

**АКТИВНАЯ ФАЗА СУББУРИ КАК ЦЕПОЧКА ДВУХ ТИПОВ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ –
В ЗАМКНУТОМ ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ И ОТКРЫТЫХ ДОЛЯХ ХВОСТА**

¹В. Мишин, ²З.Pu, ¹Л. Сапронова, ¹А. Базаржапов, ¹Ю. Кузьминых, ²С. Цао, ²Х. Жанг

**SUBSTORM ACTIVE PHASE AS A SERIES OF TWO TYPES OF RECONNECTION OCCURRED
IN THE CLOSED PLASMA SHEET AND IN THE OPEN TAIL LOBES**

V. Mishin, Z. Pu, L. Sapronova, A. Bazarzhapov, Yu. Kuz'minykh, X. Cao, H. Zhang

В работе использованы карты плотности продольных токов (ПТ) в ионосфере, полученные для суббури 27.08.2007 г. с шагом от 1 до 5 мин, и данные КА «Cluster», WIND и «Polar». Втекающий и вытекающий ПТ токового клина суббури (SCW) были обнаружены на каждой карте ПТ, была также измерена их интенсивность J . Начала суббури были разделены на две группы, обозначенные PSR и TLR. Быстрое распространение в хвост первоначальной области PSR описано как переход от режима PSR к режиму TLR, связанный с поворотом межпланетного магнитного поля (ММП) к северу. Таким образом, в действительности режим TLR/начало полного расширения является полным режимом PSR+TLR. Предполагается, что область источника PSR и TLR является двумерным ($\partial/\partial z=0$) тонким токовым слоем в экваториальной плоскости, взятой как прямоугольная площадь с размерами X , Y . Второе базовое предположение состоит в том, что J является интенсивностью ПТ от краев области разрушения тока, текущего поперек хвоста, или в эту область. Отсюда, с использованием электродинамики были рассчитаны оценки некоторых параметров области разрушения. Разрушенное магнитное поле составляет $\sim 5\%$ неразрушенного во время начального PSR и $\sim 95\%$ для временного интервала усиления PSR+TLR. То же самое отношение величин Q было рассчитано для PSR и PSR+TLR. Значительный рост мощности Q для временного интервала PSR+TLR наблюдался на всей площади SCW от ближней области хвоста до его средней и удаленной части. Это было связано с поворотом межпланетного магнитного поля (ММП) к северу, что типично для суббури.

The maps of field-aligned current (FAC) density in the ionosphere, obtained for 27.08.2007 substorm with the time increments 1 to 5 minutes were used together with Cluster, WIND and Polar data. The downward and upward FACs of the substorm current wedge (SCW) were detected in each FAC maps, and their intensity J was also measured. The substorm onsets were divided into two groups, denoted by PSR (initial plasma sheet reconnection/pseudobreakups) and TLR (tail lobe reconnection/full expansion onsets). A fast tailward propagation of the initial PSR region was described as transition from PSR to TLR regime, associated with the northward turn of the IMF. Thus, actually, the TLR/full expansion onset is the total PSR+TLR regime. The source region of PSR and TLR was assumed to be the two-dimensional ($\partial/\partial z=0$) thin current sheet in the equatorial plane that was given as the rectangular area with its X - and Y -sizes. The second basic assumption used was that J is the intensity of the FAC flowing from (or into) the edge region of the cross-tail current disruption region. From here, using electrodynamics, the estimates of some disruption region parameters have been calculated. The disrupted magnetic field is $\sim 5\%$ of the un-disrupted magnetic field during initial PSR, and $\sim 95\%$ for the time interval of amplified PSR+TLR. The same ratio of Q values was calculated for PSR and PSR+TLR. Dramatic growth of the power Q for PSR+TLR time interval was observed in all area of SCW from near till medium and distant tail. It was associated with the northward turn of the IMF, as usually for substorms.

