

ДИНАМИКА АСИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ ВО ВРЕМЯ СУББУРЬ В СЕЗОН РАВНОДЕНСТВИЯ

DYNAMICS OF DISTRIBUTION ASYMMETRY OF FIELD-ALIGNED CURRENTS DURING SUBSTORMS IN THE EQUINOX SEASON

В.В. Мишин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vladm@iszf.irk.ru*

В.М. Мишин[†]

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия*

М.А. Курикалова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kurikalova@iszf.irk.ru*

V.V. Mishin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vladm@iszf.irk.ru*

V.M. Mishin[†]

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia*

M.A. Kurikalova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kurikalova@iszf.irk.ru*

Аннотация. На основе техники инверсии магнитограмм по данным мировой сети магнитометров исследуется динамика распределения продольных токов в ионосфере Северного полушария. Исследование проведено в период равноденствия в ходе двух суббурь во время длительного интервала с неизменной по знаку и величине азимутальной компонентой межпланетного магнитного поля. Обнаружено изменение знака асимметрии утро–вечер в распределении интенсивности продольных токов при переходе от одной суббури к другой. Причину этого изменения мы связываем с суточным вращением оси геомагнитного диполя, перемещением терминатора относительно центра полярной шапки, вызвавшим существенное изменение освещенности полярной ионосферы и ее проводимости. Кроме того, впервые обнаружена быстрая (в течение нескольких минут) смена знака асимметрии во время взрывной фазы первой суббури при нахождении терминатора вблизи центра полярной шапки и при равной освещенности полярной ионосферы в обоих полушариях. Мы предполагаем, что такая быстрая динамика асимметрии продольных токов при неизменной азимутальной компоненте ММП в период равноденствия могла быть следствием неустойчивости симметрии освещенности и проводимости ионосфер двух полушарий из-за суточного вращения Земли и сильной межполушарной асимметрии геомагнитного поля, что могло вызвать протекание межполушарного продольного тока.

Ключевые слова: буря, суббуря, продольные токи, асимметрия утро–вечер.

Abstract. We continue to study the physical processes occurring during the August 17, 2001 magnetospheric storm by analyzing the dynamics of the intensity of field-aligned currents (FACs) in Iijima—Potemra Region 1 in the polar ionospheres of two hemispheres, using the modernized magnetogram inversion technique. The results obtained on the dynamics of the FAC asymmetry of two types (dawn–dusk and interhemispheric), as well as the previously obtained regularities in the behavior of Hall currents and polar cap boundaries depending on the large azimuthal component of the interplanetary magnetic field (IMF), observed during the storm, and the seasonal behavior of the conductivity are consistent with the open magnetosphere model and with satellite observations of auroras in two hemispheres. We have shown that the weakening of the asymmetry of two types in the FAC distribution during substorms in the storm under study occurs almost completely in the winter hemisphere and is much weaker in the summer one. We associate this phenomenon with the predominance of the effect of long-term exposure to the azimuthal IMF component in the sunlit polar ionosphere of the summer hemisphere over the substorm symmetrization effect of the night magnetosphere. A symmetrization effect of the polar cap and FACs, created by the solar wind pressure pulse at the end of the storm, is observed. We propose a qualitative explanation of this effect.

Keywords: storm, substorm, field-aligned currents, dawn–dusk asymmetry.

ВВЕДЕНИЕ

В известной модели [Iijima, Potemra, 1978], полученной статистически по спутниковым данным, продольные токи (ПТ) заполняют две кольцевые зоны (низкоширотную зону 2 и высокоширотную зону 1), а также расположенную внутри границы зоны 1 приполюсную зону 0. По знаку ПТ система разбита на полузоны в шахматном порядке так, что

в зону 1 ПТ втекают на утренней стороне и вытекают на вечерней стороне, а в окружающих ее зонах 2 и 0 ПТ имеют другой знак. Результат усреднения по большому числу наблюдений — симметрия системы зон ПТ относительно меридиана полдень–полночь (см. более детальную схему ПТ с учетом мезомасштабных неоднородностей в [Mishin et al., 2011]). При этом система ионосферной конвекции обычно состоит из двух вихрей. Во время возмущений ве-

черный вихрь более развит, чем утренний. Это может быть связано, например, с градиентом ионосферной проводимости вблизи терминатора [Ляцкий, 1978; Atkinson, Hutchison, 1978; Ляцкий, Мальцев, 1983]. При увеличении геомагнитной активности отмечается тенденция к повороту всей системы конвекции по часовой стрелке [Senior et al., 1990]. Система ПТ также испытывает вращение, направление которого в ходе суббури может измениться при переходе от подготовительной фазы к взрывной [Mishin et al., 2019]. Ряд факторов ответственен за появление существенной асимметрии в распределении ПТ и ионосферной конвекции в каждом из полушарий и между ними, а также за возникновение межполушарных ПТ (МПП). Одна из причин возникновения асимметрии связана с азимутальной компонентой B_y межпланетного магнитного поля (ММП). Согласно открытой модели магнитосферы [Ляцкий, 1978; Ляцкий, Мальцев, 1983; Cowley, 1981; Cowley, Lockwood, 1992], эта компонента ММП при пересоединении с геомагнитным полем вызывает асимметрию в распределении геомагнитного поля, ПТ и конвекции в ионосфере относительно меридиана полдень–полночь, а также смещение полярной шапки (ПШ) антипараллельно азимутальной составляющей вектора ММП B_y . Выводы теории были подтверждены данными наблюдений (см. ссылки в цитированных работах, а также в [Мишин, 1976; Mishin et al., 1992; Ширапов, Мишин, 2009; Lukianova, Kozlovsky, 2013]). Наложение ММП B_y на геомагнитное поле вызывает также формирование асимметричной картины магнитосферной конвекции в долях хвоста магнитосферы [Cowley, 1981; Tenfjord et al., 2015]. Оптические спутниковые наблюдения [Haaland et al., 2017; Østgaard et al., 2018], а также первые результаты, полученные ТИМ о динамике электрических полей и токов в двух полушариях [Lunyushkin et al., 2019], показали, что в зависимости от знака B_y смещение аврорального овала и ПШ в двух полушариях происходит в противоположных направлениях. С эффектом компоненты ММП B_y связывают не только асимметрию ПТ, но и протекание МПП. Так, Stenbaek-Nielsen, Otto [1997] предположили, что МПП в области полярного сияния создают межполушарную асимметрию вытекающих ПТ. МПП в этом случае являются результатом создания в хвосте шира (сдвига, поворота) магнитного поля вследствие проникновения компоненты ММП B_y и должны, в первую очередь, зависеть от ее знака. Бороев, Гельберг [2001], Величко и др. [2002], Velichko et al. [2002] также наблюдали эффекты компоненты ММП B_y : 1) асимметрию положения долготного сектора максимума интенсивности суббури между полушариями; 2) изменения отношения ширины полос втекающих и вытекающих ПТ при изменении знака B_y . Авторы предположили формирование в области разрыва тока утро–вечер хвоста аномального сопротивления, нестационарных продольного электрического поля и МПП, направление которых зависит от знака B_y .

Другой возможной причиной асимметрии в распределении конвекции и ПТ является влияние градиентов день–ночь ионосферной проводимости

[Ляцкий, 1978; Atkinson, Hutchison, 1978; Moses et al., 1987]. Ляцкий, Мальцев [1983] рассмотрели модель с терминатором, пересекающим центр ПШ, и показали, что резкий перепад проводимости на линии терминатора вызывает асимметрию утро–вечер в распределении ионосферной конвекции и ПТ. Добавление компоненты ММП B_y вызывает сдвиг потоков конвекции в ПШ по местному времени относительно полудня. Комбинированный эффект ММП B_y и наклона диполя исследовался в работе [Reistad et al., 2019]. Авторы обнаружили, что размер ПШ больше при противоположных знаках угла наклона диполя и компоненты ММП B_y , по сравнению со случаем совпадения их знаков. Suvorova [2017] показала, что различие координат геомагнитных полюсов в Северном и Южном полушариях вызывает сильную асимметрию освещенности и, соответственно, волновой проводимости полярной ионосферы в летние и зимние месяцы. Теоретические работы [Richmond, Roble, 1987; Benkevich et al., 2000; Benkevich, 2006; Lyatskaya et al., 2014, 2015] рассматривают квазистационарные модели электрической цепи, содержащей генератор и две параллельно соединенные ионосферы в сезоне зима–лето. Модели предсказывают, что из областей с резким перепадом проводимости летней полярной ионосферы, особенно на терминаторе, могут стекать квазистационарные МПП. Эти МПП способны даже формировать западный электроджет в зимней полностью не освещенной ионосфере.

