

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ВОЗМУЩЕННОЙ СИСТЕМЫ МАГНИТОСФЕРА–ИОНОСФЕРА И ИХ ГЕНЕРАТОРЫ

<sup>1</sup>В.М. Мишин, <sup>1</sup>А.Д. Базаржапов, <sup>2</sup>У. Сухбаатар, <sup>3</sup>М. Фёрстер

## ELECTRIC CIRCUITS OF THE DISTURBED MAGNETOSPHERE–IONOSPHERE SYSTEM AND THEIR GENERATORS

<sup>1</sup>V.M. Mishin, <sup>1</sup>A.D. Bazarzhapov, <sup>2</sup>U. Sukhbaatar, <sup>3</sup>M. Förster

{1} Описаны применения простейшей теории электрических цепей в анализе наблюдаемого крупномасштабного электрического поля и токов в возмущенной системе магнитосфера–ионосфера. Использовались карты распределения в ионосфере плотности продольных токов (ПТ), полученные по наземным магнитным измерениям с помощью оригинальной техники инверсии магнитограмм (ТИМ) и измерения на спутниках. Предложен метод определения цепей по данным таких карт, основанный на обнаружении пространственных R.N-неоднородностей в каждой из трех зон ПТ Ииджимы и Потемры. С использованием результатов нового метода описаны некоторые ранее неизвестные генераторы электрического поля и токов, новые типы токовых систем в долях хвоста и плазменном слое, а также образование и динамика новых типов трехмерных систем с авроральными электроструями и меридиональными ионосферными токами Педерсена, которым ранее в литературе уделялось незаслуженно мало внимания.

{1} The study presents applications of the simplest theory of electric circuits in the analysis of the observed large-scale electric field and currents in the disturbed magnetosphere–ionosphere system. Maps of the distribution of density of field-aligned currents (FAC) in the ionosphere were used. The maps were obtained from ground-based magnetic measurements using the original technique of inversion of magnetograms (TIM) and also from satellite measurements. We suggested the method of determining the circuits from data of the maps based on finding spatial R.N-inhomogeneities in each of three Iijima and Potemra FAC zones. Using the results of new method we described some unknown before generators of electric field and currents, new types of current systems in the tail lobes and plasma sheet, as well as formation and dynamics of new types of three-dimensional systems with auroral electrojets and meridional ionospheric Pedersen currents which have received little attention in literature.

### 1. Введение

{2} Электрическая цепь по определению состоит из генераторов и нагрузок, характеристики которых описываются условиями  $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} < 0$  и  $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} > 0$  соответственно. Такой подход обычен для проволочных цепей, но его применимость к токам в беспроводной магнитосфере не очевидна. Здесь термины «проволочная цепь» и «беспроволочная цепь» заменяют более известные термины «цепь с сосредоточенными параметрами» и «цепь с распределенными параметрами».

Если система содержит последовательно соединенные токи в магнитосфере, токи вдоль силовых линий (ПТ, продольные токи) и токи в ионосфере, то в такой системе должны быть нагрузки и генераторы, так как в ионосфере ток выделяет джоулево тепло. Таким образом, если известно, что система имеет магнитосферное происхождение, то возникает противоречивая ситуация: с позиций МГД понятие генератор теряет смысл, а в рамках аналогии магнитосферных и проволочных электрических цепей генератор существует и его параметры могут быть определены.

{3} Проблема обычно решается в пользу подхода в рамках МГД. Источник энергии названной трехмерной цепи тока остается невыясненным при таком подходе, или же применение аналога магнитосферной системы токов и электрической цепи с генератором ведет к противоречиям с известными данными наблюдений и, например, с гипотезой пересоединения на дневной магнитопаузе [Heikkila, 1984]. Теоретическое обсуждение проблемы привело к выводу, что описание магнитосферных токов в рамках их аналогии с электрическими цепями возможно, если электрическое поле и токи заданы из наблюдений [Parker, 1996; Parker, 2000; Vasyliunas, 2001].

{4} Однако в [Siebert, Siscoe, 2002] показано, что применение электрических цепей в физике магнитосферы не только возможно, но и необходимо для примирения данных наблюдений пересоединения на дневной магнитопаузе при южном ММП с данными о токе и электрическом поле вблизи магнитопаузы и в головной ударной волне. Другой случай описал Акасофу [Akasofu, 2004], используя наземные магнитные измерения, технику инверсии магнитограмм KRM [Kamide, et al., 1981; Kamide, Baumjohann, 1993] и магнитные измерения во внутренней магнитосфере [Iijima, et al., 1990]. Приведенные данные подтвердили, что токовые элементы в магнитосфере и ионосфере составляют цепь с генератором, который необходим, чтобы обеспечить потери в ионосфере.

В приведенных примерах основные ионосферные токи в возмущенном ночном авроральном овале – *меридиональные*. По разным причинам подобное предположение сделано в работах [Akasofu, 2004; Lui, Kamide, 2003; Liang, Liu, 2007; Mishin, et al., 2008]. Аналогично в статистических моделях ПТ суббури [Weimer, 2001; Papitashvili, et al., 2002; Gjerloev, Hoffman, 2001] меридиональные токи, замыкающие в ионосфере пары ПТ соседних зон 1 и 0 Ииджимы и Потемры, являются основными в области ночного аврорального овала. Эти факты ставят под сомнение первичную роль принятой в физике магнитосферных возмущений модели токового клина суббури (SCW, substorm current wedge) [McPherron, et al., 1973]. В названной модели основной вклад в систему токов возмущенного овала создают не меридиональные, а перпендикулярные им зональные токи SCW.

