

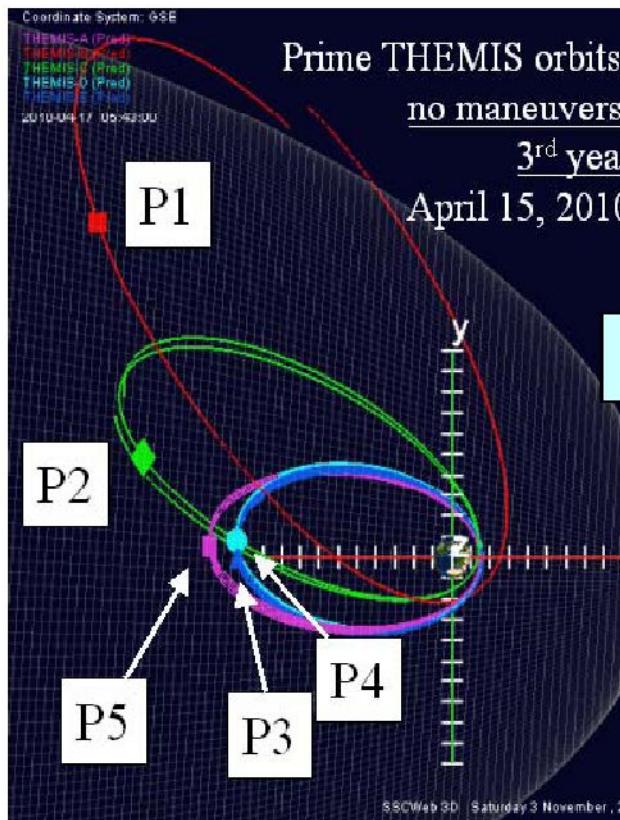
СВОДКА НЕДАВНИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИПОЛИЗАЦИЙ И ИНЖЕКЦИЙ ПЛАЗМЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ В ПРОЕКТЕ THEMIS

В. Сергеев , С. Дубягин, М. Кубышкина, С. Апатенков
(СПбГУ), В. Ангелопоулос , А. Рунов (UCLA),
Е. Панов (IWF, Graz)





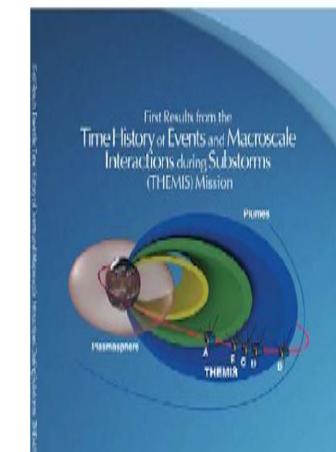
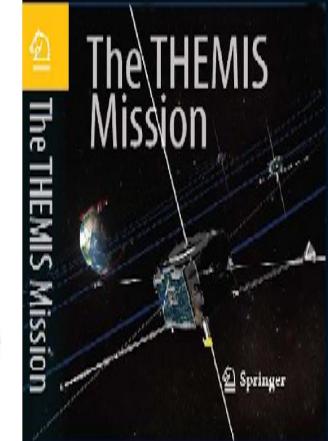
• THEMIS = T



THEMIS Mission Status



J. Burch
V. Angelopoulos
Editors
Burch & Angelopoulos, Eds.



- All instruments functioning nominally
 - Cross calibration, inter-calibration performed during coast-phase
- Team discoveries are changing the field, excite the public
 - Science discoveries piling up
 - >100 papers in refereed journals
 - GRL special issue on THEMIS, on Coast Phase
 - JGR special issue on THEMIS First Results
 - ICS10 meeting coming up – special issue in JGR (THEMIS-centric)
 - Data collected per plan, and widely disseminated
 - First tail season showed thinner tail than expected
 - Preliminary results published; adjusted 2nd tail season orbit
 - Second tail season results are a resounding success
 - More than a dozen substorms collected: unique features on quiet time substorms
- Mission completion on time, on budget by September 2009
- Constellation available in good health for extended mission: FY10-12
- Extended Phase Approved in Senior Review (Jun 09) thru Sep 2012
 - THEMIS and ARTEMIS comprise the THEMIS Extended Phase
 - Instruments checked out especially for low field conditions
 - THEMIS extended phase planning has started
 - Clustered configuration, unique at inner magnetosphere; at 3000-100km
 - Preparing the ground for MMS that will revisit the region in 2015-2017
 - ARTEMIS technical implementation going very well

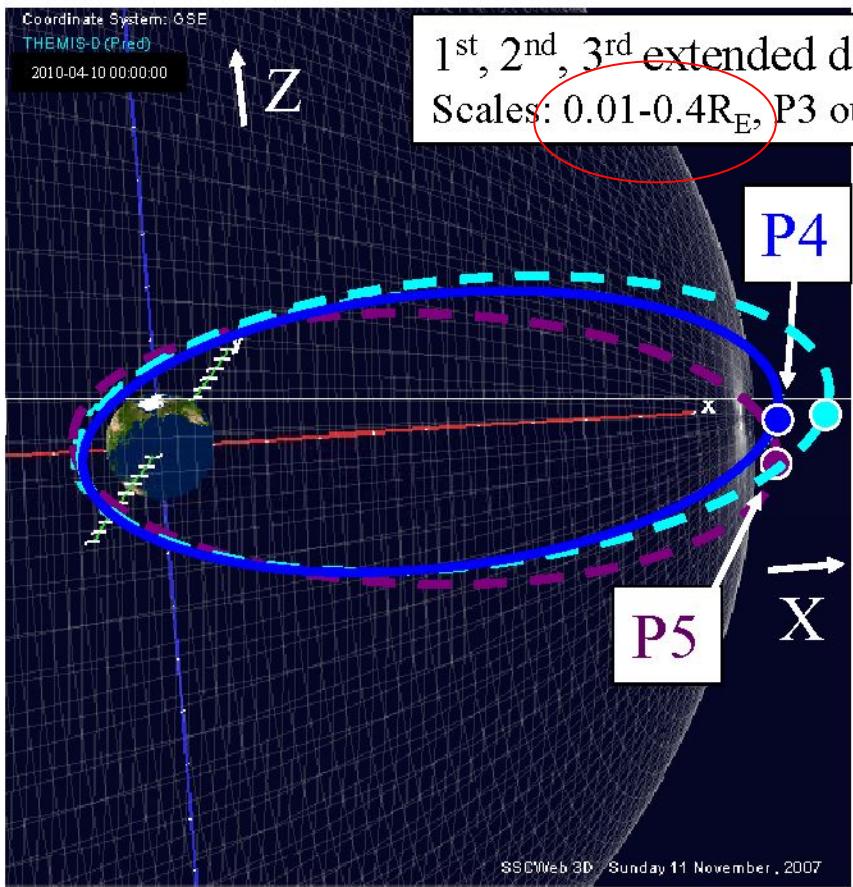


P3,4,5 dayside scenario

$\Sigma \gamma \nu \tau \phi \chi \alpha \nu \tau \chi \alpha \pi \alpha \beta \nu \lambda$

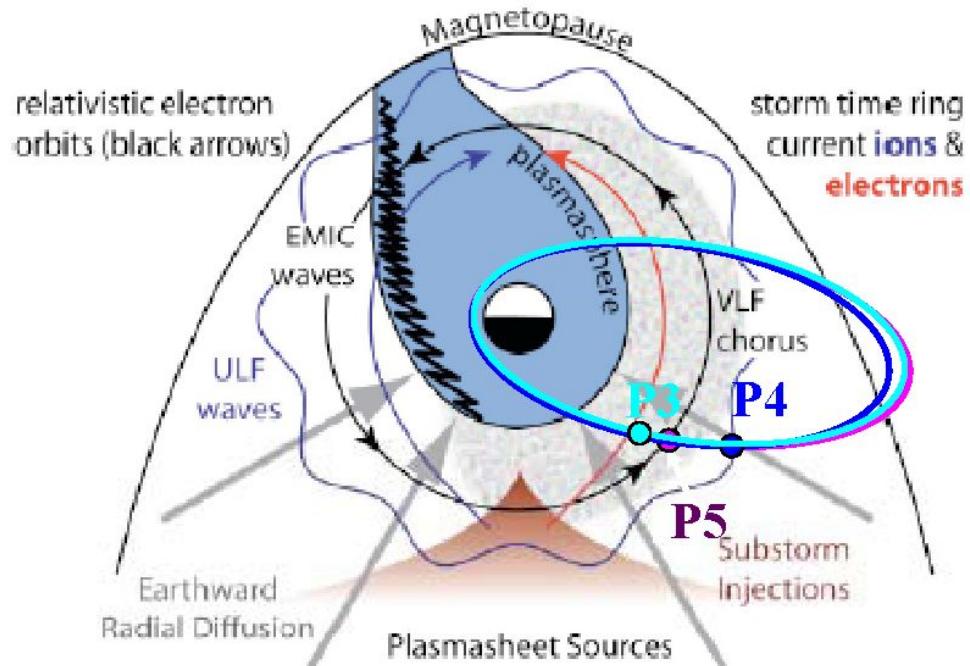
Probes P3,4,5 in an Rθ plane, never achieved before

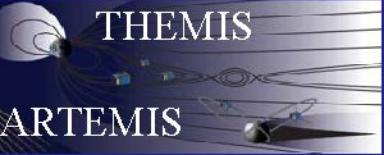
- Magnetopause and field aligned currents under study
- Bracket reconnection site, measure inflow and outflow



Extended THEMIS (E-THEMIS)

- At Inner Magnetosphere, Study Role of:
 - ULF/VLF/EMIC waves on ion, electron energization/losses
 - Large electric fields on storm time ring current
- Result:
 - Comprehensive AC waves and E-fields models

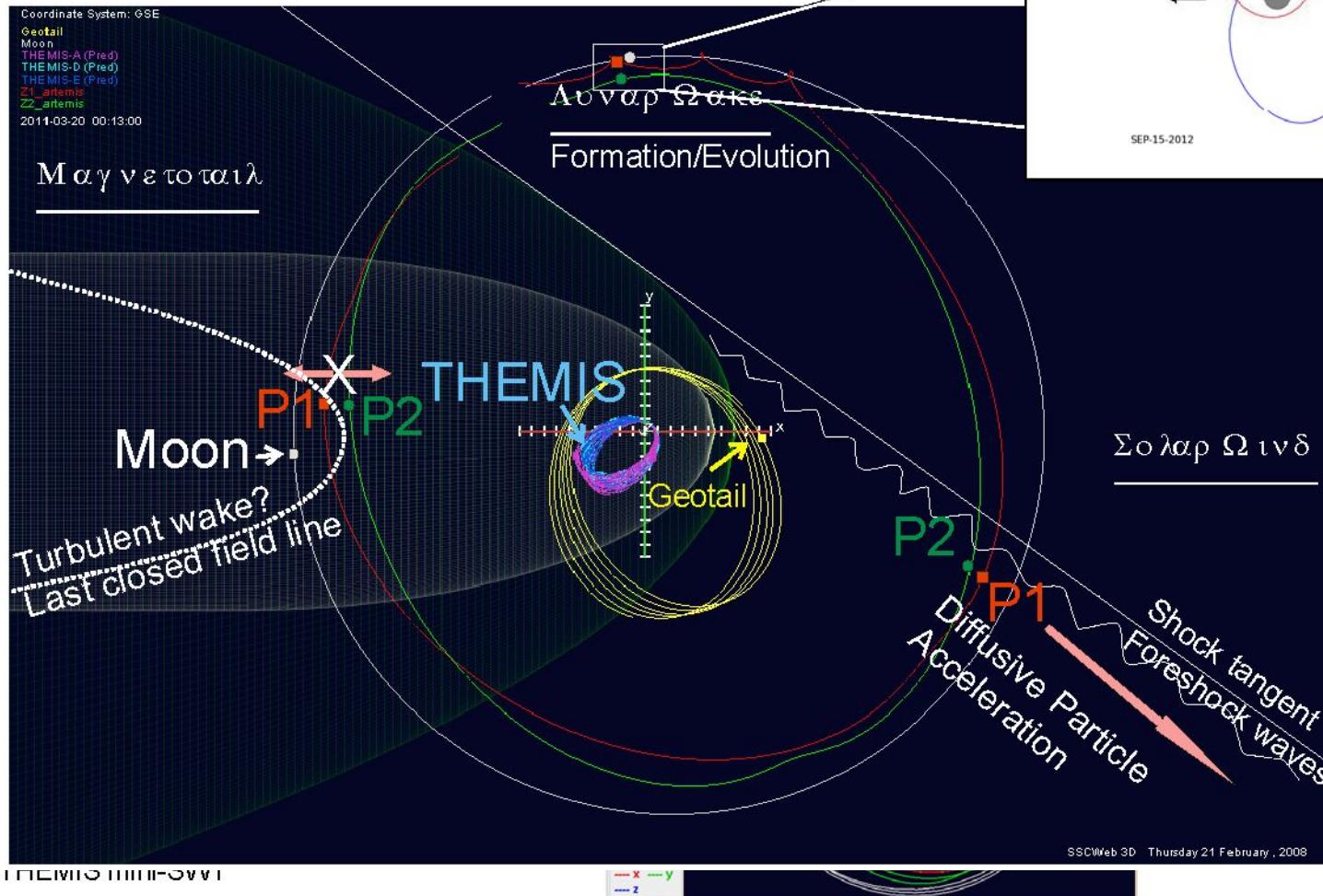




ARTEMIS (P1,P2) in FY10,11,12: Mission Concept



FY10: Translunar injection
FY11-12: 6mo in Lissajous orbits +
17 mo in Lunar orbits

