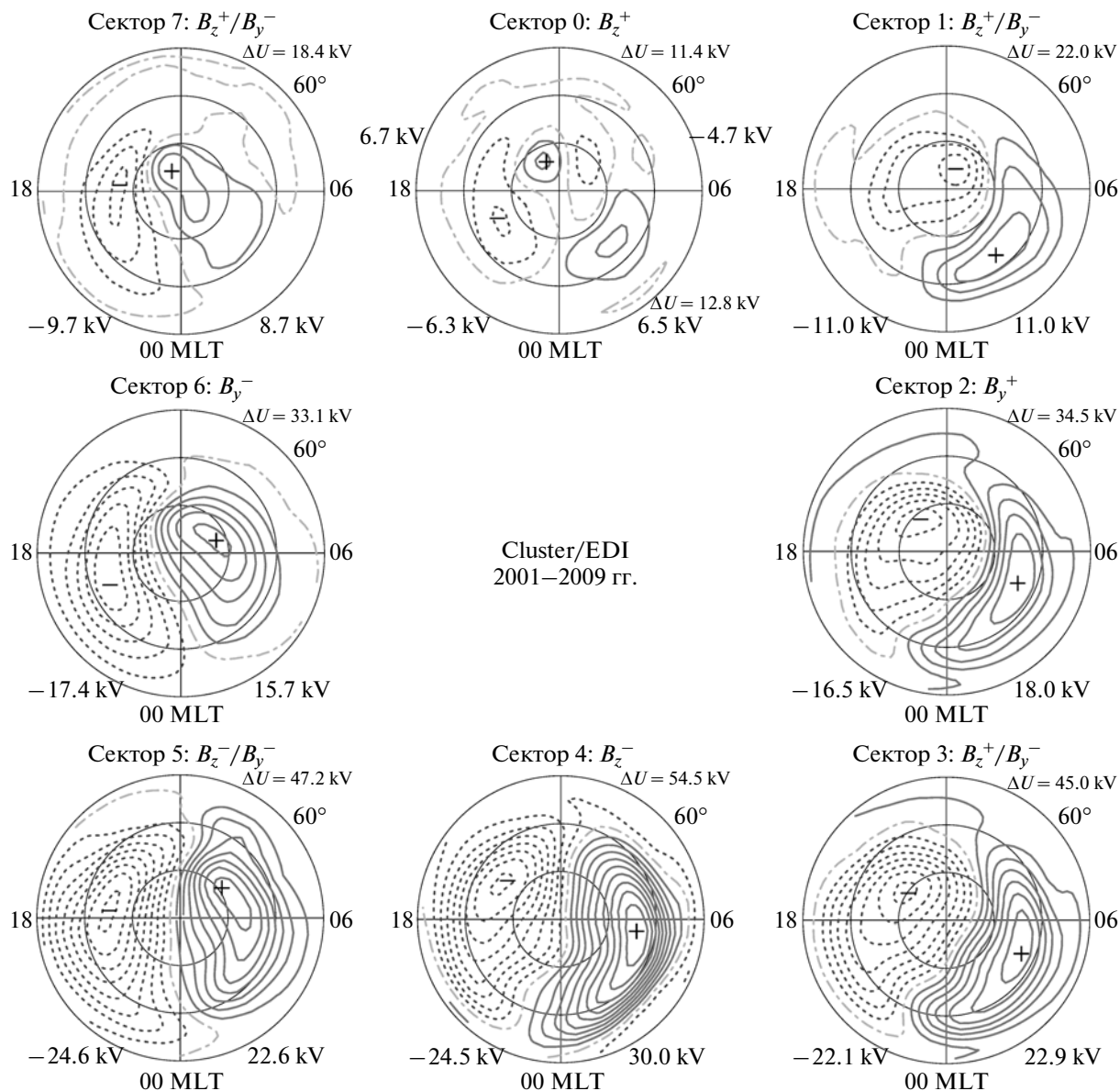
**Таблица 1.** Медианные значения,  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП на границе магнитосферы в восьми секторах за интервал 2001/02–2009/04 гг.

Сектор ММП	Ориентация	$B_x$ , нТл	$B_y$ , нТл	$B_z$ , нТл
0	$B_z^+$	0.02	0.05	3.79
1	$B_z^+ / B_y^+$	-1.54	3.13	2.66
2	$B_y^+$	-2.57	4.48	0.01
3	$B_z^- / B_y^+$	-2.48	3.23	-2.87
4	$B_z^-$	-1.46	-0.02	-4.82
5	$B_z^- / B_y^-$	2.19	-3.87	-3.3
6	$B_y^-$	2.84	-5.02	0.00
7	$B_z^+ / B_y^-$	1.90	-3.81	3.00

понент ММП на магнитопаузе в каждом секторе. На этом рисунке использованы координаты AACGM (Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic), изолинии проведены с шагом  $\Delta U = 3$  кВ, внешняя граница области — параллель 58°. Измеренные инструментом EDI значения поля приходятся на интервалы с преимущественно небольшими интенсивностями компонент вектора ММП, при его модуле ~ (4–5) нТл. Ширина сектора 45° по ориентации в GSM плоскости ZY (от сектора 0 до сектора 7), а их центры смещены последовательно на 45° по часовой стрелке. При южной ориентации ММП (сектор 4) конвекция состоит из двух вихрей, их фокусы располагаются утром на широте  $\Phi \sim 73^\circ$  и вечером — на  $\Phi \sim 75^\circ$ ; в полярной шапке направление конвекции антисолнечное (с дневной стороны на ночную), граница между вихрями располагается примерно вдоль полуденного/полуночного меридианов. Значение разности потенциалов через полярную шапку между фокусами вихрей  $\Delta U = 54.5$  кВ, она максимальна из всей совокупности ориентаций ММП.

При восточно-западной ориентации ММП (сектор 2 для  $B_y > 0$  и сектор 6 для  $B_y < 0$ ) двухвихревая система конвекции сохраняется. В полярной шапке происходит деформация вихрей конвекции плазмы: в секторах 2/6 увеличиваются площади, занятые вечерним/утренним вихрями в случае северного полушария (при зеркальной симметрии — в южном). При этом нулевая изолиния потенциала смещается к утренним/вечерним часам.