{5} Многочисленные примеры аналогии магнитосферных токов и токов в проволочных электриче-

ских цепях дают двумерные карты распределения в ионосфере плотности ПТ, в которых учитываются три зоны ПТ Ииджимы и Потемры [Potemra, 1994] и дополнительные пространственные структуры в каждой зоне [Mishin, et al., 2004; Förster, et al., 2006]. Примеры таких карт показаны на рис. 1. Можно видеть пары противоположно направленных ПТ: втекающий ток в одной зоне и вытекающий в соседней. Пары противоположных ПТ замыкаются в проводящей ионосфере. Факт замыкания каждой пары показан на рис. 1 короткой жирной дугой. Каждая такая пара и соединяющий меридиональный ионосферный ток – звено электрической цепи, которое мы называем меридиональной токовой системой (MCS, meridional current system). Изучение MCS – новая научная проблема, активно обсуждаемая в литературе (например, [Akasofu, 2004; Lui, Kamide, 2003; Mishin, et al., 2008]). В настоящей статье вводятся три типа: MCS-0, MCS-1, и MCS-2.

Чтобы описать простейшие электрические цепи, содержащие наблюдаемые системы типа MCS, их продолжения в магнитосфере и предполагаемые генераторы, на которые замыкается каждая цепь, мы используем карты ПТ, показанные на рис. 1. Будут

также учтены цепи, содержащие SCW и зональный ионосферный ток, соединяющий пару ПТ.

{6} Задача настоящей работы – показать, что даже простейшие варианты электрических цепей, подобных проводочным цепям в электротехнике, позволяют выделить в возмущенной системе магнитосфера–ионосфера генераторы наблюдаемых электрических полей и токов и обеспечивают компактное описание токов и их сложной динамики, а также качественно новое понимание физики возмущений.

В разделе 2 излагается оригинальная версия пространственной модели ПТ, которая основана на модели Ииджимы и Потемры, но содержит вместо трех девять областей втекающего и девять вытекающего ПТ. В разделе 3 описана система генераторов ПТ, в разделе 4 – принципиальные схемы электрических цепей, создаваемых в ионосфере и магнитосфере. Цепи включают MCS. Раздел 5 – обсуждение.

## 2. Модель продольных токов

{7} Мы используем мировую сеть наземных магнитометров для вычисления двумерных карт эквивалентных (ЭТ) ионосферных и продольных токов. Вычисления выполняются на основе техники инверсии магнитограмм (ТИМ) [Kamide, et al., 1981; Förster,

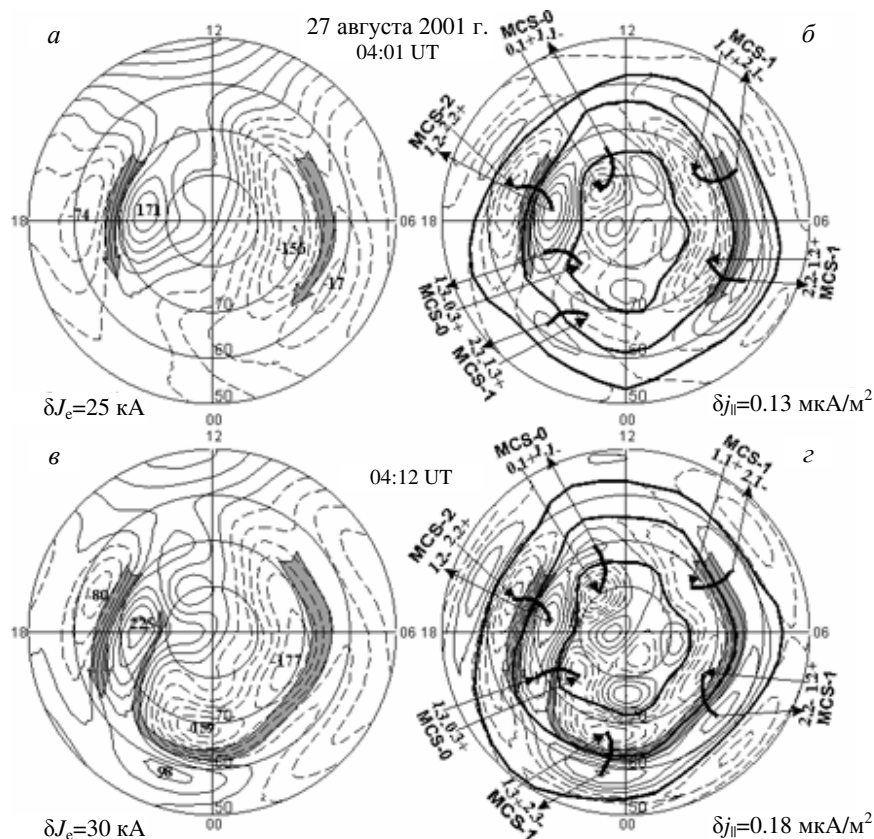


Рис. 1. Примеры типичных для суббурь карт ЭТ (а, в) и ПТ (б, з). Показаны восточная и западная авроральные электроструктуры и замыкающий струйный ток вдоль границы зон 1 и 0. На картах ЭТ (а, в) показаны значения полного тока в фокусах отдельных вихрей (в кА). На картах ПТ (б, з) отмечен интервал  $\delta j_{||}$  (мкА/м²) между изолиниями плотности ПТ. Использовались значения  $\Sigma_p=7$  См,  $\Sigma_H=14$  См.

На картах ПТ (б, з) показаны границы трех зон Ииджимы и Потемры (толстые линии) и отмечены R.N-неоднородности плотности ПТ внутри каждой зоны. Штриховые изолинии – втекающий, сплошные изолинии – вытекающий из ионосферы ПТ. Короткие жирные дуги соединяют центры областей втекающего и вытекающего ПТ двух соседних зон Ииджимы и Потемры. Каждую пару ПТ замыкает ионосферный ток Педерсена, имеющий основную меридиональную компоненту. Этот меридиональный ток и соответствующая пара ПТ составляют одну из MCS, отмеченных на рисунке.

et al., 2006; Mishin, 1990 и ссылки там]. Примеры карт, полученных нами по данным ТИМ для загрузочной (*a* и *б*) и разгрузочной (*в* и *г*) фаз суббури 27 августа 2001 г., приведены на рис. 1.