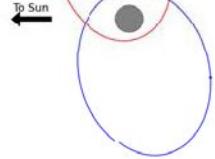


e
12)

τα λ

.ο ν

ε τε ρ σπ α %



SEP-15-2012

19, 2009

ИКИ, 10.02.2010

ДИПОЛИЗАЦИИ И ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ



Струйные
транзиентные
потоки (BBF) :

Принципиальные
вопросы

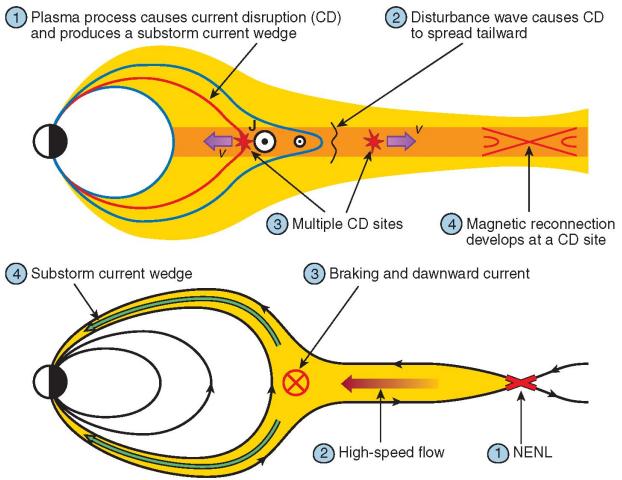
Турбулентность или
структуры?

Характеристики
фронтов?

Торможение во
внутренней
магнитосфере?

Энтропия
инжектированной
плазмы?

BBF и начало взрывной
фазы суббури



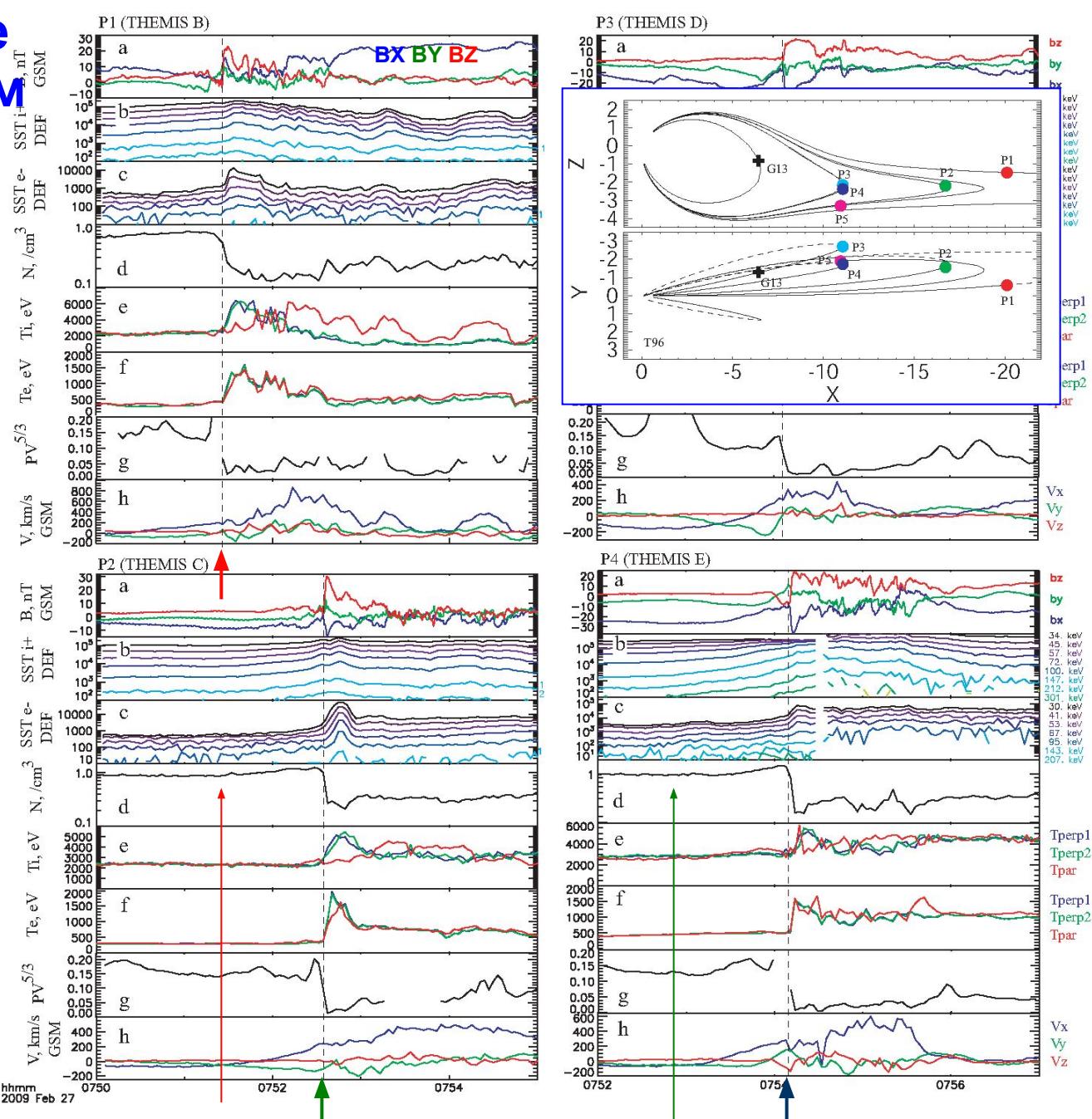
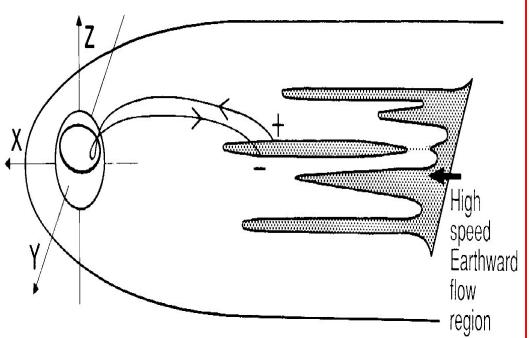
Темы сообщения

1. Распространение BBF в плазменном слое с сохранением структуры, торможение во внутренней магнитосфере
2. Кинетическая структура фронта инжекции
3. Термодинамические характеристики BBF
4. Последовательность/механизм начала ВФ суббури/аврорального брейкапа Пересоединение
 BBF авроральный брейкап

Распространение BVF в плазменном слое

Runov et al., GRL 2009, L14106;
Planet..Space Sci 2010

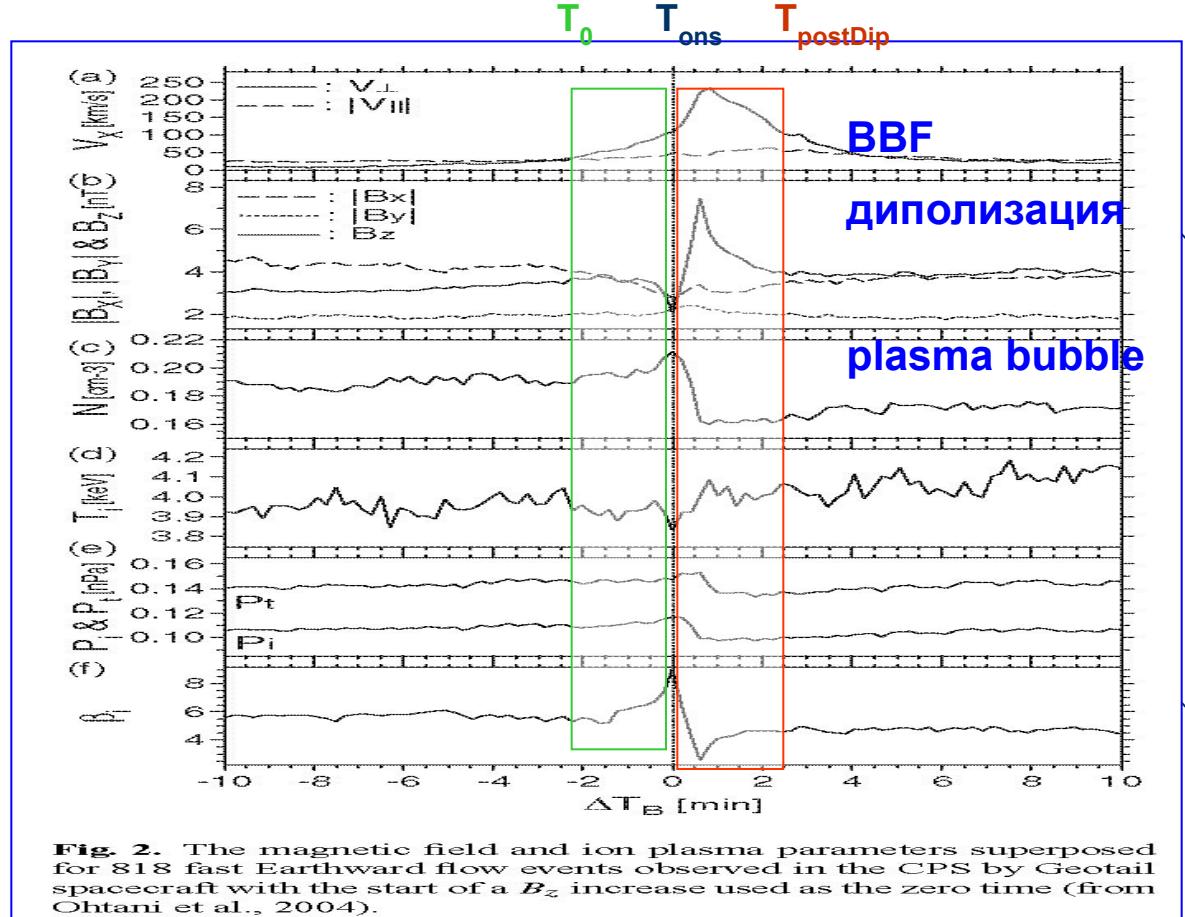
- BVF - индивидуальная среднемасшт. структура, сохраняется на масштабе минут; Э область взаимодействия
- $V_{\text{transp}} \sim V_{\text{xp}}$ (до фронта);
- $\uparrow B_z, T \downarrow N, P, PV^Y$
 \Rightarrow недогруженные трубы (plasma bubbles);
- Тurbулентность внутри BVF;
- $V_x \sim 300 \text{ km/s}$ – V_A ??
 Пересоединение во вложенных ТТС на замкнутых силовых линиях?



