

ДВА «ГЛАВНЫХ НАЧАЛА» СУББУРИ 27 АВГУСТА 2001 ГОДА

В.М. Мишин, С.Б. Лунюшкин, В.В. Мишин (ИСЗФ, Иркутск)

Введение

Механизм взрывного начала активной фазы суббури – основная тема в феноменологии и теории суббурь. Однако существует множество методов определения названного начала: по наблюдениям полярных сияний или магнитных возмущений в авроральном овале, или то же в средних широтах, или на основе данных Pi2 в высоких широтах, или то же в средних широтах. Существует также понятие "множественные начала" и, наконец, понятие двух главных начал разгрузочной фазы суббури, EО1 и EО2, создаваемых пересоединением в замкнутом (MR1) и открытом хвосте (MR2), соответственно. Настоящая статья – о двух главных началах, наблюдаемых в суббуре 27.08.2001. Это событие и вопрос о двух названных expansion onsets исследовали Baker et al. [2002] и ряд авторов [e.g., Eriksson et al., 2002; Li et al., 2003; Blake et al., 2005]. Двойные expansion onsets в отдельных суббурях отметили Cheng et al. [2005; 2011], Liu et al. [2009], Morioka et al. [2010], Connors et al. [2011]. В отличие от Baker et al. [2002], эти авторы интерпретировали два главных начала, не связывая их с MR1 и MR2. С другой стороны, наблюдаемые признаки связи EО1/EО2 с MR1/MR2, соответственно, отмечены в серии статей [Mishin et al., 1997; 2000; 2001; 2010; Russell, 2000; Cao et al., 2008; Pu et al., 1999; 2010; Tang et al., 2009; 2010; Nakamura et al., 2011]. Можно видеть, что понятие "two major substorm onsets" имеет разный смысл у разных авторов и что остаётся много неясного. Не ясно, как влияет на мощность и энергию суббури переход от EО1 к EО2? В каких областях хвоста развиваются процессы, создающие главные начала EО1 и EО2? Модель Baker et al. [2002, their Fig. 5] допускает возможность, что переход от EО1 к EО2 есть процесс расширения области MR в центральном плазменном слое вверх по оси Z. Данные Tang et al. [2009] поддерживает такую версию, но в модели Nakamura et al. [2011, their Fig. 11] названный переход описан как процесс расширения области MR вдоль оси X. В работах [Mishin et al., 2001, and references therein], MR2 и EО2 наблюдаются как начало спада магнитного потока долей хвоста Ψ , т.е. EО2 и MR2 начинаются на границе полярной шапки (R0) и процесс продолжается внутри R0. Названные и другие открытые вопросы о double expansion onsets входят в круг задач настоящей статьи. Будет использован набор данных наблюдений, традиционный для исследования суббурь, и выходные данные техники инверсии магнитограмм (ТИМ) [Mishin et al., 1990; 2001].

1. Таймирование фаз суббури

Комплекс использованных опытных данных содержит результаты измерений параметров плазмы и ММП на space craft WIND (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>), индексы AE (42 станции на геомагнитных широтах $\Phi > 40^\circ$) и базу данных ТИМ, полученную на основе наземных измерений трёх компонент магнитного поля на высокоширотной сети из 101 наземного магнитометра ($\Phi > 40^\circ$). На Рис. 1 - временные ряды значений упомянутых параметров СВ и выходных параметров ТИМ: переменной части магнитного потока долей хвоста Ψ_1 , потока электромагнитной энергии из СВ в магнитосферу ($\epsilon' = \text{const} \Psi_1^2 V_{\text{СВ}}$), интенсивности J_{CD} токового клина суббури, мощности возмущения (Q), энергии - накопленной в хвосте (W^*) и затраченной на активной фазе (W). Параметр Ψ - магнитный поток через площадь полярной шапки (область R0 Ииджимы и Потемры) - определяется, используя карты ПТ и полагая $\Psi = B \cdot S$, где B – среднее значение магнитного поля в R0, S – площадь внутри границы полярной шапки (R0). Мы учитываем, что $\Psi = \Psi_1 + \Psi_0$, где Ψ_1 переменное слагаемое, Ψ_0 – значение Ψ перед началом рассматриваемой суббури [e.g., Mishin et al., 2001; 2012]. Об определении границы

