

УДК 523.745;550.386

## ПРОДОЛЬНЫЕ ТОКИ В ЗИМНЕМ И ЛЕТНЕМ ПОЛУШАРИЯХ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ $V_u$ ММП

© 2012 г. Р. Ю. Лукьянова<sup>1,2</sup>, А. Козловский<sup>3</sup>, Ф. Христиансен<sup>4</sup><sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. С.-Петербург<sup>2</sup>ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва<sup>3</sup>Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия<sup>4</sup>Датский технический университет, Копенгаген, Дания

e-mail: renata@aari.nw.ru; kozlovsk@sun3.oulu.fi; fch@space.dtu.dk

Поступила в редакцию 17.09.2010 г.

С помощью декомпозиции карт продольных токов (ПТ), построенных по данным измерений магнитного поля низколетящими спутниками с полярной орбитой, выделены структуры, контролируемые двумя факторами: знаком  $V_u$  ММП и сезоном года. Показано, что в летнем полушарии при любом знаке  $V_u$  продольные токи (ПТ) имеют одинаковую структуру, состоящую из основного приполюсного тока кругового сечения и тока обратного направления на дневной границе полярной шапки. В зимних условиях в зависимости от знака  $V_u$  реализуются два различных типа структур: для северной зимы при  $V_u < 0$  это приполюсный ток кругового сечения и обратный ток на ночной границе полярной шапки, а при  $V_u > 0$  токовые слои сильно вытянуты вдоль широты ниже  $80^\circ$  MLat, и лишь небольшая часть тока находится в полуденном секторе полярной шапки. Для южной зимы соответствующие структуры реализуются при противоположных знаках  $V_u$ . Даны оценки интенсивности ПТ, возникающих вследствие межполушарной асимметрии, и текущих вдоль замкнутых геомагнитных линий вблизи границы полярной шапки. Максимум плотности межполушарного тока составляет  $0.25 \mu\text{A}/\text{m}^2$  летом и  $0.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$  зимой, а полный ток, соответственно,  $5 \times 10^5$  и  $5 \times 10^4$  А.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферы северного и южного полушарий электродинамически связаны между собой как непосредственно, так и через магнитосферу Земли. Наклон земной оси, несовпадение географического и геомагнитного полюсов ведут к различиям в распределении ряда параметров в верхней атмосфере противоположных полушарий. Важную роль играют топология и эффективность взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром, определяемые, в основном, ориентацией ММП. Геомагнитные возмущения, возникающие в процессе такого взаимодействия в высокоширотной ионосфере, распространяются по проводящей ионосферной оболочке в более низкие широты, а по замкнутым силовым линиям земного диполя через магнитосферу — в противоположное полушарие. Внутримангнитосферные процессы, например, возникновение аномального сопротивления или динамика плазменного слоя также вносят свой вклад в специфику межполушарного взаимодействия. В этой ситуации часто применяемое зеркальное отображение распределения электрических полей и токов из одного полушария в другое является большим упрощением и было вызвано, главным образом, отсутствием необходимых моделей и недостаточным количеством данных наблюдений.

Данная работа является продолжением исследования распределения продольных токов (ПТ) и электрических полей в высокоширотных областях противоположных полушарий с помощью моделирования и анализа спутниковых измерений магнитного поля [Лукьянова 2005; Lukianova and Christiansen, 2006; Лукьянова и др., 2010]. В предыдущей работе [Лукьянова и др., 2010], применив метод вычитания полных картин конвекции и ПТ для противоположных знаков азимутальной ( $V_u$ ) компоненты ММП при сохранении других контролируемых параметров неизменными, мы выделили структуры, возникающие в полярной шапке (в области открытых линий геомагнитного поля), которые обусловлены прямым проникновением  $V_u$  ММП в магнитосферу в высоких широтах. Полученные структуры ПТ оказались практически антисимметричны в противоположных полушариях так, что при фиксированном знаке  $V_u$  ММП соответствующий ПТ втекает в одном полушарии и вытекает из другого, а вдоль замкнутых силовых линий перетекает ток между полушариями. Было показано, что для условий лета и равноденствия в обоих полушариях область основного втекающего/вытекающего ПТ имеет круговую форму, и ток сосредоточен у полюса вблизи полуденного меридиана. Соответствующие системы конвекции имеют вид вихря, закручивающегося вокруг полюса. В зимних же

Комбинации соотношения между  $Z$  и  $Y$  компонентами ММП

	$V_y < 0$	$V_y = 0$	$V_y > 0$
$V_z > 0$	4	3	2
$V_z = 0$	5	0	1
$V_z < 0$	6	7	8

условиях какой-либо четкой структуры ПТ получить не удалось, а рассчитанная картина конвекции фактически состояла не из одного, а из двух вихрей. В этой связи было высказано предположение, что, так как при использованном подходе не учитывалось возможное смещение полярной шапки вдоль меридиана утро-вечер при смене знака  $V_y$ , на краях полярной шапки могла происходить неполная взаимная компенсация токов, не связанных с  $V_y$ . Однако, специального анализа в этой предыдущей работе [Лукьянова и др., 2010] не проводилось, и вопрос о том, является ли качественное отличие зимнего распределения всего лишь артефактом метода, или оно обусловлено более глубокими физическими причинами, остался невыясненным. Рассмотрению этой проблемы посвящена данная статья.

Следует отметить, что сезонные различия отмечаются и в отклике внутренней магнитосферы на изменение знака  $V_y$  ММП. Так, в работах [Petrukovich et al., 2007; Petrukovich, 2009] показано, что величина  $V_y$  в плазменном слое ( $V_{yT}$ ) в ряде случаев может быть равной или даже превышать значение  $V_y$  ММП. При этом наклон земного диполя и формирование  $V_{yT}$  связаны между собой так, что летний (зимний) для северного полушария сезон предпочтителен для появления в плазменном слое положительных (отрицательных) значений  $V_{yT}$ . Несимметрия в межполушарном распределении электрических полей, токов и проводимости является источником возникновения в области замкнутых геомагнитных линий токов перетекания из одного полушария в другое (межполушарных продольных токов – МПТ), и при определенных условиях эти токи могут создавать дополнительное азимутальное магнитное поле в хвосте магнитосферы. Таким образом, различия в распределении электродинамических параметров в противоположных полушариях и характеристики МПТ тесно взаимосвязаны. Получение и оценка величины МПТ, возникающих вследствие межполушарной асимметрии, обусловленной совместным действием двух факторов – наклоном земного диполя и знаком  $V_y$  ММП, является второй задачей данной работы.