В модели ночной электрической цепи Мишин и др. [Mishin et al., 2011; Мишин и др., 2016] генератор запитывается через ночные ячейки зоны 1 параллельно соединенные ионосферы двух полушарий, которые дополнительно связаны продольными токами зоны 2 через частичный кольцевой ток. Эта связь при разной проводимости в двух ионосферах должна вызывать в них асимметрию утро–вечер интенсивности ПТ, знак которой зависит от сезона года.

Изучение асимметрии утро–вечер в настоящее время по-прежнему является одним из актуальных направлений исследований в физике магнитосферы Земли [Forsyth et al., 2018; Liou, Mitchell, 2019]. Большой прогресс в изучении структуры и динамики ионосферной конвекции связан с реализацией проекта SuperDARN [Pettigrew et al., 2010]. Однако характерный временной масштаб усреднения от ~10 мин до 1 ч, который используется при обработке наблюдений, не позволяет увидеть мгновенную картину ионосферной конвекции и ПТ.

Применяемая нами техника инверсии магнитограмм (ТИМ) может рассчитывать двумерные распределения электрических полей и токов в полярной ионосфере каждую минуту, что позволяет изучать процессы длительностью в несколько минут [Mishin, 1990]. Так, по данным нескольких событий авторы работ [Mishin et al. 2019; Mishin, Kurikalova, 2020] обнаружили быстрое явление развала системы ПТ в предполуденном секторе во время взрывной фазы суббури зимнего типа и связали его с протеканием МПП между сопряженными ячейками зоны 1. В данной работе мы рассматриваем динамику асимметрии распределения ПТ в сезон равноденствия в те-

чение длительного возмущенного интервала 02–16 UT с неизменной ориентацией ММП B_y , имеющей довольно большое значение ($-6 \text{ нТл} < B_y < -4 \text{ нТл}$). Хотя в равноденствие и отсутствует сезонный эффект, но в течение полусуточного интервала между двумя исследуемыми суббурями успевает проявиться суточная вариация угла наклона оси геомагнитного диполя и соответственно освещенности и проводимости ионосферы [Мишин, 1976]. Целью настоящей работы является изучение влияния смещения терминатора относительно центра ПШ, изменения площади освещенной части ПШ, аврорального овала и ионосферной проводимости вследствие суточного вращения Земли на асимметрию утро–вечер в распределении плотности ПТ в период равноденствия. В работе по временным рядам карт распределения плотности ПТ, полученным ТИМ с 1-минутным шагом, впервые показана возможность смены знака асимметрии утро–вечер распределения интенсивности ПТ в течение нескольких минут в ходе взрывной фазы суббури. Кроме ТИМ, карты глобального распределения плотности ПТ (с возможностью расчета интенсивностей ПТ) получаются по данным многоспутниковой программы AMPERE [Coxon et al., 2018]. Однако используемая процедура статистического усреднения данных наблюдений с интервалом 10 мин не позволяет проследить глобально более быструю динамику интенсивности ПТ в ходе взрывной фазы. То же можно сказать и о наиболее развитых теоретических моделях МПТ [Lyatskaya et al., 2015] в квазистационарном приближении.

1. ГЕОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА 6 АПРЕЛЯ 2000 г.

Событие 6 апреля 2000 г. изучалось в ряде работ [Мишин и др., 2010; Mishin et al., 2011, Mishin, Kurikalova, 2020]. В данной работе мы исследуем полусуточный интервал перед внезапным началом (SSC) сильной магнитосферной бури, зарегистрированным в 16:40 UT. На рис. 1 показаны вариации параметров солнечного ветра, а также переменной части открытого магнитного потока через ПШ $\Psi_1 = \Psi - \Psi_0$. Здесь Ψ_0 — значение магнитного потока до начала суббури. Полный магнитный поток Ψ через ПШ равен $\Psi = \int B(r) ds$, где $B(r)$ — дипольное геомагнитное поле на высоте 115 км, а S — площадь полярной шапки. В исследуемом интервале наблюдались две суббуревые активизации с началами подготовительной фазы в ~02:00 и ~12:00 UT. Во время этих активизаций динамическое давление солнечного ветра менялось незначительно ($P_d \sim 1-2 \text{ нПа}$) за исключением короткого небольшого всплеска вблизи 11:30 UT. В интервале первой суббури, около 02:00 UT, наблюдалось усиление южной и азимутальной компонент ММП. Это вызвало начало подготовительной фазы суббури. Наблюдавшиеся затем достаточно большие отрицательные значения компонент ММП $B_z = B_y \sim -6 \text{ нТл}$ сопровождалось быстрым переносом магнитного потока в доли хвоста и соответственно ростом магнитного потока Ψ через ПШ. В ~03:10 UT наблюдается начало взрывной фазы — результат пересоединения и последующей диполяризации магнитного

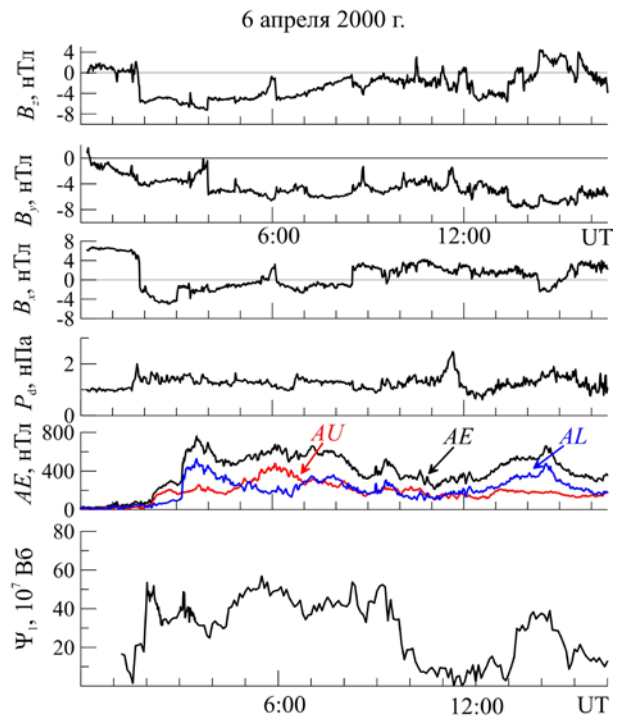


Рис. 1. Вариации компонент ММП, динамического давления солнечного ветра P_d , AE-индекса, переменной части магнитного потока полярной шапки Ψ_1 перед SSC бури 6 апреля 2000 г.

поля в хвосте, что проявляется в наблюдаемом резком спаде магнитного потока ПШ Ψ и усилении индексов авроральной активности AL , AE .

На протяжении всего интервала второй суббуревой активизации (12–16 UT) компонента ММП B_y сохраняет устойчиво отрицательные значения вблизи $B_y = -6 \text{ нТл}$. Медленный рост AE-индекса сопровождается более быстрым ростом Ψ , который начался вблизи 13:00 UT. Компонента ММП B_z резко поворачивается к северу около 13:20 UT и принимает положительные значения после 14:00 UT. В интервале примерно 12:30–14:35 UT AE-индекс растет от 300 до 660 нТл, что сопровождается ростом магнитного потока Ψ в 13:00–14:15 UT. В 14:15 UT начался спад Ψ и рост индексов AL , AE , т. е. началась взрывная фаза суббури.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Мы используем оригинальную версию техники инверсии магнитограмм (ТИМ ИСЗФ), разработанную в 1970-х гг. [Mishin, 1990]. ТИМ использует одноминутные геомагнитные данные глобальной сети наземных станций и позволяет вычислять не только двумерные карты распределения электрического потенциала, интегральных проводимостей, горизонтальных и продольных токов, но также и выделять на этих картах и изучать неоднородные структуры — мезомасштабные ячейки. ТИМ дает также возможность изучения динамики интенсивностей ПТ в каждой зоне и динамики магнитного потока ПШ [Mishin et al., 2011].