Жирными толстыми замкнутыми линиями на картах ПТ показаны границы трех зон Ииджимы и Потемры: околополюсной зоны 0, соседней зоны 1, и самой низкоширотной зоны 2. О методе определения границ можно прочитать в [Mishin, et al., 2001; 1997]. На картах (рис. 1, *в*, *г*) отмечены максимумы плотности ПТ внутри каждой зоны, обозначенные символами типа  $R.N+$ ,  $R.N-$ . Здесь первая цифра,  $R=0, 1, 2$ , означает номер зоны по классификации Ииджимы и Потемры. Вторая цифра может принимать значения  $N=1, 2, 3$ , где 1 означает сектор MLT вблизи полудня, 3 – вблизи полуночи, и 2 – промежуточный сектор MLT. Например, символ  $0.3+$  обозначает ПТ зоны 0 ( $R0$ ), втекающий в ночном секторе; символ  $1.2-$  обозначает ПТ зоны  $R1$ , вытекающий из ионосферы в промежуточном секторе. При более общем подходе символ  $R.N$  не обязательно обозначает максимум плотности ПТ, но всегда обозначает область с определенным номером  $R$  зоны Ииджимы и Потемры и определенным номером  $N$  сектора MLT.

Отметим, что точность вычислений на основе ТИМ быстро уменьшается на широтах  $\Phi < 60^\circ$  [Mishin, 1990; Mishin, et al., 2001; 1997]. Детали распределения ЭТ и ПТ на названных широтах в настоящей статье не обсуждаются.

С описанными дополнениями каждая карта ПТ, показанная на рис. 1, содержит 9 структурных элементов вместо трех в модели Ииджимы и Потемры. Модель распределения плотности ПТ с  $R.N$ -неоднородностями впервые введена в работах [Mishin, et al., 2004; Förster, et al., 2006]. Учет  $R.N$ -неоднородностей позволяет впервые ввести в рассмотрение генераторы и электрические цепи, в которых *меридиональные* ионосферные токи связывают зону 1 с соседними зонами 2 и 0 (см. разделы 3 и 4).

Геометрические параметры и интенсивности токов на картах распределения ПТ, подобных рис. 1, зависят от условий в солнечном ветре (СВ), от типа и фазы возмущения. Однако основная описанная выше структура пространственного распределения плотности ПТ с  $R.N$ -неоднородностями сохраняется применительно к задачам, рассматриваемым ниже. Эта структура видна и на картах ПТ типичной (статистической) суббури [Mishin, et al., 2001]. Типичной суббуре соответствуют также системы ЭТ типа DP2 на загрузке (рис. 1, *a*) и DP1 на разгрузке (рис. 1, *в*).

### 3. Магнитосферные генераторы

{8} Три генератора и электрические цепи каждого из них, изображенные на основе обнаруженных  $R.N$ -структур, представлены схематически на рис. 2.

Показаны экваториальное сечение магнитосферы и сечение Земли с зонами  $R0, R1, R2$ , а также одно из поперечных сечений хвоста в Северном полуша-

рии. Сплошные линии показывают ПТ и замыкающие их частичные кольцевые токи, обозначенные DRP-1 и DRP-2.

{9} Учитывая данные МГД-моделирования Сиско и др. [Siscoe, et al., 2000], мы принимаем на рис. 2, *a*, что при южном ММП в головной ударной волне возникает ток вечер–утро, который замыкается противоположно направленным током на дневной магнитопаузе. Замыкающий ток имеет то же направление, что и ток Чепмена–Ферраро, но эти два тока, хотя они оба наблюдаются на дневной магнитопаузе, имеют разную природу. Ток Чепмена–Ферраро не только течет на магнитопаузе, но и замыкается в этом слое. Что же касается упомянутого замыкающего тока, Зиберт и Сиско [Siebert, Siscoe, 2002] обнаружили его генератор в головной ударной волне (ГУВ), показав, что в ГУВ при южном ММП выполняется условие  $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} < 0$ .

{10} Генератор Зиберта и Сиско создает ток в ГУВ в цепи без ПТ. В отличие от этого, мы используем опытные данные упомянутых выше  $R.N$ -структур. Они позволяют описать генератор, который расположен на дневной магнитопаузе и создает цепи, замкнутые через ионосферу и потому содержащие ПТ. С этой целью мы принимаем, что наблюдаемая на рис. 2 пара ПТ ( $1.1+$ ,  $1.1-$ ) (зона 1, дневной сектор,  $N=1$ ) втекает/вытекает из краев разрыва/уменьшения тока дневной магнитопаузы. Этот разрыв создается в модели наложением на основной ток утро–вечер плазменного слоя (ПС) хвоста тока вечер–утро в генераторе, который мы будем называть дневным. Дневной генератор расположен в секторе  $N=1$  и отмечен на рис. 2, *a* римской цифрой I.

{11} Другой генератор, названный ночным, схематически показан на рис. 2, *б*. Мы принимаем, что этот генератор III (по номеру сектора  $N=3$ ) создается разрывом/уменьшением тока хвоста в ночном ПС хвоста. Как можно видеть, ночной разрыв образует пару ПТ ( $1.3+$ ,  $1.3-$ ) (зона 1, сектор  $N=3$ ). Предполагается, что размеры и расположение области разрыва зависят от рассматриваемых типов и фаз возмущения.

{12} Оба генератора замыкаются через ионосферу. Поэтому каждый из них создает вклад в наблюдаемые электрическое поле и ионосферные токи при всех MLT и на всей площади трех зон Ииджимы и Потемры, хотя генератор I может быть основным в дневные, а генератор III – в ночные часы. Мы принимаем также, что в промежуточном секторе  $N=2$ , как и во всех трех зонах Ииджимы и Потемры и соответствующих магнитных силовых трубках, электрическое поле и токи создаются действием обоих названных генераторов и генератора II, кратко описанного в разделе 5. Единую систему генераторов, действующую в секторе  $N=2$ , как и в секторах  $N=1$  и 3, мы будем обозначать буквой G.

