

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт космических исследований
Институт изучения Солнечной системы
им. Макса Планка

Евгений Валентинович ПАНОВ

**ИЗУЧЕНИЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ НА ГРАНИЦЕ
МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ЧЕТЫРЕХ
СПУТНИКОВ КЛАСТЕР**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.03 - физика Солнца

Москва, 2007

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и Институте изучения солнечной системы им. Макса Планка (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, MPS)

Научные руководители:
д.ф.- м.н. С.П. Савин (ИКИ РАН)
проф. Й. Бюхнер (J. Büchner, MPS)

Официальные оппоненты:
к.ф.- м.н. В.Л. Красовский (ИКИ РАН)
д.ф.- м.н. И.И. Алексеев (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова)

Ведущая организация:
Институт земного магнетизма Российской академии наук

Защита состоялась 6 апреля 2007г. на заседании Диссертационного Совета Д 002.113.03 ИКИ РАН.

Аннотация

Взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем Земли приводит к образованию ударной волны и сложно устроенной магнитосфере, а также переходной области между ними - магнитослоя. Внешняя граница магнитосферы - магнитопауза - регулирует перенос импульса и массы солнечного ветра в магнитосферу Земли. Ряд одно-спутниковых миссий, а так же двух-точечные наблюдения спутниками ISEE и AMPTE показали, что толщина токового слоя магнитопаузы вблизи подсолнечной точки намного превышает теоретические оценки (порядка ионного ларморовского радиуса). При этом, сам токовый слой магнитопаузы является источником плазменных неустойчивостей, порождая флуктуации электрического и магнитного поля во всем наблюдаемом диапазоне частот (от ионно-циклотронной до нижнегибридной частоты). Предшествующие миссии, однако, не давали возможность считать отдельно частные пространственные и временные производные измеряемых параметров. Как следствие, не было дано четкого ответа о природе неустойчивостей на магнитопаузе и генерируемой ими электромагнитной турбулентности. Четырех-спутниковый проект КЛАСТЕР (CLUSTER) впервые на средних и высоких широтах позволил систематически оценивать скорость и толщину токового слоя магнитопаузы, получать плотность тока напрямую из ротора магнитного поля, а так же определять волновой вектор возмущений, предоставив эффективный инструмент для изучения строения токового слоя магнитопаузы и связанной с ним турбулентностью. В данной работе собраны результаты систематического анализа как внешних условий, так и собственных параметров магнитопаузы, используя измерения функций распределения ионов и магнитного поля, собранных четырьмя спутниками КЛАСТЕР во время 154 переходов магнитослой-магнитосфера на средних и высоких широтах. Выясняется зависимость толщины магнитопаузы от параметров в прилегающем магнитослое. Изучается строение токового слоя магнитопаузы и свойства электрических и магнитных флуктуаций в его окрестности. На основе этого материала делаются оценки электромагнитного вклада в эффективный коэффициент диффузии при рассеянии частиц на волнах за счет флуктуаций магнитного поля и плотности тока в окрестности тонкой и толстой магнитопаузы.

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
Space Research Institute
Max Planck Institute for Solar System Research

Evgeny V. PANOVA

**INVESTIGATION OF THE CURRENT SHEETS AT
THE OUTER BOUNDARY OF THE EARTH'S
MAGNETOSPHERE USING THE FOUR CLUSTER
SPACECRAFT**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences Thesis
speciality 01.03.03 - Solar Physics

Moscow, 2007

This work was carried out at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ИКИ РАН) and Max Planck Institute for Solar System Research (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, MPS)

Scientific advisors:

S.P. Savin, Dr. Sci (ИКИ РАН)

J. Büchner, Prof. (MPS)

Official referees:

V.L. Krasovsky, Cand. Sci. (ИКИ РАН)

I.I. Alekseev, Dr. Sci. (Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics)

Leading institution:

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of the Russian Academy of Sciences

Disputation took place on April 6, 2007 at the meeting of the council Д 002.113.03 at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

Abstract

Interaction of the solar wind with the Earth's magnetic field results in the formation of the bow-shock and complex magnetosphere, as well as to the transitional region between them - the magnetosheath. The outer boundary of the magnetosphere - magnetopause - controls the momentum and mass transport from the solar wind into the Earth's magnetosphere. A number of single-spacecraft missions, as well as two-point observations by ISEE and AMPTE spacecraft have revealed, that the current sheet thickness of the sub-solar magnetopause enormously exceeds the corresponding theoretical estimates (about one ion gyro-radius). It was also observed that the magnetopause current sheet is a source of plasma instabilities which give rise of fluctuations of electric and magnetic fields in the all observable frequency range (from the ion-cyclotron to the lower-hybrid frequency). Former in situ observations, however, did not provide the possibility to calculate separately spatial and temporal derivatives of the measured plasma and field parameters. Hence, no clear explanation about the nature of the plasma instabilities at the magnetopause and about the generation processes of the electromagnetic turbulence. Four-spacecraft CLUSTER mission allowed for the first time at middle and high latitudes a systematical estimation of the magnetopause speed and thickness, calculation of the magnetopause current density directly from the curl of the magnetic field, as well as of the wave-vector. This way, CLUSTER provided an effective instrument to investigate the magnetopause current sheet structure and related turbulence. In the present work we collect the results of the systematical analysis of the ambient plasma and magnetic field configurations and the proper magnetopause parameters using the full ion-distribution function and magnetic field measurements, collected by the four CLUSTER spacecraft during the 154 transitions from the magnetosheath into the magnetosphere at middle and high latitudes. A dependence of the magnetopause current sheet thickness on the parameters in the adjacent magnetosheath is checked. The structure of the magnetopause current sheet and the properties of the electric and magnetic fluctuations in its neighborhood is investigated. Basing on the results of this study the estimates of the вклад в effective diffusion coefficient due to the interaction particles with the electromagnetic waves at a thin and a thick magnetopause.

Содержание

Введение	16
1 Наблюдения четырьмя спутниками и методы анализа	19
1.1 Проект КЛАСТЕР	19
1.1.1 Магнитометр FGM (Fluxgate Magnetometer)	20
1.1.2 Спектрометр CIS (CLUSTER Ion Spectrometry)	22
1.1.3 Эксперимент EFW (Electric Field and Waves)	25
1.2 Методы анализа	26
1.2.1 Используемые системы координат	26
1.2.2 Нахождение системы координат магнитопаузы	27
1.2.3 Определение скорости и толщины магнитопаузы	29
1.2.4 Определение плотности тока магнитопаузы	29
1.2.5 Определение волнового вектора	30
2 Макроскопические характеристики магнитопаузы	33
2.1 Введение	33
2.2 Параметры магнитослоя и магнитосферы вблизи магнитопаузы . .	40
2.2.1 Параметры плазмы	47
2.2.2 Параметры магнитного поля	50
2.2.3 Баланс давлений	53
2.3 Собственные параметры магнитопаузы	56
2.3.1 Геометрия магнитопаузы	57
2.3.2 Скорость, толщина и ток магнитопаузы	62
2.3.3 Закон Ампера	63
2.3.4 Открытая и закрытая магнитопауза	66
2.4 Выводы	74
3 Электромагнитные флуктуации в окрестности магнитопаузы	77
3.1 Введение	77
3.2 Толщина магнитопаузы и плотность энергии магнитных флуктуаций	79
3.3 Строение тонкой магнитопаузы	82
3.3.1 Наблюдение тонкой магнитопаузы	82
3.3.2 Роль электрического поля в тонкой магнитопаузе	86
3.3.3 Диффузия за счет волн вблизи нижнегибридной частоты . .	87
3.3.4 Обсуждение	89
3.4 Строение толстой магнитопаузы	90
3.4.1 Наблюдение толстой магнитопаузы	90
3.4.2 Диффузия за счет волн вблизи ионно-циклотронной частоты	96
3.4.3 Обсуждение	97
3.5 Выводы	100
Положения, выносимые на защиту	102
Список публикаций	114
Благодарности	116

Список таблиц

1	Список асимптотических параметров магнитослоя и магнитосферы для переходов магнитослой-магнитосфера спутниками КЛАСТЕР в периоды с 02 февраля по 17 июня 2002г., при расстоянии между аппаратами 100 км, и с 01 июля 2003г. по 03 мая 2004г., при расстоянии между аппаратами 300 км.	37
2	Характеристики 52 токовых слоев магнитопаузы	56
3	16 интервалов для исследования магнитных флуктуаций в окрестности токового слоя магнитопаузы по данным высокого разрешения (с частотой опроса 22.4 или 67 Гц)	79

Список иллюстраций

1	Строение магнитосферы Земли (Crooker <i>et al.</i> , 1999).	16
2	КЛАСТЕР в чистой комнате во время монтажа (собственность Европейского космического агенства).	19
3	Орбита и конфигурация тетраэдра КЛАСТЕР в плоскости (X,Z) GSE (см. раздел 1.2.1), когда апогей орбиты находится в солнечном ветре. Расстояния между аппаратами увеличены в десятки раз. Силовые линии магнитного поля построены согласно модели Цыганенко (Tsyganenko, 1987) с индексом $K_p = 2$, местоположение магнитопаузы и ударной волны согласно Sibek <i>et al.</i> (1991) (давление солнечного ветра 2 нПа) и Peredo <i>et al.</i> (1995) (альфвеновское число Маха от 2 до 20) (Escoubet <i>et al.</i> , 1997).	20
4	Четверка аппаратов КЛАСТЕР во время пересечения магнитопаузы в воображении художника.	21
5	Расстояния между аппаратами КЛАСТЕР в период с января 2001 по июнь 2006гг.	22
6	Базовая схема феррозондового магнитометра.	23
7	Прибор Fluxgate Magnetometer (FGM) для аппаратов КЛАСТЕР, состоящий из устройства цифровой обработки (Digital Processing Unit DPU) слева и двух датчиков, соединенных с DPU кабелем (Balogh <i>et al.</i> , 1993, 1997, 2001).	24
8	Спектрометр CLUSTER Ion Spectrometer (CIS) на борту четверки аппаратов КЛАСТЕР способен измерять пространственные распределения ионов за один спин (4 секунды). CIS состоит из двух детекторов: ion Composition Distribution Function analyzer (CIS/CODIF) и Hot Ion Analyzer (CIS/HIA), а так же цифрового модуля обработки измерений Data Processing System (DPS) (Reme <i>et al.</i> , 1997; Rème <i>et al.</i> , 2001).	25
9	Схематическое изображение детектора CIS/HIA в разрезе.	26
10	Схематическое изображение детектора CIS/CODIF в разрезе.	27
11	Эксперимент The Electric Field and Wave (EFW) на борту четверки аппаратов КЛАСТЕР разработан для измерения электрического поля и плотности ионов (Gustafsson <i>et al.</i> , 1997; André <i>et al.</i> , 2001).	28
12	Тетраэдр из четырех аппаратов КЛАСТЕР и измеряемые компоненты плотности тока (Dunlop <i>et al.</i> , 2002b).	30
13	Схематическое изображение полуденно-меридианального сечения земной магнитосферы вблизи полярного каспа (показано только северное полушарие). Сплошная толстая линия отображает магнитопаузу, где она регулярно наблюдается. Штрихованная толстая линия показывает магнитопаузу над каспом, где она не формируется непрерывно.	36
14	Данные с аппарата КЛАСТЕР-1 за 2000-2006 г.г. наблюдения, приведенные в системе координат, где ось абсцисс совпадает с осью X в GSM системе координат, а по оси ординат отложены значения $\sqrt{Y^2 + Z^2}$, где Y и Z - соответствующие значения в GSM системе отсчета: (сверху вниз) среднее значение плотности, перпендикулярной температуры, параллельной температуры и модуля скорости протонов, а так же модуля магнитного поля.	41

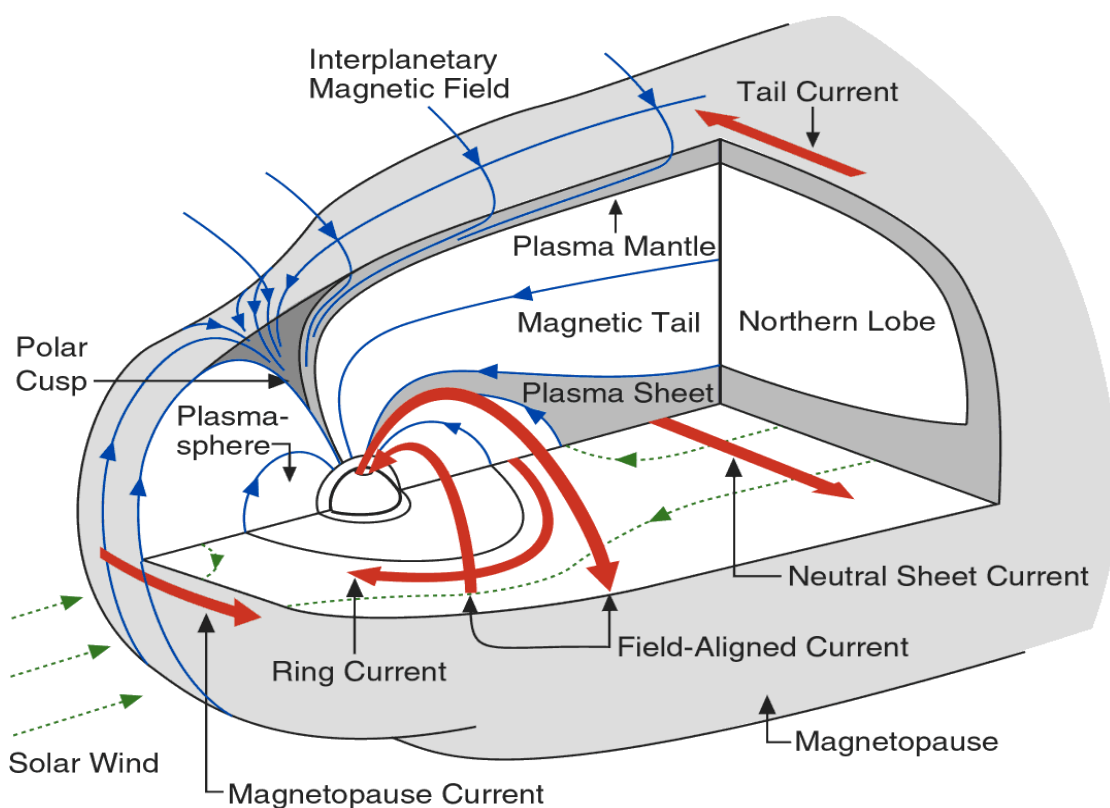
- 15 Пример перехода из дневной магнитосферы в магнитослой аппаратом КЛАСТЕР-4 10 мая 2002 г. в промежуток времени 01:00-07:00 UT. (сверху вниз) Плотность потока энергии протонов, плотность, температура и скорость протонов, напряженность магнитного поля. 42
- 16 Пример перехода из магнитосферной доли через касп и дневную магнитосферу в магнитослой аппаратом КЛАСТЕР-4 9 апреля 2002 г. в промежуток времени 0:00-7:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15. 43
- 17 Пример перехода из магнитослоя через касп в магнитосферную долю аппаратом КЛАСТЕР-4 25 марта 2002 г. в промежуток времени 06:00-09:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15. 44
- 18 Пример перехода из магнитослоя через касп и плазменную мантию в магнитосферную долю аппаратом КЛАСТЕР-4 13 марта 2002 г. в промежуток времени 9:00-12:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15. 45
- 19 Пример перехода из магнитосферной доли через плазменную мантию в магнитослой аппаратом КЛАСТЕР-4 30 марта 2002 г. в промежуток времени 12:30-14:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15. . . . 46
- 20 Карта 154 пересечений четырьмя аппаратами КЛАСТЕР различных типов границ между магнитослоем и магнитосферой. Типы границ перечислены в легенде. 48
- 21 Распределение плотности (сверху) и температуры (в середине) протонов, а так же модуля магнитного поля (внизу) со стороны магнитослоя (слева) и в магнитосферы (справа) для 154 переходов квартета КЛАСТЕР через пять групп границ между магнитослоем и магнитосферой. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром показаны интегральные распределения. 49
- 22 Распределение соотношения концентрации и температуры протонов магнитослоя и магнитосферы (вверху); распределения плазменного параметра β и альфвеновского числа Маха (внизу) для 154 переходов магнитослой-магнитосфера четверкой КЛАСТЕР через групп границ между магнитослоем и магнитосферой. Цветная кодировка соответствует рис. 20. Черным пунктиром показаны интегральные распределения. 51
- 23 Распределение отношений напряженностей (слева) и угла (справа) между направлениями магнитного поля в магнитослое и в магнитосфере для 154 переходов квартета КЛАСТЕР. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром изображено интегральное распределение. Оно также показано по отдельности для положительных (голубым) и отрицательных (желтым) B_z -компонент магнитного поля в магнитослое. 52
- 24 (сверху вниз) Распределение лобового, теплового и магнитного давления магнитослоя, и теплового и магнитного давления магнитосферы для 154 переходов квартета КЛАСТЕР. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром изображено интегральное распределение используя все пять видов переходов. 54

- 25 Распределение отношения давления в магнитослое к давлению в магнитосфере $(m_p n_p V_p^2 + n_p k_B T_p + B^2/2\mu_0)_{MSH} / (n_p k_B T_p + B^2/2\mu_0)_{MSP}$ (справа: лобовое давление плазмы магнитослоя $(m_p n_p V_p^2)_{MSH}$ умножено на $\cos^2(\phi)\cos^2(\theta)$, где ϕ и θ - магнитная широта и долгота соответственно) для 154 переходов квартета CLUSTER. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром - интегральное распределение. Зеленым пунктиром - переходы магнитослой-дневная магнитосфера, где тепловое и магнитное давления магнитосферы меньше. 55
- 26 Пример пересечения магнитопаузы с прилегающим пограничным слоем низкоширотного типа. Данные четырех аппаратов КЛАСТЕР 2 марта 2002 в период 03:20-03:40 UT (сверху вниз): L, M и N компоненты магнитного поля, скорость протонов, плотность протонов и температура протонов. 58
- 27 Пример пересечения магнитопаузы с прилегающим высокоширотным пограничным слоем "entry layer" с завершающей областью захвата "trapping boundary" (ТВ). Формат тот же, что на рис. 26 59
- 28 Пример пересечения магнитопаузы с прилегающей плазменной мантией. Формат тот же, что на рис. 26 60
- 29 Местонахождение (начало векторов) и направление скорости движения (окончание векторов) магнитопаузы в (X,Z), (Y,Z) и (X,Y) плоскостях GSM системы отсчета для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цвет указывает на различные типы прилегающего пограничного слоя. 61
- 30 Распределение углов между направлением магнитного поля со стороны магнитослоя и со стороны магнитосферы для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка согласно рис. 29. 62
- 31 (слева направо, сверху вниз) Распределение скоростей в км/с, толщин в км, толщин в Ларморовских радиусах теплового протона магнитослоя ρ_p и максимальных амплитуд тока внутри токового слоя магнитопаузы для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует рис. 29 64
- 32 Диаграмма разброса безразмерной толщины магнитопаузы $\beta L_B / \rho_p$ в зависимости от угла между направлением магнитного поля со стороны магнитослоя и со стороны магнитосферы для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует легенде рис. 29. 65
- 33 Диаграмма разброса толщины магнитопаузы в зависимости от величины параметра β (отношения теплового давления к магнитному) для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует рис. 29 (Рапов *et al.*, 2007). 65
- 34 Диаграммы разброса среднего значения J_M -компоненты плотности тока внутри токового слоя магнитопаузы в зависимости от скачка в B_L -компоненте магнитного поля (вверху слева) и от толщины токового слоя магнитопаузы L_B (вверху справа), а так же распределение величины $\mu_0 \langle J_M \rangle L_B / \Delta B_L$ для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует рис. 29. 67

35	Данные четырех аппаратов КЛАСТЕР (см. легенду вверху слева) во время пересечения магнитопаузы 16 июня 2002 г. в период 00:55:00 - 00:56:00 UT: L, M и N компоненты магнитного поля; модуль магнитного поля; угол проекции вектора магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы; L, M и N компоненты тока (см. легенду); плотность ионов; L, M и N компоненты скорости ионов; температура ионов. Внизу также представлен пространственный масштаб.	68
36	Годографы магнитного поля (вверху), скорости ионов (в середине) и тока (внизу) в (L,M)-плоскости (слева) и в (L,N)-плоскости (справа) во время пересечения магнитопаузы, представленной на рис. 35	69
37	То же, что на рис. 35 во время пересечения магнитопаузы 10 мая 2002 г. в период 04:26:35 - 01:27:05 UT	70
38	То же, что на рис. 36 во время пересечения магнитопаузы, представленной на рис. 37	71
39	То же, что на рис. 35 во время пересечения магнитопаузы 21 февраля 2004 г. в период 01:21:30 - 01:22:30 UT	72
40	То же, что на рис. 36 во время пересечения магнитопаузы, представленной на рис. 39	73
41	Интегральные энергетические спектры флуктуаций магнитного поля в B_L (слева), B_M (в середине) и B_N (справа) компонентах полученные с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Спектры представлены для 16 интервалов, расположенных со стороны магнитослоя от токового слоя магнитопаузы из таблицы 3. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в км.	80
42	То же, что на рисунке 41. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в ρ_p	80
43	Интегральные спектры плотности флуктуаций магнитного поля в B_L (слева), B_M (в середине) и B_N (справа) компонентах полученные с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Спектры представлены для 16 интервалов, расположенных со стороны магнитосферы от токового слоя магнитопаузы из таблицы 3. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в км.	81
44	То же, что на рисунке 41. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в ρ_p	81
45	Данные четырех аппаратов КЛАСТЕР 30 март 2002 г. в промежуток времени 13:11:40-13:11:55 UT. (сверху вниз) LMN компоненты магнитного поля, модуль магнитного поля, $\arctan(B_L/B_M)$, тангенциальная (черным) и нормальная (желтым) компоненты плотности тока, E_x -компонента электрического поля (примерно вдоль X_{GSE}), плотность протонов, масштаб.	83
46	Годографы магнитного поля (с частотой опроса 66 Гц), скорости (с частотой опроса 0.25 Гц) и плотности тока в плоскости токового слоя магнитопаузы 30 марта 2002 г. в промежуток времени 13:11:40-13:11:55 UT.	84
47	Нормальные компоненты \mathbf{E} (пурпурным), $-\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (черным) и $\frac{1}{ne}\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ (голубым) членов обобщенного закона Ома, а так же сумма $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (зеленым) для аппаратов КЛАСТЕР-3 и -4 во время последовательного пересечения трех токовых слоев магнитопаузы.	85

- 48 (слева) Спектральная плотность энергии электрических и магнитных флуктуаций, наблюдаемая внутри токового слоя 30 марта 2002 г. в промежуток времени 13:11:44-13:11:48 UT. (справа) Отношение энергии флуктуаций в электрическом поле к энергии флуктуаций в магнитном поле за тот же промежуток времени. 86
- 49 Нормальная компонента векторного произведения флуктуаций магнитного поля и тока в диапазоне частот 1-67/2 Гц (вверху) и 4-67/2 Гц (внизу) для четырех аппаратов КЛАСТЕР (см. легенду для цветной кодировки). 88
- 50 Данные квартета КЛАСТЕР (см. легенду для цветной кодировки) 10 мая 2002 г. в промежуток времени 04:26:35-04:27:05 UT: L, M и N компоненты магнитного поля; модуль магнитного поля; направление магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы); плотность протонов. 92
- 51 Эволюция плотности энергии флуктуаций в B_L (вверху), B_M (в середине) и B_N (внизу) компонентах магнитного поля, измеренного КЛАСТЕР-4 10 мая 2002 г. в промежуток времени 04:26:35-04:27:05 UT. Протонно-циклотронная частота f_{pc} , скорректированная на минимальный и максимальный сдвиг Доплера, обозначена черным (см. легенду). 93
- 52 Амплитуда восстановленного волнового вектора (вверху) и угол между волновым вектором и нормалью к токовому слою (внизу). 95
- 53 Схематическое изображение конфигурации магнитного поля с двух сторон магнитопаузы и направления распространения волны. 95
- 54 Нормальная компонента векторного произведения флуктуаций магнитного поля тока в диапазоне частот между 0.4 и 2 Гц 10 мая 2002 г. в промежуток времени 4:26:35-4:27:05 UT квартетом КЛАСТЕР. Цветная кодировка расшифрована в легенде рисунка. Пунктиром показано усредненное в окне шириной в 1 сек. значение $(\delta j \times \delta B)_N$ для КЛАСТЕР-4, умноженное на коэффициент 10 для лучшей видимости. 96
- 55 Поток протонов измеренный инструментом CIS/ CODIF на борту КЛАСТЕР-4 10 мая 2002 г. (сверху) и распределение направления движения протонов (с энергиями 150-800 эВ) по отношению к направлению вектора магнитного поля (внизу) в промежуток времени 4:26:30-4:27:30 UT. Вертикальные линии разделяют области 1 (магнитосфера), 2 (внешний разреженный пограничный слой), 3 (внутренний плотный пограничный слой), 4 (токовый слой), 5 (магнитопауза) и 6 (магнитослой). 98

Введение

Рис. 1: Структура магнитосферы Земли (Crooker *et al.*, 1999).

Актуальность темы

Первые односпутниковые космические эксперименты, запущенные для изучения физических явлений в плазме Солнечной системы, открыли солнечный ветер, переходные области (магнитослои), компоненты планетных магнитосфер (см. рис. 1). Кроме того, эти эксперименты показали, что разные плазменные области разделены разрывами, например, в виде ударных волн, магнитопауз или плазмапауз.

Вместе с тем, односпутниковые эксперименты выявили сильные флуктуации параметров плазмы и электромагнитного поля во многих исследуемых областях. К сожалению, по измерениям в одной точке пространства в данный момент времени невозможно разделить пространственные вариации параметров от временных. Таким образом, односпутниковые эксперименты не дают определять частные производные измеряемых параметров. Малочисленные двухспутниковые наблюдения позволили определять пространственные производные только в одном измерении - в проекции на линию, соединяющую два спутника. Для изучения внешней границы магнитосферы Земли - магнитопаузы - и связанных с ней физических процессов это означало неопределенность в оценке скорости и толщины магнитопаузы, а также плотности тока в токовом слое магнитопаузы. Кроме того, нельзя было определить, являются ли флуктуации электромагнитного поля на магнитопаузе волнами или это характерная структура магнитопаузы.

Запуск Европейским космическим агентством в 2000 г. четырех идентичных аппаратов КЛАСТЕР (CLUSTER) (<http://clusterlaunch.esa.int/>), образующих тетраэдр, и собранные ими данные на разных расстояниях между спутниками впервые позволили разделять пространственные и временные флуктуации моментов функций распределения плазмы и электромагнитного поля на разных масштабах, систематически определять скорость и толщину магнитопаузы, полный вектор плотности тока, проходящего через объем, заключенный внутри граней тетраэдра КЛАСТЕР, а также величину и направление волнового вектора возмущений в электромагнитном поле на частотах до 2 Гц¹. Таким образом, КЛАСТЕР предоставляет принципиально новые возможности, в частности, для изучения физических процессов, связанных с внешней границей магнитосферы Земли.

Цель работы

Целью диссертации является исследование по данным четырех аппаратов КЛАСТЕР на средних и высоких широтах магнитосферы Земли:

- параметров плазмы и магнитного поля в окрестности магнитопаузы,
- ориентации, скорости, толщины и плотности тока магнитопаузы,
- структуры магнитопаузы,
- свойств электромагнитной турбулентности в окрестности магнитопаузы,
- механизмов проникновения плазмы магнитослоя через магнитопаузу.

Научная новизна

Результаты исследования параметров плазмы и магнитного поля в окрестности магнитопаузы, для получения которых не требовались наблюдения несколькими аппаратами, получены впервые статистически достоверным образом, то есть в виде функций распределения соответствующих величин.

Результаты диссертации, которые могли быть получены только с привлечением многоспутниковых методов анализа, являются новыми.

Научная и практическая ценность работы

Исследование толщины магнитопаузы показало необходимость пересмотра имеющихся моделей токового слоя между двумя замагниченными плазмами, основанных на линейных кинетических эффектах, которые предсказывают, что толщина слоя должна быть порядка ионного ларморовского радиуса. В новые модели, вероятно, должны быть включены нелинейные кинетические эффекты, которые приводят к переносу ионов через токовый слой за счет взаимодействия волна-частица, что, возможно, позволяет расширить токовый слой магнитопаузы.

Регулярное обнаружение пересечений магнитопаузы, где изменение направления магнитного поля происходит на масштабах, в несколько раз меньших градиента основной компоненты магнитного поля, говорит о необходимости пересмотра подхода к определению толщины токового слоя магнитопаузы. За толщину следует

¹Ограничение по частоте зависит от расстояния между аппаратами. При длине волны меньше этого расстояния появляется неоднозначность в определении волнового вектора.

принимать масштаб изменения направления магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы.

Оценки коэффициентов диффузии протонов магнитослоя в магнитосферу за счет взаимодействия волна-частица из наблюдений вблизи нижнегибридной частоты и протонно-циклотронной частоты, найденные из амплитуд флуктуаций магнитного поля и плотности тока, на два порядка превосходят квазилинейные оценки. Полученные коэффициенты диффузии достаточно велики для объяснения существования части пограничных слоев у магнитосферной границы магнитопаузы с наблюдаемыми градиентами плотности.

Результаты диссертации открывают возможность корректной постановки задачи для проведения серии численных экспериментов с целью систематического изучения возникновения плазменных неустойчивостей на токовом слое магнитопаузы Земли. Ошибка в постановке задачи равна сумме инструментальных погрешностей в данных и погрешностей методов анализа.

Результаты диссертации могут быть использованы при планировании и, далее, напрямую сопоставлены с результатами четырехспутникового проекта NASA Magnetospheric Multiscale Mission (<http://stp.gsfc.nasa.gov/missions/mms/mms.htm>), старт которого запланирован в 2013 г, а также в подготовке предложения ESA по запуску 12-спутникового проекта Cross-Scale (<http://www.cross-scale.org/>). В частности, автор диссертации считает необходимым внести в программу интервал наблюдений с расстояниями между спутниками от сотен метров до нескольких километров. Это обеспечило бы возможность изучения дисперсионных свойств электростатических флуктуаций на нижнегибридной частоте вплоть до 100 Гц.

Апробация работы

Результаты диссертации опубликованы в статьях, прошедших процедуру реферирования квалифицированными в отрасли специалистами международного уровня в журналах РФ, ЕС и США.

Кроме того, результаты диссертации представлены устно во время проведения летней школы "Методы анализа турбулентной плазмы" (Analysis Techniques for Turbulent Plasmas) в 2004 г., на ассамблее Европейского геофизического союза (European Geophysical Union, EGU) в 2005 г., на конференциях Немецкого физического общества (Deutsche Physikalische Gesellschaft, DPG) в 2005 и 2006 г.г., на ассамблее международного Комитета по космическим исследованиям (Committee on Space Research, COSPAR) в 2006 г., а так же на семинарах ИКИ РАН и MPS.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации, были получены лично автором диссертации при поддержке научных руководителей и других соавторов публикаций на основе данных приборов, которые были спроектированы, изготовлены, юстированы и размещены на борту четырех аппаратов КЛАСТЕР группами разработчиков инструментов.

1 Наблюдения четырьмя спутниками и методы анализа

1.1 Проект КЛАСТЕР



Рис. 2: КЛАСТЕР в чистой комнате во время монтажа (собственность Европейского космического агентства).

Четыре идентичных спутника КЛАСТЕР (Escoubet *et al.*, 1997) - первый из многоспутниковых проектов, задачей которого является изучение процессов, происходящих в солнечном ветре, на ударной волне, магнитопаузе, в полярных каспах и авроральных областях, а так же в хвосте магнитосферы Земли. После неудачного запуска ракетой-носителем Ariane-5 в июне 1996 г., КЛАСТЕР был наконец выведен на околоземную орбиту двумя ракетами-носителями Союз с установленными

разгонными блоками Фрегат с космодрома Байконур 16 июля и 09 августа 2000 г. Пара аппаратов во время монтажа изображена на рис. 2. Четыре аппарата были выведены на эллиптическую полярную орбиту с перигеем 19000 км (~ 3 земных радиуса) и апогеем 119000 км (~ 19 земных радиусов) (см. рис. 3). Они образуют тетраэдр с ребрами длиной от ~ 100 до ~ 10000 км (см. рис. 4 и 5).

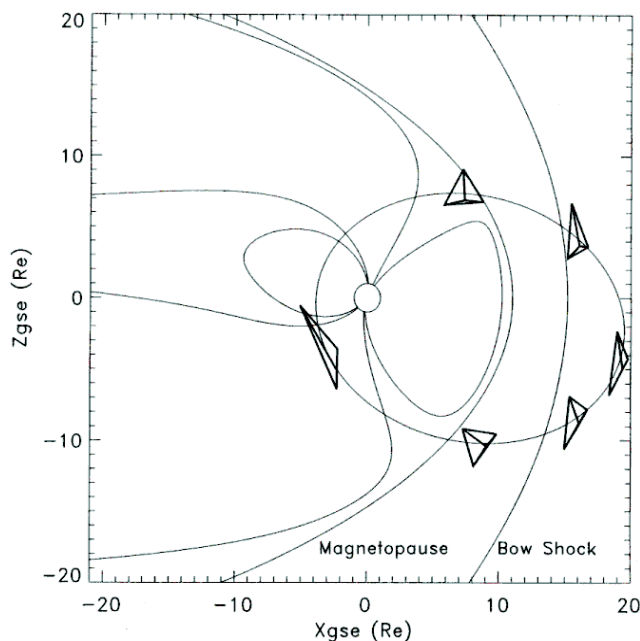


Рис. 3: Орбита и конфигурация тетраэдра КЛАСТЕР в плоскости (X,Z) GSE (см. раздел 1.2.1), когда апогей орбиты находится в солнечном ветре. Расстояния между аппаратами увеличены в десятки раз. Силовые линии магнитного поля построены согласно модели Цыганенко (Tsyganenko, 1987) с индексом $K_p = 2$, местоположение магнитопаузы и ударной волны согласно Sibeck *et al.* (1991) (давление солнечного ветра 2 нПа) и Peredo *et al.* (1995) (альфвеновское число Маха от 2 до 20) (Escoubet *et al.*, 1997).

