

СИНХРОННЫЕ СУББУРЕВЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ В БЛИЖНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ

И.А. Корнилов, Т.А. Корнилова (*Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*)

Аннотация. Анализировались результаты измерений спутников THEMIS с использованием телевизионных данных обсерватории ПГИ в обл. Ловозеро. Обнаружено, во время суббуревых возмущений в плазменном слое магнитосферы на расстояниях 5-10 Re наблюдаются быстрые синхронные возрастания потоков электронов и ионов в диапазоне 0.5-30 кэВ. За несколько секунд потоки возрастают в 5-50 раз, и отчетливо антикоррелируют с потоками в низких энергиях (10-500 эВ). Возрастания наблюдаются при прохождении мимо спутника фронта движущейся по направлению к Земле волны диполяризации, и сопровождаются быстрыми интенсивными вариациями амплитуд магнитного и электрического полей. Высказывается предположение, что происходит ускорение локальных электронов и ионов на фронте волны диполяризации.

Введение

Спутники серии THEMIS были выведены на околоземные орбиты в середине февраля 2007 г. Система состоит из пяти спутников с вытянутыми эллиптическими орбитами, лежащими в экваториальной плоскости магнитосферы. Спутники имеют кратные периоды обращения и периодически оказываются на одной линии в апогеях орбит, что позволяет одновременно наблюдать процессы в магнитосфере на разных расстояниях от Земли. Основные детекторы спутников:

1. Векторные измерения электрических и магнитных полей в большом динамическом диапазоне (не менее 50-100 тысяч), так что фильтрация данных может выделить самые слабые вариации.
2. Электростатический анализатор для измерения потоков электронов и протонов в диапазоне энергий 10 эВ – 30 кэВ с высоким угловым разрешением в 32 энергетических каналах. Апертура детектора (т.е. статистика счета частиц) очень высокая, что позволяет строить детальные энергетические спектры.
3. Полупроводниковый твердотельный детектор измеряет потоки электронов и ионов с энергиями 30 кэВ – 2 МэВ в 30 энергетических каналах также с хорошей статистикой.
4. Индукционный магнитометр позволяет анализировать пульсации магнитного поля с временным разрешением от 8 до 8192 измерений в секунду.

Спутниковые измерения поддерживаются большим комплексом расположенной на территории северной Канады наземной аппаратуры (более 20 магнитометров, риометров и телевизионных all-sky камер). Стандартное временное разрешение всех данных 3 секунды, но для отдельных событий (т.н. burst mode) может быть намного выше. Вся наземная и спутниковая информация по THEMIS представлена в свободном доступе в Интернет, и непрерывно дополняется почти в реальном времени. Информация доступна как в виде готовых обзорных картинок, так и в виде удобных для обработки цифровых текстовых и CDF файлов.

Уникальные приборные и баллистические характеристики спутников серии THEMIS позволяли надеяться на быстрый и существенный прогресс в понимании физических процессов в магнитосфере. Однако после почти 4 лет исследований такого явного прогресса не наблюдается. Хотя по данным THEMIS опубликовано очень большое количество работ, физические выводы авторов часто противоречат друг другу [например, 1-5]. Более того, нередко одна группа авторов, критически анализируя данные, представленные другой группой, подвергает сомнению сделанные ими заключения [4,5].

Данные и результаты

На рисунке 1 представлен 1-часовой интервал наземных и спутниковых данных для 27.02.2008. Кеограмма, показывающая движения сияний вдоль направления север-юг (1) построена по данным телевизионной камеры, установленной в обсерватории ПГИ Ловозеро. К сожалению, эти наблюдения сопровождались сильным туманом, который практически полностью маскирует движения сияний на обычной кеограмме, поэтому на рисунке представлена кеограмма, подвергнутая высокочастотной фильтрации. Момент брейкапа, т.е. начало быстрого уярчения сияний и движения их к северу отмечается около 18.36 UT. Интенсивная подсветка тумана яркими сияниями брейкапа (проявляется протяженными вертикальными полосами на кеограмме) несколько искажает картину, однако движение сияний к северу видно вполне отчетливо. Перед брейкапом, на предварительной фазе суббури (18.10-18.36), видны слабые активизации сияний и регулярные движения их к югу. Ниже кеограммы данные детекторов спутника THEMIS-A отображают энергетические спектры низко (3) и высокоэнергичных электронов (2), а также вариации магнитного поля в нанотесла (4), и его высокочастотные пульсирующие компоненты (5). Внизу (6) показан интеграл спектра высокоэнергичных электронов, т.е. их суммарный поток с энергиями 30-500 кэВ. Проекция спутника на