Введение

Старая проблема двух типов начала суббури и связанных с ними двух типов пересоединения в хвосте – в замкнутом плазменном слое (PSR, plasma sheet reconnection) и в открытых долях (TLR, tail lobe reconnection) – остается открытой. После первоначального сценария [1] была создана серия полуэмпирических моделей суббури [2–4]. Наиболее активные дебаты идут до сего времени вокруг двух альтернативных сценариев: в первом основную роль играет околоземная нейтральная линия (NENL, near Earth neutral line) и TLR, во втором – разрушение тока поперек хвоста (CD, current disruption) и PSR. В то же время были описаны наблюдаемые признаки двух основных типов начала суббури: псевдобрейкапы и начало полного расширения (full expansion onsets) [5 и ссылки там]. Новые данные дают основание предполагать, что псевдобрейкапы и начало полного расширения связаны с начальными событиями PSR и последующими событиями PSR+TLR соответственно [напр., 6]. В целом, консенсус об идентичности псевдобрейкапов с PSR и начала расширения с PSR+TLR, о причинной связи между PSR и TLR и об их временной последовательности еще не достигнут. Мы видим важную причину остающейся неопределен-

ности в пространственной ограниченности используемых данных, измеряемых на спутниках. Это ограничение противоречит глобальной природе явления суббури. Например, в [2] исследована суббурия 27.08.2001 г. в 02–05 UT. Была отмечена фаза роста с псевдобрейкапами примерно в 02:20–04:10 UT и начало расширения в 04:10±2 UT. Кроме того, вблизи 04:01 UT, т. е. за 10 мин до начала расширения, вспышка BBF – быстрого течения плазмы к Земле – была зарегистрирована на борту КА «Cluster» на $x \sim -19R_E$ (R_E – радиус Земли). Этую BBF авторы интерпретировали как признак генерации NENL на $x < -19R_E$ и сделали основной вывод, что генерация NENL в 04:01 UT является первичной причиной начала расширения. Однако это заключение не было поддержано данными наблюдений какого-либо глобального и мощного эффекта, созданного BBF.

Цель настоящей статьи – изучить заново события 27.08.2001 г., используя данные спутников «Cluster» и WIND, дополненные данными глобальных проявлений суббури, включая интегральный открытый магнитный поток через доли хвоста Ψ и глобальные карты эквивалентных ионосферных и продольных магнитосферных токов. Разделение локальных и глобальных деталей в данных КА «Cluster» и на-

званные дополнительные данные оказали значительное влияние на наши заключения.

Расширение к полюсу токового клина суббури в ходе PSR и TLR

Данные спутников «Cluster» и WIND, дополненные данными 101 наземного магнитометра на геомагнитных широтах $\Phi \geq 40^\circ$, были обработаны с использованием техники инверсии магнитограмм ТИМ-2 [7]. Применялись модели пространственно неоднородной и однородной ($\Sigma_H=14$, $\Sigma_p=7S$) проводимости ионосферы для количественных и качественных оценок соответственно. Выходные данные ТИМ-2 вычислены с шагом 1–5 мин в интервале 02–05 UT, 27.08.2001 г., включая открытый магнитный поток Ψ и АЕ-индексы. Названные данные приведены для интервала 04:00–05:00 UT на рис. 1.

Линия с одной звездочкой отмечает начальный псевдобрейкап/PSR, линия с двумя звездочками – начало полного расширения/TLR. Вращение межпланетного магнитного поля (ММП) на юг и на север наблюдалось вблизи 02:20 и 04:10 UT соответственно, а фаза роста имела место от 02:20 до 04:10 UT, включая фазу начальных PSR в 03:36–04:08±2 UT и фазу начала расширения /TLR в 04:10–04:30 UT [8]. Эти результаты не идентичны приводимым в [2]: мы не включили события, зарегистрированные на КА «Cluster» около 04:01 UT в fazu расширения/TLR, так как эти события по данным ТИМ-2 не сопровождались заметными глобальными изменениями.