## 2. ДАННЫЕ И МОДЕЛИ

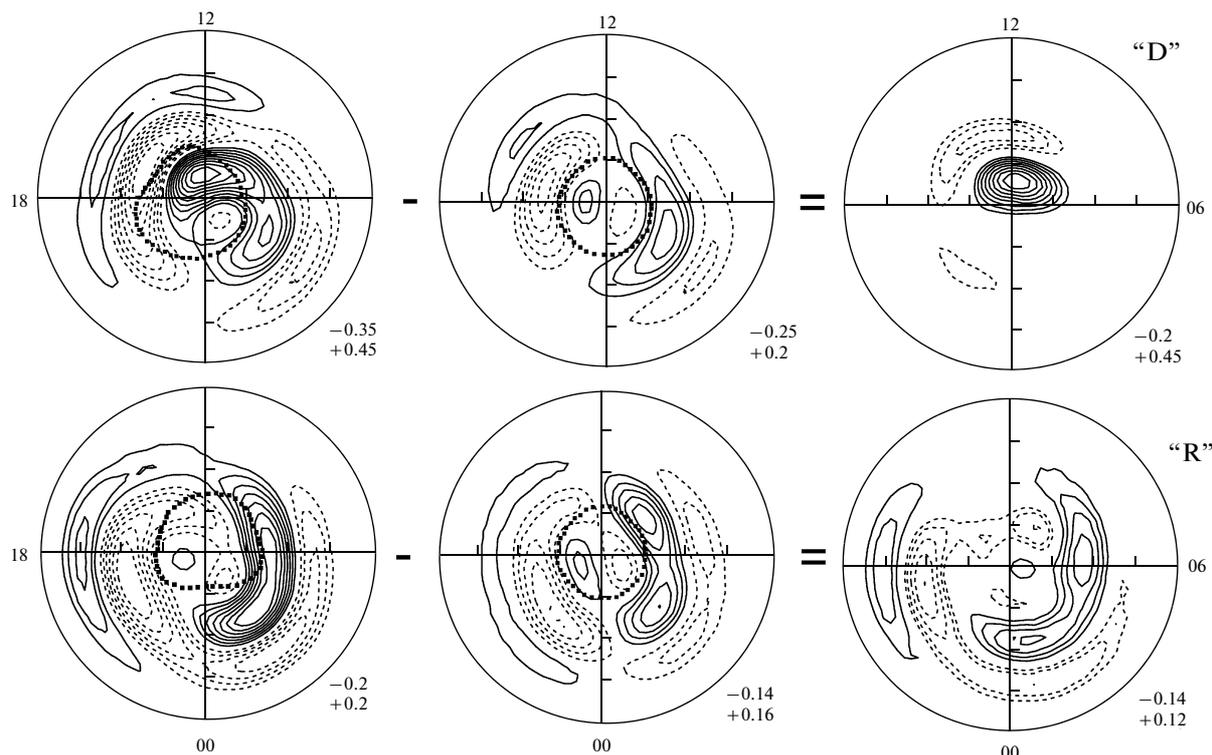
В работе использовались статистические карты ПТ, построенные по данным спутников *Magsat*, *Oersted* и *Champ* [Christiansen et al., 2002; Paritashvili et al., 2002]. Двумерные карты получены на основе статистического анализа отдельных пролетов спутников над высокоширотной ионосферой при ряде допущений (см. [Лукьянова и др., 2010]), однако очень большое количество данных позволило представить распределение ПТ в виде реалистичной модели, параметризованной по полушарию, сезону года, величине и ориентации ММП. Девять основных комбинаций соотношений между  $Z$  и  $Y$  компонентами ММП ( $X$  компонента не учитывалась) представлены в таблице и обозначены цифрами от 0 до 8. Важно отметить, что в рамках модели выделено распределение ПТ для условий нулевого ММП, что будет использовано при дальнейшем анализе.

Распределение электрического потенциала рассчитывалось с помощью модели конвекции [Lukianova and Christiansen, 2006]. При расчете картин конвекции в качестве входных данных (источника потенциала) задавалось распределение ПТ, скарированное на расчетную сетку. Величина полного вектора ММП  $V_T = \sqrt{V_z^2 + V_y^2}$  выбрана равной  $\approx 5$  нТл. Задавалось также распределение интегральной проводимости ионосферы, учитывался вклад солнечного УФ излучения [Robinson and Vondrak, 1984] и высыпающихся частиц [Hardy et al., 1987]. При расчете проводимости выбирались следующие значения параметров: поток солнечного радиоизлучения  $F_{10.7} = 150$ , индекс геомагнитной активности  $Kp = 2$  для  $V_T \neq 0$  и  $Kp = 1$  для  $V_T = 0$ . Проводимость и ПТ усреднялись за 2-месячный интервал, центрированный на день летнего и зимнего солнцестояния. Для удобства изложения в дальнейшем при обозначении сезона используются также названия месяцев июнь и декабрь.

При смене знака  $V_y$  ММП вследствие изменения общей топологии магнитного поля положение границ полярной шапки может несколько смещаться на утреннюю или вечернюю сторону. Кроме того, размер и форма шапки контролируются интенсивностью и направлением вертикальной компоненты ММП. Определение границы областей открытых и замкнутых силовых линий проводилось по модели GEOPACK-2008 [Tsyganenko and Sitnov, 2005] (<http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>).