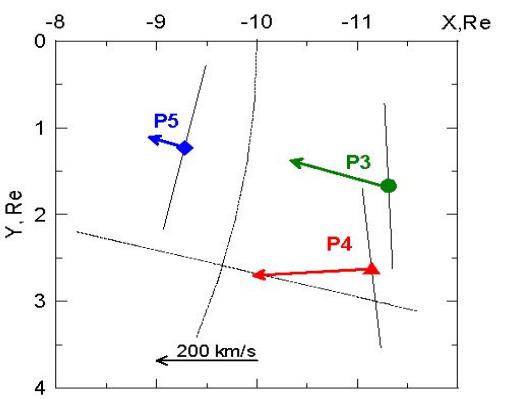
Среднестатистический BBF



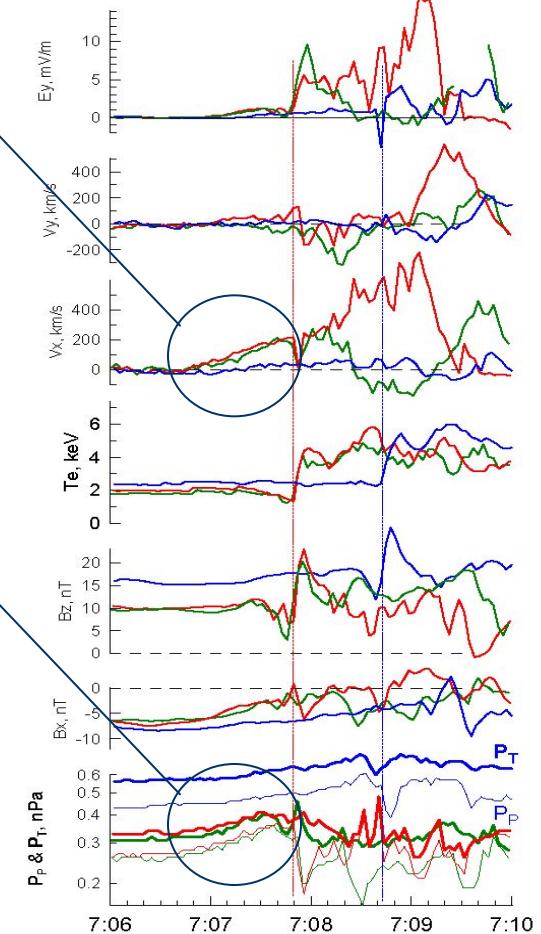
Generic BBF in CPS
 (Ohtani et al, 2004, Geotail 818 CPS events)



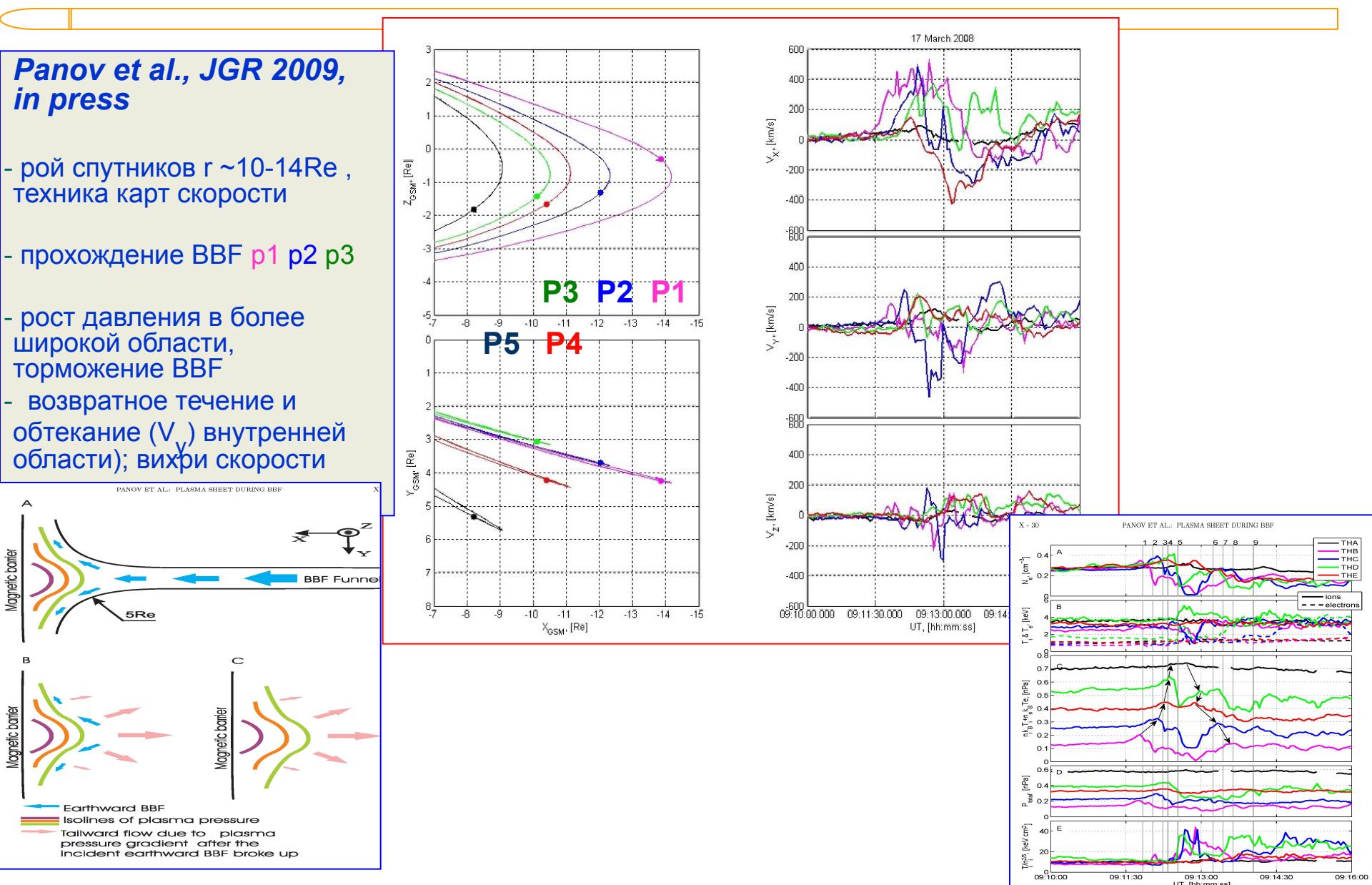
Compression / Dipolarization
 phase



February 23, 2008 Themis P3 & P4 & P5



Торможение BBF



Кинетическая структура фронта инжекции

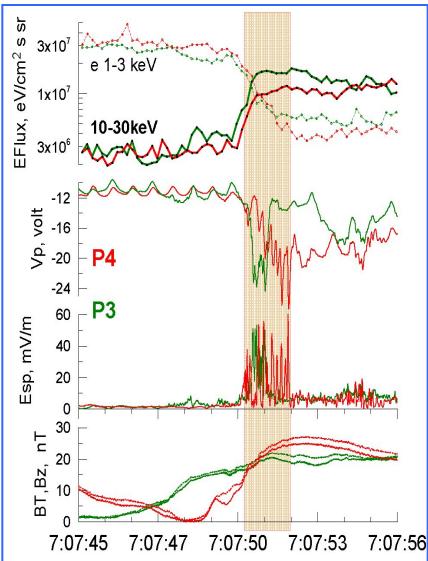
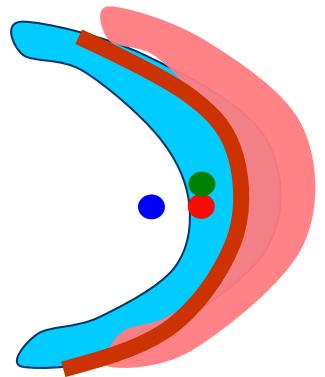


Первое детальное наблюдение границы инжекции (границы ВВФ\диполизации), распространяющейся с торможением на периферии квазидипольной области

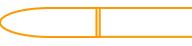
(Sergeev et al., GRL 2009, Zhou et al., GRL 2009)

Themis 3 SC at 9...11Re

- геометрия, масштаб и свойства границы
- микроструктура и волновые явления



Dipolarization Front at spin resolution



Feb.23,2008 event f : Sharp Dipolarization Front (SDF)

✓ Time delay P3,P4□P5 dt=53sec,
Earthward propagation $Vx \sim 220 \text{ km/s}$ from $11.3 \text{ Re} \square 9.5 \text{ Re}$

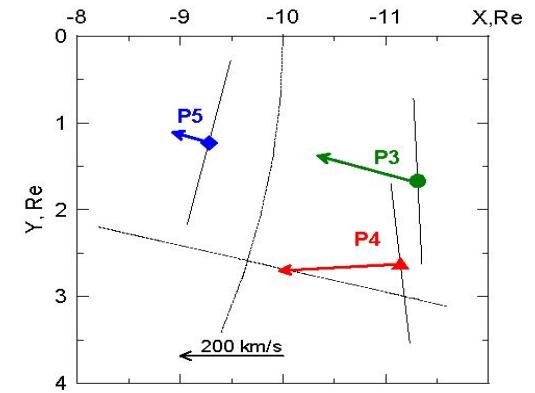
✓ Prior to SDF $Vix \sim 200 \text{ km/s}$ at P3, P4, $Vix \sim 70 \text{ km/s}$ at P5 ,
propagation with plasma, □ flow braking

✓ MVA normals

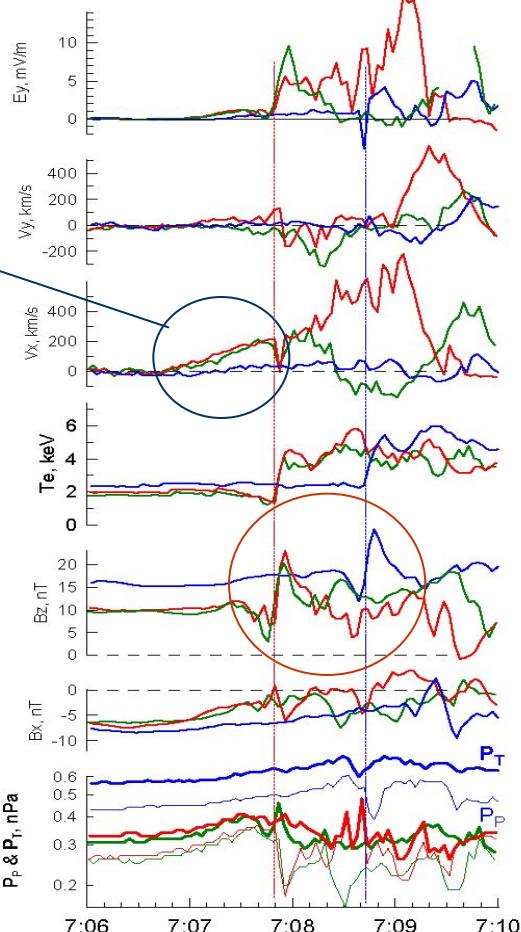
| SC | $\lambda 2/\lambda 3$ | N | N3 | R |
|----|-----------------------|----|--------------------|------------------------|
| P3 | 28.77 | 28 | [0.95; 0.04; 0.30] | [-11.3; 1.7; -2.7] gsm |
| P4 | 32.02 | 16 | [0.93; 0.09; 0.34] | [-11.1; 2.6; -2.8] gsm |
| P5 | 7.49 | 16 | [0.94;-0.21; 0.24] | [-9.3 ; 1.3; -2.6] gsm |

✓ SDF duration (peak-to-peak Bz increase) $\sim 4 \text{ sec}$ at P4, P5, $\sim 7 \text{ sec}$ at P3. Front thickness $220 \text{ km/s} * 4 \text{ sec} = < 880 \text{ km}$

gyroradius $Wi = 7 \text{ keV}$ in $Bz = 20 \text{ nT}$ $r_{cp} = 600 \text{ km}$
inertial length for $n = 0.3 \text{ cm}^{-3}$ $lpi = 420 \text{ km}$