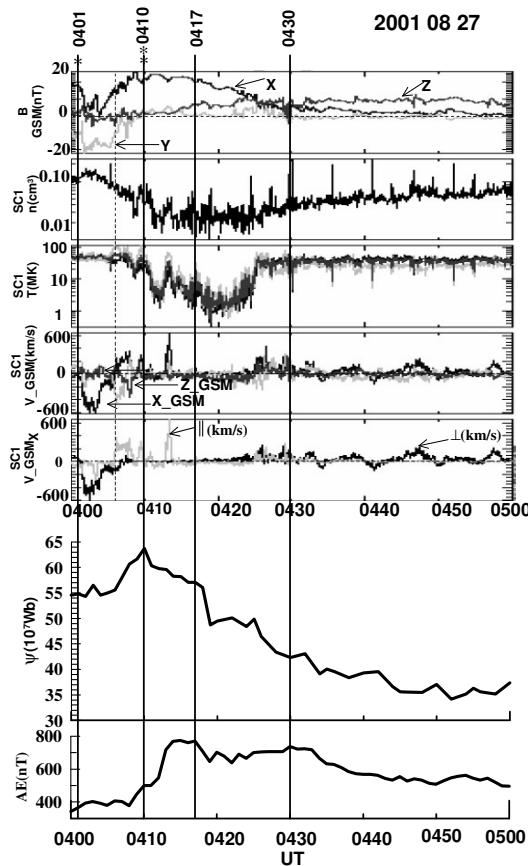


Рис. 1. Сверху вниз: данные КА «Cluster», открытый магнитный поток Ψ и АЕ-индексы.

27.08.2001

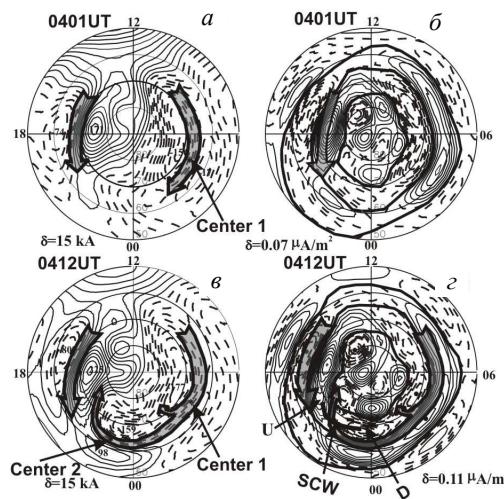


Рис. 2. Эквивалентные токи для двух моментов суббури 27.08.2001 г. Показаны авроральные электроструны (а, б); три зоны ПТ Ииджими и Потемры (в, г). Толстые сплошные линии – границы зон. Штриховые и сплошные изолинии – втекающие и вытекающие ПТ, соответственно.

На рис. 2 приведены два типичных примера карт эквивалентных и продольных токов (ПТ). Рисунки 2, а, б получены для моментов одного из начальных PSR в 04:01 UT и для TLR в 04:12 UT соответственно. Отметим, что западный авроральный электроджет в области токового клина суббури (SCW) отсутствует в 04:01 UT, но появляется после 04:10 UT. Карты ПТ содержат множество неоднородностей среднего масштаба, но мы фокусируем внимание на паре втекающего и вытекающего ПТ, центры которых обозначены на рис. 2 буквами D и U соответственно. Каждая такая пара удовлетворяет следующим критериям: 1) втекающий (вытекающий) ток расположен к востоку (западу) от центра пары; 2) пара располагается в околополуночном овале; 3) место пары – сектор MLT от ~20 до 01 MLT в зоне 1 Ииджими и Потемры. Отобранная таким образом пара ПТ принадлежит, по нашему определению, классическому SCW [9]. Границы трех зон Ииджими и Потемры на рис. 2 определены на основе известных правил Ииджими и Потемры. Площадь S зоны 0 и магнитное поле $B=0.5$ Гс использованы для оценки открытого магнитного потока в доле хвоста $\Psi=BS$ [6].

Наша задача теперь – изучить изменения пространственного положения центров SCW, D и U в различных интервалах (T_1 , T_2) событий двух типов: начальный PSR и PSR+TLR. Для этого были вычислены карты дифференциальных систем ПТ, $\Delta\text{ПТ} = \text{ПТ}(T_2) - \text{ПТ}(T_1)$. Далее получены разности широт Φ каждого центра, $\Delta\Phi = \Phi(\Delta\text{ПТ}) - \Phi(T_1)$, обозначенные $\Delta\Phi_D$ и $\Delta\Phi_U$. Средние значения $\delta\Phi = 0.5(\Delta\Phi_D + \Delta\Phi_U)$ показаны на рис. 3 как функция T_2 . Два фиксированных значения T_1 таковы: $T_1 = 03:36$ UT в интервале начальных псевдобрейкапов (03:36–04:08±2 UT) и $T_1 = 04:10$ UT на фазе расширения (04:10–04:30 UT). Можно видеть почти постоянный уровень значений $\delta\Phi$ в интервале 03:36–04:10 UT и скачкообразный рост $\delta\Phi$ после 04:10 UT. Каковы физические причины этого скачка?