При северной ориентации ММП (сектор 0) дополнительно к двум основным (ночным) вихрям с  $\Delta U \sim 12.8$  кВ в дневные часы появляются два вихря с  $\Delta U \sim 11.4$  кВ и с конвекцией, направленной к Солнцу (с ночной стороны на дневную) между вихрями. Согласно приведенным на рис. 1



**Рис. 1.** Распределение электрического потенциала по наблюдениям Cluster EDI C1–C3 в северном полушарии как функции геомагнитной широты и местного геомагнитного времени для восьми секторов ММП. Положение максимальных и минимальных значений потенциала обозначено соответственно + и –, а их величина указана под каждым сектором ММП. Суммарная разность потенциалов поперек полярной шапки  $\Delta U$  обозначена в правом верхнем углу каждого сектора. Для сектора 0 ( $B_z > 0$ ) приведены максимальное и минимальное значения потенциала в дневном секторе. Положительные значения потенциала обозначены сплошными линиями, отрицательные – пунктиром, между соседними изолиниями потенциала – 3 кВ.

данным, разность потенциалов между основными вихрями монотонно убывает по мере перехода от сектора 4 к сектору 0. В секторе 0 разности потенциалов между парами дневных и ночных вихрей различаются всего на 1.4 кВ.

#### 4. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА И МОДЕЛИ КОНВЕКЦИИ

В таблице 2 приведены разности потенциалов  $\Delta U$  разных наборов данных, позволяющие оце-

нить вариации  $\Delta U$  в зависимости от продолжительности используемого временного интервала и от увеличения числа используемых в уравнении (3) сферических функций от 8-ми до 10-ти. При анализе нами частично использованы литературные данные [Haaland et al., 2007, 2009; Förster et al., 2009].

Для массива данных за интервал 2001–2009 гг.  $\Delta U$  при использовании для расчетов как 8-ми, так и 10-ти сферических гармоник, практически одинаковы во всех восьми секторах. Дисперсия раз-

**Таблица 2.** Разность электростатических потенциалов  $\Delta U$  (кВ) между фокусами вихрей конвекции в высоких широтах северного полушария по измерениям прибора Cluster/EDI

Сектор ММП	$\Delta U$ , кВ 2001–2006 (8 гармоник) <sup>1</sup>	$\Delta U$ , кВ 2001–2009 (8 гармоник) <sup>2</sup>	$\Delta U$ , кВ 2001–2009 (10 гармоник) <sup>3</sup>	$\Delta U$ , кВ 2001–2008, лето (10 гармоник) <sup>4</sup>
0	12.8 (дневные) 14.3 (ночные)	11.4 12.8	11.4 12.8	11.0 13.6
1	27.5	21.5	22.0	24.1
2	40.6	34.2	34.5	37.5
3	54.3	45.0	45.0	54.2
4	61.9	54.2	54.5	58.1
5	51.3	47.4	47.2	43.5
6	33.5	33.1	33.1	37.7
7	18.3	18.9	18.4	21.5

Примечание: <sup>1</sup> – Haaland et al. [2007], <sup>2</sup> – Haaland et al. [2009], <sup>3</sup> – данная статья, <sup>4</sup> – Förster et al. [2009].

ности значений  $\Delta U$  для основных вихрей  $-0.3$  кВ, а для дневных вихрей  $-0.1$  кВ (в секторе 0).

Значения  $\Delta U$  для летнего сезона приведены в табл. 2 согласно Förster et al. [2009]. Для получения глобального покрытия наблюдениями использовались данные с марта по сентябрь в северном полушарии и с сентября по март – в южном. Последние данные проектировались в северное полушарие с обращением знака компоненты  $B_y$  вектора ММП. Различия в разности потенциалов по данным за весь год и в летний сезон во всех секторах находятся в пределах нескольких кВ, а значение дисперсии  $\sim 4$  кВ с большими значениями в летний сезон за исключением сектора 5. Для пары дневных вихрей в секторе 0 различие в  $\Delta U = 0.4$  кВ, для трех секторов (7, 0 и 1) с северной ориентацией ММП дисперсия разности значений  $\Delta U = 2.2$  кВ, а для секторов (3–5) с южной ориентацией ММП она составляет  $\sim 6$  кВ.

Увеличение объема используемых данных от примерно пяти лет (2001–2006 гг.) до примерно восьми (с 2001 по 2009 гг.) сопровождается изменениями разности потенциалов: она уменьшается на 1.4 кВ между высокоширотными дневными вихрями, на 7.3 кВ – при южной ориентации ММП и на 2.2 кВ – при северной ориентации.

Статистическая модель конвекции, предложенная Förster et al. [2009] и основанная на измерениях Cluster/EDI, предполагает линейную зависимость потенциала от  $B_y$  и  $B_z$  компонент вектора ММП:

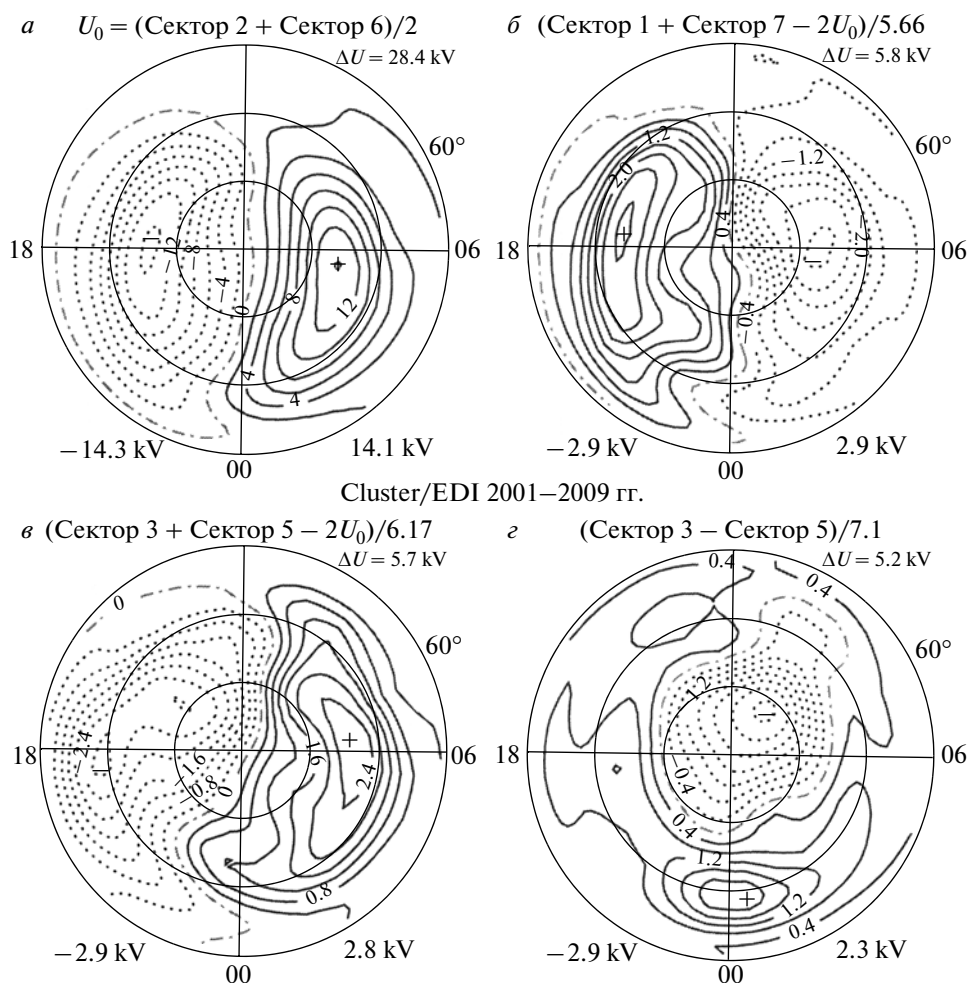
$$U(\text{MLAT}, \text{MLT}, B_y, B_z) = U_0(\text{MLAT}, \text{MLT}) + B_y U_y^\pm + B_z U_z^\pm, \quad (4)$$

где  $U_0$  (кВ) – потенциал, независимый от ММП;  $U_y^\pm$  и  $U_z^\pm$  – (в кВ/нТл) описывают линейную зависимость  $U$  от компонент  $B_y$  и  $B_z$  ММП, нормали-

зованную на магнитное поле с интенсивностью в 1 нТл, которая может быть различна для разных знаков; коэффициенты  $U_y^\pm$  и  $U_z^\pm$  с верхними индексами “+” относятся к ситуации положительных  $B_y$  или  $B_z$ , а с нижними индексами “-” – к ситуации отрицательных  $B_y$  или  $B_z$ . Измерения скорости дрейфа плазмы приходились преимущественно на интервалы с небольшими интенсивностями  $B_y$  и  $B_z$  (см. табл. 1), что оправдывает использование линейного приближения. Такое разложение потенциала используется в литературе, например, в работах [Feldstein and Levitin, 1986; Papitashvili and Rich, 2002; Kabin et al., 2003].

На рисунке 2 демонстрируются элементы базового распределения потенциала (БРП):  $U_0$  (верхний ряд слева);  $U_y^\pm$  (нижний ряд справа для  $B_y = \pm 1$  нТл, на данном рисунке для  $B_y = 1$  нТл);  $U_z^\pm$  (верхний ряд справа для  $B_z = +1$  нТл);  $U_z^-$  (нижний ряд слева для  $B_z = -1$  нТл). Элементы БРП определяются суммированием распределений потенциала в разных секторах на рис. 2:  $U_0$  – потенциал при минимальных значениях  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП, вычисляемый как среднее значение потенциала в секторах 2 и 6;  $U_y^\pm$  – потенциал, контролируемый  $B_y$  компонентой, определяется как разность распределений потенциала в тех же секторах, нормализованная к  $B_y = 1$  нТл;  $U_z^+$  или  $U_z^-$  – потенциалы, контролируемые  $B_z^+$  или  $B_z^-$  компонентами, определяются соответственно как разность распределений потенциалов в секторах 0 или 4 и  $U_0$ , нормированное на  $B_z = +1$  нТл и  $B_z = -1$  нТл.

Потенциалу  $U_0$ , независимому от ММП, соответствует двухвихревая система конвекции плазмы с антисолнечным направлением в полярной шап-



**Рис. 2.** Элементы базового распределения потенциала (БРП), полученные из наблюдений Cluster/ EDI для различных направлений ММП, приведенных на рис. 1. Их совокупность составляет модель конвекции в ионосфере, определяемую ситуацией в ММП: *a* – часть потенциала, независимая от  $B_y$  и  $B_z$ ; *b* – изолинии распределения потенциала при  $B_z = 1$  нТл; *v* – распределение потенциала при  $B_z = -1$  нТл; *z* – распределение потенциала при  $B_y = 1$  нТл. Соотношения для расчета каждого элемента БРП приводятся над рисунком соответствующего распределения.

