

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

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



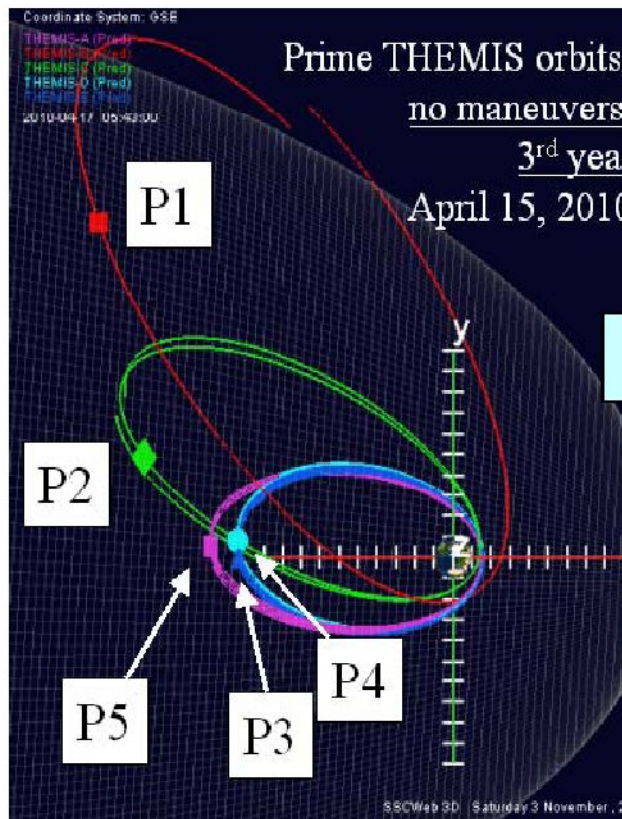
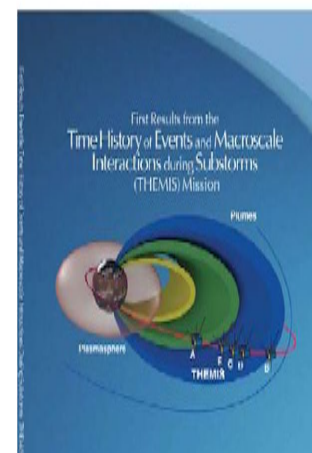
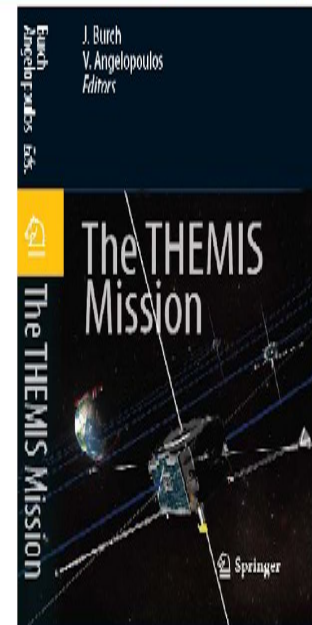


THEMIS Mission Status



• THEMIS = T

- 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



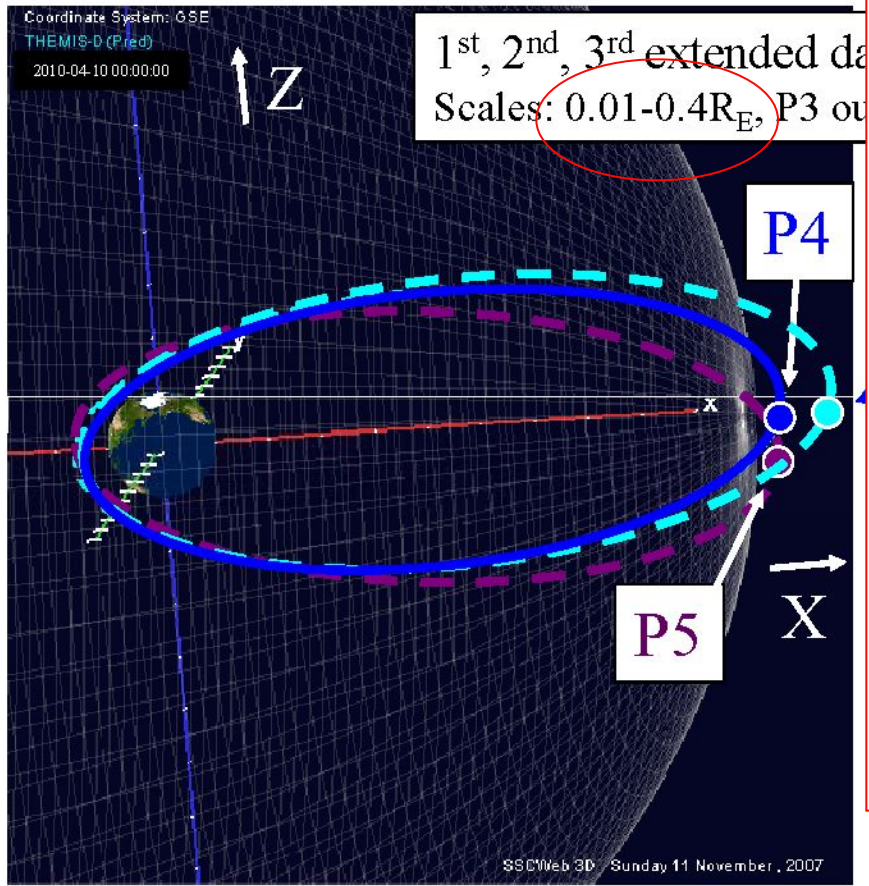


P3,4,5 dayside s

Συνιφχαντχαπαβιλ

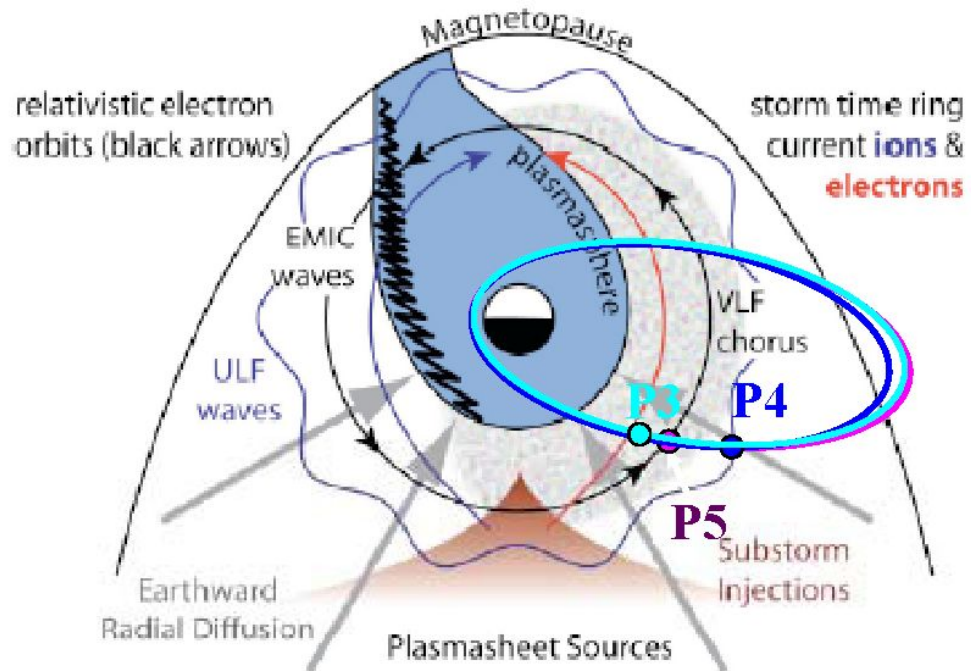
Probes P3,4,5 in an Rθ plane, never achieved before

- Magnetopause and field aligned currents un
- Bracket reconnection site, measure inflow a



Extended 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



ДИПОЛИЗАЦИИ И ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ



Струйные
транзиентные
потoki (BBF) :

Принципиальные
вопросы

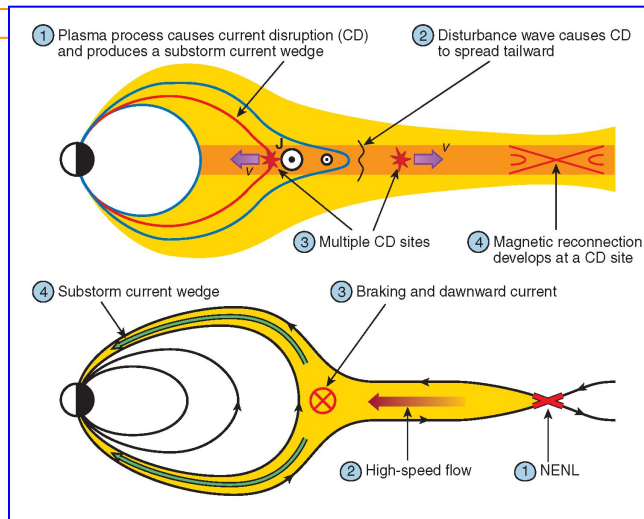
Турбулентность или
структуры?

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 инъекции
3. Термодинамические характеристики BBF
4. Последовательность/механизм начала ВФ суббури/аврорального брейкапа *Пересоединение*
 BBF авроральный брейкап