## 3. МЕТОД

Для выявления структур ПТ, обусловленных действием определенной компоненты ММП, применялась методика декомпозиции полных,



**Рис. 1.** Распределение ПТ в северном (верхний ряд) и южном (нижний ряд) полушариях для условий июньского солнцестояния при  $B_u < 0$ . Карты представлены как разложение полной картины при  $B_z = 0$ ,  $B_u = -5$  нТл (первая колонка) на токи при нулевом ММП (вторая колонка) и токи, обусловленные только  $B_u$  (третья колонка). Величина максимальной плотности втекающего/вытекающего тока указана в нижнем правом углу каждой карты; втекающий ток – сплошные линии, а вытекающий – пунктирные линии; шаг между изолиниями в верхнем ряду  $0.05 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , в нижнем ряду  $0.03 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ; внешний широтный круг на  $50^\circ$  исправленной геомагнитной широты. Граница полярной шапки обозначена толстой пунктирной линией. Буквы “D” и “R” обозначают тип ПТ (см. текст); знаки “-” и “=” между панелями указывают на процедуру декомпозиции.

реально наблюдаемых картин ПТ для фиксированного сезона. При этом предполагалось, что полные картины представляют собой линейную суперпозицию распределения при нулевом ММП, когда  $B_z = B_u = 0$  (номер 0 в таблице) и распределения при ненулевом ММП (комбинации 1–8 в таблице). Принцип суперпозиции в отношении картин конвекции применялся в ряде работ [например, Papitashvili and Rich, 2002; Kabin et al., 2003], где было показано, что он дает хорошее согласие с экспериментом. Этот принцип также применим и для продольных токов. Так, эффект  $B_u$  ММП будет максимально выделяться, если из картин для  $B_z = 0$ ,  $B_u = \pm 5$  нТл вычесть картину для  $B_T = 0$  (соответственно, комбинации 1, 5 и 0 в таблице). При изменении величины и знака  $B_u$  ММП следует контролировать положение границ полярной шапки и осуществлять декомпозицию, соблюдая по возможности точное наложение шапок при изменении параметров ММП.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 4.1 Распределение ПТ в различные сезоны при $B_z = 0$ , $B_u = \pm 5$ нТл

На рис. 1 приведены карты ПТ в северном (верхний ряд) и южном (нижний ряд) полушариях для условий июньского солнцестояния при  $B_u < 0$ . Карты представлены как декомпозиция полной картины ПТ при  $B_z = 0$ ,  $B_u = -5$  нТл (первая колонка) на две составляющие: токи при нулевом ММП (вторая колонка) и токи, обусловленные отрицательным  $B_u$  (третья колонка). Знаками “-” и “=” между соответствующими панелями обозначена процедура разделения. На картах ПТ также нанесены границы полярной шапки. Можно видеть, что границы, рассчитанные по модели [Tsyganenko and Sitnov, 2005], достаточно хорошо совпадают с положением ПТ зоны 1 [Iijima and Potemra, 1976], а ток, обусловленный  $B_u$  находится внутри области открытых силовых линий геомагнитного поля. При переходе от условий  $B_u < 0$  к условиям  $B_u = 0$  шапка расширяется в вечерний (утренний) сектор в северном (южном) полушарии, но не бо-

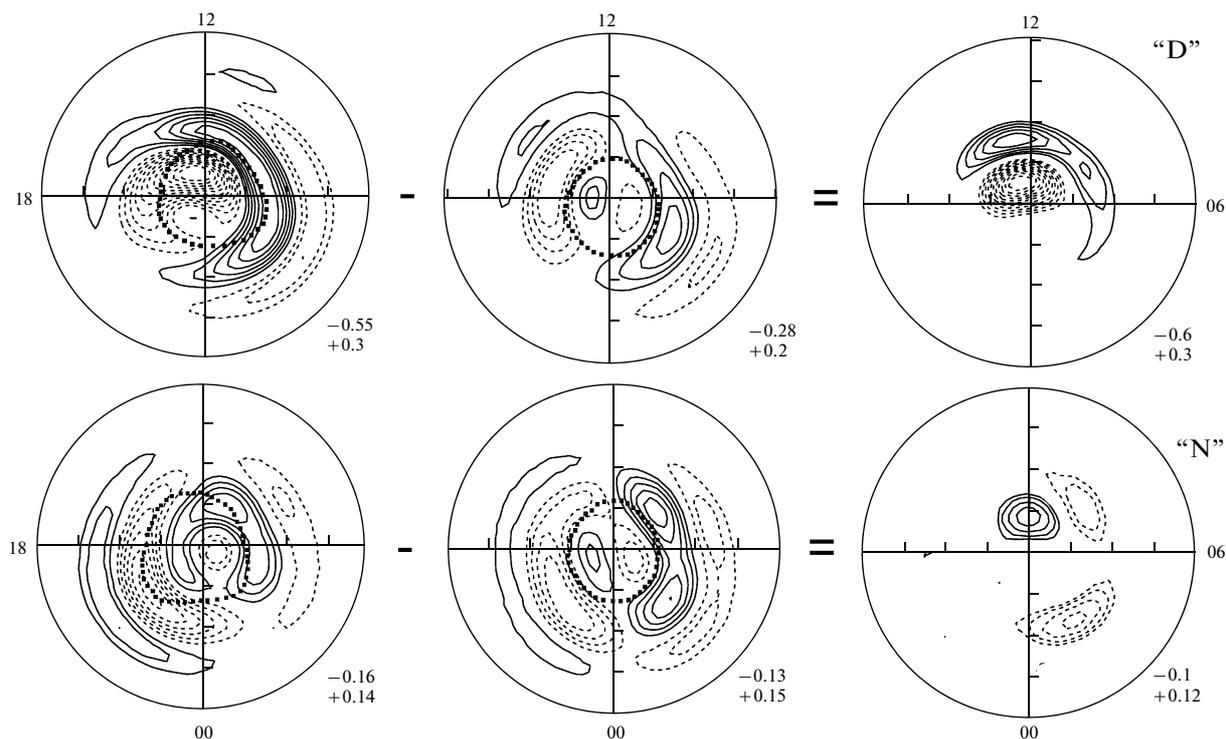


Рис. 2. То же, что и рис. 1, но для  $B_u > 0$ . Буквы “D” и “N” обозначают тип ПТ (см. текст).