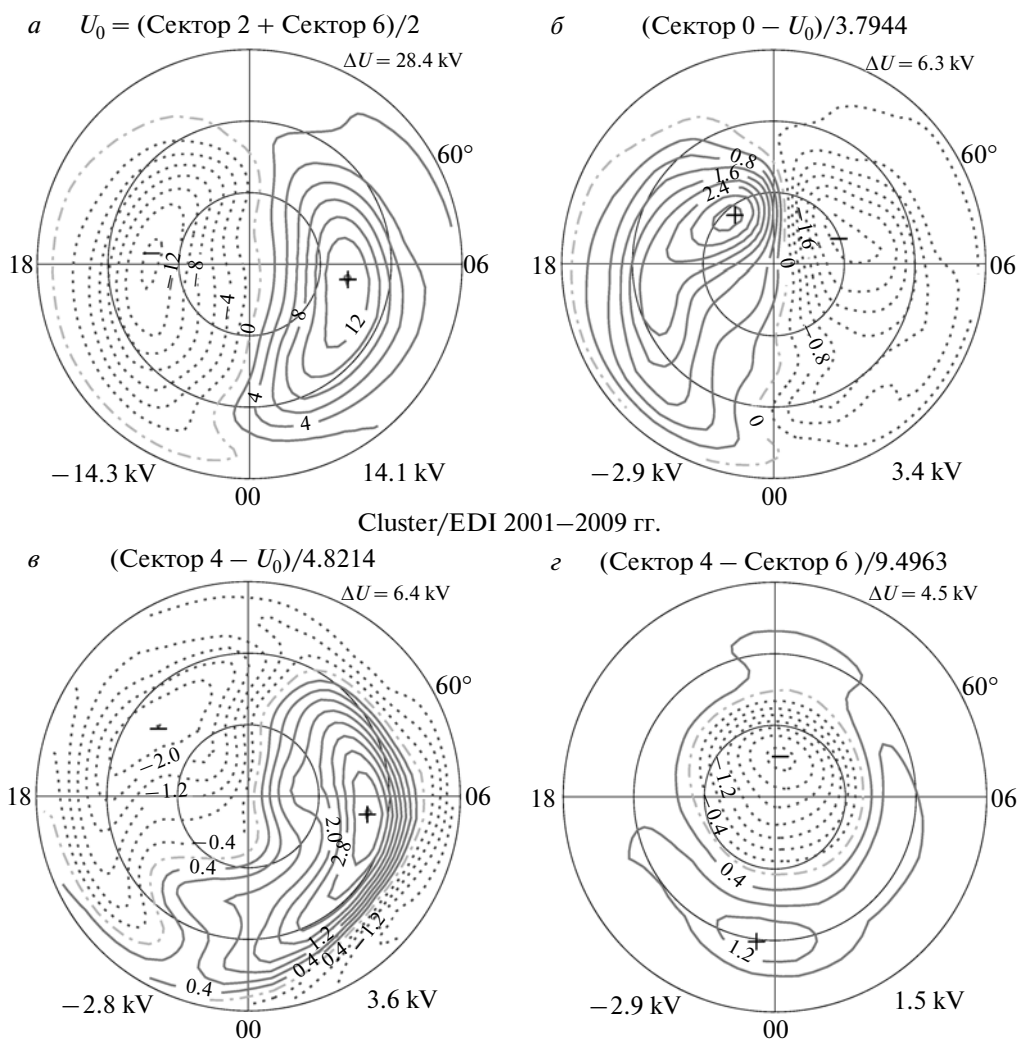
ке. Аналогичную двухвихревую систему представляет и распределение потенциала  $U_z^-$ . Распределение потенциала  $U_z^+$  представляет собой двухвихревую систему со сгущением изолиний в полуденные часы, где конвекция направлена к Солнцу, и, наконец, потенциалу  $U_y^+$  соответствует один вихрь в полярной шапке, фокус которого находится вблизи ее центра. В северном полушарии конвекция плазмы направлена по часовой стрелке при  $B_y^+$  и против часовой стрелки при  $B_y^-$ .

Элементы БРП могут быть вычислены с использованием других комбинаций распределения потенциала по 8-ми секторам ММП. Некоторые результаты таких расчетов приведены на рис. 3. В заголовке каждого элемента обозначены используемые для определения каждого из элементов БРП сектора ММП и характер необходимых дей-

ствий. Под каждым элементом приведены значения потенциалов в фокусах вихрей, вверху указана суммарная разность потенциалов между фокусами вихрей. Для определения элементов БРП использованы следующие комбинации секторов ММП:

$$\begin{aligned}
 U_z^- &= (\text{сектор 3} + \text{сектор 5} - 2U_0)/6.17 \\
 U_z^+ &= (\text{сектор 1} + \text{сектор 7} - 2U_0)/5.66 \\
 U_y^+ &= (\text{сектор 3} - \text{сектор 5})/7.10 \\
 U_y^- &= (\text{сектор 1} - \text{сектор 7})/6.94.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Рисунки 2 и 3 демонстрируют элементы БРП, контролируемые компонентами  $B_y$  и  $B_z$  вектора ММП, полученные независимым образом с использованием различных исходных данных. Они практически идентичны по следующим параметрам: количеству вихрей и направлению конвекции



**Рис. 3.** То же, что и на рис. 2, но для вычисления элементов БРП используются соотношения (4), отличные от тех, по которым рассчитывались БРП, приведенные на рис. 2.

в вихрях; положению фокусов вихрей; разности потенциалов между фокусами вихрей, которые различаются для  $U_z^-$  на 0.7 кВ, для  $U_z^+$  — на 0.5 кВ, для вихря в полярной шапке  $U_y^+$  — на 0.3 кВ. Такое согласие между элементами БРП позволяет относиться к ним с доверием, ибо они получаются примерно одинаковыми при использовании для их определения различных независимых измерений скорости дрейфа плазмы прибором EDI.

Пространственно-временное распределение конвекции и разность потенциала  $\Delta U$  поперек полярной шапки с использованием EDI определялись нами при различной ориентации ММП в секторах с угловым раствором конуса  $\alpha = 45^\circ$ . Поэтому закономерен вопрос: изменяется ли картина конвекции при уменьшении угла  $\alpha$ , а если изменяется, то как. В работе [Förster et al., 2008] проанализировано изменение характера конвекции при повороте сектора ММП на  $5^\circ$ , когда угол

$\alpha$  оставался равным  $45^\circ$ , для ситуаций с северным  $V_z$ . Ниже приводятся оценки влияния величины угла  $\alpha$  на характер и интенсивность высокоширотной конвекции, которые получены при анализе данных в северном и в южном полушариях с февраля 2001 г. по сентябрь 2009 г. Для аналитического представления потенциала мы использовали 8 сферических гармоник. Угол  $\alpha$  уменьшался от  $45^\circ$  с шагом, равным  $10^\circ$ . При этом характер конвекции вплоть до  $\alpha = 10^\circ$  оставался прежним: двухвихревое распределение с утренним и вечерним вихрями во всех секторах и два дополнительных дневных вихря при северной ориентации ММП (сектор 0). Покрываемая площадь пространства данными ухудшается в каждом секторе с уменьшением угла  $\alpha$ , особенно на широтах, меньших  $75^\circ$ , и при  $\alpha = 7.5^\circ$ , когда изменяется даже характер самой конвекции. При уменьшении угла  $\alpha$  от  $45$  до  $10^\circ$  разность потенциалов между фокусами вихрей  $\Delta U$  сохраняется при северной