Период обращения спутников составляет 57 часов. На каждом из аппаратов установлен идентичный набор инструментов: FGM (Fluxgate Magnetometer), EDI (Electron Drift Instrument), ASPOC (Active Spacecraft Potential Control experiment), STAFF (Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation experiment), EFW (Electric Field and Wave experiment), DWP (Digital Wave Processing experiment), WHISPER (Waves of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation experiment), WBD (Wide Band Data instrument), PEACE (Plasma Electron And Current Experiment), CIS (КЛАСТЕР Ion Spectrometry experiment), RAPID (Research with Adaptive Particle Imaging Detectors). В рамках данной диссертации мы использовали измерения магнитного поля инструментом FGM, функций распределения ионов инструментом CIS и электрического поля инструментом EFW. Краткие описания этих инструментов изложены ниже.

1.1.1 Магнитометр FGM (Fluxgate Magnetometer)

Феррозондовые магнитометры - один из трех типов магнитометров (существуют так же магнитометры индукционного типа и механические торсионные магнитометры), который сочетает в себе качества, необходимые для прибора, установленного на космический аппарат: простую конструкцию, малую массу и высокую чув-

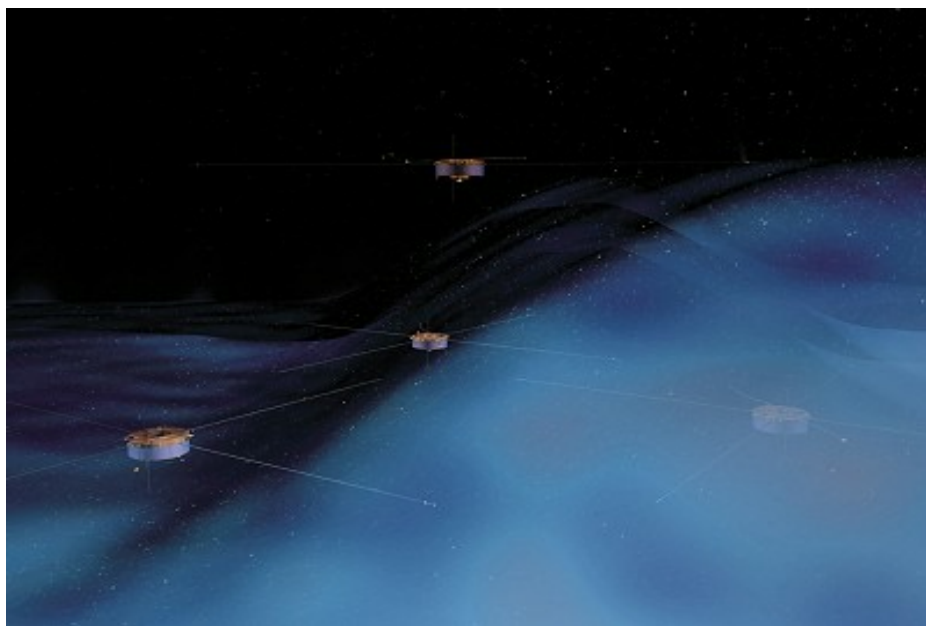


Рис. 4: Четверка аппаратов КЛАСТЕР во время пересечения магнитопаузы в воображении художника.

ствительность.

Базовая схема феррозондового магнитометра представлена на рис. 6. Магнитометр состоит из стержневого ферромагнитного сердечника и находящихся на нем двух катушек: катушки возбуждения, питаемой переменным током, и измерительной (сигнальной) катушки. В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под действием переменного магнитного поля, создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного потока, вызванное перемагничиванием сердечника по симметричной характеристической кривой, индуцирует в сигнальной катушке эдс, изменяющуюся по гармоническому закону. Уравнение характеристической кривой может быть записано в виде

$$B(H(t)) = 3H(t) - H^3(t), \quad (1)$$

где $H(t)$ - возбуждающее магнитное поле в момент времени t . Если одновременно на сердечник действует измеряемое постоянное или слабо меняющееся магнитное поле

$$H(t) = H_{ext} + h \sin(\omega t), \quad (2)$$

то кривая перемагничивания изменяет свои размеры и форму и становится несимметричной. Подставив (2) в (1) и продифференцировав полученное выражение по времени мы получим индуцированную эдс на сигнальной катушке:

$$V \sim \frac{\delta B}{\delta t} = 3h(1 - H_{ext}^2 - \frac{1}{4}h^2)\omega \cos(\omega t) - 3H_{ext}h^2\omega \sin(2\omega t) + \frac{3}{4}h^3\omega \cos(3\omega t). \quad (3)$$

Появляются высшие гармонические составляющие эдс, величина которых пропорциональна напряженности измеряемого поля, и которые отсутствуют при сим-

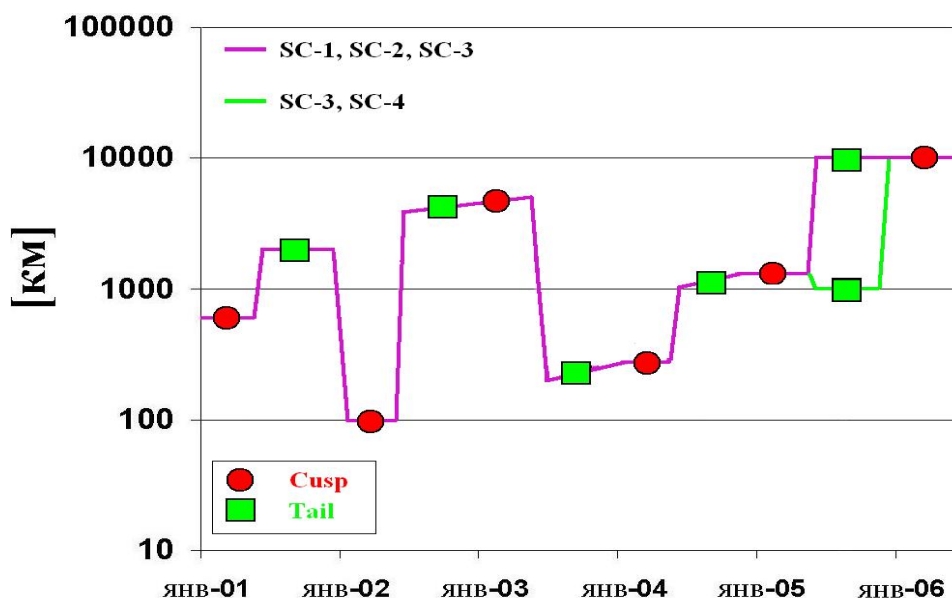


Рис. 5: Расстояния между аппаратами КЛАСТЕР в период с января 2001 по июнь 2006гг.

метричном цикле перемангничивания.

Как правило, феррозондовый магнитометр состоит из двух сердечников с катушками, которые соединены так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются. Тем самым упрощается измерительная аппаратура и повышается чувствительность магнитометра. Наиболее распространенные феррозондовые установки имеют следующие основные узлы: генератор переменного тока, питающий обмотку возбуждения, фильтр для нечетных гармонических составляющих эдс, подключенный на выходе измерительной катушки, усилитель четных гармоник и выходной измерительный прибор.

Подробное описание магнитометров, установленных на аппаратах КЛАСТЕР дано в работах Balogh *et al.* (1993, 1997). В работе Balogh *et al.* (2001) приведены первые измерения магнитного поля, осуществленные на борту КЛАСТЕР. На рис. 7 показан снимок одного из четырех приборов FGM на борту КЛАСТЕР. FGM состоит из двух детекторов и цифрового блока обработки данных. В каждом из детекторов имеется три, описанных выше, магнитометра, ферромагнитные сердечники с катушками которых ориентированы так, что их оси симметрии расположены ортогонально друг-другу, чтобы определять три компоненты вектора магнитного поля. FGM способен измерять магнитное поле с ошибкой менее 8 нТ с частотой опроса до 67 Гц.

1.1.2 Спектрометр CIS (CLUSTER Ion Spectrometry)

Эксперимент Ion Spectrometry (Reme *et al.*, 1997; Rème *et al.*, 2001) на борту КЛАСТЕР состоит из детектора горячих ионов (Hot Ion Analyzer, HIA), время-пролетного детектора состава и функции распределения плазмы (COmposition and DIstribution Function analyser, CODIF), а так же бортового цифрового устройства обработки данных (Data Processing System, DPS) (см. рис. 8). Оба детектора определяют скорость влетающих ионов по отклонению их траектории в электрическом поле.

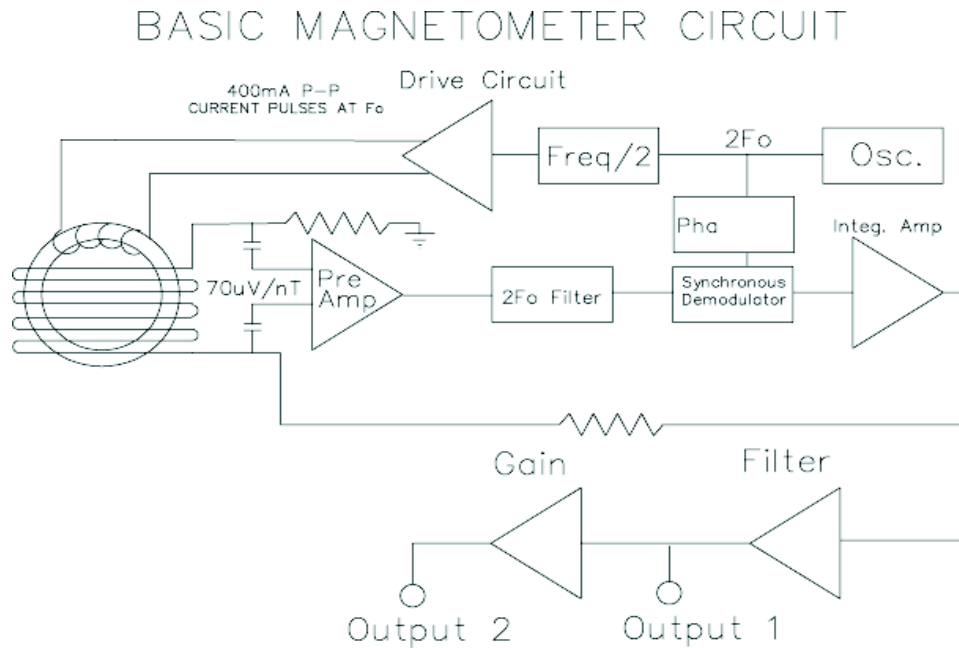


Рис. 6: Базовая схема феррозондового магнитометра.

Детектор НИА (см. рис. 9) способен измерять интегральные функции распределения по скоростям за один спин аппарата КЛАСТЕР (4 сек.) для всех типов ионов, обладающих энергиями от 5 до 32 кэВ на заряд, с угловым разрешением 5.6×5.6 градуса.

Детектор CODIF (см. рис. 10). способен измерять полные пространственные функции распределения по скоростям за один спин аппарата отдельно для ионов H^+ , He^+ , He^{2+} , O^+ , обладающих энергиями от 0.03 до 38 кэВ на заряд, со средним угловым разрешением 11.2×22.5 градуса. Для дискретного измерения функций распределения скоростей ионов с разной массой CODIF ускоряет ионы с уже измеренной энергией, внешней разностью потенциалов $U_{acc} = 25$ кВ. При попадании ионов на установленную углеродную фольгу выбиваются электроны, которые движутся со скоростью в $\sqrt{m_i/m_e}$ раз быстрее, чем ионы. Таким образом, эмитированные электроны, попав на установленную далее (на расстоянии $d=3$ см от углеродной фольги) чувствительную пластину датчика дают сигнал "старт", а прилетевшие за ними ионы дают сигнал "стоп". Зная время τ пролета иона между моментами времени "старт" и "стоп" и длину пролета d , а так же уже измеренное значение отношения энергии иона E к заряду можно определить отношение массы иона m к заряду q :

$$\frac{m}{q} = 2\left(\frac{E}{q} + eU_{acc}\right) / \left(\frac{d}{\tau}\right)^{-2} \alpha, \quad (4)$$

где e - элементарный заряд, α - поправка, вносимая потерей энергии на угольной фольге (около $3 \mu\text{г}/\text{см}^2$).

Имея измерения функции распределения частиц по скоростям $f(v, x, t)$ можно посчитать ее моменты

$$M_n(x, t) = \int f(v, x, t) v^n d^3v, \quad (5)$$



Рис. 7: Прибор Fluxgate Magnetometer (FGM) для аппаратов КЛАСТЕР, состоящий из устройства цифровой обработки (Digital Processing Unit DPU) слева и двух датчиков, соединенных с DPU кабелем (Balogh *et al.*, 1993, 1997, 2001).

где $M_n(x, t)$ - момент порядка n , а d^3v - бесконечно малый элемент объема в пространстве скоростей. Для описания состояния плазмы достаточно знать моменты порядка $n=0, 1, 2$ и 3 . Момент функции распределения частиц по скоростям нулевого порядка есть плотность частиц

$$N(x, t) = \int f(v, x, t) d^3v. \quad (6)$$

Момент первого порядка, поделенный на плотность есть скорость частиц

$$V_b(x, t) = \int v f(v, x, t) d^3v. \quad (7)$$

Момент второго порядка образует тензор плотности

$$P(x, t) = m \int (v - V_b)(v - V_b) f(v, x, t) d^3v, \quad (8)$$

где m - масса частиц. Из тензора давления можно получить температурный тензор

$$T(x, t) = \frac{P}{3k_B N} = \frac{m}{3k_B N} \int (v - V_b)(v - V_b) f(v, x, t) d^3v, \quad (9)$$

где k_B - постоянная Больцмана. Значение давления и температуры в изотропной плазме есть след соответствующего тензора. Наконец, момент третьего порядка образует вектор потока энергии

$$Q(x, t) = \frac{m}{2} \int (v - V_b)(v - V_b)(v - V_b) f(v, x, t) d^3v \quad (10)$$



Рис. 8: Спектрометр CLUSTER Ion Spectrometer (CIS) на борту четверки аппаратов КЛАСТЕР способен измерять пространственные распределения ионов за один спин (4 секунды). CIS состоит из двух детекторов: ion Composition Distribution Function analyzer (CIS/CODIF) и Hot Ion Analyzer (CIS/HIA), а так же цифрового модуля обработки измерений Data Processing System (DPS) (Reme *et al.*, 1997; Rème *et al.*, 2001).

1.1.3 Эксперимент EFW (Electric Field and Waves)

Эксперимент EFW (Gustafsson *et al.*, 1997; André *et al.*, 2001) способен измерять компоненты постоянной составляющей электрического поля, лежащие в плоскости вращения аппаратов КЛАСТЕР, в диапазоне от 0.3 до 700 мВ/м с частотой опроса до 10000 Гц. Кроме того, EFW может измерять переменную составляющую электрического поля в диапазоне от 1 до 10^4 мкВ/м с частотой опроса 50-8000 Гц. Дополнительно, инструмент EFW способен измерять флуктуации плотности плазмы с уровнем от 1 до 50% с частотой опроса до 10000 Гц.

Обширное описание инструментов, аналогичных EFW, а так же метода измерения читатель может найти в работе Pedersen *et al.* (1984). В состав EFW входят две пары детекторов, которые расположены на в вершинах мачт и изолированы от них. Четыре мачты расположены на кайме аппарата через 90 градусов друг от друга. Размах каждой противоположно установленной пары мачт составляет 88 метров. Таким образом каждая пара детекторов разнесена на расстояние, намного превышающее дебаевский радиус

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}}, \quad (11)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, а T_e - температура электронов.

Детекторы EFW (см. рис. 11), выполнены из проводящего материала и имеют сферическую форму. Таким образом, каждый детектор обладает собственным потенциалом, который определяется условием, при котором суммарный ток в сфере равен нулю. На практике оно означает равенство между количеством выбитых фотоэлектронов и количеством электронов из обтекающей плазмы, которые столкну-

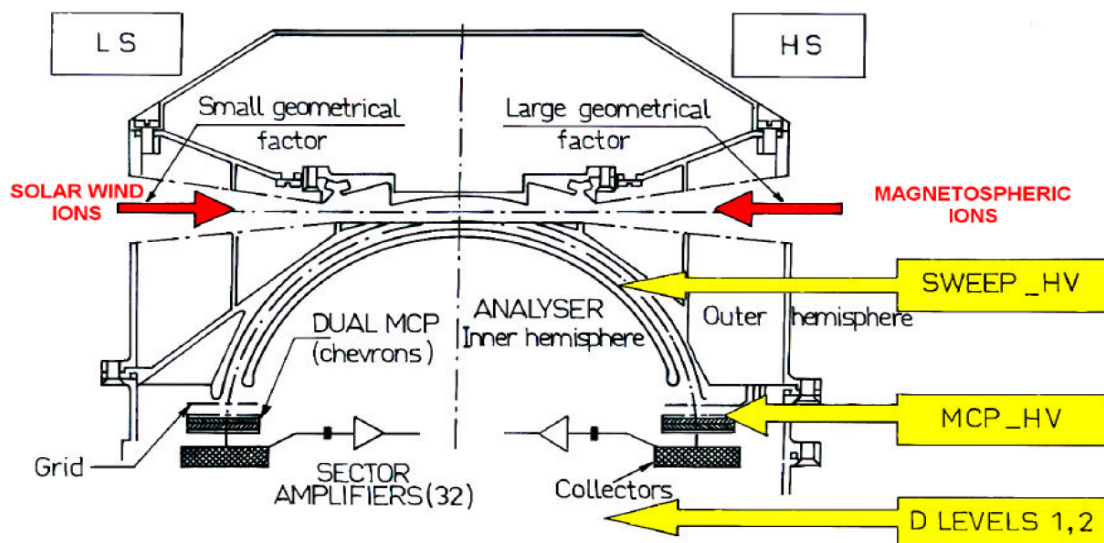


Рис. 9: Схематическое изображение детектора CIS/HIA в разрезе.

лись с детектором. При этом, ионными токами можно пренебречь. В присутствии внешнего электрического поля, разность потенциала между двумя противоположно расположенными детекторами, которая модулирована вращением аппарата вокруг собственной оси симметрии, используется для определения модуля компоненты электрического поля, коллинеарной радиус-вектору, соединяющего два детектора.

1.2 Методы анализа

Сборник статей, обобщающий методы анализа данных многоспутниковых измерений, которые предполагалось использовать в рамках проекта КЛАСТЕР могут быть найдены в сборнике под редакцией Paschmann and Daly (1998). Здесь мы обсудим лишь некоторые из методов, которые использовались в работе над диссертацией

1.2.1 Используемые системы координат

Читатель может найти определения систем координат, используемых в солнечно-земной физике, а так же матрицы для их взаимного преобразования в работах Russell (1971) и Hargood (1992), где рассмотрены геоцентрированные системы координат, и в работе Fränz and Harper (2002), где рассмотрены солнечные системы координат.

В данной диссертации используются три системы координат:

- Geocentric Solar Ecliptic Coordinates (GSE). Начало отсчета системы координат GSE находится в центре Земли. Ось X указывает на Солнце. Ось Z перпендикулярна плоскости эклиптики и направлена на север. Ось Y дополняет базис XYZ до правой тройки векторов.
- Geocentric Solar Magnetospheric Coordinates (GSM). Начало отсчета системы координат GSM находится в центре Земли. Ось X указывает на Солнце. Ось

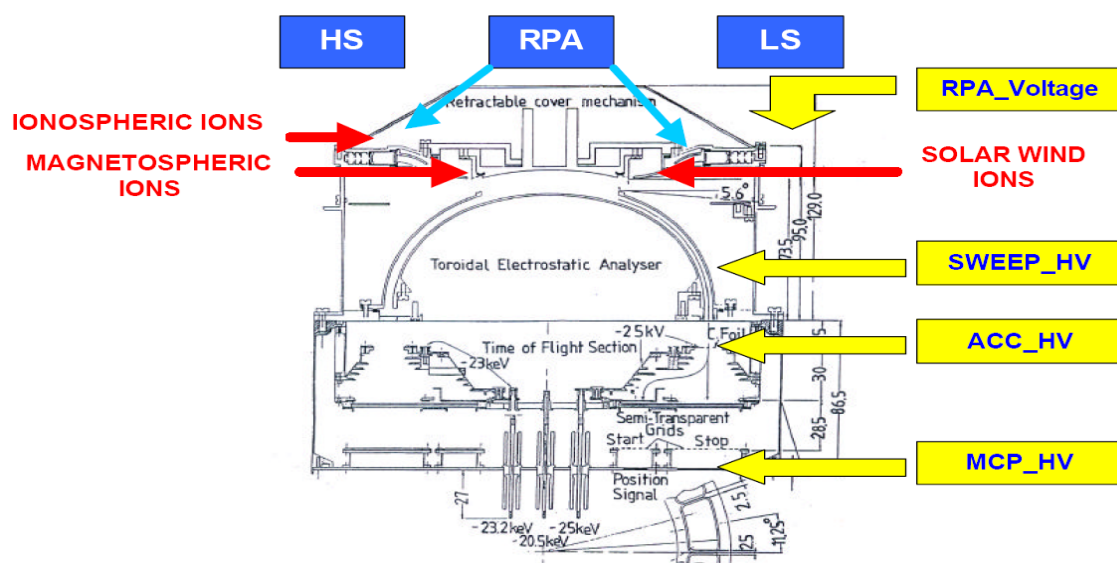


Рис. 10: Схематическое изображение детектора CIS/CODIF в разрезе.

Y отложена перпендикулярно магнитному диполю Земли и указывает в сторону сумерек, чтобы ось Z , которая дополняет базис XYZ до правой тройки векторов, была направлена на север. Переход между GSE и GSM системами координат описан в Hargood (1992).

- Собственная система координат магнитопаузы. Оси собственной системы магнитопаузы обозначены в диссертации L , M и N . Система координат магнитопаузы всегда локальна и зависит от ориентации магнитопаузы в данной точке пространства. В этой системе координат ось N отложена вдоль направления минимума вариации магнитного поля при пересечении токового слоя магнитопаузы и направлен наружу магнитосферы. Таким образом, ось N перпендикулярна поверхности магнитопаузы. Ось L отложена вдоль направления минимума вариации магнитного поля при пересечении токового слоя магнитопаузы и указывает на север. Ось M дополняет базис LMN до правой тройки векторов. Базис собственной системы координат магнитопаузы всегда дан в диссертации относительно GSM системы координат. Чтобы преобразовать координаты вектора $(x;y;z)$ системы координат GSM в координаты $(l;m;n)$ собственной системы координат магнитопаузы, нужно умножить вектор $(x;y;z)$ на матрицу из базисных векторов LMN :

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_X & M_X & N_X \\ L_Y & M_Y & N_Y \\ L_Z & M_Z & N_Z \end{pmatrix} \quad (12)$$

1.2.2 Нахождение системы координат магнитопаузы

Для определения базиса собственной системы координат магнитопаузы, в диссертации использовался метод вариации магнитного поля Sonnerup and Scheible (1998). Направление нормали к токовому слою магнитопаузы N совпадает с направлением минимума вариации вектора магнитного поля B^m при пересечении

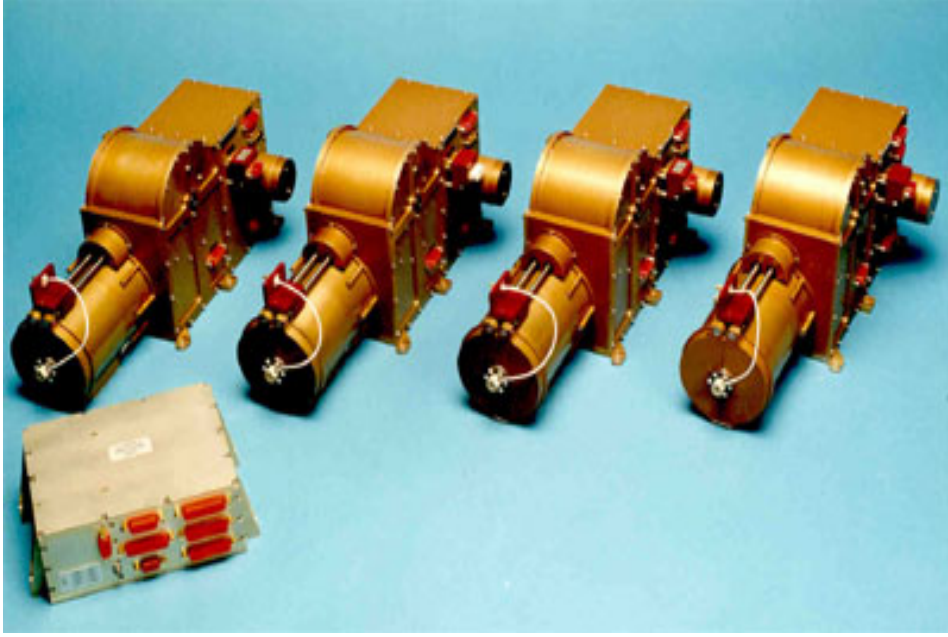


Рис. 11: Эксперимент The Electric Field and Wave (EFW) на борту четверки аппаратов КЛАСТЕР разработан для измерения электрического поля и плотности ионов (Gustafsson *et al.*, 1997; André *et al.*, 2001).

токового слоя магнитопаузы. Таким образом направление оси \mathbf{N} может быть определено путем подбора наименьшего значения величины σ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |(\mathbf{B}^m - \langle \mathbf{B} \rangle) \cdot \mathbf{N}|^2, \quad (13)$$

где

$$\langle \mathbf{B} \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{B}^m, \quad (14)$$

а

$$|\mathbf{N}|^2 = 1. \quad (15)$$

Таким образом задача сводится к решению системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta N_X} (\sigma^2 - \lambda(|\mathbf{N}|^2 - 1)) &= 0 \\ \frac{\delta}{\delta N_Y} (\sigma^2 - \lambda(|\mathbf{N}|^2 - 1)) &= 0 \\ \frac{\delta}{\delta N_Z} (\sigma^2 - \lambda(|\mathbf{N}|^2 - 1)) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Продифференцированная система уравнений (16) может быть записана в виде

$$\sum_{\nu=1}^3 M_{\mu\nu}^B n_\nu = \lambda n_\mu, \quad (17)$$

где ν обозначает компоненты X, Y и Z в декартовой системе координат (в диссертации всегда в системе координат GSM), а

$$M_{\mu\nu}^B \equiv \langle B_\mu B_\nu \rangle - \langle B_\mu \rangle \langle B_\nu \rangle \quad (18)$$

- матрица вариаций магнитного поля с собственными значениями λ_1 , λ_2 и λ_3 . Таким образом собственные вектора $M_{\mu\nu}^B$ ортогональны и образуют базис собственной системы координат магнитопаузы (\mathbf{L} ; \mathbf{M} ; \mathbf{N}).

Все, найденные методом вариации магнитного поля, собственные системы координат магнитопаузы были дополнительно проверены методом вариации величины $[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$. В этом случае направление нормали к токовому слою соответствует направлению максимума вариации величины $[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$. Заметим так же, что нормаль к токовому слою магнитопаузы дополнительно проверялась третьим методом, который описан в следующей секции.

1.2.3 Определение скорости и толщины магнитопаузы

Наиболее простой путь определения скорости движения плоского разрыва (например, ударной волны или магнитопаузы) в космической плазме был предложен в работе Russell *et al.* (1983). Зная расстояния между четырьмя аппаратами и времена детектирования разрыва на каждом из аппаратов, можно определить скорость разрыва V_N вдоль нормали $\mathbf{N} = (N_X; N_Y; N_Z)$ из соотношения

$$\begin{pmatrix} \Delta r_{13} \\ \Delta r_{23} \\ \Delta r_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_Z \end{pmatrix} = V_N \begin{pmatrix} \Delta t_{13} \\ \Delta t_{23} \\ \Delta t_{43} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где $\Delta r_{\alpha\beta}$ - расстояние между аппаратами α и β , а $\Delta t_{\alpha\beta}$ - разница во времени детектирования разрыва на паре аппаратов α и β .

С другой стороны, зная нормаль к магнитопаузе, по измерениям магнитного поля можно определить нормальные составляющие скорости V_N и ускорения A_N разрыва из уравнения (Dunlop *et al.*, 2002a):

$$\begin{pmatrix} \Delta r_{13} \\ \Delta r_{23} \\ \Delta r_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_Z \end{pmatrix} = V_N \begin{pmatrix} \Delta t_{13} \\ \Delta t_{23} \\ \Delta t_{43} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} A_N \begin{pmatrix} \Delta t_{13}^2 \\ \Delta t_{23}^2 \\ \Delta t_{43}^2 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

В диссертации толщина токового слоя магнитопаузы определена, как длина градиента в B_L компоненте вектора магнитного поля, то есть в компоненте вектора магнитного поля, коллинеарной направлению максимума вариации вектора магнитного поля при пересечении токового слоя магнитопаузы. Такой выбор был обусловлен важностью возможности прямого сравнения с результатами предыдущих работ по оценке толщины магнитопаузы. В в следующем разделе будет показано, однако, что примерно в половине случаев пересечения магнитопаузы основной токовый слой может быть сильно тоньше, чем длина градиента в B_L компоненте вектора магнитного поля.

1.2.4 Определение плотности тока магнитопаузы

Чтобы определить плотность тока на плоском токовом слое магнитопаузы, достаточно знать изменение магнитного поля и толщину токового слоя магнитопаузы. В случае, когда нам известна скорость магнитопаузы, касательные компоненты плотности тока магнитопаузы можно определить по измерениям магнитного поля с одного спутника:

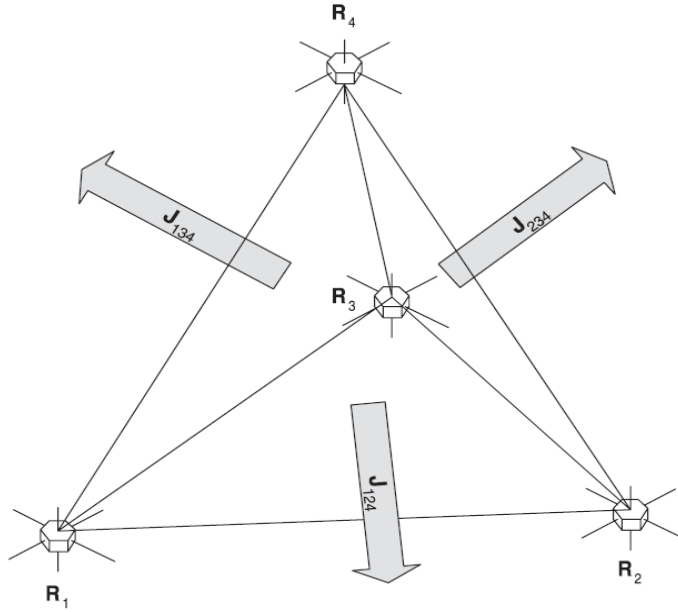


Рис. 12: Тетраэдр из четырех аппаратов КЛАСТЕР и измеряемые компоненты плотности тока (Dunlop *et al.*, 2002b).

$$\begin{pmatrix} j_L \\ j_M \\ j_N \end{pmatrix} = \frac{1}{\mu_0 V_N} \begin{pmatrix} -\frac{\Delta B_M}{\Delta t} \\ \frac{\Delta B_L}{\Delta t} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где V_N скорость токового слоя магнитопаузы вдоль собственной нормали.

В случае, когда имеются измерения магнитного поля с четырех аппаратов, можно измерить полный вектор плотности тока, проходящего через объем, заключенный между четырьмя гранями тетраэдра, который образуют четыре аппарата КЛАСТЕР. В этом случае отдельно считаются три компоненты плотности тока, проходящие через любые три (из четырех) грани тетраэдра, как показано на рис. 12. Каждая из трех компонент плотности тока находится путем вычисления пространственных производных магнитного поля в выражении

$$\mu_0 (\mathbf{j}_{\alpha\gamma\beta}, [\mathbf{r}_{\gamma\alpha} \times \mathbf{r}_{\gamma\beta}]) = (\Delta \mathbf{B}_{\gamma\alpha}, \mathbf{r}_{\gamma\beta}) - (\Delta \mathbf{B}_{\gamma\beta}, \mathbf{r}_{\gamma\alpha}), \quad (22)$$

где α, β и γ означают индексы аппаратов КЛАСТЕР, $\mathbf{r}_{\alpha\beta}$ - радиус-вектор, соединяющий аппараты α и β , $\Delta \mathbf{B}_{\alpha\beta}$ - разница в индукции магнитного поля, измеренной аппаратами α и β (Dunlop *et al.*, 2002b).

В диссертации применяются оба метода, в зависимости от ситуации.

1.2.5 Определение волнового вектора

С запуском четырех аппаратов КЛАСТЕР стало впервые возможно посчитать полный вектор распространения возмущения в плазме. Для этого в диссертации использовался метод определения сдвига фаз, который изначально применялся для нахождения вектора распространения возмущения в скалярном поле с использованием двух зондов и подробно описан в работе Veall *et al.* (1982) для случая, когда исследуемый сигнал может быть представлен в виде суммы плоских волн. Путем

заменой преобразования Фурье на преобразование вэйвлетов в алгоритме метода можно положить, что сигнал состоит из суммы волновых пакетов. Таким образом модифицированный метод был применен в работах Dudok de Wit *et al.* (1995) и Valikhin *et al.* (1997) для изучения дисперсионных свойств магнитных флуктуаций вблизи земной ударной волны, используя данные магнитного поля с пары аппаратов AMPTE-UKS и AMPTE-IRM.