ионосферу находится западнее обсерватории Ловозеро, но определенно попадает в поле зрения телевизионной камеры. Важно также отметить, что примерно за 15-20 минут перед брейкапом (около 18.00-18.20) спутник регистрирует возрастание потоков электронов с энергиями 30-500 кэВ (2, 6), а через 15 минут после брейкапа резко усиливаются потоки с энергиями 30-100 кэВ (18.45-19.00). За 1-2 минуты перед моментом брейкапа спутник регистрирует прохождение волны диполяризации, т.е. распространяющийся вдоль хвоста магнитосферы процесс преобразования конфигурации магнитного поля от вытянутых в хвост силовых линий к более дипольному, что проявляется в регулярном возрастании B_z – компоненты (4). Высокочастотная фильтрация данных показывает интенсивные пульсации после прохождения фронта волны диполяризации (5). Диполяризация сопровождается резким увеличением потоков электронов энергий 1-10 кэВ, причем потоки имеют ярко выраженный осциллирующий характер. Можно видеть признаки явной антикорреляции потоков электронов с энергиями 10-500 эВ и 2-20 кэВ.

27.02.2008 Lovozero 18.00-19.00 UT

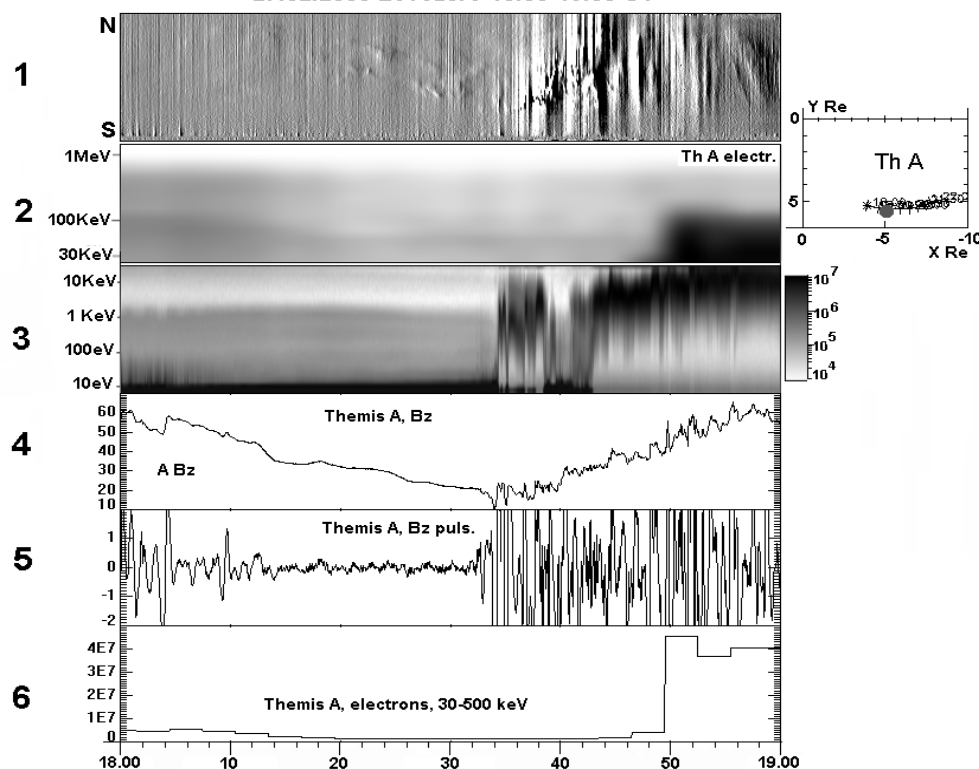


Рис. 1. Пример осциллирующего характера спектра электронов на 5 Re. Кеограмма сияний в Ловозеро (1), энергетические спектры электронов в диапазонах энергий 10 эВ-30 кэВ и 30 кэВ-2 МэВ (2 и 3), а также вариации магнитного поля на спутнике THEMIS A (4,5).