Дифференциальная система ДПТ есть возмущение, наложенное в момент T_2 на пространственный образец ПТ, наблюдаемый в момент T_1 . На рис. 3 показано, что центры этого возмущения D и U являются центрами ПТ, наблюдаемого в момент T_1 . Центры этого возмущения D и U в SCW скачком перемещаются после 04:10 UT дальше к полюсу. Предполагая, что возмущение создается магнитным пересоединением в хвосте (MR, magnetic reconnection), мы используем наблюдаемый скачок $\Delta\Phi$ как признак того, что площадь MR быстро расширилась дальше в хвост при переходе от режима начальных PSR к режиму PSR+TLR. Этот вывод не согласуется с соответствующими заключениями, полученными в [2], хотя не противоречит известным фактам расширения к полюсу авроральной выпуклости в ходе начала расширения.

Магнитное поле и мощность в токовом клине суббури в периоды PSR и TLR

Следующая задача – оценить параметры разрушенного (и разрушающего) тока поперек хвоста (CTS) в SCW отдельно для PSR и TLR. Используются законы Ампера, Фарадея, и Ома:

$$\text{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}, \quad (1)$$

$$dF/dt = -\Delta U, \quad (2)$$

$$Q = J \Delta U, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Вб/(А·м), j , F , и ΔU – соответственно плотность разрушающего тока, магнитный поток через разрушенную область, э.д.с. в контуре, охватывающем эту область, и J_D – интенсивность разрушающего тока (в единицах СИ). Использовано предположение, что разрушенный CTS – тонкий токовый слой (TCS, thin current sheet) в нейтральном слое хвоста, с толщиной $z \sim 0.1 R_E$ [напр., 10]. Тогда $\partial B/\partial z = 0$, и из (1) получаем в TCS $B_z = B_x$, $B_x = 0$. Мы принимаем также следующие упрощающие предположения: 1) TCS – ток утром–вечер без радиальной компоненты, т. е. его интенсивность $J_D = J_y$; 2) интенсивность J_+ втекающего ПТ SCW равна интенсивности J_- вытекающего ПТ; 3) интенсивность J_D равна интенсивности J продольных токов SCW; 4) интенсивность J_D разрушающего тока хвоста равна интенсивности J_+ ПТ SCW.

Поскольку CD и магнитное пересоединение MR – есть родственные, хотя и различные явления, мы принимаем, что магнитные потоки, диссирированные посредством CD в интервалах 03:36–04:08±02 UT и 04:10–04:30 UT, грубо идентичны потокам, которые диссирируют в ходе PSR и TLR соответственно. Имея из ТИМ-2 значения J_+ (рис. 3) и задавая дополнительно значение площади $S=XY$ частично разрушенного TCS, получаем плотность разрушающего тока: $j_y = J / XY$, где $J = J_+$.

Из уравнений (1)–(3) в экваториальной плоскости при введенных обозначениях и в предположении симметрии относительно экватора имеем:

$$\partial B_z / \partial X \approx -\mu_0 J_y, \quad (1')$$

$$j_y \approx J / (XY), \quad (4)$$

$$B_z \approx \mu_0 J / Y, \quad (2')$$

$$F = B_z XY = -\mu_0 X, \quad (5)$$

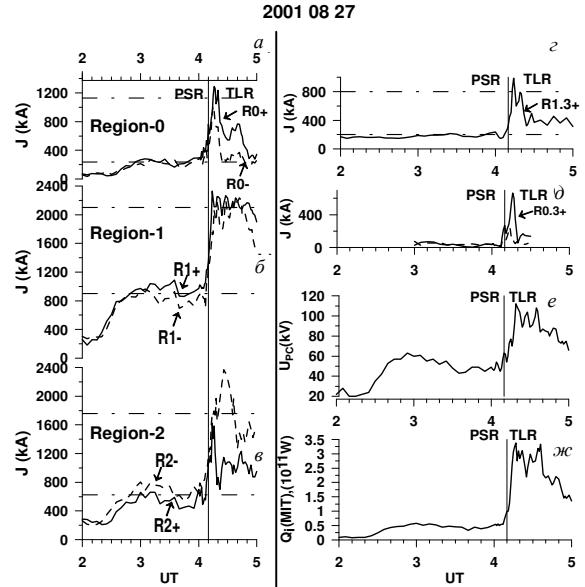


Рис. 3. Интенсивности ПТ в каждой зоне Ииджими и Потемы в целом (a–d); интенсивность J втекающего тока области SCW (e); интенсивность ПТ $R0.3_+$ и $R0.3_-$ (f); разность потенциалов на границе полярной шапки U_{pc} (e); мощность джоулева нагрева полярной ионосфера в двух полушариях, $2Q_i$ (ТИМ) (ж).

$$Q = (F/\Delta t)J = \mu_0 J^2 X / \Delta t, \quad (3')$$

$$\Delta U = F / \Delta t. \quad (6)$$

Эти уравнения позволяют вычислить разрушенное магнитное поле TCS, $B=B_z$, уменьшенный магнитный поток F , индуктивную э.д.с. $\Delta U=\Delta F/\Delta t$ и мощность $Q=J_+ \Delta U$.

Мы рассматриваем область SCW в экваториальной плоскости как прямоугольник с площадью $S_1 = X_1 Y_1$, где $Y_1 = X_1 = 10R_E$ и $-5 \geq x \geq -15R_E$ для PSR. X_1 и Y_1 предполагаются постоянными, так как $\Delta\Phi \approx \text{const}$ в интервале начального PSR (рис. 4). Для интервала PSR+TLR, (04:10–04:30 UT) мы принимаем, что общая площадь составляет $S_1 + \Delta S$, где $\Delta S = \Delta X Y_1$, $\Delta X = 20R_E$ и $-15 \geq x \geq -35R_E$. Эти грубые оценки основаны частично на нашем картировании пространственного распределения ПТ в экваториальную плоскость, используя модель T-96. Было найдено, что области SCW в интервале 03:30–05:00 UT соответствует площадь с координатами $-50 < x < -5R_E$, $-10 < y < 10 R_E$, что согласуется с оценками [11] и не противоречит другим литературным данным [например, 12 и ссылки там]. Мы используем также значения $J_1 = 1.5 \cdot 200$ кА и $\Delta t_1 = 6 \cdot 10^2$ с для PSR, $J_2 = 1.5 \cdot 800$ кА и $\Delta t_2 = 1.2 \cdot 10^3$ с

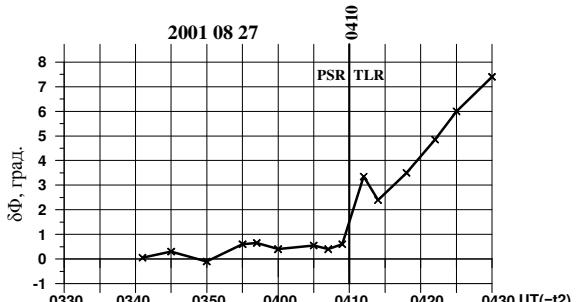


Рис. 4. Значения $\delta\Phi$ как функция T_2 .

для TLR. Значения Δt_1 и Δt_2 определены на магнитограммах, $J_1=200$, $J_2=800$ кА – из рис. 3, множитель 1.5 учитывает интенсивность SCW зимой в южном полушарии [13].

Были получены следующие результаты: $\Delta U_1=3.1 \cdot 10^4$ В, $Q_1=9.3 \cdot 10^9$ Вт для PSR; $\Delta U_2=2.4 \cdot 10^5$ В, $Q_2=2.9 \cdot 10^{11}$ Вт для PSR+TLR. Дополнительно $B_{z,1}=5.9$ нТл, $B_{z,2}=24.0$ нТл, $F_1=3.1 \cdot 10^7$ Вб, $F_2=1.9 \cdot 10^8$ Вб. Отметим, что индексы 1 и 2 относятся к площадям S_1 и $S_1+\Delta S$ соответственно. Эти результаты критически зависят от принятых в модели размеров X и Y . Важно выяснить, как полученные результаты согласуются с соответствующими независимыми оценками, известными из литературы.