Рассмотрим алгоритм метода определения сдвига фаз. Применим вэйвлетное преобразование с базисной функцией вэйвлета Морле к j -му отрезку данных одной из компонент магнитного поля $B(\vec{x}, t)$ длиной в половину всего временного интервала, на котором наблюдаются флуктуации.

$$B(\vec{x}, a, \tau) = \int B(\vec{x}, t) \frac{1}{\sqrt{a}} h^*\left(\frac{t - \tau}{a}\right) dt, \quad (23)$$

где

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{-2\pi j t} e^{-t^2/2}. \quad (24)$$

Для того, чтобы произвести хорошее усреднение на всем временном интервале, применяется обработка методом окна таким образом, что временные отрезки длиной в половину всего временного интервала сдвинуты M раз на N точек.

Взаимная спектральная плотность для каждого временного отрезка между двумя аппаратами может быть получена в этом случае, как

$$H^{(j)}(\chi, \omega) = B^{(j)*}(\vec{x}_1, a, \tau) B^{(j)}(\vec{x}_2, a, \tau) = C^{(j)}(\omega) + iQ^{(j)}(\omega), \quad (25)$$

где $\chi = |\vec{x}_1 - \vec{x}_2|$ - расстояние между двумя аппаратами, а C и Q вещественная и мнимая части взаимной спектральной плотности. Локальное волновое число для исследуемого отрезка j находится, как

$$K^{(j)}(\omega) = \frac{1}{\chi} \arctan \frac{Q^{(j)}(\omega)}{C^{(j)}(\omega)} \quad (26)$$

Функция арктангенс вносит периодичность в решение в точках $\pm 2\pi n/\chi$, где n - целое число. Локальный спектр в зависимости от волнового числа и частоты $S(K, \omega)$ может быть найден следующим образом:

$$S(K, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M I_{[0, \Delta K]}[K - K^{(j)}(\omega)] \times \\ \times \left\langle \frac{1}{2} B^{(j)*}(\vec{x}_1, a, \tau) B^{(j)}(\vec{x}_1, a, \tau) + B^{(j)*}(\vec{x}_2, a, \tau) B^{(j)}(\vec{x}_2, a, \tau) \right\rangle, \quad (27)$$

где

$$I_{[0, h]}(x) = \begin{cases} 1, & xh > 0 \\ 0, & xh \leq 0 \end{cases}. \quad (28)$$

Имея $S(K, \omega)$ для любых трех пар из четырех аппаратов, которые не лежат в одной плоскости, можно получить полный волновой вектор, например, в системе координат

$$\left(\frac{\vec{\chi}_{\alpha\beta}}{|\chi_{\alpha\beta}|}, \frac{\vec{\chi}_{\alpha\gamma}}{|\chi_{\alpha\gamma}|}, \frac{\vec{\chi}_{\alpha\delta}}{|\chi_{\alpha\delta}|} \right), \quad (29)$$

где $\vec{\chi}_{\alpha\beta}$ - радиус вектор соединяющий аппараты α и β .

Отметим, что существует альтернативный алгоритм, разработанный специально для группы из четырех аппаратов, в основе которого лежит так же определение сдвига фаз на разных парах аппаратов (Pincon and Lefeuvre, 1991; Motschmann *et al.*, 1995, 1996; Glassmeier *et al.*, 2001; Narita *et al.*, 2006). Отличие от метода определения сдвига фаз состоит в том, что $S(K, \omega)$ усреднена по всем компонентам поля и по всем парам аппаратов.

2 Макроскопические характеристики магнитопаузы

2.1 Введение

Внешняя граница магнитосферы Земли - магнитопауза - определяет скорость проникновения ионов солнечного ветра в магнитосферу. Возможно, что механизмы проникновения связаны с толщиной магнитопаузы. Любой магнитогидродинамический разрыв имеет бесконечно малую толщину. Существующие кинетические модели магнитопаузы, например модель (Chapman and Ferraro, 1930), предсказывают верхний предел толщины магнитопаузы порядка ларморовского радиуса теплового иона ρ_i . Такой предел обусловлен силой Лоренца, которая заворачивает движущийся в магнитном поле заряд по круговой орбите ларморовского радиуса.

Магнитопауза - это динамическая структура, которая постоянно находится в движении. Считается, что движение вызвано вариациями динамического давления солнечного ветра, или пересоединением силовых линий магнитного поля Земли с межпланетным магнитным полем (Song *et al.*, 1988). Кроме того, движение магнитопаузы может быть спровоцировано вариациями плотности на форшоке (Russell *et al.*, 1997). Таким образом, для оценки толщины магнитопаузы необходимо знать её скорость.

Уже измерения, сделанные одиночными аппаратами на низких широтах позволили делать грубые оценки скорости магнитопаузы используя различные изоцентрические методы анализа (Cahill and Amazeen, 1963; Holzer *et al.*, 1966; Cummings and Coleman, 1968; Aubry *et al.*, 1971; Kaufmann and Konradi, 1973; Gringauz *et al.*, 1974; Sonnerup and Ledley, 1979; Eastman and Hones, 1979; Eastman *et al.*, 1996). Эти исследования выявили, что скорость магнитопаузы в исследованных случаях пересечения достигала 60 км/с. Полученные значения толщины магнитопаузы простирались от 100 до более, чем 1700 км (один и десять ларморовских радиусов тепловых протонов ρ_p , соответственно).

Регулярное наблюдение магнитопаузы парами аппаратов ISEE и AMPTE (Elphic and Russell, 1979; Berchem and Russell, 1982b; Le and Russell, 1994; Phan and Paschmann, 1996) позволило делать систематические оценки скорости и толщины магнитопаузы на низких широтах. Результаты этих наблюдений расширили уже имеющиеся по наблюдениям одиночных спутников. Было получено, что магнитопауза на низких широтах может двигаться со скоростью от нескольких км/с до нескольких сотен км/с. Полученный отсюда диапазон толщин магнитопаузы простирается от 100 км до нескольких тысяч км.

Заметим, однако, что, имея в распоряжении измерения только с двух зондов, можно вычислить лишь проекцию скорости магнитопаузы на линию, соединяющую зонды. Таким образом, в этих исследованиях скорость магнитопаузы, а следовательно и толщина могли быть недооценены в тех случаях, когда нормаль к магнитопаузе была получена неверно.

Скорости и толщины магнитопаузы, а так же плотности тока в токовом слое магнитопаузы оценивались и на высоких широтах из наблюдений как одиночных аппаратов (Gringauz *et al.*, 1974; Vaisberg *et al.*, 1983), так и используя современные четырех-точечные данные миссии КЛАСТЕР (Haaland *et al.*, 2004a,b; Paschmann *et al.*, 2005; Dunlop and Balogh, 2005; De Keyser *et al.*, 2005; Sonnerup *et al.*, 2006; Panov *et al.*, 2006a,b). Однако, все эти исследования до сих пор не носили систематического характера. Скорости и толщины магнитопаузы, полученные для пересечений на высоких не выходят за рамки оценок сделанных при исследовани-

ях низкоширотной магнитопаузы. Анализ, проделанный в работе Paschmann *et al.* (2005) для 24 последовательных пересечений магнитопаузы (в каждом случае четырьмя аппаратами одновременно) для одного и того же перехода магнитослой-магнитосфера флотом КЛАСТЕР, проходя вдоль фланга магнитосферы, выявил медианную скорость магнитопаузы в тот день около 50 км/с, а медианное значение толщины 800 км. Кроме того, в перечисленных работах было показано, что плотность тока магнитопаузы в исследованных событиях варьировалась от нА/м² до 2-3 мкА/м² внутри необычайно тонкого токового слоя магнитопаузы (Panov *et al.*, 2006a).

Идеальная магнитопауза может быть описана тангенциальным или вращательным магнитогидродинамическим разрывом. Условия равновесия и устойчивости тангенциальной магнитопаузы исследовались в работах De Keyser and Roth (1997a,b, 1998a,b). В этих работах говорится, в частности, что не все скачки скорости допустимы для существования тангенциальной магнитопаузы.

Магнитопауза наблюдалась, как при малых углах между направлениями магнитных полей Земли и солнечного ветра (Paschmann *et al.*, 1990; Song *et al.*, 1993), так и при больших (Sonnerup *et al.*, 1990). Тем не менее, магнитопауза с четко наблюдаемым токовым слоем в магнитном поле детектировалась существенно чаще для больших углов (свыше 40 градусов) (Berchem and Russell, 1982b; Gosling *et al.*, 1990). Berchem and Russell (1982a) нашли, что магнитное поле вращается в основном в плоскости токового слоя магнитопаузы. Считается, что антипараллельные конфигурации магнитных полей с двух сторон магнитопаузы могут привести к магнитному пересоединению (Phan *et al.*, 1996; Phan and Paschmann, 1996). Магнитопауза, испытывающая пересоединение может быть описана вращательным разрывом который влечется вдоль плоскости магнитопаузы прочь от места пересоединения.

Замечено, что существует пограничный слой ионов со свойствами магнитослоя у магнитосферной стороны токового слоя магнитопаузы. В зависимости от местоположения, различают три типа пограничных слоев магнитопаузы. Магнитопауза у подсолнечной точки имеет низкоширотный пограничный слой (Haerendel *et al.*, 1978; Sonnerup, 1980). Такой вид пограничного слоя так же наблюдаем на флангах магнитосферы (Scholer and Treumann, 1997; Fedorov *et al.*, 2001). Несколько исследователей обнаружили особенно устроенный пограничный слой, прикрепленный к дневной магнитопаузе на высоких широтах (Heppner *et al.*, 1967; Frank, 1971; Hones *et al.*, 1972). На конце такого пограничного слоя существует так называемая область захвата ("trapping boundary") - токовый слой с ускоренно движущейся плазмой. Paschmann *et al.* (1976) назвал этот пограничный слой "входным слоем". Paschmann *et al.* (1976) и Haerendel *et al.* (1978) предположили, что он является частью полярного каспа у своей нижней границы. Для входного слоя характерны быстрые, по сравнению с локальными скоростями плазмы магнитослоя, плазменные потоки. Напротив, горловина каспа заполнена застойной плазмой с медленными и нерегулярными плазменными потоками. У кромки каспа со стороны магнитосферного хвоста образуется третий тип пограничного слоя магнитопаузы - плазменная мантия (Hones *et al.*, 1972; Rosenbauer *et al.*, 1975). Рис. 13 схематично отображает перечисленные выше области. Дополнительно на рисунке изображена черная и пурпурная область, в которых наблюдаются вперемешку признаки застойной плазма каспа с признаками входного слоя и плазменной мантии, соответственно. Введения этих смежных областей понадобится для анализа, который проделан в следующем разделе диссертации.

В области магнитослоя непосредственно над каспом взаимодействие магнитослоя с магнитосферой носит сильно турбулентный характер (Savin *et al.*, 2001, 2005b). Масштабы турбулентности не позволяют магнитопаузе формироваться непрерывно. В силу этого, в диссертации делается акцент на изучение магнитопаузы вне каспа. Больше о характере взаимодействия магнитослоя с магнитосферой в области полярного каспа может быть найдено в ряде других работ (Lundin, 1985; Savin *et al.*, 1998; Russell, 2000; Savin *et al.*, 2004; Lavraud *et al.*, 2005a,b; Dunlop *et al.*, 2005; Cargill *et al.*, 2005; Savin *et al.*, 2005a; Amata *et al.*, 2006; Savin *et al.*, 2006). Eastman *et al.* (2000) параметризовали положение входного слоя, каспа и плазменной мантии углом наклона магнитного диполя Земли и динамическим давлением в солнечном ветре.

С целью выяснения причины происхождения пограничного слоя магнитопаузы на высоких широтах Delcourt and Sauvaud (1998) провели численный эксперимент. Они выяснили, что после вливания плазмы магнитослоя в горловину каспа, она перемещается параллельно поверхности магнитопаузы в сторону хвоста, образуя, таким образом плазменную мантию. Fedorov *et al.* (2002), однако, пришел к заключению, что плазменная мантия могла стать следствием случайного спорадического пересоединения в областях магнитопаузы с большим углом поворота магнитного поля.

Выяснение свойств плазм и магнитных полей с двух сторон магнитопаузы, ориентации, движения, толщины и плотности тока токового слоя магнитопаузы важно для ответа вопрос, как о формировании и устойчивости магнитопаузы, так и о переносе ионов через нее.

Только с применением многоспутниковых методы анализа к данным четырех аппаратов КЛАСТЕР стало возможным систематически определять скорость, толщину и плотность тока магнитопаузы (Russell *et al.*, 1983; Dunlop *et al.*, 2002a,b) на средних и высоких широтах. В данной главе диссертации, используя измеренные четырьмя аппаратами КЛАСТЕР функции распределения протонов и магнитное поле в промежутки времени, когда расстояние между аппаратами не превышало 300 км, исследуются вариации параметров плазмы и магнитного поля при переходах из магнитослоя в магнитосферу или наоборот. В особенности, упор будет сделан на изучение (I) параметров плазмы и магнитного поля с двух сторон магнитопаузы и (II) собственных параметров токового слоя магнитопаузы.

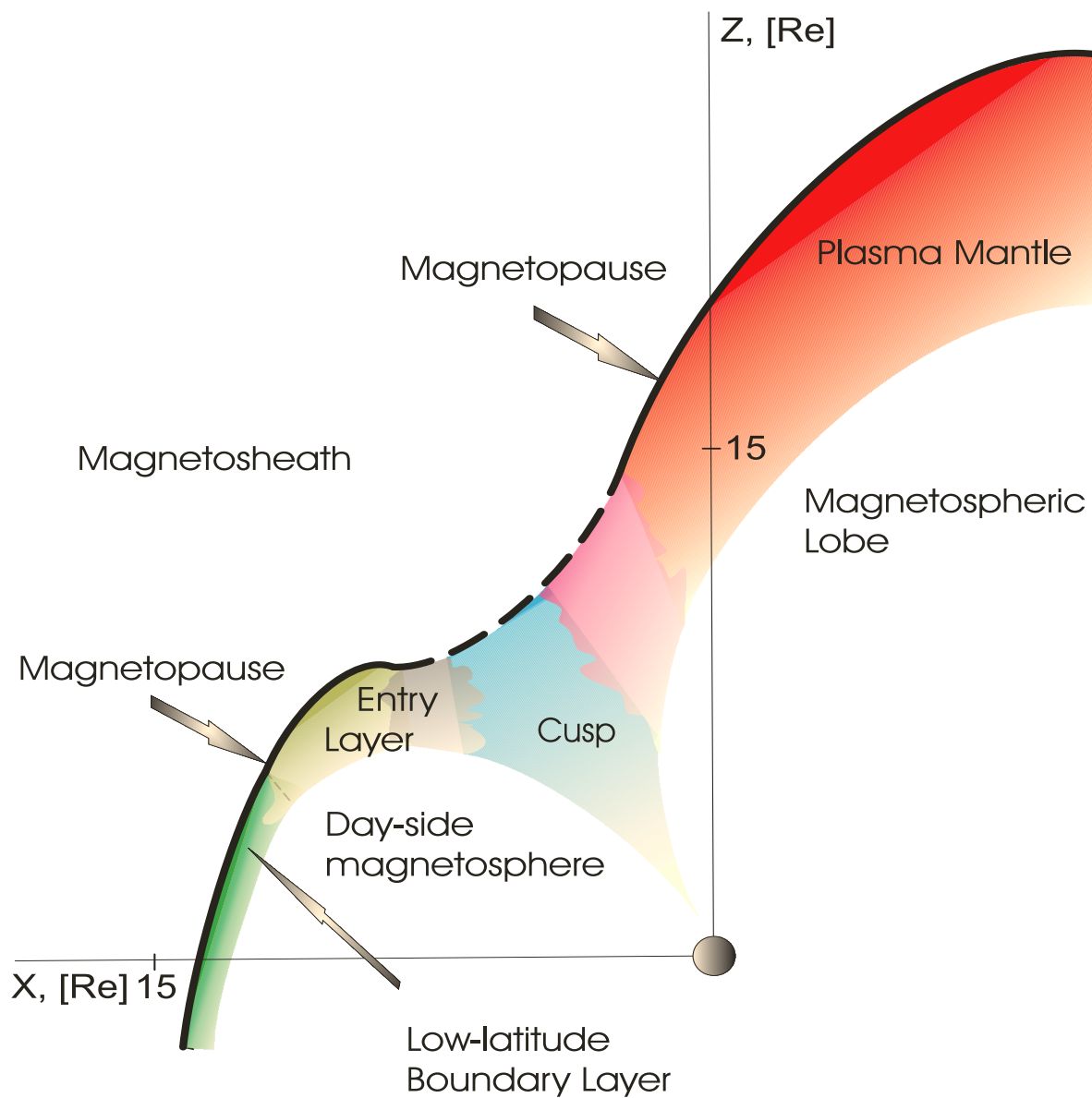


Рис. 13: Схематическое изображение полуденно-меридианального сечения земной магнитосферы вблизи полярного каспа (показано только северное полушарие). Сплошная толстая линия отображает магнитопаузу, где она регулярно наблюдается. Штрихованная толстая линия показывает магнитопаузу над каспом, где она не формируется непрерывно.

Таблица 1: Список асимптотических параметров магнитослоя и магнитосферы для переходов магнитослой-магнитосфера спутниками КЛАСТЕР в периоды с 02 февраля по 17 июня 2002г., при расстоянии между аппаратами 100 км, и с 01 июля 2003г. по 03 мая 2004г., при расстоянии между аппаратами 300 км.

Дата UTCMMDD	Время ччмм	(X, Y, Z) Re, GSM	Искл нГнА/нм ²	шир град	Магнитослой/Магнитосфера									
						B нТ	E нТ	nr-3 см-3	Tr кэВ	Vr км/с	ρr км	β	MA	
1	20020203	(4,6, -0,3, -8,2)	200	94	(0, -20, 0)/(-15, 5, -70)	20/72	40/0,5	0,2/0,4	70/30	72/29	8,1/0,0	1,0/0,0		
2	20020206	(3,8, -3,6, 9,2)	300	124	(-15, 20, 20)/(-15, -20, -20)	32/32	8/0,2	0,5/3	330/60	71/175	1,6/0,2	1,3/0,0		
3	20020208	(6,1, 2,6, -8,1)	300	68	(0, 35, 10)/(-15, 40, -50)	36/66	10/1	0,35/0,05	200/80	53/11	1,1/0,0	0,8/0,1		
4	20020212	(6,1, 2,5, -8,2)	200	24	(-10, 20, -10)/(-10, 50, -50)	24/71	20/1	0,3/0,1	250/50	72/14	4,0/0,0	2,1/0,0		
5	20020215	(8,5, 0,6, 10,0)	150	146	(-15, 0, 15)/(-15, 10, -8)	21/70	10/0,2	0,2/2	200/40	68/232	1,8/0,4	1,4/0,0		
6	20020218	(4,8, 1,2, 9,3)	300	109	(10, -15, -10)/(-25, -5, 0)	21/25	40/0,5	0,5/5	200/50	111/284	19,0/1,6	2,8/0,1		
7	20020219	(7,0, 2,6, -8,5)	300	27	(0, 20, -10)/(-5, 30, -40)	22/50	10/1	0,2/0,1	150/50	65/20	1,6/0,0	1,0/0,0		
8	20020220	(2,7, 2,0, 8,5)	400	140	(-10, 30, 20)/(-10, -30, -70)	37/77	10/0,1	0,1/3	200/50	27/73	0,3/0,0	0,6/0,0		
9	20020222	(4,3, -1,1, 9,0)	300	121	(10, -20, -10)/(-5, 5, 5, 5)	24/55	4/1	0,15/0,1	150/60	51/18	0,4/0,0	0,6/0,0		
10	20020302	(7,5, -0,7, 9,0)	200	72	(0, 30, 50)/(-21, 0, 8)	42/22	30/1	0,1/3	180/30	24/249	0,7/2,4	1,1/0,1		
11	20020303	(2,6, 1,6, -8,4)	400	100	(-15, 30, -40)/(-30, 40, -80)	52/94	8/0,2	0,15/0,05	150/60	24/8	0,2/0,0	0,4/0,0		
12	20020306	(5,8, -1,9, 8,5)	500	151	(-10, 0, 15)/(10, 18, -80)	18/83	10/1	0,4/0,2	330/80	114/18	5,0/0,0	2,7/0,0		
13	20020308	(5,4, -1,2, -9,4)	200	81	(10, 0, 0)/(10, 10, 60)	10/62	10/0,02	0,2/0,4	280/40	145/33	8,1/0,0	4,1/0,0		
14	20020309	(6,9, -0,5, 8,7)	60	24	(-20, 15, 22)/(-25, 5, 14)	33/29	10/0,2	0,2/4,5	180/40	43/236	0,7/0,4	0,8/0,0		
15	20020311	(4,0, 1,1, -9,3)	200	135	(-15, 15, -30)/(10, 10, 80)	37/81	30/0,1	0,25/0,05	150/50	44/9	2,2/0,0	1,0/0,0		
16	20020311	(6,5, -0,4, 8,6)	400	145	(-10, 20, 30)/(0, 0, -80)	37/80	40/2	0,15/0,05	200/40	33/9	1,7/0,0	1,0/0,0		
17	20020313	(3,2, -2,0, -9,0)	400	127	(10, 30, 10)/(-5, -25, -70)	33/74	20/0,2	0,3/0,5	200/70	53/31	2,2/0,0	1,2/0,0		
18	20020316	(3,7, -0,2, 8,1)	250	108	(-30, 20, 20)/(-20, 5, -100)	41/102	30/0,7	0,1/0,4	160/20	25/20	0,7/0,0	1,0/0,0		
19	20020318	(1,6, 0,5, 7,4)	300	131	(-15, 10, 20)/(-13, 3, -100)	27/101	10/0,5	0,3/0,3	160/30	66/18	1,7/0,0	0,9/0,0		
20	20020323	(4,8, -0,4, 8,0)	200	43	(-50, -35, 0)/(10, 0, -5)	40/40	30/7	0,2/4,0	300/30	36/51	1,5/0,7	1,9/0,1		
21	20020325	(3,0, -2,2, -9,5)	400	93	(15, -60, 30)/(-35, 30, -50)	69/68	10/1	0,07/0,3	220/30	12/26	0,1/0,0	0,5/0,0		
22	20020330	(3,8, -0,7, 7,7)	1000	115	(0, 50, 10)/(20, -30, -120)	51/125	30/7	0,5/2,0	150/70	45/12	2,3/0,0	0,7/0,1		
23	20020400	(5,8, -1,9, 7,9)	300	129	(0, -10, -10)/(10, 20, 0)	14/22	20/0,5	0,3/0,5	170/50	125/102	6,0/1,2	1,7/0,2		
24	20020409	(7,3, -4,7, 7,0)	200	18	(-5, 10, 0)/(-20, 20, 0)	11/28	20/0,5	0,1/2	150/50	92/162	6,5/0,5	2,7/0,1		
25	20020410	(1,5, -0,1, -10,0)	800	149	(30, -20, 30)/(-35, 5, -45)	47/57	40/0,1	0,05/0,2	150/100	15/25	0,4/0,0	0,9/0,0		
26	20020411	(4,1, -1,1, 7,6)	600	108	(-20, 40, 20)/(20, 20, -100)	49/104	40/5	0,25/0,15	180/60	33/12	1,7/0,0	1,1/0,1		
27	20020413	(1,9, -3,7, -10,0)	400	100	(10, 40, -10)/(30, 60, -20)	42/70	20/0,1	0,1/0,2	200/50	24/21	0,4/0,0	1,0/0,0		
28	20020413	(5,3, -4,7, 6,5)	600	155	(0, -70, 0)/(20, 60, -20)	70/66	20/0,5	0,1/0,3	200/150	15/27	0,2/0,0	0,6/0,1		
29	20020415	(2,2, -3,5, -10,6)	300	64	(-20, 20, -10)/(-20, -10, -40)	30/46	15/0,5	0,07/0,1	250/50	29/22	0,5/0,0	1,5/0,0		
30	20020416	(3,2, -3,2, 7,3)	400	90	(0, 10, 10)/(-20, 50, -50)	14/73	90/10	0,15/0,07	200/30	89/12	27,2/0,1	6,1/0,1		
31	20020421	(7,6, -7,6, 5,7)	200	39	(-5, 20, 25)/(-20, 35, 10)	32/42	10/0,3	0,3/1,5	150/30	55/95	1,2/0,1	0,7/0,0		
32	20020422	(2,7, -4,7, -11,5)	300	60	(-10, 0, -10)/(0, -15, -15)	14/21	10/2	0,2/0,5	200/30	102/108	4,0/0,9	2,0/0,1		
33	20020423	(4,6, -2,4, 7,5)	1000	161	(-30, 0, 50)/(40, 30, -150)	58/158	50/3	0,3/0,1	220/60	30/6	1,8/0,0	1,2/0,0		
34	20020426	(9,6, -11,0, 2,4)	150	44	(5, 10, 5)/(-2, 12, 22)	12/25	10/0,2	0,2/1,4	150/20	118/152	5,4/0,2	1,8/0,0		
35	20020430	(4,9, -3,3, 7,6)	300	51	(5, 40, 0)/(10, 40, -50)	40/65	20/0,4	0,3/0,05	150/50	44/11	1,5/0,0	0,8/0,0		
36	20020502	(5,6, -7,0, 5,5)	150	50	(0, -35, 30)/(0, 60, -10)	46/61	10/1	0,15/0,5	200/50	27/38	0,3/0,1	0,6/0,0		
37	20020505	(6,0, -6,1, 7,4)	400	76	(0, 10, 10)/(-10, 50, -30)	14/59	40/3	0,1/0,2	180/30	72/24	8,1/0,1	3,7/0,0		
38	20020507	(0,0, -3,2, -11,4)	200	35	(-20, -30, -10)/(-40, -20, -35)	37/57	20/0,2	0,15/0,05	200/50	33/13	0,9/0,0	1,1/0,0		
39	20020507	(5,5, -6,7, 6,5)	1000	180	(-10, -20, 20)/(30, 60, -60)	30/90	20/0,1	0,15/0,05	120/50	42/8	1,3/0,0	0,8/0,0		
40	20020509	(0,0, -7,6, -9,8)	400	146	(10, 20, 0)/(-20, -25, -20)	22/38	10/0,7	0,1/1,5	250/50	46/105	0,8/0,3	1,6/0,1		
41	20020510	(6,4, -9,5, 5,6)	400	117	(10, 0, -20)/(0, -25, 15)	22/29	10/0,2	0,1/4	200/70	46/222	0,8/0,4	1,3/0,0		
42	20020517	(4,8, -7,1, 6,9)	300	68	(15, 10, -20)/(0, 40, 0)	27/40	20/2	0,1/0,4	170/50	38/51	1,1/0,2	1,3/0,1		
43	20020518	(-1,3, -4,4, -11,3)	400	81	(20, -30, 30)/(-15, -15, 0)	47/21	90/5	0,2/0,6	350/80	31/84	3,3/1,3	3,2/0,4		
44	20020519	(5,6, -14,1, 1,7)	200	77	(-5, 0, 25)/(12, 20, 8)	25/25	10/1	0,1/0,1	230/50	40/102	0,6/0,4	1,3/0,1		
45	20020521	(-3,8, -6,4, 5,9)	300	142	(-20, 20, 20)/(20, 70, -10)	35/73	10/2	0,15/0,5	140/50	36/31	0,5/0,1	0,6/0,0		
46	20020530	(-2,2, -14,2, -7,5)	150	135	(10, 13, -10)/(0, -5, 15)	19/16	10/0,2	0,2/4,2	300/50	75/409	2,2/1,3	2,3/0,1		
47	20020602	(-3,3, -7,8, -11,1)	400	77	(0, 20, 20)/(-40, -25, -10)	28/48	10/0,3	0,1/0,6	200/50	36/52	0,5/0,0	1,0/0,0		
48	20020602	(3,1, -0,6, 5,4)	300	140	(-20, -30, -50)/(30, 50, 0)	47/58	20/1	0,1/2,0	200/50	22/78	0,4/0,2	0,9/0,0		
49	20020604	(-3,4, -13,6, -7,8)	200	143	(20, 20, -20)/(10, -15, 0)	35/18	10/0,2	0,1/4	180/50	30/359	0,3/1,0	1,3/0,1		
50	20020605	(2,5, -10,0, 8,4)	800	156	(-5, -20, -5)/(20, 30, 0)	21/36	9/0,3	0,3/1,5	180/80	84/110	2,4/0,1	1,2/0,1		
51	20020607	(2,1, -11,0, 6,5)	400	140	(-20, -20, -15)/(30, 40, -10)	32/51	20/0,5	0,1/1	130/30	32/63	0,8/0,1	0,8/0,0		
52	20020609	(-4,4, -11,0, -10,5)	300	49	(-5, -10, 5)/(30, -20, -10)	12/37	20/0,5	0,15/0,25	300/100	102/43	8,1/0,0	5,0/0,0		

продолжение таблицы на следующей странице...