Факт антикорреляции электронных потоков представляется очень важным для понимания физики магнитосферных процессов, и рассмотрен более детально для события 10 февраля 2008 г. (рис. 2). На рисунке представлен 12-минутный интервал данных по потокам низкоэнергичных электронов (10 эВ-30 кэВ), зарегистрированных на спутнике THEMIS-E. Энергетический спектр (1) демонстрирует быстрые вариации длительностью 1-2 минуты, на их фоне присутствуют еще более мелкомасштабные, длительность которых фактически ограничена временным разрешением детектора (3 сек.). В спектре отчетливо видна антикорреляция потоков электронов 2-20 кэВ и 10-500 эВ. Интегралы спектра в двух диапазонах энергий (2,3) показывают, что модуляция потоков как в низких, так и в высоких энергиях очень глубокая – антикоррелирующая, потоки меняются более чем в 50 раз. При этом потоки, проинтегрированные по всем регистрируемым детектором энергиям (3) варьируют не более чем на 10 процентов. Скорее всего, вариаций в интегральном потоке вообще нет, просто небольшая часть электронов с энергиями более 30 кэВ не попадает в энергетический диапазон детектора. Этот важный факт показывает, что регистрируются не электроны, ускоренные в хвосте магнитосферы и инжектированные в околоземную область, а ускоряются (термализуются) локальные электроны в окрестности спутника некоторым активным процессом, связанным с развитием плазменной неустойчивости на фронте волны диполяризации.

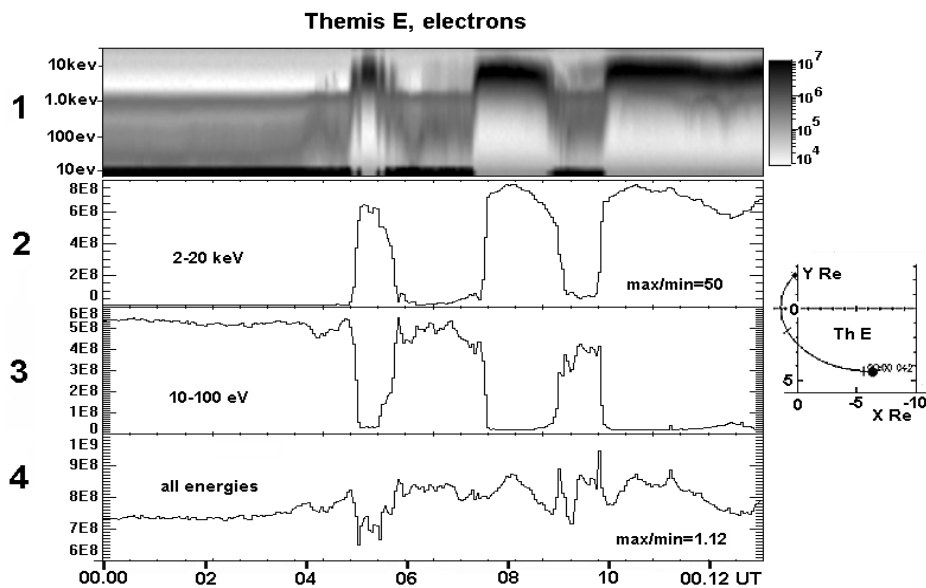


Рис. 2. Анतिकорреляция потоков низко (3) и высокоэнергичных (2) электронов.