Относительные вклады генераторов изменяются с переходом возмущения от дневного к ночному сектору и зависят от условий в СВ. Вклады генераторов I и II увеличиваются с ростом южного ММП, модуля ММП  $B_y$ , динамического давления СВ. Вклад генератора III становится основным в ночном секторе на фазе

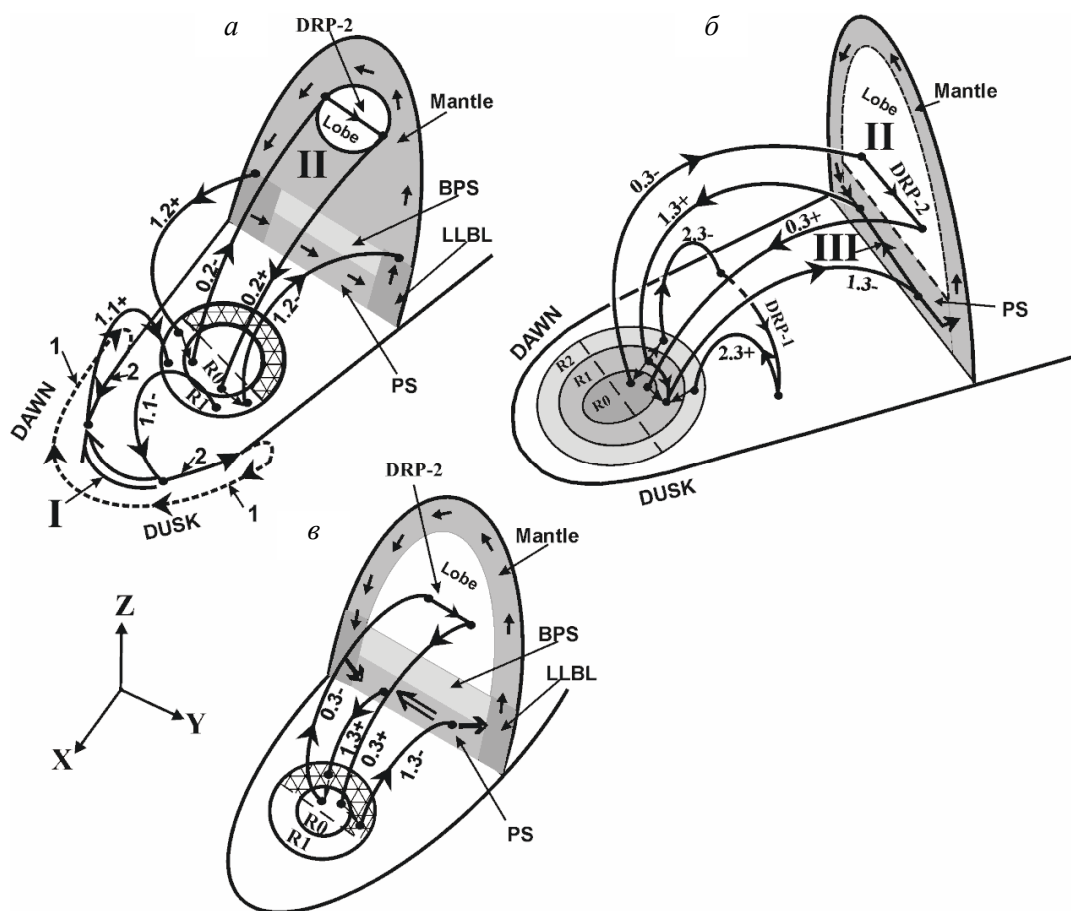


Рис. 2. Система трех генераторов в возмущенной магнитосфере. Показаны сечения северной половины хвоста в экваториальной и YZ-плоскостях, вид с вечерней стороны (Солнце слева, ось X – к Солнцу, ось Y – с утра на вечер). Штриховой линией 1 в экваториальной плоскости показан ток в ГУВ, замыкаемый током 2 на магнитопаузе. Стрелки, отмеченные римскими цифрами I и III, показывают направления токов в генераторах I и III. Цифрой II отмечено сечение объемного генератора II, в котором показана замкнутая цепь тока в мантии (Mantle), плазменном слое (PS) и низкоширотном пограничном слое (LLBL). Концентрические круги в экваториальной плоскости ограничивают ионосферные зоны R0, R1 и R2 Ииджимы и Потемры. Сплошными толстыми линиями со стрелками показаны ПТ, вытекающие/втекающие в ионосферу из генераторов.

На рис. 2, а отмечены ПТ 1.1 из генератора I и ПТ 1.2 из генератора II. Токи 1.2 на этом рисунке замыкаются на генератор II через меридиональные ионосферные токи, ПТ 0.2 и дневную часть перпендикулярных токов DRP-2 в доле хвоста.

На рис. 2, б – ночная система ПТ 1.3 из генератора III. Эти ПТ продолжают в ионосфере меридиональными токами вверх и вниз по широте. Далее электрическая цепь, содержащая ПТ 1.3, замыкается на генератор III посредством ПТ 0.3 и ночной части тока DRP-2 в доле хвоста и ПТ 2.3 и тока DRP-1 во внутренней магнитосфере.

Рисунок 2, в – упрощенный рис. 2, б. Не показаны частичный кольцевой ток DRP-1 и ПТ зоны 2.

расширения суббури. На фазе роста суббури разрыв тока хвоста, создающий генератор III, происходит в дальнем хвосте, а на фазе расширения – в среднем и дальнем хвосте. (О полном составе общей системы G см. раздел 5.)

#### 4. Электрические цепи

{13} В [Siscoe, 1982; Siscoe, et al., 1991 и ссылки там] введено и эффективно использовано предположение, что ПТ R2 – результат частичного замыкания ПТ R1 через R2. При этом предположении генераторы ПТ R1 создают также ПТ R2. Мы обобщаем такой подход и принимаем как *основное предположение*, что ПТ R2 и R0 создаются системой генераторов I, II и III в результате ответвления от ПТ R1.