Распространение ВВФ в плазменном слое

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

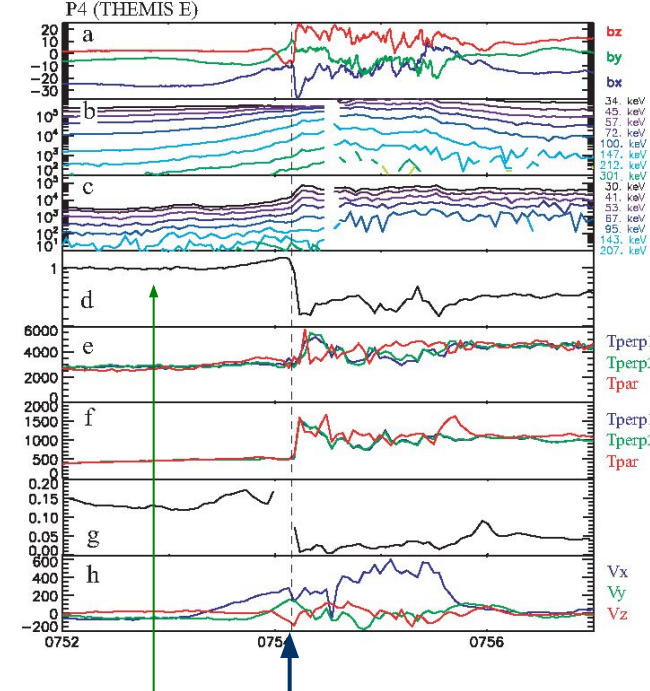
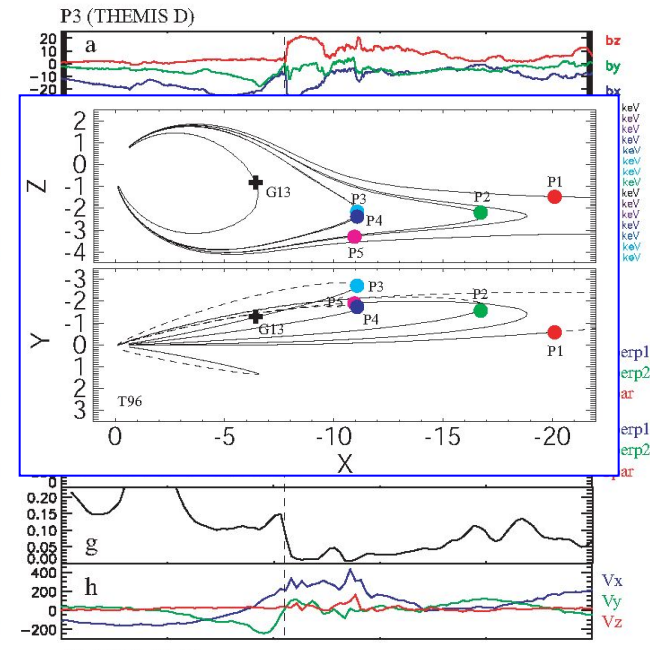
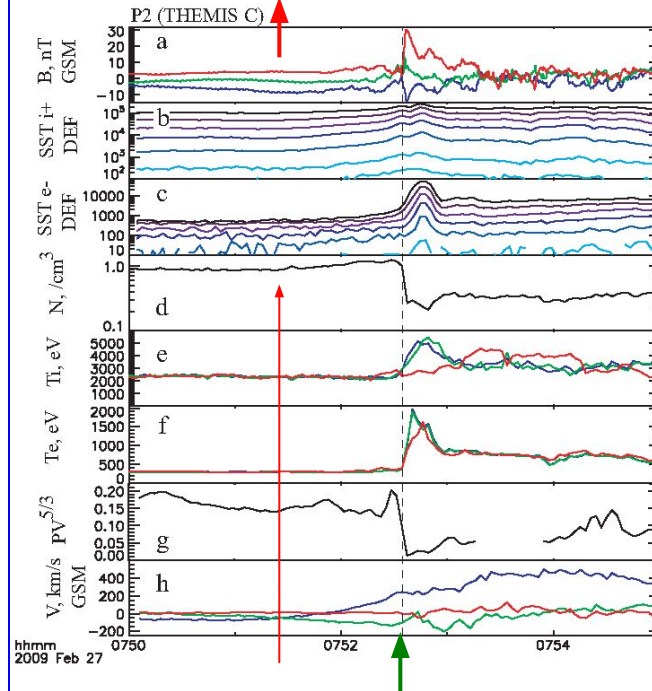
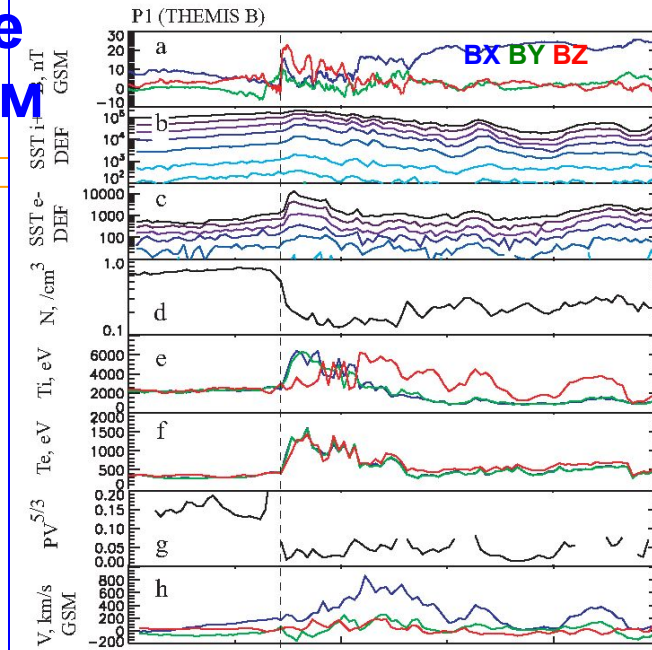
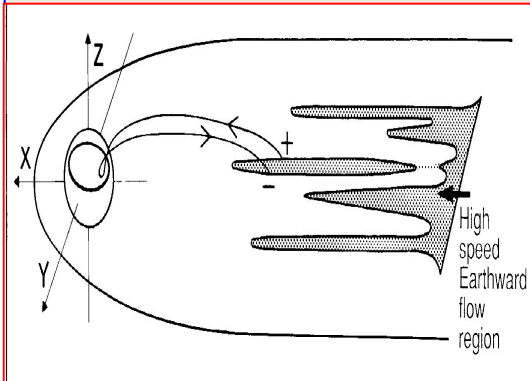
- ВВФ - индивидуальная среднемасшт. структура, сохраняется на масштабе минут; Э область взаимодействия

- $V_{transp} \sim V_{xp}$ (до фронта);

- $\uparrow BZ, T \quad \downarrow N, P, PV^Y$
⇒ недогруженные трубки (plasma bubbles);

- Турбулентность внутри ВВФ;

- $V_x \sim 300 \text{ km/s} - VA??$
Пересоединение во вложенном TTC на замкнутых силовых линиях?



Среднестатистический ВВФ

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

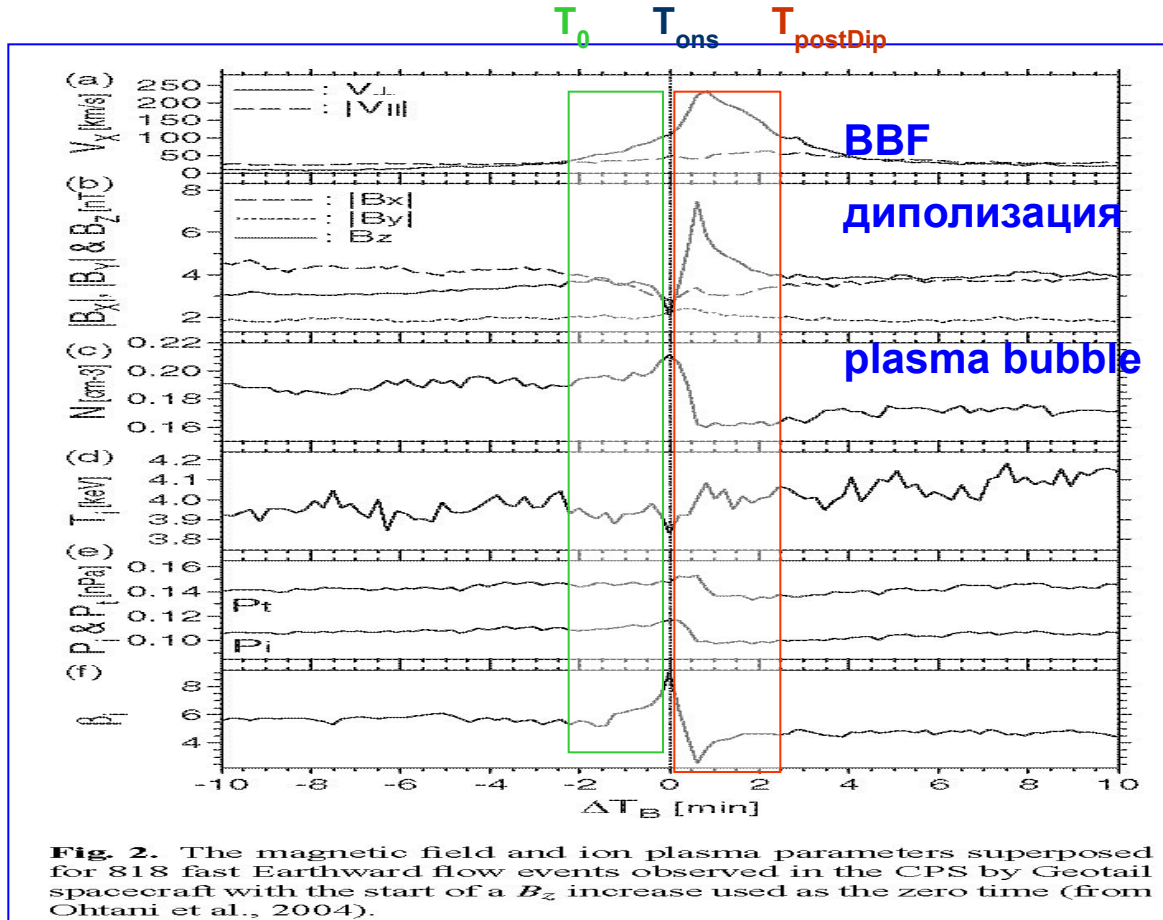
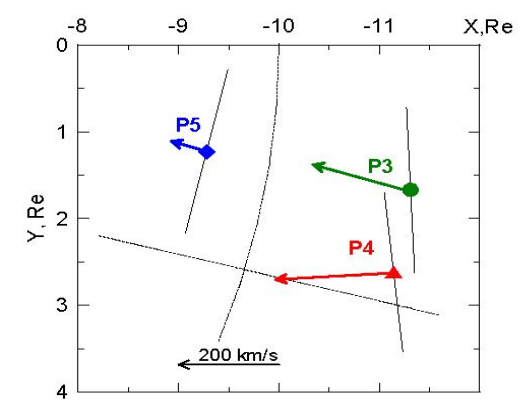
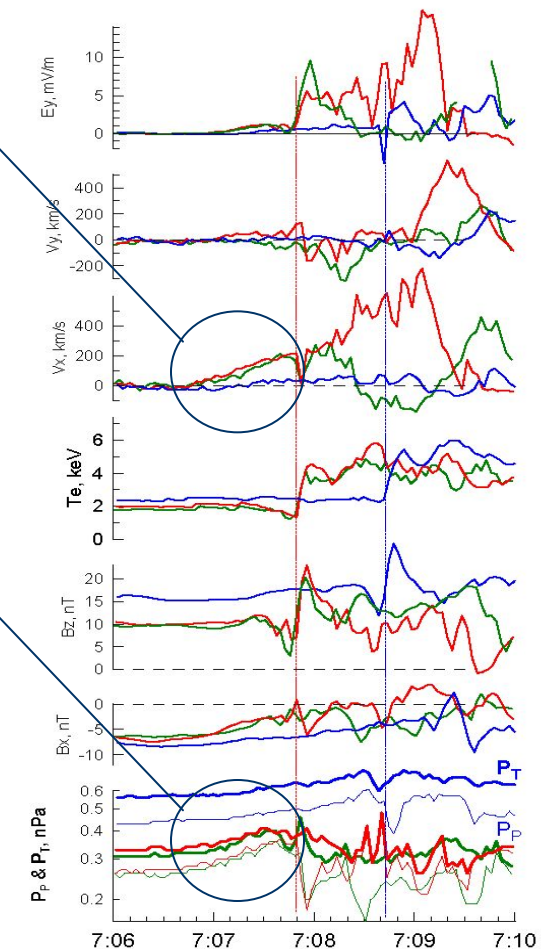


Fig. 2. The magnetic field and ion plasma parameters superposed for 818 fast Earthward flow events observed in the CPS by Geotail spacecraft with the start of a B_z increase used as the zero time (from Ohtani et al., 2004).

