

СУПЕРБУРЯ 06.04.2000 г.: ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ УДАРОВ

В.М. Мишин, М.А. Курикалова, М.В. Толочко

SUPERSTORM OF 06.04.2000: EFFECTS OF STRONG DYNAMIC SHOCKS

V.M. Mishin, M.A. Kurikalova, M.V. Tolochko

{1} Выполнен анализ карт эквивалентных (ЭТ) и продольных токов (ПТ) супербури 6 апреля 2000 г. в интервале 15:00–20:00 UT. Основные возмущения были следствием скачкообразного роста P_d – динамического давления солнечного ветра (СВ).

Использовалась аналогия магнитосферных токов и проволочных электрических цепей. Ключевая особенность рассмотренных цепей – меридиональные ионосферные токи Педерсена, соединяющие ПТ одного знака зоны 1 с ПТ другого знака соседней зоны 2 или 0. Описана эмпирическая модель, в которой три названных тока образуют одну из меридиональных систем токов (meridional current system, MCS). Эти системы разделены на три типа: MCS-0, MCS-1 и MCS-2. В области каждой MCS, вместе с током Педерсена, образуется ток Холла, который создает известные наблюдаемые авроральные электроструи AEJW и AEJE, а также холловскую электрострую в ионосфере полярной шапки. Вывод о холловской природе электроструй распространяется и на разгрузочную AEJW. Системы MCS заменяют или дополняют классический токовый клин суббури (substorm current wedge, SCW) в качестве основной составляющей общей трехмерной системы токов P_d -возмущений и суббури.

Электрические цепи MCS-1 и MCS-0 замыкаются на магнитосферный генератор соответственно через известный частичный кольцевой ток DRP-1 и ранее не известный DRP-2 в долях хвоста.

Важная особенность рассмотренных P_d -возмущений – преобладание дневной активности над ночной, обычной для типичных суббурий. Мы предполагаем, что этот факт объясняет ряд наблюдавшихся явлений, необычных для суббурий. В ходе разгрузочной фазы возмущений площадь полярной шапки, а также наблюдаемые значения магнитного потока доля хвоста Ψ и потока Пойтинга ϵ' не уменьшились, а увеличились. Эти результаты противоречат выводам, полученным ранее для суббурий и P_d -возмущений, как и тот факт, что соотношение между входной мощностью супербури ϵ' и потребляемой мощностью возмущения Q имело вид $Q \leq \epsilon'$.

Мы предполагаем, что наблюдавшийся скачок P_d вызвал рост скорости дневного пересоединения (magnetic reconnection disturbance, MRD), который более чем скомпенсировал одновременный рост скоростей ночных процессов: пересоединения в замкнутом хвосте (MR1) и в долях хвоста (MR2).

Мы заключаем, что в рассмотренных P_d -возмущениях прослеживались основные процессы, подобные тем, которые свойственны типичным суббуриям: MRD, образование CD (current disruption) и ПТ SCW, MR1 и MR2. В рассмотренных P_d -возмущениях эти процессы наблюдались с сильными особенностями, обусловленными повышенным сжатием магнитосферы динамическим давлением СВ.

{1} The analysis of maps of equivalent currents (EC) and field-aligned currents (FAC) of April 6, 2000 superstorm within the range of 15:00–20:00 UT. Major disturbances were caused by abrupt increase in solar wind (SW) dynamic pressure (P_d).

The analogy of magnetospheric currents and wire electric circuits was used. The key property of circuits under consideration is Pedersen meridional ionospheric currents connecting FACs of one sign of zone 1 and FACs of another sign of the adjacent zone 2 or 0. The empirical model is described in which three mentioned currents form one of the meridional current systems (MCS). These systems are classified as MCS-0, MCS-1 and MCS-2. Within the region of each MCS, along with Pedersen current, Hall current is generated which causes well-observed auroral electrojets AEJW and AEJE, as well as Hall electrojet in the polar cap ionosphere. The conclusion of Hall origin of electrojets is valid for relieving AEJW. MCS systems replace the classic substorm current wedge (SCW) or is added to it as the main component of the general three-dimensional current system of P_d -disturbances and substorms.

The electric circuits MCS-1 and MCS-0 close on the magnetospheric generator through the known partial ring current DRP-1 and previously unknown current DPR-2 in the tail lobes respectively.

A prominent feature of the P_d -disturbances is predominance of daytime activity over nighttime activity which is general for typical substorms. In our opinion, this fact can explain some phenomena unusual for substorms. At the relieving phase of disturbances, the polar cap area, as well as the observed values of the magnetic flux of the tail lobes Ψ and of the Poynting flux ϵ' did not decrease but increased. These results contradict the conclusions made before for substorms and P_d -disturbances as is the fact that the relationship between the superstorm input power ϵ' and the disturbance power consumption Q was of the form $Q \leq \epsilon'$.

We suppose that the observed P_d jumping results in increase in the rate of daytime reconnection (magnetic reconnection disturbance, MRD). This increase more than compensates for simultaneous increase in rates of nighttime processes such as reconnection in the closed tail (MR1) and in the tail lobes (MR2).

We conclude that P_d -disturbances under consideration reveal cardinal processes similar to those which are peculiar to typical substorms. These processes are MRD, CD (current disruption) formation, FAC SCW, MR1 and MR2. For the examined P_d -disturbances, the observed processes were characterized by significant peculiarities caused by increased compression of the magnetosphere due to SW dynamic pressure.

Введение

{2} Настоящая работа является продолжением исследования супербури 6–7.04.2000 г., которое было начато в работах [Huttunen, et al., 2002; Ebihara, et al., 2005]. Это событие – следствие резкого усиления динамического давления солнечного ветра (P_d) при аномально высоких значениях ММП B_z , B_y и уровне

возмущенности, который достигал AE>2500 нТл. Следуя [Lyons, et al., 2005], мы будем использовать для таких событий термин P_d -возмущения. Буря продолжалась более суток. [Huttunen, et al., 2002] описали ее источники на Солнце и в СВ, и кратко отметили особенности магнитосферных откликов на протяжении всей супербури.

Задачи, рассмотренные [Huttunen, et al., 2002], не пересекаются с основными задачами настоящей работы, которая посвящена описанию P_d -возмущений на основе аналогии проволочных электрических цепей и трехмерных токов в системе магнитосфера–ионосфера. Соответствующая модель описана в статье [Мишин и др., 2010а], далее – статья 1. В статье 2 [Мишин и др., 2010б] описана начальная фаза супербури – интервал 15:00–16:40 UT, в котором наблюдалось кратковременное и сравнительно слабое P_d -возмущение на отрезке 16:32–16:38 UT. В настоящей работе мы снова используем данные этого интервала, но исследуем, в основном, его продолжение 16:39–20:00 UT, которое соответствует сильному динамическому удару и P_d -возмущению, сопровождающему быстрым ростом АЕ-индексов.

{3} P_d -возмущения, в отличие от спонтанных суббури, относятся к классу магнитосферных откликов, управляемых изменениями параметров СВ [Rostoker, et al., 1987; Lyons, et al., 1997; Sun, et al., 1998]. Основные управляющие параметры – компоненты ММП B_z , B_y и P_d . Основные известные режимы P_d -возмущений обнаружены и описаны в большой серии работ [Lyons, et al., 1997, 2003, 2005; Zhou, Tsurutani, 1999, 2003; Lee, et al., 2004; Voudoridis, et al., 2004; Meurant, et al., 2005; Hubert, et al., 2009 и ссылки там].

По данным наблюдений, P_d -возмущения включают в себя образование быстрых усилений авроральной эмиссии и продольных токов токового клина суббури (ПТ SCW), имеющих глобальный масштаб. P_d -возмущения не сводятся к суббурям, в которых SCW локализован в узком секторе MLT вблизи разрыва Харанга. При разных сочетаниях значений трех управляющих параметров, ММП B_z , B_y и P_d , в [Lyons, et al., 2003, 2005] говорится о различных видах P_d -возмущений, часто очень сильных, но иногда нулевых, несмотря на высокие значения P_d и южного ММП [Lyons, et al., 2003, 2005].