{14} Как пример, рассмотрим на рис. 2, б схему электрических цепей ночного генератора III (N=3).

В соответствии с основным предположением мы принимаем, что этот генератор питает ПТ структур R1.3. Эти ПТ растекаются по ионосфере и замыкаются на генератор через ПТ R0.3, ПТ R2.3 и магнитосферные токи DRP-1 и DRP-2. Образуются две электрические цепи, из которых в первой замыкание токов R1 происходит через R2, а во второй – через R0.

Проследим первую цепь, звеньями которой служат пары ПТ R1 и R2, ионосферные *меридиональные* токи Педерсена, текущие из R1 в R2, и частичный кольцевой ток DRP-1 во внутренней магнитосфере. В этой цепи генератор III создает пару ПТ R1.3, ПТ 1.3+ втекает в ионосферу и создает ионосферный ток Педерсена, текущий в область R2; ток Педерсена вытекает из ионосферы как ПТ 2.3–, продолжается во внутренней магнитосфере как DRP-1; возвращается в ионосферу как ПТ 2.3+ и течет по

ионосфере в область R1, где он создает ПТ 1.3–, который замыкается на генератор. Первая замкнутая цепь имеет вид

$$\begin{aligned} \text{III} \rightarrow 1.3+ \rightarrow i.\text{current S} \rightarrow 2.3- \rightarrow \\ \text{DRP-1} \rightarrow 2.3+ \rightarrow i.\text{current N} \rightarrow 1.3- \rightarrow \text{III}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь «i.current N(S)» означает «ионосферный ток Педерсена на север (юг)» и DRP-1 обозначает частичный кольцевой ток утро–вечер, замыкающий пару ПТ (2.3–, 2.3+) во внутренней магнитосфере.

Вторая цепь создается растеканием ПТ R1+ вверх по широте:

$$\begin{aligned} \text{III} \rightarrow 1.3+ \rightarrow i.\text{current N} \rightarrow 0.3- \rightarrow \text{DRP-2} \rightarrow \\ 0.3+ \rightarrow i.\text{current S} \rightarrow 1.3- \rightarrow \text{III}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь DRP-2 – ток утро–вечер, который замыкает пару ПТ (0.3– и 0.3+) в долях хвоста.

{15} Аналогичные принципиальные схемы можно получить для генераторов I и II. Схемы (1) и (2) получены в варианте N=3. Мы будем использовать подобные схемы также в вариантах N=1 и 2. Схемы (1), (2) – не догма. Соседние по MLT ячейки R.N каждой зоны могут сливаться так, что одна из них становится неразличима, а вторая замещает первую. Например, в схеме (1) может наблюдаться звено «i.current N → 0.2– → DRP-2», вместо «i.current N → 0.3– → DRP-2».

Отметим, что реальные (полные) токи в звеньях цепей типа (1) и (2) содержат вклады не только генератора III, но и общей системы генераторов, названной выше системой G. Как было отмечено, мы полагаем, что в ночном секторе основным в возмущенной магнитосфере является генератор III.

{16} Схемы (1) и (2) не учитывают *зональный* ток, который может замыкать в ионосфере пару (1.N+ и 1.N–) и создать западную авроральную электрострую (AEJW, auroral electrojet West) в зоне 1 прямо, без ответвления в R0 и R2. Учесть вклад такого зонального тока можно, присоединив параллельно к каждой из цепей (1) и (2) цепь вида

$$G \rightarrow 1.M + i.\text{current W} \rightarrow 1.E- \rightarrow G, \quad (3)$$

где M – утренний, а E – вечерний сектор R1. В цепи (3) пара ПТ замыкается ионосферным зональным током Педерсена или Каулинга, текущим на запад. Цепь (3) подобна классическому SCW, но мы не накладываем на значения M и E ограничения M=E=3. В общем случае M и E могут принимать значения 2 и 0. Поэтому мы называем цепь (3) токовым клином (CW, current wedge), в отличие от токового клина суббури SCW. По данным, например, статистической модели [Weimer, 2001], CW наблюдается всегда. Однако интенсивность зонального ионосферного тока, замыкающего ПТ CW, зависит от проводимости ионосферы и *расстояния по MLT между втекающим 1.M+ и вытекающим 1.E–*. Отсюда следует, что локальный SCW вблизи раздела Харанга может быть не наблюдаем в определенных режимах возмущения, хотя его более крупномасштабный аналог CW должен существовать всегда.

Пример распределений плотности ПТ без SCW, но с CW показан на рис. 3, в. Перманентное существование CW означает, что разрыв/уменьшение тока утро–вечер в плазменном слое хвоста имеет место постоянно даже без SCW.

## 5. Обсуждение

Схемы (1) и (2) опираются как на модели генераторов на рис. 2, так и на опытные данные, примеры которых даны на рис. 1. Приведенные выше выводы, следующие из описания электрических цепей, либо сопоставимы с известными, которые нуждаются в верификации, либо получены впервые. Эти две группы результатов дополнительно обсуждаются ниже.

{17} В параграфе {12} было отмечено, что полный состав общей системы генераторов, создающей электрическое поле и токи в возмущенной ионосфере и магнитных силовых трубках, предстоит выяснить. Мы кратко описали только генераторы I и III, следы которых прямо прослеживаются на картах ПТ, подобных приведенным на рис. 1.