Compression / Dipolarization
phase phase



February 23, 2008 THEMIS P3 & P4 & P5

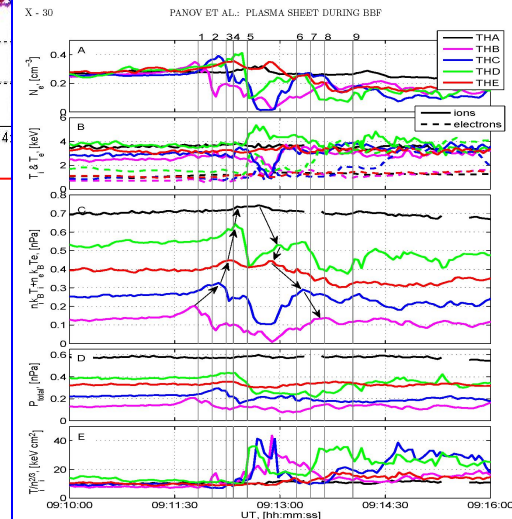
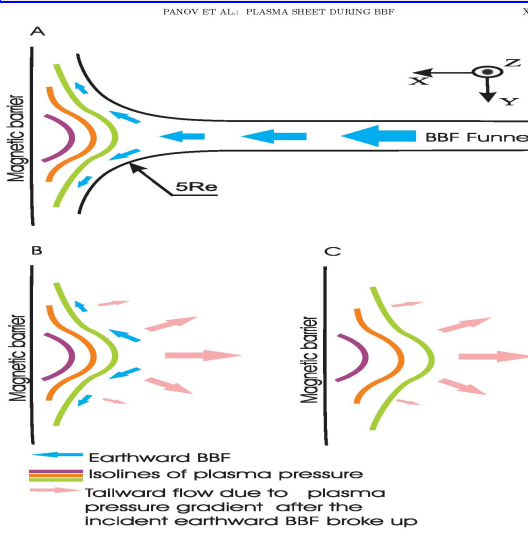
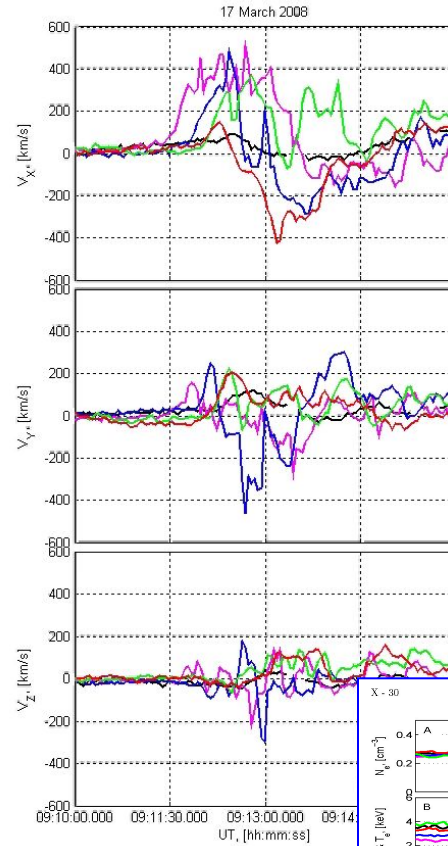
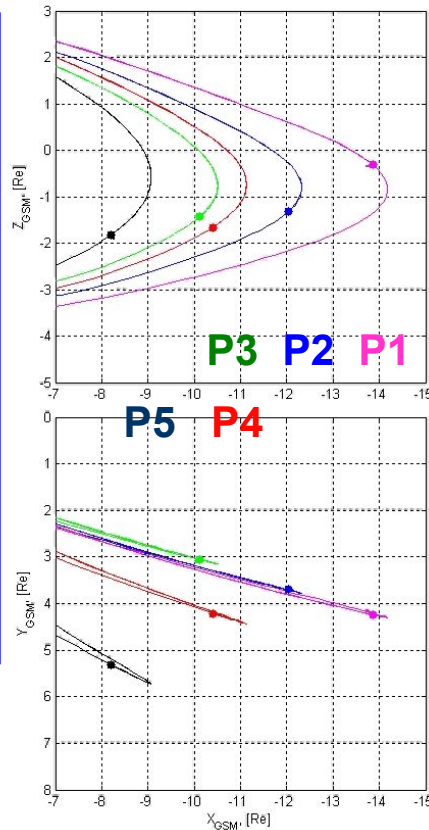


Торможение BBF



Panov et al., JGR 2009, in press

- рой спутников $r \sim 10-14R_E$, техника карт скорости
- прохождение BBF p_1 p_2 p_3
- рост давления в более широкой области, торможение BBF
- возвратное течение и обтекание (V_x) внутренней области); вихри скорости



Кинетическая структура фронта инъекции



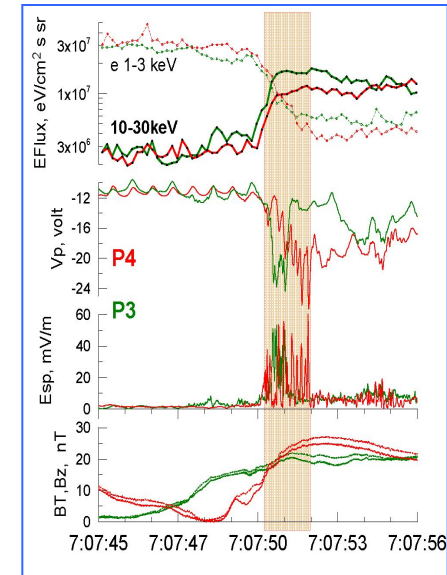
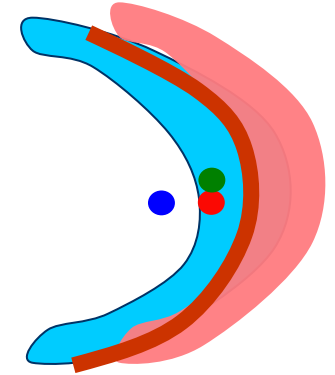
Первое детальное наблюдение границы инъекции (границы ВВФ\диполизации), распространяющейся с торможением на периферии квазидипольной области

(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



ИКИ, 10.02. 2010

Dipolarization Front at spin resolution

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

- ✓ Time delay P3,P4□P5 dt=53sec,
Earthward propagation **Vx~220km/s** from 11.3Re□9.5Re
- ✓ Prior to SDF Vix~200km/s at P3, P4, Vix~70km at P5 ,
propagation with plasma, □ **flow braking**

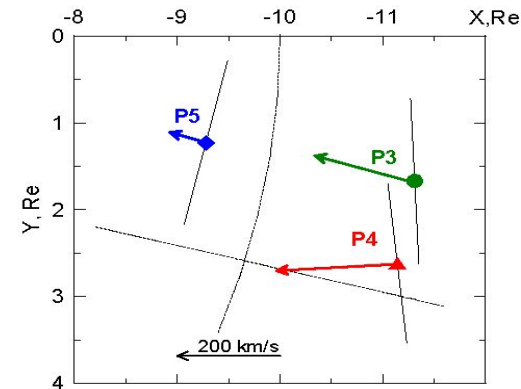
✓ MVA normals

SC	λ_2/λ_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

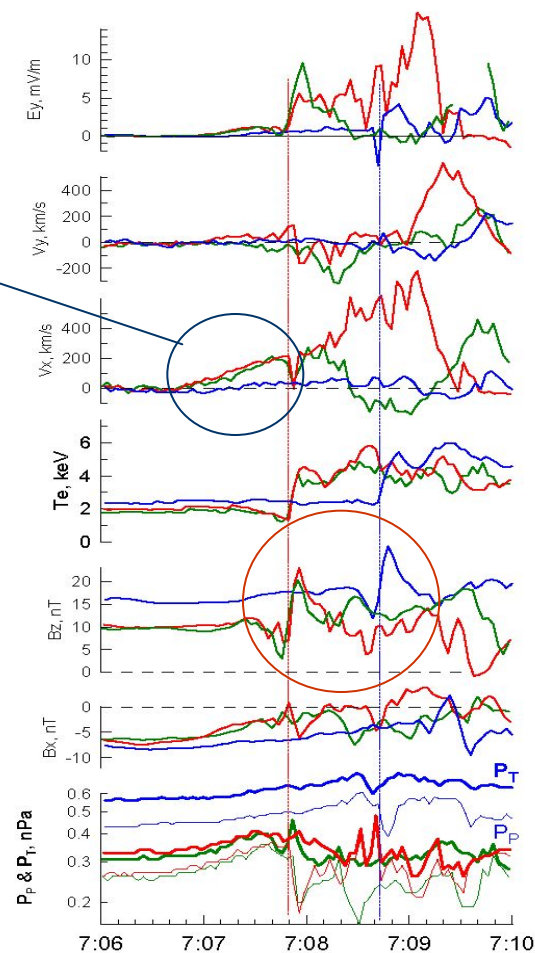
- ✓ SDF duration (peak-to-peak Bz increase) ~4sec at P4, P5, ~7sec

at P3. Front thickness 220km/s * 4sec = **<880 km** ion
gyroradius Wi=7keV in Bz=20nT r_{cp} = **600km** ion
inertial length for n=0.3 cm-3 l_{pi} = **420 km**