{4} Теоретическое полукачественное обобщение данных наблюдений и численного МГД-моделирования, выполненное в [Lyons, et al., 2003, 2005], ведет к выводу, что уровень авроральной активности, определяемый скоростью высыпания частиц плазменного слоя (ПС), приближенно обратно пропорционален отношению E_e/B_e . Здесь E_e – электрическое поле утро–вечер в ПС, создающее возвратную конвекцию плазмы в области раздела Харанга, B_e – магнитное поле ПС. Поэтому уменьшение E_e , также как рост B_e , могут вести к росту наблюдаемого уровня активности, если эти два изменения не гасят друг друга. Согласно [Lyons, et al., 2003, 2005], рост E_e сопровождает увеличение электрического поля СВ (E_{cb}) и южной компоненты ММП (B_s), а рост P_d создает сжатие магнитосферы, которое увеличивает B_e . Таким образом, отношение $\alpha = B_s/P_d$ используется как приближенная замена отношения E_e/B_e . Уменьшение α , согласно модели [Lyons, et al., 2003, 2005], усиливает авроральную возмущенность, что имеет ряд подтверждений по данным наблюдений. Модель описывает также тот факт, что начало процесса наблюдается в области раздела Харанга.

{5} При изложенном подходе группы [Lyons, et al., 2003, 2005] основное наблюдаемое различие феноменологии суббури (спонтанных или показывающих корреляцию с уменьшающимся ММП) и P_d -возмущений (управляемых изменениями, как ММП, так и P_d) сводится к различиям локального токового клина суббури, SCW, и его глобального аналога в P_d -возмущениях. С другой стороны, P_d -возмущения и суббури обладают общими свойствами (например, [Meurant, et al., 2005]). В терминах концепции суббури, таких как «разрыв тока хвоста (current disruption, CD)», и «магнитное пересоединение magnetic reconnection (MR)», сходство и различие двух названных типов возмущений остается невыясненным. Мы будем учитывать три вида MR: пересоединение на дневной магнитопаузе MRD, пересоединение в замкнутом хвосте, MR1 и пересоединение открытого магнитного потока Ψ долей хвоста MR2. Символом CD мы обозначаем не процесс, а результат образования разрыва/уменьшения тока хоста, являющийся обязательным спутником MR2 и, возможно, MR1.

Классический SCW – трехмерная система токов, которая состоит из генератора в области разрыва/уменьшения основного тока в плазменном слое хвоста, пары продольных токов (ПТ) и ионосферного тока на запад, замыкающего эту пару [McPherron, et al., 1973]. Из пары ПТ один втекает, второй вытекает с краев области разрыва и вытекает/втекает в ионосферу в области раздела Харанга. Разрыв тока хвоста (CD), магнитное пересоединение (MR) и, как следствие, образование SCW – парадигмы существующей концепции суббури, принимаемые в обеих основных альтернативных моделях суббури [Angelopoulos, 2009; Lui, 2009 и ссылки там].

Прямые данные о токах системы SCW и названные парадигмы теории суббури не использовались в упомянутой выше серии работ. Эти факты (особенно первый) – основная мотивация настоящей работы. Наши заключения получены с использованием наряду с традиционной базой данных карты распределения в 2D-ионосфере плотности ПТ. Карты получены с шагом 1–5 мин. Мы предполагаем, что ПТ SCW в P_d -возмущениях, как и в суббурях, есть следствие CD и MR. Такой подход может служить развитию общей концепции суббури и управляемых P_d -возмущений.

{6} На основе данных ПТ мы нашли, что за минуты после динамического удара СВ (быстрого роста P_d) образуется пара ПТ SCW и локализуется вблизи раздела Харанга, но вскоре расширяется по MLT до меридиана утро–вечер и даже до полудня. Как было отмечено, такое расширение не свойственно типичной суббури [Lyons, et al., 2005; Meurant, et al., 2005 и ссылки там]. Однако наблюдавшие начало и продолжение P_d -возмущения включали процессы MR на дневной магнитопаузе и в долях хвоста – важные компоненты режима суббури, не учитываемые в сценарии P_d -возмущений по [Lyons, et al., 2005; Meurant, et al., 2005].

Далее сделан вывод, что пары ПТ SCW и CW замыкаются в ионосфере меридиональными токами Педерсена скорее, чем зональными (вдоль зоны 1 Ииджимы и Потемры) токами Каулинга, что отличает наши результаты от ожидаемых в классической модели [McPherron, et al., 1973] и моделях суббури

типа [Kan, 2007 и ссылки там]. Поэтому в настоящей статье речь идет о наблюдаемой динамике пары ПТ SCW, не SCW в целом.

Описано также новое следствие удара: резкий рост активности после удара сопровождается расширением полярной шапки и ростом скорости пересоединения на магнитопаузе, что контрастирует с изменениями обратного знака, характерными для суббурь.

Также использованы многие упомянутые выше парадигмы концепции суббурь при описании наблюдаемых P_d -возмущений.

В разделе 2 кратко, со ссылкой на статьи 1 и 2, описаны база данных и оригинальные методы исследования. Раздел 3 – описание динамического удара СВ и его магнитосферных следствий. Раздел 4 – обсуждение и выводы.

1. База данных, таймирование и методы обработки данных

{7} На рис. 1 приведены графики плотности, скорости СВ, ММП B_z , B_y , и P_d , полученные по данным WIND. Время на оси абсцисс сдвинуто к магнитопаузе на 8 мин в интервале 15:00–16:40 UT и на 12 мин в последующем интервале, согласно [Huttonen, et al., 2002]. Показаны также два графика АЕ-индексов. Один получен в WDC-A (Киото) по данным стандартной сети магнитометров ночного овала (Iuemori (WDC-C2)), другой построила Сайфудинова по данным всей используемой в данной работе сети 120 наземных магнитометров на геомагнитных широтах $\Phi > 40^0$. АЕ-индексы второго типа мы будем называть «глобальными». Оба графика получены по общей методике: $AE = AU + AL$, где AU (AL) – наибольшее на сети магнитометров положительное/отрицательное отклонение наблюдаемой Н-компоненты от уровня спокойных дней.

{8} Данные рис. 1 охватывают пять часов, 15:00–20:00 UT, включая период 15:00–16:38 UT, исследованный в статье 2, и период 16:39–20:00 UT, основной в настоящей статье. На рисунке вертикальными линиями выделены 6 интервалов: 16:33, 16:39, 16:55, ~17:10 UT, ~17:30, 17:50 и ~18:10 UT. Две первые вертикальные линии отмечают соответственно начала (onsets) двух скачков P_d : в 16:33 и 16:39 UT. Начала выделенных интервалов основного периода отмечены римскими цифрами от I до VI. Интервалы различаются по значениям отношения $\alpha = B_s/P_d$, среднего на интервале индекса AE, и по характеру изменения каждого из названных параметров внутри интервала и при переходе от одного интервала к последующему. Анализ выделенных особых режимов супербури – тема отдельной статьи, где будет описана попытка сравнить эти режимы с ожидаемыми следствиями изменений критерия α .

{9} Согласно рис. 1, интервалы I – II имеют одну общую особенность, которая объединяет их с предшествующим интервалом (15:00–16:38) UT, – различие двух графиков АЕ-индекса. По данным статьи 2, различие объясняется тем, что индексы Киото получены с использованием малой сети наземных магнитометров из низкоширотной области аврорального овала, а глобальные индексы – по данным всей сети 120 магнитометров.

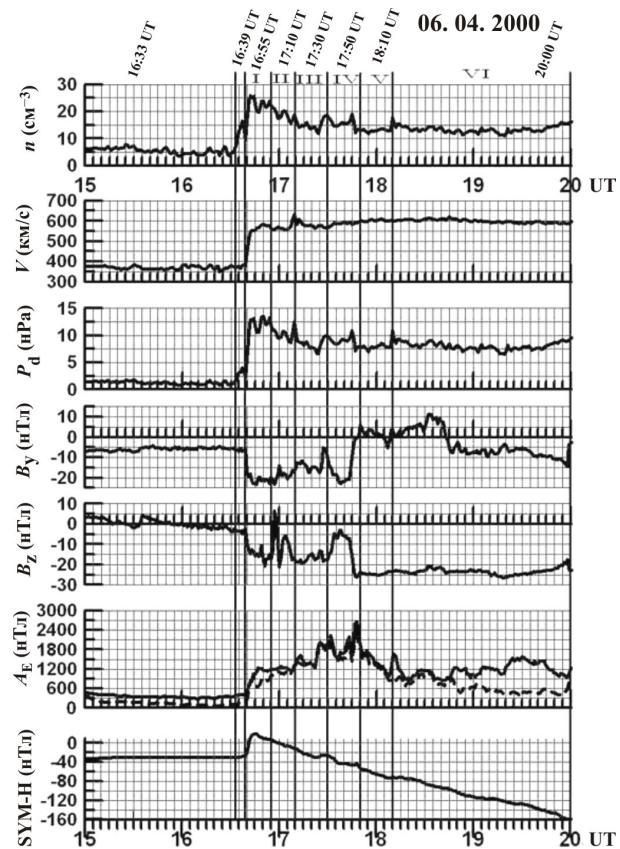


Рис. 1. Параметры солнечного ветра: плотность, скорость, динамическое давление, ММП B_y , B_z . Графики приведены со сдвигом на время прихода сигнала с WIND на магнитопаузу. Сдвиг составляет 12 мин до 16:40 UT и 8 мин после 16:40 UT. Показаны два графика АЕ-индексов. Штриховая линия – АЕ-индексы, полученные в Киото (Iuemori (WDC-C2)) по данным стандартной сети магнитометров ночного овала. Сплошная линия – АЕ-индексы, полученные по данным всей сети 120 наземных магнитометров. Приведен график индекса SYM-H.