...начало таблицы на предыдущей странице

Дата ГГТТММДД	Время ЧЧММ	(X, Y, Z) Re, GSM	J _{маг} нТлнА/м ²	шир град	Магнитослой / Магнитосфера									
					B нТ	E нТ	np-3 см ⁻³	Ip кЭВ	Vp км/с	rp км	β	MA		
53	20020611	0200 - 1200	300	76	(5, -10, 20) / (-10, -15, 0)	23 / 18	10 / 0,3	0,2 / 4	300 / 70	63 / 359	1,5 / 1,5	1,9 / 0,1		
54	20020612	1200 - 1900	400	119	(-10, -10, -15) / (-30, 25, -10)	21 / 40	10 / 0,5	0,1 / 2	200 / 50	50 / 114	0,9 / 0,2	1,4 / 0,0		
55	20020613	1200 - 1900	20	90	(-5, -5, 25) / (-26, -15, -8)	26 / 31	10 / 0,2	0,2 / 4	300 / 50	56 / 208	1,2 / 0,3	1,7 / 0,0		
56	20020614	2000 - 1000	400	145	(-10, -10, -10) / (-30, 30, 0)	17 / 42	20 / 0,2	0,1 / 4	180 / 30	59 / 153	2,7 / 0,2	2,1 / 0,0		
57	20020616	0000 - 1000	600	128	(0, 15, -15) / (-30, -25, 10)	21 / 40	20 / 2	0,1 / 1,5	280 / 20	48 / 98	1,8 / 0,7	2,7 / 0,0		
58	20031124	0800 - 1100	1000	119	(20, -50, 20) / (-39, 0, -60)	57 / 72	9 / 0,1	0,7 / 20	300 / 50	47 / 20	0,8 / 0,0	0,7 / 0,0		
59	20031125	0900 - 1400	200	151	(15, -10, -20) / (-25, 15, 10)	37 / 51	3 / 0,8	0,3 / 2	300 / 200	66 / 148	0,5 / 0,7	0,9 / 0,0		
60	20031201	1230 - 1400	400	104	(5, -35, 0) / (-25, 10, -50)	35 / 57	8 / 0,1	0,2 / 0,7	150 / 50	41 / 48	0,5 / 0,0	0,5 / 0,0		
61	20031202	1200 - 1700	150	78	(15, -7, 20) / (-9, 7, 14)	26 / 18	70 / 0,6	0,04 / 3	400 / 120	25 / 310	1,7 / 2,2	5,9 / 0,2		
62	20031204	1800 - 2000	150	104	(20, -10, -20) / (0, -10, 10)	30 / 14	20 / 1	0,1 / 4	200 / 50	34 / 458	0,9 / 8,1	1,4 / 0,2		
63	20031208	1500 - 1730	400	96	(20, 50, 30) / (-35, 40, -60)	62 / 80	7 / 1	0,4 / 0,2	300 / 100	33 / 18	0,3 / 0,0	0,6 / 0,1		
64	20031209	1200 - 1600	150	64	(-10, 10, 10) / (10, 8, 20)	17 / 24	10 / 0,2	0,3 / 7	250 / 50	102 / 360	4,0 / 1,0	2,1 / 0,0		
65	20031211	0000 - 0200	800	5	(-20, 20, -30) / (-40, 40, -50)	41 / 75	8 / 0,1	1 / 0,1	350 / 50	78 / 14	1,9 / 0,0	1,1 / 0,0		
66	20031213	0700 - 1130	400	59	(-10, 30, 10) / (-30, 10, 70)	33 / 77	10 / 0,2	0,8 / 0,1	300 / 80	97 / 13	2,9 / 0,2	1,3 / 0,0		
67	20031214	0600 - 1000	150	65	(-15, -15, 0) / (-15, 0, 20)	21 / 25	8 / 0,1	0,4 / 3	400 / 50	96 / 224	2,9 / 0,2	2,4 / 0,0		
68	20031219	0100 - 0200	100	72	(-10, 10, 0) / (-12, -2, -20)	14 / 23	20 / 0,8	0,8 / 1	200 / 50	205 / 138	32,3 / 0,6	2,9 / 0,1		
69	20031220	1600 - 1700	600	88	(10, -90, 0) / (-45, -10, 120)	91 / 129	30 / 5	0,2 / 0,07	200 / 70	16 / 7	0,3 / 0,0	0,6 / 0,1		
70	20031221	0700 - 1000	300	140	(20, -10, -30) / (-10, -10, 20)	37 / 24	10 / 0,5	0,2 / 4	200 / 30	39 / 264	0,6 / 1,3	0,8 / 0,0		
71	20031222	1800 - 2100	100	87	(10, -10, -10) / (-1, -10, 8)	17 / 13	7 / 0,1	0,2 / 4	230 / 30	84 / 504	1,9 / 1,0	1,6 / 0,0		
72	20031226	0200 - 0500	200	146	(0, 10, -20) / (-15, -10, 20)	22 / 27	10 / 0,2	0,1 / 4	250 / 50	46 / 240	0,8 / 0,4	1,6 / 0,0		
73	20031227	1500 - 2000	600	94	(10, -20, 0) / (10, 10, -70)	22 / 71	20 / 0,1	0,15 / 1	200 / 50	56 / 45	2,4 / 0,0	1,8 / 0,0		
74	20031228	1330 - 1700	150	45	(10, -15, 25) / (-7, -2, 20)	31 / 21	5 / 0,1	0,2 / 7	400 / 50	47 / 402	0,4 / 0,6	1,3 / 0,0		
75	20031230	1700 - 2200	700	141	(-15, 20, 0) / (0, -47, -10)	25 / 48	20 / 0,2	0,1 / 4	270 / 50	41 / 135	1,3 / 0,1	2,2 / 0,0		
76	20040101	1200 - 1230	700	77	(0, 50, 0) / (-30, 20, -85)	50 / 92	7 / 0,5	0,2 / 0,05	200 / 70	29 / 8	0,2 / 0,0	0,5 / 0,0		
77	20040103	2000 - 2200	700	18	(-20, 15, -30) / (-23, 45, -50)	39 / 71	10 / 0,5	0,3 / 0,5	200 / 80	45 / 10	0,8 / 0,0	0,7 / 0,0		
78	20040104	1200 - 1500	200	122	(-15, -30, -10) / (-10, -15, 5)	35 / 19	10 / 0,3	0,3 / 5	350 / 50	51 / 387	1,0 / 1,7	1,4 / 0,1		
79	20040106	0400 - 0600	400	59	(2, 40, 17) / (-30, 15, 60)	44 / 69	8 / 1	0,35 / 0,1	250 / 100	44 / 15	0,6 / 0,0	0,7 / 0,1		
80	20040108	1400 - 1600	500	68	(0, 20, 0) / (0, -20, -50)	20 / 54	7 / 0,1	0,3 / 0,1	300 / 50	89 / 19	2,1 / 0,0	1,8 / 0,0		
81	20040109	0600 - 0800	150	125	(0, 30, -40) / (-20, -10, 10)	50 / 24	40 / 0,3	0,3 / 5	300 / 50	35 / 295	1,9 / 1,0	1,7 / 0,1		
82	20040111	1500 - 1700	200	139	(-5, 23, -18) / (-3, -27, 0)	30 / 27	5 / 0,1	0,3 / 3	300 / 30	60 / 206	0,7 / 0,2	1,0 / 0,0		
83	20040113	0700 - 1000	500	62	(-7, 20, -5) / (-15, 0, -60)	22 / 62	20 / 0,07	0,25 / 0,7	250 / 40	74 / 44	4,3 / 0,0	2,4 / 0,0		
84	20040115	1900 - 2000	500	67	(0, -30, -20) / (-25, 15, -50)	36 / 95	7 / 0,2	0,7 / 0,1	250 / 60	75 / 11	1,3 / 0,0	0,8 / 0,0		
85	20040118	0300 - 0330	250	67	(0, -30, -25) / (-25, 18, -65)	39 / 72	7 / 0,7	0,2 / 0,1	200 / 80	37 / 14	0,4 / 0,0	0,6 / 0,0		
86	20040118	1900 - 1930	150	102	(15, 0, -20) / (-5, -25, 3)	25 / 26	4 / 0,2	0,3 / 7	300 / 50	71 / 333	0,8 / 0,9	1,1 / 0,0		
87	20040121	0400 - 0600	100	129	(20, -15, -15) / (-20, -10, 20)	29 / 30	10 / 0,5	0,2 / 5	400 / 150	50 / 241	0,9 / 1,1	2,0 / 0,2		
88	20040122	2100 - 2200	400	149	(-5, -10, -30) / (-30, 40, 70)	32 / 86	20 / 5	0,35 / 0,1	150 / 80	60 / 12	2,8 / 0,0	1,0 / 0,1		
89	20040123	1430 - 1515	60	136	(22, -5, -35) / (-10, -10, 10)	42 / 17	10 / 0,2	0,3 / 7	200 / 50	43 / 494	0,7 / 1,9	0,7 / 0,1		
90	20040125	0400 - 0700	400	77	(5, -50, -20) / (-22, 10, -80)	54 / 84	20 / 1	0,2 / 0,05	200 / 50	27 / 9	0,6 / 0,0	0,8 / 0,0		
91	20040127	1700 - 1800	300	54	(-5, 10, -10) / (-3, -20, -90)	15 / 98	40 / 0,1	0,3 / 0,07	200 / 50	118 / 9	21,5 / 0,0	3,9 / 0,0		
92	20040128	0600 - 0700	300	48	(-40, 20, 30) / (-25, -17, -25)	54 / 39	15 / 0,7	0,2 / 4	260 / 50	27 / 165	0,4 / 0,7	0,9 / 0,0		
93	20040130	1445 - 1730	150	118	(-15, 20, 20) / (-10, -20, -5)	32 / 23	10 / 0,2	0,3 / 5	270 / 50	55 / 316	1,2 / 0,8	1,2 / 0,0		
94	20040201	0900 - 1200	500	111	(10, 30, 0) / (-15, -25, -75)	32 / 80	10 / 0,05	0,2 / 1	200 / 50	46 / 40	0,8 / 0,0	0,9 / 0,0		
95	20040204	1100 - 1230	150	149	(5, -5, -20) / (-15, -10, 15)	21 / 23	7 / 0,3	0,7 / 5	200 / 50	128 / 308	4,4 / 1,1	1,1 / 0,1		
96	20040206	1600 - 2100	200	125	(-10, 15, 5) / (-10, -50, -90)	19 / 103	10 / 0,05	0,2 / 2	200 / 50	77 / 44	2,3 / 0,0	1,5 / 0,0		
97	20040208	1300 - 1430	400	90	(0, 30, 0) / (-15, 0, -47)	30 / 49	10 / 0,1	0,1 / 0,6	200 / 50	34 / 51	0,4 / 0,0	1,0 / 0,0		
98	20040209	0500 - 0600	150	124	(0, 30, -20) / (-21, -5, 28)	36 / 35	10 / 0,4	0,15 / 3	200 / 30	35 / 159	0,5 / 0,4	0,8 / 0,0		
99	20040210	2200 - 2400	400	81	(-12, 30, -15) / (-33, -35, -130)	36 / 93	30 / 0,5	0,13 / 0,05	130 / 50	33 / 8	1,2 / 0,0	0,9 / 0,0		
100	20040211	0900 - 1200	250	50	(20, -30, -40) / (-35, -70, -80)	54 / 152	50 / 1	0,1 / 0,2	220 / 40	19 / 10	0,7 / 0,0	0,7 / 0,0		
101	20040213	0600 - 0900	700	57	(0, -30, -15) / (-20, -10, -80)	34 / 73	10 / 0,1	0,5 / 0,15	300 / 50	68 / 15	1,8 / 0,0	1,3 / 0,0		
102	20040213	2000 - 2200	150	48	(10, -20, -10) / (-5, -30, -70)	24 / 86	5 / 1	0,4 / 0,3	250 / 100	84 / 23	1,3 / 0,0	1,0 / 0,1		
103	20040215	1300 - 1600	300	115	(12, -18, 10) / (0, -42)	24 / 42	2 / 0,05	0,4 / 0,1	300 / 50	86 / 24	0,6 / 0,0	0,8 / 0,0		
104	20040218	1800 - 2000	150	111	(10, -20, -10) / (-20, -7, 18)	24 / 28	10 / 0,1	0,2 / 2	200 / 30	59 / 165	1,3 / 0,1	1,2 / 0,0		
105	20040220	0600 - 1200	400	90	(5, -20, 10) / (-10, -20, -40)	23 / 46	20 / 0,1	0,15 / 0,05	180 / 50	55 / 16	2,3 / 0,0	1,6 / 0,0		
106	20040221	0100 - 0200	150	82	(0, -30, 0) / (-30, -5, -20)	30 / 36	1,5 / 0,3	0,2 / 3	180 / 30	48 / 154	0,1 / 0,3	0,3 / 0,0		
107	20040223	1000 - 1100	200	75	(15, -20, -20) / (-30, -10, -30)	32 / 44	20 / 0,3	0,2 / 3	180 / 30	45 / 129	1,6 / 0,2	1,2 / 0,0		
108	20040225	0300 - 0500	500	58	(0, -15, -10) / (-20, 0, -60)	18 / 63	30 / 0,1	0,15 / 0,05	130 / 40	70 / 11	5,6 / 0,0	1,8 / 0,0		
109	20040225	1600 - 2100	250	80	(0, -15, 0) / (-50, -25, -135)	15 / 146	20 / 0,2	0,1 / 2	150 / 50	68 / 31	3,6 / 0,0	2,0 / 0,0		
110	20040227	1500 - 1600	500	111	(10, 30, 10) / (-50, 5, -95)	33 / 107	40 / 0,1	0,15 / 0,8	200 / 30	38 / 27	2,2 / 0,0	1,7 / 0,0		
111	20040228	0330 - 0430	200	61	(-20, -40, 20) / (-40, 0, 8)	49 / 41	15 / 0,7	0,2 / 3	250 / 50	30 / 137	0,5 / 0,5	0,9 / 0,0		
112	20040229	2100 - 2400	400	66	(-10, 20, 0) / (-25, 20, -65)	22 / 72	10 / 0,1	0,5 / 0,1	280 / 80	102 / 14	4,0 / 0,0	1,8 / 0,0		
113	20040301	1000 - 1400	200	90	(0, 0, -10) / (-20, 0, 0)	10 / 45	10 / 0,7	0,4 / 1	280 / 40	205 / 72	16,1 / 0,1	4,1 / 0,0		

продолжение таблицы на следующей странице...

...начало таблицы на предыдущей странице

Дата ГГТТММДД	Время ЧЧММ	(X, Y, Z) Re, GSM	Jmax в ГГА/м ²	шир град	Магнитослой/Магнитосфера									
					B нТ	E нТ	nr см ⁻³	Гр кэВ	Vp км/с	rp км	B	MA		
114	20040303	0700 - 1000	400	130	(10, 30, 15)/(-25, -13, -67)	35 / 73	8 / 0,1	0,4 / 0,1	250 / 50	58 / 14	1,1 / 0,0	0,9 / 0,0		
115	20040303	2100 - 2400	100	61	(-15, -10, 30)/(-40, -10, 0)	35 / 41	10 / 0,2	0,5 / 2	200 / 20	65 / 11	1,6 / 0,1	0,8 / 0,0		
116	20040303	1600 - 1800	400	60	(10, 0, 10)/(-10, 10, 40)	14 / 42	15 / 0,05	0,2 / 0,6	200 / 30	102 / 59	6,0 / 0,0	2,5 / 0,0		
117	20040306	0830 - 0930	200	55	(-5, 18, 10)/(-20, 2, 30)	21 / 36	20 / 0,2	0,2 / 2,5	140 / 50	68 / 42	3,6 / 0,2	1,4 / 0,0		
118	20040308	0130 - 0230	600	157	(20, 0, 27)/(-15, 12, -48)	34 / 52	9 / 0,07	9 / 0,1	150 / 80	289 / 20	28,9 / 0,0	0,6 / 0,0		
119	20040308	1500 - 1800	150	83	(-10, 30, 15)/(-45, -5, -7)	35 / 46	10 / 0,2	0,1 / 1,5	150 / 20	29 / 86	2,3 / 0,1	0,6 / 0,0		
120	20040310	1000 - 1300	600	84	(-3, -35, 0)/(-40, -10, -80)	35 / 90	10 / 0,03	0,6 / 0,2	250 / 60	72 / 16	2,0 / 0,0	1,0 / 0,0		
121	20040310	2200 - 0400	200	101	(0, 10, -10)/(-30, 10, 20)	14 / 37	9 / 0,2	0,7 / 2	250 / 50	191 / 122	12,7 / 0,1	2,4 / 0,0		
122	20040312	1800 - 2200	500	107	(10, 0, 0)/(-20, 25, -60)	10 / 68	8 / 0,1	0,3 / 0,1	350 / 50	177 / 15	9,7 / 0,0	4,5 / 0,0		
123	20040313	1000 - 1300	100	122	(7, 0, -15)/(-40, 0, 5)	17 / 40	10 / 0,2	0,3 / 3	200 / 20	107 / 139	4,4 / 0,1	1,8 / 0,0		
124	20040315	0100 - 0500	600	85	(0, -20, 0)/(-20, -5, -50)	20 / 54	10 / 0,1	0,2 / 0,05	180 / 50	72 / 13	2,0 / 0,0	1,3 / 0,0		
125	20040315	1600 - 2200	200	104	(10, -10, -20)/(-55, 10, -15)	24 / 58	20 / 0,1	0,2 / 0,1	180 / 80	59 / 18	2,7 / 0,0	1,5 / 0,0		
126	20040317	0700 - 1600	400	131	(8, -10, 15)/(-5, -7, -60)	20 / 61	9 / 0,1	0,18 / 0,12	250 / 50	70 / 18	1,7 / 0,0	1,7 / 0,0		
127	20040318	0500 - 0700	200	143	(10, -20, -20)/(-25, 5, 25)	30 / 36	20 / 0,7	0,1 / 2	150 / 20	34 / 128	0,9 / 0,4	1,0 / 0,0		
128	20040319	2100 - 0100	600	136	(10, -20, 10)/(-40, 15, -60)	24 / 74	15 / 1	0,11 / 0,15	220 / 50	44 / 17	1,1 / 0,0	1,6 / 0,0		
129	20040320	1100 - 1500	200	42	(15, 5, 30)/(-50, 0, -20)	34 / 54	20 / 0,2	0,2 / 3	130 / 20	43 / 104	1,4 / 0,1	0,8 / 0,0		
130	20040322	0600 - 1000	600	32	(-10, -20, 15)/(-35, 20, -60)	27 / 72	30 / 0,1	0,18 / 0,1	150 / 50	51 / 14	3,0 / 0,0	1,4 / 0,0		
131	20040324	1600 - 1700	300	161	(3, 0, 5)/(-20, 8, -35)	7 / 41	10 / 0,1	0,09 / 0,2	200 / 30	137 / 35	7,3 / 0,0	4,1 / 0,0		
132	20040327	0000 - 0400	700	114	(0, -30, 20)/(-35, 5, -35)	36 / 65	20 / 0,1	0,2 / 0,6	300 / 50	40 / 38	1,2 / 0,0	1,7 / 0,0		
133	20040327	1300 - 2000	200	95	(0, 20, 0)/(-70, -20, -200)	20 / 213	9 / 0,15	0,9 / 0,7	300 / 50	153 / 13	8,2 / 0,0	2,1 / 0,0		
134	20040329	0900 - 1200	400	97	(0, 20, -10)/(-15, -20, -30)	22 / 39	8 / 0,2	0,4 / 0,2	250 / 40	92 / 37	2,6 / 0,0	1,4 / 0,0		
135	20040331	1800 - 2100	500	54	(0, 20, -10)/(-10, 7, -35)	22 / 37	10 / 0,1	0,25 / 0,4	280 / 50	72 / 55	2,0 / 0,0	1,8 / 0,0		
136	20040401	1000 - 1400	150	114	(0, 0, -15)/(-30, 15, 15)	15 / 37	15 / 0,2	0,2 / 2	180 / 20	96 / 125	5,4 / 0,1	2,1 / 0,0		
137	20040403	0100 - 0600	250	39	(-15, 0, -5)/(-27, -10, -40)	16 / 49	20 / 0,1	0,1 / 0,05	280 / 50	65 / 15	3,2 / 0,0	3,6 / 0,0		
138	20040405	1200 - 1800	500	83	(-10, -50, 0)/(-60, 0, -70)	51 / 92	20 / 0,1	0,15 / 0,5	200 / 50	25 / 25	0,5 / 0,0	0,8 / 0,0		
139	20040406	0400 - 0500	400	161	(20, -25, -25)/(-40, 25, 25)	41 / 53	10,5 / 0,8	0,4 / 2	250 / 20	50 / 86	1,0 / 0,2	0,9 / 0,0		
140	20040407	1900 - 0000	500	42	(-5, 10, -10)/(-25, 0, -50)	15 / 56	10 / 1	0,2 / 0,05	250 / 50	96 / 13	3,6 / 0,0	2,4 / 0,0		
141	20040408	1300 - 1500	200	114	(-5, -20, 10)/(-40, 35, 0)	23 / 53	20 / 0,5	0,25 / 1,5	150 / 30	71 / 75	3,8 / 0,1	1,3 / 0,0		
142	20040410	0500 - 0900	400	38	(-5, -20, -10)/(-25, 20, -40)	23 / 51	10,5 / 1	0,2 / 0,05	180 / 70	63 / 14	1,6 / 0,0	1,2 / 0,1		
143	20040410	2200 - 0200	400	161	(0, -30, -20)/(-20, 50, 30)	36 / 62	25 / 1	0,2 / 2,5	280 / 50	40 / 83	1,6 / 0,3	1,8 / 0,0		
144	20040412	1600 - 2000	700	152	(20, -10, 10)/(-40, 10, -50)	24 / 65	10 / 0,02	0,1 / 0,6	180 / 60	42 / 39	0,7 / 0,0	1,1 / 0,0		
145	20040413	1000 - 1400	150	142	(3, 0, -7)/(-15, 18, 20)	8 / 31	7 / 0,1	0,3 / 1,5	150 / 50	233 / 129	14,6 / 0,1	2,4 / 0,0		
146	20040415	1300 - 1800	300	139	(10, -10, 70)/(-40, 50, -50)	71 / 81	25 / 0,7	0,15 / 2	180 / 40	18 / 56	0,3 / 0,1	0,6 / 0,0		
147	20040417	0900 - 1300	400	72	(0, -20, 5)/(-25, 25, -35)	21 / 50	10 / 2	0,17 / 0,3	220 / 80	65 / 36	1,6 / 0,1	1,5 / 0,1		
148	20040419	1900 - 2200	400	130	(5, -8, 5)/(-25, 0, -40)	11 / 47	10 / 0,07	0,1 / 0,8	230 / 20	96 / 61	3,5 / 0,0	3,1 / 0,0		
149	20040422	0300 - 0700	500	143	(0, 10, 50)/(-30, -20, -40)	51 / 54	10 / 0,3	0,15 / 0,4	200 / 30	25 / 38	0,2 / 0,0	0,6 / 0,0		
150	20040424	1200 - 1700	400	79	(-5, 25, -10)/(-20, -10, -40)	27 / 46	10 / 0,05	0,15 / 0,7	350 / 50	46 / 59	0,8 / 0,0	1,9 / 0,0		
151	20040425	0300 - 1000	200	113	(-20, 50, 0)/(-10, -10, 0)	14 / 54	20 / 2	0,4 / 2	200 / 50	146 / 85	16,5 / 0,6	2,9 / 0,1		
152	20040427	1200 - 1700	150	33	(0, 70, -25)/(-15, 30, 0)	74 / 34	10 / 0,8	0,15 / 0,05	130 / 50	17 / 22	0,1 / 0,0	0,3 / 0,1		
153	20040430	0100 - 0300	200	139	(5, 5, -20)/(-5, 20, 40)	21 / 45	3 / 0,3	0,1 / 1,5	300 / 100	48 / 88	0,3 / 0,1	1,1 / 0,1		
154	20040501	1700 - 2000	400	88	(10, -25, 10)/(-35, 0, 40)	29 / 53	2 / 0,01	0,1 / 0,4	300 / 50	36 / 38	0,1 / 0,0	0,7 / 0,0		

2.2 Параметры магнитослоя и магнитосферы вблизи магнитопаузы

Для анализа использовались моменты функций распределений протонов измеренные раз в четыре секунды используя инструмент CIS (см. раздел 1.1.2). Так же были использованы усредненные за четыре секунды данные магнитного поля прибора FGM (см. раздел 1.1.1). Рис. 14 отображает данные с аппарата КЛАСТЕР-1 за 2000-2006 г.г. наблюдения, приведенные в системе координат, где ось абсцисс совпадает с осью X в GSM системе координат, а по оси ординат отложены значения $\sqrt{Y^2 + Z^2}$, где Y и Z - соответствующие значения в GSM системе отсчета: (сверху вниз) среднее значение плотности, перпендикулярной температуры, параллельной температуры и модуля скорости протонов, а так же модуля магнитного поля.

Для изучения магнитопаузы орбита спутников КЛАСТЕР была наиболее выгодной в периоды со 2 февраля 2003 г. по 17 июня 2003 г. и с 1 июня 2003 г. по 03 мая 2004 г., когда расстояния между аппаратами были наименьшими (~ 100 и ~ 300 км, соответственно).

Заметим, что (1) в силу ряда причин магнитопауза колеблется (Song *et al.*, 1988; Russell *et al.*, 1997) со скоростями, практически всегда превышающими скорость спутников КЛАСТЕР (около 2 км/с), что дает множественные пересечения магнитопаузы во время одного и того же перехода; (2) магнитопауза является источником плазменных волн во всем наблюдаемом диапазоне частот (от ионно-циклотронной до нижнегибридной частоты), которые могут распространяться в обе стороны от магнитопаузы (Anderson *et al.*, 1982; André *et al.*, 2001); (3) вследствие пересоединения появляются так называемые FTE события (flux transfer events) (Russell and Elphic, 1978) и плазменные пузыри (Khotyaintsev *et al.*, 2006)), наблюдаемые по обе стороны от магнитопаузы; (4) турбулентный пограничный слой не позволяет магнитопаузе формироваться над каспом непрерывно (Savin *et al.*, 2001, 2005b); (5) на высоких широтах вблизи каспа видны быстрые плазменные потоки входного слоя Paschmann *et al.* (1976); Haerendel *et al.* (1978).

Перечисленные явления вносят существенный вклад в динамику плазмы вблизи магнитопаузы, затрудняя ее идентификацию и увеличивая неопределенность положения магнитопаузы за счет внесения дополнительных вариаций в измерения плазмы и магнитного поля. Таким образом, с целью исключить влияние этих явлений на исследование параметров плазмы магнитослоя и магнитосферы вблизи магнитопаузы, нужно брать их значения несколько глубже в магнитослое и магнитосфере. Из-за этого, полный переход магнитослой-магнитосфера может длиться часы.

Покажем типичные переходы магнитослой-магнитосфера, сделанные аппаратами КЛАСТЕР через ключевые области рисунка 13 с помощью рисунков 15, 16, 17, 18 и 19. Все пять рисунков имеют один и тот же формат. Сверху вниз на них изображены плотность потока энергии протонов, плотность, температура и скорость протонов, а так же напряженность магнитного поля.

На рис. 15 показан переход через пограничный слой низкоширотного типа. Признаки такого пограничного слоя не видны на показанных временных масштабах. Они будут продемонстрированы в следующем разделе. Здесь лишь предполагается, что пограничный слой низкоширотного типа может возникнуть лишь у магнитопаузы, покрывающей дневную магнитосферу, при переходах, пример которых дан на рис. 15. В дневной магнитосфере (левая часть рисунка 15) магнитосферная плазма примерно на порядок горячее и разреженнее, чем плазма соседнего магнитослоя (правая часть рис. 15). Признаки входного слоя могут быть обнаружены на рис.

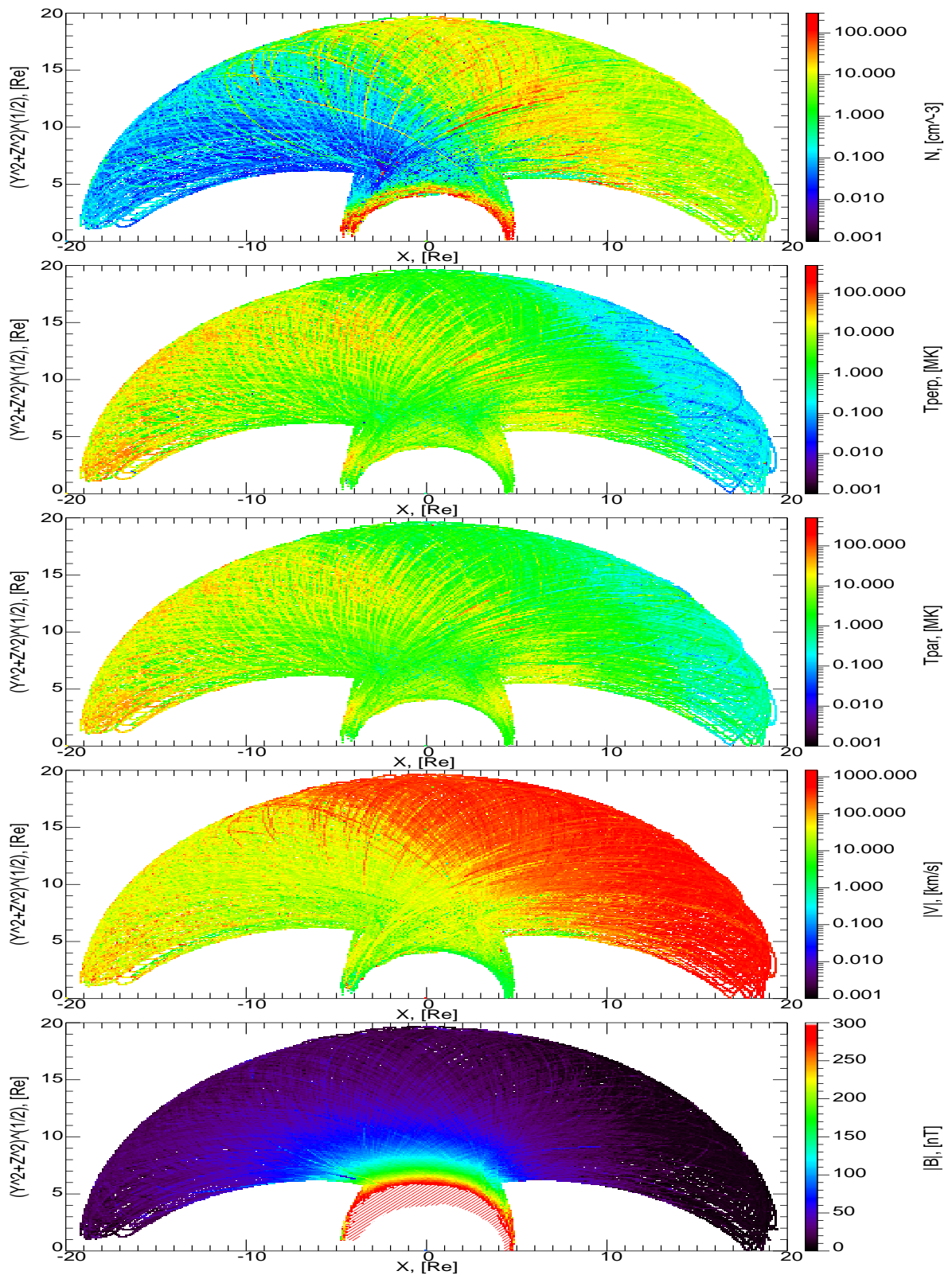


Рис. 14: Данные с аппарата КЛАСТЕР-1 за 2000-2006 г.г. наблюдения, приведенные в системе координат, где ось абсцисс совпадает с осью X в GSM системе координат, а по оси ординат отложены значения $\sqrt{Y^2 + Z^2}$, где Y и Z - соответствующие значения в GSM системе отсчета: (сверху вниз) среднее значение плотности, перпендикулярной температуры, параллельной температуры и модуля скорости протонов, а так же модуля магнитного поля.

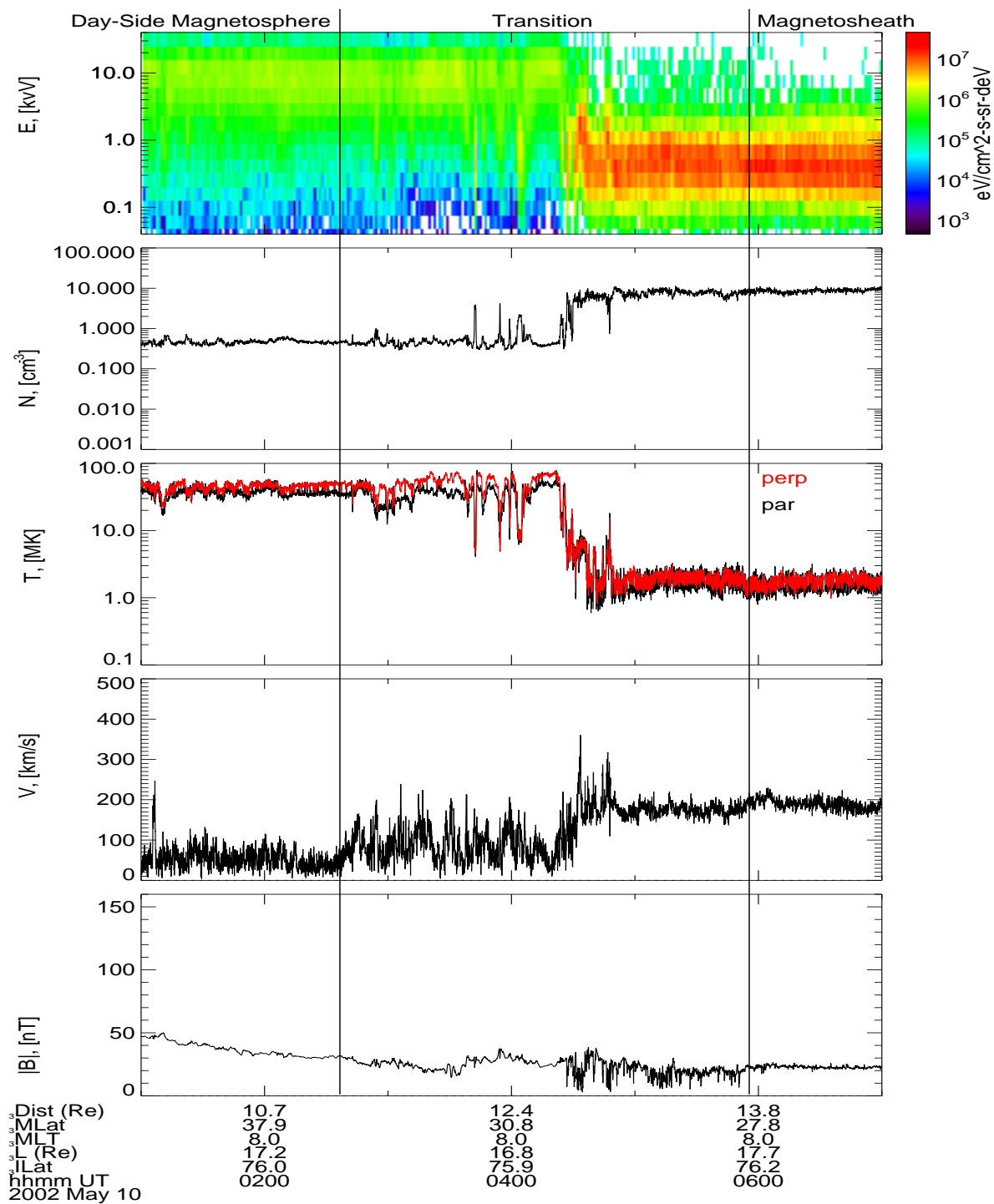


Рис. 15: Пример перехода из дневной магнитосферы в магнитослой аппаратом КЛАСТЕР-4 10 мая 2002 г. в промежуток времени 01:00-07:00 UT. (сверху вниз) Плотность потока энергии протонов, плотность, температура и скорость протонов, напряженность магнитного поля.

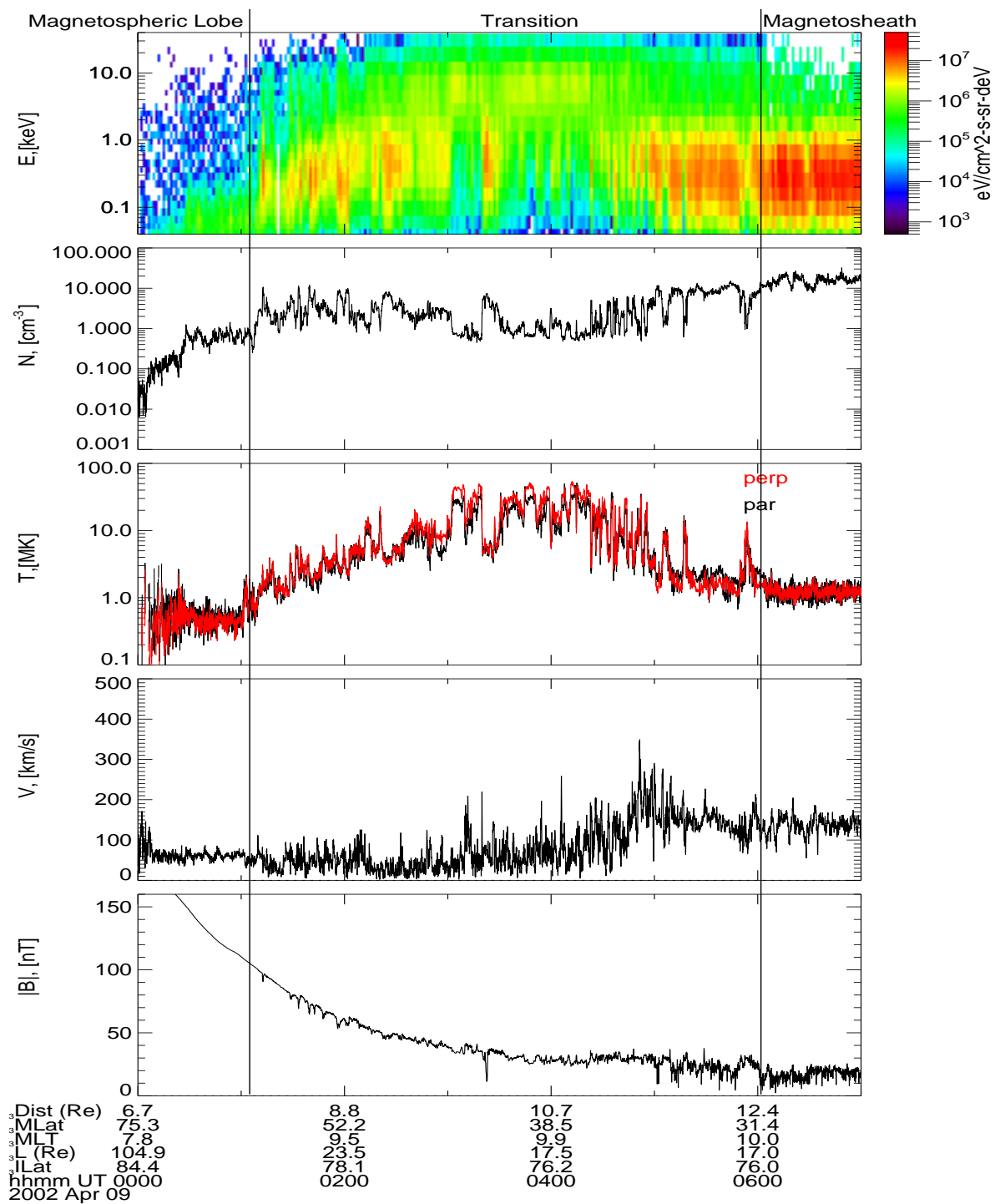


Рис. 16: Пример перехода из магнитосферной доли через касп и дневную магнитосферу в магнитослой аппаратом КЛАСТЕР-4 9 апреля 2002 г. в промежуток времени 0:00-7:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15.