При помощи ТИМ мы рассчитываем временные ряды карт распределения плотности ПТ с шагом 1 мин. По этим картам мы определяем границы

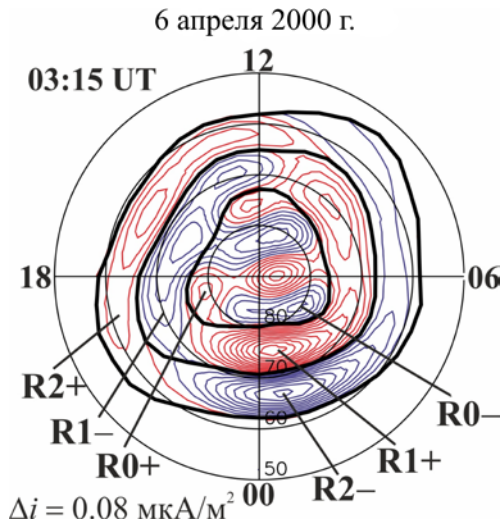


Рис. 2. Пример карты двумерного распределения (геомагнитная широта — геомагнитное местное время) плотности ПТ i_N в ионосфере Северного полушария. Толстые черные линии показывают границы областей (зон) ПТ $R0+(-)$, $R1+(-)$, $R2+(-)$. Знаки «+», «-» соответствуют втекающим/вытекающим ПТ

крупномасштабных зон ПТ $R0$, $R1$, $R2$ (черные жирные линии на рис. 2), значения полных токов — интенсивностей ПТ обоих знаков в каждой зоне, а также площадь ПШ S и передаваемый через нее магнитный поток Ψ .

На рис. 2 показан пример карты распределения плотности ПТ. В зоне 1 ПТ втекает (вытекает) в утреннем (вечернем) секторе, в зонах 2 и 0 — наоборот.

3. АСИММЕТРИЯ УТРО–ВЕЧЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПТ

Используя карты распределения плотности ПТ, мы получили графики (рис. 3) вариаций интенсивности втекающих и вытекающих ПТ в областях 1 и 2 согласно классификации [Iijima, Potemra, 1978] в ходе двух суббуревых активизаций в 02–16 UT 6 апреля 2000 г.

На верхней панели можно видеть, что в 03:35 UT одновременно наблюдается максимум AE -индекса и интенсивностей втекающего ПТ в зоне 1 (I_{R1+}) и вытекающего ПТ в зоне 2 (I_{R2-}) в утреннем секторе. В то же время интенсивности вытекающих ПТ зоны 1 и втекающих ПТ зоны 2 в вечернем секторе в несколько раз ниже, чем в утреннем секторе. Таким образом, в интервале 03:10–04:00 UT во время взрывной фазы наблюдается асимметрия ПТ $I_{утро} > I_{вечер}$. Такой тип распределения ПТ [Mishin et al., 2015b] назвали зимним.

На нижней панели в момент максимума индекса AE в 13:30 UT наблюдается максимум интенсивностей ПТ I_{R1-} и I_{R2+} в зонах $R1$ и $R2$ в вечернем секторе. В то же время в утреннем секторе можно наблюдать более низкие значения I_{R1+} , I_{R2-} . Таким образом, в интервале 10:00–16:00 UT наблюдается асимметрия ПТ $I_{вечер} > I_{утро}$. Такое распределение ПТ соответствует распределению ПТ летнего типа в Северном полушарии [Mishin et al., 2015a].

На верхней панели слева видно также, что интенсивность втекающего ПТ зоны 1 I_{R1+} сначала меньше интенсивности вытекающего ПТ I_{R1-} (~до 03 UT) ($I_{R1+} < I_{R1-}$), а затем в интервале 03:00–04:00 UT, наоборот, значительно превосходит интенсивность вытекающего ПТ зоны 1 $I_{R1+} > I_{R1-}$. Следовательно, наблюдается переход от летнего типа (в интервале 02:00–03:00 UT) к зимнему типу распределения ПТ (в интервале 03:00–04:00 UT).

На нижней панели слева показано, что интенсивность вытекающего ПТ зоны 1 превосходит интенсивность втекающего ПТ практически во всем интервале 12:00–16:00 UT, т. е. летний тип распределения ПТ в этом интервале сохраняется. Исключение составляет небольшой интервал вблизи максимума ПТ, когда наблюдается выравнивание значений интенсивности втекающих и вытекающих продольных токов. Аналогичный процесс симметризации конфигурации с возрастанием магнитосферной активности показан в [Reistad et al., 2018].

Подчеркнем еще раз, что в интервале 02–16 UT, т. е. в ходе обеих суббурь азимутальное ММП оставалось почти неизменным, однако знак преобладающей асимметрии утро–вечер распределения интенсивности ПТ меняется при переходе от первой суббури ко второй: от зимнего типа ($I_{утро} > I_{вечер}$) в интервале 02–04 UT на летний тип ($I_{вечер} > I_{утро}$) в интервале 12–16 UT.

4. ДИНАМИКА ТЕРМИНАТОРА

Известно, что плоскость экватора Земли составляет угол $23^\circ 27'$ с плоскостью орбиты. В результате большая часть ПШ освещена в летний сезон. Зимой наблюдается противоположная картина. Во время равноденствия освещается половина земной поверхности, продолжительность дня и ночи почти одинакова. Перемещение терминатора в геомагнитных координатах и освещенность ПШ определяется суточным колебанием оси геомагнитного диполя относительно оси вращения. Мы полагаем, что асимметрия в распределении ПТ может быть связана с изменением освещенности ПШ и аврорального овала в событиях 6 апреля, вызванным суточным вращением Земли.

Проследим положение терминатора в течение суток 6 апреля 2000 г. Угол наклона оси геомагнитного диполя Φ_{tilt} , определяющий положение терминатора, в течение суток 6 апреля изменялся в пределах $-4.72^\circ \leq \Phi_{\text{tilt}} \leq 17.68^\circ$. Наименьшее значение $\Phi_{\text{tilt}} = -4.72^\circ$ принимал в 04:43 UT, наибольшее значение $\Phi_{\text{tilt}} = 17.68^\circ$ — в 16:43 UT. Угол Φ_{tilt} примерно был равен нулю в 01:05 и 08:22 UT. Значение угла наклона оси геомагнитного диполя было вычислено по следующей формуле [e.g. Shue, 1993]:

$$\Phi_{\text{year}} = 23.4 \cos[(\text{DAY} - 172)2\pi/365.25];$$

$$\Phi_{\text{day}} = 11.2 \cos[(\text{UT} - 16.72)2\pi/24];$$

$$\Phi_{\text{tilt}} = \Phi_{\text{year}} + \Phi_{\text{day}}.$$

Здесь угол наклона оси геомагнитного диполя есть сумма годового (Φ_{year}) и суточного (Φ_{day}) углов наклона оси геомагнитного диполя; DAY — номер дня в году. В интервале 01:05–08:22 UT $\Phi_{\text{tilt}} < 0$ (ось земного диполя наклонена от Солнца), т. е. это интер-

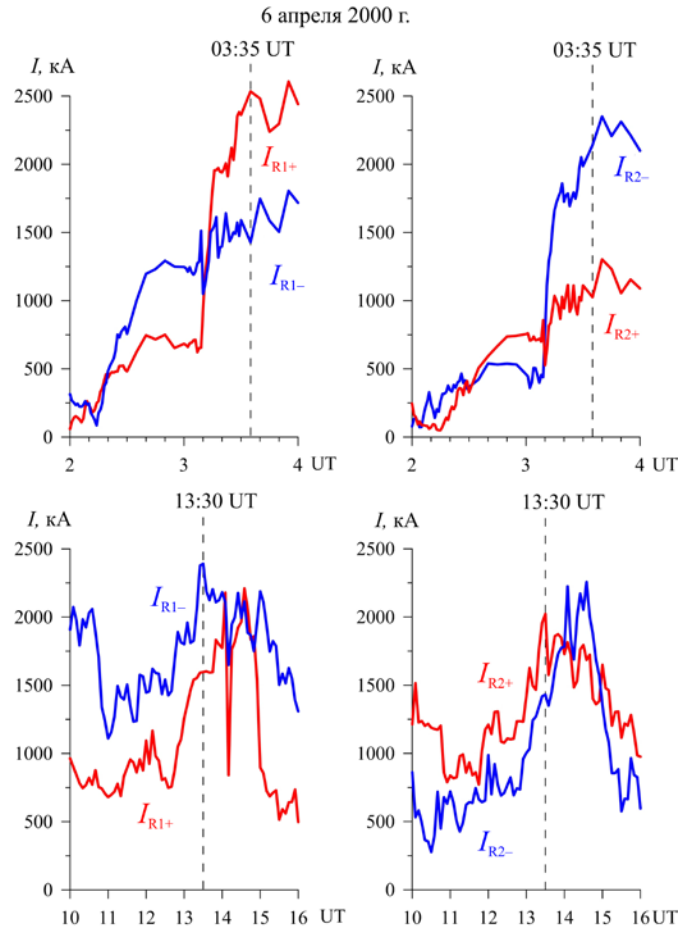


Рис. 3. Вариации интенсивности ПТ в зоне 1 (слева) и в зоне 2 (справа) в интервалах 02–04 UT (вверху) и 10–16 UT (внизу)

вал меньшей освещенности Северного полушария (зима). В интервале 08:02–01:05 UT $\Phi_{\text{ilt}} > 0$ (ось земного диполя наклонена к Солнцу), т. е. это интервал большей освещенности (лето).