лее, чем на  $3^\circ$ , и такое смещение не оказывает большого влияния на результат декомпозиции. Подчеркнем, что конфигурация, представленная в крайней правой колонке, в реальности не наблюдается, но входит составной частью в полную картину ПТ. Результат декомпозиции, представленный в третьей колонке, показывает, что распределения ПТ в противоположных полушариях качественно отличаются друг от друга. Так, в северном летнем полушарии втекающий ПТ круговой формы сосредоточен у полюса на полуденном меридиане и подковообразный вытекающий ПТ расположен у дневной границы шапки. Этот тип обозначен буквой “D”. В южном же зимнем полушарии в распределении доминирует структура, состоящая из двух слоев противоположной полярности, приуроченных к утренней и вечерней сторонам. На рис. 1 такой тип обозначен как “R”, поскольку он подобен системе ПТ зоны R1 [Iijima and Potemra, 1976].

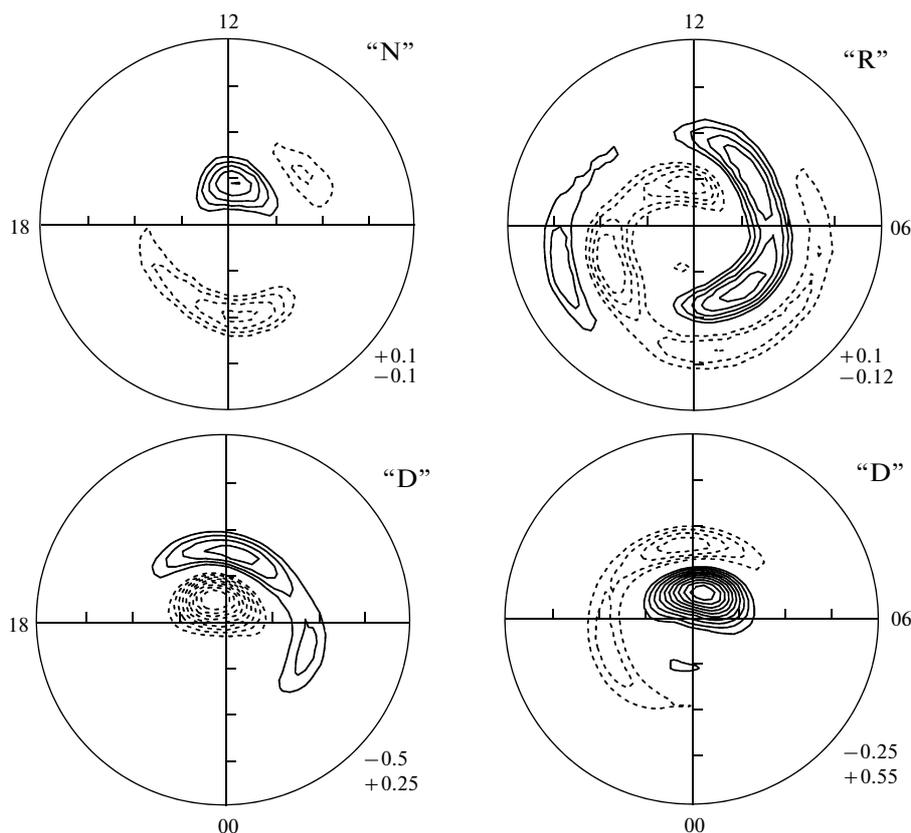
На рисунке 2, организованном аналогично рис. 1, приведены карты ПТ в двух полушариях для условий июньского солнцестояния при  $B_u > 0$ . Здесь мы также видим межполушарные (сезонные) различия в структуре изолиний ПТ. Северный вытекающий и южный втекающий токи, обусловленные электрическим полем солнечного ветра, направленным при  $B_u > 0$  с юга на север, расположены у полюса на полуденном меридиане и различаются лишь интенсивностью. Структурные

различия наблюдаются в низкоширотной ветви ПТ, а именно, летом токи перетекания сосредоточены на дневной стороне (тип D), а зимой — на ночной. Этот тип конфигурации изолиний ПТ обозначен буквой “N”.

На рисунке 3 показаны результаты декомпозиции ПТ (исходные карты не приведены) в двух полушариях для условий декабрьского солнцестояния при  $B_u < 0$  и  $B_u > 0$ . На этом рисунке также видно, что летом структура изолиний одинакова при обоих знаках  $B_u$ , и токи отличаются лишь полярностью, тогда как зимой при  $B_u < 0$  наблюдается приполюсный кругообразный ток и ток перетекания, сосредоточенный на ночной стороне, а при  $B_u > 0$  реализуется структура, состоящая из протяженных слоев, вытянутых вдоль параллелей. Таким образом, сезонные особенности в распределении ПТ проявляются по-разному при противоположных знаках  $B_u$ , и особенное влияние знак  $B_u$  имеет на зимнее полушарие. Это, в свою очередь, ведет к ряду следствий, которые будет обсуждаться ниже.

#### 4.2 Конвекция

Конфигурация эквипотенциалей, вдоль которых движется ионосферная плазма, тесно связана с распределением ПТ. На рис. 4 представлены картины конвекции, рассчитанные по модели [Lukianova and Christiansen, 2006], когда в качестве входных данных (источника потенциала) за-



**Рис. 3.** Распределение ПТ, обусловленные  $B_u$ , в северном (верхний ряд) и южном (нижний ряд) полушариях для условий декабрьского солнцестояния при  $B_u < 0$  (первая колонка) и  $B_u > 0$  (вторая колонка). Шаг между изолиниями в зимнем полушарии  $0.05 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , в летнем полушарии  $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Обозначения аналогичны рис. 1 и 2.