В то же время Ляцкий [Ляцкий, 1987 и ссылки там] описал пространственно-однородное электрическое поле в полярной шапке (ПШ) с синусоидальным распределением потенциала на границе ПШ, приближенно соответствующим наблюдаемым двухвихревым системам антисолнечной и возвратной конвекции плазмы в ионосфере. Такое поле бездивергентно внутри ПШ, что поддерживает упомянутое выше основное предположение о первичности ПТ зоны 1. В модели [Cowley, Lockwood, 1992], основанной на модели Данжи для южного ММП, конвекционное электрическое поле в долях хвоста и ионосфере создается переносом потенциала из СВ. Переносчиком служит пара ПТ, стекающих с краев «окна Стерна», на площади которого на магнитопаузе содержится полный поток магнитных силовых линий, открытых в СВ. В модели [Mishin, et al., 2004] конвекционное электрическое поле создается генератором, упомянутым в настоящей статье под номером II. Этот генератор образуется во всем объеме долей хвоста, охватывая и промежуточный сектор N=2. Э.д.с. генератора II возникает по закону Фарадея в каждом сечении хвоста, пересекаемом потоком открытых магнитных силовых линий. Одно из таких сечений показано на всех панелях рис. 2. Сечения – элементарные генераторы – соединены параллельно. Ток в элементарном генераторе имеет на магнитопаузе направление вечер–утро и обратное направление в ПС. Разрыв/уменьшение тока утро–вечер в ПС создает ПТ, втекающие в ионосферу в утреннем и вытекающие в вечернем секторе зоны 1 аврорального овала.

Стимулом для введения генератора II, как и генераторов I и III, послужили R.N-максимумы плотности ПТ, впервые описанные в [Mishin, et al., 2004]. Поскольку генератор I образуется на дневной магнитопаузе в области пересоединения, предполагалось, что он – генератор тока. Ему было дано название стартового генератора, роль которого сводится к созданию

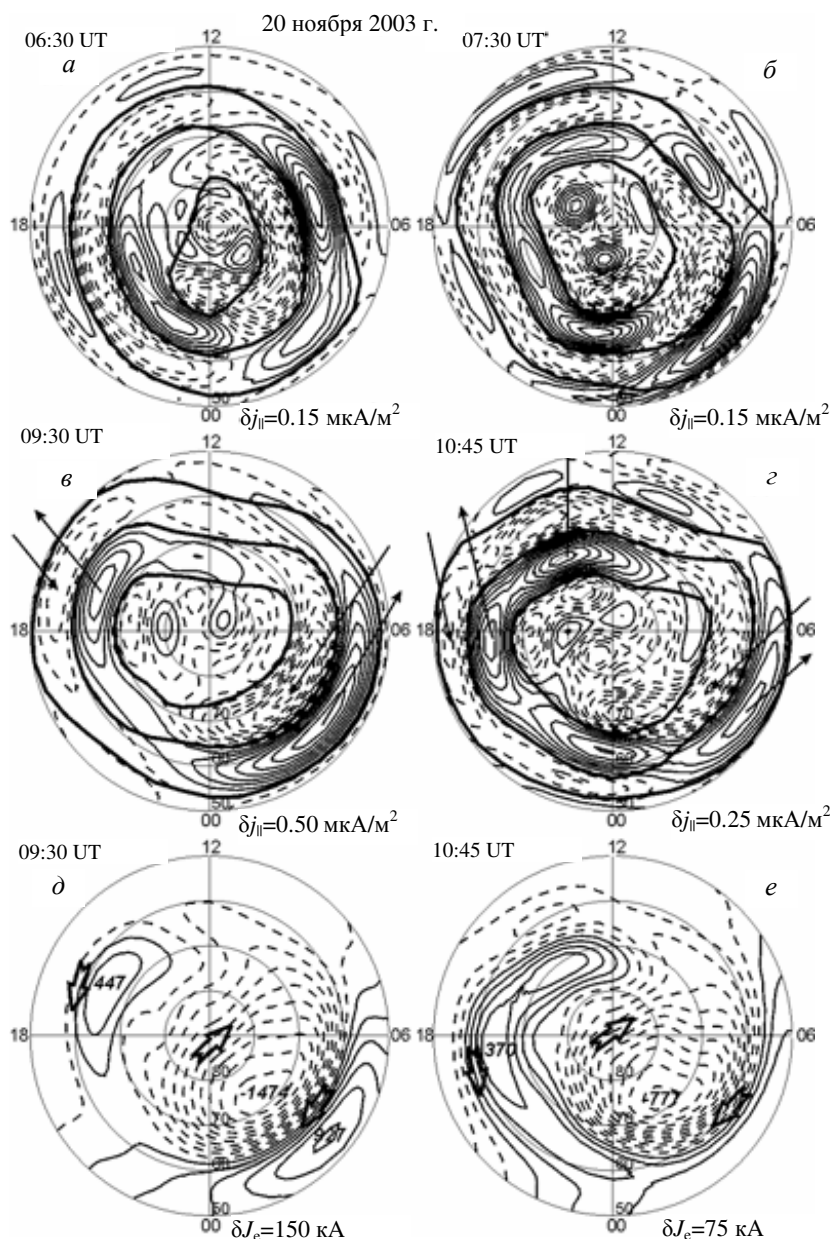


Рис. 3. Карты ПТ (а–с) и ЭТ (д, е) супербури 20 ноября 2003 г. Стрелки на картах ЭТ показывают направление тока. Значения полного тока отмечены (в кА) в фокусах отдельных вихрей. Отмечены также расстояния между изолиниями –  $\delta J_e$  (в кА). Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

упомянутого потока открытых силовых линий долей хвоста. Поскольку генератор III тоже образуется в области пересоединения с аномально низкой проводимостью, мы предполагаем, что он также является генератором тока. При таком подходе генератор II оказывается основным генератором напряжения.

{18} Как было отмечено, схемы (1) и (2) не учитывают зональный ток, замыкающий в ионосфере пару (1.3+ и 1.3–) в зоне 1 прямо, без ответвления в R0 и R2. Прямое замыкание соответствовало бы классической концепции SCW, где разгрузочная AEJW является зональным током Педерсена или Каулинга [McPherron, et al., 1973; Kan, 2007 и ссылки там]. В отличие от такой модели, в схемах (1) и (2) разгрузочная AEJW – ток Холла.