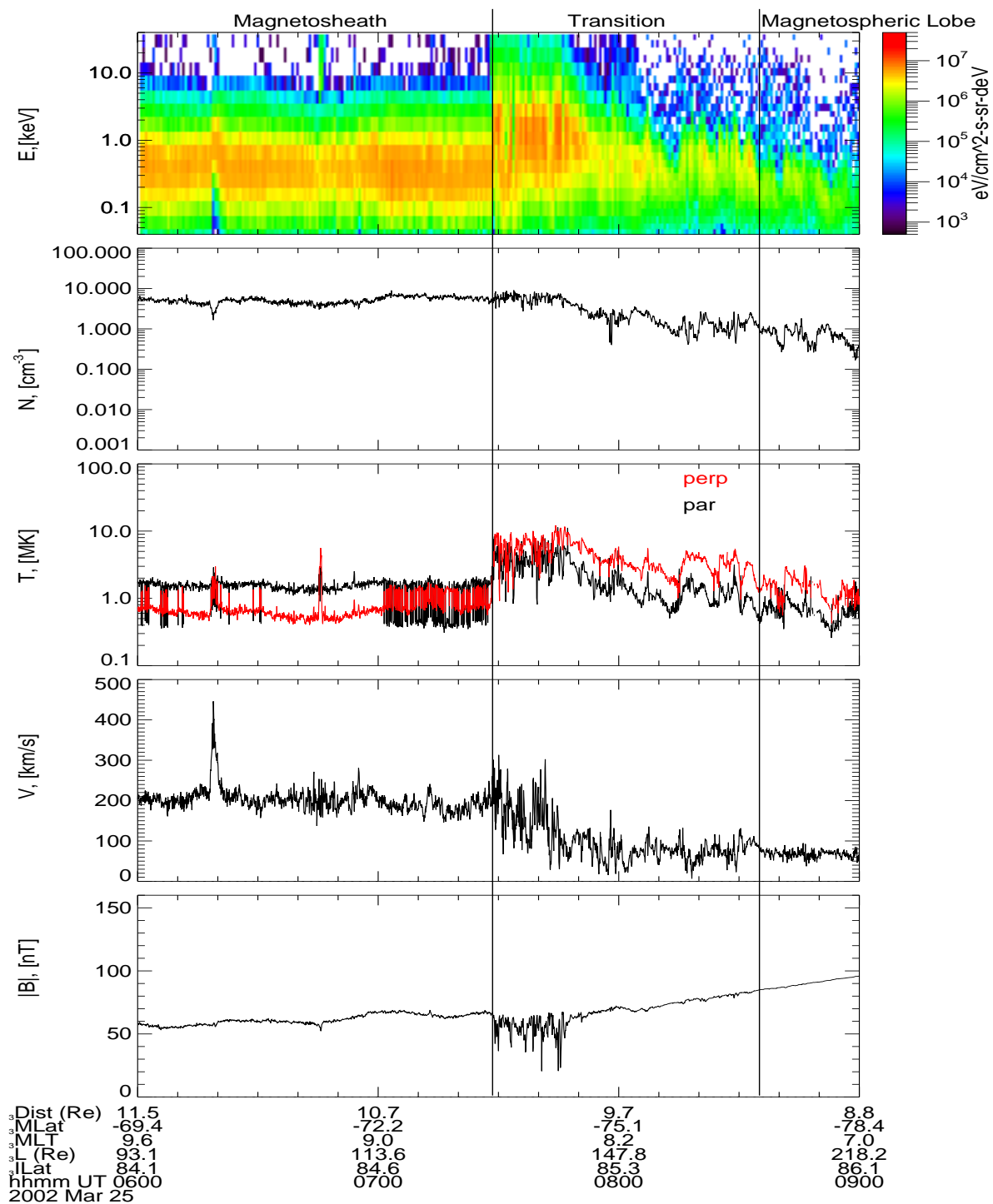


Рис. 17: Пример перехода из магнитослоя через касп в магнитосферную долю аппаратом КЛАСТЕР-4 25 марта 2002 г. в промежуток времени 06:00-09:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15.

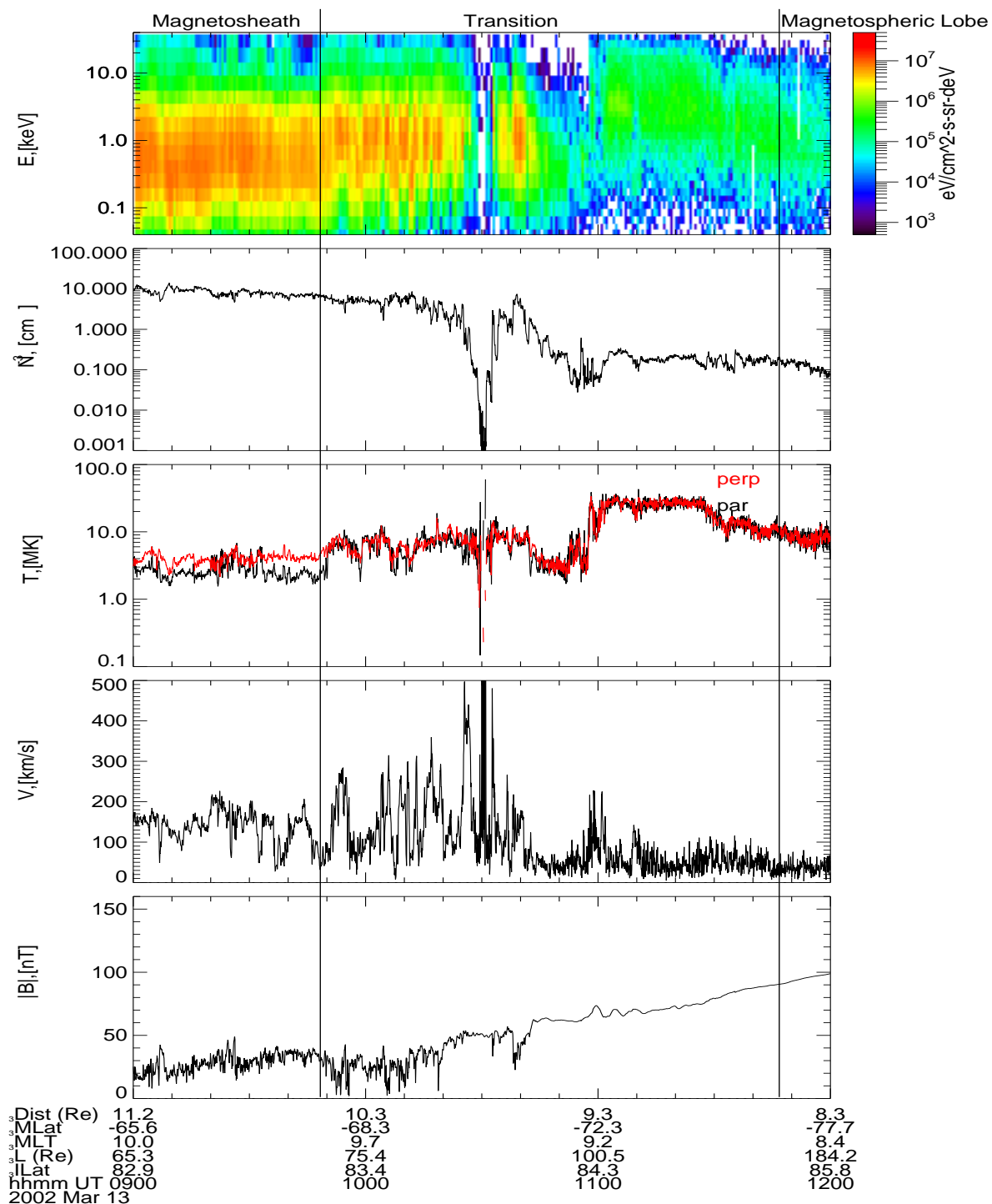


Рис. 18: Пример перехода из магнитослоя через касп и плазменную мантию в магнитосферную долю аппаратом КЛАСТЕР-4 13 марта 2002 г. в промежуток времени 9:00-12:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15.

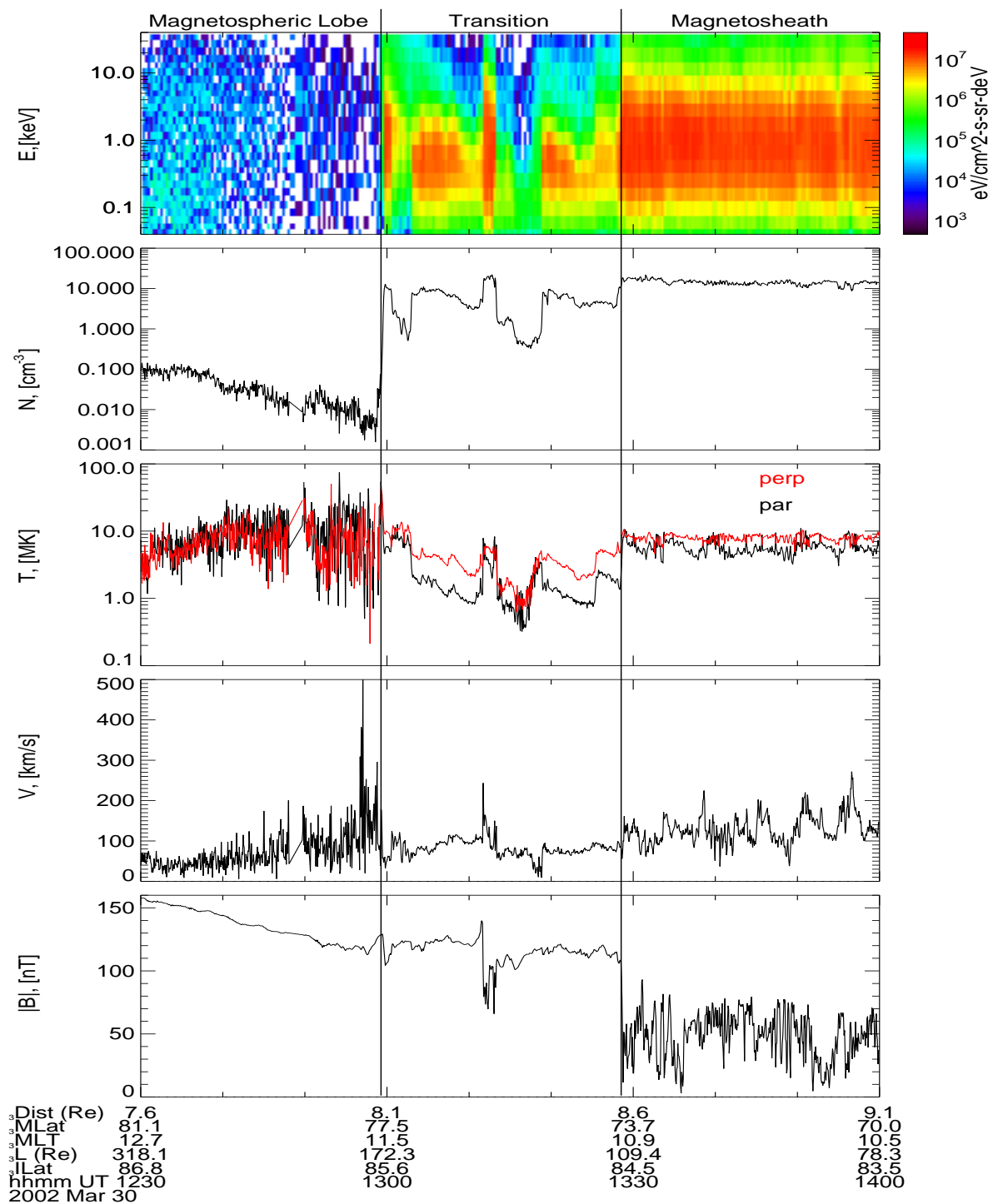


Рис. 19: Пример перехода из магнитосферной доли через плазменную мантию в магнитослой аппаратом КЛАСТЕР-4 30 марта 2002 г. в промежуток времени 12:30-14:00 UT. Формат тот же, что в рисунке 15.

15 в виде высокоскоростных потоков (здесь со скоростями 200-400 км/с) в интервале 4:30-5:00 UT. На рис. 17 показан переход через касп. Касп проявляет себя в виде застойной или нерегулярно движущейся плазмы в минимуме магнитного поля в 7:30-7:45 UT. В интервале времени 7:45-8:35 UT магнитное поле - практически чистое магнитное поле Земли в магнитосферной доле. Тем не менее, в этот промежуток времени наблюдаются сгустки застойной плазмы. Хотя здесь окончательный переход через касп происходит в магнитосферную долю, в иных случаях аппараты выходят в дневную магнитосферу. Наконец, рис. 19 отображает через плазменную мантию. Плазменная мантия наблюдается только под магнитопаузой, покрывающей магнитосферную долю. Мантия видна на рис. 19 в промежутки времени 13:03-13:10 UT и 13:19-13:30 UT. На рис. 19 можно различить несколько пересечений магнитопаузы, например, в 13:11, 13:13, 13:28 UT (анализ движения этих трех пересечений проделан в работе *Ranov et al.* (2006a)). Пересечение плазмы со свойствами магнитослоя около 13:00 UT возможно является плазменным пузырем или иной структурой, нежели настоящим магнитослоем. На рисунках 16 и 16 изображены смешанные переходы магнитослой магнитосфера.

Были отобраны всего 154 перехода магнитослой-магнитосфера, которые была разделены на пять групп, в зависимости от вида границы между магнитослоем и магнитосферой, которые указаны на рис. 13. Таблица 1 содержит асимптотические параметры магнитослоя и магнитосферы для 154 переходов. Первая из пяти групп содержит переходы через пограничный слой низкоширотного типа и через входной слой (зеленые области на рис. 13, характерный пример дан на рис. 15). Оставшиеся четыре группы это (вторая группа) переходы только через касп (синяя область на рис. 13, характерный пример дан на рис. 17), (третья группа) переходы через плазменную мантию (красная область на рис. 13, характерный пример приведен на рис. 15), (четвертая группа) переходы через касп включающие в себя высокоскоростные потоки входного слоя (черная область на рис. 13, характерный пример приведен на рис. 16), (пятая группа) переходы через касп вперемешку с плазменной мантией (пурпурная область на рис. 13, характерный пример приведен на рис. 18).

Местоположения тетраэдра КЛАСТЕР в середине каждого из 154 переходов показано на рис. 20 в GSM системе координат (см. раздел 1.2.1). Длина планки погрешности на рис. 20 равна времени перехода, умноженному на скорость спутников (2 км/с). Заметим, что на таких временных масштабах (много меньше периода обращения 57 часов) орбиту спутников КЛАСТЕР, в нулевом приближении можно считать прямой линией. Рис. 20 демонстрирует таким образом максимально возможную амплитуду флуктуации магнитопаузы. Она варьировалась от $\sim 0.5 R_e$ до $\sim 10 R_e$. В большинстве случаев, однако, она не превышала 2-3 R_e . Пограничный слой низкоширотного типа пересекался в основном на флангах магнитосферы и вокруг переходов, связанных с касповой областью (показаны черными, синими пурпурными крестами на рис. 20). Касповые переходы сконцентрированы у полуденного меридиана на самых высоких широтах. Вдоль орбиты четверки КЛАСТЕР большинство переходов через плазменную мантию (пурпурные и красные кресты на рис. 20) наблюдались в южном полушарии.

2.2.1 Параметры плазмы

Рисунок 21 показывает (сверху вниз) распределение плотности и температуры протонов, а так же напряженности магнитного поля в магнитосфере (слева) и магни-

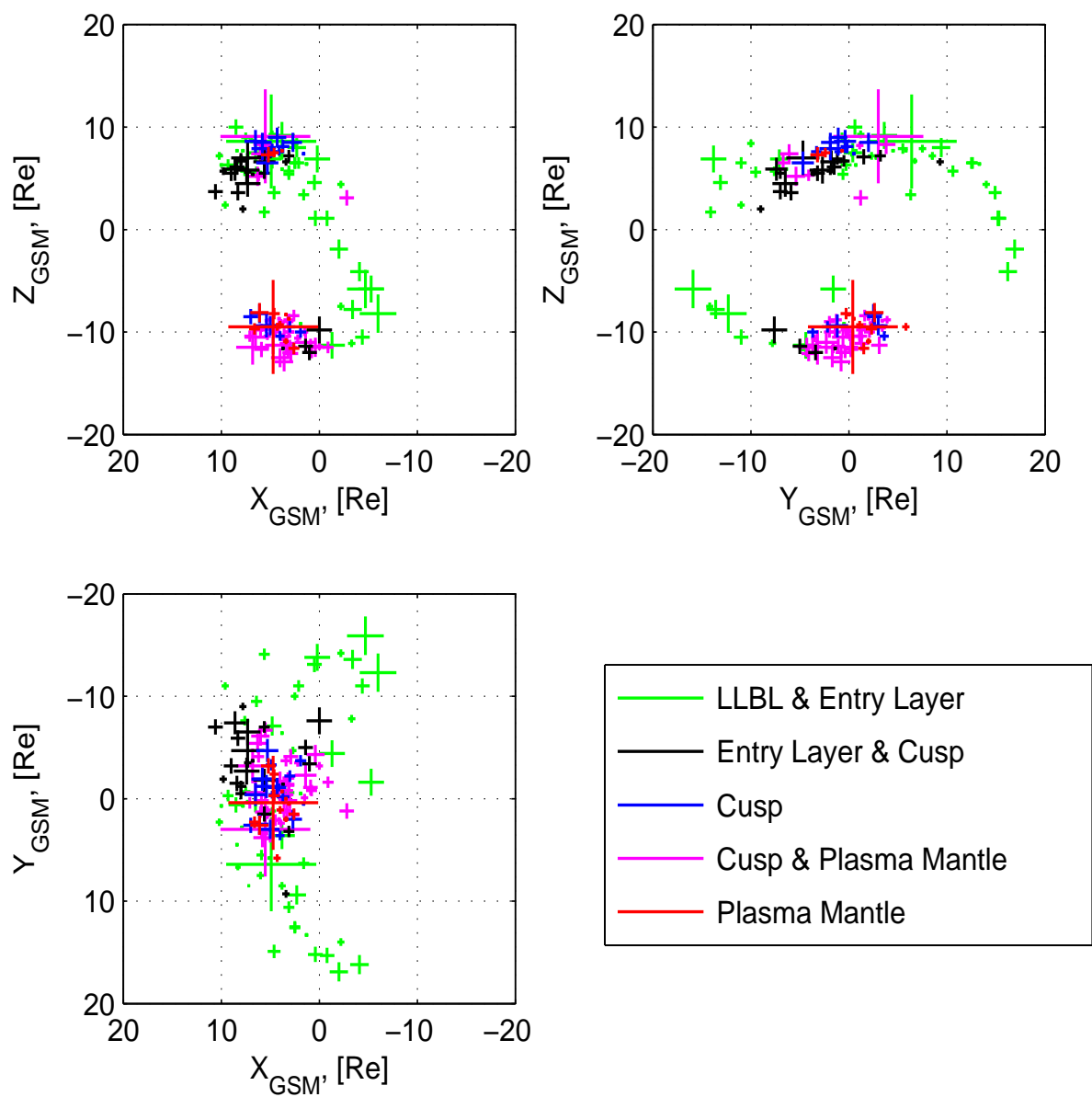


Рис. 20: Карта 154 пересечений четырьмя аппаратами КЛАСТЕР различных типов границ между магнитослоем и магнитосферой. Типы границ перечислены в легенде.

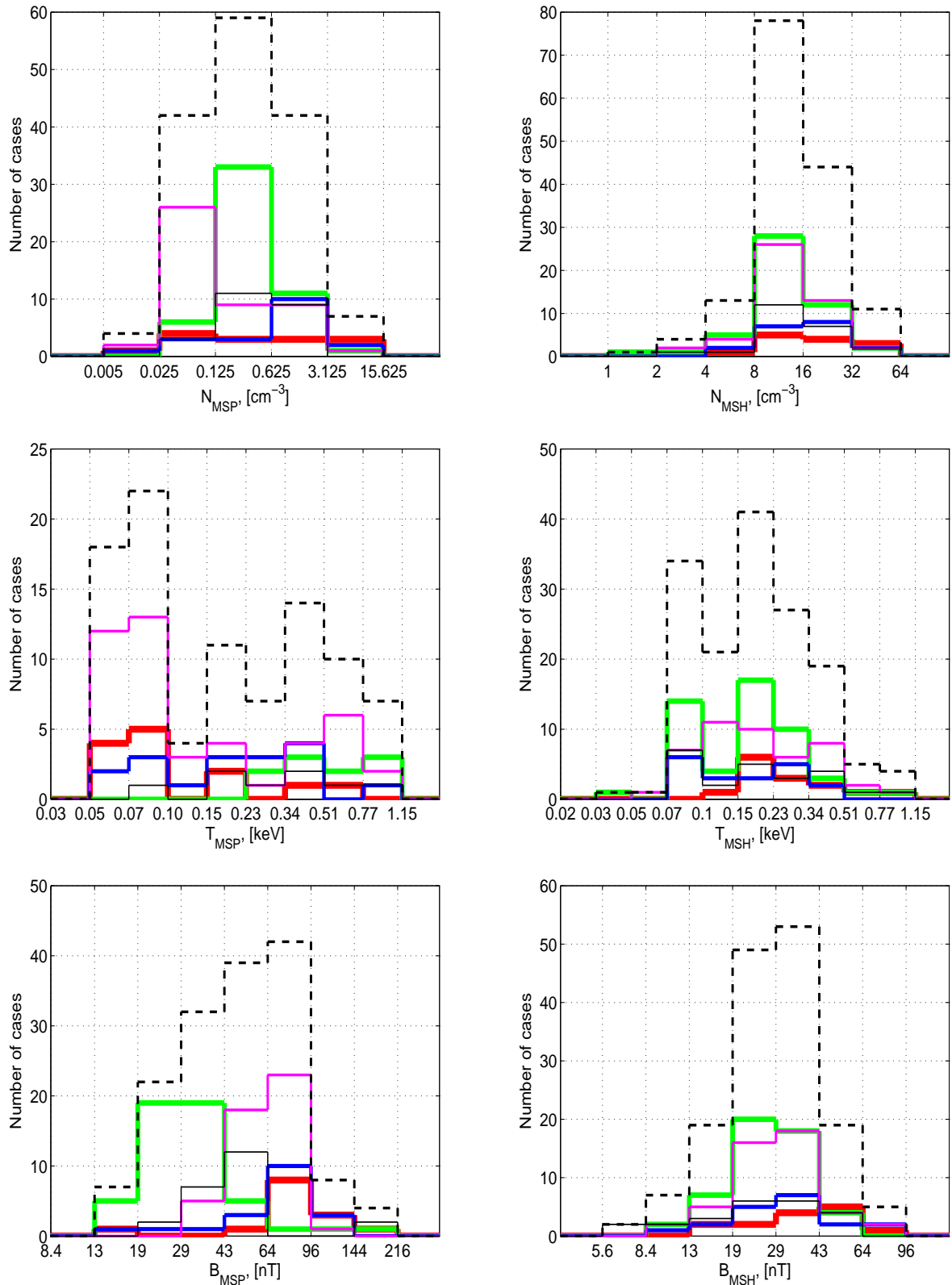


Рис. 21: Распределение плотности (сверху) и температуры (в середине) протонов, а так же модуля магнитного поля (внизу) со стороны магнитослоя (слева) и в магнитосфере (справа) для 154 переходов квартета КЛАСТЕР через пять групп границ между магнитослоем и магнитосферой. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром показаны интегральные распределения.

тослое (справа). Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Значения плотности протонов, их температуры и значения напряженности магнитного поля взяты левее и правее области "transition" (переход) показанных на рисунках 15, 17 and 19. Черным пунктиром изображены интегральные распределения. Средняя плотность протонов (вверху слева) в дневной магнитосфере на порядок больше, чем в магнитосферной доле, в то время, как плотность магнитослоя над дневной магнитосферой и над магнитосферной долей одного порядка. Точные вычисления показали, что средняя плотность протонов магнитослоя над магнитосферной долей (27 см^{-3}) примерно в 1.5 раза выше, чем над дневной магнитосферой (15 см^{-3}). Средняя температура протонов в дневной магнитосфере (в середине слева) примерно на один порядок превосходит температуру в магнитосферной доле. Средняя температура протонов магнитослоя над магнитосферной долей (красным и пурпурным) хоть и одного порядка, но, тем не менее, выше, чем над дневной магнитосферой (зеленым), как это видно середине справа на рис. 21. Точные вычисления показали, что средняя температура протонов магнитослоя на магнитосферной долей (0.4 кэВ) примерно в 1.6 раза выше, чем над дневной магнитосферой (0.25 кэВ). Наконец, средняя напряженность магнитного поля в дневной магнитосфере (внизу слева) в несколько раз меньше, чем в магнитосферной доле, в то время, как средняя напряженность магнитного поля магнитослоя (внизу справа) примерно та же. Точные вычисления показали, однако, что напряженность магнитного поля над магнитосферной долей примерно в 1.5 раза больше, чем над дневной магнитосферой.

Рис. 22 распределения соотношения плотности протонов в магнитослое и магнитосфере (вверху слева), соотношения температуры протонов в магнитослое и магнитосфере (вверху справа), плазменного параметре β - отношения теплового давления к магнитному (внизу слева) и альфвеновское число Маха в магнитослое (внизу справа) для 154 переходов магнитослой-магнитосфера четверкой КЛАСТЕР через пять типов границ между магнитослоем и магнитосферой. Цветовая кодировка дана в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром показано интегральное распределение. Самое часто наблюдаемое соотношение плотности было около 10^{-2} для переходов через дневную магнитосферу и около 3×10^{-3} для переходов через магнитосферную долю. Распределение соотношения температуры протонов имеет два четко разделенных максимума в точке $T_{MSP}/T_{MSH} \simeq 15$ для переходов через дневную магнитосферу и в точке $T_{MSP}/T_{MSH} \simeq 0.2$ для переходов через магнитосферную долю. Частично это обусловлено тем, что плазма магнитослоя над магнитосферной доле примерно в 1.5 горячее, чем над дневной магнитосферой. Однако, большей частью это является следствием того, что плазма магнитосферной доли на порядок холоднее, чем плазма дневной магнитосферы. Параметр β был, в среднем, близок к единице, т.е. тепловое и магнитное давления находились в локальном равновесии. Однако, в магнитослое над дневной магнитосферой β был, в среднем, в 2-4 раза меньше, чем над магнитосферной долей. Поток магнитослоя был, в среднем, альфвеновский. При этом сверхальфвеновские скорости чаще наблюдались над дневной магнитосферой, а субальфвеновские над каспом и магнитосферной долей.

2.2.2 Параметры магнитного поля

Отношение напряженностей магнитного поля и угол между его направлениями с двух сторон магнитопаузы показаны на рис. 23. Напряженность магнитного поля в магнитослое может быть в 8 меньше, чем в магнитосфере. Однако, примерно

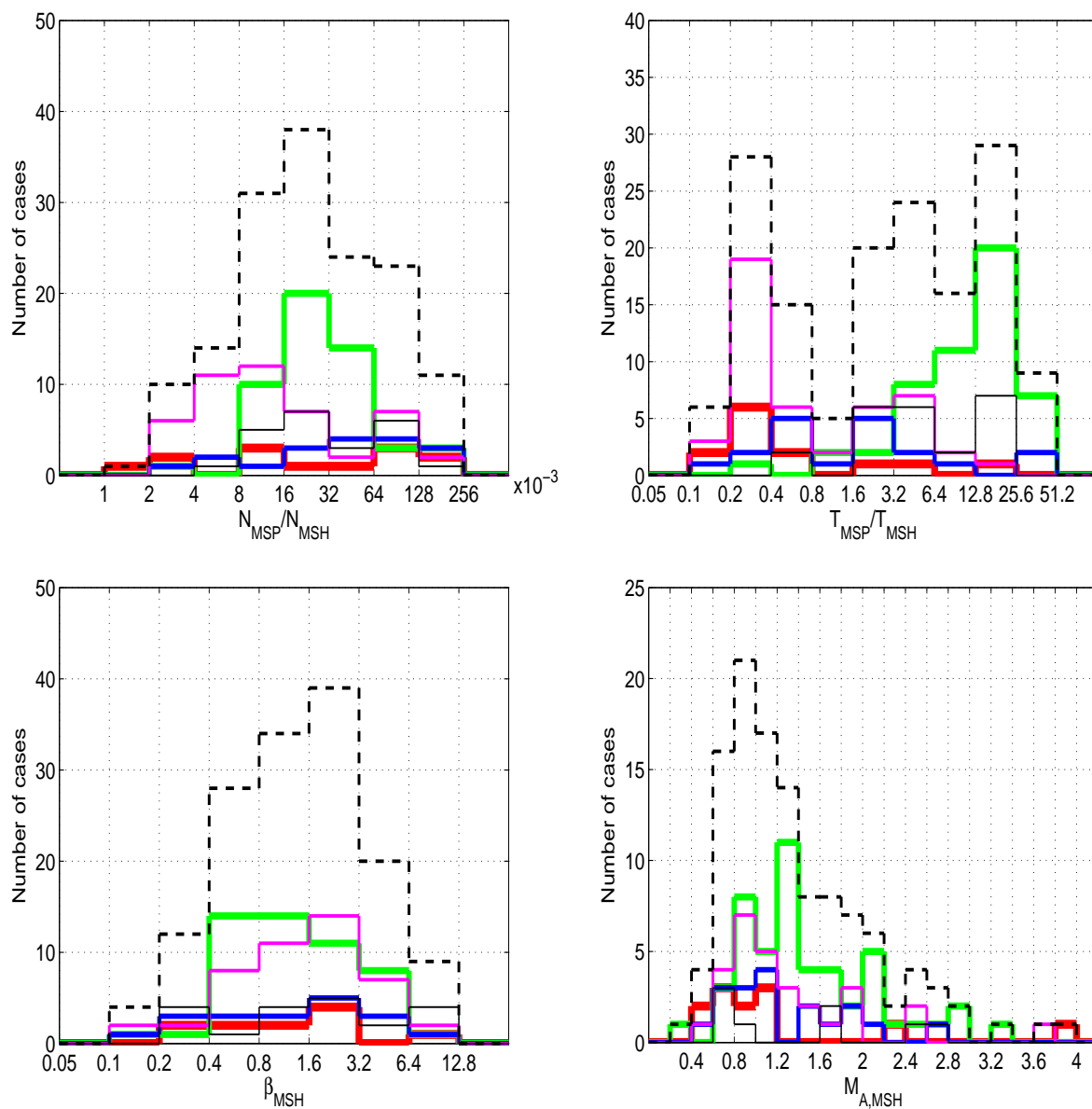


Рис. 22: Распределение соотношения концентрации и температуры протонов магнитослоя и магнитосферы (вверху); распределения плазменного параметра β и альфвеновского числа Маха (внизу) для 154 переходов магнитослой-магнитосфера четверкой КЛАСТЕР через групп границ между магнитослоем и магнитосферой. Цветная кодировка соответствует рис. 20. Черным пунктиром показаны интегральные распределения.