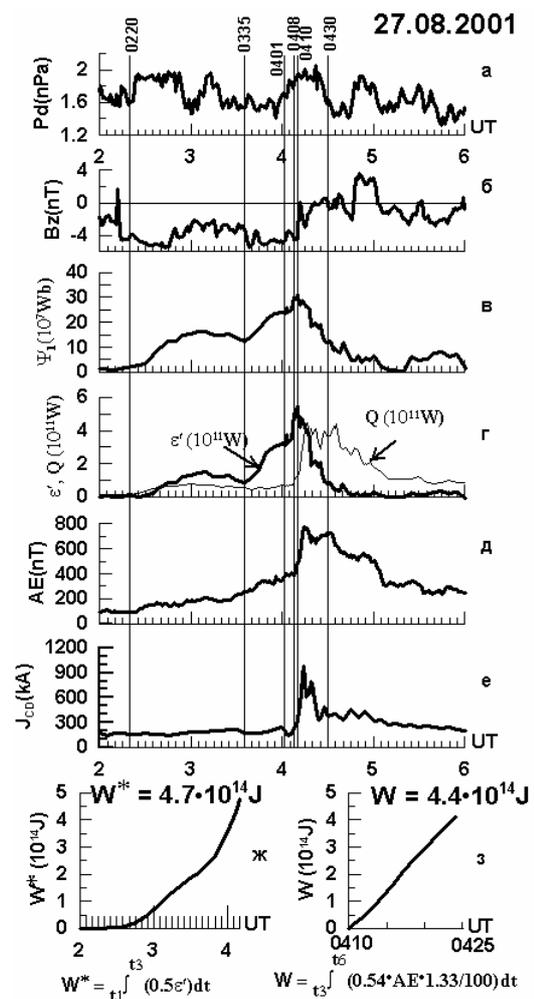


Рис. 1 Параметры СВ и ТИМ (пояснения в тексте)

R0 см. *Mishin et al.* [2011, and references therein]. Параметр J_{CD} тоже определяется на карте ПТ, как интенсивность токового клина суббури SCW. Об определении параметров Q, W и W^* см. *Østgaard et al.* [2002], *Mishin et al.* [2010].

На Рис. 1 можно видеть, что в ходе рассматриваемой суббури динамическое давление СВ (P_d) колеблется с малой амплитудой около среднего уровня < 2.0 нПа. Корреляция с изменениями АЕ-индексов визуально не прослеживается. Предонсетная фаза суббури начинается вместе с началом медленного роста АЕ-индексов и более быстрого роста Ψ_1 вблизи 02:20UT, когда наблюдается резкое усиление модуля южной компоненты ММП. Второй импульс быстрого роста АЕ-индекса начинается за несколько минут до 04:10UT. В этот момент на Рис. 1 наблюдается резкий северный поворот ММП B_z и начало падения Ψ_1 .

Согласно известным определениям, “псевдобрейкап” - сравнительно слабая вспышка активности, локализованная в низкоширотной части овала, а “expansion onset” – более сильное возмущение, которое начинается там же, но распространяется к границе ПШ [*Koskinen et al.*, 1993; *Ohtani et al.*, 1993; *Nakamura et al.*, 1994]. Известно также, что псевдобрейкапы наблюдаются на фазе роста Ψ , а expansion onsets начинаются и продолжаются на фазе последующего спада Ψ [*Mishin et al.*, 1997; 2001, and references therein]. Учитывая изложенное, мы определяем по данным Рис. 1 предонсетные фазы суббури, growth phase и фазу псевдобрейкапов, как интервалы (02:20-03:35) и (03:35-04:08)UT, соответственно. Начало EО1 в 04:08UT будет обосновано ниже. Начало recovery phase определяем из графика АЕ-индекса как 04:30UT. Такого предварительное таймирование. Дополнительные детали и связь EО1, EО2 с MR1, MR2 обсуждаются ниже.