Поэтому в индексах Киото преобладает вклад ночных возмущений, связанных с ПТ SCW, тогда как глобальные индексы учитывают также вклад возмущений в дневном высоколатитном овале и дневной полярной шапке (ПШ). Таким образом, наблюдаемое на рис. 1 различие двух графиков предполагает, что в интервале 15:00–17:10 UT интенсивность дневных авроральных электроструй высоколатитного овала была выше, чем интенсивность ночной электроструи. Причина этого необычного явления обсуждается в {18}.

{10} Мы используем сеть из 120 наземных магнитометров, чтобы обеспечить оптимально возможное равномерное покрытие высоколатитной области Северного полушария, необходимое для надежного вычисления систем эквивалентных ионосферных (ЭТ) и продольных токов (ПТ). Вычисления выполнены на основе техники инверсии магнитограмм, ТИМ [Mishin, 1990; Mishin, et al., 2001; Kamide, Baumjohann, 1993 и ссылки там]. Получены карты, описывающие 2D-распределение в ионосфере плотности ПТ и ЭТ в ходе рассматриваемого интервала.

На основе карт ПТ определены значения Ψ_1 – переменной части открытого магнитного потока долей хвоста, и J – интенсивности втекающего ПТ SCW. При заданных значениях Ψ_1 и скорости СВ

вычисляется поток Пойтинга из СВ с магнитосферу, $\epsilon' = (\Psi_1)^2 V_{sw} / \mu_0 S_T$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $S_T = 6 \cdot 10^{16} \text{ м}^2$. (Изменения параметров Ψ_1 , J , ϵ' показаны на рис. 4 и будут обсуждаться в разделе 3.3). Метод определения J описан в статье 2, параграф {12}. Методы определения параметров Ψ_1 , ϵ' , и границ ПШ зон Ииджимы и Потемры описаны, например, в [Mishin, et al., 2001; Караваев и др., 2006; Мишин и др., 2007].

Будут обсуждаться также изменения полной мощности рассматриваемого возмущения Q при $Q = Q_i + Q_{DR} + Q_{DT}$, где слагаемые учитывают вклады мощностей, потребляемых в ионосфере, кольцевом токе и токовом слое хвоста соответственно [Akasofu, 1977]. Принято также $Q_{DR} = Q_{DT}$, $Q = 2Q_{DR} + Q_i$ [Turner, et al., 2001], $Q_i(\text{Ватт}) = 0.54 \cdot 1.33 \cdot AE (\text{nTl}) \cdot 10^9$ [Ostgaard, et al., 2002]. Мощность кольцевого тока Q_{DR} вычислялась на основе известного уравнения Десслера–Паркера–Скопке, дополненного в [Akasofu, 1977]. Постоянная распада кольцевого тока τ вычислена согласно слаженной зависимости τ от индексов SYM-H [Gonzalez, et al., 1989].

В ранних работах [Mishin, et al., 2001, 1997] исследовались суббури при «нормальных» значениях $P_d \sim (1-2) \text{ нПа}$ и принималось $\Psi_1 = \Psi - \beta \Psi_{02}$, где Ψ – полный магнитный поток через площадь ПШ в заданный момент суббури, Ψ_{02} – магнитный поток «старой» ПШ, измеряемый в спокойных условиях перед суббурей, $\beta \leq 1$ – коэффициент, учитывающий изменения названной площади в ходе суббури. Было найдено, что $\beta=1$ в начале суббури, $\beta \rightarrow 0$ на фазе роста (growth phase) и $\beta \rightarrow 1$ в конце фазы восстановления [Mishin, et al., 2004]. Учитывая, что в настоящей статье рассматривается не суббурия, а P_d – возмущения через несколько часов после их начала, в условиях сжатой магнитосферы, мы полагали $\beta=0$.

{11} Типичные примеры карт суббури 27.08.01, полученные нами по данным ТИМ, приведены на рис. 2, взятым из статьи 2. Показаны границы трех зон Ииджимы и Потемры. На картах отмечены максимумы плотности ПТ внутри каждой зоны, обозначенные символами R.N+, R.N-. Здесь первая цифра R=0, 1 или 2 означает номер зоны по классификации Ииджимы и Потемры [Potemra, 1994]. Вторая цифра может принимать значения N=1, 2 или 3, где 1 означает сектор MLT вблизи полуночи, 3 – вблизи полуночи, и 2 – промежуточный сектор MLT. Например, символ 0.3+ означает ПТ зоны 0 (R0), втекающий в ночном секторе; символ 1.2 обозначает ПТ R1, вытекающий из ионосферы в промежуточном секторе. При более общем подходе символ R.N обозначает не обязательно максимум плотности ПТ, а область с определенным номером R зоны Ииджимы и Потемры и определенным номером N сектора MLT.

{12} С описанными дополнениями модель пространственного распределения ПТ содержит 9 структурных элементов, вместо трех в модели Ииджимы и Потемры. Каждая область R.N на карте ПТ является проекцией на ионосферу соответствующего домена магнитосферы. Область ПТ (1.1+ и 1.1-) – проекция области пересоединения на дневной магнитопаузе, область ПТ (1.3+ и 1.3-) проецируется на центральную часть области разрыва тока хвоста. ПТ (2.N+ и 2.N-) проецируют область частичного кольцевого тока DRP-1. Площадь внутри границы ПШ – проекция доли хвоста, включая область тока DRP-2, замыкающего пару (0.N+ и 0.N-).

Учет R.N-структур позволяет ввести в рассмотрение генераторы и их электрические цепи, в которых упомянутые во Введении меридиональные ионосферные токи связывают зону 1 с соседними зонами 2 и 0. Эта модель ПТ и подробное изложение концепции электрических цепей применительно к магнитосфере приводится в статье 1 и используется в статье 2.

{13} Авторы статьи 1 предполагали, что непосредственное соединение генератора электрической цепи с ионосферой обеспечивает ПТ зоны 1 [Siscoe, et al., 1994]) и что ПТ зон 0 и 2 образуются как продолжения меридиональных ионосферных токов, соединяющих названные зоны 0 и 2 с зоной 1. Второе предположение базируется на наблюдаемых типичных распределениях плотности ПТ в ионосфере, подобных показанным на рис. 2. На такой основе и с учетом RN-неоднородностей на картах выделены три типа меридиональных токовых систем: MCS-0, MCS-1, и MCS-2. Частный вид MCS и названные три типа MCSs описали соответственно авторы [Lui, Kamide, 2003; Liang, Liu, 2007; Mishin, et al., 2008].

{14} Каждая MCS-R содержит пару втекающего ПТ зоны R Ииджимы и Потемры [Potemra, 1994] и вытекающего ПТ соседней зоны (рис. 2). Эта пара ПТ замыкается в ионосфере одним из упомянутых меридиональных токов. Три названных тока составляют MCS-R, наблюдаемую в одном или каждом из секторов с N=1, 2, 3.