February 23, 2008 Themis P3 & P4 & P5



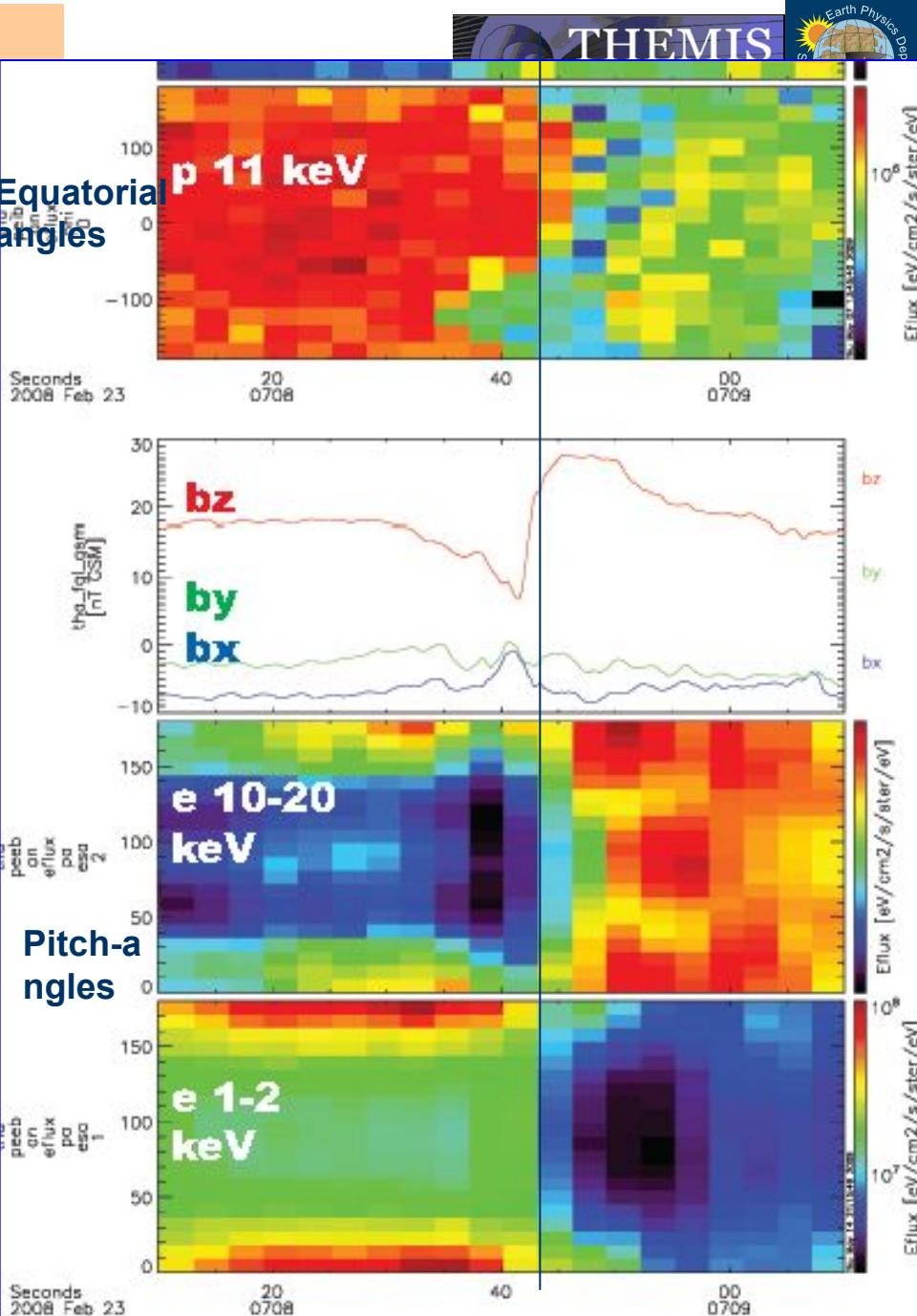
✓ **SDF = Thin (gyro-scale) vertical current sheet !**

SDF – particle features

Spacecraft P5 (9.3Re) :

Sudden change of particle distributions at Sharp Dipolarization Front (in one spin)

- ✓ energization of both p, e
- ✓ electrons: field-aligned bi-directional before SDF (at P3,P4,P5) ,
- ✓ stay bi-directional at P3,P4, at P5 change to pancake (energetic) + bidirectional (low energies) after SDF

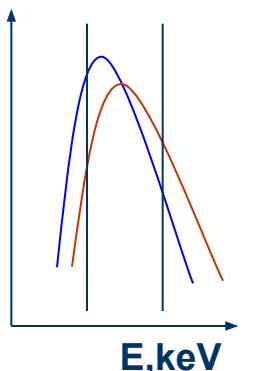
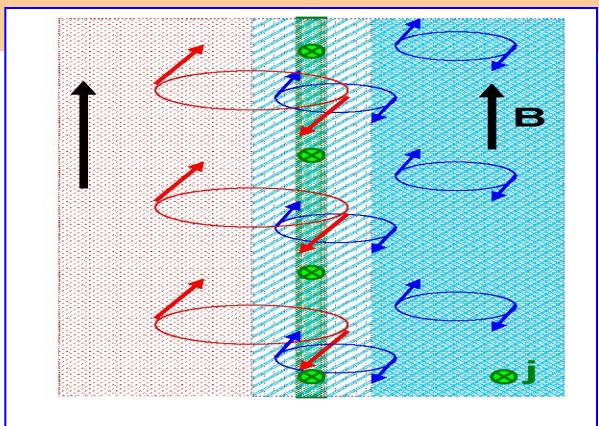


Ion (finite gyroradius) pattern at SDF

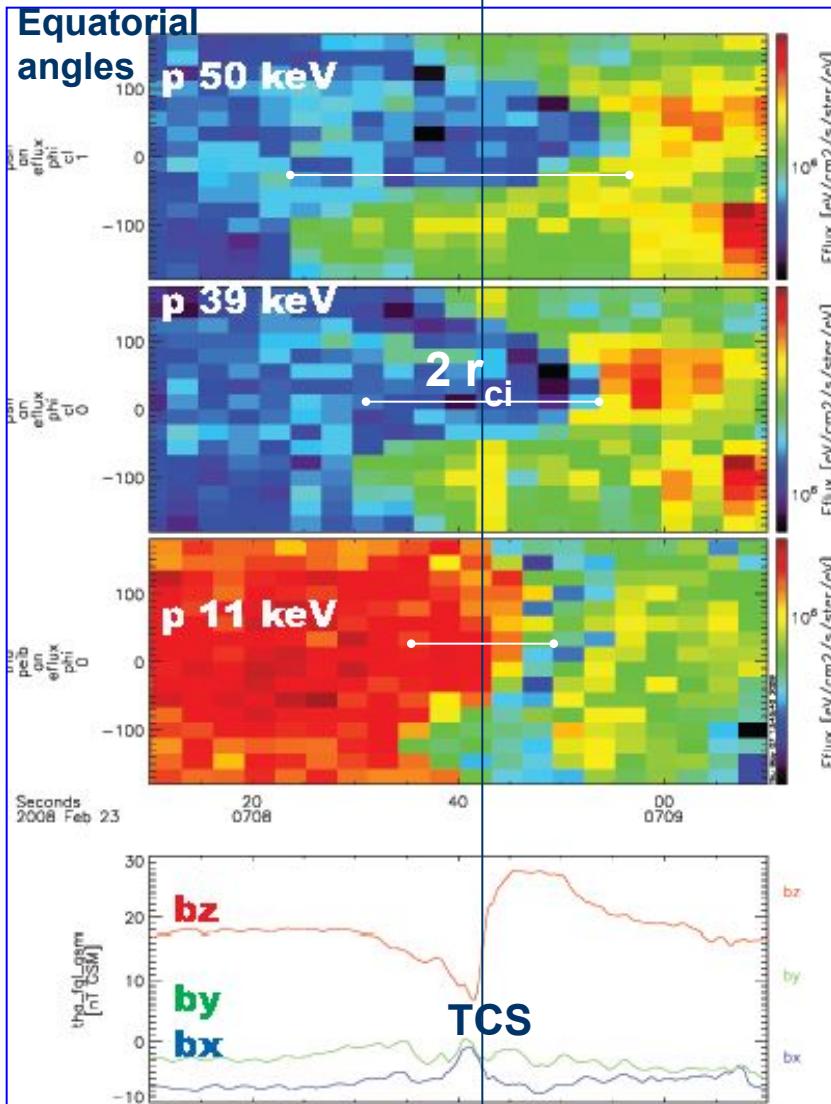


Spacecraft P5 (9.3Re) :

- ✓ Sharp temperature boundary
- ✓ protons (looking $\sim \perp B$) : nice Zigzag pattern with complementary patterns at high/low energies; size $\sim W_p^{1/2}$ - finite gyroradius effect of sharp temperature boundary co-located with TCS
- ✓ Remote sensing of Earthward-moving temperature boundary: $Vx \sim 2r_{ci} / \Delta t \sim 2*760\text{km}/15\text{s} \sim 100\text{km/s}$
-consistent with ion velocity $Vx \sim 80\text{km/s}$ (measured in front of SDF).



Cold /dense Energetic /low-density



Zoom of TCS and energization boundary (within 1 spin timescale)



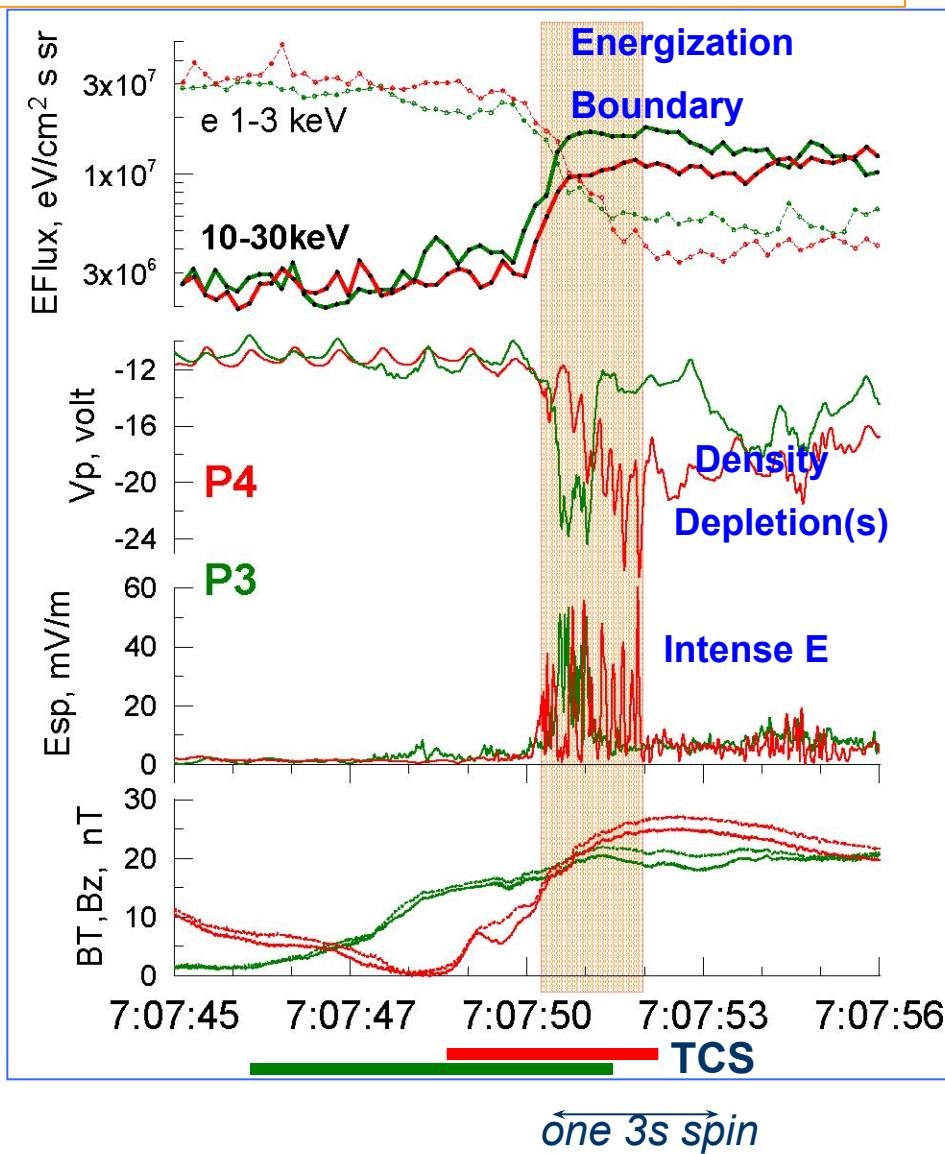
1

Substructure of the thin current sheet :