**Таблица 3.** Разность потенциалов  $\Delta U$  между фокусами основных (ночных) вихрей конвекции в кВ по данным Cluster/EDI за интервал 2001–2009 г.г. при направлении ММП к Солнцу ( $B_x > 0$ ) и от Солнца ( $B_x < 0$ )

Сектор ММП	$\Delta U$ , кВ Северное полушарие		$\Delta U$ , кВ Южное полушарие	
	$B_x > 0$	$B_x < 0$	$B_x > 0$	$B_x < 0$
0	15.5	15.4	11.5	11.8
1	21.8	24.6	22.9	23.4
2	35.4	34.0	37.9	37.9
3	50.8	44.5	47.2	48.2
4	58.5	54.6	52.5	57.4
5	44.2	59.4	49.5	49.7
6	32.9	35.9	33.4	34.8
7	17.7	24.2	21.9	20.6

ориентации ММП на уровне  $20 \pm 2$  кВ в секторах 1 и 7 и на несколько меньшем уровне ( $13 \pm 2$  кВ) — в секторе 0. При восточно-западной ориентации вектора ММП  $\Delta U$  составляет  $35 \pm 3$  кВ в секторах 2 и 6 и  $52 \pm 5$  кВ при южной ориентации ММП в секторах 3 и 5;  $55 \pm 6$  кВ в секторе 4. Таким образом, уменьшение углового раствора конуса  $\alpha$  от  $45$  до  $10^\circ$  не сказывается на характере крупномасштабной картины конвекции и не изменяет ее интенсивность более чем на 10%.

### 5. $B_x$ КОМПОНЕНТА ВЕКТОРА ММП И КОНВЕКЦИЯ ПЛАЗМЫ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Существуют различные, даже совершенно противоположные, мнения относительно воздействия  $B_x$  компоненты вектора ММП на геофизические процессы в высоких широтах. Яхнин и Сергеев [1981]; Crooker [1986]; Cowley et al. [1991]; Belenkaya [1998]; Blomberg et al. [2005]; Alexeev et al. [2007], Newell et al. [2009]; Peng et al. [2010] полагают, что  $B_x$  оказывает ощутимое влияние. В статьях [Levitin et al., 1982; Newell et al., 1989] показано, что выявить заметного влияния этой компоненты на высокоширотные токовые системы не удалось. Трудность выделения воздействия  $B_x$  компоненты на геофизические явления связана с существованием секторной структуры ММП в плоскости эклиптики, состоящей из двух секторов, в каждом из которых  $B_x$  и  $B_y$  компоненты вектора ММП имеют разные знаки [Friis-Christensen et al. 1972]. Сумарук и Фельдштейн [1973], анализируя вариации геомагнитного поля в приполюсной области, пришли к выводу, что они контролируются именно  $B_y$  компонентой вектора ММП. Такой вывод был основан на анализе связи вариаций геомагнитного поля с компонентами вектора ММП в полярной шапке в интервалы, когда секторная структура

ММП нарушалась, и эти векторные компоненты имели одинаковые знаки. Полученный ими результат в настоящее время общепризнан, и все известные статистические модели высокоширотной конвекции ионосферной плазмы включают в себя зависимость пространственно-временного распределения этой конвекции только от  $B_y$  и  $B_z$  компонент вектора ММП.

Большой объем измерений скоростей дрейфа плазмы в магнитосфере спутником Cluster/EDI за 8.5 лет позволяет еще раз провести исследование влияния  $B_x$  компоненты вектора ММП на конвекцию плазмы. Для этой цели массив измерений был разделен на две примерно одинаковых части, когда измерения проводились только в периоды  $B_x > 0$  (ММП направлено к Солнцу) или только  $B_x < 0$  (ММП направлено от Солнца). Затем данные каждой из частей были рассортированы по 8-ми секторам, соответствующим направлениям ММП в плоскости GSM YZ, каждый шириной в  $45^\circ$ . Распределение потенциала электрического поля в ионосфере на высоте 400 км и ММП на магнитопаузе определялись по методикам, детально описанным в работах [Haaland et al., 2007; Förster et al., 2008]. Характерные особенности распределения потенциала во всех 8-ми секторах аналогичны изображенному на рис. 1, что свидетельствует о достаточности даже половины данных для получения устойчивой картины конвекции. Средняя напряженность  $B_x$  компоненты вектора ММП в секторах меняется от 2 до 4 нТл, при этом она равна  $\sim 2$  нТл в секторах, в которых  $B_x$  и  $B_y$  имеют одинаковое направление, и достигает  $\sim 4$  нТл в секторах, в которых они имеют разные направления.

В таблице 3 приведены разности потенциалов между фокусами основных (вечернего и утреннего) вихрей конвекции по 8-ми секторам в северном и южном полушариях отдельно для  $B_x > 0$  и  $B_x < 0$ . Из этих данных можно заключить, что независимо от знака  $B_x$  сохраняются не только общие характеристики конвекции, но и закономерность изменения разности потенциалов  $\Delta U$  через полярную шапку:  $\Delta U$  монотонно увеличивается от сектора 0 к сектору 4 и уменьшается опять для отрицательных значений  $B_x$  от сектора 4 к сектору 0. В южном полушарии такая закономерность выполняется без исключений, в северном полушарии из нее выпадает сектор 5 при  $B_x < 0$ . Мы полагаем, что это исключение обусловлено недостаточным количеством данных: во-первых, из-за характера орбит спутников, которые большую часть времени находились в южном полушарии; во-вторых, из-за уменьшения количества данных в секторах с одинаковым направлением  $B_x$  и  $B_y$ . Сопоставление  $\Delta U$  в обоих полушариях при разных направлениях  $B_x$  (табл. 3) не выявляет отчетливо влияния компоненты  $B_x$  на разность потенциалов через полярную шапку.