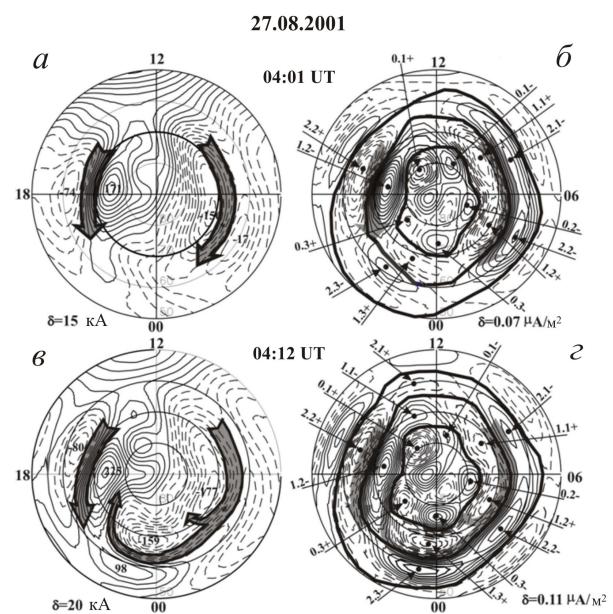


Рис. 2. Типичные для суббури примеры карт эквивалентных (ЭТ) и продольных токов (ПТ). Толстые сплошные линии на картах ПТ – границы трех зон Ииджимы и Потемры. Отмечены RN-неоднородности плотности ПТ и меридиональные системы токов – три MCSs. На картах ЭТ показаны значения полного тока в фокусах отдельных вихрей (в кА). Затемненные зоны на картах ЭТ и ПТ соответствуют восточной и западной авроральным ионосферным электроструям и замыкающему струйному току вдоль границы зон 1 и 0.

{15} Каждая MCS-R на рис. 2 – часть электрической цепи, замкнутой на генератор G. Примеры принципиальных схем цепей приводятся ниже для сектора N, где N может принимать значения 1, 2 или 3.

Принималось, что ПТ 1.N втекает в ионосферу из генератора, растекается по ионосфере как меридиональный ток Педерсена и замыкается на генератор G через ПТ 2.N (вниз по широте) и ПТ 0.N (вверх по широте). При таких предположениях образуются две соответствующие замкнутые электрические цепи, которые можно видеть на рис. 2. Первая имеет вид

$$G \rightarrow 1.N+ \rightarrow i.current S \rightarrow 2.N- \rightarrow DRP-1 \rightarrow 2.N+ \rightarrow i.current North \rightarrow 1.N- \rightarrow G. \quad (1)$$

Здесь символ $i.current North/South$ означает ионосферный ток Педерсена на север/юг, DRP-1 – ток утро–вечер, который замыкает пару ПТ (2.N-, 2.N+) во внутренней магнитосфере. Звено цепи (незамкнутая цепь) вида ($1.N+ \rightarrow i.current S \rightarrow 2.N-$) есть MCS-1. Звено ($2.N+ \rightarrow i.current North \rightarrow 1.N-$) есть MCS-2.

Вторая цепь создается растеканием ПТ R1+ вверх по широте:

$$G \rightarrow 1.N+ \rightarrow i.current North \rightarrow 0.N \rightarrow DRP-2 \rightarrow 0.N+ \rightarrow i.current S \rightarrow 1.N- \rightarrow G. \quad (2)$$

Здесь DRP-2 – ток утро–вечер, который замыкает пару ПТ (0.3- и 0.3+) в долях хвоста. Звено ($0.N+ \rightarrow i.current S \rightarrow 1.N-$) есть MCS-0.

{16} В MCS-0 и MCS-1 меридиональный ионосферный ток Педерсена направлен на юг, в MCS-2 – на север. Поэтому в ионосферной области MCS-0 и MCS-1 течет западный, а в ионосферной области MCS-2 – восточный ток Холла. С использованием таких аргументов в статье 2 показано, что в интервале 15:00–16:40 UT токи Холла были основными компонентами западной и восточной авроральных электроструй соответственно.

Этот вывод относится как к конвекционной, так и к разгрузочной AEJW. Аналогичное заключение сделано в [Mishin, et al., 2008; Akasofu, 1977, 2004] на основе дополнительных независимо полученных аргументов. Подчеркнем, что этот вывод противоречит преобладающему в литературе мнению, что разгрузочная AEJW – ток Каулинга и ионосферная часть системы токов SCW. В параграфах {21–23} признается и используется тот факт, что совокупность названных аргументов достаточна для рассмотрения наблюдаемых и преобладающих на разгрузочной фазе возмущений системы MCS-0 и MCS-1 в качестве достаточного признака того, что разгрузочная AEJW является, в основном, током Холла, а не током Каулинга.

2. Скачки P_d и их следствия

{17} Как было отмечено, в рассматриваемом периоде 15:00–20:00 UT имели место скачкообразные усиления и длительно сохранялся аномально высокий уровень P_d . Мы выделили наблюдаемые по данным ТИМ признаки и следствия этих явлений:

- два скачкообразных импульса роста P_d в 16:33 и 16:39 UT и сжатие магнитосферы;
- появление ПТ SCW в околополуночном секторе и последующее образование ПТ CW глобального масштаба;
- образование электрических цепей, содержащих ПТ SCW и CW;

- аномальный (с позиций концепции суббулья) рост площади ПШ, потока Пойтинга из СВ в магнитосферу и мощности возмущения и в начальной стадии активной фазы P_d -возмущения, в интервале 16:39–16:45 UT.

Эти следствия будут описаны отдельно.

3.1. О сжатии магнитосферы

{18} Известный общий признак внезапного усиления тока на магнитопаузе и сжатия магнитосферы – импульс SC на графике индекса SYM-H в 16:41 UT, как отмечено [Huttunen, et al., 2002]. Предполагаемые эффекты сжатия магнитосферы показаны также на рис. 3, где приведены магнитограммы наземных станций Гренландской и Канадской цепочек в узком околополуденном секторе полярной шапки, на ~8–15 MLT. Сжатие проявляется на магнитограммах как рост значений наземного магнитного поля ΔX , который начался до 15:00 UT и продолжался примерно до 16:40 UT.

Ряд других данных поддерживает предположение, что отклик на сжатие магнитосферы начинается на дневной стороне [Zhou, 1999; Hubert, et al., 2003; Mewratt, et al., 2003]. По данным карт ЭТ на рис. 3, в статьи 2 было отмечено, что в интервале 15:00–16:32 UT основной вклад в АЕ-индексы создавала не ночные активности, а западная электроструя и соответствующая струя антисолнечной конвекции в дневном секторе 8–15 MLT. Карты ЭТ на рис. 5 показывают, что вклад дневной западной электроструи в общую интенсивность ионосферных токов остается преобладающим или сравнимым с вкладом разгрузочной ночной AEJW и после резкого усиления общей системы токов, вызванного скачками P_d в 16:33 и 16:39 UT. Этот факт был подтвержден таблицей с перечнем наземных магнитометров, которые зарегистрировали наибольший размах магнитных бухт, определяющих АЕ-индексы в интервале 15:00–16:32 UT. В таблице приведены данные 15 моментов UT, в которые были отмечены наибольшие АЕ-индексы и значения MLT и MLAT этих магнитометров в называемые моменты. Оказалось, что все магнитометры, включенные в таблицу, были на дневной, а не на ночной стороне, вопреки результатам, ожидаемым для событий типа нормальных суббулья. Аналогичная таблица и аналогичный вывод получен для интервала 16:33–20:00 UT. Таким образом, преобладающая в системе ионосферных токов дневная западная электроструя – одно из главных отличий от суббулья, наблюдавшихся в сильных P_d -возмущениях, рассмотренных в данной статье и статье 2.

Изложенные факты свидетельствуют в пользу того, что дополнительное сжатие магнитосферы, хотя и слабое по сравнению с эффектами последующих скачков P_d , началось задолго до первого скачка P_d в 16:33 UT. Следы сжатия не видны на графике P_d на рис. 1. Они не наблюдались на спутнике WIND, но могли быть созданы неоднородностью СВ, которая не попала в поле зрения WIND, или событиями в магнитошизме, например, событиями типа Hot Flow Anomaly. Таким образом, похоже, что магнитосферное возмущение с АЕ до ~350 нТл, наблюдавшееся задолго до первого скачка в 16:33 UT, было не типичной малой суббульей,