2 outer Themis spacecraft

- ✓ Electrons take ~2sec for complete replacement cold □ hot population at P3,P4;
- ✓ Deep density depletion (from probe 1,2 potential V_p) colocated with :
- ✓ Very intense E-field ~40-60mV/m in the spin plane (E_{sp}) which have the wave/bursts time scale of 100 msec, about Low Hybrid timescale ($f_{LH} \sim 13\text{Hz}$)

$$f_{LH}^2 = f_{pi}^2 f_{ce}^2 (f_{pe}^2 + f_{ce}^2)^{-1}$$

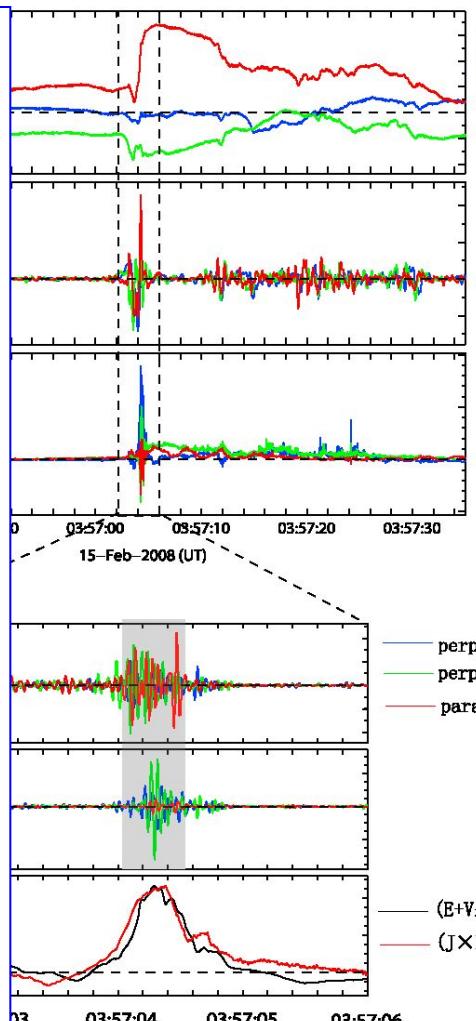
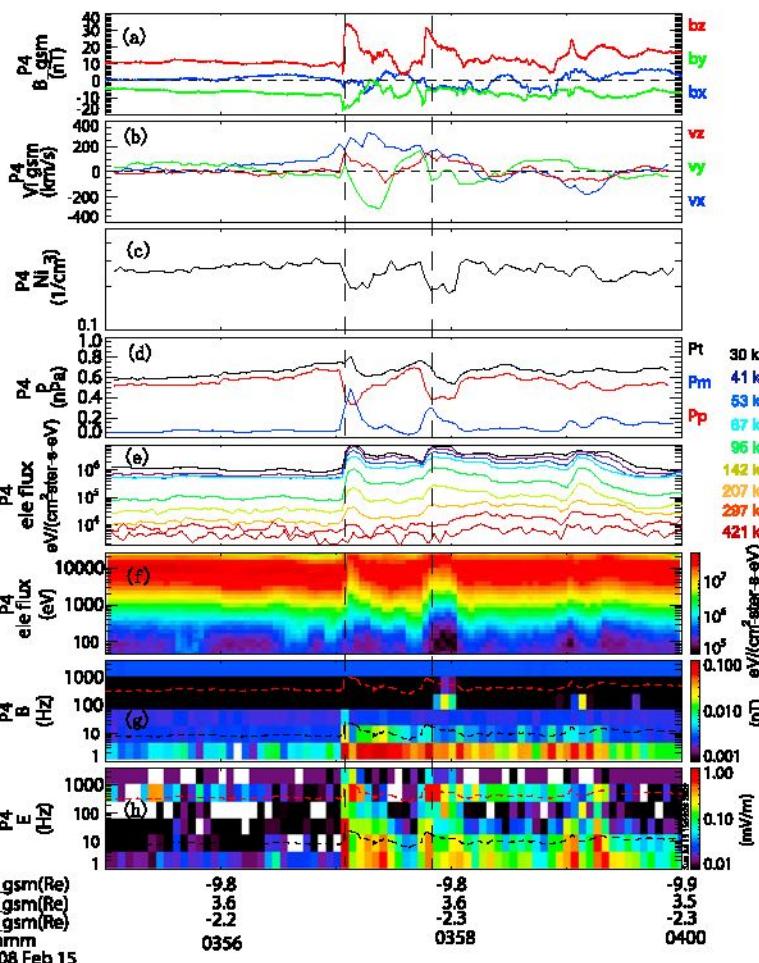


Свойства фронта диполизации



ZHOU ET AL.: WAVES OF DIPOLARIZATION FRONT

ZHOU ET AL.: WAVES OF DIPOLARIZATION FRONT



of THEMIS P4 observations between 03:55 and 04:00 UT. From the top are (a) field around the first dipolarization observed by THEMIS, (b) magnetic field waveform in the GSM coordinate system, (c) ion density, (d) thermal (red), magnetic (black) and (e) electron differential energy flux from the SST and ESA instruments, respectively, (f) and (g) the expanded waveform between 03:55 and 04:00 UT, (h) and (i) the magnetic and electric field fluctuations between 1 and 4000 Hz. Black and red dashed lines are transformed into the field aligned coordinate system. Dashed vertical lines indicate the times when the two waves discussed in this section occurred. Black line shows the observed electric field in the field aligned coordinate system. Figures 2b, 2c, and 2d were calculated combining both ESA and SST instruments.

Zhou et al., GRL 2009

-Холловское Е на
фронте
(~обобщ. з-н Ома)

- Интенсивная
волновая активность,
от LH волн до
ECH волн за
фронтом

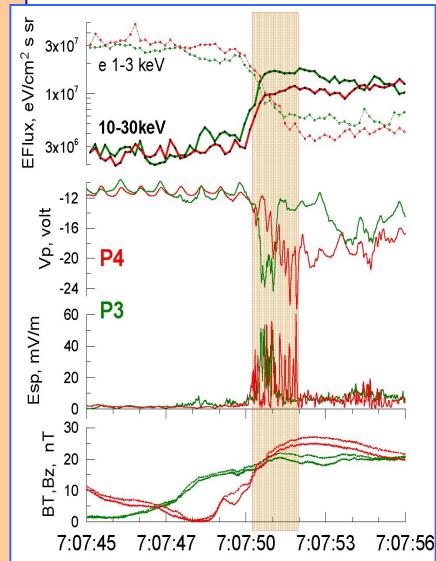
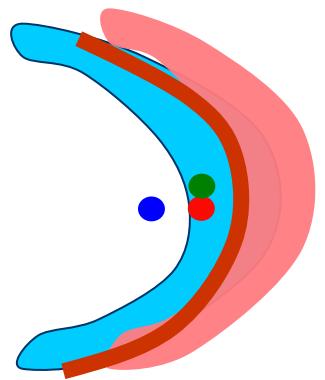
Кинетическая структура фронта инжекции



Первые детальное наблюдения границы инжекции (границы BBF) на периферии квазидипольной области

Themis 3 SC at 9...11Re

- Фронт диполизации на экваторе – перемещающаяся с плазмой долгоживущая (минуты) пространственная граница: вертикальный токовый слой толщиной ~1-2 ионного микромасштаба, -- TD ?
- совпадает с тонкой температурной границей (толщиной ~400 км) двух плазм (p,e), фоновой (cold/dense) и инжектированной (горячая разреженная плазма, plasma bubble)
- интенсивные E-всплески в кавернах плотности LH масштаба на температурной границе (сходство с LHCavities),
- Следствие резкой температурной границы? Роль в ускорении частиц?
- прочие волны ...



ДИПОЛИЗАЦИИ И ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ



Струйные
транзиентные
потоки (BBF) :

Принципиальные
вопросы

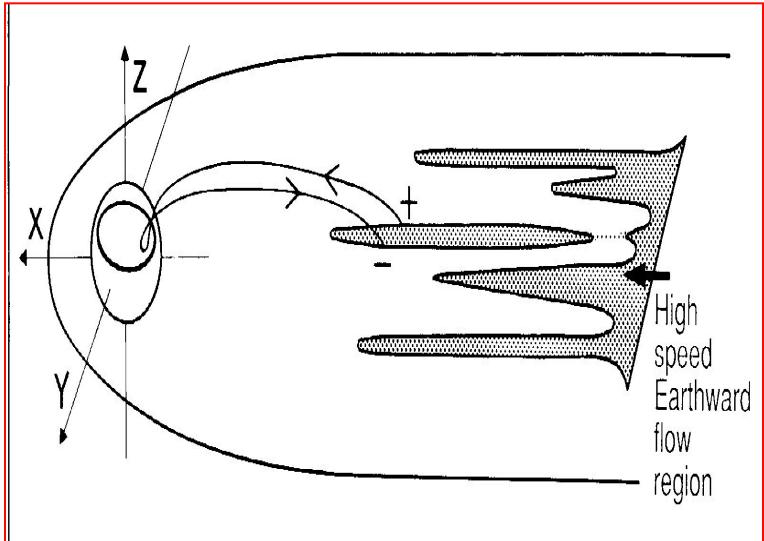
Турбулентность или
структуры?

Торможение во
внутренней
магнитосфере?

Энтропия
инжектированной
плазмы?

Характеристики
фронтов?

BBF и начало взрывной
фазы суббури



Природа (движения) во внутреннюю магнитосферу?

Термодинамические характеристики плазмы BBF
(доклад С. Дубягина)

BBF и начало взрывной фазы суббури

Струйные транзиентные потоки (BBF) :

Принципиальные вопросы

Турбулентность или структуры?

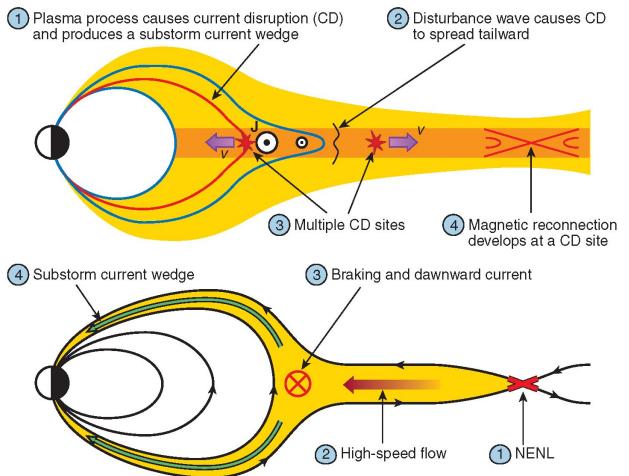
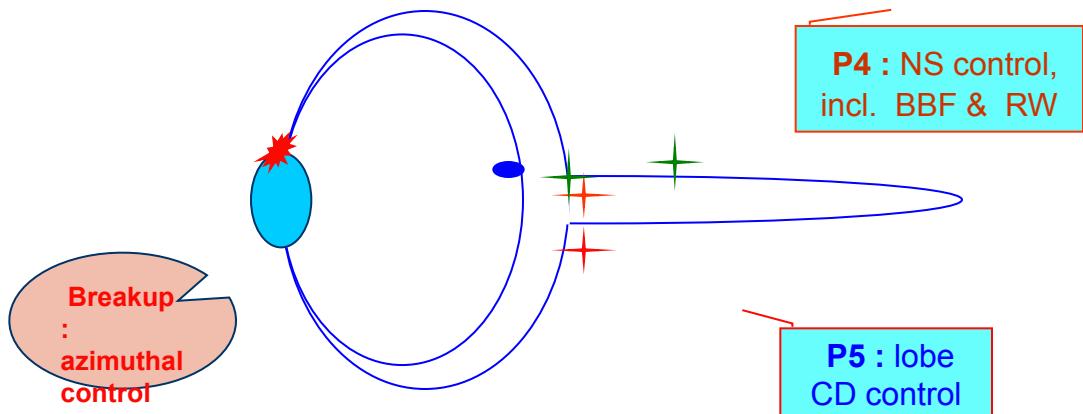
Характеристики фронтов?

Торможение во внутренней магнитосфере?

Энтропия инжектированной плазмы?