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



February 23, 2008 Themis **P3 & P4 & P5**



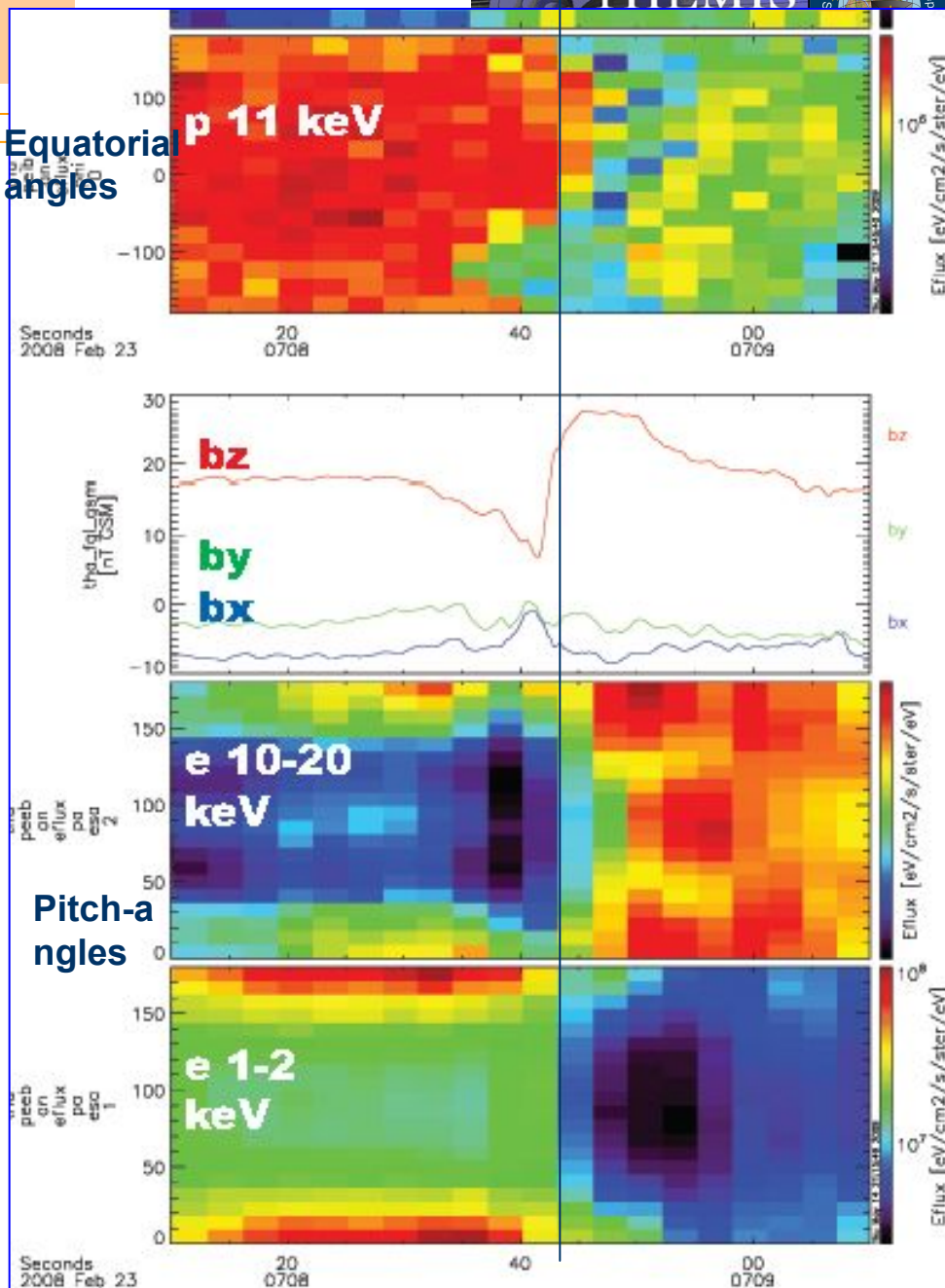
SDF – particle features

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

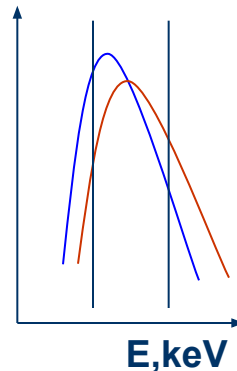
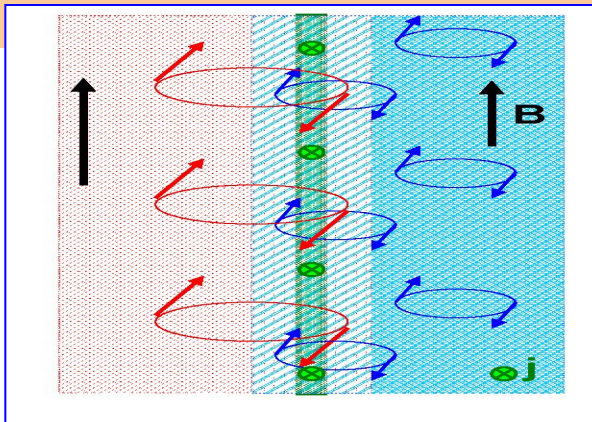
Equatorial angles



Ion (finite gyroradius) pattern at SDF

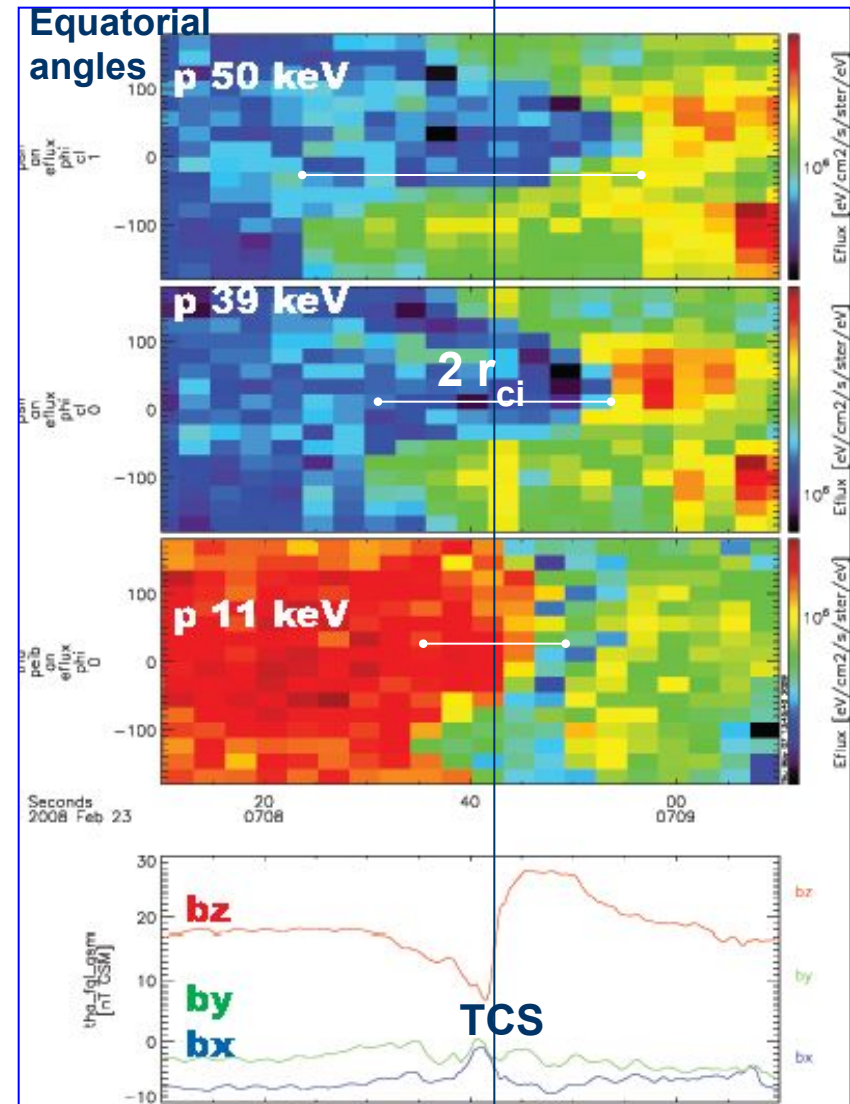
Spacecraft P5 (9.3Re) :

- 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: $V_x \sim 2r_{ci} / \Delta t \sim 2 \cdot 760 \text{ km} / 15 \text{ s} \sim 100 \text{ km/s}$ - consistent with ion velocity $V_x \sim 80 \text{ km/s}$ (measured in front of SDF).



Cold
/dense

Energetic
/low-density



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

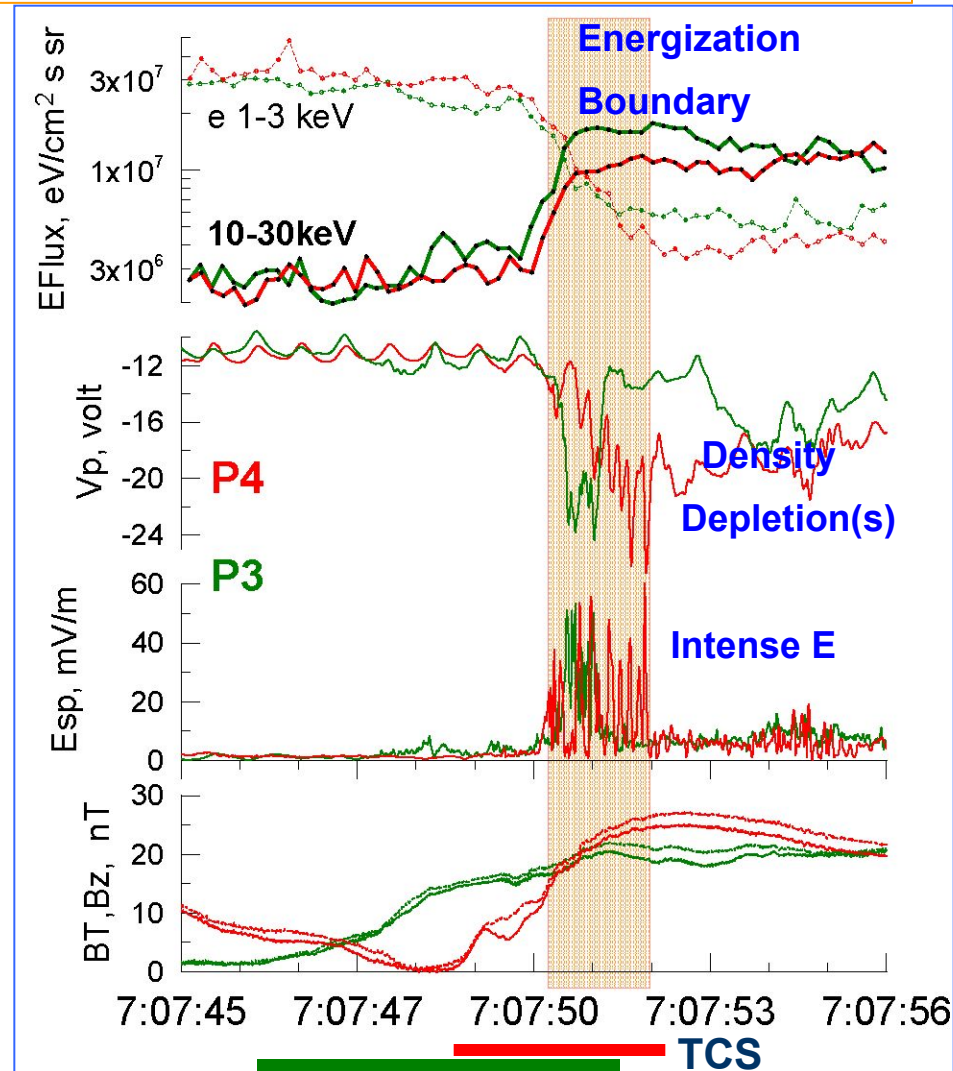


Substructure of the thin current sheet :