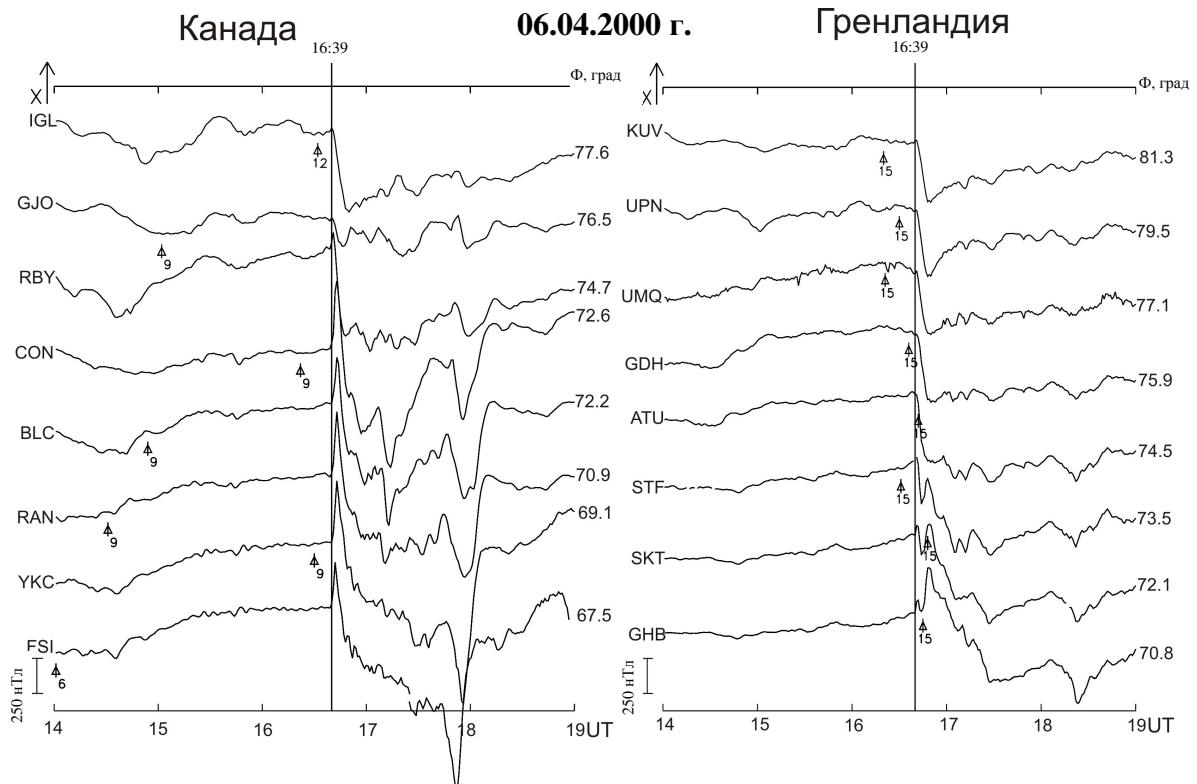


Рис. 3. Магнитограммы X-компоненты поля геомагнитных вариаций Канадских и Гренландских наземных магнитометров в околополуденном секторе полярной шапки. Показаны геомагнитная широта (Φ) и местное магнитное время MLT, часы (маленькие стрелки). Вертикальные линии отмечают основной и самый ранний начало суббури (substorm-onset).

а скорее длительным слабым P_d -возмущением. Это предположение позволяет понять наблюдаемую в ходе этого возмущения сравнительно малую длину L замкнутого хвоста магнитосферы. Оценки L по методике [Mishin, et al., 2001; Angelopoulos, et al., 2008] показали, что в рассмотренном интервале значения L были меньше среднего значения $\sim 120 R_E$, которое, согласно [Slavin, et al., 1985], характерно для слабовозмущенной магнитосферы (график L не приведен).

Сильное быстрое сжатие магнитосферы и соответствующее P_d -возмущение началось в 16:33 и еще более усилилось в 16:39–16:41 UT двумя последовательными скачками P_d , которые за несколько минут преобразовали P_d -возмущение в супербурю с $AE > 2500$ нТл.

3.2. Образование электрических цепей, содержащих ПТ SCW и CW

{19} Рис. 4 показывает изменения параметров Ψ_1 , ϵ' , J , Q , и AE , определения которых даны в параграфе {10}. На графиках ϵ'_1 и Ψ_1 видны скачки P_d в 16:33 и 16:39 UT, за которыми следуют скачки AE -индекса и мощности возмущения Q . Эти данные свидетельствуют о резком усилении процессов MRD на дневной магнитопаузе. Соответствующее усиление MR2 в ночном хвосте видно на графике интенсивности J токового клина, что означает начало процессов CD и SCW.

Таким образом, в интервале 16:33–16:39 UT в хвосте магнитосферы наблюдается переход от режима загрузки хвоста к глобальному разгрузочному режиму. На рис. 5 показаны типичные примеры карт ЭТ и ПТ, характерные для загрузочного режима

16:20 UT и развитого разгрузочного режима 16:45 UT. Звездочка на картах отмечает центр области, где встречаются западная и восточная ионосферные электроструи. Это область переворота Харанга (п. Харанга) [Lyons, et al., 2005; Harang, 1946; Zou, et al., 2009; Gkioulidou, et al., 2009]. Следуя [Lyons, et al., 2005], принимаем, что ПТ SCW в ионосфере локализованы внутри области п. Харанга, и ее полуразмер, т. е. размер области втекающего ПТ 1.3+, не превышает 3 MLT. Как показал анализ карт, такое условие выполняется до начала упомянутых выше скачков P_d , например, в 16:20 UT на рис. 5, но уже в 16:40 UT восточный край названной области достигает ~ 06 MLT. Такая расширенная область ПТ SCW (мы ее называем областью ПТ CW) наблюдается на картах и в 16:45 UT, и позднее. Следует отметить, что максимум плотности втекающего ПТ 1.N+, как в расширенной, так и в нерасширенной областях, показан на рис. 5 не близи центра п. Харанга, а на расстояниях от него ~ 3 MLT и более. Этот факт имеет место на разгрузочной фазе (expansion phase) рассматриваемого P_d -возмущения. Наибольшие плотности разгрузочной AEJW на картах ЭТ тоже наблюдаются далеко от п. Харанга.

Таким образом, при усилении P_d -возмущения область ПТ SCW сравнительно малого масштаба переходит в крупномасштабную область ПТ CW. [Lyons, et al., 2005] отметил подобные факты как основное отличие P_d -возмущений от суббурь.

{20} Рассмотрим теперь примеры карт ЭТ и ПТ на рис. 5, типичные для всего рассматриваемого периода P_d -возмущений. На картах отмечены MCS-1 и MCS-0, и можно видеть, что эти меридиональные

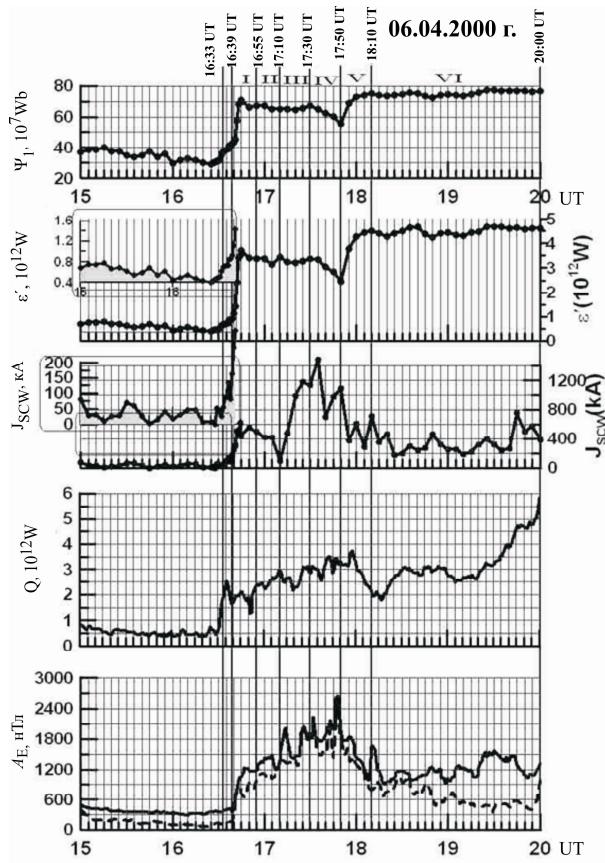


Рис. 4. Сверху вниз: открытый магнитный поток долей хвоста, поток Пойтинга, интенсивность втекающего продольного тока 1.3+, график мощности, поступающей из солнечного ветра в магнитосферу, АЕ-индексы, определенные по данным 120 наземных магнитометров (сплошная линия), АЕ-индексы, полученные в Киото (штриховая линия).

системы токов, вместе с MCS-2, являются преобладающими составляющими в общей системе токов. Это верно как в 16:20 UT до скачков P_d , так и на последующей разгрузочной фазе возмущения. Отсюда, используя выводы параграфа {16}, полученные в исследовании суббури, следует заключить, что и в рассмотренных P_d -возмущениях разгрузочная AEJW является током Холла, не током Каулинга (хотя вблизи центра п. Харанга эта электроструя иногда наблюдается как ток Каулинга см., например [Kamide, Baumjohann, 1993]).