BBF и начало взрывной фазы суббури

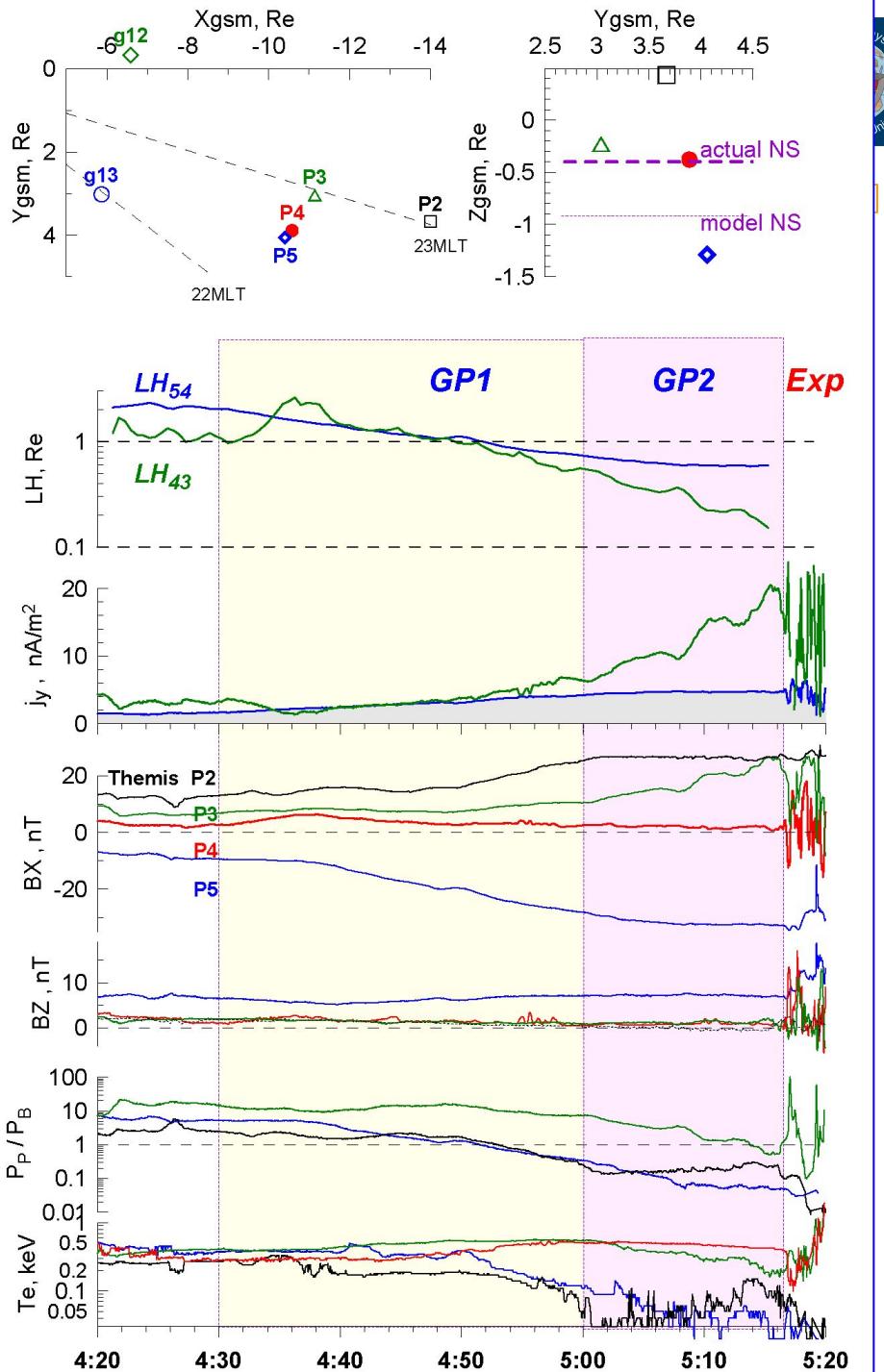
Minimal Ideal Coverage



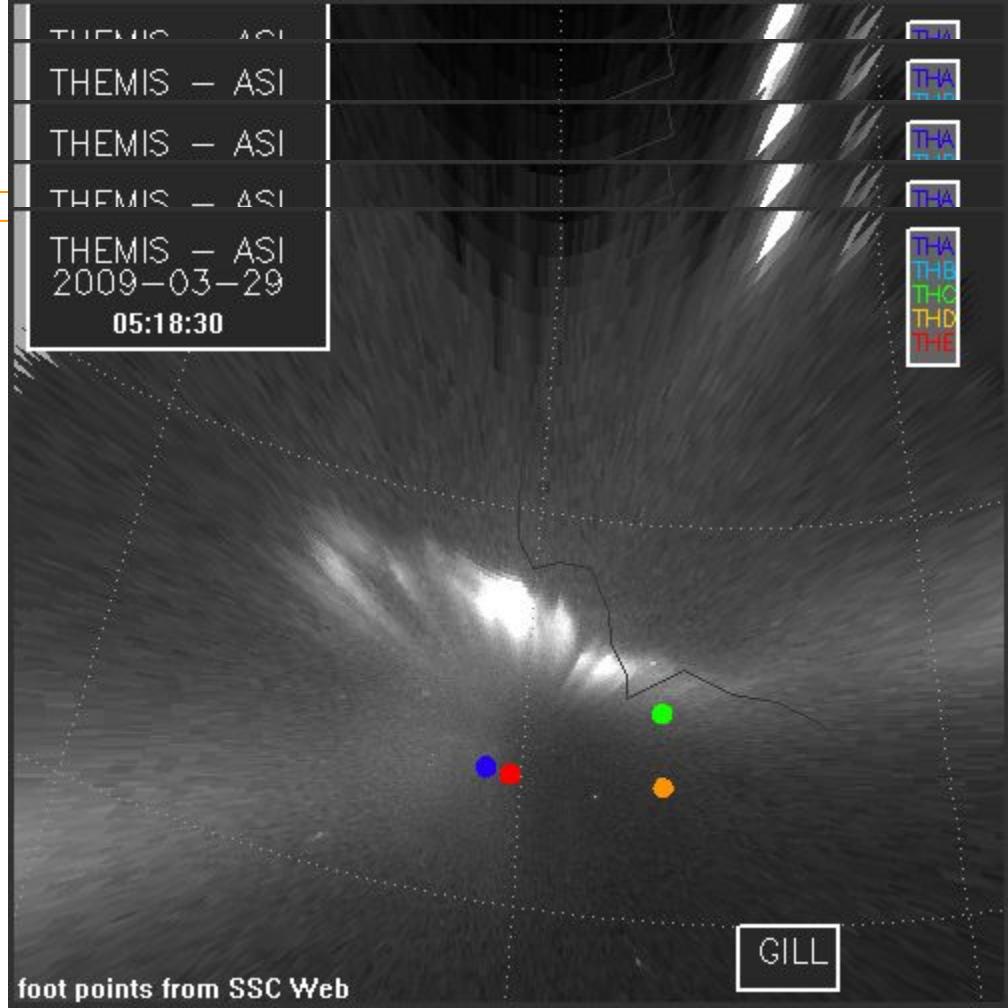
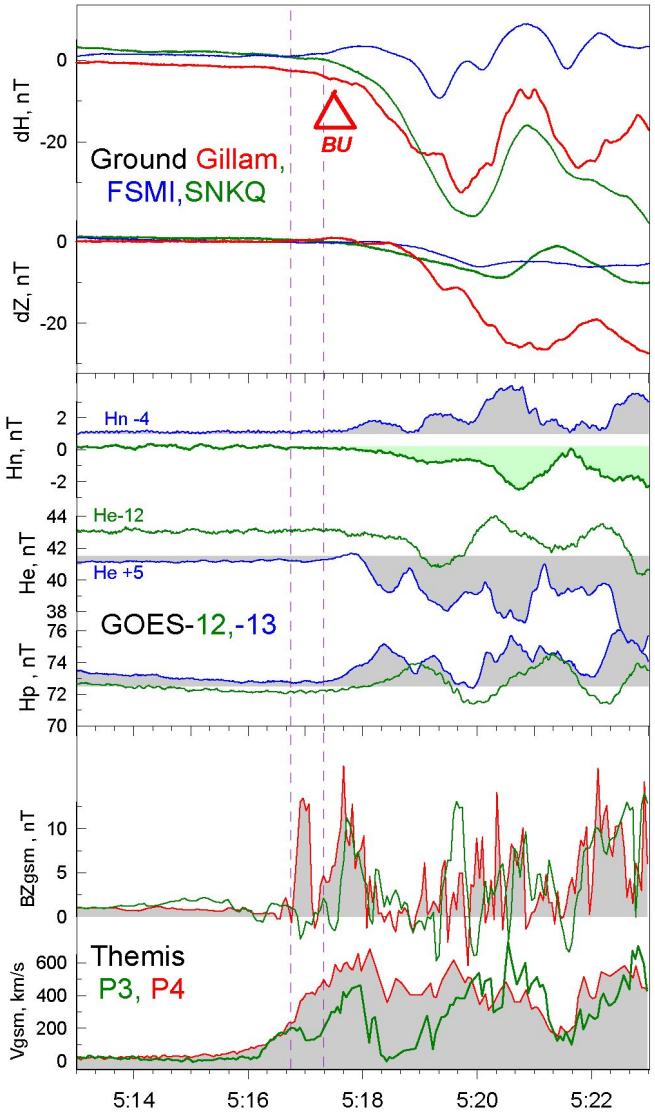
BBF и начало взрывной фазы суббури



- Идеальная конфигурация SC
- Предв. фаза: GP1(30мин) рост тока + утоньшение ПС; $|B|, B_z < 2 \text{nT}$ на 11 Re !
- GP2 (15мин) –быстрый рост ТТС ($LH \sim 0.15 \text{Re}$), в центре



Начало взрывной фазы



- SC на долготе брейкапа

- задержки:

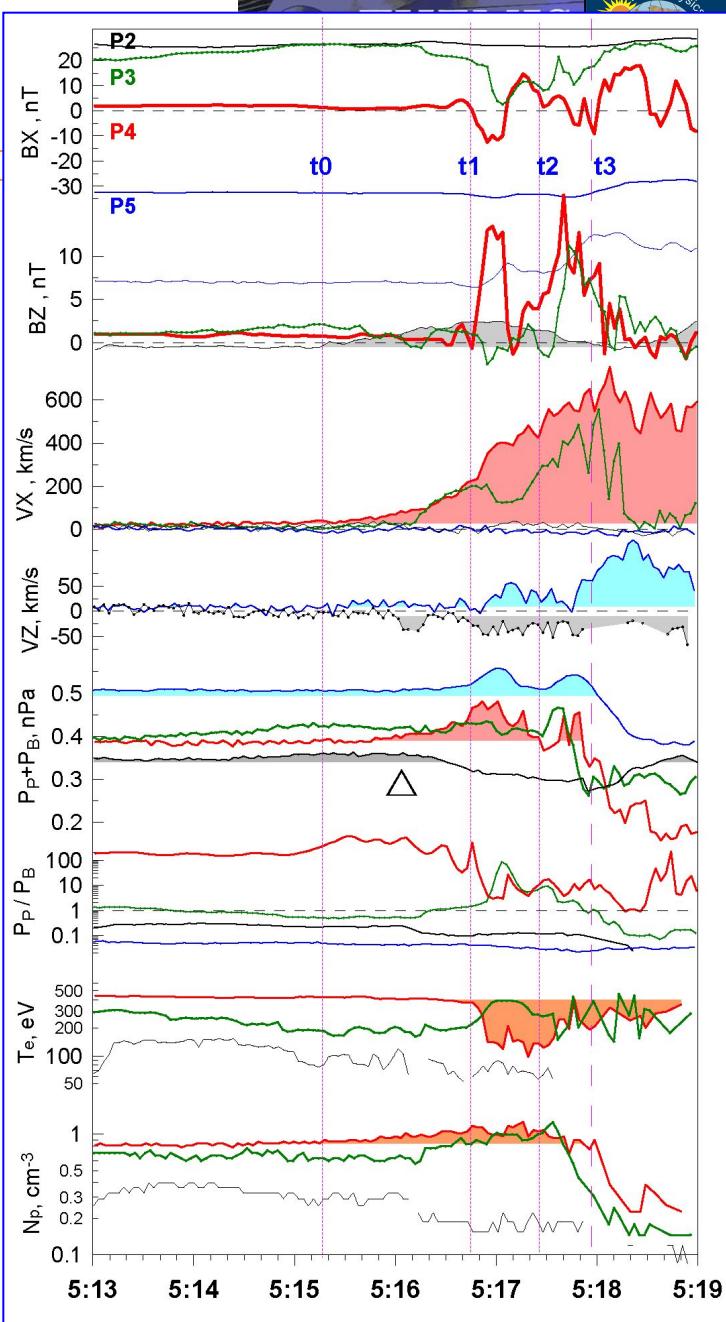
14Re **BBF** 11Re 6.6Re

бре́йка́п+электо́рдже́т

BBF и начало взрывной фазы суббури



- Процесс взрыва установлен в ТТС на $r > 14Re$
 - задержки, проектирование
- Padlock icon Падение T_e за фронтом диполизации (источник плазмы – во внешних трубках ПС),
- Среднемасштабные структуры типов BBF, TCR, CD, NFTE
 - Padlock icon Проявления/отображение одной и той же плазменной структуры, видимой из разных точек наблюдения,
 - Padlock icon Волновые формы вариаций B_x, B_z, E_y, V_z в долях (**P5**) интерпретируются моделью импульсного пересоединения