2 outer Themis spacecraft

- ✓ Electrons take ~2sec for complete replacement cold □ hot population at P3,P4;
- ✓ Deep density depletion (from probe 1,2 potential 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 ($f_{LH} \sim 13\text{Hz}$)

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



one 3s spin

Свойства фронта диполизации

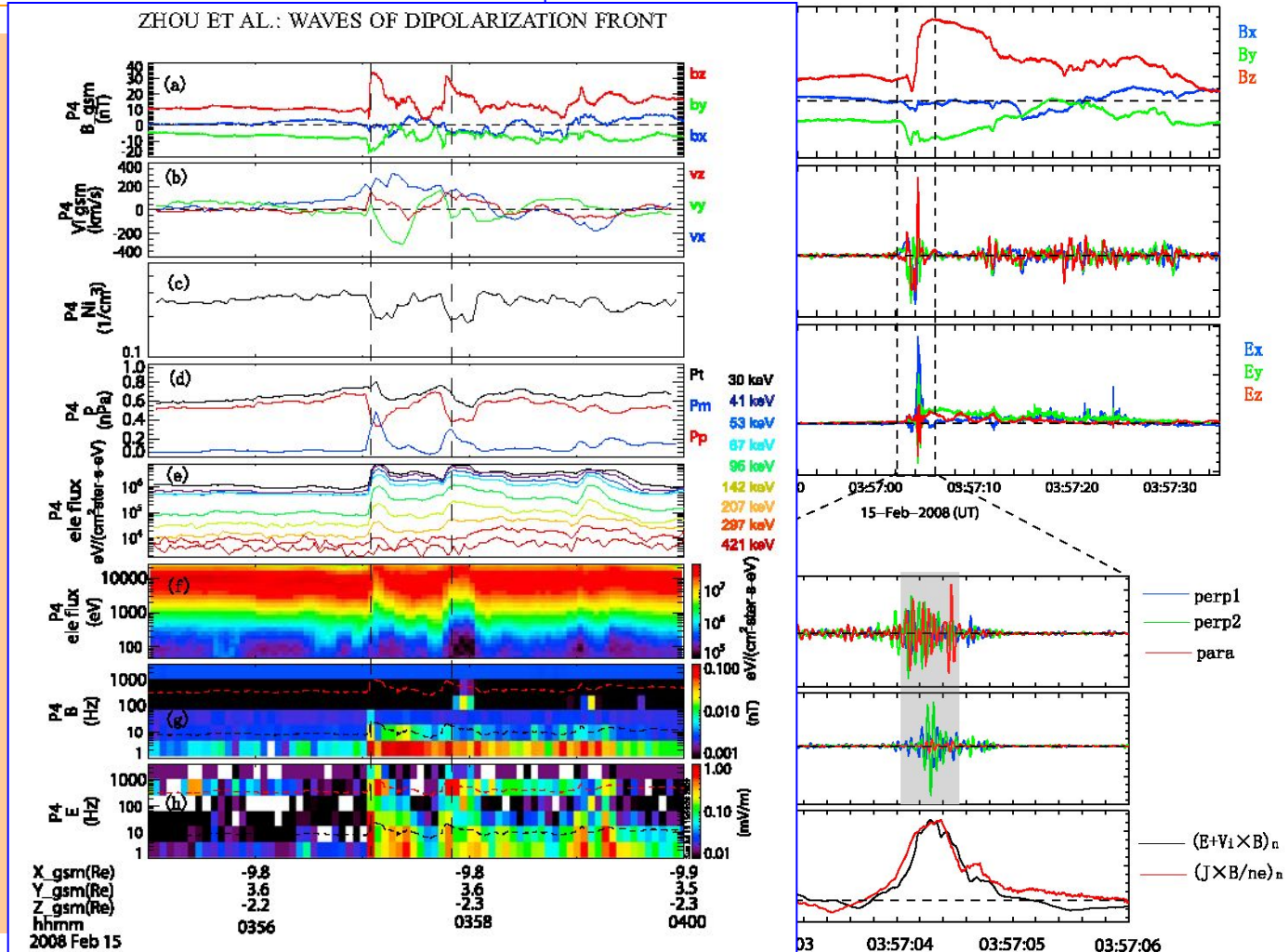


ZHOU ET AL.: WAVES OF DIPOLARIZATION FRONT

Zhou et al., GRL 2009

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

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



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) the components of bulk flow velocity, (c) ion density, (d) thermal (red), magnetic field, (b) magnetic field waveform in the GSM coordinate system, and (f) electron differential energy flux from the SST and ESA instruments, respectively. (d) and (e) the expanded waveform between 03:57:00 and 03:57:30 UT. (g) and (h) the expanded magnetic and electric field fluctuations between 1 and 4000 Hz. Black and red dashed vertical lines indicate the times when the two waves discussed in this paper were observed. Black line shows the observed electric field in the field aligned coordinate system. Black and red dashed vertical lines indicate the times when the two waves discussed in this paper were observed. Black line shows the observed electric field in the field aligned coordinate system. Black and red dashed vertical lines indicate the times when the two waves discussed in this paper were observed. Black line shows the observed electric field in the field aligned coordinate system.

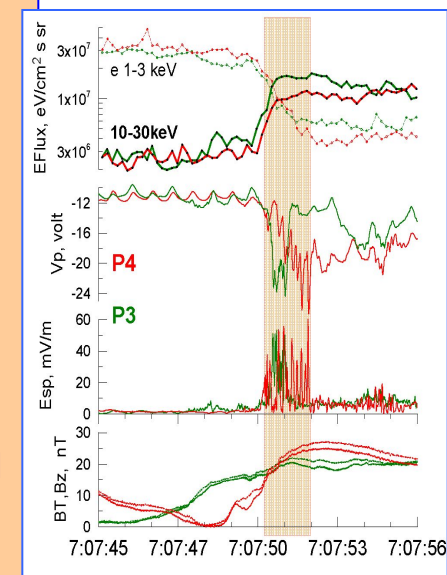
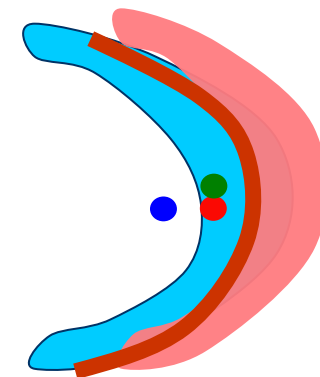
Кинетическая структура фронта инъекции



Первые детальное наблюдения границы инъекции (границы VBF) 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 $\sim 1-2$ ионного микромасштаба, -- TD ?
- совпадает с тонкой температурной границей (толщиной ~ 400 км) двух плазм (р,е), 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

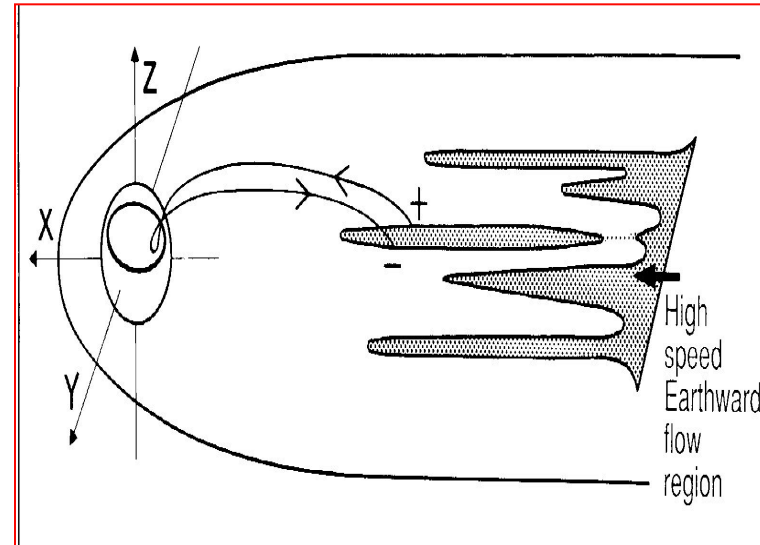
Турбулентность или
структуры?

Торможение во
внутренней
магнитосфере?

Энтропия
инжектированной
плазмы?

Характеристики
фронтон?

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 транзитные потоки (BBF) :

Принципиальные вопросы

Турбулентность или структуры?

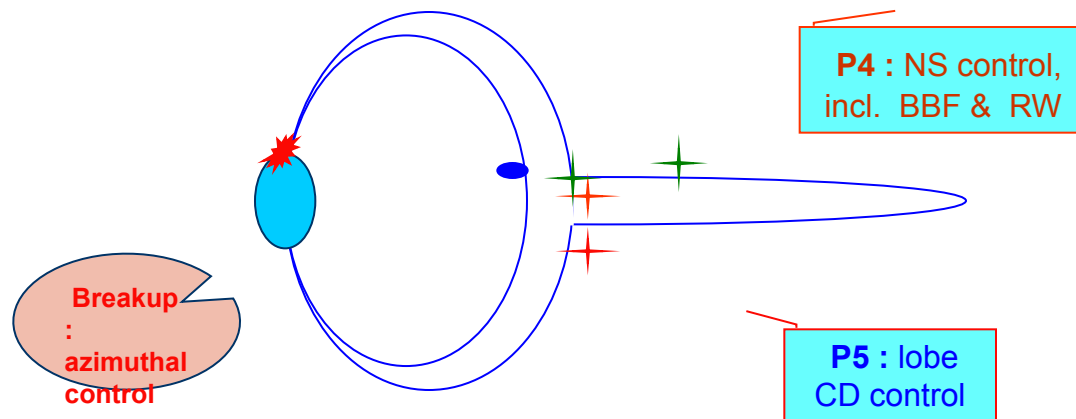
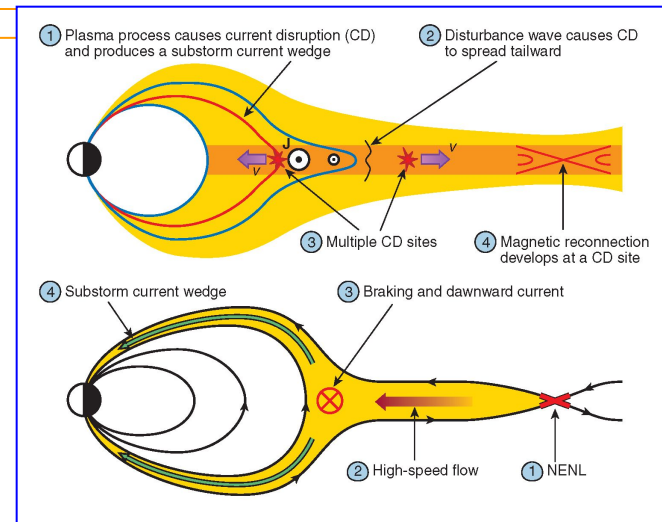
Характеристики фронтов?