{21} Вывод о холловской природе разгрузочной AEJW, общий для суббури и P_d -возмущений, меняет понятие «токовый клин суббури», принятое в классической модели [McPherron, et al., 1973; Kan, 2007]. Действительно, в классической модели пара ПТ 1.3+ и 1.3– замыкается ионосферным зональным током Каулинга. В нашем случае (холловская разгрузочная электроструя) названная пара ПТ замыкается через цепи вида (1) и (2) (см. раздел 2). Эти цепи не содержат зональных, но содержат меридиональные ионосферные токи Педерсена и их продолжения во внутренней магнитосфере (DRP-1) и в долях хвоста (DRP-2). Классический токовый клин суббури, где разгрузочная AEJW, отходит на второй план, хотя пара ПТ прежнего SCW сохраняется.

{22} В целом результаты, изложенные в параграфах {19, 21}, вместе с данными {11–16} иллюстрируют аналогию магнитосферных токов и проводочных электрических цепей и результаты применения этой аналогии. Выявляется ключевая особенность рассмотренных трехмерных цепей – меридиональные ионосферные токи Педерсена, соединяющие ПТ зоны 1 одного знака с ПТ другого знака из соседней зоны 2 или 0. Три названных тока образуют одну из меридиональных систем токов, MCS, в которой можно выделить MCS-0, MCS-1 и MCS-2. В области каждой MCS, вместе с током Педерсена, образуется ток Холла, который создает известные наблюдаемые авроральные электроструи AEJW и AEJE, а также холловскую электрострую в ионосфере полярной шапки. Системы MCS заменяют классический SCW в качестве основной составляющей общей трехмерной системы токов P_d -возмущений и суббури.

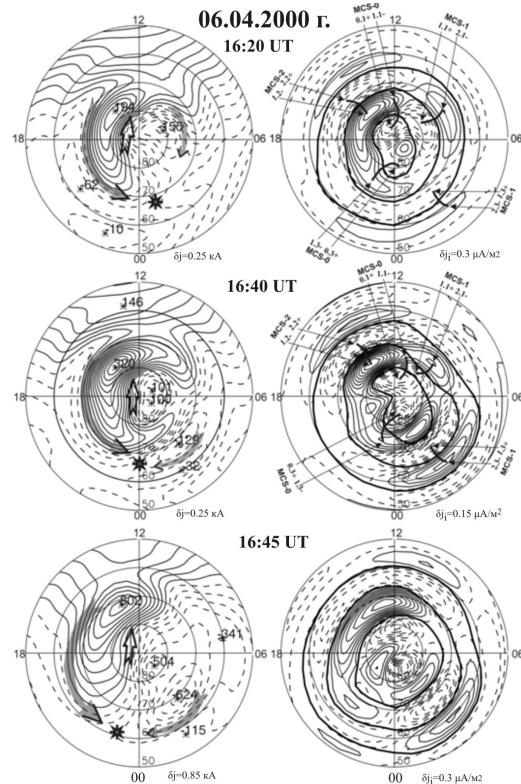


Рис. 5. Карты распределения в ионосфере плотности эквивалентных (ЭТ) и продольных токов (ПТ). Звездочка отмечает центр области переворота Харанга. Стрелками обозначены западная авроральная электроструя AEJW, восточная AEJE, а также дневная западная электроструя, образуемая в магнитосфере струей конвекции плазмы от Солнца, а в ионосфере – замыканием AEJW и AEJE. Дневная электроструя-3 – основное отличие системы ионосферных токов P_d -возмущений от системы ионосферных токов типичной суббури.

На картах ПТ обозначены границы трех зон Ииджимы и Потемры и отмечены RN-неоднородности плотности ПТ внутри каждой зоны. Здесь R= 0, 1, 2 – номера зон, N=1, 3, 2 – номера сектора MLT, дневного, ночного, или промежуточного соответственно. Знаки «+» и «-» обозначают втекающий и вытекающий ПТ. Обозначены системы MCS-1, MCS-0 и MCS-2.

3.3. «Аномальные» изменения площади ПШ, потока Пойтинга из СВ в магнитосферу и мощности возмущения. Фундаментальное подобие и различия P_d -возмущений и суббурь

Рассмотрим снова рис. 4, который описывает изменения параметров Ψ_1 , ϵ' , J и индексов АЕ в 16:00–18:00 UT, и рис. 1, описывающий два скачка P_d : первый, в 16:33–16:38 UT, при слабом южном ММП, и второй, в 16:39–16:47 UT, сопровождаемый сильнейшим ростом южной компоненты и модуля B_y ММП. Данные этих рисунков используются для описания изменений, названных в заголовке.

{23} Признаки разгрузочной фазы нормальной суббури на Земле (expansion phase, EP) хорошо известны [Angelopoulos, et al., 2008; Pu, et al., 2010]. Они включают быстрый рост уровня активности, который начинается в области Харанга и распространяется к экватору, на запад, в вечерний сектор, а также к границе ПШ и, соответственно, к области ОСВ в хвосте. Этот процесс ведет к сокращению площади ПШ в ходе разгрузочной фазы, т. е. к уменьшению открытого магнитного потока Ψ_1 и потока Пойтинга ϵ' . Сокращение площади ПШ и связанное с этим замыкание (пересоединение) магнитного потока хвоста наблюдалось также в качестве отклика на импульс роста P_d [Boudoridis, et al., 2004; Hubert, et al., 2006; Meurant, et al., 2004]. Сокращение наблюдается со сдвигом 5–10 мин относительно начала фазы расширения вблизи внутренней кромки плазменного слоя (ПС) [Мишин и др., 2010b]. Этот сдвиг – время распространения фронта возмущения в ионосфере от внутренней кромки ПС до границы ПШ.

{24} Первые из названных признаков нормальной суббури были отмечены в статье 2 по данным начала активной фазы P_d -возмущения в 16:33–16:39 UT. Часть этих данных показана на графиках Ψ_1 , J и АЕ-индексов рис. 4, которые охватывают названный интервал и продолжение активной фазы P_d -возмущения до 20:00 UT. Можно видеть, что, вместо ожидаемого на EP нормальной суббури спада Ψ_1 и ϵ' , на рис. 4 показан бурный рост этих параметров при активизации P_d -возмущения. Рост начинается в 16:33 UT в связи с первым скачком P_d и ускоряется в 16:39–16:41 UT после второго скачка.

Новые факты – рост Ψ_1 и ϵ' вместо ожидаемого спада в начале активной фазы – еще одно отличие характеристик рассматриваемого P_d -возмущения от соответствующих признаков нормальных суббурь и признаков P_d -возмущений в ранних исследованиях. Последнее связано с особенностями рассмотренной супербури и с тем, что мы использовали карты ПТ и дополнительную информацию об изменениях Ψ и ϵ' .

В [Huang, et al., 2009] исследованы три вида возмущений: пилообразные колебания (sawtooth oscillations), изолированные суббурь и возмущения типа стационарной магнитосферной конвекции (SMC). Показано, что значения Ψ перед началом EP растут вместе с ростом E_{sw} , что объясняет наблюдаемую независимость периода повторяемости «зубов» (отдельных суббурь) в пилообразных колебаниях. По заключению авторов [Huang, et al., 2009] приведенные данные свидетельствуют также, что значение Ψ перед началом EP есть порог, достижение которого необходимо для начала EP.

Приведенные новые факты говорят о том, что в рассмотренных случаях сильных P_d -возмущений названный порог был достигнут за несколько минут и был обеспечен самим скачком P_d . Похоже, что сильный скачок P_d за минуты обеспечивает необходимое условие для expansion onset, которое без него, т.е. в нормальных суббурьях, создавалось бы сильным ММП в ходе growth phase за десятки минут.

{25} Отмеченные факты можно оценить, по крайней мере качественно, не вступая в противоречия с известной концепцией нормальных суббурь. Достаточно предположить, что мощность P_d -возмущения (Q), как и мощность EP нормальной суббури, обеспечивается накоплением энергии магнитного поля хвоста, но время накопления в первом случае много короче, чем во втором.

Предполагаемая разность времен накопления для двух типов возмущения – естественное следствие соответствующей разности скоростей пересоединения на дневной магнитопаузе MRD. Скорость MRD при повышенном значении P_d больше скорости MRD во время суббурь при нормальном P_d .

{26} Таким образом, приведенное выше описание возмущений в рассмотренном начальном периоде супербури 06.04.2000 предполагает, что P_d -возмущения, как и нормальные суббурь, включают в себя, в числе основных процессов, MRD, MR1, MR2, CD и расширение области ПТ SCW.

Дополнения относящиеся к названным процессам, приводятся ниже.