2. Два главных начала фазы экспансии

Baker et al. [2002] использовали измерения на GOES-8, POLAR, Cluster и отметили признаки первого в суббуре 27.08.01 усиления MR1, наблюдаемые в центральном плазменном слое на $X \sim -18$ Re в 04:01UT. Этот факт был интерпретирован как причина наблюдаемого аврорального псевдобрейкапа, который был отмечен как предшественник EО1. Признаки MR1 сохранялись несколько минут и в интервале (04:05- 04:08) UT резко усилились - как в названной области среднего хвоста, так и на $X = -6.6$ Re. Момент 04:08UT был принят авторами как время EО1. В интервале (04:08-04:10)UT отмечены также признаки разрушения of the cross-tail current как следствия MR1 в ближнем хвосте на GOES-8. Используя данные Cluster, *Baker et al.* предполагают, что следствием названных событий MR1 является образование канала plasma tailward flow со скоростью ~ 100 км/сек, и что это течение расширяет область MR1 дальше в хвост, на $X < -18$ Re. На такой основе предполагаются, что в названной области $X < -18$ Re, и примерно одновременно с EО1, возникают процессы MR2/EО2. Они отметили также начало быстрого роста в 04:10UT индексов АЕ - по наземным данным, и признаки образования EО1/EО2 – по данным упомянутых измерений на геостационарной орбите.

Мы принимаем изложенный сценарий за основу. Будет выполнен тест, используя графики изменений в ходе суббури плотности ПТ, электрического потенциала U и параметров J_{CD} и Ψ , чтобы исключить те элементы сценария, которые не имели прямого подтверждения, и частично ответить на упомянутые открытые вопросы.

1. Как влияет на мощность и энергию суббури переход от режима MR1/EО1 к режиму MR2/EО2?

Поток электромагнитной энергии, поступающий в магнитосферу из СВ, есть $\epsilon' = C(\Psi_1)^2 V_{sw}$. Используя эту формулу, *Mishin et al.* [2010] описали показанные на Рис. 1г, ж, з изменения мощности Q, энергии W^* , накапливаемой в хвосте в ходе growth phase, и энергии W, потребляемой на разгрузочной стадии. Принимали: $W^* = \int (\epsilon' - Q) dt$; $W = \int (Q - \epsilon') dt$; $Q = Q_i + 2Q_{DR}$ [*Turner et al.*, 2001], $Q_i(GW) = 0.54AE + 1.8$ [*Østgaard et al.*, 2002]. Можно видеть, что приближённо выполняется баланс $W = W^*$. Отсюда видно, что изменения входного

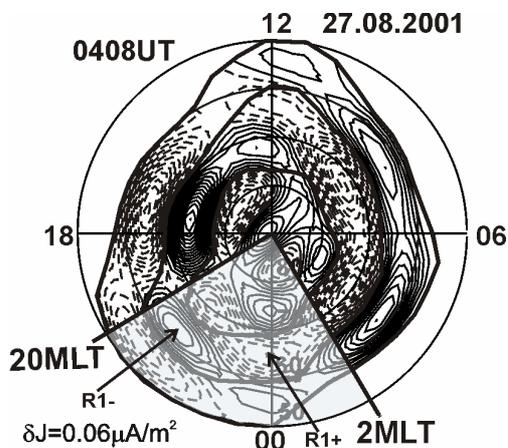


Рис. 2 Карта ПТ (пунктир-ток вниз, сплошная – вверх).