Первый исследуемый интервал 02–04 UT приходится на время меньшей освещенности ПШ. В разделе 3 мы отметили изменение знака асимметрии при наступлении фазы расширения первой суббури (03:10 UT). Во время этой суббури изменение знака асимметрии утро–вечер происходит, когда терминатор проходит почти через геомагнитный полюс (рис. 4).

Несмотря на то, что ММП B_y принимает отрицательные значения, начиная с 00 UT, и его среднее значение составляло $\langle B_y \rangle \sim -3$ нТл в течение 02–04 UT, в момент 02:50 UT все еще не виден сдвиг овала и ПШ относительно меридиана полдень–полночь, а в 03:16 UT сдвиг уже заметен. Это характеризует время реакции ПШ на эффект ММП B_y .

Второй исследуемый интервал 12–16 UT приходится на время большей освещенности ПШ, когда терминатор находился южнее геомагнитного полюса и преобладает асимметрия $I_{\text{утро}} < I_{\text{вечер}}$. На этом интервале средний модуль азимутальной компоненты удвоился $\langle B_y \rangle = -6$ нТл, при этом наблюдается сильное смещение овала (зон 1 и 2) и ПШ с утра на вечер (против направления B_y) относительно меридиана полдень–полночь (рис. 5).

На рис. 6 видно влияние ММП $B_y < 0$ на смещение к вечеру ПШ, что более заметно для второй суббури. При сравнении с рис. 5 видно, что смещение с утра на вечер вечерней границы ПШ становится меньше. Таким образом, во время взрывной фазы суббури наблюдается тенденция к минимизации асимметрии утро–вечер относительно меридиана полдень–полночь.

На рис. 7 показаны вариации отношения площадей освещенной и неосвещенной частей ПШ $S_{\text{light}}/S_{\text{dark}}$. Видно (слева), что в интервале первой суббури (02–04 UT) площади освещенной и неосвещенной частей ПШ примерно равны ($S_{\text{light}}/S_{\text{dark}} \sim 1$). В интервале второй суббури (12–15 UT) площадь освещенной части ПШ значительно превосходит площадь неосвещенной части ($S_{\text{light}}/S_{\text{dark}} \gg 1$). Минимум отношения $S_{\text{light}}/S_{\text{dark}} = 2$ наблюдается вблизи пика взрывной фазы второй суббури (здесь и далее: пик суббури — максимум интенсивности ПТ и AE -индекса).

Угол наклона диполя на пике взрывной фазы первой (03:35 UT) и второй (13:30 UT) суббурь принимал следующие значения:

$$\Phi_{\text{ilt}}(03:35 \text{ UT}) = -4.22^\circ;$$

$$\Phi_{\text{ilt}}(13:30 \text{ UT}) = 13.93^\circ;$$

Разница между значениями углов наклона диполя в 03:35 и в 13:30 UT составляет:

$$\Delta\Phi_{\text{ilt}}(03:35 \div 13:30 \text{ UT}) = 18.15^\circ.$$

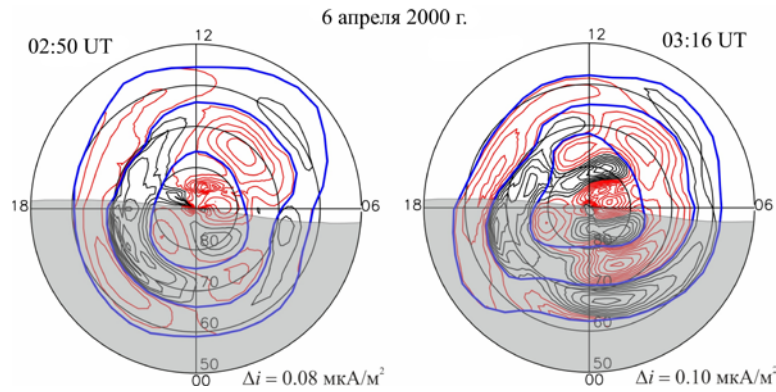


Рис. 4. Примеры карт распределения плотности ПТ, положения терминатора и границ зон ПТ в поздней фазе роста (слева) и начале активной фазы первой суббури (02–04 UT). Смещение ПШ с утра на вечер (против направления ММП B_y) успевает установиться во второй момент

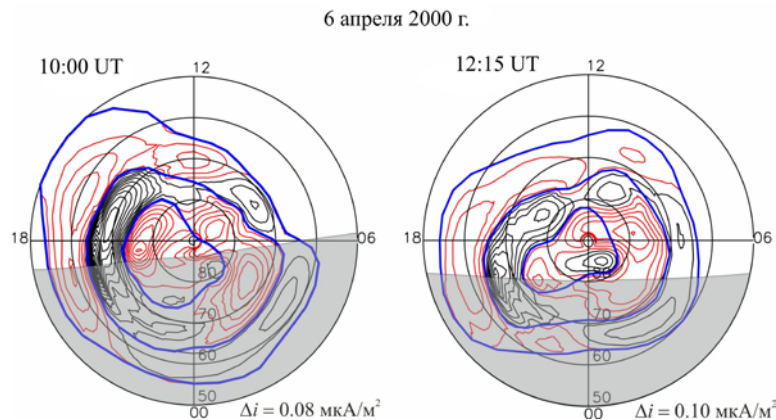


Рис. 5. То же, что на рис. 4 до и во время подготовительной фазы второй суббуревой активизации 12–16 UT

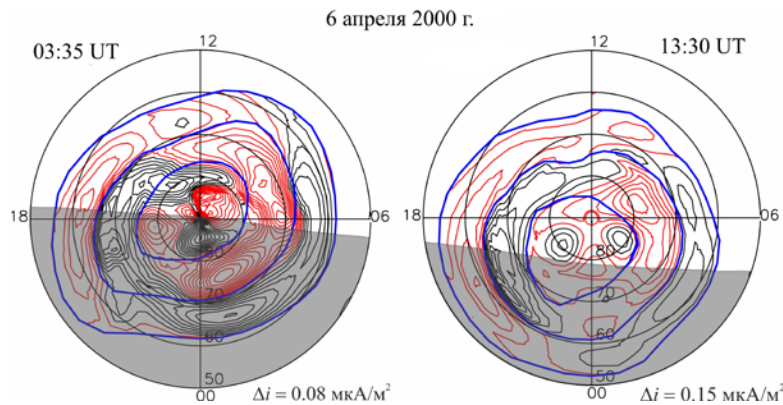


Рис. 6. Положение терминатора на карте распределения плотности ПТ в моменты пика интенсивности ПТ зоны 1 во время взрывной фазы двух суббурь. Показаны моменты времени 03:35 UT (слева) в первом интервале 02–04 UT (примерное равенство освещенной и неосвещенной частей ПШ ($S_{\text{light}}=S_{\text{dark}}$)) и 13:30 UT во втором интервале 12–16 UT ($S_{\text{light}}/S_{\text{dark}}=2$)

Отметим интересный факт: изменение угла наклона диполя и положения терминатора между двумя суббуревыми активизациями составляет всего $\sim 18^\circ$. Однако величина отношения площадей освещенной и неосвещенной частей ПШ существенно различается из-за быстрой динамики ПШ во время второй суббури.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы рассмотрели два суббуревых интервала перед магнитосферной бурей 6 апреля 2000 г. Для каждого из них были получены графики изменения

интенсивности втекающих и вытекающих ПТ в вечерних и утренних секторах каждой из трех зон ПТ. Показано, что во время сезона равноденствия наблюдаются два типа распределения ПТ, которые мы назвали «летний тип распределения ПТ» и «зимний тип распределения ПТ» [Mishin et al., 2015b]. Напомним тот факт, что в рассмотренном интервале 02–16 UT события 6 апреля 2000 г. сохраняется знак компоненты ММП $B_y < 0$. Несмотря на это, наблюдаются два типа распределения интенсивностей ПТ в утренней и вечерней частях зон ПТ ($I_{\text{утро}}/I_{\text{вечер}} < 1$ и $I_{\text{утро}}/I_{\text{вечер}} > 1$). Таким образом, изменение типа рас-

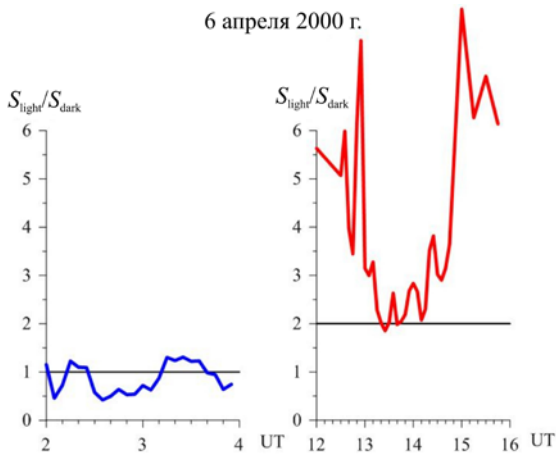


Рис. 7. Вариации отношения площадей освещенных и неосвещенных частей полярной шапки $S_{\text{light}}/S_{\text{dark}}$ во время двух суббурь

предела ПТ происходит при неизменном знаке ММП B_y .