Торможение во внутренней магнитосфере?

Энтропия инжектированной плазмы?

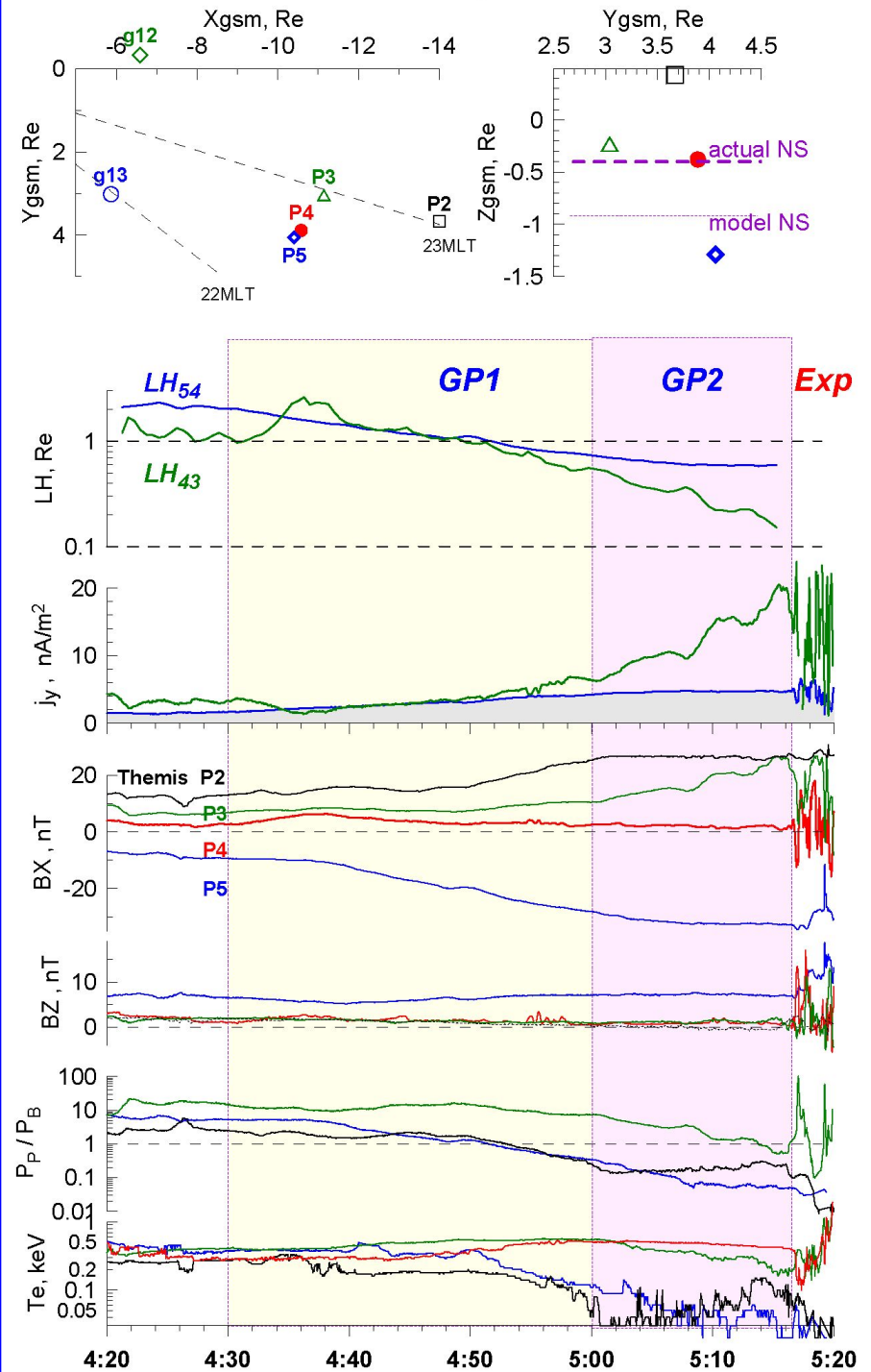
BBF и начало взрывной фазы суббури

**Minimal
Ideal
Coverage**

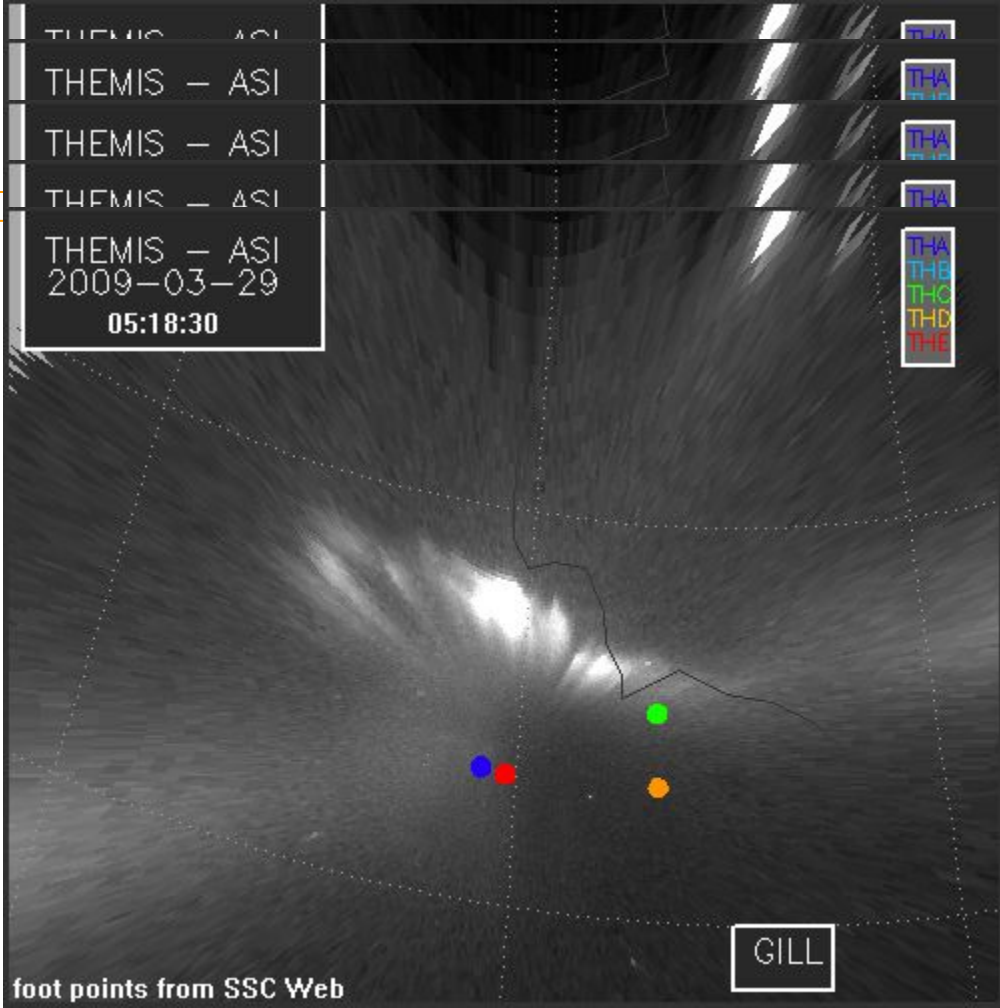
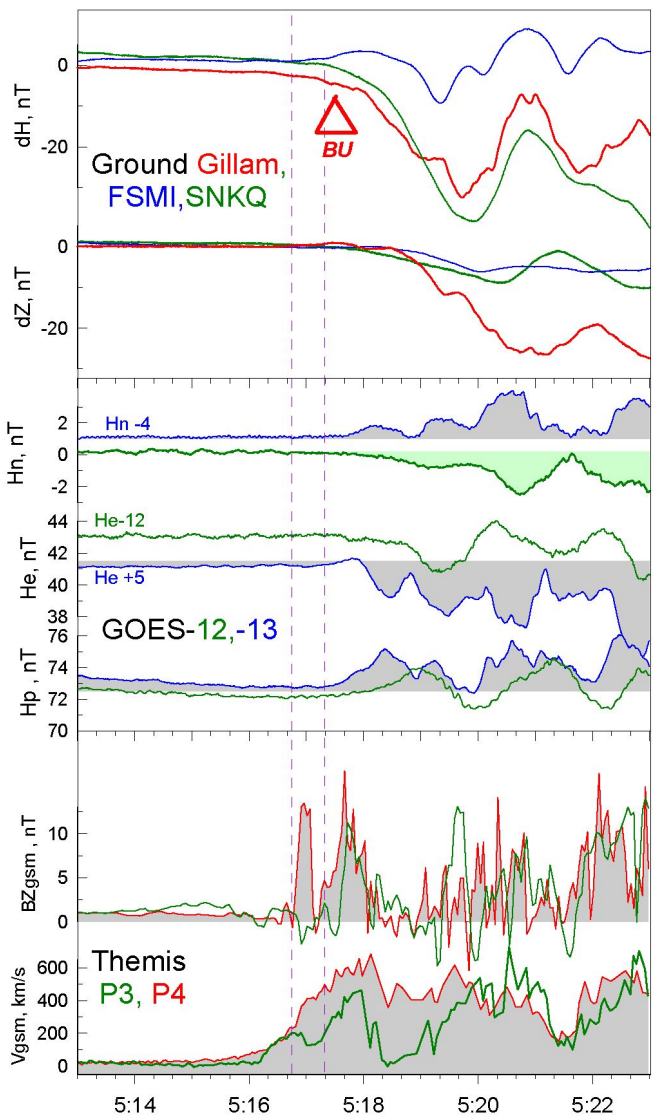