потока энергии ϵ' практически полностью контролируются параметром Ψ_1 , т.е. площадью полярной шапки. Этот вывод соответствует упомянутому предположению *Baker et al.* [2002] и *Cao et al.* [2008], что основной вклад в наблюдаемую мощность и энергию разгрузочной стадии суббури вносит процесс MR2.

2. Когда и где (в какой области хвоста) отмечены признаки EО1? Наблюдаемым признаком MR1 служит частичный разрыв основного тока хвоста в ночном плазменном слое (Current Disruption, CD). С краёв CD в ионосферу области R1 Ииджимы и Потемры стекает пара ПТ токового клина суббури (SCW) [*McPherron et al.*, 1973; *Birn and Hesse*, 2013]. Эту пару ПТ составляют токи: втекающий (R1+) в ионосферу в утреннем и вытекающий (R1-) в вечернем ночном секторе (20–02)MLT, длиной ~ 6 часов, [e.g., *Lyons*, 2005]. Соответствующий пример по данным рассматриваемой суббури дан на Рис. 2. Можно

видеть, что область втекающего ПТ R1+ достаточно ясно определена. Временной ряд таких карт был получен на основе ТИМ с шагом 1 минута и использовался для определения параметра J_{CD} , принимая, что J_{CD} есть интенсивность втекающего ПТ R1+, которая есть также интенсивность тока CD. Полученный график изменений J_{CD} в ходе рассматриваемой суббури показан на Рис. 1е. Можно видеть, что J_{CD} действительно испытывает в интервале (04:07-04:08)UT ожидаемое первое скачкообразное усиление - признак EО1. В рассматриваемой суббуре этот признак наблюдается в секторе (20-02)MLT зоны R1.

3. *Особый интерес представляет тот факт, что названные признаки EО1 - скачкообразная интенсификация электрического поля и токов в ионосфере – наблюдаются почти одновременно на всей площади ионосферной проекции хвоста - от near-Earth tail to distant tail.* О такой интенсификации в near-Earth tail и среднем хвосте свидетельствуют отмеченные *Baker et al.* [2002] данные геостационарного спутника GOES-8, а также данные наземных наблюдений сияний и АЕ-индексы. На картах ПТ максимум плотности ПТ всегда наблюдается в экваторной половине R1 и он резко усиливается в интервале (04:07-04:08)UT. Примеры показаны на Рис. 2 и Рис. 3. Статистические данные *Miyashita et al.* [2009] также свидетельствуют, что «почти одновременность» появления EО1 в near-Earth tail и в среднем хвосте на $X > 20R_e$ является общим свойством суббурь. Скачкообразная интенсификация в дальнем хвосте тоже проявляется отчётливо при сравнении пар карт плотности ПТ/потенциала U, полученных для начала и конца того же интервала (04:07-04:08)UT. Две такие пары представлены на Рис. 3 - для моментов 04:07 и 04:08UT. Можно видеть, что плотность ПТ и градиент потенциала U на приграничном ночном участке R0 увеличивается в разы за время $\Delta t \leq 1$ минута. Если учесть, что две названные области хвоста разделены расстоянием $\sim 100 R_e$, то скорость распространения сигнала, связывающего эти две области, должна быть не меньше 10^4 км/сек, что превышает известные скорости распространения МГД-волн. Этот факт послужил основой гипотезы КЗ - короткого замыкания ионосферных токов возмущённой М-И системы в интервале (04:07-04:08)UT [*Mishin et al.*, 2013].