Нами была также предпринята попытка выделения из высокоширотной конвекции плазмы части, контролируемой компонентой  $V_x$  вектора ММП. Эта попытка охватывает два различных метода, которые основываются на различных предположениях.

Первый метод опирается на предположение, что  $V_x$  компонента вектора ММП не оказывает влияния на конвекцию плазмы в случаях одинакового направления  $V_x$  и  $V_y$ , т.е. в северном полушарии для массива с  $V_x > 0$  это сектора 1, 2 и 3, а для массива с  $V_x < 0$  это сектора 5, 6 и 7. В дальнейшем для расчетов используются данные в секторах 2 и 6, в которых контроль конвекции плазмы осуществляется  $V_y$  компонентой ММП и практически отсутствует контроль  $V_z$  компонентой и, следовательно, структура конвективных вихрей более простая.

Второй метод использует то обстоятельство, что геомагнитные силовые линии в северной полярной шапке имеют противоположное направление с отрицательной  $V_x$  компонентой ММП, а в южной полярной шапке — с положительной компонентой  $V_x$ . Противоположное направление ММП и магнитного поля в хвосте магнитосферы создает благоприятное условие для проникновения солнечного ветра в область полярной шапки [Newell et al., 2009]. Повышенный поток мягкого корпускулярного вторжения может проявиться и в конвекции через изменение уровня ионизации в верхней атмосфере.

Методика вычислений и результаты попытки выделения части конвекции, контролируемой  $V_x$  компонентой ММП, из данных спутника Cluster/EDI детально изложена в работе [Förster et al., 2011].

Были получены распределения конвекции для независимого от ММП элемента  $U_0$ , а также от элементов, контролируемых  $\pm V_y$  и  $\pm V_x$  компонентами вектора ММП ( $U_y^\pm$  и  $U_x^\pm$ ). Конвекция плазмы, описываемая элементом  $U_0$ , во всех случаях является двухвихревой, с утренним и вечерним вихрями и анτισолнечной конвекцией в полярной шапке, а элемент, контролируемый  $\pm V_y$  ММП, вихрем конвекции в полярной шапке; ее фокус располагается вблизи геомагнитного полюса, а конвекция происходит в северном/южном полушарии против/по часовой стрелке при  $V_y > 0$  и по/против часовой стрелке при  $V_y < 0$ . Падение потенциала через полярную шапку  $\Delta U$  между фокусами  $U_0$  и значение потенциала в фокусе полярного вихря для  $U_y^\pm$  приведены в табл. 4.

Для элементов БРП  $U_0$  и  $U_y^\pm$  ММП характер конвекции и величины  $\Delta U$  при нахождении обоими методами (табл. 4) находятся в хорошем согласии с соответствующими значениями, приведенными на рис. 2:  $\Delta U_0 = 28.4$  кВ, а для  $\Delta U_y^+ = -2.9$  кВ.

**Таблица 4.** Падение потенциалов  $\Delta U$  (кВ) между фокусами вихрей конвекции для элементов БРП  $U_0$  и  $U_y^\pm$  по данным Cluster/EDI за 2001–2009 гг.

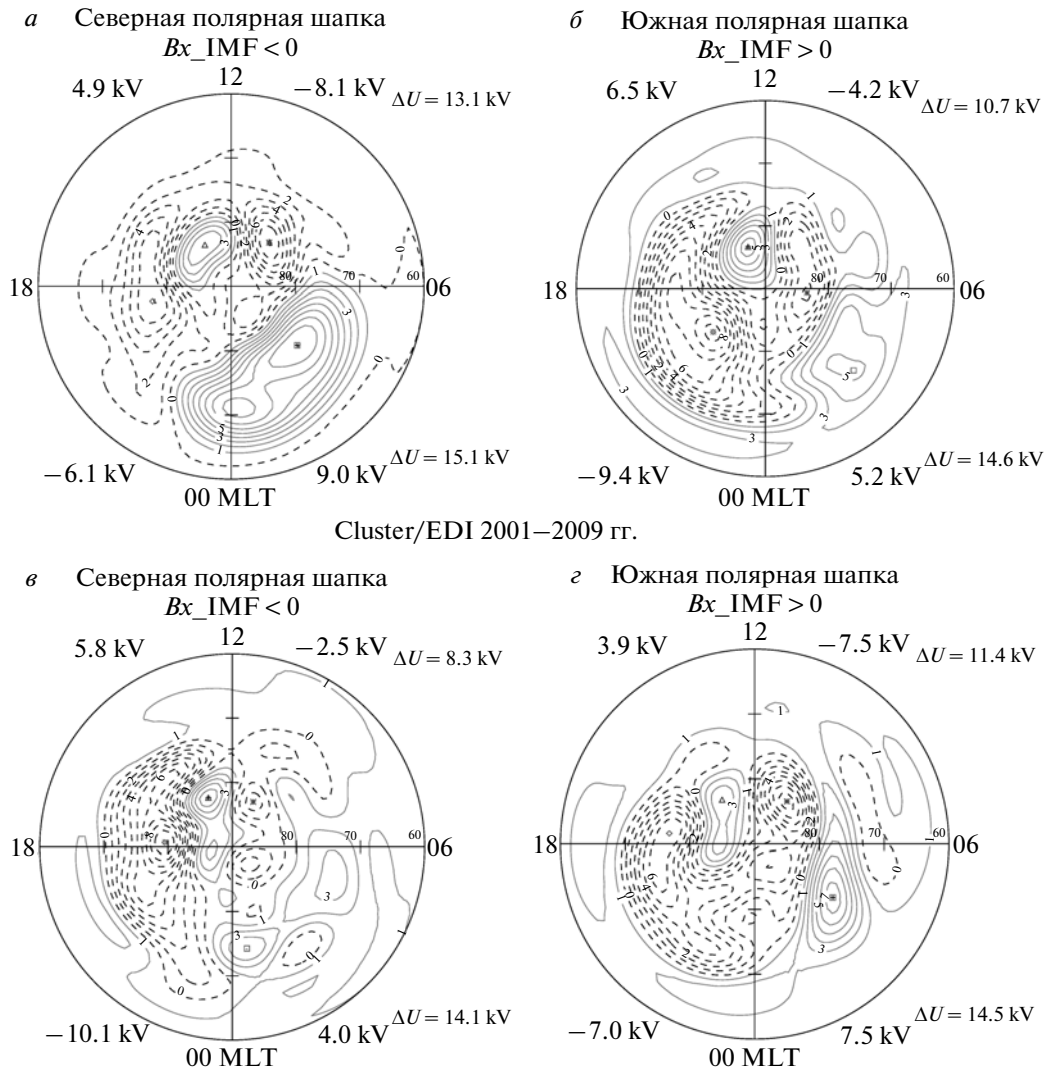
Элемент БРП	Северное полушарие		Южное полушарие	
	I метод	II метод	I метод	II метод
$U_0$	30.4	29.5	33.3	30.9
$U_y^+$	-2.9	-3.0	2.8	2.5