Действительно, западная электроструя образуется как ток Холла в меридиональной системе то-

ков вида (1.3+i.current S→2.3–). Мы обозначаем подобные системы токов вида (1.N+i.current S→2.N–) аббревиатурой MCS-1. Цифра 1 здесь – номер зоны Ииджимы и Потемры, которой принадлежит втекающий ПТ данной MCS независимо от значения N. MCS-1 служит звеном цепи (1). Упомянутый ток Холла течет в околополуночном/утреннем секторе внутри ионосферных оснований пары (1.3+, 2.3–), как и перпендикулярный к нему ток Педерсена, на юг.

Заменяя в (1) и (2) N=3 на N=2 и N=1, получим аналогичные схемы электрических цепей, описывающие образование AEJW в промежуточном и дневном секторах.

{19} Продолжение AEJW в околополуночном/вечернем секторе N=3 тоже создается током Холла в MCS вида (0.3+→i.current S→1.3–). Эту

MCS мы обозначаем MCS-0, где цифра 0, согласно изложенному выше правилу, есть номер зоны втекающего ПТ. MCS-0 служит звеном цепи (2).

Отметим, что продолжение AEJW внутри систем MCS-0 на активной фазе суббури наблюдается как отдельная авроральная электроструя, которая пространственно совпадает с антиконвекционной (от Солнца) струей конвекции плазмы в ионосфере ПШ и долях хвоста. Конвекция от Солнца замыкается двумя струями возвратной конвекции, совпадающими пространственно с AEJW в утреннем и восточной авроральной электроструей (AEJE, auroral electrojet East) в вечернем секторе. Струйный характер продолжения AEJW в вечернем секторе ясно виден на рис. 1, в, г.

{20} Согласно схеме (1), AEJE тоже образуется как ток Холла в MCS вида (2.3+current N→1.3–). Используя знакомое правило, мы применяем для подобных систем типа (2.N+current N→1.N–) обозначение MCS-2.

{21} В целом, схемы типа (1) и (2) описывают образование MCS-0, MCS-1 и MCS-2 и проливают новый свет на образование восточной и западной авроральных электроструй как токов Холла. По этому поводу имеются различные точки зрения.

Широко известна модель образования утренней AEJW на разгрузочной фазе суббури, развиваемая много лет в работах [Кап, 2007 и ссылки там], в которой названная электроструя – ток Каулинга. Согласно [Kamide, Baumjohann, 1993], наблюдаемые в спокойное время обе конвекционные авроральные электроструи образуются токами Холла, но утренняя разгрузочная AEJW суббури создается током Каулинга.

С другой стороны, Акасофу [Akasofu, 2004] пришел к заключению, что во время суббури разгрузочная AEJW образуется не током Каулинга, а током Холла. В [Mishin, et al., 2008] по данным трех отдельных суббур сделан вывод, что разгрузочная западная авроральная электроструя чаще наблюдалась как ток Холла, реже – как ток Каулинга. Амми и Фуджи [Amm, Fujii, 2008] исследовали распределение токов в околополночном секторе AEJW в один из моментов избранной суббури и заключили, что ток Каулинга доминировал на относительно малой части рассмотренной области.

Таким образом, проблема не закрыта, и мы предполагаем, что в ее дальнейших исследованиях изложенные выше новые методы найдут новые применения. Одно из таких последних применений – статья [Мишин и др., 2010] о динамике систем токов в ходе супербури 6 апреля 2000 г. в настоящем сборнике.

{22} Завершая обсуждение полученных результатов, отметим ток утро–вечер DRP-2, показанный на рис. 2 и включенный в схему (2). В вариантах N=3, N=2 и N=1 этот ток замыкает пары ПТ (0.3–, 0.3+), а в вариантах N=2 и N=1 – пары (0.2–, 0.2+), (0.1–, 0.1+). Этот перпендикулярный к магнитному полю ток течет в долях хвоста. Насколько известно авторам, существование такой системы токов предсказывается впервые.

С использованием карт ПТ типа рис. 1, полученных по данным избранных суббур, в [Мишин и др.,

2009; Mishin, et al., 2009a] отмечен ряд других, ранее неизвестных, систем перпендикулярных к магнитному полю токов в долях хвоста, мантии и плазменном слое. В [Mishin, et al., 2009b] сделан вывод, что новые системы составляют цепочку, вытянутую приблизительно вдоль меридиана полдень–полночь от дневной магнитопаузы до области околоземного разрыва хвоста. Расположенные вдоль цепочки магнитосферные токи периодически меняют направление от утро–вечер в одном звене цепочки до вечер–утро в соседнем звене. Цепочка в целом подобна стоячей волне, образованной магнитозвуковыми волнами, излучающимися в противоположных направлениях из областей пересоединения на дневной магнитопаузе и в околоземном хвосте. При основном для суббур периоде таких волн  $\sim 10^3$  с и измеренной на картах ПТ длине волны авторы получили оценки скоростей магнитозвуковых волн, близкие к ожидаемым по порядку величины.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-05-90207 Монг-а.