Мы изучили динамику угла наклона оси геомагнитного диполя, связь смещения терминатора относительно полюса и степени освещенности ПШ с распределением ПТ. Показано, что в то время когда угол наклона диполя положительный и площадь освещенной части ПШ более чем в два раза превосходит площадь ее неосвещенной части, в зонах ПТ R1, R2 наблюдается асимметрия летнего типа $I_{\text{вечер}} > I_{\text{утро}}$ (рис. 3 (10–16 UT), рис. 7 справа, рис. 5 и 6 справа).

Во время первой суббуревой активизации площади освещенной и неосвещенной частей ПШ примерно равны, оба типа асимметрии в распределении ПТ равновероятны (рис. 3 сверху и рис. 7 слева) и в ходе взрывной фазы может произойти быстрая смена типа асимметрии. Такую быструю динамику распределения ПТ нам удалось изучить благодаря используемой ТИМ мировой сети наземных магнитометров с 1-минутной скоростью регистрации. Поскольку, как мы отметили во введении, временное разрешение наиболее дорогого спутникового проекта AMPERE составляет 10 мин, по его данным трудно наблюдать описанное нами кратковременное выравнивание асимметрии и тем более быструю смену ее знака в ходе взрывной фазы.

Во введении мы описали основные факторы появления асимметрии распределения ПТ утро–вечер: эффект азимутальной компоненты ММП, неоднородностей ионосферной проводимости и связанных с ними МПТ. В рассмотренном нами событии ММП B_y не менялась в ходе обеих суббурь, а смена знака асимметрии утро–вечер в распределении ПТ произошла только в первой суббуре при примерном равенстве площадей освещенной и темной частей ПШ $S_{\text{light}}/S_{\text{dark}} \sim 1$. Поэтому мы предполагаем, что в этом случае одна из возможных причин быстрой смены типа распределения ПТ связана с транзитными МПТ. Возможность образования МПТ в условиях равноденствия из-за суточной вариации положения терминатора относительно геомагнитных полюсов и возникновения неравенства проводимостей в двух полушариях отметили Benkevich et al.

[2000]. Покажем сейчас качественно по аналогии с [Benkevich et al., 2000; Mishin et al., 2019], что даже в период равноденствия состояние симметрии освещенности и проводимости ионосферы неустойчиво, что может вызывать МПТ.

В глобальной электрической цепи, содержащей генератор в магнитосфере и две нагрузки (ионосферы), генератор через зону 1 запитывает через пару ПТ параллельно соединенные ионосферы двух полушарий утром, при этом токи в ионосфере протекают вдоль параллели, вытекают из них вечером и замыкаются на генератор (см. рис. 7 в [Mishin et al., 2011]). Предположим, что в период равноденствия терминатор находится в центре обеих ПШ, $S_{\text{light}}/S_{\text{dark}} = 1$ и проводимости ионосфер двух полушарий совпадают, поэтому через них протекают одинаковые токи. При отклонении терминатора от центра ПШ (полюса) происходит нарушение симметрии — равенство эффективных сопротивлений (проводимостей) нарушается. В месте пересечения с зоной R1 терминатор создает в ней перепад проводимости по долготе, что в соответствии с законами Ома и Кирхгофа, вызывает перетекание МПТ из Южного полушария с большей проводимостью в Северное с меньшей проводимостью через силовую линию геомагнитного поля с бесконечной проводимостью. При отсутствии такого перепада проводимости вдоль параллели внутри зоны 1 даже при наличии сильного неравенства проводимостей между полушариями ток между ними (т. е. МПТ) возникнуть не может (см. детали рис. 3.2 в [Benkevich, 2006]). МПТ — ток, обеспечивающий быстрый переход к новому распределению проводимости и ионосферных токов. Если требуемого резкого изменения проводимости вдоль параллели нет, то МПТ не возникнет. Оценим теперь порядок величины МПТ. Представим себе в вечернем секторе магнитную силовую трубку, которая связывает две магнитно-сопряженные области зоны 1 ПТ вблизи пересечения терминатора с полюсной границей зоны 1 в обеих ионосферах. Аналогично [Stenbaek-Nielsen, Otto, 1997; Mishin et al., 2019]) на эту трубку наложим МПТ, который вытекает из летней ионосферы и течет в зимнюю. Такой МПТ может дать дополнительный вытекающий ПТ в зимнем полушарии, тем самым уменьшая наблюдаемый общий вытекающий ПТ в этой области, что ассоциируется с ослаблением I_{R1-} (см. рис. 3) в зимнем интервале 03:05–04:00. Наоборот, в летнем полушарии МПТ может создать дополнительный вытекающий ПТ, тем самым увеличивая наблюдаемый общий вытекающий ПТ (усиление I_{R1-} (см. рис. 3) в летнем интервале 02:15–03:05).

Полагая в соответствии с данными [Lunyushkin et al., 2019], что $I_{\text{лето}} \cong 2 I_{\text{зима}}$, можно оценить интенсивность $I_{\text{МПТ}} \cong 1/3 I_{R1-}$ (~400 кА на пике суббури).

Поскольку ПТ переносят альфвеновские волны [Ляцкий, Мальцев, 1983; Kostarev et al., 2021] с характерной скоростью в магнитосфере $V_A = 1000$ км/с, время перетекания МПТ из одной ПШ в другую вблизи меридиана 06–18 MLT составит $t \sim 3-5$ мин, что сравнимо с временем быстрого изменения отношения $I_{\text{вечер}}/I_{\text{утро}}$ (см. рис. 3 вблизи 03:10 UT). Если не допустить протекания МПТ, то изменение ПТ

в двух полушариях произойдет в глобальной цепи через хвост магнитосферы за время, в несколько раз большее. Необходимо отметить, что отношение $S_{\text{light}}/S_{\text{dark}}$ колеблется вблизи 1 на интервале 02–04 UT (рис. 7), а кроме вращения оси геомагнитного диполя, дополнительным фактором потери симметрии является сильная межполушарная асимметрия геомагнитного поля, которая вызывает асимметрию проводимости [Suvorova, 2017]. Поэтому переход от одного типа асимметрии ПТ к другому с возникновением МПТ мог произойти в любой момент интервала взрывной фазы первой активизации. Кроме того, трудно ожидать точной реализации предложенного механизма по данным одного полушария, хотя сама идея о роли транзиентных МПТ в быстрой смене знака асимметрии ПТ в условиях равновесия кажется нам весьма правдоподобной.

Теперь обратимся к нашим результатам по влиянию ММП B_y на положение ПШ (см. рис. 4–6), которые согласуются с известным фактом смещения ПШ в Северном полушарии против направления ММП B_y (на вечер) в соответствии с предсказаниями модели [Cowley, Lockwood, 1992] и данными наблюдений [Mishin et al., 1992; Lukianova, Kozlovsky, 2013].

Отметим, что в ходе взрывной фазы независимо от смены знака асимметрии распределения ПТ происходит кратковременное ее исчезновение. Тенденция к минимизации асимметрии утро–вечер ПШ относительно меридиана полдень–полночь во время взрывной фазы суббури известна давно, использовалась нами в [Mishin et al., 2011] и также согласуется с данными последних исследований [Østgaard et al., 2018; Lunyushkin et al., 2019].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы следующие:

1. В зонах 1 и 2 ПТ происходит смена знака асимметрии утро–вечер в распределении интенсивности ПТ между двумя рассматриваемыми интервалами 6 апреля 2000 г. в течение нескольких минут во время взрывной фазы первой суббури (при $S_{\text{light}} \sim S_{\text{dark}}$).