Сначала мы используем приведенное выше значение $\Delta S=\Delta XY_1=8.1 \cdot 10^{15}$ м² и наблюдаемое уменьшение потока Ψ в ходе фазы расширения 04:10–04:30 UT, $\Delta\Psi=2 \cdot 10^8$ Вб (рис. 1). Отсюда, среднее значение $\langle B_z \rangle = \Delta\Psi/\Delta S = 2.0 \cdot 10^8 / 8.0 \cdot 10^{15} = 25.0$ нТл. Эта оценка разрушенного магнитного поля на площади ΔS близка к $B_{z,2}=24.0$ нТл. Далее сравним приведенные выше оценки индуктивной э.д.с. ΔU со значениями разности потенциалов на границе полярной шапки, U_{pc} , полученными на основе ТИМ-2 (рис. 3). Для PSR и TLR имеем средние значения $U_{pc} \sim 50$ и 100 кВ, которые сопоставимы с ΔU_1 и ΔU_2 соответственно. Аналогичные соотношения между ΔU и U_{pc} были получены по данным суббури 09.01.1997 г. в работе [11]. Третье сравнение выполнено с использованием двух рядов независимых оценок полной мощности суббури Q_T , потребляемой в магнитосфере и полярной ионосфере двух полушарий. В работе [8] вычислены $Q_{T,1}=2.8 \cdot 10^{11}$ и $Q_{T,2}=6.5 \cdot 10^{11}$ Вт как два средних значения для временных интервалов PSR и TLR соответственно. Отношения $Q_1/Q_{T,1}$ и $Q_2/Q_{T,2}$ составляют 0.03 для PSR и 0.45 для TLR. Отметим, что в интервале PSR среднее значение АЕ-индекса близко к 400 нТл, но западная авроральная электроструя не наблюдается на площади SCW в 04:01 UT (см. рис. 2 и [4]). Поэтому малое значение $Q_1/Q_{T,1}$ есть ожидаемый результат. Отношение $Q_2/Q_{T,2}=0.45$ для TLR также сопоставимо с данными рис. 2, поскольку на этом рисунке наблюдаются два центра АЕJ-W примерно с равной интенсивностью.

Наконец, на основе приведенных выше оценок параметров Q , B_z , $S=S_1$ и $S=\Delta S$ была вычислена толщина TCS, $Z=2\mu_0 Q/S \langle (B_z) \rangle^2$. Расчеты дали значения $Z=170$ км для PSR и 160 км для временного интервала PSR+TLR. С использованием локальных измерений Z на КА «Cluster» во время суббури 23.08.2003 г. в [10] было получено среднее значение $\langle Z_{Nak} \rangle = 670$ км, что близко к оценке ионной инерционной длины l_i . Оценка $Z=165$ км может быть соглашена с $\langle Z_{Nak} \rangle$, если принять, что в действительности только 1/4 объема $V_1=S_1 Z$ и объема $V=\Delta S Z$ в модели занята процессом пересоединения.

В целом, мы заключаем, что рассмотренные четыре приближенные оценки, основанные на данных ТИМ-2 о ПТ и на принятой модели TCS, не противоречат, но дополняют соответствующие независимые данные из литературы.

В работе [8] сравниваются также приведенные выше значения $B_{z,1}=5.9$ нТл, $B_{z,2}=24.0$ нТл с данными

измерений неразрушенного магнитного поля хвоста. Использовались статистические эмпирические модели B_z в плазменном слое и B_L в долях хвоста [14–16]. По данным [15] для спокойных условий в области $-x=(5 \div 15)R_E$ разрушенному в ходе PSR полю $B_{z,1}=5.9$ нТл соответствуют значения неразрушенных полей $\langle B_L \rangle = 114$ нТл в долях хвоста и $\langle B_{ps} \rangle = 44$ нТл в плазменном слое. Отсюда $B_{z,1}/\langle B_L \rangle = 0.06$ и $B_{z,1}/\langle B_{ps} \rangle = 0.14$ для PSR. Из слитых моделей [14, 15] для возмущенных условий в интервале $15 < -x < 35R_E$ было получено $\langle B_L \rangle = 24.98$ нТл. Согласно модели [16] для начала суббури PSR+TLR, найдено $\langle B_L \rangle = 21.3$ нТл. Таким образом, в отличие от PSR отношение $B_{z,2}/\langle B_L \rangle$ в ходе временного интервала PSR+TLR близко к единице.