За предоставление входных данных ТИМ авторы благодарят Drs. D. McComas, R. Lepping, K. Ogilvie, J. Stenberg и A. Lasarus за данные спутника WIND; и Drs. H. Gleisner (DMI, Дания), A. Viljanen (проект IMAGE), K. Yumoto (проект 210MM), T. Iyemori (WDC-C2, Киото), J. Posch (проект MACCS), О.А. Трошичева (ААНИИ), Е.П. Харина (МСД-Б), С.И. Соловьева (ИКФИА, Якутск), Б.М. Шевцова и А.В. Винницкого (ИКИР), руководителей проектов Intermagnet, GIMA (Аляска), Canopus (CARISMA) (Dr. D. Milling); С. Хомутова (обс. Новосибирск) и О. Кусонского (обс. Аркти). Авторы благодарят рецензентов настоящей статьи за полезные замечания и сотрудников группы ТИМ Т. Сайфудинову, М. Толочко и Л. Сапронову за обсуждения и техническую помощь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ляцкий В.Б. Токовые системы магнитосферно-ионосферных магнитных возмущений. Наука, 1987. 195 с.
- Мишин В.М., Фёрстер М., Сайфудинова Т.И. и др. Спонтанные суббури и упорядоченный тип магнитосферных возмущений во время супербури 20 ноября 2003 // Геомагнетизм и аэрономия, 2007. Т. 47, № 4. С. 457–469.
- Мишин В.М., Курикалова М.А., Ферстер М. Электрические цепи и их генераторы в магнитосфере Земли: концепция электрических цепей в применении к начальной фазе супербури 6 апреля 2000 г. // Солнечно-земная физика. 2010. Вып 15. С. 66–74.
- Akasofu S-I. Several controversial issues on substorms // Space. Sci. Rev. 2004. V. 113. P. 1–40.
- Amm O., Fujii R. Separation of Cowling channel and local closure currents in the vicinity of a substorm breakup spiral // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A06304. doi:10.1029/2008JA013021.
- Cowley S.W.H., Lockwood M. Excitation and decay of solar wind driven flows in the magnetosphere-ionosphere system // Ann. Geophys. 1992. V. 10. P. 103–115.
- Förster M., Mishin V.M., Stauning P., et al. Plasma convection in the Earth's magnetosphere and ionosphere during substorms // Adv. Space Res. 2006. V. 38, P. 1750–1754.
- Gjerloev J.W., Hoffman R.A. The convection electric field in auroral substorms // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 12912.



- Heikkila W.J. Magnetospheric topology of fields and currents // *Magnetospheric Currents*. Geophys. Monogr. Ser. V. 28 / Ed. T.A. Potemra, AGU. Washington D.C., 1984. P. 208–222.
- Iijima T., Potemra T.A., Zanetti L.J. Large-scale characteristics of the magnetospheric equatorial currents // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 991.
- Kamide Y., Richmond A.D., Matsushita S. Estimation of ionospheric electric fields, ionospheric currents, and field-aligned currents from ground magnetic records // *Ibid.* 1981. V. 86. P. 801–813.
- Kamide Y., Baumjohann W. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. 178 p.
- Kan J.R. On the formation of near Earth X-line at substorm expansion onset // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. A01207. doi: 10.1029/2006JA012011.
- Lui A.T.Y., Kamide Y. A fresh perspective of the current system and its dynamo // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 18. doi: 10.1029/2003GL0017835.
- Liang J., Liu W.W. A MHD mechanism for generation of the meridional current system during substorm expansion phase // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. A09208. doi: 10.1029/2007JA012303.
- McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968. 9. Phenomenological model for substorms // *Ibid.* 1973. V. 78. P. 3131–3152.
- Mishin V.M., Saprionova L., Saifudinova T., et al. The Hall's and Cowling's currents contribution into the westward auroral electrojet during substorm – unloading phase // *Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXXI Annual Seminar / Kola Science Centre, Russian Academy of Science*. Apatity, 2008. P. 42–45.
- Mishin V.M., Mishin V.V., Shirapov D.Sh., et al. Electric field and field-aligned currents // *Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations / Eds. L.M. Zelenyi, M.A. Geller, and J.H. Allen, CAWSES Handbook-001*. 2004. P. 128–133.
- Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications // *Space Sci. Rev.* 1990. V. 53. P. 83–163.
- Mishin V.M., Saifudinova T.I., Bazarzhapov A.D., et al. Two distinct substorm onsets // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N 7. P. 13105–13118.
- Mishin V.M., Block L.P., Bazarzhapov A.D., et al. A study of the CDAW9C substorm, May 3, 1986 using magnetogram inversion technique 2 and a substorm scenario with two active phases // *Ibid.* 1997. V. 102. P. 19845–19859.
- Mishin V., Pu Z., Saprionova L., et al. Active phase a substorm as a chain of two types of reconnection; in the closed plasma sheet and in the open tail lobes // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. V. 49, N 8. P. 1193.
- Mishin V.M., Saifudinova T.I., Karavaev Yu.A., et al. Spatial distribution of the field-aligned current density in the polar ionosphere and the contribution of magnetosonic waves // *Ibid.* 2009. V. 49, N 7. P. 975.
- Papitashvili V.O., Christiansen F., Neubert T. A new model of field-aligned currents derived from high-precisions satellite magnetic field data // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, N 14. P. 1683. doi: 10.1029/2001GL014207.
- Parker E.N. The alternative paradigm for magnetospheric physics // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 10587–10625.
- Parker E.N. Newton, Maxwell and magnetospheric physics // *Magnetospheric Current Systems*. Geophys. Monogr. Ser. V. 118 / Ed. S.-I. Ohtani, et al., AGU. Washington D.C., 2000. P. 1–10.
- Potemra T.A. Sources of large-scale birkeland currents // *Physical Signatures of Magnetospheric Boundary Layer Processes / Eds. J.A. Holter and A. Egeland*. 1994. P. 3–27.
- Siebert K.D., Siscoe G.L. Dynamo circuits for magnetopause reconnection // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A7. doi: 10.1029/2001JA000237.
- Siscoe G., Crooker N.U., Erickson G.M., et al. Global geometry of magnetospheric currents // *Magnetospheric Current Systems*. Geophys. Monogr. Ser. V. 118 / Ed. S.-I. Ohtani, AGU. Washington D.C. 2000. P. 41–52.
- Siscoe G.L. Energy coupling between regions 1 and 2 Birkeland current systems // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87, N A7. P. 5124–5130.
- Siscoe G.L., Lotko W., Sonnerup B.U.O. A High-latitude, Low-latitude boundary layer model of the convection current system // *Ibid.* 1991. V. 96, N A3. P. 3487–3496.
- Vasyliunas V.M. Electric Field and plasma flow: what drives what? // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 2177–2180.
- Weimer D.R. Maps of ionospheric field-aligned currents as a function of the interplanetary magnetic field derived // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N A7. P. 12889–12902.

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр астрономии и геофизики МАН, Монголия

<sup>3</sup>Центр геонаук, Потсдам, Германия