4. *Переходим к таймированию EО.* На Рис. 1в, г показаны изменения в ходе суббури упомянутых выше параметров Ψ_1 и ε' . Из предыдущего следует, что изменение знака производных по времени обоих названных параметров есть индикатор перехода от EО1 к EО2. По данным Рис. 1в такой переход имеет место вблизи 04:10UT. График ММП B_z на Рис. 1б также свидетельствует, что вблизи 04:10UT наблюдается поворот ММП на север – известная причина интенсификации суббури [e.g., *Russell*, 2000]. В 04:10UT наблюдается также ускорение роста АЕ-индексов, который начался ранее. Эти факты поддерживают таймирование EО2 в 04:10UT с задержкой $\Delta t = 2$ мин после EО1. Такое разделение EО1 и EО2 во времени отличается от соответствующих результатов *Baker et al.* [2002], где $\Delta t = 0$, и от результатов *Nakamura et al.* [2011], где $\Delta t = 23$ мин. Вероятная причина этих различий - упомянутый северный поворот ММП. В суббуре, которую исследовали *Nakamura et al.*, не было северного поворота ММП, а *Baker et al.* не отметили запоздания EО2 на 2 минуты, не имея использованного нами графика Ψ .

5. *Где начинается и продолжается процесс MR2/EО2?* Ясно, что EО2 есть следствие расширения области, где развивается процесс MR1 и EО1. Сигнал из области источника EО1 в область EО2 может, вообще говоря, распространяться как по оси Z вверх, так и по оси X tailward. Первый вариант допускается в сценарии *Baker et al.* [2002, their Fig. 5] и поддерживается уникальными данными *Tang et al.* [2009]. В пользу второго варианта свидетельствуют аргументы *Nakamura et al.* [2011, their Fig. 11]. Можно говорить о третьем варианте – распространении в обоих названных направлениях, и варианте 4, в котором EО2 начинается на границе области R0, когда начинается спад Ψ . Наши данные свидетельствуют о реальности варианта 4. Поскольку Ψ_1 есть приращение $\Delta\Psi$ открытого магнитного потока Ψ , возникающее в ходе суббури, ненулевые положительные значения Ψ_1 и их рост должны наблюдаться в ходе growth phase вблизи границы старой полярной шапки, существующей перед началом суббури. Это так, поскольку Ψ есть поток через площадь полярной шапки. Отрицательные $\Delta\Psi$ и рост их модуля ожидаются в ходе expansion phase. График Ψ_1 на Рис. 1в и дополнительные данные (не показаны) подтверждают именно такие ожидаемые события. Деление на названные варианты имеет смысл в пространстве 2D. В трёхмерном пространстве возможны все 4 варианта. Этот вывод может быть полезен при дальнейшем изучении проблемы double expansion onsets.

В целом, по данным суббури 27.08.01 рассмотрены и частично получены ответы на вопросы:

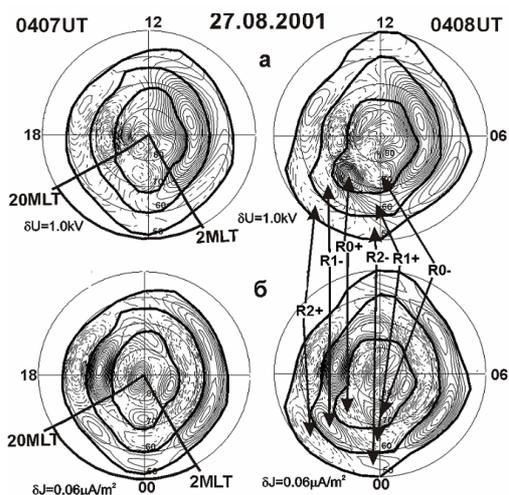


Рис. 3 Карты U (вверху) и ПТ (внизу).

1. Как влияет на мощность и энергию суббури переход от режима MR1/EO1 к режиму MR2/EO2?
2. Когда и где (в какой области хвоста) отмечены признаки EO1?
3. Как связаны наблюдаемые expansion onsets с явлением КЗ в возмущённой М-И системе?
4. Каковы последовательности во времени и пространстве двух главных expansion onsets?
5. Где начинается и продолжается процесс MR2/EO2 ?

Мы продолжаем аналогичное исследование по данным возмущений различного типа.