давалось распределение ПТ, приведенное на рис. 3 (зима в северном полушарии, лето в южном). Можно видеть, что в зависимости от сочетания сезон/знак  $B_u$  имеется три вида конфигураций, а именно, (\*) круговые вихри вокруг полюса для лета при  $B_u < 0$ ; (\*\*) двухвихревая структура с течением плазмы через полярную шапку в антисолнечном направлении с наклоном на более ранние часы, для зимы при  $B_u > 0$ ; (\*\*\*) квази-двухвихревая структура с развитым вихрем, фокус которого расположен у полюса в предполуденном секторе, и более слабый вихрь в секторе 18–24 MLT для зимы при  $B_u < 0$ . Аналогично рисунку 3 эти виды конфигураций обозначены соответственно буквами D, R и N. Видно, что в летнем полушарии картины конвекции подобны и зеркально отображаются относительно меридиана день–ночь при смене знака  $B_u$ , тогда как в зимнем полушарии они сильно различаются. Вследствие этого отсутствует и перекрестное (юг/север) подобие структуры изолиний в противоположных полушариях при смене знака  $B_u$ . Еще раз напомним, что конфигурации, представленные на рис. 4, есть результат декомпозиции и не могут наблюдаться изолированно, а входят составной частью в полную реально наблюдаемую картину конвекции.

Однако, интересно отметить, что конвекция, похожая на структуру (\*\*), но с еще более “Г”-образной формой вечерней ячейки иногда наблюдается в системой радаров SuperDARN северного полушария, и это бывает исключительно в декабре при доминировании положительного  $B_u$  ММП [Watanabe et al., 2010].

#### 4.3 Межполушарный продольный ток

Распределение ПТ, которое обусловлено исключительно  $B_u$  ММП (представленное на рисунках 1–3 справа), дает возможность оценить положение и интенсивность межполушарных продольных токов (МПТ), перетекающих из одного полушария в другое вдоль замкнутых силовых линий вблизи границы полярной шапки и появляющихся вследствие асимметрии, возникающей под воздействием двух факторов: знака  $B_u$  ММП и сезонных различий в проводимости ионосферы.

Можно отметить следующие особенности распределения МПТ: (1) не происходит простого зеркального отображения токовых структур при смене знака  $B_u$  и при переходе из летнего полушария

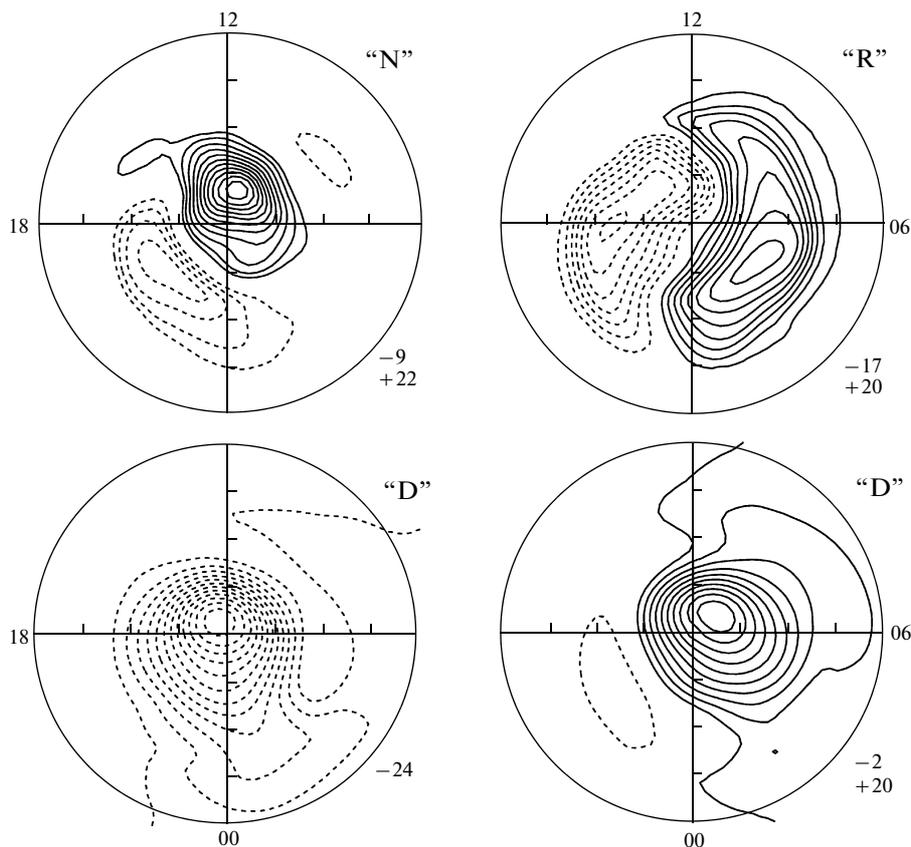


Рис. 4. То же, что и рис. 3, но для электрического потенциала. Шаг между изолиниями 2 кВ.

в зимнее (с учетом сезонного изменения интенсивности); (2) летом МПТ сосредоточен на дневной стороне; (3) зимой определенный знак  $B_y$  способствует появлению либо МПТ, сосредоточенному на ночной стороне, либо развитию другой системы ПТ, состоящей из пары слоев противоположной полярности, сильно вытянутых вдоль широты и образующих спиралевидную структуру. На рисунках 1–3 можно видеть, что в июне (декабре) при  $B_y > 0$  ( $B_y < 0$ ) МПТ в околополуночном секторе вытекает из южного (северного) полушария (тип N). При противоположных знаках  $B_y$  в соответствующем зимнем полушарии образуются вытянутые вдоль широты слои ПТ (тип R1).