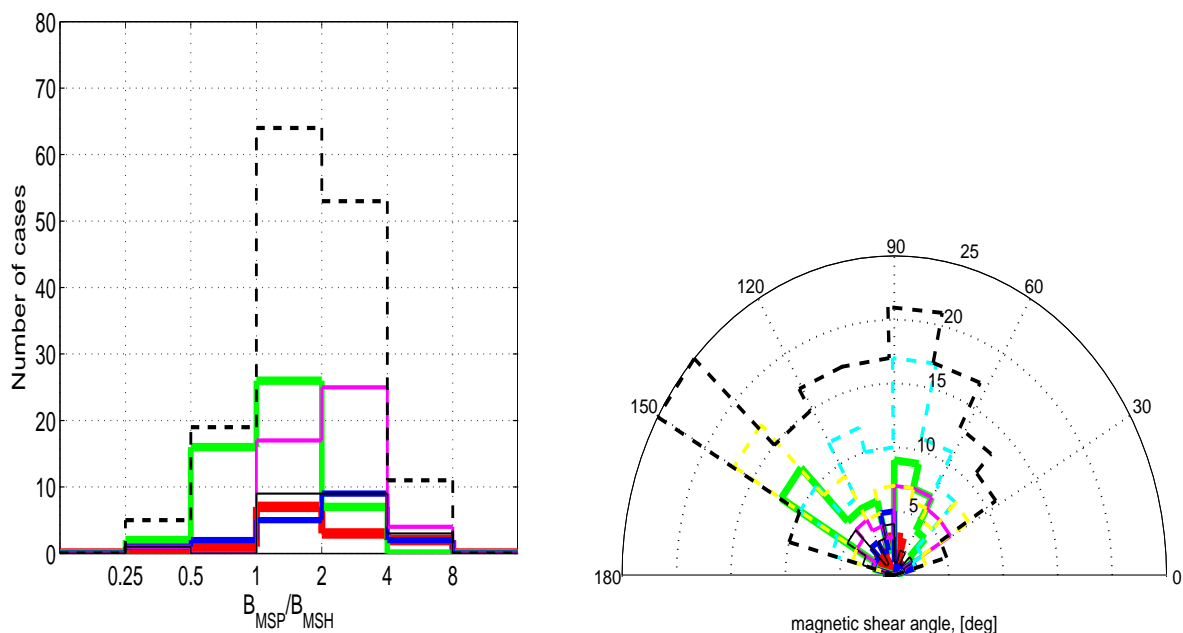


Рис. 23: Распределение отношений напряженностей (слева) и угла (справа) между направлениями магнитного поля в магнитослое и в магнитосфере для 154 переходов квартета КЛАСТЕР. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром изображено интегральное распределение. Оно также показано по отдельности для положительных (голубым) и отрицательных (желтым) B_Z -компонент магнитного поля в магнитослое.

в 40% из 154 переходов, в основном при переходах через дневную магнитосферу, напряженность магнитного поля в магнитослое примерно соответствует магнитосферной. В 15% (24 случая из 154 переходов) напряженность магнитного поля в магнитослое превышает магнитосферную. Правая часть рисунка 23 отображает распределение углов между направлениями вектора магнитного поля в магнитослое и магнитосфере. Вдоль орбиты КЛАСТЕР практически не было случаев с параллельно или антипараллельно направленным магнитным полем с двух сторон магнитопаузы. Интегральное распределение выявило два наиболее часто встречаемых угла в 75 и 135 градусов, которые соответствуют переходам через дневную магнитосферу (зеленым) и через магнитосферную долю (пурпурным и красным), соответственно.

Заметим, что направление магнитного поля в плоскости (Y, Z) не изменяется при прохождении через ударную волну, поскольку межпланетное магнитное поле связано с магнитным полем магнитослоя через соотношения Ренкина-Гюгонно (Landau and Lifshitz, 1959). На рис. 23 также показано по отдельности для положительных (голубым) и отрицательных (желтым) B_Z -компонент магнитного поля в магнитослое. Таким образом видно, что наблюдаемые максимумы определены орбитой спутников КЛАСТЕР и направлением магнитного поля в магнитослое, т.е. наиболее часто встречаемым направлением межпланетного магнитного поля. Это направление определяется гелиосферным токовым слоем, который имеет форму похожую на форму юбки балерины (Parker, 1958).

2.2.3 Баланс давлений

Баланс давлений между плазмами магнитослоя и магнитосферы исследован с помощью рисунков 24 and 25. На рис. 24 показаны распределения лобового, теплового и магнитного давления в магнитослое (три верхние панели), а так же тепловое и магнитное давление магнитосферы (две нижние панели). Как видно из рисунка, в магнитослое доминирует лобовое давление, в особенности пре переходах через дневную магнитосферу. Поскольку плазма магнитослоя над плазменной мантией примерно в 1.6 раз горячее и в 1.5 раза плотнее, а магнитное поле в 1.5 раза больше, сравнивая с параметрами магнитослоя над дневной магнитопаузой (показаны на рис. 21), то тепловое и магнитное давления магнитослоя над плазменной мантией сопоставимы с лобовым давлением. Это видно на трех верхних панелях рис. 24, где максимумы распределений переходов через плазменную мантию (красным) находятся примерно в одной точке: между 0.8 и 1.6 нПа. Savin *et al.* (2005b) получили аналогичный результат путем сравнения теплового и лобового давлений на низких широтах по данным спутника Geotail с измерениями, сделанными спутником Interball-1 за каспом над магнитосферной мантией. Таким образом, тепловое давление магнитослоя над плазменной мантией, в среднем, в два раза выше, чем над дневной магнитосферой. Тепловым давлением плазмы магнитосферной доли можно пренебречь. Наиболее сильным, в среднем, давлением в магнитосфере является магнитное давление. Заметим, однако, что примерно в 25% случаев, в дневной магнитосфере, магнитное давление сопоставимо с тепловым давлением (зеленые распределения в области 0.1-0.8 нПа на двух нижних панелях рис. 24).

Нужно сделать несколько важных замечаний о лобовом давлении магнитослоя прежде, чем рассматривать полный баланс давлений. Прежде всего заметим, что магнитопауза может быть либо полностью непроницаема, либо частично прозрачна для плазмы магнитослоя. Прозрачность может возникнуть, в случае открытой магнитопаузы в виде вращательного разрыва. Возможность прозрачности для тангенциальной магнитосферы появляется в случае эффективной диффузии ионов магнитослоя в магнитосферу при рассеянии на волнах. Степень прозрачности определяет часть лобового давления магнитослоя, которое должно быть взято для учета баланса давлений на магнитопаузе: если взаимодействие между магнитослоем и магнитопаузой упруго, то нужно учитывать полное лобовое давление; напротив, если это взаимодействие полностью неупругое (из-за открытости магнитопаузы или ненулевой эффективной диффузии), то лишь половина лобового давления должна быть учтена. К сожалению, из-за весомых ошибок данного анализа (порядка двойки) нельзя сделать вывод о степени упругости взаимодействия. Вероятно, в разных местах магнитопауза прозрачна по-разному. Другим важным фактором является то, что мы можем учесть ориентацию магнитопаузы в данном анализе на довольно грубом уровне, то есть невозможно надежно учесть падения потока плазмы магнитослоя на поверхность магнитопаузы. Чтобы хотя бы частично избежать сильных ошибок из-за последнего обстоятельства, лобовое давление плазмы магнитослоя корректируется, принимая во внимание магнитную широту и долготу в каждом из переходов магнитослой-магнитосфера.

На рис. 25 отношение полного давления магнитослоя к полному давлению в магнитосфере $(m_p n_p V_p^2 + n_p k_B T_p + B^2/2\mu_0)_{MSH} / (n_p k_B T_p + B^2/2\mu_0)_{MSP}$, где $(m_p n_p V_p^2)_{MSH}$ - лобовое давление магнитослоя, $(n_p k_B T_p)_{MSH}$ - тепловое давление магнитослоя, $(B^2/2\mu_0)_{MSH}$ - магнитное давление магнитослоя, $(n_p k_B T_p)_{MSP}$ - тепловое давление магнитосферы и $(B^2/2\mu_0)_{MSP}$ - магнитное давление магнитосферы. В правой

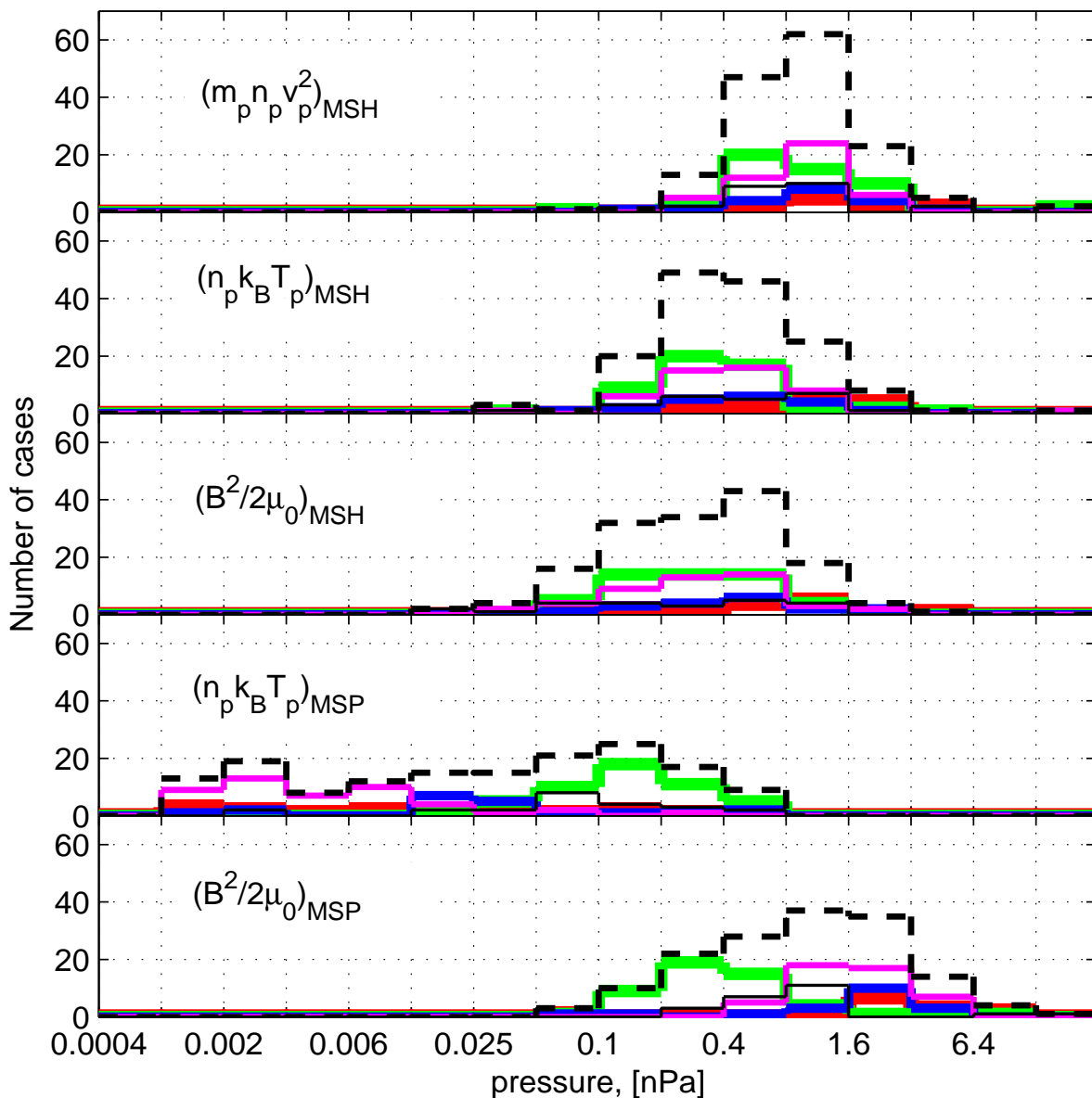


Рис. 24: (сверху вниз) Распределение лобового, теплового и магнитного давления магнитослоя, и теплового и магнитного давления магнитосферы для 154 переходов квартета КЛАСТЕР. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром изображено интегральное распределение используя все пять видов переходов.

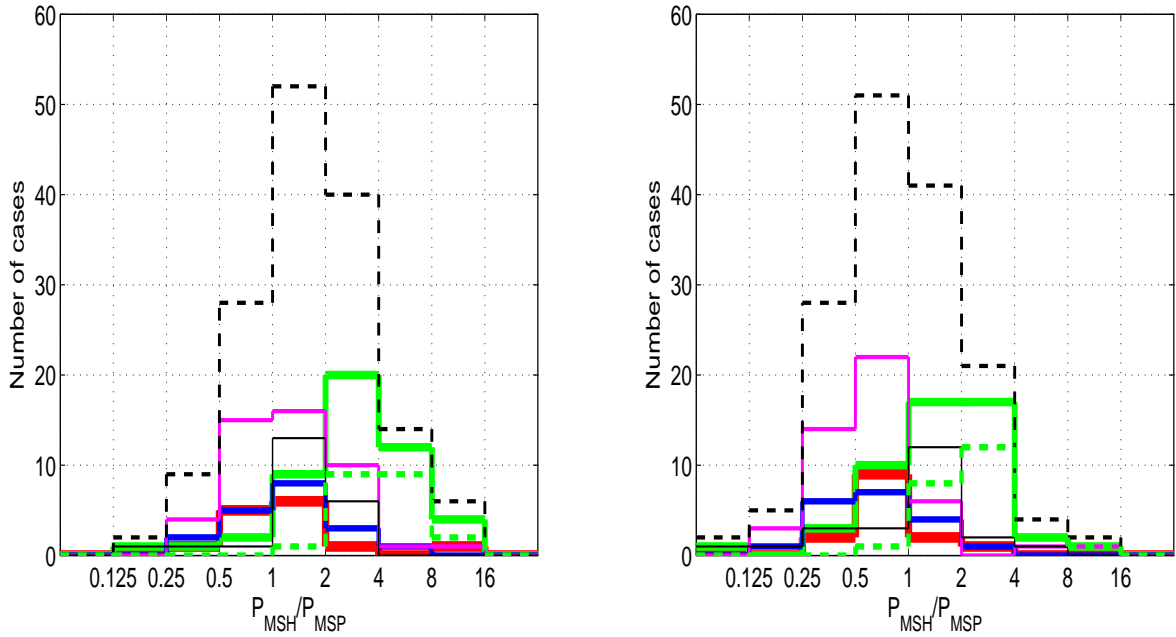


Рис. 25: Распределение отношения давления в магнитослое к давлению в магнитосфере $(m_p n_p V_p^2 + n_p k_B T_p + B^2/2\mu_0)_{MSH}/(n_p k_B T_p + B^2/2\mu_0)_{MSP}$ (справа: лобовое давление плазмы магнитослая $(m_p n_p V_p^2)_{MSH}$ умножено на $\cos^2(\phi)\cos^2(\theta)$, где ϕ и θ - магнитная широта и долгота соответственно) для 154 переходов квартета CLUSTER. Цветовая кодировка в соответствии с рис. 20. Черным пунктиром - интегральное распределение. Зеленым пунктиром - переходы магнитослой-дневная магнитосфера, где тепловое и магнитное давления магнитосферы меньше.

части рис. 25 лобовое давление плазмы магнитослая $(m_p n_p V_p^2)_{MSH}$ умножено на $\cos^2(\phi)\cos^2(\theta)$, где ϕ и θ магнитная широта и долгота, соответственно. В то время, как плазма магнитослая над каспом и магнитосферной долей (черным, синим, пурпурным и красным), в среднем, довольно хорошо сбалансирована магнитосферным давлением ($\langle P_{MSH}/P_{MSP} \rangle \approx 1$) (в левой части рис. 25), лобовое давление плазмы магнитослая над дневной магнитосферой находится в лучшем соответствии, когда оно умножено на $\cos^2(\phi)\cos^2(\theta)$. Это является следствием довольно большого числа переходов через дневную магнитосферу на магнитосферных флангах. Однако, даже после такой искусственной корректировки, в существенном количестве переходов из или в дневную магнитосферу (сплошным зеленым) полное давление магнитослая значительно превышает магнитосферное. Оказалось, что в 24 из 154 перехода, когда магнитное поле в магнитослое было больше, чем в магнитосфере, являются именно этими случаями с сильно нарушенным балансом давлений. Распределение соотношения давлений с двух сторон магнитопаузы в этих 24 случая показаны на рис. 25 штрихованной зеленой линией. Дополнительный анализ выявил, что в 23 из 24 случаев уже сумма магнитного и теплового давлений в магнитослое больше, чем в магнитосфере, т.е. положив, что вклад лобового давления плазмы магнитослая равен нулю. Более того, в 10 из 23 случаев сумма теплового и магнитного давлений в магнитослое была больше, чем в магнитосфере более, чем в два раза. Таким образом, во время этих переходов магнитопауза формировалась сильно нестационарным образом. Формирование магнитопаузы при таких условиях необходимо изучить в будущем.

Таблица 2: Характеристики 52 токовых слоев магнитопаузы

	Дата ггггммдд	Время ччммсс	Тип	Сдвиг В [град]	Нормаль ($n_x; n_y; n_z$)	V [км/с]	L_B [км]	L_B [ρ_p]	J [нА/м ²]
1	20020203	091500	PM	131	(-0,92; -0,02; 0,39)	28	980	27	330
2	20020206	074700	LL	130	(0,70; 0,72; 0,00)	136	1632	18	400
3	20020206	081330	LL	125	(-0,73; 0,61; -0,32)	92	2760	37	360
4	20020206	081715	LL	67	(0,55; 0,58; 0,60)	32	576	15	240
5	20020206	085124	LL	136	(0,79; 0,00; 0,61)	48	720	17	360
6	20020215	234110	EL	108	(0,88; 0,02; 0,48)	26	624	5	280
7	20020218	045930	EL	118	(0,15; -0,36; 0,92)	94	1128	17	400
8	20020302	033105	LL	20	(0,56; -0,47; 0,68)	33	396	4	190
9	20020330	131130	PM	100	(0,94; 0,17; 0,23)	24	48	1	1350
10	20020330	131330	PM	100	(0,91; -0,24; 0,35)	28	336	7	700
11	20020330	132845	PM	108	(0,90; -0,42; 0,10)	67	2010	40	1100
12	20020410	231100	PM	153	(-0,66; 0,21; 0,72)	6	252	13	730
13	20020423	081830	PM	72	(0,87; -0,25; 0,43)	11	396	21	1300
14	20020510	042655	LL	170	(0,99; -0,02; -0,04)	90	450	5	300
15	20020510	042950	LL	120	(0,70; -0,40; 0,59)	28	364	4	450
16	20020521	220720	LL	68	(0,83; -0,24; 0,48)	39	1638	42	370
17	20020605	083255	LL	65	(-0,65; 0,37; -0,66)	32	192	1	60
18	20020607	173345	LL	152	(0,85; -0,53; 0,03)	43	2838	45	250
19	20020607	174300	LL	132	(0,91; -0,28; 0,30)	40	1680	13	250
20	20020613	131630	LL	69	(0,63; -0,74; 0,22)	68	2448	55	200
21	20020613	142900	LL	64	(0,14; -0,99; -0,09)	78	936	9	200
22	20020613	183724	LL	36	(-0,16; 0,95; 0,27)	45	1215	8	160
23	20020613	184806	LL	91	(-0,27; 0,03; 0,96)	38	684	4	200
24	20020613	190106	LL	25	(0,56; -0,20; 0,12)	80	1200	11	180
25	20020616	004912	LL	112	(0,22; 0,93; 0,30)	68	408	18	150
26	20020616	005100	LL	116	(0,28; 0,88; 0,37)	74	2664	78	170
27	20020616	005600	LL	153	(0,70; -0,47; -0,54)	37	1665	12	120
28	20020616	022630	LL	161	(0,13; 0,35; 0,93)	58	696	8	210
29	20031125	114315	LL	173	(-0,18; -0,74; 0,65)	53	3180	49	130
30	20031201	130900	PM	149	(0,91; 0,33; -0,27)	56	2352	34	470
31	20031214	064620	LL	167	(0,58; 0,67; 0,46)	150	1050	7	130
32	20031223	193800	LL	160	(0,87; 0,41; -0,27)	146	2628	22	60
33	20040104	141215	LL	134	(0,77; 0,64; 0,03)	62	1488	40	100
34	20040118	191130	LL	94	(0,56; 0,12; 0,82)	127	1524	35	90
35	20040123	145312	LL	144	(0,80; -0,20; 0,56)	171	4617	122	60
36	20040128	063700	LL	106	(0,83; 0,29; 0,48)	48	2304	54	100
37	20040130	150230	LL	169	(0,61; 0,16; 0,77)	112	2688	24	135
38	20040130	165730	LL	96	(-0,49; -0,34; -0,80)	64	5376	83	80
39	20040221	012200	LL	21	(0,69; -0,47; 0,55)	25	750	19	40
40	20040228	040230	LL	130	(0,92; 0,03; 0,38)	69	3726	116	125
41	20040229	230030	PM	48	(-0,78; -0,61; 0,13)	62	1116	5	470
42	20040306	083500	LL	133	(0,95; 0,09; 0,30)	27	1296	23	100
43	20040406	043430	EL	169	(0,78; -0,05; 0,63)	46	276	6	380
44	20040410	224400	LL	108	(0,91; -0,23; 0,34)	26	312	10	450
45	20040410	224600	LL	97	(-0,48; 0,64; -0,60)	64	1536	42	240
46	20040410	225830	LL	159	(0,60; -0,76; 0,24)	185	3330	117	180
47	20040413	120540	LL	65	(0,06; 0,97; 0,25)	145	1160	19	115
48	20040413	124400	LL	147	(0,75; 0,33; 0,58)	108	3240	59	140
49	20040413	131730	LL	115	(-0,80; 0,54; -0,27)	33	594	2	80
50	20040415	163230	PM	170	(0,99; 0,12; 0,10)	51	510	15	250
51	20040415	164730	PM	137	(0,93; 0,28; 0,22)	17	340	9	360
52	20040422	050130	PM	154	(0,50; 0,85; 0,17)	6	180	7	600

2.3 Собственные параметры магнитопаузы

Чтобы прояснить условия формирования магнитопаузы были более детально исследованы параметры токового слоя магнитопаузы для 52 пересечений "правильной" магнитопаузы. В диссертации магнитопауза считается "правильной", если она содержит четкий токовый слой, т.е. наблюдается четкое изменение направления вектора магнитного поля при переходе из магнитослоя в магнитосферу. В представленной далее статистике, магнитопауза всегда имеет пограничный слой у своей магнитосферной границы: пограничный слой низкоширотного типа, входной слой или плазменную мантию. Таблица 2 содержит дату, время, угол между направлениями вектора магнитного поля с двух сторон токового слоя магнитопаузы, нормаль к токовому слою магнитопаузы в системе отсчета GSM, скорость магнитопаузы вдоль нормали, толщину магнитопаузы (как в км, так и в локальных ларморовских радиусах протона ρ_p), а так же пиковое значение модуля плотности тока для каждого из пересечений. Кроме того, в таблице приведен тип прилегающего пограничного слоя магнитопаузы: LL, EL и PM означают пограничный слой низкоширотного типа, входной слой и плазменную мантию, соответственно. С целью продемонстрировать разницу между LL, EL и PM группами магнитопауз, ниже дано по примеру для каждой группы на рисунках 26, 27 and 28. Рисунки сделаны в одном формате: L, M и N магнитного поля, скорость, плотность и температура

протонов.

На рис. 26 показан пример пересечения магнитопаузы с прилегающим пограничным слоем низкоширотного типа. Влетая из магнитослоя (справа) в магнитосферу (слева) параметры плазмы изменяются плавно к соответствующим магнитосферным уровням. Заметим, что для таких пересечений магнитопаузы всегда справедливо, что плотность протонов в магнитосфере намного меньше, а температура намного больше, чем в магнитослое.

Рис. 27 отображает пересечение магнитопаузы с прилегающим входным слоем. В отличие от пограничного слоя низкоширотного типа, скорость, плотность и температура протонов на всем протяжении входного слоя лежат на практически постоянных промежуточных уровнях. Заканчивается входной слой областью захвата (trapping boundary, ТВ). В магнитном поле область захвата представляет из себя слабый, по сравнению с магнитопаузой, токовый слой внутри которого находятся ускоренная плазма со скоростями выше, чем в магнитослое.

Третий вид пограничного слоя магнитопаузы – плазменная мантия – показан на рис. 28. В отличие от обоих предыдущих примеров, плазменная мантия всегда наблюдается за каспом у магнитопаузы, покрывающей магнитосферную долю. Температура в магнитосферной доле обычно сравнима или меньше, чем в магнитослое, а плотность протонов в ней намного меньше, чем в дневной магнитосфере (сравните с рисунками 21 и 22).

2.3.1 Геометрия магнитопаузы

У токового слоя магнитопаузы во время 52 пересечений были определены нормаль, скорость вдоль нормали и толщина, используя метод, примененный в работе (Russell *et al.*, 1983). Чтобы получить надежные результаты полученная нормаль магнитопаузы была проверена анализом минимума вариации магнитного поля и максимума вариации векторного произведения скорости плазмы и магнитного поля. На рис. 29 показано местонахождение (начала векторов) а направление скорости (стрелки векторов) магнитопаузы в (X,Z) , (Y,Z) и (X,Y) плоскостях системы отсчета GSM. Заметно, что на флангах магнитосферы нормаль магнитопаузы направлена в основном параллельно оси Y . Три цвета соответствуют магнитопаузе с прилегающим пограничным слоем низкоширотного типа (светло-зеленым), входной слой (темно-зеленым) и плазменная мантия (красным). Наиболее часто у магнитопаузы наблюдался пограничный слой низкоширотного типа (в 38 из 52 случаев). Плазменная мантия наблюдалась ещё в 11 случаях. Орбита спутников редко позволяла наблюдать плазменную мантию в северном полушарии. Входной слой был идентифицирован в оставшихся трех случаях пересечения магнитопаузы. Все они обнаружены в северном полушарии. Видно, что, как входной слой, так и плазменная мантия идентифицируются вблизи полуденного меридиана.

Рис. 30 отображает распределение угла между направлениями магнитного поля с двух сторон магнитопаузы для 52 пересечений. Видно, что магнитопауза с токовым слоем наблюдалась чаще для больших углов (свыше 60 градусов). Только в четырех случаях угол составил примерно 30 градусов. Berchem and Russell (1982b) и Gosling *et al.* (1990) получили аналогичный результат для низкоширотной магнитопаузы.

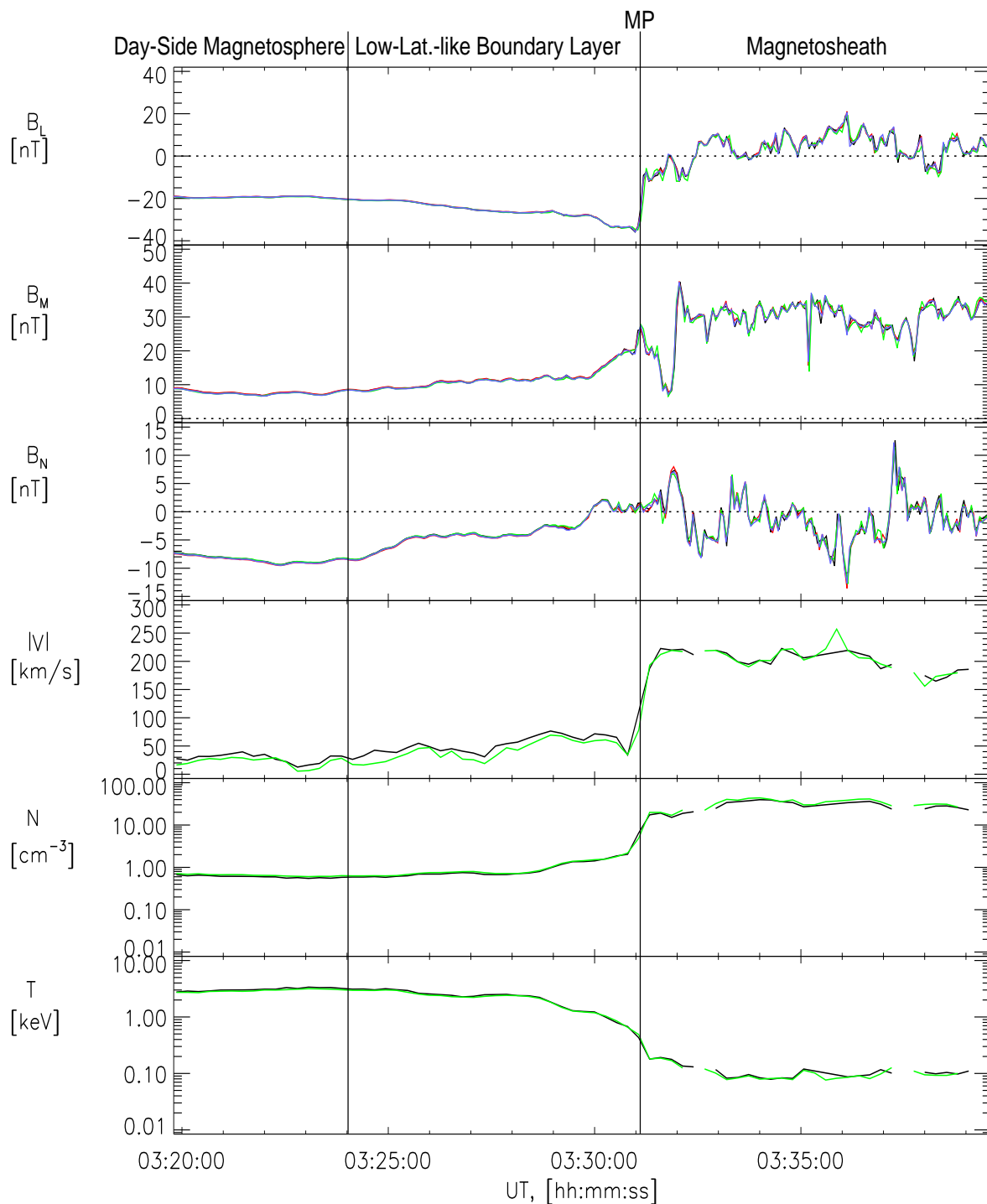


Рис. 26: Пример пересечения магнитопаузы с прилегающим пограничным слоем низкоширотного типа. Данные четырех аппаратов КЛАСТЕР 2 марта 2002 в период 03:20-03:40 UT (сверху вниз): L, M и N компоненты магнитного поля, скорость протонов, плотность протонов и температура протонов.