Авторы благодарят Сапронову Л. А. за расчеты и подготовку рисунков. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты №12-05-91159-ГФЕН и №13-05-92219-МОНГ).

Список литературы

- Baker, D. N., et al. (2002), Timing of magnetic reconnection initiation during a global magnetospheric substorm onset, *Geophys. Res. Lett.*, 29(24), 2190.
- Birn, J., and M. Hesse (2013), The substorm current wedge in MHD simulations, *J. Geophys. Res.*, 118(6), 3364-3376.
- Blake, J. B., R. Mueller-Mellin, J. A. Davies, X. Li, and D. N. Baker (2005), Global observations of energetic electrons around the time of a substorm on 27 August 2001, *J. Geophys. Res.*, 110.
- Cao, X., et al. (2008), Multispacecraft and ground-based observations of substorm timing and activations: Two case studies, *J. Geophys. Res.*, 113(A7), A07S25.
- Cheng, C.-C., C. T. Russell, G. D. Reeves, M. Connors, and M. B. Moldwin (2005), On the relationships between double-onset substorm, pseudobreakup, and IMF variation: The 4 September 1999 event, *J. Geophys. Res.*, 110(A7), A07201.
- Cheng, C. C., C. T. Russell, V. Angelopoulos, I. R. Mann, K. H. Glassmeier, and W. Baumjohann (2011), THEMIS observations of double-onset substorms and their association with IMF variations, *Ann. Geophys.*, 29(3), 591-611.
- Connors, M., C. T. Russell, and V. Angelopoulos (2011), Magnetic flux transfer in the 5 April 2010 Galaxy 15 substorm: an unprecedented observation, *Ann. Geophys.*, 29(3), 619-622.
- Eriksson, S., J. W. Bonnell, L. G. Blomberg, R. E. Ergun, G. T. Marklund, and C. W. Carlson (2002), Lobe cell convection and field-aligned currents poleward of the region 1 current system, *J. Geophys. Res.*, 107(A8), SMP 16-11-SMP 16-15.
- Koskinen, H. E. J., R. E. Lopez, R. J. Pellinen, T. I. Pulkkinen, D. N. Baker, and T. Bösinger (1993), Pseudobreakup and Substorm Growth Phase in the Ionosphere and Magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 98(A4), 5801-5813.
- Li, X., T. E. Sarris, D. N. Baker, W. K. Peterson, and H. J. Singer (2003), Simulation of energetic particle injections associated with a substorm on August 27, 2001, *Geophys. Res. Lett.*, 30(1), 1004.
- Liu, J., et al. (2009), THEMIS observation of a substorm event on 04:35, 22 February 2008, *Ann. Geophys.*, 27(5), 1831-1841.
- Lyons, L. R., D. Y. Lee, C. P. Wang, and S. B. Mende (2005), Global auroral responses to abrupt solar wind changes: Dynamic pressure, substorm, and null events, *J. Geophys. Res.*, 110(A8), A08208.
- McPherron, R. L., C. T. Russell, and M. P. Aubry (1973), 9. Phenomenological Model for Substorms, *J. Geophys. Res.*, 78(16), 3131-3149.
- Mishin, V. M. (1990), The magnetogram inversion technique and some applications, *Space Sci Rev*, 53(1), 83-163.
- Mishin, V. M., C. T. Russell, T. I. Saifudinova, and A. D. Bazarzhapov (2000), Study of weak substorms observed during December 8, 1990, Geospace Environment Modeling campaign: Timing of different types of substorm onsets, *J. Geophys. Res.*, 105(A10), 23263-23276.
- Mishin, V. M., M. Förster, M. A. Kurikalova, and V. V. Mishin (2011), The generator system of field-aligned currents during the April 06, 2000, superstorm, *Adv. Space Res.*, 48(7), 1172-1183.