Интенсивность МПТ распределяется следующим образом. Летом максимум плотности МПТ, находящийся в полуденном секторе на  $\sim 75^\circ$  MLat, составляет около  $0.25 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , что в два раза меньше, чем для приполюсного тока. Величина полного тока в низкоширотной ветви примерно равна  $10^5$ – $10^6$  А. В противоположном летнем полушарии при конфигурации типа N максимум плотности находится в послеполуночном секторе на  $\sim 70^\circ$  MLat и составляет  $0.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , то есть плотность тока высокоширотной и низкоширотной ветвей практически одинакова. В среднем, пол-

ный ток низкоширотной ветви оценивается как  $4 \times 10^4$  А, что даже больше, чем ток высокоширотной ветви ( $\sim 3 \times 10^4$  А). При типе R в распределении тока имеется фактически четыре максимума плотности  $\geq 0.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ : в послеполуночном, утреннем, полуденном и вечернем секторах, при этом полуденный максимум явно находится внутри полярной шапки.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предыдущей работе, посвященной исследованию распределения ПТ и электрических полей, контролируемых азимутальной компонентой ММП и сезоном года [Лукьянова и др., 2010], было показано, что в зимний сезон эти распределения качественно отличаются от распределений, характерных для других сезонов. Для лета и равноденствия были получены достаточно четко структурированные картины, которые хорошо соотносились с базовыми концепциями пересоединения и проникновения  $B_y$  ММП в магнитосферу. В то же время, структуры, полученные для зимних условий, оказались более сложными, и не могли быть удовлетворительно объяснены в рамках модели, применимой для других сезонов. В

настоящей работе влияние определенного знака  $V_y$  в сочетании с определенным сезоном рассмотрено более подробно с целью выявить причины и обсудить следствия такого рода “зимней аномалии”.

В предположении, что каждая полная картина ПТ представляет собой линейную суперпозицию элементов, контролируемых процессом взаимодействия магнитосферы с вертикальной  $Z$  и азимутальной  $Y$  компонентами ММП, включая условия ММП = 0, были выделены структуры, которые возникают благодаря наличию в солнечном ветре только поля  $V_y$  того или иного знака. При этом исключено влияние поля  $V_z$  и квазивязкого взаимодействия. Еще раз отметим, что в реальности выделенные структуры не могут наблюдаться как изолированные, но они присутствуют как составляющие в любой полной картина ПТ при  $V_y \neq 0$ .

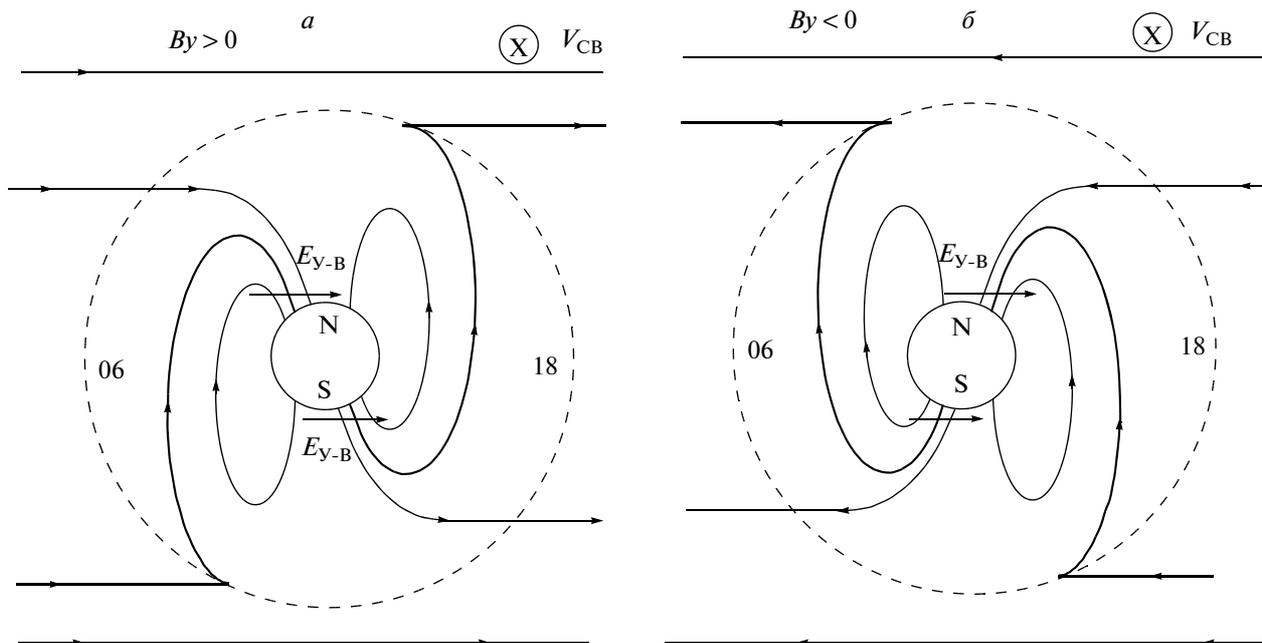
Результаты декомпозиции показывают, что ПТ в летнем полушарии и при  $V_y < 0$ , и при  $V_y > 0$  имеют одинаковую структуру, состоящую из основного приполюсного тока кругового сечения и низкоширотной ветви тока обратного направления на дневной границе полярной шапки. В зимних условиях в зависимости от знака  $V_y$  реализуются два различных типа структур: для декабря при  $V_y < 0$  это приполюсный ток кругового сечения и обратный ток на ночной границе полярной шапки (тип N), тогда как при  $V_y > 0$  — это токи типа R, вытянутые вдоль широтных кругов. Лишь небольшая часть тока находится в полуденном секторе полярной шапки. Для июня полушария и знаки  $V_y$  заменяются на противоположные. В соответствии с особенностями распределения ПТ структура конвекции также может быть трех типов, два из которых реализуются зимой при различных знаках  $V_y$  (рис. 4). Положение границы, разделяющей области открытых и замкнутых линий геомагнитного поля показывает, что сдвиг полярной шапки на утреннюю или вечернюю сторону при смене знака  $V_y$  не является главной причиной полученных сезонных различий и, вероятно, развитие особенных систем ПТ (конвекции) зимой имеет другие причины, связанные с особенностями топологии магнитных силовых линий.