Рост электронных потоков с энергиями 1-10 кэВ на фронте волны диполяризации сопровождается также возрастанием потоков ионов (протонов). На рисунке 3 приведен типичный пример. Рисунок представляет 10-минутный интервал данных с временным разрешением 3 секунды. Усиление потоков электронов (1) и ионов (2) в пределах временного разрешения детектора происходит одновременно, даже для ионов с энергиями около 1 кэВ. Направленная скорость таких ионов около 500 км/сек. Если бы эти ионы были ускорены в хвосте, на 15-20 Re, спутника они достигли бы не раньше, чем через 1.5-2 минуты. В отличие от предыдущих случаев, рисунок 3 показывает и наличие ранее ускоренных 10-кэВных электронов и ионов, по-видимому, оставшихся во внутренней магнитосфере от предыдущей суббури (интервал времени 02:50-02:56 UT). При прохождении волны диполяризации растет их количество и средняя энергия (3-4), при этом также можно отметить признаки анतिकорреляции потоков электронов низких и высоких энергий. То, что ускорение частиц явно связано с некоторой токовой плазменной неустойчивостью, показывает тот факт, что быстрые вариации магнитного поля заметно опережают (на 20-30 сек.) возрастание потоков частиц (интервал 02:56-02:57 UT). Данные индукционного магнитометра (128 отсчетов в секунду), показывают, что характерный временной масштаб развития такой неустойчивости всего несколько секунд (6).

Обсуждение и выводы

Считается, что три главных процесса, сопровождающих суббурю – пересоединение, диполяризация и авроральный брейкап являются тремя различными проявлениями некоего единого взрывного процесса. Кратко перечислим основные экспериментальные факты, известные на данный момент:

1. На предварительной фазе суббури, за 30-40 минут перед брейкапом спутники регистрируют возрастание потоков энергичных электронов (и ионов) с энергиями 30-100 кэВ. Высыпания их в ионосферу хорошо видны на стратосферных баллонах в тормозном рентгеновском излучении [9]. На кадрах ТВ камеры они связаны с малоактивными северными структурами сияний, предвещающие брейкап на южном горизонте [6]. От северных структур сияний отделяются движущиеся к югу слабые светящиеся структуры.
2. Прохождение фронта диполяризации сопровождается ускорением местных электронов и ионов до энергий 10-30 кэВ. Примерно в этот интервал времени в ионосфере наблюдается брейкап, т.е. расширение к северу интенсивных ярких сияний. Южнее их развиваются пульсирующие сияния.
3. Через 5-10 минут после брейкапа на спутниках THEMIS наблюдаются интенсивные потоки электронов с энергиями 30-500 кэВ.

Можно предложить предварительную схему развития суббури, в которой пересоединение, брейкап и диполяризация рассматриваются как три связанных, но отдельных явления:

На предварительной фазе суббури (около 30-40 минут до брейкапа) происходит накопление энергии солнечного ветра (вытягивание в хвост силовых линий, усиление токов поперек хвоста). Одновременно с этим (или немного позже) на 15-25 Re начинается процесс квазистационарного пересоединения, наполняющего внутреннюю магнитосферу горячей плазмой (северные структуры сияний и их смещение к югу). Достижение критической плотности тока поперек хвоста (следствие насыщения горячей плазмой и уменьшения толщины токового слоя) вызывает развитие плазменной неустойчивости на 10-12 Re.