Такое хорошее согласие может служить дополнительным аргументом в пользу легитимности используемых при вычислениях элементов БРП предположений.

Контроль характера конвекции и ее интенсивности  $V_x$  компонентой ММП для основных (ночных) вихрей конвекции при всех ориентациях ММП и в секторах 2 и 6 (для  $\pm V_y$  ММП) не столь очевиден. Отсутствует регулярная систематическая картина конвекции, распределение потенциала представляется несколькими мелкими вихрями. Изолинии потенциала крайне иррегулярны, его максимальные значения в фокусах вихрей в несколько раз ниже значений, связанных с  $V_y$  и  $V_z$  компонентами ММП. Не выявлены особенности в распределениях, которые можно было бы связать со знаком  $V_x$  или различиями в полушариях. Таким образом, не получено убедительных свидетельств наличия составляющей конвекции, контролируемой  $V_x$  компонентой ММП, не выявлены ее характерные особенности и интенсивность для данных ситуаций.

С другой стороны, анализ падения потенциалов между фокусами высокоширотных дневных вихрей, появляющихся в интервалы с  $V_z > 0$ , дает основание утверждать существование в конвекции составляющей, контролируемой  $V_x$  компонентой ММП.

На рисунке 4 приведены распределения потенциалов в секторе 0 в северном и южном полушариях при разной ориентации  $V_x$ . Во всех ситуациях конвекция представляется четырьмя вихрями: в полярной шапке в дневные часы располагаются два вихря с конвекцией к Солнцу между вихрями и фокусами в пред- и послеполуденные часы на геомагнитных широтах 82–84°. Падение потенциала между фокусами дневных вихрей демонстрирует взаимосвязь его с  $V_x$  компонентой ММП: она больше в ситуациях с антипараллельной ориентацией геомагнитных силовых линий в хвосте магнитосферы и  $V_x$  компоненты ММП. Для северной полярной шапки это соответствует ориентации  $V_x < 0$ , а для южной полярной шапки —  $V_x > 0$ .



**Рис. 4.** Высокоширотная конвекция в Секторе 0 по наблюдениям Cluster/EDI за интервал 2001/02–2009/09. Цифрами обозначены значения потенциалов в фокусах вихрей: *a* – северная полярная шапка,  $B_x < 0$ ; *б* – северная полярная шапка,  $B_x > 0$ ; *в* – южная полярная шапка,  $B_x < 0$ ; *г* – южная полярная шапка,  $B_x > 0$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного дополнительного анализа базового распределения потенциала (БРП) можно заключить следующее.

1. Элементы БРП, определяемые разными методами и при использовании независимых исходных данных, идентичны по количеству вихрей конвекции и направлениям конвекции в них, положениям фокусов вихрей. Разность потенциалов между фокусами вихрей в северном полушарии составляет для элемента БРП, независимого от ММП,  $\Delta U(U_0) = 29.4 \pm 0.7$  кВ; для элемента БРП, контролируемого  $V_y > 0$ , для вихря в полярной шапке  $\Delta U(U_y^+) = -2.8 \pm 0.2$  кВ; для элемента БРП, контролируемого  $B_z < 0$ ,  $\Delta U(U_z^-) = 6.0 \pm 0.3$  кВ; для элемента БРП, контролируемого  $B_z > 0$ ,  $\Delta U(U_z^+) = 6.0 \pm 0.2$  кВ. Согласие в пределах нескольких

процентов элементов БРП позволяет относиться с доверием к их величинам, ибо они получены из независимых измерений скоростей дрейфа плазмы прибором EDI.

2. Используемые в работе [Förster et al., 2009] методики и результаты расчетов пространственно-временного распределения потенциала сохраняются: *a*) при увеличении количества сферических гармоник с 8-ми до 10-ти; *б*) при уменьшении угла раствора конуса в секторах с ориентацией ММП от 45 до 10°.

3. Не получено убедительных свидетельств наличия контролируемой  $B_x$  компонентой ММП составляющей конвекции для основных (ночных) вихрей конвекции. В секторе 0 (интервалы с  $B_z > 0$ ) для пары дневных вихрей разность потенциалов между фокусами больше в ситуациях при антипараллельных ориентациях магнитных по-

лей в хвосте магнитосферы и в солнечном ветре (контроль  $B_x$  компонентой ММП).