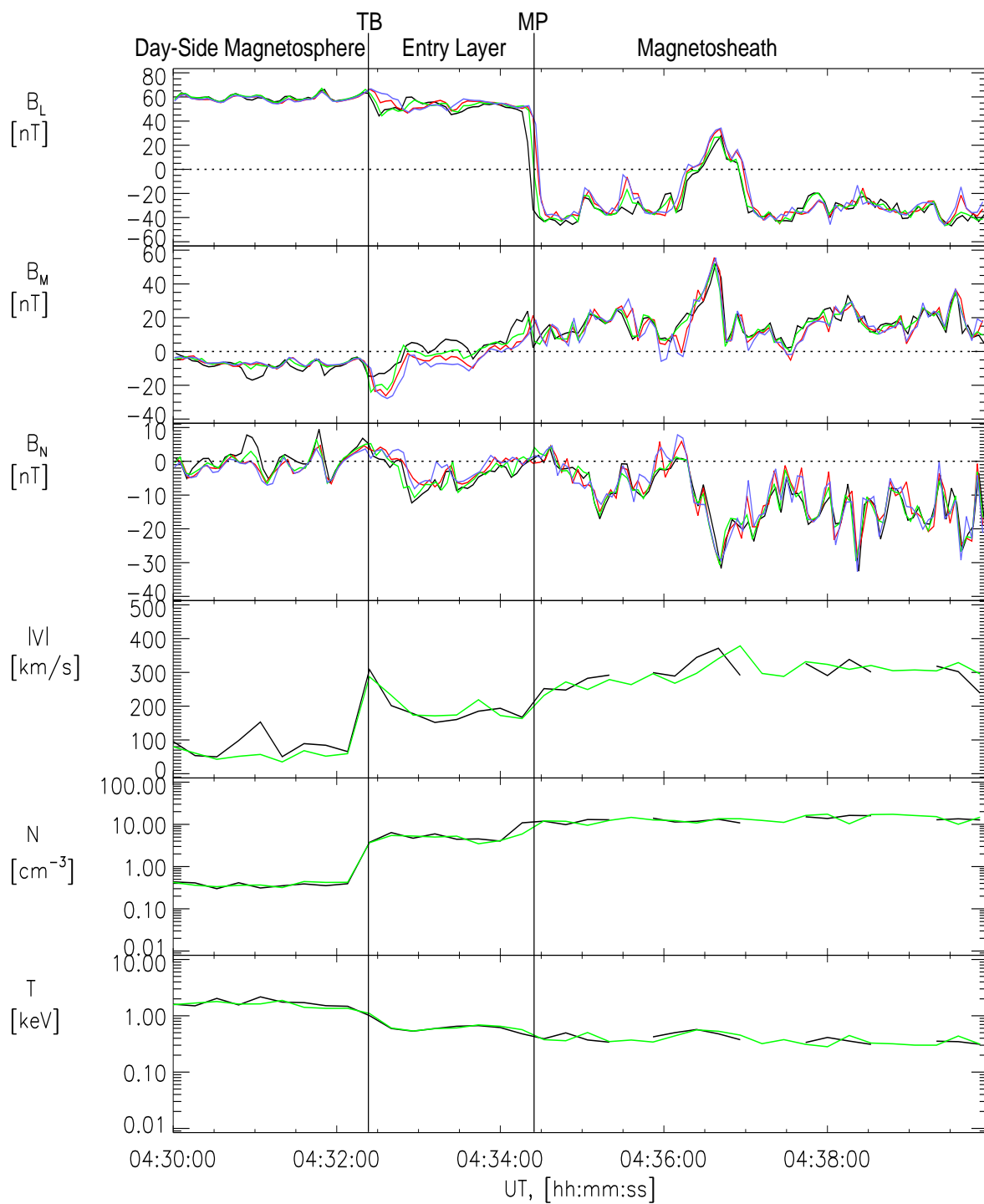


Рис. 27: Пример пересечения магнитопаузы с прилегающим высокоширотным пограничным слоем "entry layer" с завершающей областью захвата "trapping boundary" (TB). Формат тот же, что на рис. 26

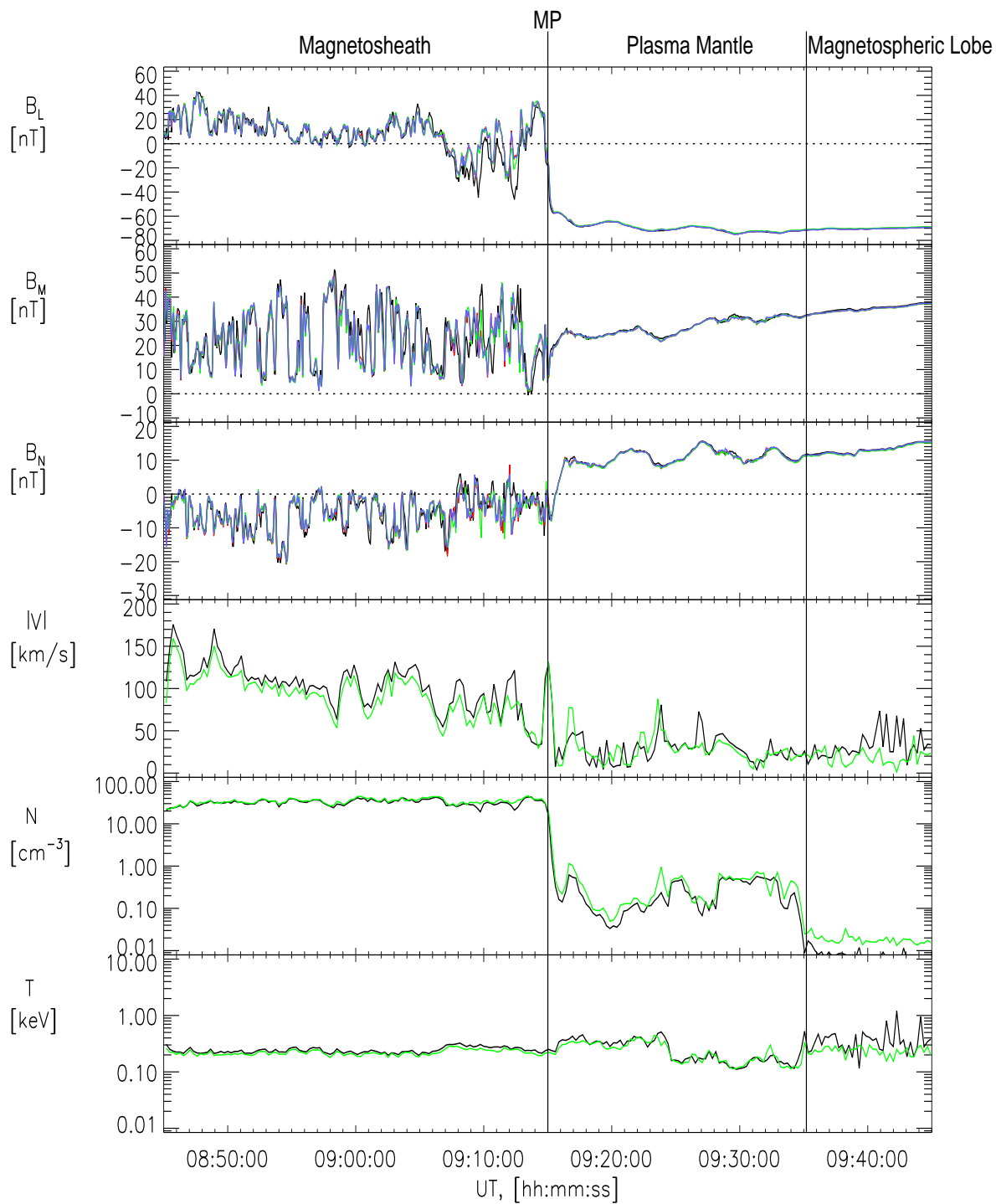


Рис. 28: Пример пересечения магнитопаузы с прилегающей плазменной мантией. Формат тот же, что на рис. 26

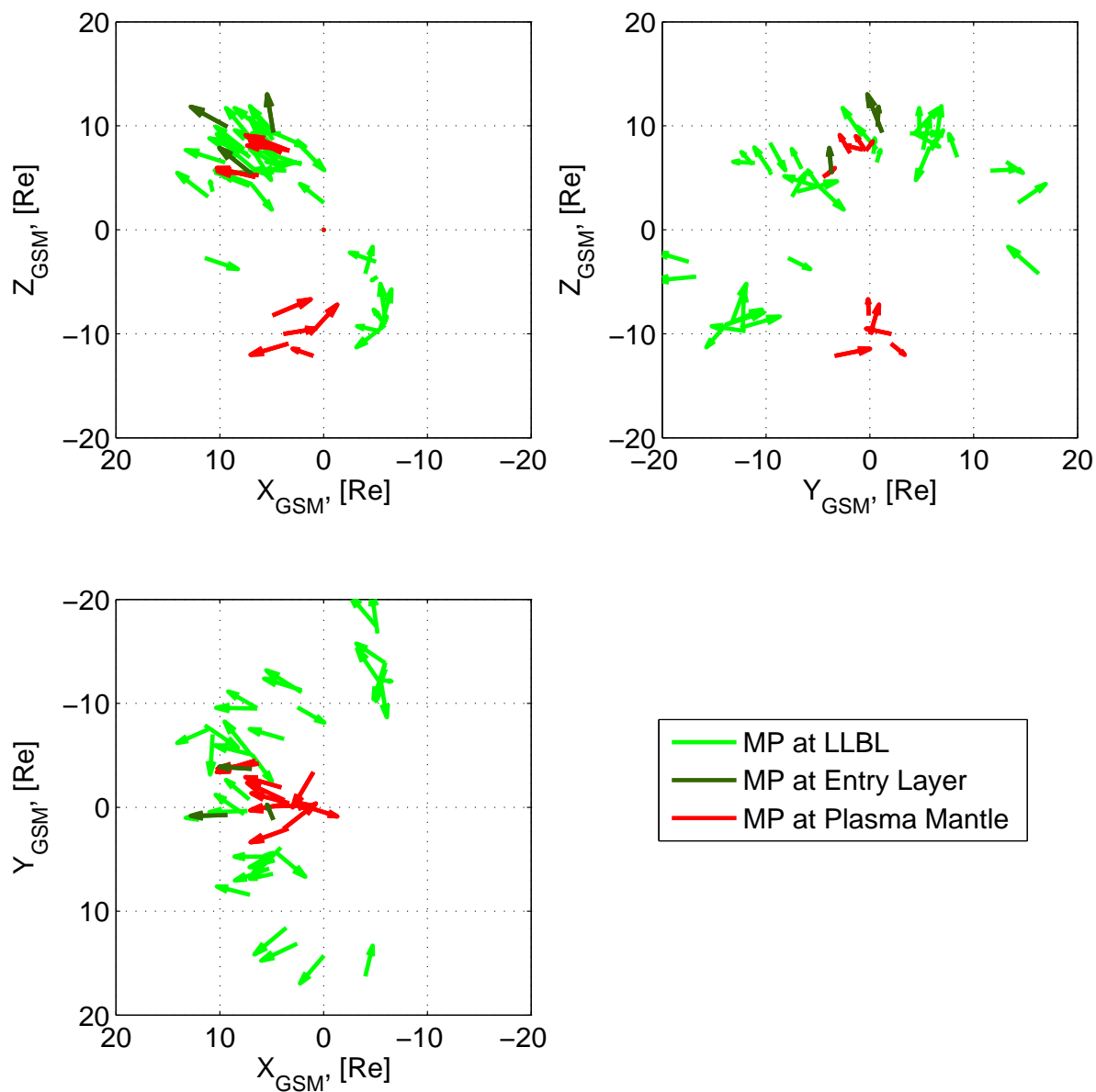


Рис. 29: Местонахождение (начало векторов) и направление скорости движения (окончание векторов) магнитопаузы в (X,Z) , (Y,Z) и (X,Y) плоскостях GSM системы отсчета для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цвет указывает на различные типы прилегающего пограничного слоя.

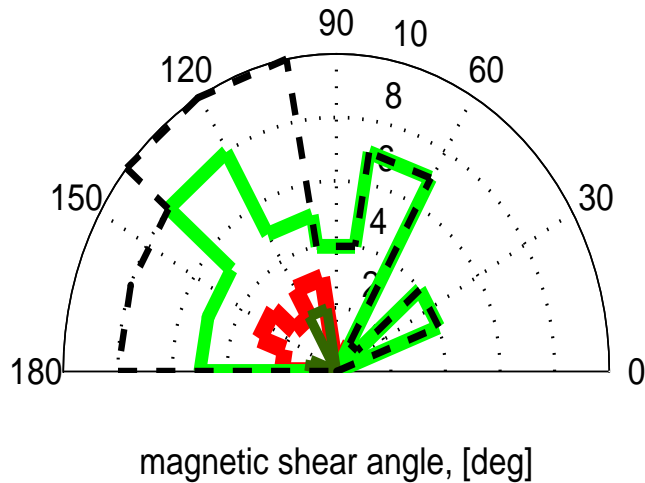


Рис. 30: Распределение углов между направлением магнитного поля со стороны магнитослоя и со стороны магнитосферы для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка согласно рис. 29.

2.3.2 Скорость, толщина и ток магнитопаузы

Верхняя левая часть рис. 31 — распределение скоростей магнитопаузы во время 52 пересечений. Найдено, что скорость магнитопаузы не превышала 180 км/с вдоль нормали, как внутрь, так и наружу магнитосферы. Среднее значение скорости магнитопаузы составило ~ 60 км/с (в ~ 1.3 раза медленнее, чем на низких широтах, сравните с работой Berchem and Russell (1982b)). Медианное значение составило ~ 50 км/с. Магнитопауза с прилегающей плазменной мантией двигалась медленнее — со скоростью менее ~ 70 км/с.

Вверху справа и внизу слева на рис. 31 показано распределение толщин токового слоя магнитопаузы для 52 пересечений, как в км, так и в ρ_p . Заметим, что здесь за толщину магнитопаузы всегда принимается длина градиента в B_L -компоненте магнитного поля, т.е. в компоненте магнитного поля, коллинеарной направлению максимума вариации поля при переходе через магнитопаузу. Токовый слой магнитопаузы варьировался от ~ 50 км (один ларморовский радиус протона магнитослоя ρ_p) до ~ 6000 км ($120\rho_p$). Средняя толщина составила ~ 1600 км ($30\rho_p$). Это в ~ 1.8 раз (в три раза в терминах ρ_p) толще, чем на низких широтах (сравните с работами Elphic and Russell (1979); Berchem and Russell (1982b); Le and Russell (1994)). Медианное значение толщины магнитопаузы оказалось равным ~ 800 км ($10\rho_p$). Магнитопауза с прилегающей плазменной мантией оказалась примерно в два раза тоньше, чем с пограничным слоем низкоширотного типа.

Далее, были вычислены плотности токов на магнитопаузе напрямую из ротора магнитного поля (Dunlop *et al.*, 2002b). Нижняя часть рис. 31 показывает распределение пикового значения плотности тока для 52 пересечений магнитопаузы. Было найдено, что плотности тока магнитопаузы варьировались между ~ 20 нА/м² ~ 1.3 мкА/м². Средняя плотность токов была ~ 600 нА/м². Медианное значение плотности составило ~ 200 нА/м². Плотность тока магнитопаузы с прилегающей плазменной мантией (показано красным) примерно в два раза превышала плотности токов магнитопаузы с низкоширотным пограничным слоем (показано светло-зеленым).

Заметим, что Paschmann *et al.* (2005), используя 96 пересечений магнитопаузы (24 пересечения, каждое четырьмя аппаратами одновременно) в один и тот же

день получили на порядок меньшие значения плотности тока магнитопаузы, по сравнению с переставленными здесь результатами. Однако, в работе Paschmann *et al.* (2005) плотности тока были получены из скачка B_L -компоненты магнитного поля и оценок толщины магнитопаузы, а не напрямую их ротора магнитного поля.

Далее было решено проверить, успевают ли развиваться тиринговая неустойчивость в токовом слое магнитопаузы настолько, чтобы начался процесс перколяции, который мог бы привести к последующему пересоединению силовых линий магнитного поля Земли с силовыми линиями межпланетного магнитного поля.

В работах Galeev and Zelenyi (1976); Galeev (1983) показано, что в случае, если тиринговая неустойчивость является глобальным явлением на магнитопаузе, то безразмерная толщина токового слоя магнитопаузы $\beta L_B / \rho_p$ должна зависеть от угла поворота магнитного поля при пересечении токового слоя магнитопаузы. Эта зависимость имеет экстремум при значениях угла между 60-90 градусами. Рис. 32 показывает, однако, что очевидной зависимости $\beta L_B / \rho_p$ от угла поворота магнитного поля при пересечении токового слоя магнитопаузы во время 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2 не наблюдается. Таким образом, если тиринговая неустойчивость вообще когда-либо возбуждается на токовом слое магнитопаузы, то она не является основной неустойчивостью магнитопаузы.

Наконец, была сделана проверена возможная связь собственных параметров магнитопаузы с внешними параметрами в прилегающем магнитослое и магнитосфере. В частности, проверялась корреляция между толщиной магнитопаузы, а так же плотности токов в токовом слое магнитопаузы с углами между направлениями магнитного поля с двух сторон магнитопаузы и с лобовым давлением плазмы магнитослоя. Однако, никаких очевидных корреляций обнаружено не было. Также, не было подтверждена линейная связь толщины магнитопаузы с магнитной широтой, полученная в работе Berchem and Russell (1982b) (см. рис. 10) для низкоширотной магнитопаузы. В силу этого, можно предположить, что толщина магнитопаузы определяется не внешними параметрами плазмы и магнитного поля с двух сторон магнитопаузы, а локальными процессами, например, эффективной диффузией ионов при рассеянии на волнах. Аргументы в поддержку данной гипотезы подробно рассмотрены в разделе 3.

В работе Le and Russell (1994) по данным двухспутникового проекта ISEE во время пересечений низкоширотной магнитопаузы утверждается, что магнитопауза тоньше при больших значениях плазменного параметра β (отношения теплового давления к магнитному). На Рис. 33 показана диаграмма разброса толщины магнитопаузы в зависимости от величины параметра β для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Действительно, наблюдается тенденция, что при больших значениях β разброс толщин магнитопаузы гораздо меньше, чем при малых значениях β . Причем средняя толщина магнитопаузы при больших значениях β меньше средней толщины всех 52 магнитопауз.

2.3.3 Закон Ампера

Поскольку толщины и плотности токов магнитопаузы были определены независимо, можно проверить насколько J_M -компонента плотности тока магнитопаузы соответствует градиенту B_L -компоненты магнитного поля через закон Ампера. Рис. 34 отображает диаграммы разброса среднего значения J_M -компоненты плотности тока внутри токового слоя магнитопаузы в зависимости от скачка в B_L -компоненте магнитного поля (вверху слева) и от толщины токового слоя магнитопаузы L_B

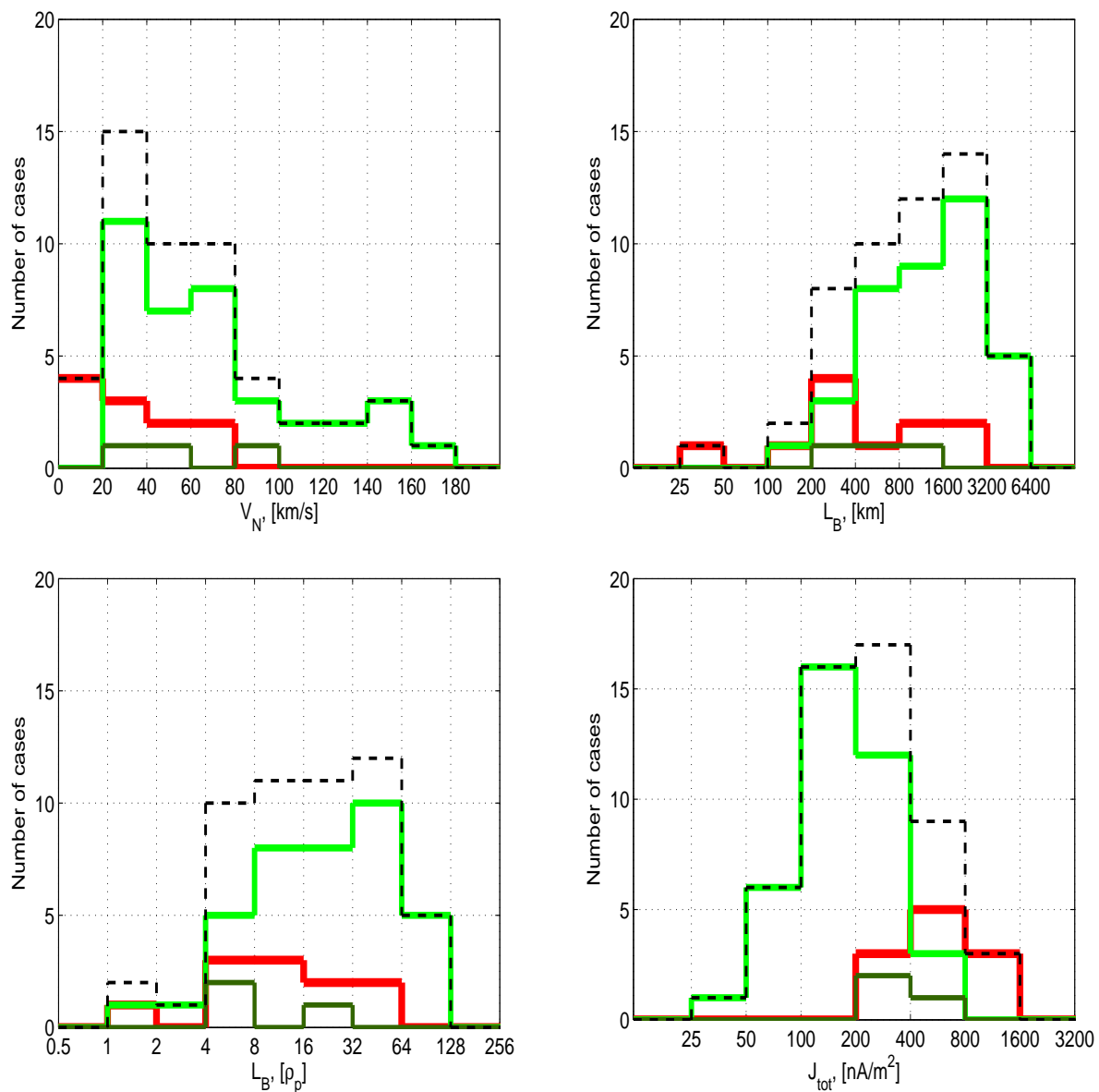


Рис. 31: (слева направо, сверху вниз) Распределение скоростей в км/с, толщин в км, толщин в Ларморовских радиусах теплового протона магнитослоя ρ_p и максимальных амплитуд тока внутри токового слоя магнитопаузы для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует рис. 29

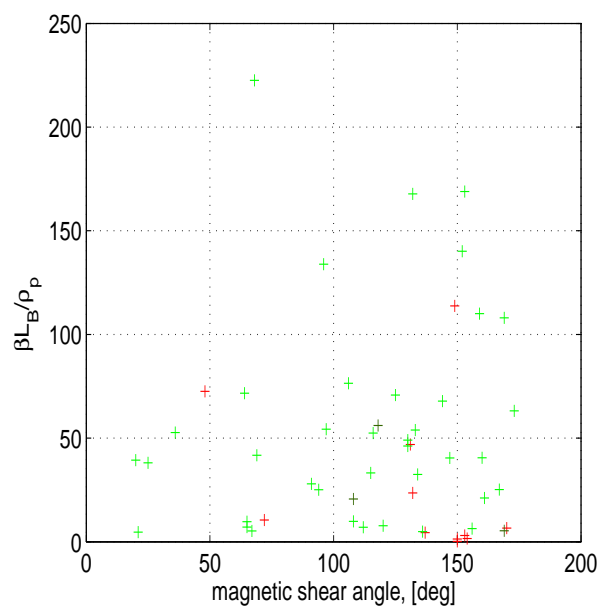


Рис. 32: Диаграмма разброса безразмерной толщины магнитопаузы $\beta L_B / \rho_p$ в зависимости от угла между направлением магнитного поля со стороны магнитослоя и со стороны магнитосферы для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует легенде рис. 29.

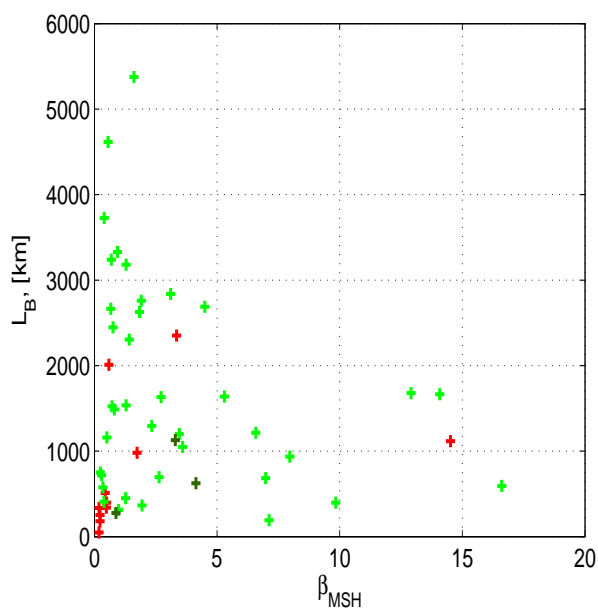


Рис. 33: Диаграмма разброса толщины магнитопаузы в зависимости от величины параметра β (отношения теплового давления к магнитному) для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует рис. 29 (Рапов *et al.*, 2007).

(вверху справа). Как видно из рис. 34, величина плотности тока определяется, как толщиной магнитопаузы, так и скачком в B_L -компоненте магнитного поля при переходе через токовый слой магнитопаузы. Нижняя часть рис. 34 показывает распределение величины $\mu_0 \langle J_M \rangle L_B / \Delta B_L$ для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Хотя эта величина, в среднем, порядка единицы, в распределении присутствуют хвосты, отстоящие от единицы на порядок величины. Это может быть по двум причинам: во-первых, в некоторых случаях расстояния между аппаратами превышали толщину магнитопаузы; во-вторых, в половине из 52 случаев основной токовый слой магнитопаузы размещен на масштабах меньших длины градиента B_L -компоненты магнитного поля (на масштабах поворота магнитного поля в плоскости магнитопаузы), как это продемонстрировано в ниже на рис. 37 и 38.

2.3.4 Открытая и закрытая магнитопауза

Обратимся теперь к вопросу о строении токового слоя магнитопаузы в смысле существующих конфигураций магнитного поля, моментов функций распределения ионов и профиля плотности тока. Во введении к данному разделу диссертации сказано, что магнитопауза может существовать 1) в виде тангенциального разрыва (или закрытого, так как поток плазмы поперек тангенциального разрыва равен нулю), при переходе через который касательные к разрыву компоненты вектора магнитного поля (B_L , B_M) и скорости (V_L , V_M) претерпевают резкое изменение, в то время, как нормальные компоненты магнитного поля и скорости (B_N и V_N) равны нулю, 2) в виде вращательного разрыва (или открытого, так как существует ненулевой поток плазмы поперек вращательного разрыва), при переходе через который B_N и V_N не равны нулю.

При анализе структура токового слоя магнитопаузы, используя данные с четырех аппаратов КЛАСТЕР в время 52 пересечений из таблицы 2 было обнаружено, что возможны две устойчивые конфигурации магнитопаузы тангенциального типа, которые встречаются с примерно одинаковой частотой.

Обратимся к рисункам 35 и 36. На первом изображены данные четырех аппаратов КЛАСТЕР (см. легенду вверху слева) во время пересечения магнитопаузы 16 июня 2002 г. в период 00:55:00 - 00:56:00 UT: L, M и N компоненты магнитного поля; модуль магнитного поля; угол проекции вектора магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы; L, M и N компоненты тока (см. легенду); плотность ионов; L, M и N компоненты скорости ионов; температура ионов. Внизу также представлен пространственный масштаб. На рисунке 36 изображены годографы магнитного поля (вверху), скорости ионов (в середине) и тока (внизу) в (L,M)-плоскости (слева) и в (L,N)-плоскости (справа) во время пересечения магнитопаузы, представленной на рис. 35.

Пересечение магнитопаузы происходит на масштабах около 500 км (длина градиента в B_L -компоненте магнитного поля). Среднее значение нормальной (B_N) компоненты магнитного поля около нуля. Это хорошо видно справа вверху на рис. 36. В плоскости (L,M) вектор магнитного поля поворачивается на угол около 90 градусов (см. рис. 36 вверху справа и четвертую панель на рис. 35). Основной ток течет вдоль оси M (показано светло-голубым цветом на шестой панели рис. 35). Это так же хорошо видно в V_M -компоненте скорости на рис. 35 и на годографе вектора плотности тока в плоскости токового слоя магнитопаузы (L,M) на рис. 36, который описывает петлю симметрично оси M исходя и возвращаясь в ноль,

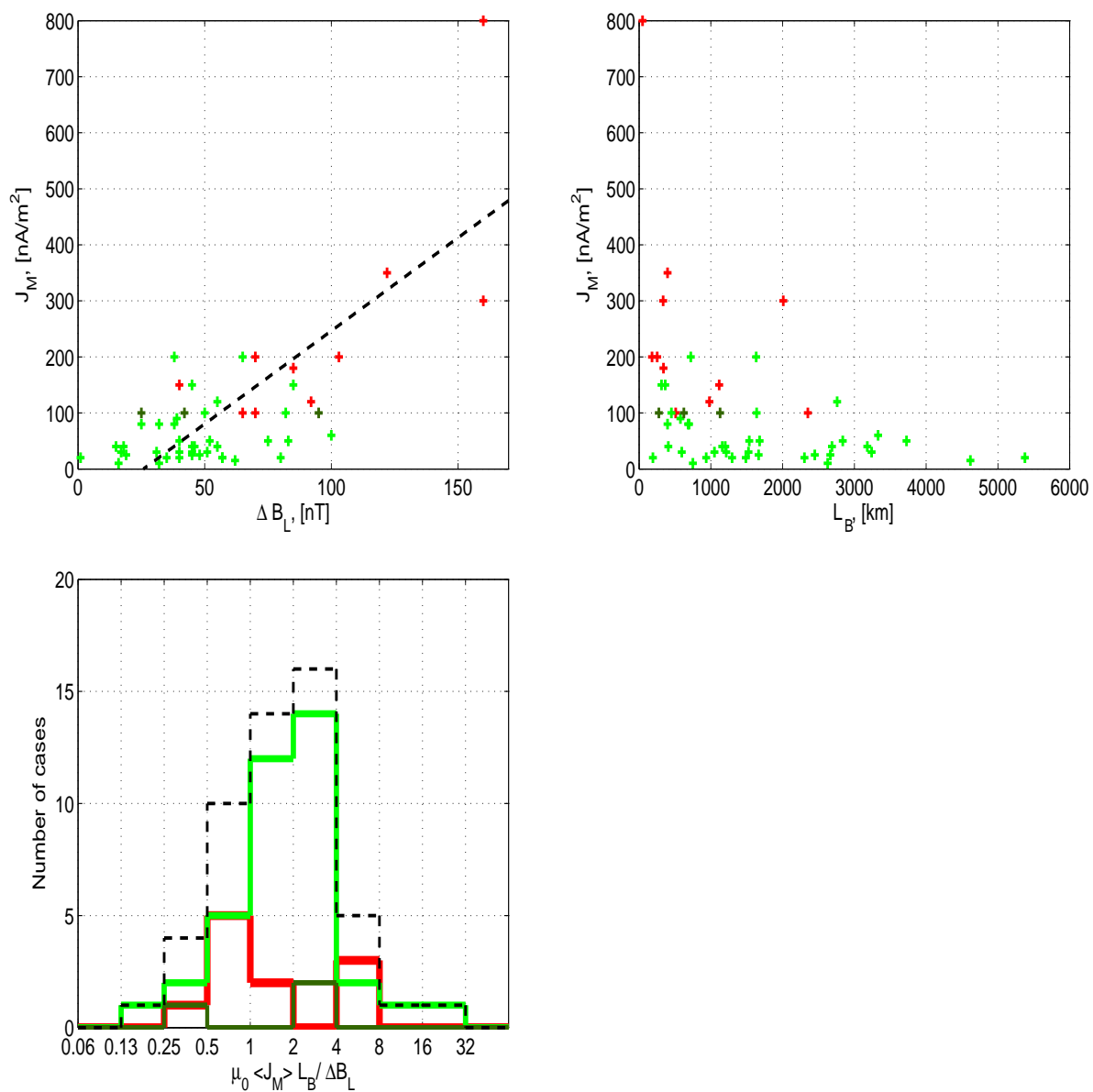


Рис. 34: Диаграммы разброса среднего значения J_M -компоненты плотности тока внутри токового слоя магнитопаузы в зависимости от скачка в B_L -компоненте магнитного поля (вверху слева) и от толщины токового слоя магнитопаузы L_B (вверху справа), а так же распределение величины $\mu_0 \langle J_M \rangle L_B / \Delta B_L$ для 52 пересечений магнитопаузы, представленных в таблице 2. Цветная кодировка соответствует рис. 29.

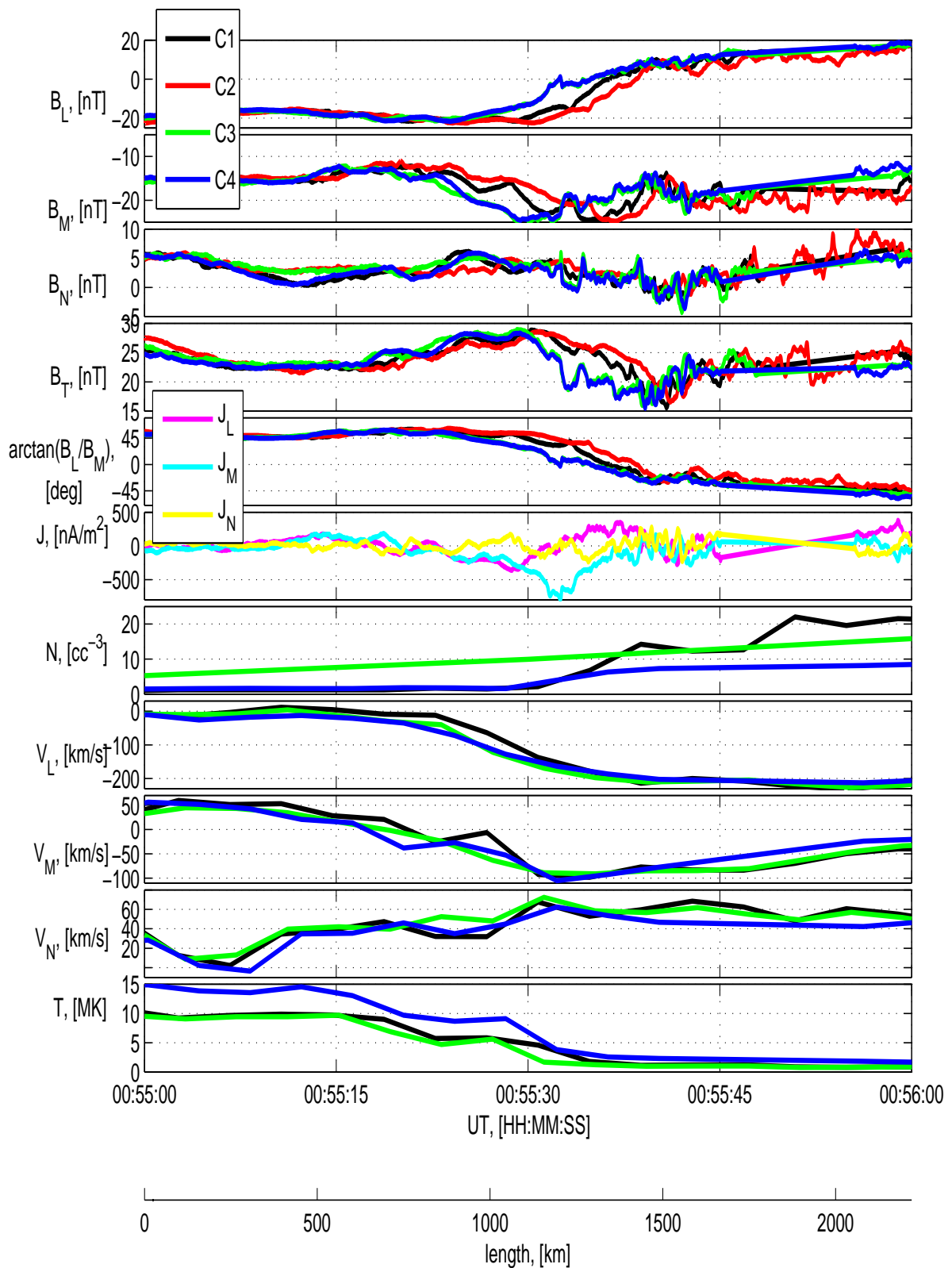


Рис. 35: Данные четырех аппаратов КЛАСТЕР (см. легенду вверху слева) во время пересечения магнитопаузы 16 июня 2002 г. в период 00:55:00 - 00:56:00 UT: L, M и N компоненты магнитного поля; модуль магнитного поля; угол проекции вектора магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы; L, M и N компоненты тока (см. легенду); плотность ионов; L, M и N компоненты скорости ионов; температура ионов. Внизу также представлен пространственный масштаб.