- Mishin, V. M., Y. A. Karavaev, L. A. Sapronova, and S. I. Solov'yev (2012), Activation of the tail open part during the magnetospheric storm, *Cosmic Res*, 50(4), 272-281.
- Mishin, V. M., Z. Pu, V. V. Mishin, and S. B. Lunyushkin (2013), Short-circuit in the magnetosphere-ionosphere electric circuit, *Geomagnetism and Aeronomy*, 53(6), 809-811.
- Mishin, V. M., Z. Pu, L. A. Sapronova, M. V. Tolochko, T. I. Saifudinova, and S. I. Solov'yev (2010), The scenario of magnetospheric substorms on the example of events on February 26, 2008, *Doklady Earth Sciences*, 433(2), 1053-1056.
- Mishin, V. M., T. Saifudinova, A. Bazarzhapov, C. T. Russell, W. Baumjohann, R. Nakamura, and M. Kubyshkina (2001), Two distinct substorm onsets, *J. Geophys. Res.*, 106(A7), 13105-13118.
- Mishin, V. M., et al. (1997), A study of the CDAW 9C substorm of May 3, 1986, using magnetogram inversion technique 2, and a substorm scenario with two active phases, *J. Geophys. Res.*, 102(A9), 19845-19859.
- Miyashita, Y., et al. (2009), A state-of-the-art picture of substorm-associated evolution of the near-Earth magnetotail obtained from superposed epoch analysis, *J. Geophys. Res.*, 114(A1), A01211.
- Morioka, A., et al. (2010), Two-step evolution of auroral acceleration at substorm onset, *J. Geophys. Res.*, 115(A11), A11213.
- Nakamura, R., D. N. Baker, T. Yamamoto, R. D. Belian, E. A. Bering, III, J. R. Benbrook, and J. R. Theall (1994), Particle and Field Signatures During Pseudobreakup and Major Expansion Onset, *J. Geophys. Res.*, 99(A1), 207-221.
- Nakamura, R., et al. (2011), Flux transport, dipolarization, and current sheet evolution during a double-onset substorm, *J. Geophys. Res.*, 116, A00136.
- Ohtani, S., et al. (1993), A Multisatellite Study of a Pseudo-Substorm Onset in the Near-Earth Magnetotail, *J. Geophys. Res.*, 98(A11), 19355-19367.
- Østgaard, N., G. Germany, J. Stadsnes, and R. R. Vondrak (2002), Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices, *J. Geophys. Res.*, 107(A9), 1233.
- Pu, Z. Y., et al. (1999), Ballooning instability in the presence of a plasma flow: A synthesis of tail reconnection and current disruption models for the initiation of substorms, *J. Geophys. Res.*, 104(A5), 10235-10248.
- Pu, Z. Y., et al. (2010), THEMIS observations of substorms on 26 February 2008 initiated by magnetotail reconnection, *J. Geophys. Res.*, 115(A2), A02212.
- Russell, C. T. (2000), How northward turnings of the IMF can lead to substorm expansion onsets, *Geophys. Res. Lett.*, 27(20), 3257-3259.
- Tang, C. L., Z. Y. Li, V. Angelopoulos, S. B. Mende, K. H. Glassmeier, E. Donovan, C. T. Russell, and L. Lu (2009), THEMIS observations of the near-Earth plasma sheet during a substorm, *J. Geophys. Res.*, 114.
- Tang, C. L., V. Angelopoulos, A. Runov, C. T. Russell, H. Frey, K. H. Glassmeier, K. H. Fornacon, and Z. Y. Li (2010), Precursor activation and substorm expansion associated with observations of a dipolarization front by Thermal Emission Imaging System (THEMIS), *J. Geophys. Res.*, 115(A7), A07215.
- Turner, N. E., D. N. Baker, T. I. Pulkkinen, J. L. Roeder, J. F. Fennell, and V. K. Jordanova (2001), Energy content in the storm time ring current, *J. Geophys. Res.*, 106(A9), 19149-19156.