Заключение

Оценки параметров области разрушения тока хвоста получены отдельно для активных периодов суббури типа псевдобрейкап/PSR и начало расширения/(PSR+TLR). Оценки основаны на данных ТИМ-2 интенсивности продольных токов SCW, использованных в рамках 2D-модели тонкого токового слоя TCS в экваториальной плоскости хвоста. Найдено, что разрушается ~5–10 % магнитного поля TCS во время начальных PSR и около 100 % во временному интервале PSR+TLR. Такие же отношения значений мощности Q найдены по данным временных интервалов PSR и PSR+TLR. Драматический рост Q в ходе интервала PSR+TLR наблюдался на всей площади SCW от ближнего до среднего и дальнего хвоста. Рост был инициирован поворотом ММП на север, как обычно для суббури. Полученные результаты содержат элементы обеих основных альтернативных моделей суббури CD и NENL, но не сводятся к простой их сумме.

Авторы благодарят Т. Сайфудинову и Ю. Караваева, В. Сергеева и А. Юхнина за сделанные замечания. За представленные геомагнитные данные авторы благодарят руководителей проектов INTERMAGNET, GIMA (Университет Аляска), DMI (Копенгаген), ИКФИА (Якутск), д-ров А. Lasarus, A. Viljanen (Image team), J. Posch (MACCS team), T. Iyemori (WDC-C2), K. Yumoto (Университет Нагоя), О. Троицкая (AARI), E. Donovan и F. Crentzberg (CANOPUS), E. Kharin (WDC-B), Б. Шевцова и А. Винницкого (ИКИР). Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-05-65-170) и INTAS (грант No 06-100013-8823)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Russell C.T., McPherron R.L. The magnetotail and substorms // J. Geophys. Res. 1973. V. 92. P. 12187.
2. Baker D.N., et al. Timing of magnetic reconnection // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 24. P. 2190.
3. Lui A. T. Y., Controversies in magnetospheric physics // Rev. Geophys. 2001. V. 39, N. 4. P. 535–563.
4. Lyons L.R., Wang C.-P. Substorm onset by plasma sheet divergence // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A12, P. 1427, doi 10.1029/2003JA010178.
5. Nakamura R., et al. Pseudo-breakup and major expansion onset // Ibid. 1994. V. 99, N A1. P. 207.
6. Mishin V.M., et al. Two distinct substorm onsets // Ibid. 2001. V. 106, N 7. P. 13105–13118.
7. Mishin V.M. The magnetogram inversion technique //

- Space Sci. Rev. 1990. V. 53. P. 83–163.
8. Mishin V.M., et al., The 28.08.01 events: A fresh look // J. Geophys. Res. 2007 (submitted).
9. McPherron R.L., Russell C.T., Abry M.A. Model for substorms // Ibid. 1973. V. 78. P. 3131.
10. Nakamura R., et al. Dynamics of thin current sheet // Ibid. 2006. V. 111, N A11206.
11. Lu Gang., et al. Field-aligned currents and auroral precipitations // Ibid. 2000. V. 105, N A8. P. 18,483.
12. Miyashita Y., et al. Intense and weak substorms // Ibid. 2004. V. 109, doi:10.1029/2004JA010588.
13. Papitashili V., Weimer D. New terminology for the field-aligned currents // AGU Fall Meeting, 2003.
14. Slavin J.A., et al. The distant plasma sheet // Magnetotail Physic / Ed. A.T.Y. Lui. 1987. P. 96.
15. Nakai H., Kamide Y. The magnetotail field and storm activity // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 22,701.
16. Shukhtina M.A., et al. Magnetotail characteristics // Annales Geophysicae. 2004. V. 22. P. 1019–1032.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Пекинский университет, Китай