Известно, что система R ПТ [Iijima and Potemra, 1976] соответствует двух-вихревой конвекции, обусловленной пересоединением при южной вертикальной компоненте ММП [Dungey, 1961] и механизмом вязкого трения в пограничном слое магнитосферы [Axford and Hines, 1961]. Кроме этого, пересоединение происходит и с азимутальной компонентой ММП [Nishida, 1971]. Геомагнитные силовые линии, соединенные с силовыми линиями ММП, независимо от направления этого поля вдоль оси  $Y$  движутся через полярные

шапки с дневной стороны на ночную и возвращаются обратно через низкие и средние широты, как и в случае южного ММП.  $V_y$  компонента ММП (положительное направление — с утренней на вечернюю сторону) генерирует и электрическое поле, направленное с юга на север, создавая при этом разность потенциалов между долями магнитосферы. В системе ПТ, контролируемой  $V_y$ , вытекающий или втекающий ток располагается в области дневного каспа. При  $V_y > 0$  в северной (южной) полярной шапке усиливается вытекающий (втекающий) ПТ. При  $V_y < 0$  направление токов меняется на обратное. Таким образом, в высокоширотной области  $V_y$  ММП создает две составляющие электрического поля: поле, направленное с утренней стороны на вечернюю, и разность потенциалов между полярными шапками противоположных полушарий, следствием которого является радиальное электрическое поле в шапках и азимутальное движение плазмы вокруг полюсов, причем направление вращения на юге и на севере противоположно [Ляцкий, 1978; Kozlovsky et al., 2003; Лукьянова и др., 2010].

В терминах ПТ это и соответствует двум конфигурациям: системе токов-слоев (тип R) и круговому приполюсному току с низкоширотной ветвью межполушарного перетекания (типы N и D). Как показано выше, в условиях солнцестояния при  $V_y \pm 5$  нТл обнаруживаются все типы ПТ, при этом тип R доминирует в северном зимнем (декабрь) полушарии при  $V_y > 0$  и в южном зимнем (июнь) полушарии при  $V_y < 0$ , а тип N — в зимних условиях при противоположном знаке  $V_y$ . ПТ типа R связан с пересоединением и электрическим полем утро—вечер, а ПТ типов N и D — с разностью потенциалов между полярными шапками противоположных полушарий. Обычно эффект межполушарной разности потенциалов превышает эффект пересоединения  $V_y$  на флангах магнитосферы. Однако, доминирование R свидетельствует о том, что в условиях декабрь/ $V_y > 0$  (июнь/ $V_y < 0$ ) электрическое поле утро—вечер в северном (южном) полушарии сравнимо или превышает радиальное электрическое поле, а пересоединение с  $V_y$  в высокоширотных частях долей хвоста магнитосферы идет более интенсивно.

На рисунке 5, следуя работе [Stern, 1973], показана упрощенная схема пересоединения силовых линий геомагнитного поля с  $Y$  и  $X$  компонентами ММП в сечении магнитосферы плоскостью утренне-вечернего меридиана (рис. 5а, б). На рисунке 5а (5б) представлена топология при  $V_y > 0$  (при  $V_y < 0$  картина отображается зеркально), из которой можно видеть, что пересоединение интенсивно происходит в южной (северной) доле магнитосферы, и при этом соответствующее электрическое поле утро—вечер картируется в противоположное полушарие. Свою роль здесь может играть  $X$  компонента [Peng et al., 2010], ко-



**Рис. 5.** Схема пересоединения силовых линий геомагнитного поля с  $Y$  компонентой ММП в сечении магнитосферы плоскостью утренне-вечернего меридиана: при  $B_y > 0$  (рис. 5а),  $B_y < 0$  (рис. 5б). Вид от солнца. Толстой линией обозначена условно первая пересоединившаяся силовая линия.

торая в секторной структуре ММП тесно связана со знаком  $Y$  компоненты (противоположные знаки  $X$  и  $Y$  в определенном секторе). Топология пересоединения с  $B_x$  ММП в сезон декабрьского (июньского) солнцестояния такова, что сочетание декабрь/ $B_x < 0$  (июнь/ $B_x > 0$ ) также способствует пересоединению в южном (северном) полушарии при  $B_y > 0$  ( $B_y < 0$ ), а поле утро–вечер эффективно картируется в противоположное полушарие.

Структуры ПТ, полученные в результате декомпозиции, позволяют идентифицировать токи, которые (по крайней мере частично) текут между полушариями вдоль замкнутых силовых линий, т.е. межполушарные продольные токи (МПТ). В летнем полушарии МПТ сосредоточены на дневной стороне в области высокой ионосферной проводимости. В зимнем полушарии определенное сочетание двух факторов – знака  $B_y$  и сезона, способствует тому, чтобы МПТ концентрировались на ночной стороне. Так, рисунки 1–3 показывают, что этому способствуют условия декабрь/ $B_y < 0$  (ночной МПТ в северном полушарии) и июнь/ $B_y > 0$  (ночной МПТ в южном полушарии). Эти токи могут замыкаться через хвост магнитосферы, создавая там дополнительное азимутальное магнитное поле, хотя на данном этапе трудно определить каким именно путем происходит замыкание. Одним из возможных маршрутов перетекания может быть путь, предложенный в работе [Pudovkin and Zaitseva, 1993], в которой показано, что дневная и ночная ветви

МПТ могут быть взаимосвязаны. Интересно отметить, что именно при приведенном выше сочетании  $B_y$  и сезона наблюдались экстремальные (равные или превышающие  $B_y$  ММП) значения  $B_{yT}$  в плазменном слое [Petrukovich, 2009].

Что касается интенсивности МПТ, то по использованном здесь спутниковым данным максимум плотности тока получается равным  $0.25 \mu\text{A}/\text{m}^2$  летом и  $\sim 0.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$  зимой. Полный ток, соответственно,  $\sim 5 \times 10^5 \text{ A}$  и  $\sim 5 \times 10^4 \text{ A}$ . Эти значения можно сравнить с некоторыми опубликованными ранее оценками. Так, плотность МПТ в послеполуночном секторе, определенная в работе [Kozlovsky et al., 2003], составила  $0.6 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . На основе моделирования магнитосферных токов в работе [Alexeev et al., 1993] была получена величина полного МПТ, равная  $10^3 \text{ A}$ . Расхождение в оценках можно связать с тем, что, как отмечалось в работе [Laundal and Ostgaard, 2009], МПТ пока трудно наблюдаемы и недостаточно изучены.