ВВФ и начало взрывной фазы суббури

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



Начало взрывной фазы



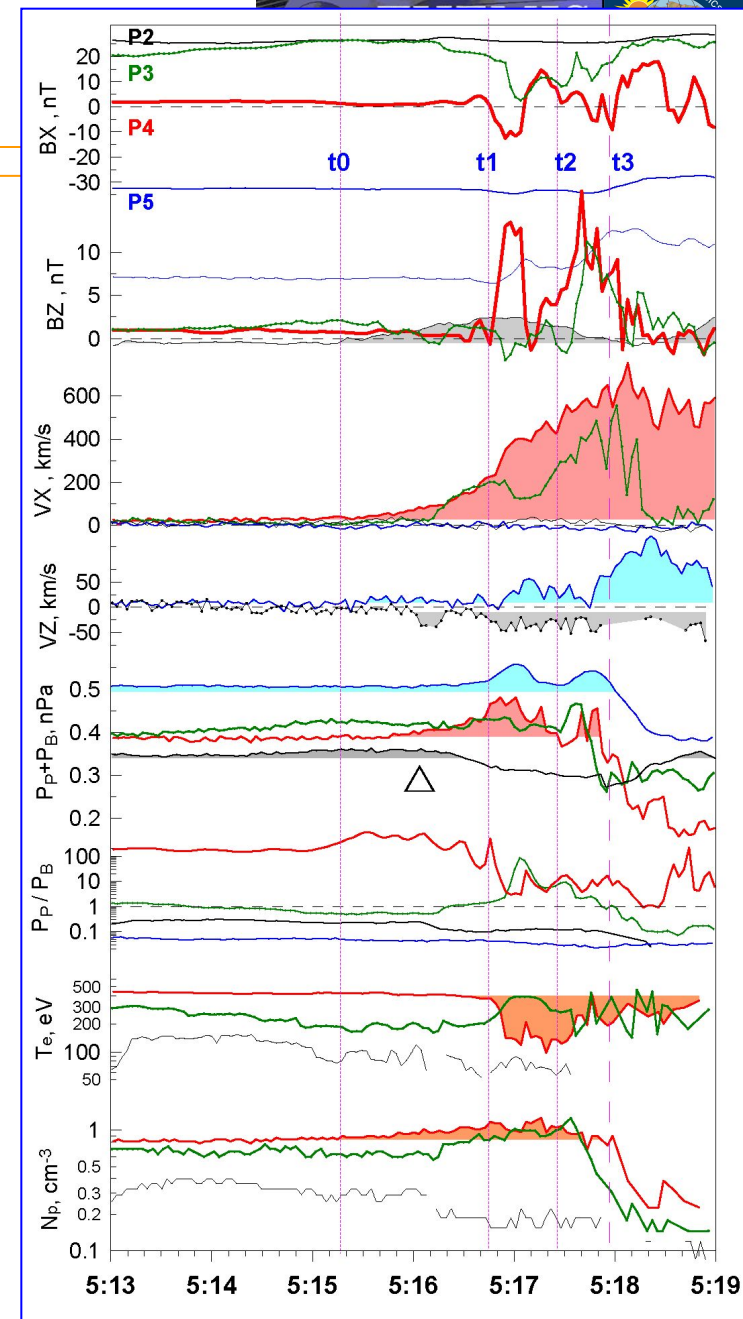
- SC на долготе брейкапа

-задержки: *брейкап+электроджет*

□ 14Re **BBF** □ 11Re □ 6.6Re

ВВФ и начало взрывной фазы суббури

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



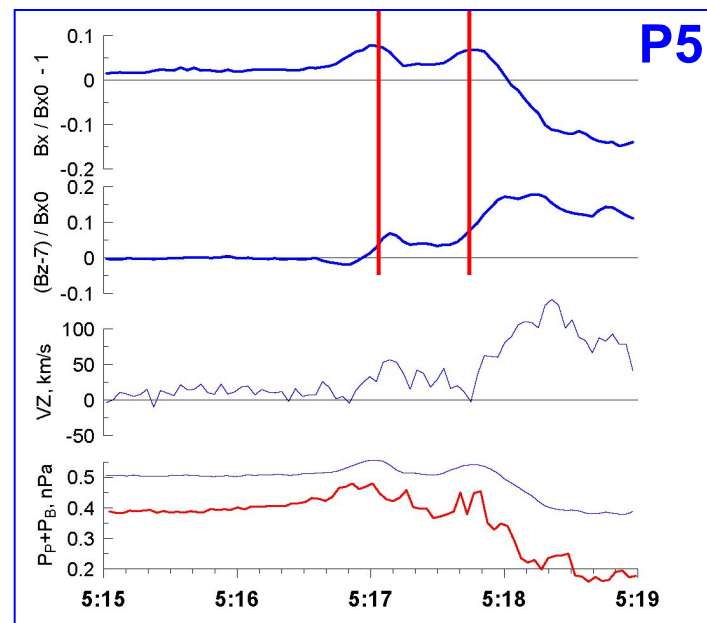
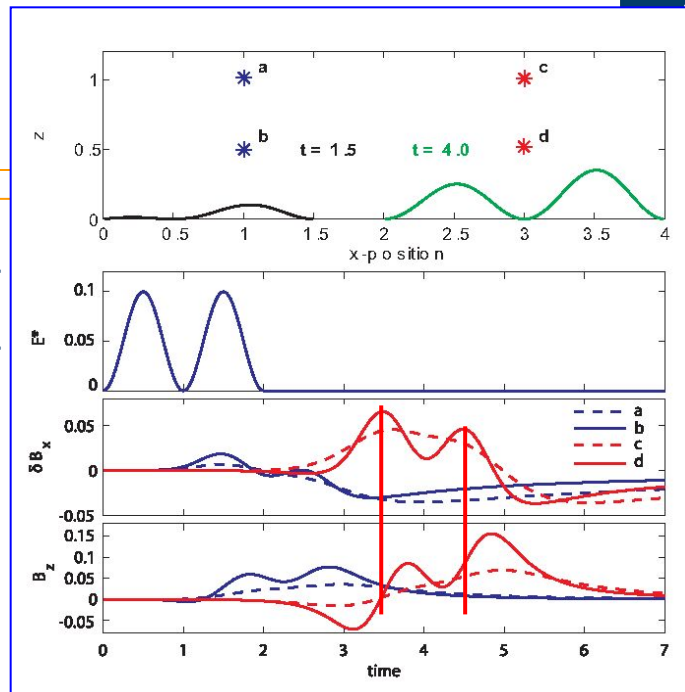
ВВФ и начало взрывной фазы суббури

- Среднемасштабные структуры типов ВВФ, TCR, CD, NFTE

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

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

из Sharma et al. (2008)



В заключение ...



2009 THEMIS :

Струйные транзитные 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**

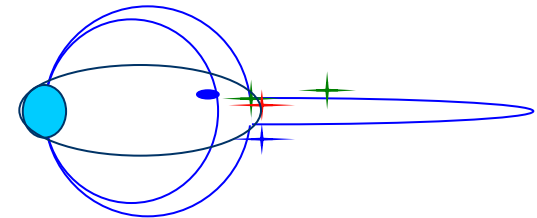
ICS-10

AR/THEMIS

\Rightarrow 2012 \rightarrow 2016

РЕЗОНАНС

**RBSP /
ORBITALS**



Спасибо за внимание !



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

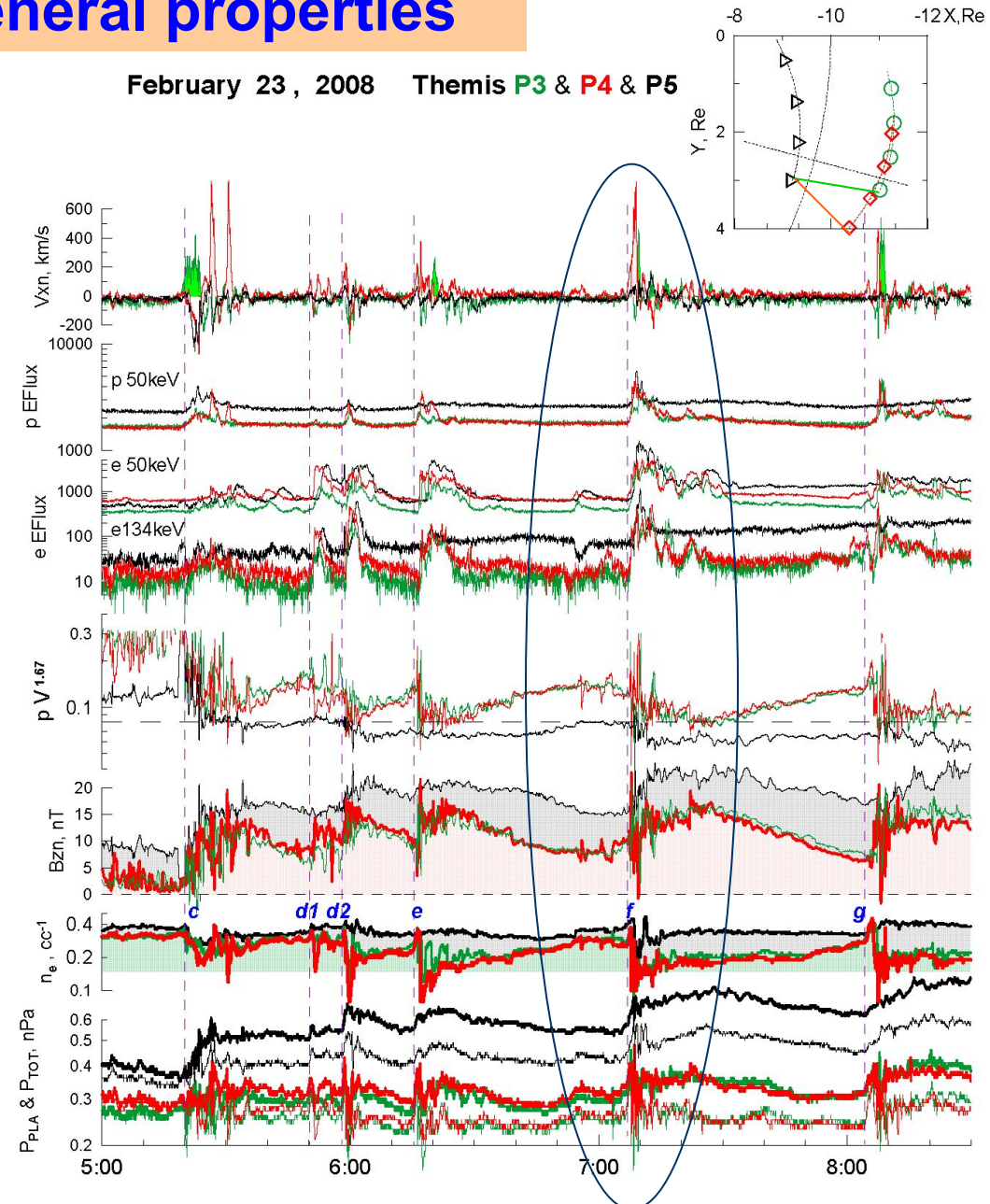


Example of multiple injections:
P3,P4,P5 triangle in XY plane near
Neutral Sheet

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

5 distinct Dipolarizations (DIP),
basic features :