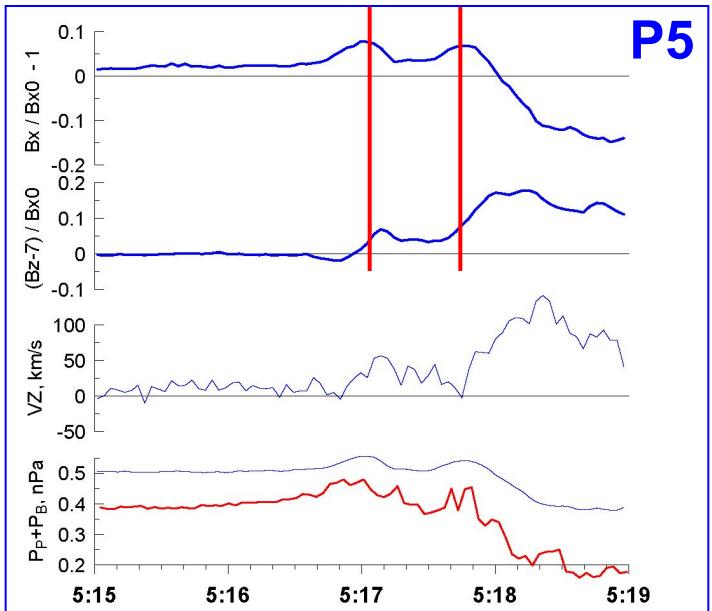
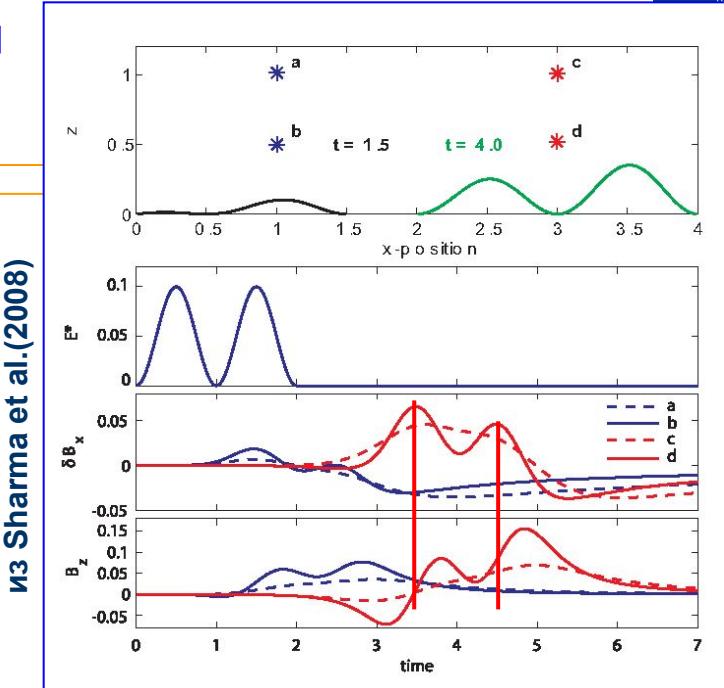


BBF и начало взрывной фазы суббури

- Среднемасштабные структуры типов BBF, TCR, CD, NFTE

➡ Проявления/отображение одной и той же плазменной структуры, видимой из разных точек наблюдения (Z)

➡ Волновые формы вариаций B_x, B_z, E_y, V_z в долях (**P5**) соответствуют прогнозу модели импульсного пересоединения; расстояние до области пересоединения $\sim 5-10 R_E$



В заключение ...



2009 THEMIS :

Струйные транзиентные потоки (BBF)

Турбулентность или структуры?

Характеристики фронтов? TCS/TD/...

Торможение во внутренней магнитосфере?

Энтропия инжектированной плазмы? (bubbles)

BBF и начало взрывной фазы суббури

- Область генерации брейкапа \Leftarrow TCS
- Пересоединение \square BBF \square авроральный брейкап

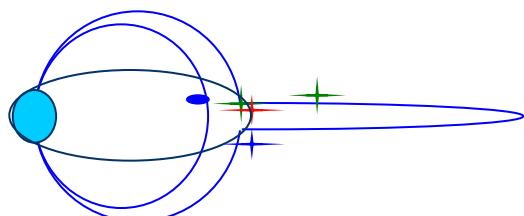
ICS-10

AR/THEMIS

$\Rightarrow 2012 \rightarrow 2016$

РЕЗОНАНС

RBSP /
ORBITALS



Спасибо за внимание !



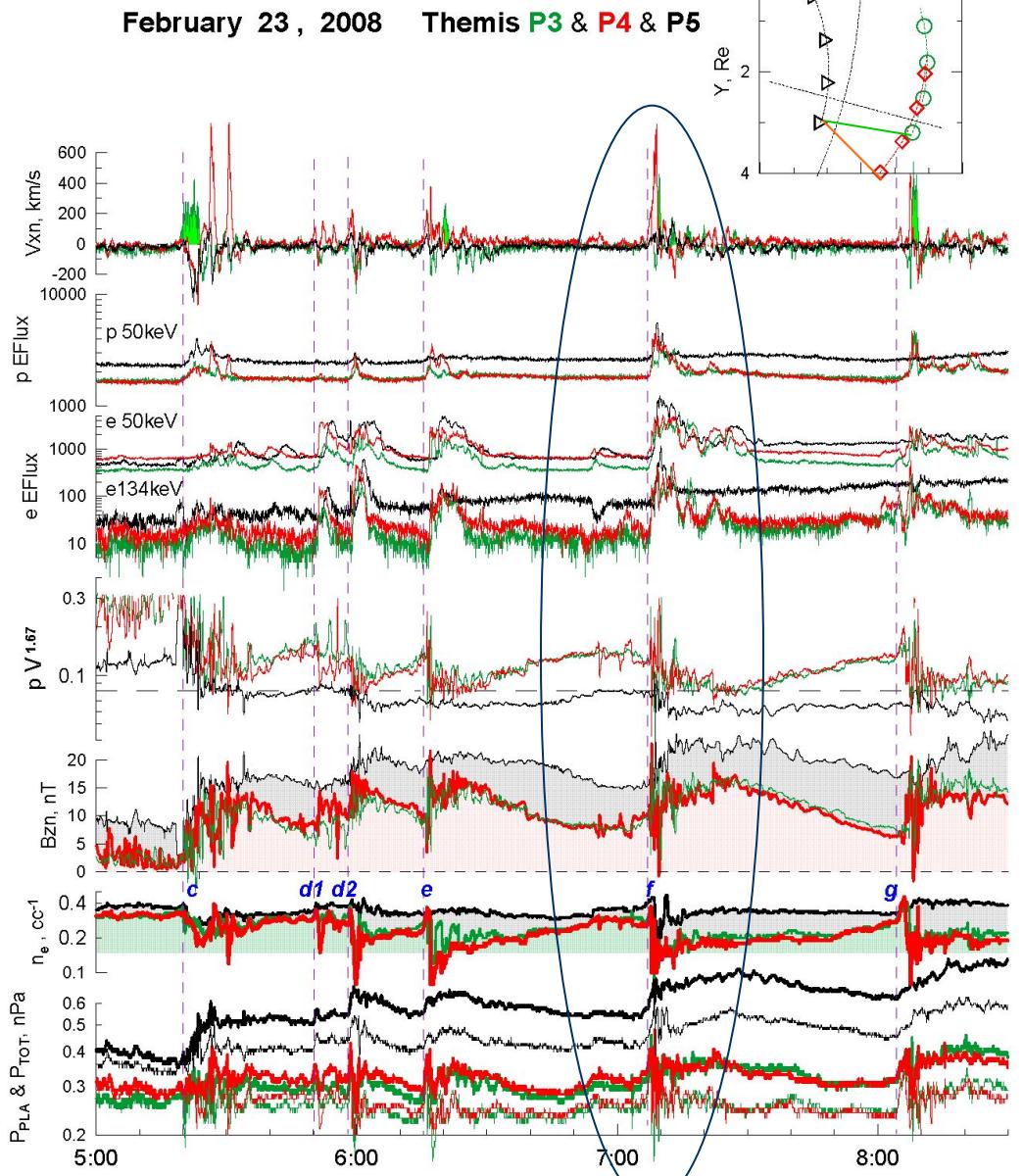
Example of Dipolarizations at the periphery of dipole-like region – general properties

Example of multiple injections:
P3,P4,P5 triangle in XY plane near Neutral Sheet

Steady Earthward ∇P , ∇B : SC are at the periphery of dipole-like region

5 distinct Dipolarizations (DIP),
basic features :

- ✓ **Plasma (and total) pressure** generally **increase** during DIP events; also pressure dropped (for short time) in many cases (bubbles)
- ✓ **Generally density & pV^{γ} decrease** inside DIPs; less pronounced at the inner SC
- ✓ HE particle flux increases at DIP fronts (*dispersionless*)
- ✓ Later - zoom in : event f

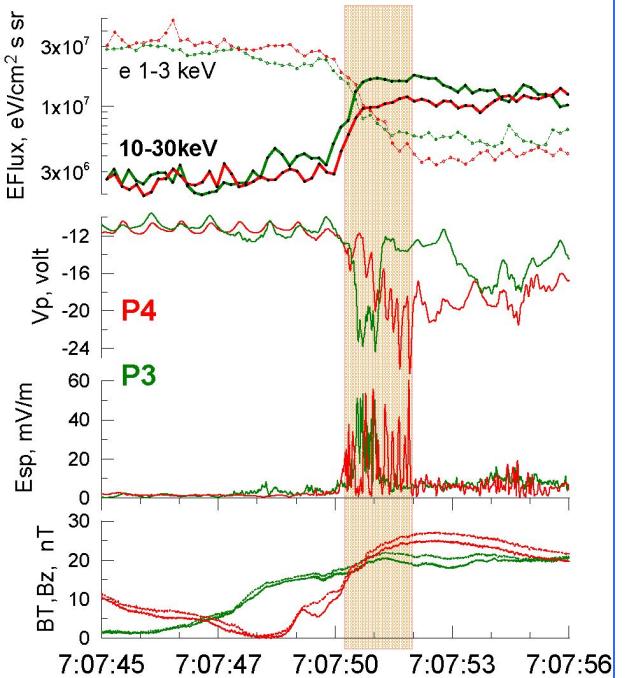
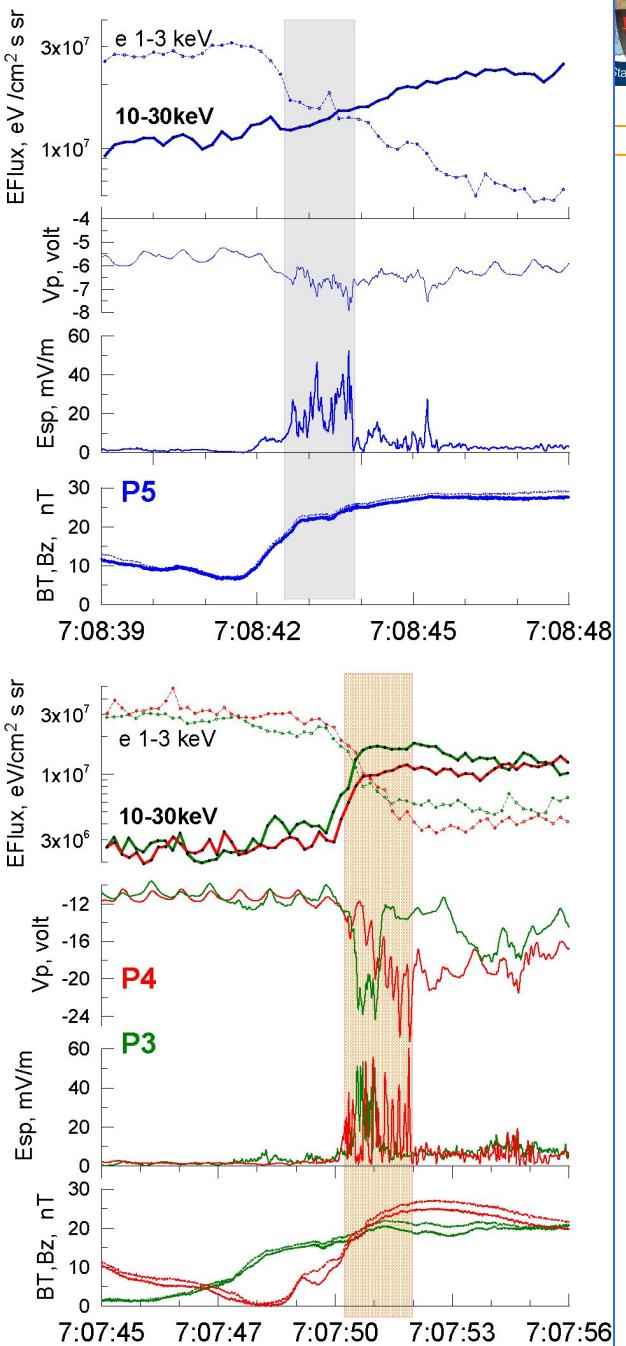