2. Поскольку ММП B_y 6 апреля 2000 г. (02–16 UT) практически не изменялась, возможной причиной разворота направления асимметрии утро–вечер ПТ является качание оси геомагнитного диполя относительно оси вращения Земли, которое изменяет положение терминатора и степень освещенности ПШ и аврорального овала.

3. В ходе взрывной фазы суббурь независимо от смены знака асимметрии распределения ПТ происходит кратковременное ее исчезновение.

4. Влияние отрицательной азимутальной компоненты ММП проявляется в смещении ПШ с утра на вечер (соответствует предсказаниям открытой модели магнитосферы [Cowley, Lockwood, 1992]) более чем через два часа после ее появления в 0 UT. Это смещение немного уменьшается во время взрывной фазы второй суббури 6 апреля 2000 г. (12–16 UT).

5. При превышении площади освещенной части ПШ $S_{\text{light}} > S_{\text{dark}}$ преобладает асимметрия распределения ПТ летнего типа ($I_{\text{вечер}} > I_{\text{утро}}$).

6. Мы предполагаем, что в интервале 02–04 UT при равной освещенности ПШ ($S_{\text{light}} \sim S_{\text{dark}}$) быстрая смена асимметрии утро–вечер распределения ПТ может быть связана с протеканием межполушарных токов. Интенсивность МПТ можно оценить как $I_{\text{МПТ}} \sim 1/3 I_{\text{R1-}} (\sim 400 \text{ кА на пике суббури})$.

В заключение отметим, что результаты о возможном влиянии суточной вариации угла наклона оси геомагнитного диполя на степень освещенности и быструю смену (в течение нескольких минут) знака распределения интенсивности ПТ получены нами по избранным событиям и по данным наблюдений станций только Северного полушария. Поэтому мы планируем дальнейшие исследования с использованием данных двух полушарий.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-05-00437. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru>]. Мы благодарим руководителей международных проектов CARISMA, INTERMAGNET, GIMA, MACCS и IMAGE, а также магнитных сетей в Арктике и Антарктике (Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт и DMI) за 1-минутные данные наземных магнитометров, а также сотрудников отдельных российских и японских магнитных обсерваторий за предоставление магнитных данных, используемых в этом исследовании. Доступные геомагнитные данные получены непосредственно из [<http://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php>] (INTERMAGNET), [<http://space.fmi.fi/image>] (IMAGE), [<http://space.augsburg.edu/maccs/requestdatafile.jsp>] (MACCS), [<https://www.gi.alaska.edu/monitors/magnetometer>] (GIMA), [<http://www.carisma.ca>] (CARISMA).

Ключевые параметры СВ и индекс AE были получены через сайт SuperMAG [<http://supermag.jhuapl.edu>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бороев Р.Н., Гельберг М.Г. Зависимость долготной локализации центра суббури на геосинхронных орбитах от B_y -компоненты ММП // Геомагнетизм и аэронавигация. 2001. Т. 41, № 5. С. 588–594.
- Величко В.А., Бороев Р.Н., Гельберг М.Г. Азимутальная асимметрия областей втекающих и вытекающих из ионосферы продольных токов в токовом клине суббури // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42, № 5. С. 619–623.
- Ляцкий В.Б. Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений. Ленинград: Наука, 1978. 199 с.
- Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 192 с.
- Мишин В.М. Спокойные геомагнитные вариации и токи в магнитосфере. Новосибирск: Наука, 1976. 203 с.
- Мишин В.М., Курикалова М.А., Фюрстер М. Электрические цепи и их генераторы в магнитосфере Земли: концепция электрических цепей применительно к первой фазе суббури 6 апреля 2000 г. // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 15. С. 66–74.
- Мишин В.М., Мишин В.В., Моисеев А.В. Распределение продольных токов в ионосфере: асимметрия утро–вечер и ее связь с асимметрией в двух полушариях // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56, № 5. С. 558–567. DOI: 10.7868/S0016794016050096.

Ширапов Д.Ш., Мишин В.М. Моделирование глобальных электродинамических процессов в геомагнитосфере. Улан-Удэ: Изд-во Восточно-Сибирского государственного технологического университета, 2009. 213 с.

Atkinson G., Hutchison D. Effect of the day–night ionospheric conductivity gradient on polar cap convective flow // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1978. Vol. 83, no. A2. P. 725–729. DOI: [10.1029/JA083iA02p00725](https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00725).

Benkevich L. Effects of ionospheric conductance in high latitude phenomena. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2006. 233 p.

Benkevich L., Lyatsky W., Cogger L.L. Field-aligned currents between conjugate hemispheres // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000. Vol. 105, no. A12. P. 27727–27737. DOI: [10.1029/2000ja900095](https://doi.org/10.1029/2000ja900095).

Cowley S.W.H. Magnetospheric asymmetries associated with the y-component of the IMF // *Planet. Space Sci.* 1981. Vol. 29, no. 1. P. 79–96. DOI: [10.1016/0032-0633\(81\)90141-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90141-0).

Cowley S.W.H., Lockwood M. Excitation and decay of solar-wind driven flows in the magnetosphere-ionosphere system // *Ann. Geophys.* 1992. Vol. 10. P. 103–115.

Coxon J.C., Milan S.E., Anderson B.J. A review of Birke-land current research using AMPERE // *Electric Currents in Geospace and Beyond* / Eds. A. Keiling et al. Hoboken, New Jersey, USA. 2018. P. 259–278. DOI: [10.1002/9781119324522.ch16](https://doi.org/10.1002/9781119324522.ch16).

Forsyth C., Shortt M., Coxon J.C., et al. Seasonal and temporal variations of field-aligned currents and ground magnetic deflections during substorms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123, no. 4. P. 2696–2713. DOI: [10.1002/2017ja025136](https://doi.org/10.1002/2017ja025136).

Haaland S., Lybekk B., Maes L., et al. North-south asymmetries in cold plasma density in the magnetotail lobes: Cluster observations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, no. 1, P. 136–149. DOI: [10.1002/2016ja023404](https://doi.org/10.1002/2016ja023404).

Iijima T., Potemra T.A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1978. Vol. 83, no. A2. P. 599–615. DOI: [10.1029/JA083iA02p00599](https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00599).

Kostarev D.V., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Alfvén wave parallel electric field in the dipole model of the magnetosphere: Gyrokinetic treatment // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, e2020JA028611. DOI: [10.1029/2020JA028611](https://doi.org/10.1029/2020JA028611).

Liou K., Mitchell E.J. Hemispheric asymmetry of the premidnight aurora associated with the dawn-dusk component of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124. P. 1625–1634. DOI: [10.1029/2018JA025953](https://doi.org/10.1029/2018JA025953).

Lukianova R., Kozlovsky A. Dynamics of polar boundary of the auroral oval derived from the IMAGE satellite data // *Cosmic Res.* 2013. Vol. 51, no. 1. P. 46–53. DOI: [10.1134/s0010952513010061](https://doi.org/10.1134/s0010952513010061).

Lunyushkin S.B., Mishin V.V., Karavaev Y.A., et al. Studying the dynamics of electric currents and polar caps in ionospheres of two hemispheres during the August 17, 2001 geomagnetic storm // *Solnecno-zemnaya fizika [Solar-Terr. Phys.]*. 2019. Vol. 5, no. 2. P. 17–29. DOI: [10.12737/szf-52201903](https://doi.org/10.12737/szf-52201903).

Lyatskaya S., Khazanov G.V., Zesta E. Interhemispheric field-aligned currents: Simulation results // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119, no. 7. P. 5600–5612. DOI: [10.1002/2013ja019558](https://doi.org/10.1002/2013ja019558).

Lyatskaya S., Lyatsky W., Zesta E. Effect of interhemispheric currents on equivalent ionospheric currents in two hemispheres: Simulation results // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 121, no. 2. P. 1339–1348. DOI: [10.1002/2015ja021167](https://doi.org/10.1002/2015ja021167).

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications // *Space Sci. Rev.* 1990. Vol. 53, no. 1-2. P. 83–163. DOI: [10.1007/bf00217429](https://doi.org/10.1007/bf00217429).

Mishin V.M., Kurikalova M.A. Magnetospheric substorms in the Earth two hemispheres. The 8 March 2008 and 6 April 2000 events // *Danish Scientific J.* 2020. Vol. 2, no. 42. P. 7–21.

Mishin V.M., Bazarzhapov A.D., Saifudinova T.I., et al. Different methods to determine the polar cap area // *J. Geomagnetism and Geoelectricity*. 1992. Vol. 44, no. 12. P. 1207–1214. DOI: [10.5636/jgg.44.1207](https://doi.org/10.5636/jgg.44.1207).