{27} По данным рис. 4, рост скорости MRD ϵ' усиливается в 16:33 и в 16:41 UT. Рисунок 1 свидетельствует, что эти два усиления обусловлены скачками плотности и скорости СВ соответственно. На картах рис. 5 можно видеть положение ПТ (1.1+, 1.1–), проецирующих в ионосферу область MRD из дневной магнитопаузы/магнитоизиа, и наблюдать рост интенсивности этих токов, составляющих часть трехмерной системы дневного токового клина.

{28} Принимается, что начало EP в 16:33 UT создается развитием MR1, подобно тому, как это наблюдали в суббурьях [Angelopoulos, et al., 2008, 2009; Pu, et al., 2010]. Однако магнитограммы рис. 3, другие магнитограммы и карты ЭТ и ПТ свидетельствуют, что основной онсет начинается вблизи высоколатитной границы зоны 1 около 16:39 UT и процесс распространяется вниз и вверх по широте, на запад и на восток. Подобное расширение области EP и MR, особенно к полюсу и на запад, – известное свойство нормальной суббури.

{29} Мы принимаем на основе этих данных и по аналогии с [Angelopoulos, et al., 2008, 2009; Pu, et al., 2010], что после расширения области MR1 до границы ПШ начинается MR2. В нормальной суббуре такой переход виден как начало спада Ψ и сокращения длины хвоста. В рассматриваемом P_d -возмущении спад Ψ не наблюдается на графике Ψ и картах ПТ, где показаны положения границы ПШ, т. е. проекции открытой/закрытой границы (рис. 4, 5). Дополнительную информацию дает график мощности P_d -возмущения. При сделанных предположениях эта мощность (Q) должна увеличиться после перехода MR1→MR2, что подтверждается графиком (Q) на рис. 4.

{30} ПТ SCW – известный необходимый атрибут как нормальной суббури [McPherron, et al., 1973], так и P_d -возмущений [Lyons, et al., 2005]. По данным интервала 16:33–16:40 UT такой вывод поддержан в статье 2. Наши данные распространяют этот вывод на весь рассматриваемый интервал (рис. 4 и 5) и свидетельствуют о том, что вскоре после начала активизации P_d -возмущения MLT-размер области ПТ SCW удваивается, SCW превращается, по терминологии [Lyons, et al., 2005], в глобальный CW.

Образование и эволюция ПТ SCW – неотъемлемая часть процесса CD. Таким образом, приведенные данные подтверждают, что CD – разрыв/уменьшение тока хвоста – является парадигмой как нормальных суббурь, так и P_d -возмущений при умеренном и сильном ММП.

{31} Образование разрыва тока хвоста начинается в ближнем хвосте, куда проецируется п. Харанга ([Lyons, et al., 2005] и рис. 5). Мы принимаем этот факт как свидетельство образования в ближнем хвосте тонкого токового слоя (thin current sheet, TCS). Таким образом, процесс CD включает образование TCS – один из общих основных процессов нормальных суббурь и P_d -возмущений.

Таким же общим свойством двух названных типов возмущений является диполяризация магнитного поля хвоста [Lyons, et al., 2005]. Процессы диполяризации и TCS дополняют список основных процессов, приведенный в {35}, хотя каждый из этих процессов может рассматриваться как составляющая процессов CD и MR.

{32} Таким образом, основные процессы, предполагаемые в классической модели SCW: образование разрыва CD основного тока хвоста и пары ПТ, стекающих с краев этого разрыва – сохраняются и в рамках изложенной концепции даже без классического SCW, но с ПТ SCW и электрическими цепями типа (1) и (2). Пара ПТ SCW вытекает/втекает в ионосферу в области п. Харанга. Разрыв тока хвоста (CD), магнитное пересоединение (MR) и, как следствие, образование ПТ SCW соответствуют парадигмам существующей концепции суббурь. Пара ПТ глобального CW при таком подходе образуется подобно ПТ SCW, но в условиях повышенного P_d и соответственно сжатой магнитосфера.

4. Обсуждение и выводы

{33} Исследованы P_d -возмущения в интервале 15:00–20:00 UT 6 апреля 2000 г. при аномально высоком динамическом давлении СВ. Использовались данные WIND и данные 120 наземных магнитометров, обработанные с помощью техники инверсии магнитограмм (ТИМ). Получены карты эквивалентных токов (ЭТ) и продольных токов (ПТ), анализ которых выполнен на основе оригинальной концепции генераторов и электрических цепей в системе магнитосфера–ионосфера. Концепция описана подробно в статье 1. Ключевая особенность рассмотренных электрических цепей – меридиональные ионосферные токи Педерсена, соединяющие каждую неоднородность ПТ зоны 1 одного знака с примыкающей к ней неоднородностью ПТ другого знака из соседней зоны 2 или 0. Три названных тока, пары ПТ и замыкающий меридиональный, образуют

одну из меридиональных систем токов MCS в которой выделяется три типа: MCS-0, MCS-1 и MCS-2. Вместе с названным током Педерсена образуется соответствующий ток Холла, который отождествляется с холловским компонентом одной из известных авроральных электроструй: западной AEJW или восточной AEJE. Описана также хорошо выраженная третья холловская авроральная электроструя. Она течет в ионосфере полярной шапки и замыкает AEJW и AEJE, текущие в авроральном овале.

{34} Вывод о холловской природе электроструй распространяется и на разгрузочную AEJW. Отсюда следует, что системы MCS-1 и MCS-0, которым принадлежит названная электроструя, заменяют или дополняют классический SCW в качестве основной составляющей общей трехмерной системы токов P_d -возмущений и суббурь.

{35} ПТ зоны 1 Ииджимы и Потемры, образующие все три MCSs, перетекают в ионосфере в зоны 2 и 0 и замыкаются на генератор через ПТ зоны 2 и известный частичный кольцевой ток DRP-1 во внутренней магнитосфере, а также через ПТ зоны 0 и ранее неизвестный DRP-2 в долях хвоста.

{36} Важная особенность рассмотренных P_d -возмущений – преобладание дневной активности над ночной, обычной для типичных суббурь. Преобладание наблюдалось до и после основных скачков P_d . Свидетельством этому служат графики АЕ-индексов и карты ЭТ, на которых видно, что интенсивность дневной западной AEJW систематически больше, чем ночной.

{37} Преобладание дневной активности на разгрузочной фазе P_d -возмущений ЕР проявляется также в необычном для суббурь соотношении между входной мощностью ϵ' и полной потребляемой мощностью возмущения Q. На ЕР суббурь, как известно, выполняется сильное неравенство $Q > \epsilon'$, тогда как на ЕР рассмотренных P_d -возмущений выполнялось $Q \leq \epsilon'$.

Первопричиной может служить то, что мощность ϵ' всегда обеспечивается пересоединением MRD на дневной магнитопаузе. В рассмотренных P_d -возмущениях эта мощность образовалась на дневной стороне и потреблялась главным образом там же, тогда как в суббурях наибольшая мощность возмущения создается процессами пересоединения MR1 и MR2 в ночном хвосте и потребляется там же.

{38} На фазе ЕР рассмотренных P_d -возмущений площадь ПШ не уменьшилась, как обычно в суббурях и в рассмотренных ранее P_d -возмущениях, а увеличилась, притом скачкообразно, вместе с аналогичными скачками значений открытого магнитного потока Ψ и ϵ' .

{39} Факты, отмеченные в двух предыдущих пунктах, свидетельствуют, что скачок P_d вызвал рост скорости дневного пересоединения MRD, который компенсировал одновременный рост скоростейочных MR1 и MR2.

{40} Все изложенное в статье свидетельствует о том, что в рассмотренных P_d -возмущениях прослеживались основные процессы, подобные тем, которые создают типичные суббури – MRD, образование CD и ПТ SCW/CW, MR1 и MR2. В рассмотренных

P_d -возмущениях эти процессы наблюдались с сильными особенностями, обусловленными повышенным сжатием магнитосферы динамическим давлением СВ.

В статье 2 и настоящей статье исследована часть главной фазы супербури 06.04.2000 г. Мы продолжаем анализ данных главной фазы и фазы восстановления этой супербури.