## 6. ВЫВОДЫ

С помощью декомпозиции карт продольных токов, построенных по данным измерений магнитного поля низколетящими спутниками с полярной орбитой, получены структуры, контролируемые двумя факторами: знаком  $B_y$  ММП и сезоном года. В летнем полушарии при любом знаке  $B_y$  ПТ имеет одинаковую структуру, состоящую из основного приполюсного тока кругового

сечения и тока обратного направления на дневной границе полярной шапки. В зимних условиях в зависимости от знака  $B_y$  реализуются два различных типа структур: (\*) при  $B_y < 0$  это приплюснутый ток кругового сечения и обратный ток на ночной границе полярной шапки, (\*\*) при  $B_y > 0$  это токовые слои, вытянутые вдоль широтных кругов ниже  $80^\circ$  MLat, и только небольшая часть тока находится в полуденном секторе полярной шапки. Оценки величины ПТ, возникающего из-за межполушарной асимметрии, и текущего вдоль замкнутых геомагнитных линий дают максимум плотности межполушарного тока  $\sim 0.25 \mu\text{A}/\text{m}^2$  летом и  $\sim 0.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$  зимой, а полный ток, соответственно,  $\sim 5 \times 10^5$  А и  $\sim 5 \times 10^4$  А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лукьянова Р.Ю. Асимметрия распределения электрического потенциала в ионосфере противоположных полушарий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 4. С. 474–479. 2005.
- Лукьянова Р.Ю., Козловский А., Христиансен Ф. Асимметричные структуры продольных токов и конвекции ионосферной плазмы, контролируемые азимутальной компонентой ММП и сезоном года // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 5. С. 695–706. 2010.
- Ляцкий В.Б. Токовые системы магнитосферно ионосферных возмущений // Л.: Наука, 196 с. 1978.
- Alexeev I.I., Belenkaya E. S., Kalegaev V.V., Lyutov Yu.G. Electric fields and field-aligned current generation in the magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 92. A3. P. 4041–4051. 1993.
- Axford W. I., Hines C. O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms // Can. J. Phys. V. 39. P. 1433–1464. 1961.
- Dungey J. W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. № 6, P. 47–48, doi:10.1103/PhysRevLett.6.47. 1961.
- Christiansen F., Papitashvili, V. O., Neubert T. Seasonal variations of high-latitude field-aligned current system inferred from Orsted and Magsat observations // J. Geophys. Res. V. 107. A2. doi:10.1029/2001JA900104. 2002.
- Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J. Statistical and functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux and conductivity // J. Geophys. Res. V. 92. P. 12.275\_12.282. 1987.
- Iijima T., Potemra T.A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorm // J. Geophys. Res., V. 81, P. 3999. 1976.
- Kabin K., Rankin R., Marchand R., Gombosi T.I., Clauer C.R., Ridley A.J., Papitashvili V.O., DeZeeuw D.L. Dynamic response of Earth's magnetosphere to By reversals // J. Geophys. Res. 108. A3. 1132. doi:10.1029/2002JA009480. 2003.
- Kozlovsky A., Turunen T., Koustov A., Parks G. IMF By effects in the magnetospheric convection on closed magnetic field lines // Geophys. Res. Lett. V. 30. № 24. P. 2261–2265. 2003.
- Laundal K. M., Ostgaard N. Asymmetric auroral intensities in the Earth's Northern and Southern hemispheres // Nature. 460, Issue 7254, P. 491–493. 2009.
- Lukianova R., Christiansen F. Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents // J. Geophys. Res. V. 111. A03213. doi:10.1029/2006JA011950. 2006.
- Nishida A. Interplanetary origin of electric fields in the magnetosphere // Cosmic Electroduct. V. 2. P. 350–374. 1971.
- Papitashvili V.O., Christiansen F., Neubert T. A new model of field-aligned currents derived from high-precision satellite magnetic field data // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 14. P. 1683–1686. 2002.
- Papitashvili V.O., Rich F.J. High-latitude ionospheric convection models derived from Defense Meteorological Satellite Program ion drift observations and parameterized by the interplanetary magnetic field strength and direction // J. Geophys. Res. V. 107. A8. P. 1198–1208. 2002.
- Peng Z., Wang C., Hu Y.Q. Role of IMF Bx in the solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling // J. Geophys. Res. V. 115. A08224. doi:10.1029/2010JA015454. 2010.
- Petrukovich A.A., Baumjohann W., Nakamura R., Runov A., Balogh A., Reme H. Thinning and stretching of the plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 112. A10213. doi:10.1029/2007JA012349. 2007.
- Petrukovich A.A. Dipole tilt effect in plasma sheet By: statistical model and extreme values // Ann. Geophysicae. V. 27. P. 1343–1352. 2009.
- Pudovkin M.I., Zaitseva S.I. DPY field-aligned currents and intensity of the By IMF penetrated into the magnetotail // Planet. Space Sci. V. 41. № 5. P. 405–408. 1993.
- Robinson R.M., Vondrak R.R. Measurements of E region ionization and conductivity produced by solar illumination at high latitudes // J. Geophys. Res. V. 89. P. 3951–3956. 1984.
- Stern D. P. A study of the electric field in an open magnetospheric model // J. Geophys. Res. V. 78. P. 7292–7305. 1973.
- Tsyganenko, N. A., Sitnov M. I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 110. A03208. doi:10.1029/2004JA010798. 2005.
- Watanabe M., Kabin K., Sofko G.J., Rankin R., Gombosi T.I., Ridley A.J. Dipole tilt effects on the magnetosphere-ionosphere convection system during interplanetary magnetic field By-dominated periods: MHD modeling // J. Geophys. Res. V. 115. A07218. doi:10.1029/2009JA014910. 2010.