Zoom of TCS and energization boundary (within 1 spin timescale)



Substructure of the thin current sheet :

- ✓ Electrons take ~2sec for complete replacement of population (energization) at P3,P4;
- ✓ Large density depletion (from probe1,2 potential Vp) colocated with :
- ✓ Very intense E-field ~40-60mV/m in the spin plane (Esp) which have the wave/bursts time scale of 100 msec, about Low Hybrid timescale ($f_{LH} \sim 13\text{Hz}$)
- ✓ Nearly same structure in the flow braking region (P5) but with smaller depletion and longer electron energy change:
- ✓ Density depletion + intense LH E-field resemble the (weaker!) LH Cavities previously studied in strong B low-altitude region



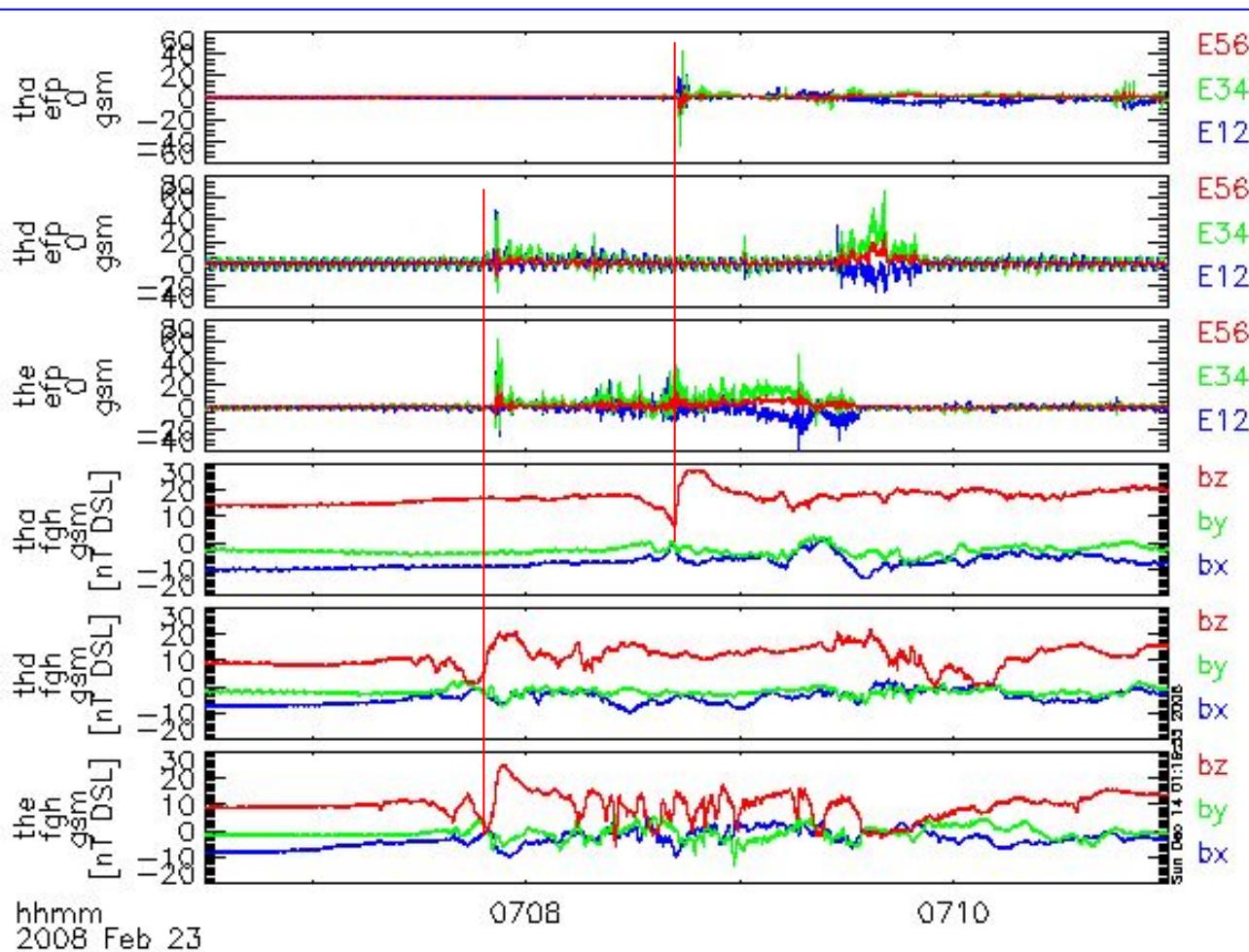
Individual injection – zoom in..



SDF – a thin spatial structure of ~600-900km, here observed near PS equator

At the discontinuity :

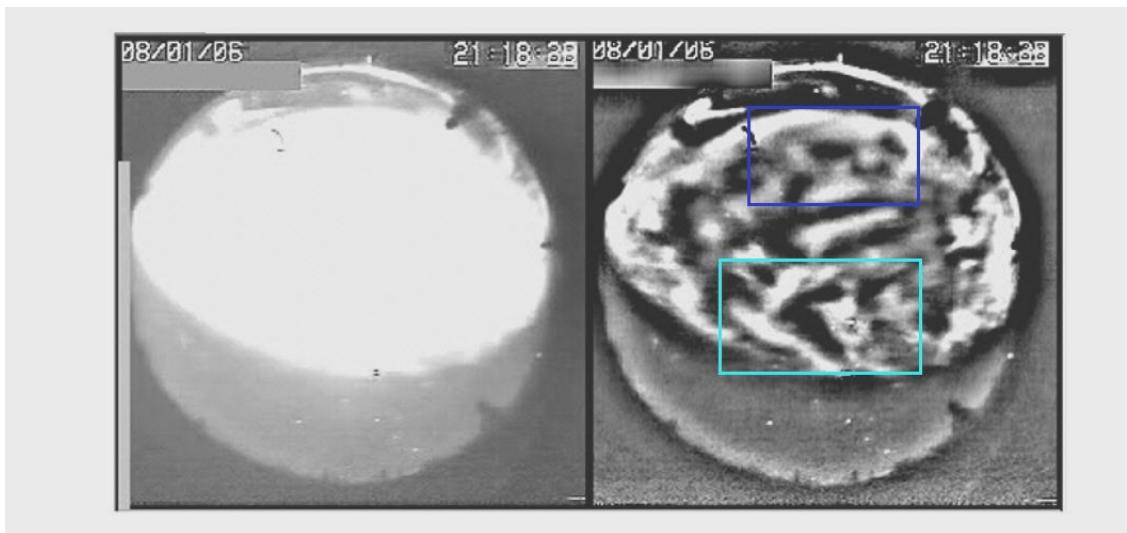
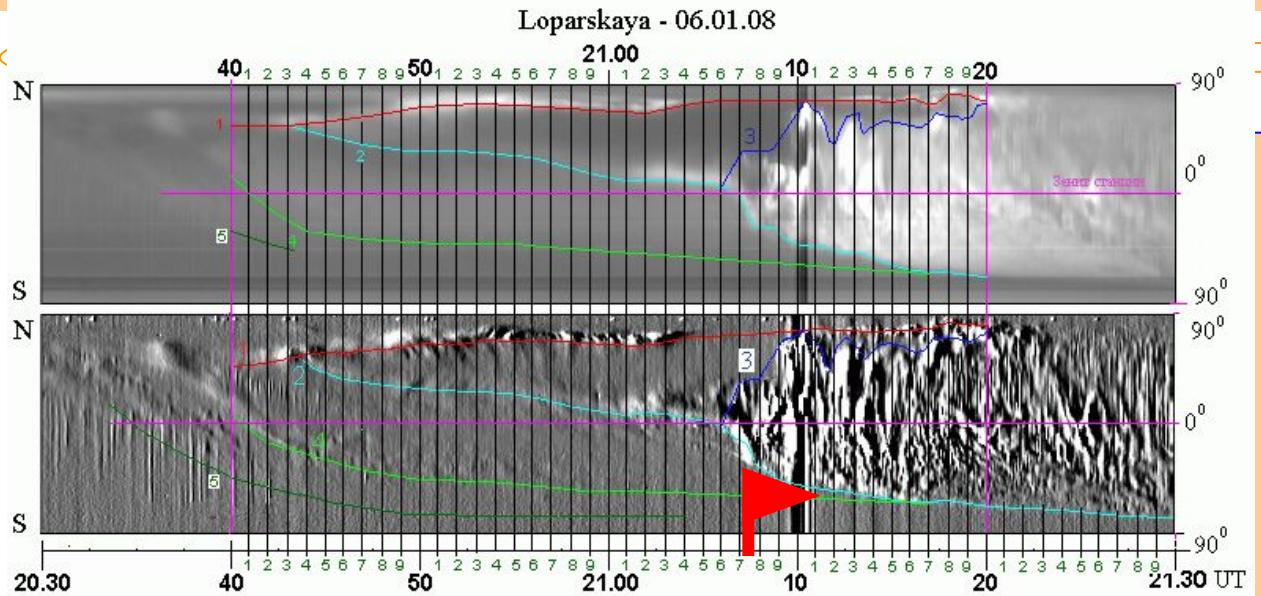
- ✓ strong E up to 60mV/m sitting upon Bz peaks ;
- ✓ SC potential drops;
- ✓ ESA spectra change in <1 spin ;
- ✓



MVA gives the Earthward-directed normals

| SC | I2/I3 | Nmva | N3x | N3y | N3z | x | y | z |
|----|-------|------|--------------------|-----|-----|-----------------------|---|---|
| P3 | 28. | 28 | [0.95; 0.04; 0.30] | | | [-11.31; 1.73; -2.71] | | |
| P4 | 32. | 16 | [0.93; 0.09; 0.34] | | | [-11.13; 2.63; -2.75] | | |
| P5 | 7.5 | 16 | [0.94;-0.21; 0.24] | | | [-9.29; 1.25; -2.59] | | |

Auroral signature of Dipolarization Front



*Break Up at ~2107 UT
(Polar UVI, TV Loparskaya):*

- followed by poleward and Equatorward auroral expansion
- Image of turbulent Dipolarization - enhanced diffuse aurora with considerable structure
- distinct EQ boundary but not outlined by bright auroral form ;

(Sergeev et al., JGR 2010)

Auroral signature of Dipolarization – mapping



Adapt T96 model to Themis P2/P5 external B-fields, compare to T96sw

- Importance of accurate mapping, footpoint variations up to $\pm 3^\circ$ CGLat , even for mapping from 7Re
- expected crossing of EQ boundary by P5 – between 2112 and 2118 UT – dipolarization in progress on P5, spiky structures overlapped onto Bz increase
- Other comparison (two step Bz increase, two injections, two traces EAB on Dec.31, 2007) also confirm spatial relationship between SDF and EAB

(Sergeev et al., JGR 2010)