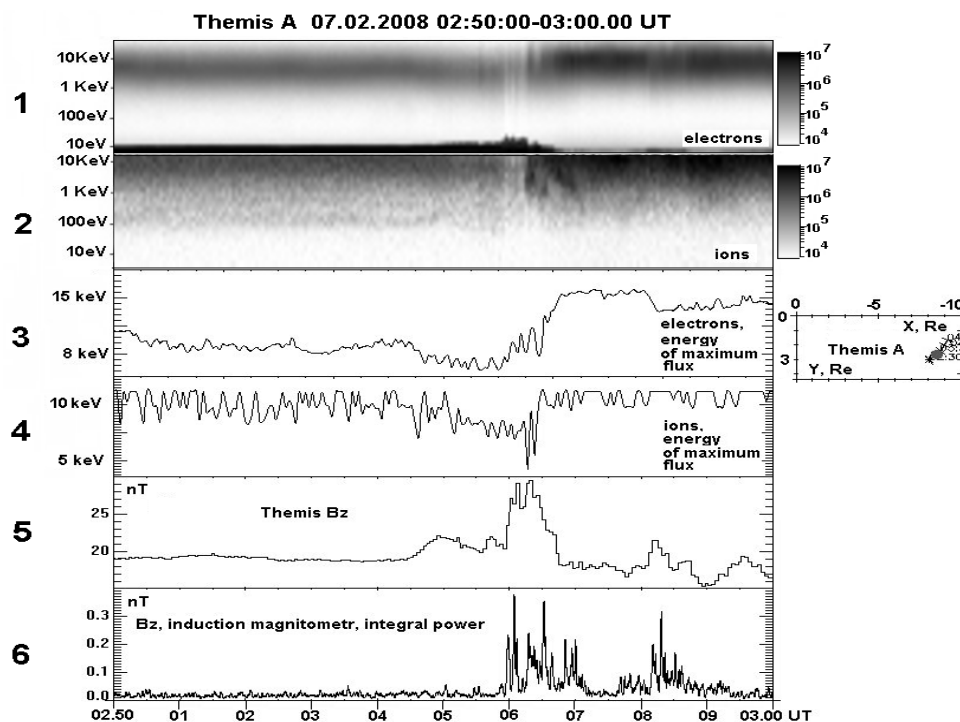


Рис.3. Пример быстрого и синхронного ускорения электронов и ионов на фронте волны диполяризации. Вариации магнитного поля (5,6) опережают рост потоков частиц.

Происходит быстрый разрыв тока поперек хвоста и превращение его в продольный ток, замыкающийся через ионосферу. Процесс расширяется в виде волны диполяризации. Нарастание продольного тока вызывает развитие аномального сопротивления в ионосфере и ускорение ионосферных электронов, наблюдаются яркие лучистые сияния брейкапа [8]. Ускоренные на фронте волны диполяризации электроны вызывают расширяющиеся к югу пульсирующие сияния. Через 5-10 минут после брейкапа в удаленном хвосте, возможно, происходит импульсное пересоединение, ускоряющее частицы до 300-500 кэВ.

Авторы благодарят сотрудников ПГИ за проведение телевизионных наблюдений в обсерваториях Ловозеро и Лопарская. Данные THEMIS взяты с сайта базы данных CDAWeb, data providers V. Angelopoulos, C.W. Carlson, McFadden, and E. Donovan.

Работа поддержана РФФИ, гранты 09-05-00818 и 10-05-00247, Программой № VI.15 отделения физических наук РАН “Плазменные процессы в солнечной системе”, а также частично грантами NORUSKA 2 of the Research Council of Norway и Nordauropt 2 of the Nordic Council of Ministers.

Список литературы

1. Naiguo Lin et.al. //Statistical study of substorm timing sequence //Jornal of Geophysical Research, Vol. 114, A12204, 12 PP., 2009, doi:10.1029/2009JA014381.
2. R.E. Ergun et.al// Observations of Double Layers in Earth's Plasma Sheet// Phys. Rev. Lett. 102, 155002 (2009).
3. J. Liu, V. Angelopoulos, H. Frey // THEMIS observation of a substorm event on 04:35, 22 February 2008// Ann. Geophys., 27, 1831-1841, 2009 doi:10.5194/angeo-27-1831-2009
4. V. Angelopoulos et al, //Tail Reconnection Triggering Substorm Onset// Science 15 August 2008: Vol. 321 no. 5891 pp. 931-935 DOI: 10.1126/science.1160495
5. A.T.Y. Lui //Comment on “Tail Reconnection Triggering Substorm Onset”//Science 12 June 2009: Vol. 324 no. 5933 p. 1391 DOI: 10.1126/science.1167726
6. Kornilova T.A., Kornilov I.A. //Fine structure of breakup development inferred from satellite and ground-based observations. //Ann. Geophys. 2008. Vol. 26. P. 1141-1148.
7. I. A. Kornilov //Localization of the source of precipitating electrons in active arcs during breakup and in pulsating auroras. // Geomagnetism and Aeronomy, 2009, Vol. 49, No. 3, pp. 347–352. Pleiades Publishing, Ltd., 2009.
8. Lazutin, L.L. //X-ray emission of auroral electrons and magnetospheric dynamics//Physics and Chemistry in Space, v.14, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, (1986).