Mishin V.M., Förster M., Kurikalova M.A., Mishin V.V. The generator system of field-aligned currents during the April 06, 2000, superstorm // *Adv. Space Res.* 2011. Vol. 48, no. 7. P. 1172–1183. DOI: [10.1016/j.asr.2011.05.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.05.029).

Mishin V.M., Kurikalova M.A., Mishin V.V., et al. Field-aligned current dynamics in two selected intervals of the 6 April 2000 superstorm // *Proc. XXXVIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Apatity, Russia, 2015a. P. 24–27.

Mishin V.M., Mishin V.V., Kurikalova M.A., et al. Field-aligned current dynamics during two substorms of summer and winter types and model for the electric circuit of the magnetosphere-ionosphere system of two hemispheres // *Proc. XXXVIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Apatity, Russia, 2015b. P. 28–31.

Mishin V.M., Mishin V.V., Kurikalova M.A., et al. Positive and negative feedbacks in the magnetosphere-ionosphere coupling // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. Vol. 187. P. 10–21. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.002).

Moses J.J., Siscoe G.L., Crooker N.U., Gorney D.J. IMF B_y and day–night conductivity effects in the expanding polar cap convection model // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1987. Vol. 92, no. A2. P. 1193–1198. DOI: [10.1029/JA092iA02p01193](https://doi.org/10.1029/JA092iA02p01193).

Pettigrew E.D., Shepherd S.G., Ruohoniemi J.M. Climatological patterns of high-latitude convection in the Northern and Southern hemispheres: Dipole tilt dependencies and interhemispheric comparisons // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. Vol. 115, no. A7. P. A07305. DOI: [10.1029/2009JA014956](https://doi.org/10.1029/2009JA014956).

Reistad J.P., Østgaard N., Laundal K.M., et al. Observations of asymmetries in ionospheric return flow during different levels of geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123, no. 6. P. 4638–4651. DOI: [10.1029/2017ja025051](https://doi.org/10.1029/2017ja025051).

Reistad J.P., Laundal K.M., Østgaard N., et al. Separation and quantification of ionospheric convection sources: 2. The dipole tilt angle influence on reverse convection cells during northward IMF // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124, no. 7. P. 6182–6194. DOI: [10.1029/2019ja026641](https://doi.org/10.1029/2019ja026641).

Richmond A.D., Roble R.G. Electrodynamical effects of thermospheric winds from the NCAR Thermospheric General Circulation Model // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1987. Vol. 92, no. A11. P. 12365–12376. DOI: [10.1029/JA092iA11p12365](https://doi.org/10.1029/JA092iA11p12365).

Senior C., Fontaine D., Caudal G., et al. Convection electric fields and electrostatic potential over $61^\circ < \Lambda < 72^\circ$ invariant latitude observed with the European incoherent scatter facility: 2. Statistical results // *Ann. Geophys.* 1990. Vol. 8. P. 257–272.

Shue J.-H. Dependence of the ionospheric convection pattern on the conductivity and the southward IMF: Ph. D. Thesis. University of Alaska, Fairbanks, 1993, 141 p.

Stenbaek-Nielsen H.C., Otto A. Conjugate auroras and the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1997. Vol. 102, no. A2. P. 2223–2232. DOI: [10.1029/96ja03563](https://doi.org/10.1029/96ja03563).

Suvorova A.V. Flux enhancements of >30 keV electrons at low drift shells $L < 1.2$ during last solar cycles // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 12,274–12,287. DOI: [10.1002/2017JA024556](https://doi.org/10.1002/2017JA024556).

Tenford P., Østgaard N., Snekvik K., et al. How the IMF B_y induces a B_y component in the closed magnetosphere and how it leads to asymmetric currents and convection patterns in the two hemispheres // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120, no. 11. P. 9368–9384. DOI: [10.1002/2015ja021579](https://doi.org/10.1002/2015ja021579).

Velichko V.A., Boroyev R.N., Gelberg M.G., et al. North-south asymmetry of the substorm intensity depending on the IMF B_y -component // *Earth, Planets and Space*. 2002. Vol. 54. P. 955–961.

Østgaard N., Reistad J.P., Tenfjord P., et al. The asymmetric geospace as displayed during the geomagnetic storm on August 17, 2001 // *Ann. Geophys.* 2018. Vol. 36. P. 1577–1596. DOI: [10.5194/angeo-2018-65](https://doi.org/10.5194/angeo-2018-65).

URL: http://ckp-angara.iszf.irk.ru/index_en.html (дата обращения 18 июня 2020 г.).

URL: <http://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php> (дата обращения 18 июня 2020 г.).

URL: <http://space.fmi/Image> (дата обращения 18 июня 2020 г.).

URL: <http://space.augsburg.edu/macacs/requestdatafile.jsp> (дата обращения 18 июня 2020 г.).

URL: <https://www.gi.alaska.edu/monitors/magnetometer> (дата обращения 18 июня 2020 г.).

URL: <http://www.carisma.ca> (дата обращения 18 июня 2020 г.).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu> (дата обращения 18 июня 2020 г.).

REFERENCES

Atkinson G., Hutchison D. Effect of the day night ionospheric conductivity gradient on polar cap convective flow. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1978, vol. 83, no. A2, pp. 725–729. DOI: [10.1029/JA083iA02p00725](https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00725).

Benkevich L. Effects of ionospheric conductance in high latitude phenomena: PhD Thesis, University of Saskatchewan: Saskatoon, Canada, 2006, 210 p.

Benkevich L., Lyatsky W., Cogger L.L. Field-aligned currents between conjugate hemispheres. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000, vol. 105, no. A12, pp. 27727–27737. DOI: [10.1029/2000ja900095](https://doi.org/10.1029/2000ja900095).

Borojev P.H., Gelberg M.G. Dependence of the longitudinal localization of the substorm center in geosynchronous orbits on the IMF V_y component. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2001, vol. 41, no. 5, pp.588–594. (In Russian).

Cowley S.W.H. Magnetospheric asymmetries associated with the y -component of the IMF. *Planet. Space Sci.* 1981, vol. 29, no. 1, pp. 79–96. DOI: [10.1016/0032-0633\(81\)90141-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90141-0).

Cowley S.W.H., Lockwood M. Excitation and decay of solar-wind driven flows in the magnetosphere-ionosphere system. *Ann. Geophys.* 1992, vol. 10, pp. 103–115.

Coxon J.C., Milan S.E., Anderson B.J. *A Review of Birke-land Current Research Using AMPERE. Electric Currents in Geospace and Beyond*. Eds. A. Keiling et al. Hoboken, New Jersey, USA. 2018, pp. 259–278. DOI: [10.1002/9781119324522.ch16](https://doi.org/10.1002/9781119324522.ch16).

Forsyth C., Shortt M., Coxon J.C., et al. Seasonal and temporal variations of field-aligned currents and ground magnetic deflections during substorms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018, vol. 123, no. 4, pp. 2696–2713. DOI: [10.1002/2017ja025136](https://doi.org/10.1002/2017ja025136).

Haaland S., Lybekk B., Maes L., et al. North-south asymmetries in cold plasma density in the magnetotail lobes: Cluster observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, no. 1, pp. 136–149. DOI: [10.1002/2016ja023404](https://doi.org/10.1002/2016ja023404).

Iijima T., Potemra T.A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1978, vol. 83, no. A2, pp. 599–615. DOI: [10.1029/JA083iA02p00599](https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00599).

Kostarev D. V., Mager P. N., Klimushkin D. Yu. Alfvén wave parallel electric field in the dipole model of the magnetosphere: Gyrokinetic treatment. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021, vol. 126, e2020JA028611. DOI: [10.1029/2020JA028611](https://doi.org/10.1029/2020JA028611).

Liou K., Mitchell E.J. Hemispheric asymmetry of the premidnight aurora associated with the dawn-dusk component

of the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, pp. 1625–1634. DOI: [10.1029/2018JA025953](https://doi.org/10.1029/2018JA025953).

Lukyanova R., Kozlovsky A. Dynamics of polar boundary of the auroral oval derived from the IMAGE satellite data. *Cosmic Res.* 2013, vol. 51, no. 1, pp. 46–53. DOI: [10.1134/s0010952513010061](https://doi.org/10.1134/s0010952513010061).

Lunyushkin S.B., Mishin V.V., Karavaev Y.A., et al. Studying the dynamics of electric currents and polar caps in ionospheres of two hemispheres during the August 17, 2001 geomagnetic storm. *Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 5, no. 2, pp. 15–27. DOI: [10.12737/stp-52201903](https://doi.org/10.12737/stp-52201903).