Исследование в Центре Гельмгольца в Потсдаме Немецкого исследовательского центра наук о Земле (М. Фёрстер) было поддержано Немецким Научным Фондом; в Университете Берген (С.Е. Хааланд) – Норвежской Исследовательской Комиссией, в ИЗМИРАН, Россия (Л.И. Громова, Л.А. Дремухина, А.Е. Левитин), – грантом РФФИ № 11-0500306. Авторы благодарят приборные группы SWERAM и MAG проекта ACE, а также научный центр ACE за предоставление данных ACE.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сумарук П.В., Фельдштейн Я.И. Секторная структура межпланетного магнитного поля и магнитные возмущения в приполюсной области // Космич. исслед. Т. 11. № 1. С. 155–160. 1973.
- Яхнин А.Г., Сергеев В.А. Сияния полярной шапки в зависимости от ориентации ММП и суббурь, некоторые особенности морфологии // Полярные сияния и свечение ночного неба. № 28. С. 27–34. 1981.
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Kalegaev V.V., Cummnok J.A., Blomberg L.G. Magnetopause mapping to the ionosphere for northward IMF // Ann.Geophysicae. V. 25. № 12. P. 2615–2625. 2007.
- Baker J.B.H., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M., Förster M., Paschmann G., Donovan E.F., Tsyganenko N.A., Quinn J.M., Balogh A. Conjugate comparison of Super Dual Auroral Radar Network and Cluster electron drift instrument measurements of  $E \times B$  plasma drift // J. Geophys. Res. V. 109(A1). P. 01209–01229. doi:10.1029/2003JA009912. 2004.
- Balogh A., Carr C.M., Acuña M.H. et al. The Cluster magnetic field investigation: overview of in-flight performance and initial results // Ann.Geophysicae. V. 19. № 10. P. 1207–1217. 2001.
- Belenkaya E.S. High-latitude ionospheric convection patterns dependent on the variable IMF orientation // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. № 13. P. 1343–1354. 1998.
- Blomberg L.G., Cummnok J.A., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Kalegaev V.V. Transpolar aurora: time evolution, associated convection patterns, and a possible cause // Ann.Geophysicae. V. 23. № 5. P. 1917–1930. 2005.
- Cowley S.W.H., Morelli J.P., Lockwood M. Dependence of convective flow and particle precipitation in the high-latitude dayside ionosphere on the  $X$  and  $Y$  components of the IMF // J. Geophys. Res. V. 96(A4). P. 5557–5564. 1991.
- Crooker N.U. An evolution of antiparallel merging // Geophys. Res. Lett. V. 13. № 10. P. 1063–1066. 1986.
- Eriksson A.I., Andre M., Klecker B. et al. Electric field measurements on CLUSTER: comparing the double-probe and electron drift techniques // Ann. Geophysicae. V. 24. № 1. P. 275–289. 2006.
- Feldstein Y.I., Levitin A.E. Solar wind control of electric fields and currents in the ionosphere // J. Geomag. Geoelectr. V. 38. P. 1143–1182. 1986.
- Förster M., Paschmann G., Haaland S.E. et al. High-latitude plasma convection from Cluster EDI: Variances and solar wind correlations // Ann. Geophysicae. V. 25. № 7. P. 1691–1707. 2007.
- Förster M., Haaland S.E., Paschmann G. et al. High-latitude plasma convection during northward IMF as derived from in-situ magnetospheric Cluster EDI measurements // Ann. Geophysicae. V. 26. № 9. P. 2685–2700. 2008.
- Förster M., Feldstein Y.I., Haaland S.E., Dremukhina L.A., Gromova L.I., Levitin A.E. Magnetospheric convection from Cluster EDI measurements compared with the ground-based ionospheric convection model IZMEM // Ann. Geophysicae. V. 27. № 8. P. 3077–3087. 2009.
- Förster M., Feldstein Y.I., Gromova L.I., Dremukhina L.A., Levitin A.E., Haaland S.E. Plasma convection in the high-latitude ionosphere deduced from Cluster EDI data and IMF  $B_x$  component // Proc. 34-th Annual Apatity seminar “Physics of Auroral Phenomena”. ISBN978-5-91137-182-1. P. 42–45. 2011.
- Friis-Christensen E., Lassen K., Wilhjelm J., Wilcox J.M., Gonsalez W., Colburn D.S. Critical component of the Interplanetary Magnetic Field responsible for large geomagnetic effects in the polar cap // J. Geophys. Res. V. 77. № 19. P. 3371–3376. 1972.
- Haaland S.E., Paschmann G., Förster M., et al. High-latitude plasma convection from Cluster EDI measurements: method and IMF-dependence // Ann. Geophysicae. V. 25. № 1. P. 239–253. 2007.
- Haines G.V. Spherical cap harmonic analysis // J. Geophys. Res. V. 90(B3). P. 2583–2591. 1985.
- Kabin K., Rankin R., Marchand R., et al. Dynamic response of Earth’s magnetosphere to By reversals // J. Geophys. Res. V. 108(A3). P. 1132–1143. doi: 10.1029/2002JA009480. 2003.
- Levitin A.E., Afonina R.G., Belov B.A., Feldstein Y.I. Geomagnetic variations and field-aligned currents at northern high-latitudes and their relations to solar wind parameters // Philos. Trans. Roy. Soc. V. A304. P. 253–301. 1982.
- Newell P.T., Meng C.-I., Sibeck D.G., Lepping R. Some low-altitude cusp dependencies on the Interplanetary Magnetic Field // J. Geophys. Res. V. 94(A7). P. 8921–8927. 1989.
- Newell P.T., Liou K., Wilson G.R. Polar cap particle precipitation and aurora: review and commentary // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 2. P. 199–215. 2009.
- Paschmann G., Quinn J.M., Torbert R.B. et al. The Electron Drift Instrument on Cluster: overview of first results // Ann.Geophysicae. V. 19. № 10. P. 1273–1288. 2001.
- Papitashvili V.O., Rich F.J. High latitude ionospheric convection models derived from DMSP ion drift observations and parametrized by the interplanetary magnetic field strings and direction // J.Geophys.Res. V. 107(A8). P. 1198–1210. doi: 10.1029/2001JA000264. 2002.
- Peng Z., Wang C., Hu Y.Q. Role of IMF  $B_x$  in the solar wind–magnetosphere–ionosphere coupling // J. Geophys. Res. V. 115(A8). P. 8224–8230. doi: 10.1029/2010A015454. 2010.
- Weimer D.R., Ober D.M., Maynard N.C., Collier M.R., McComas D.J., Ness N.F., Smith C.W., Watermann J. Predicting interplanetary magnetic field (IMF) propagation delay times using the minimum variance technique // J. Geophys. Res. V. 108(A1). P. 1026–1037. doi: 10.1029/2002JA009405. 2003.