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

За предоставление входных данных ТИМ авторы благодарят: Р. Леппинга, К. Олгиве, Дж. Стенберга и А. Лазаруса – за данные WIND; Г. Глейснера (ДМИ, Дания), А. Вилайнена (проект IMAGE), К. Юмото (проект 210(deg)MM), Т. Иемори (WDC-C2, Киото), Дж. Посч (проект MACCS), М. Фоэрстера (GFZ, Потсдам), О.А. Трошичева (ААННИ), Е.П. Харина (МСД-Б), С.И. Соловьева (ИКФИА, Якутск), Б.М. Шевцова и А.В. Винницкого (ИКИР), руководителей проектов INTERMAGNET, GIMA (Аляска), CANOPUS (Д. Миллинг); С. Хомутова (обс. Новосибирск) и О. Кусонского (обс. Арти) – за данные о компонентах магнитного поля. Авторы благодарят сотрудников группы ТИМ Т. Сайфудинову, А. Базаржапова, и Л. Сапронову за полезные обсуждения и техническую помощь, рецензентов – за ряд полезных замечаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Караваев Ю.А., Сапронова Л.А., Базаржапов А.Д. и др. Энергетика магнитосферной супербури 20 ноября 2003 г. // Солнечно-земная физика. 2006. Вып. 9. С. 34–40.

Мишин В.М., Базаржапов А.Д., Сухбаатор У. Электрические цепи возмущенной системы магнитосфера-ионосфера и их генераторы // Наст. сборник а. Вып. 15. С. 88–95.

Мишин В.М., Курикалова М.А., Фёрстер М. Электрические цепи и их генераторы в магнитосфере Земли: концепция электрических цепей в применении к начальной фазе супербури 6 апреля 2000 г. // Наст. сборник б. Вып. 15. С. 66–74.

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.

Angelopoulos V., et al. Response to comment on “Tail Reconnection Triggering of Substorm Onset” // Science. 2009. V. 324. P. 12.

Akasofu S.-I. Physics of Magnetospheric Substorms. Dordrecht: D. Reidel Pub. Co. 1977. 555 c.

Akasofu S.-I. A source of auroral electrons and magnetospheric substorm current systems // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A4. P. 8006. doi: 10.1029/2002JA009547.

Akasofu S.-I. Several “controversial” issues on substorms // Space. Sci. Rev. 2004. V. 113. P. 1–40.

Angelopoulos V., et al. Tail Reconnection Triggering of Substorm Onset // Science. 2008. V. 321, N 5891. P. 931–935.

Boudoridis A., Zesta E., Lyons L.R., et al. Magnetospheric reconnection driven by solar wind pressure front // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1367–1378.

Ebihara Y., Fok M.-C., Sazykin S., et al. Ring current and magnetosphere-ionosphere coupling during the super-storm of 20 November 2003 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A09S22. doi: 10.1029/2004JA010924.

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Gonzalez A.L.C., et al. Solar Wind Magnetosphere Coupling during intense magnetic storms (1978–1979) // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, N A7. P. 8835–8851.

Gkioulidou M., Wang C.-P., Lyons L.R., Wolf R.A. Formation of the Harang reversal and its dependence on plasma sheet conditions: Rice convection model simulation // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. A07204. doi: 10.1029/2008JA013955.

Huttunen K.E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.J., et al. April 2000 magnetic storm: Solar wind driver and magnetospheric response // Journ. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A12. P. 1440. doi: 10.1029/2001JA009154.

Hubert B., et al. Statistical properties of flux closure induced by solar wind dynamic pressure fronts // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. A07211. doi: 10.1029/2008JA013813.

Hubert B., et al. Observation of dayside subauroral proton flashes with the IMAGE-FUV imagers // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 3. P. 1145. doi: 10.1029/2002GL016464.

Hubert B., Palmorth M., Laitinen T.V., et al. Compression of the Earth magnetotail by interplanetary shocks directly drives transient magnetic flux closure // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L10115. doi: 10.1029/2006GL026008.

Huang C.-S., Anna DeJong, Cai X. Magnetic flux in the magnetotail and polar cap during sawteeth, isolated substorms, and steady magnetospheric convection events // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. A07202. doi: 10.1029/2009JA014232.

Harang L. The mean field of disturbance of polar geomagnetic storms // Terr. Magn. Atm. Electr. 1946. V. 5, N 3. P. 353–380. doi: 10.1029/TE051j003p00353.

Kan J.R. On substorm formation of near Earth X-line at substorm expansion onset // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. A01207. doi: 10.1029/2006JA012011.

Kamide Y., Baumjohann W. Magnetosphere – Ionosphere Coupling. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. P. 178.

Lyons L.R., Lee D.-E., Wang C.-P., Mende S.D. Global auroral responses to abrupt solar wind changes: Dynamic pressure, substorm, and null events // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A082008. doi: 10.1029/2005JA011089.

Lyons L.R., Blanchard G.T., Samson J.C., et al. Coordinated observations demonstrating external substorm triggering // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 27030.

Lyons L.R., Wang C.-P., Nagai T. Substorm onset by plasma sheet divergence // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A12. P. 1427. doi: 10.1029/2003JA010178.

Lee D.-E., Lyons L.R., Weigert J.M., Wang C.-P. Reasons why some solar wind changes do not trigger substorms // J. Geophys. Res. 2004. V. 112. P. A06240. doi: 10.1029/2007JA012249.

Lui A.T.Y. Comment on “tail Reconnection Triggering Substorm Onset” // Science. 2009. V. 324. P. 12.

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.

Meurant M., et al. Comparison of intense shock induced precipitation and substorm activity // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A07228. doi: 10.1029/2004JA010916.

McPherron R.L., Russell C.T., Abry M.A. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968. Phenomenological model for substorms // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 3131–3152.

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. Study of the CDAW9C Substorm, May 3, 1986 using magnetogram inversion technique 2 and a substorm scenario with two active phases // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 19845.

Mishin V.M., Mishin V.V., Shirapov D.Sh. Electric field and field-aligned currents, in: "Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations". Ed / L.M. Zelenyi, Geller M.A., Allen J.H. CAWSES Handbook-001. 2004. P. 128–133.

Mishin V. Sapronova L. Saifudinova T., et al. The Hall's and Cowling's currents contribution into the westward auroral electrojet during substorm unloading phase // Physics of Auroraal Phenomena: proc. XXXI Annual Seminar / Kola Science Centre, Russian Academy of Science. Apatity, 2008. P. 42–45.

Meurant M., Gerard J.-C., Hubert B., Cumnas V., Blockx C. Dynamics of global scale electron and proton precipitation induced by a solar wind pressure pulse // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 20. P. 2032. doi: 10.1029/2003GL018017.

Meurant M., Gerard J.-C., Blockx C., et al. Propagation of electron and proton shock-induced aurora and the role of IMF and solar wind // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. P. A10210. doi: 10.1029/2004JA010453.

Ostgaard N., Germany G., Stadnes J., Vondrak R.R. Energy analisis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. N A9. P. 1233. doi:10.1029/2001JA00100.

Potemra T.A. Sources of large-scale Birkelands currents // Physical Signatures of Magnetospheric Boundary Layer Processes. 1994. P. 3–27.

Pu Z.Y., Chu X.N., Cao X., et al. THEMIS observations of substorms on 26 February 2008 initiated by magnetotail reconnection // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. A02212. doi:10.1029/2009JA014217.

Rostoker G., Akasofu S.-I., Baumjohann W., et al. The roles of direct input of energy from the solar wind and unloading of stored magnetotail energy in driving magnetospheric substorms // Space Sc. Rev. 1987. V. 46. P. 93–111.

Sun W., Xu W.-Y., Akasofu S.-I. Separation of directly-DRIVEN and UNLOADING Components in the Ionospheric Equivalent Currents During Substorms by the Method of Natural Orthogonal Components // Geophys. Monograph. AGU. 1998. V. 104. P. 229–234.

Siscoe G.L., Lotko W., Sonnerup B.U.O. A High-Latitude, Low-Latitude Boundary Lyayer Model of the Convection Current System // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, N A3. P. 3487–3495.

Slavin J.A., et al. An ISEE 3 study of average and sub-storm time conditions in the distant magnetotail // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 10875.

Turner N.E., Baker D.N., Pulkkinen T.I., et al. Energy content in storm time ring current // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N A9. P. 19,149–19,156.

Zhou X.-Y., Tsurutani B.T. Rapid intensification and propagation of the dayside aurora: Large scale interplanetary pressure pulses (fast shocks) // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 1097.

Zhou X.-Y., Tsurutani B.T., Reeves G., et al. Ring current intensification and convection-driven negative bays: Multisatellite studies // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A11. P. 1407. doi:10.1029/2003JA009881.

Zou S., Lyons L.R., Wang C.P., et al. On the coupling between the Harang reversal evolution and substorm dynamics: A synthesis of SuperDARN, DMSP, and IMAGE observations // J. Geophys. Res. 2009. doi: 10.1029/2008JA013449.

Институт солнечно-земной физики, Иркутск