Lyatskaya S., Khazanov G.V., Zesta E. Interhemispheric field-aligned currents: Simulation results. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, no. 7, pp. 5600–5612. DOI: [10.1002/2013ja019558](https://doi.org/10.1002/2013ja019558).

Lyatskaya S., Lyatsky W., Zesta E. Effect of interhemispheric currents on equivalent ionospheric currents in two hemispheres: Simulation results. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 121, no. 2, pp. 1339–1348. DOI: [10.1002/2015ja021167](https://doi.org/10.1002/2015ja021167).

Lyatsky W.B. *Tokovye sistemy magnitosferno-ionosfernykh vozmushchenii* [Current Systems of Magnetospheric-Ionospheric Disturbances]. Leningrad, Nauka Publ., 1978, 199 p. (In Russian).

Lyatsky W.B., Maltsev Yu.P. *Magnitosferno-ionosfernoe vzaimodeistvie* [The Magnetosphere-Ionosphere Interaction]. Moscow, USSR, Nauka Publ., 1983, 192 p. (In Russian).

Mishin V.M. *Spokojnye geomagnitnye variatsii i toki v magnitosfere* [Quiet geomagnetic variations and currents in the magnetosphere]. Novosibirsk, Nauka, 1976, 203 p. (In Russian).

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications. *Space Sci. Rev.* 1990, vol. 53, no. 1-2, pp. 83–163. DOI: [10.1007/bf00217429](https://doi.org/10.1007/bf00217429).

Mishin V.M., Kurikalova M.A. Magnetospheric substorms in the Earth two hemispheres. The 8 March 2008 and 6 April 2000 events. *Danish Scientific J.* 2020, vol. 2, no.42, pp. 7–21.

Mishin V.M., Bazarzhapov A.D., Saifudinova T.I., et al. Different Methods to Determine the Polar Cap Area. *J. Geomagnetism and Geoelectricity*. 1992, vol. 44, no. 12, pp. 1207–1214. DOI: [10.5636/jgg.44.1207](https://doi.org/10.5636/jgg.44.1207).

Mishin V.M., Kurikalova M.A., Förster M. Electric circuits and their generators in the Earth’s magnetosphere: The concept of electric circuits as applied to the first phase of the April 6, 2000 superstorm. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010, vol. 50, no. 8, pp. 978–987. DOI: [10.1134/s0016793210080086](https://doi.org/10.1134/s0016793210080086).

Mishin V.M., Förster M., Kurikalova M.A., Mishin V.V. The generator system of field-aligned currents during the April 06, 2000, superstorm. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 48, no. 7, pp. 1172–1183. DOI: [10.1016/j.asr.2011.05.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.05.029).

Mishin V.M., Kurikalova M.A., Mishin V.V., et al. Field-aligned current dynamics in two selected intervals of the 6 April 2000 superstorm. *Proc. XXXVIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Apatity, Russia, 2015a, pp. 24–27.

Mishin V.M., Mishin V.V., Kurikalova M.A., et al. Field-aligned current dynamics during two substorms of summer and winter types and model for the electric circuit of the magnetosphere-ionosphere system of two hemispheres. *Proc. XXXVIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Apatity, Russia, 2015b, pp. 28–31.

Mishin V.M., Mishin V.V., Moiseev A.V. Distribution of the field-aligned currents in the ionosphere: dawn–dusk asymmetry and its relation to the asymmetry between the two hemispheres. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016, vol. 56, no. 5, pp. 524–534. DOI: [10.7868/S0016794016050096](https://doi.org/10.7868/S0016794016050096).

Mishin V.M., Mishin V.V., Kurikalova M.A., et al. Positive and negative feedbacks in the magnetosphere-ionosphere

coupling. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 187, pp. 10–21. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.002).

Moses J.J., Siscoe G.L., Crooker N.U., Gorney D.J. IMF B_y and day-night conductivity effects in the expanding polar cap convection model. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1987, vol. 92, no. A2, pp. 1193–1198. DOI: [10.1029/JA092iA02p01193](https://doi.org/10.1029/JA092iA02p01193).

Pettigrew E.D., Shepherd S.G., Ruohoniemi J.M. Climatological patterns of high-latitude convection in the Northern and Southern hemispheres: Dipole tilt dependencies and interhemispheric comparisons. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010, vol. 115, no. A7, pp. A07305. DOI: [10.1029/2009ja014956](https://doi.org/10.1029/2009ja014956).

Reistad J.P., Østgaard N., Laundal K.M., et al. Observations of asymmetries in ionospheric return flow during different levels of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018, vol. 123, no. 6, pp. 4638–4651. DOI: [10.1029/2017ja025051](https://doi.org/10.1029/2017ja025051).

Reistad J.P., Laundal K.M., Østgaard N., et al. Separation and quantification of ionospheric convection sources: 2. The dipole tilt angle influence on reverse convection cells during northward IMF. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, no. 7, pp. 6182–6194. DOI: [10.1029/2019ja026641](https://doi.org/10.1029/2019ja026641).

Richmond A.D., Roble R.G. Electrodynamic effects of thermospheric winds from the NCAR Thermospheric General Circulation Model. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1987, vol. 92, no. A11, pp. 12365–12376. DOI: [10.1029/JA092iA11p12365](https://doi.org/10.1029/JA092iA11p12365).

Senior C., Fontaine D., Caudal G., et al. Convection electric fields and electrostatic potential over $61^\circ < \Lambda < 72^\circ$ invariant latitude observed with the European incoherent scatter facility: 2. Statistical results. *Ann. Geophys.* 1990, vol. 8, pp. 257–272.

Shue J.-H. Dependence of the ionospheric convection pattern on the conductivity and the southward IMF: Ph. D. Thesis. University of Alaska, Fairbanks, 1993, 141 p.

Shirapov D.S., Mishin V.M. *Modelirovanie global'nykh elektrodinamicheskikh processov v geomagnitosfere* [Modeling of the Global Electrodynamic Processes in the Geomagnetsphere]. Ulan-Ude, East Siberian State Technological University Publ., 2009, 213 p. (In Russian).

Stenbaek-Nielsen H.C., Otto A. Conjugate auroras and the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1997, vol. 102, no. A2, pp. 2223–2232. DOI: [10.1029/96ja03563](https://doi.org/10.1029/96ja03563).

Suvorova A.V. Flux enhancements of >30 keV electrons at low drift shells $L < 1.2$ during last solar cycles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 12,274–12,287. DOI: [10.1002/2017JA024556](https://doi.org/10.1002/2017JA024556).

Tenfjord P., Østgaard N., Snekvik K., et al. How the IMF B_y induces a B_y component in the closed magnetosphere and how it leads to asymmetric currents and convection patterns in the two hemispheres. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, no. 11, pp. 9368–9384. DOI: [10.1002/2015ja021579](https://doi.org/10.1002/2015ja021579).

Velichko V.A., Boroyev R.N., Gelberg M.G. Azimuthal asymmetry of field-aligned currents flowing in and out of the ionosphere in a substorm current wedge. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2002, vol. 42, no. 5, pp. 619–623. (In Russian).

Velichko V.A., Boroyev R.N., Gelberg M.G., et al. North-south asymmetry of the substorm intensity depending on the IMF B_y -component. *Earth, Planets and Space.* 2002, vol. 54, pp. 955–961.

Østgaard N., Reistad J.P., Tenfjord P., et al. The asymmetric geospace as displayed during the geomagnetic storm on August 17, 2001. *Ann. Geophys.* 2018, vol. 36, pp. 1577–1596. DOI: [10.5194/angeo-2018-65](https://doi.org/10.5194/angeo-2018-65).

URL: http://ckp-angara.iszf.irk.ru/index_en.html (accessed June 18, 2020).

URL: <http://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php> (accessed June 18, 2020).

URL: <http://space.fmi.fi/Image> (accessed June 18, 2020).

URL: <http://space.augsburg.edu/maccs/requestdatafile.jsp> (accessed June 18, 2020).

URL: <https://www.gi.alaska.edu/monitors/magnetometer> (accessed June 18, 2020).

URL: <http://www.carisma.ca> (accessed June 18, 2020).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu> (accessed June 18, 2020).

Как цитировать эту статью:

Мишин В.В., Мишин В.М., Курикалова М.А. Динамика асимметрии распределения продольных токов во время суббурь в сезон равноденствия. *Солнечно-земная физика.* 2021. Т. 7, № 1. С. 40–50. DOI: [10.12737/szf-71202105](https://doi.org/10.12737/szf-71202105).