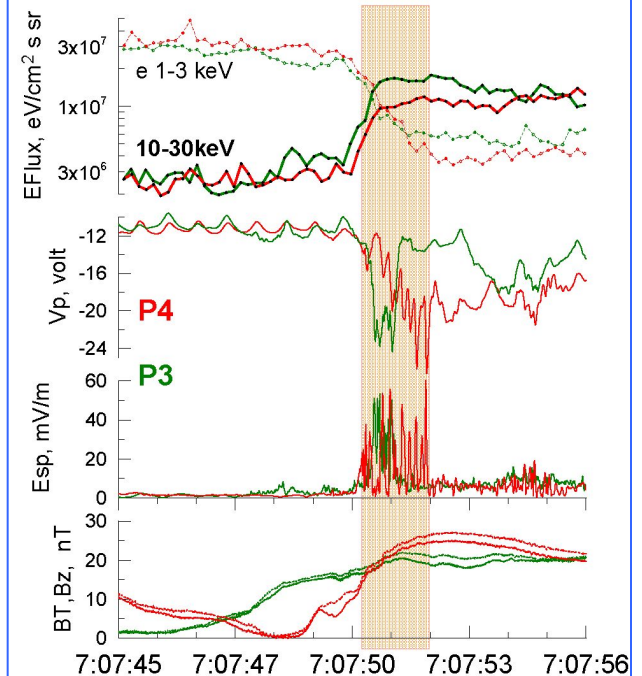
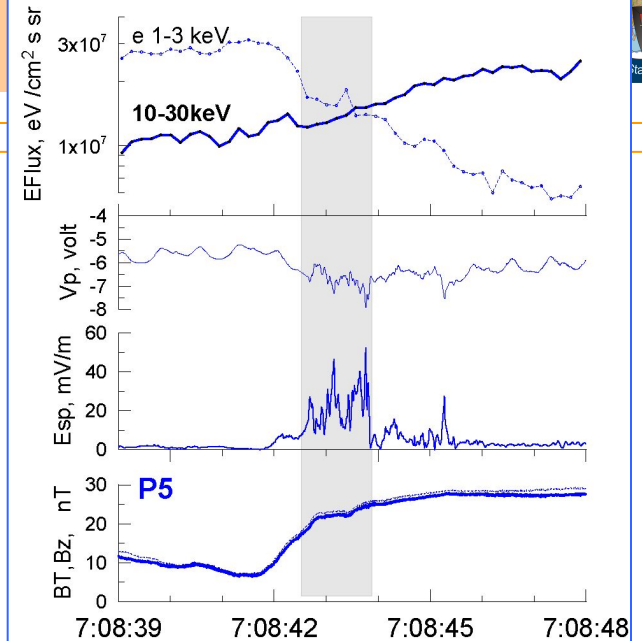
- ✓ Plasma (and total) pressure generally **increase** during DIP events; also pressure dropped (for short time) in many cases (bubbles)
- ✓ Generally **density & pV^{γ} decrease** inside DIPs; less pronounced at the inner SC
- ✓ HE particle flux increases at DIP fronts (*dispersionless*)
- ✓ *Later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



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

Substructure of the thin current sheet :

- ✓ Electrons take ~ 2 sec for complete replacement of population (energization) at P3,P4;
- ✓ Large density depletion (from probe1,2 potential V_p) colocated with :
- ✓ Very intense E-field $\sim 40-60$ mV/m in the spin plane (Esp) which have the wave/bursts time scale of 100 msec, about Low Hybrid timescale ($f_{LH} \sim 13$ 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



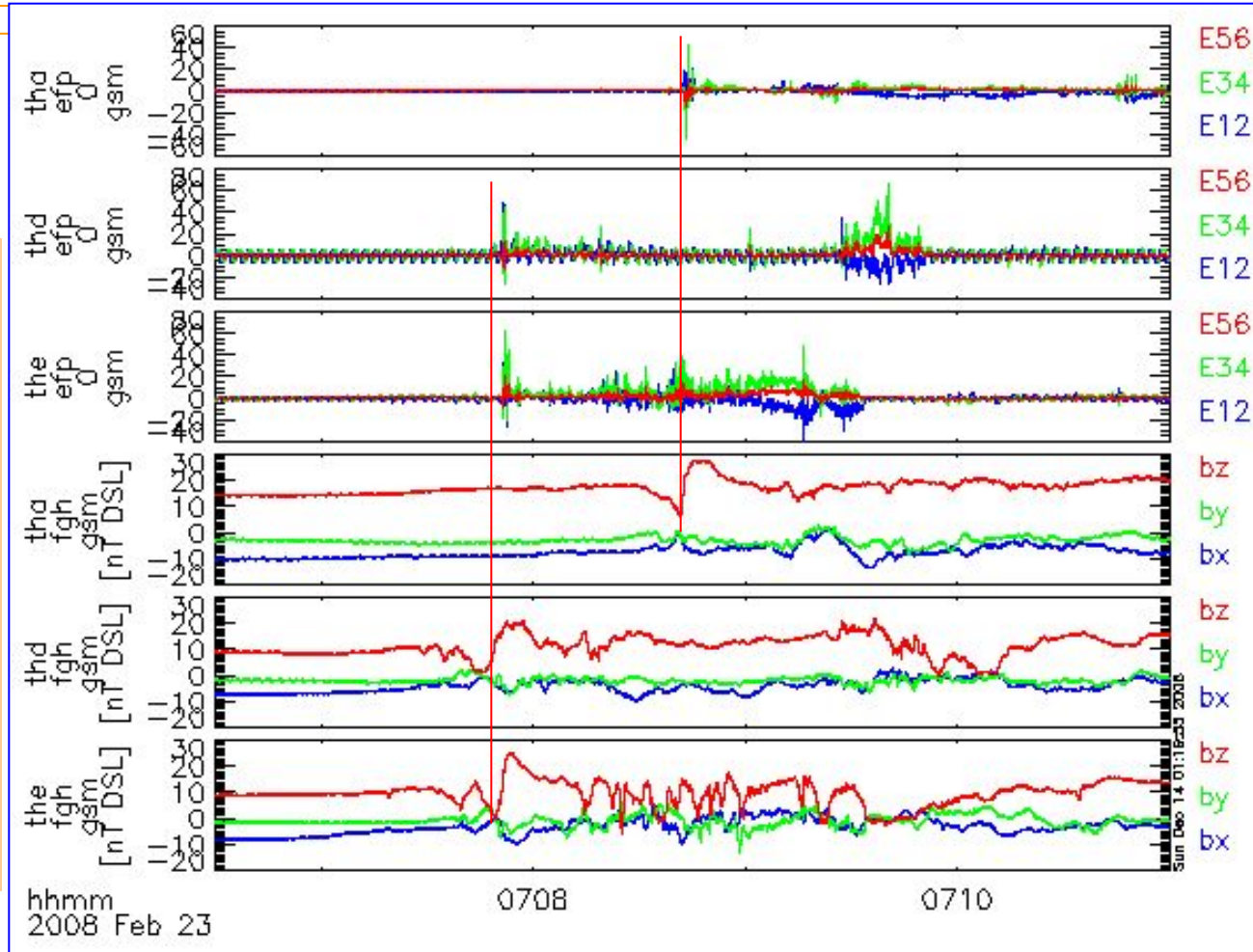
Individual injection – zoom in..



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 ;



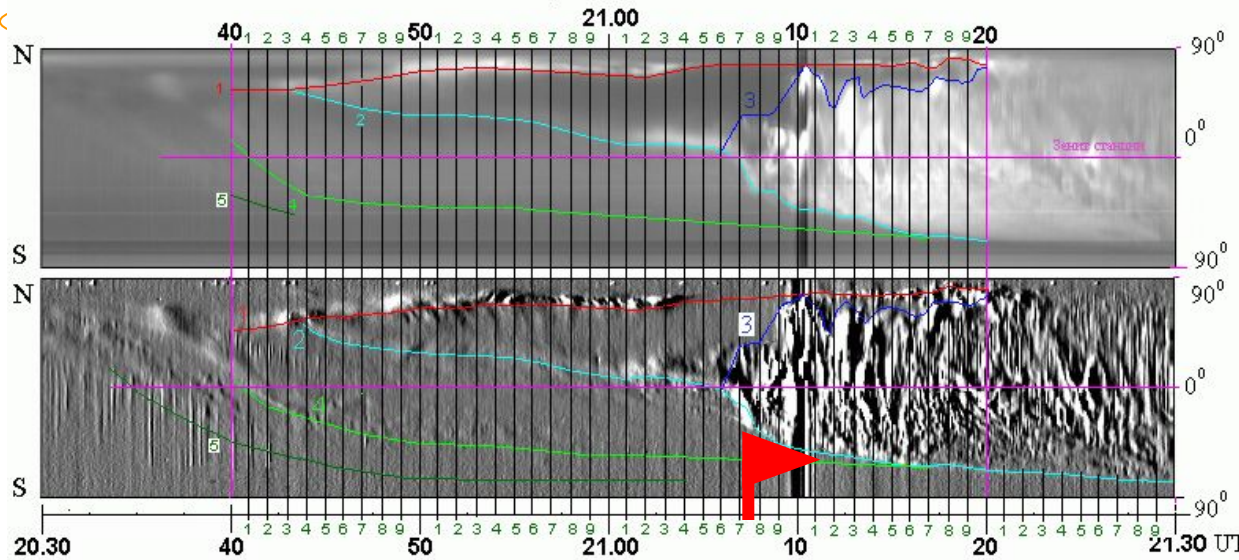
MVA gives the Earthward-directed normals

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

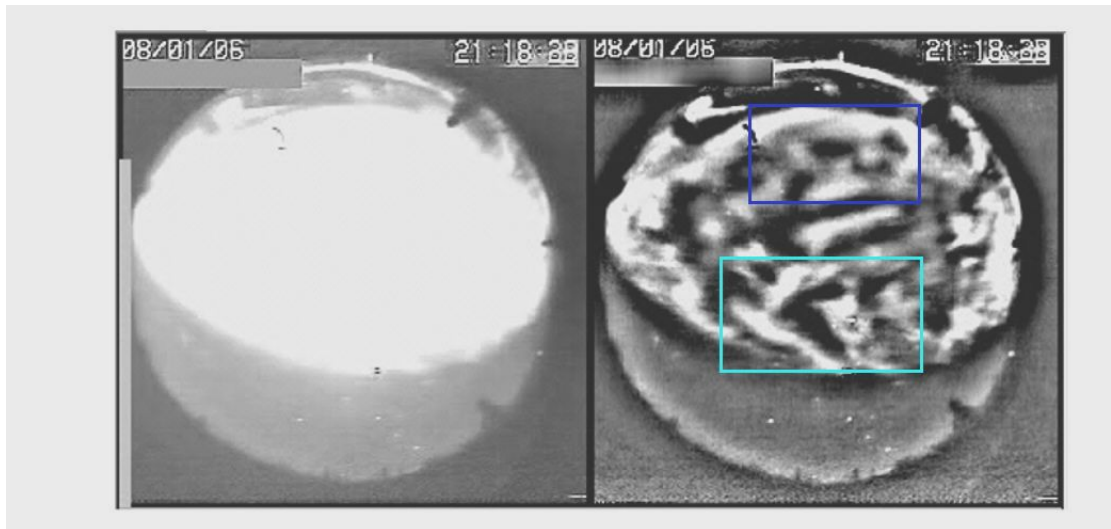


Loparskaya - 06.01.08



*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)