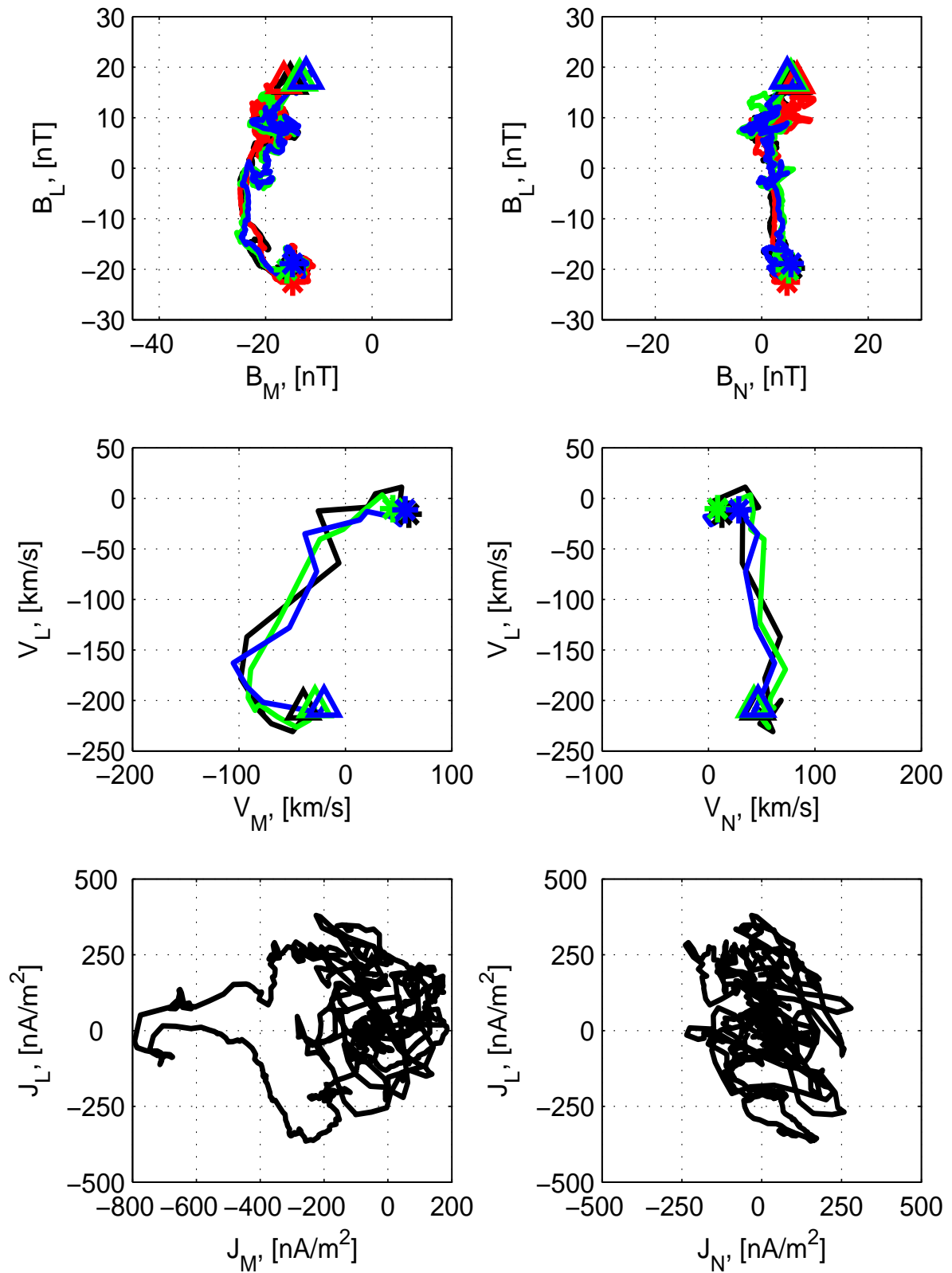


Рис. 36: Годографы магнитного поля (вверху), скорости ионов (в середине) и тока (внизу) в (L,M)-плоскости (слева) и в (L,N)-плоскости (справа) во время пересечения магнитопаузы, представленной на рис. 35 .

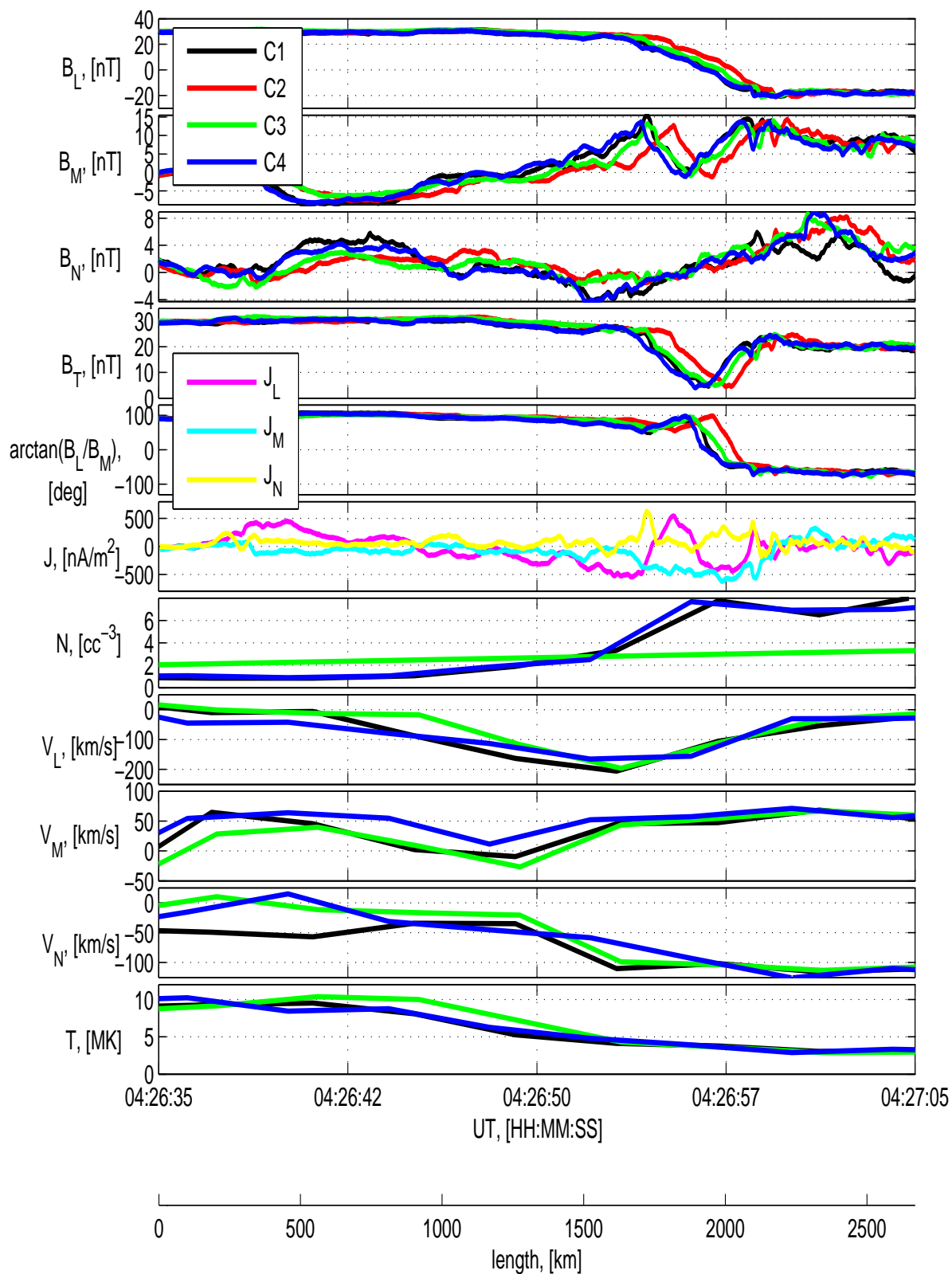


Рис. 37: То же, что на рис. 35 во время пересечения магнитопаузы 10 мая 2002 г. в период 04:26:35 - 01:27:05 UT .

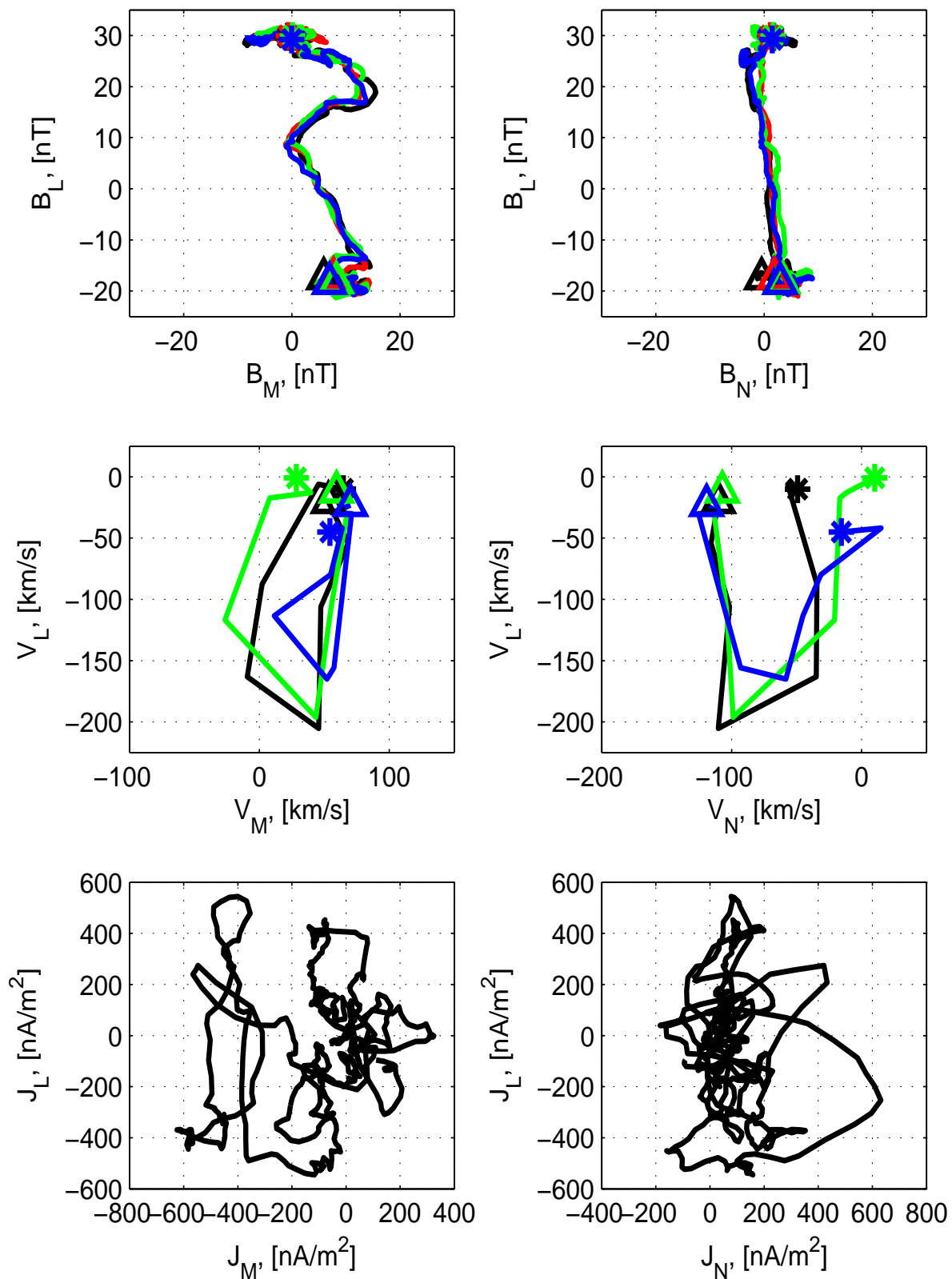


Рис. 38: То же, что на рис. 36 во время пересечения магнитопаузы, представленной на рис. 37 .

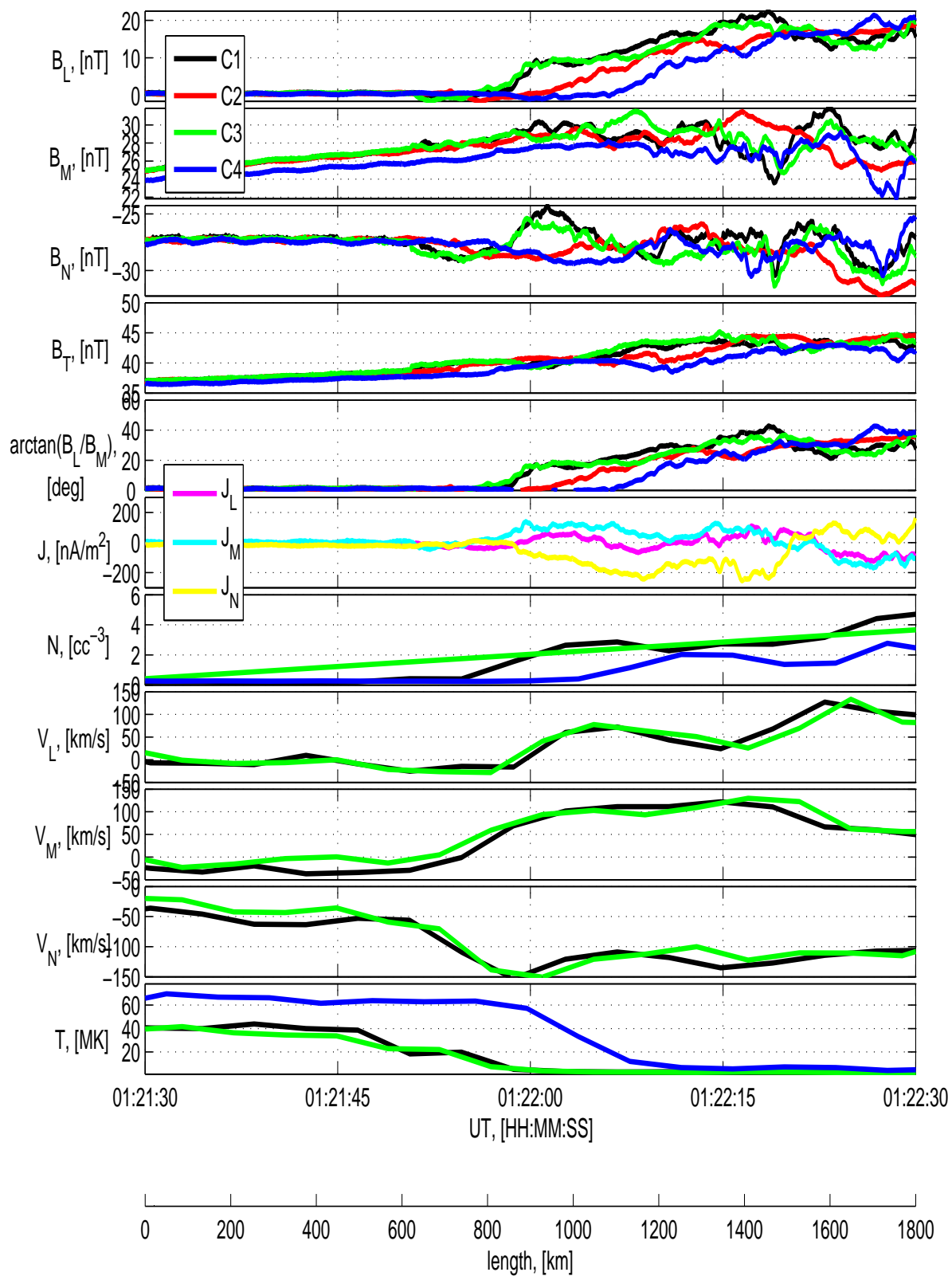


Рис. 39: То же, что на рис. 35 во время пересечения магнитопаузы 21 февраля 2004 г. в период 01:21:30 - 01:22:30 UT .

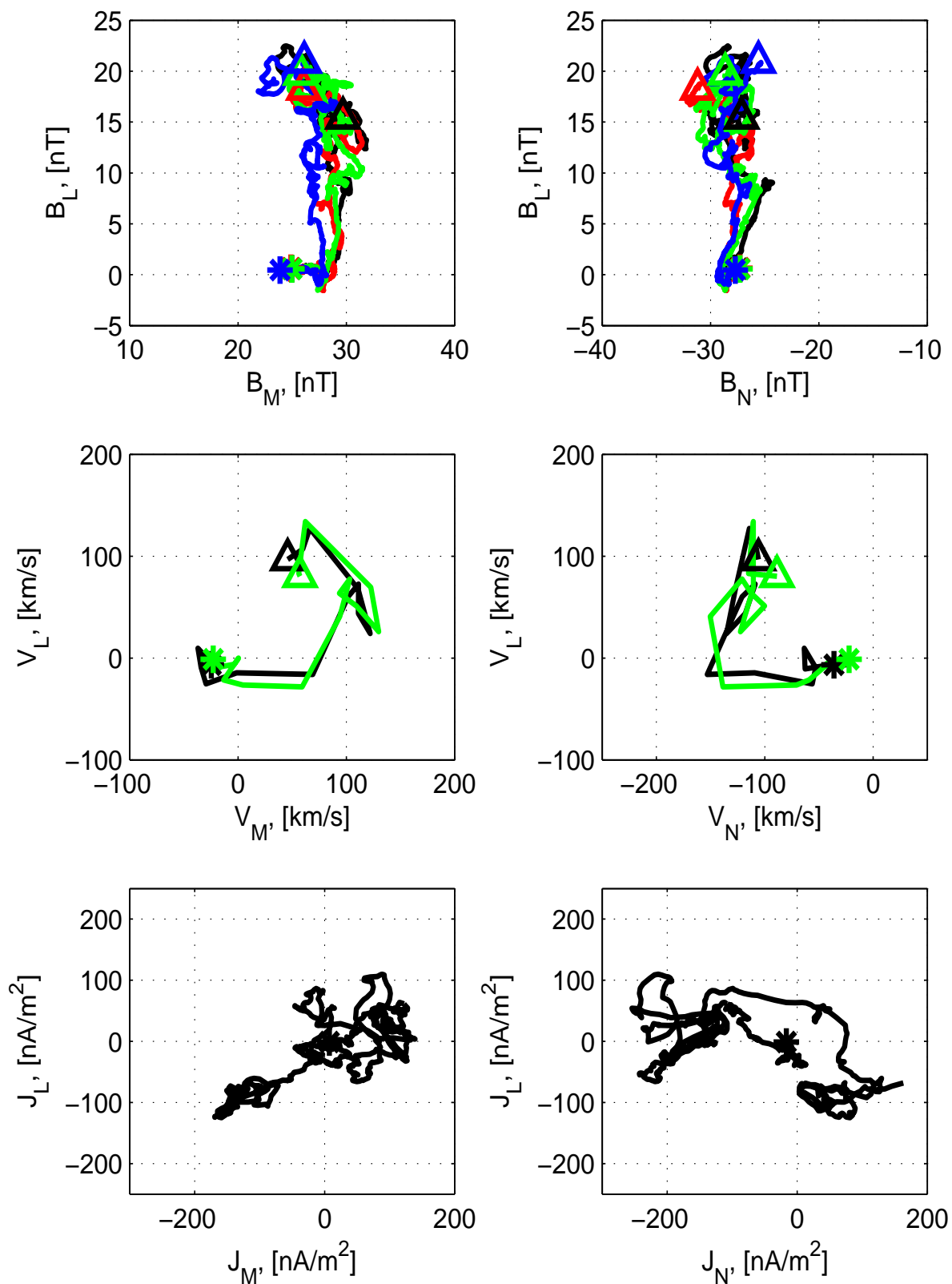


Рис. 40: То же, что на рис. 36 во время пересечения магнитопаузы, представленной на рис. 39 .

в то время, как в плоскости (L,M) годограф вектора плотности тока колеблется вокруг нулевого значения. Токовый слой магнитопаузы так же сопровождается градиентами плотности и температуры.

Рассмотрим теперь закрытую магнитопаузу второго типа. На рис. 37 и 38 показаны в формате рисунков 35 и 36 данные четырех аппаратов КЛАСТЕР и их годографы во время пересечения магнитопаузы 10 мая 2002 г. в промежуток времени 04:26:35 - 04:27:05 UT. В отличие от выше рассмотренного пересечения магнитопаузы, здесь B_M -компонента вектора магнитного поля совершает биполярную вариацию внутри магнитопаузы, то есть внутри размера градиента в B_L -компоненте вектора магнитного поля. Это приводит к тому, что в плоскости токового слоя магнитопаузы (L,M) годограф вектора магнитного поля совершает S-образное движение, а основной поворот вектора магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы происходит на существенно меньших расстояниях, чем длина градиента в B_L -компоненте вектора магнитного поля (см. панели 4 и 5 на рис. 37). На панели 6 рис. 37) видно, что во время основного поворота поля наблюдаются максимальные плотности токов в направлении оси M. При этом, биполярное возмущение в B_M -компоненте вектора магнитного поля приводит к двойному токовому слою в направлении оси L. Заметим, что такая структура в токовом слое наблюдается примерно так же часто, как и структура, представленная на рис. 35 и 36.

Регулярное обнаружение пересечений магнитопаузы, где изменение направления магнитного поля происходит на масштабах, в несколько раз меньших градиента основной компоненты магнитного поля, говорит о необходимости пересмотра подхода к определению толщины токового слоя магнитопаузы. За толщину следует принимать масштаб изменения направления магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы.

Наконец, рассмотрим пример структуры токового слоя магнитопаузы третьего типа – открытую магнитопаузу, пересеченную 21 февраля 2004 г. между 01:21:30 и 01:22:30 UT (см. рис. 39 и 40). Об открытости магнитопаузы говорит наличие ненулевого среднего значения B_N -компоненты вектора магнитного поля, которое в данном примере составляет около 25 нТ (см. панель 3 на рис. 39 и годограф вектора магнитного поля в плоскости (L,N)). Здесь, в качестве примера выбрана магнитопауза с наибольшим отклонением B_N от нулевого уровня. Обычно, среднее значение B_N -компоненты вектора магнитного поля в открытой магнитопаузе несколько меньше (в большинстве случаев не превышает 15 нТ). Видно, что для такой магнитопаузы, плотности тока поперек токового слоя магнитопаузы превышают плотности тока в токовом слое магнитопаузы, то есть идет беспрепятственное проникновение ионов магнитослоя в магнитосферу (показано желтым цветом на панели 6 рис. 39, см. также годографы вектора плотности тока внизу на рис. 40).

2.4 Выводы

В данном разделе диссертации были исследованы вариации параметров плазмы и магнитного поля при переходе через магнитопаузу на средних и высоких широтах по данным четырех спутников КЛАСТЕР, которые были собраны в периоды со 2 февраля 2003 г. по 17 июня 2003 г. и с 1 июня 2003 г. по 3 мая 2004 г., когда четыре аппарата были разнесены на наименьшие расстояния (менее 300 км). В особенности, упор был сделан на изучение (I) параметров плазмы и магнитного поля с двух сторон магнитопаузы и (II) собственных параметров токового слоя

магнитопаузы.

I. Основываясь на 154 переходах магнитослой-магнитосфера, были получены функции распределения параметров плазмы и магнитного поля в различных областях магнитосферы на средних и высоких широтах, что позволило выявить их наиболее и наименее вероятные конфигурации. Было так же найдено, что амплитуда колебаний магнитопаузы лежит в пределах от ~ 0.5 до ~ 10 Re. Обычно, однако, амплитуда колебаний не превышала 2-3 Re.

Найдено, что сверхальфвеновские потоки плазмы магнитослоя на низких широтах становятся субальфвеновскими за каспом над магнитосферной лобой. В то же время тепловое и магнитное давления магнитослоя увеличиваются примерно в 2 и 1.5 раза, соответственно. Субальфвеновские потоки магнитослоя вблизи каспа были так же недавно подтверждены статистическими исследованиями каспа в работе Lavraud *et al.* (2005a). Они связывают наличие таких потоков с присутствием плазменной подушки (plasma depletion layer), который формируется благодаря нагромождению силовых линий магнитного поля (Zwan and Wolf, 1976). Субальфвеновские плазменные потоки магнитослоя при северном межпланетном магнитном поле могут стабилизировать пересоединение магнитопаузы над магнитосферной лобой (Avanov *et al.*, 2001; Fedorov *et al.*, 2002; Phan *et al.*, 2003).

Дополнительно было найдено, что для большинства из 154 переходов магнитослой-магнитосфера баланс давлений с двух сторон магнитопаузы был выполнен в пределах ошибки (соотношение давлений с двух сторон магнитопаузы было в пределах [0.5; 2]).

Однако, в группе из 24 из 154 ($\sim 15\%$) переходов магнитослой-магнитосфера напряженность магнитного поля магнитослоя была больше, чем в магнитосфере. Именно в этих случаях, преимущественно при пролетах через дневную магнитосферу, баланс давлений был сильно нарушен (полное давление магнитослоя часто превышало магнитосферное более, чем в два раза), указывая, таким образом, что во время этих 24 переходов магнитопауза формировалась в сильно нестационарных условиях.

II. Чтобы лучше понять формирование токового слоя магнитопаузы на средних и высоких широтах были найдены собственные параметры 52 пересечений магнитопаузы с опознаваемым токовым слоем в виде четкого изменения направления вектора магнитного поля при переходе через магнитопаузу и наличием пограничного слоя низкоширотного типа, входного слоя либо плазменной мантии.

Найдено, что токовый слой магнитопаузы формируется чаще для больших углов между направлениями магнитных полей в магнитослое и магнитосфере (свыше ~ 60 градусов). Аналогичный результат был получен по наблюдениям на низких широтах (сравните с работами (Berchem and Russell, 1982b; Gosling *et al.*, 1990)). Нужно заметить, однако, что в данной диссертации, таким путем, были исключены случаи пересечения магнитопаузы, которая могла быть сформирована в виде контактного разрыва. Такое строение магнитопаузы предсказывает магнитогидродинамика, когда магнитные поля с двух сторон магнитопаузы примерно коллинеарны и с сопоставимыми напряженностями.

Во время 52 пересечений магнитопауза двигалась, как внутрь, так и наружу магнитосферы. Нормаль к магнитопаузе на флангах магнитосферы была направлена преимущественно вдоль оси Y_{GSM} .

Скорость магнитопаузы во время 52 пересечений не превышала 180 км/с, что примерно в три раза меньше максимально зарегистрированной скорости низкоширотной магнитопаузы. Средняя скорость магнитопаузы была ~ 60 км/с – в ~ 1.3

медленнее, чем на низких широтах. Медианное значение скорости составило ~ 50 км/с. Магнитопауза с прилегающей плазменной мантией двигалась медленнее – со скоростями, не превышающими ~ 70 км/с.

Толщина магнитопаузы во время 52 пересечений, определяемая, как длина градиента компоненты магнитного поля вдоль направления максимума вариаций, изменялась от ~ 50 км (один ларморовский радиус протона магнитослоя ρ_p) до ~ 6000 км ($120\rho_p$). Средняя толщина магнитопаузы составила ~ 1600 км ($30\rho_p$). Это примерно в 1.8 раз (или в три раза в терминах ρ_p) толще, чем на низких широтах (сравните Elphic and Russell (1979); Berchem and Russell (1982b); Le and Russell (1994)). Медианное значение толщины магнитопаузы оказалось равным ~ 800 км ($10\rho_p$). Магнитопауза в прилегающей плазменной мантией была, в среднем, примерно в два раза тоньше, чем с прилегающим пограничным слоем низкоширотного типа.

Пиковое значение модуля вектора плотности тока, полученное напрямую из ротора магнитного поля внутри 52 токовых слоев магнитопаузы варьировалось от ~ 20 нА/м² до ~ 1.3 мкА/м², со средним значением ~ 600 нА/м² и медианным значением ~ 200 нА/м². Плотности токов на магнитопаузе с прилегающей плазменной мантией оказались, в среднем, примерно в два раза выше, чем с пограничным слоем низкоширотного типа. Амплитуда плотности тока определяется, как толщиной магнитопаузы, так и скачком в компоненте магнитного поля вдоль направления максимума вариации при переходе через магнитопаузу.

Изучение структуры токового слоя магнитопаузы выявило, что существует два вида токового слоя магнитопаузы тангенциального типа: а) напряженность магнитного поля изменяется через слой монотонно, а ток течет только перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; поворот поля через слой происходит на всей толщине магнитопаузы. б) напряженность магнитного поля имеет минимум в центре слоя; в минимуме ток течет в основном перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; слева и справа от минимума ток в поперечном направлении ослабевает; при этом появляются продольные токи, которые противоположно направлены с двух сторон минимума; основной поворот поля через слой происходит в минимуме на масштабах в 2-3 раза меньших толщины магнитопаузы.

3 Электромагнитные флуктуации в окрестности магнитопаузы

3.1 Введение

Как магнитное пересоединение (Dungey, 1961) так и диффузия (Axford and Hines, 1961) могут привести к переносу плазмы через токовый слой между двумя замкнутыми плазмами. Проникновение частиц и полей через магнитопаузу до сих пор не понято до конца. Gosling *et al.* (1990, 1991) используя плазменные данные и данные магнитного поля с аппарата ISEE, изучили несколько пересечений магнитопаузы с признаками вращательного разрыва в виде ускоренных до альфвеновской скорости потоков плазмы вблизи магнитопаузы, что было интерпретировано, как доказательство пересоединения силовых линий межпланетного магнитного поля с линиями магнитного поля Земли. André *et al.* (2004) с помощью данных КЛАСТЕР сообщили о наблюдении очень тонких токовых подслоев (шириной в несколько электронных масштабов), вложенных в токовый слой магнитопаузы. Vale *et al.* (2002) и Mozer *et al.* (2002) с помощью плазменных данных, а так же данных электрического и магнитного поля с аппарата Polar идентифицировали холловский токовый слой. Позже Mozer *et al.* (2003) André *et al.* (2004) и Vaivads *et al.* (2004a) показали, что холловская магнитогидродинамика способна описать физику мелкомасштабных токовых слоев.

Динамика магнитопаузы так же определяется ростом и насыщением плазменных неустойчивостей, как на больших масштабах (за счет неустойчивости Кельвина-Гельмгольца) так и на меньших масштабах (например, за счет дрейфовых неустойчивостей). Спутниковые наблюдения показали, что энергетические спектры флуктуаций электрического и магнитного поля в окрестности магнитопаузы простираются от ионно-циклотронной частоты Ω_{ic} (около 1 Гц) до нижнегибридной частоты (около 40 Гц) (Tsurutani *et al.*, 1981; Anderson *et al.*, 1982; Klimov *et al.*, 1986; Vlecki *et al.*, 1987).

Диффузия посредством взаимодействия волна-частица часто предлагалась в качестве одного из основных механизмов переноса ионов через магнитопаузу Земли. Например, в работе Tsurutani *et al.* (1981) наблюдались флуктуации электрического и магнитного поля в диапазоне $10 - 10^3$ Гц в окрестности магнитопаузы на низких широтах. Было предложено, что бесстолкновительная диффузия за счет наблюдаемых флуктуаций полей позволяет протонам магнитослоя проникать в магнитосферу на глубину в 5-7 ларморовских радиусов протона. В работе Labelle and Treumann (1988a) наблюдения флуктуаций электрических и магнитных полей были расширены включив частоты в диапазоне 0.1-10 Гц, покрывая таким образом диапазон Ω_{ic} . Klimov *et al.* (1997) подтвердили данные наблюдения для высокоширотной магнитопаузы уточнив, что плотность энергии флуктуаций доминирует на частотах 0.8-1.5 Hz, т.е. вблизи Ω_{ic} . Позднее, наблюдения с интервалами флуктуаций в магнитном поле в горловине каспа с четкими пиками плотность энергии флуктуаций вблизи Ω_{ic} , как с левой, так и с правой поляризацией были обнаружены (Le *et al.*, 2001; Nykyri *et al.*, 2003). Nykyri *et al.* (2003) предложили, что наблюдаемые волны возникают благодаря наличию множественных потоков плазмы внутри области каспа, которые движутся под углом друг к другу. Grison *et al.* (2005) и Sundkvist *et al.* (2005a,b) обнаружили перпендикулярные электромагнитные волны на частоте Ω_{ic} в горловине каспа. Они связали эти волны с обнаруженными впрысками ионов. Sundkvist *et al.* (2005a,b) оценили характерную длину

волн около $(2 - 4)\rho_i$, где ρ_i ларморовский радиус иона. Существуют две общепринятые гипотезы, способные объяснить возбуждение ионно-циклотронных волн вблизи магнитопаузы. Gladd and Huba (1979) продемонстрировал, что дрейфовая ионно-циклотронная неустойчивость возбуждает ионно-циклотронные гармоники при условии, что $L/\rho_i < \sqrt{(m_i/8m_e)}$, где L - длина градиента плотности. Belova *et al.* (1991) предложили альтернативную модель, рассматривая потоки плазмы текущие параллельно токовому слою и перпендикулярно градиентам плотности и скорости. В отличие от дрейфовой ионно-циклотронной неустойчивости, потоковая неустойчивость не имеет порога в длине градиента плотности.

Tsurutani and Thorne (1982) получил верхний предел коэффициента бесстолкновительной диффузии ионов магнитослоя за счет флуктуаций электрического и магнитного поля, наблюдаемых в пограничном слое магнитопаузы около 10 % коэффициента Бома D_B ($D_B \simeq 10^9$ м²/с). Заметим во-первых, что Tsurutani and Thorne (1982) и Labelle and Treumann (1988a) утверждали, что флуктуации электрического поля вблизи частоты Ω_{ic} эффективнее для бесстолкновительной диффузии, чем флуктуации магнитного поля. Однако, Gendrin (1983) показал, что наблюдаемые амплитуды флуктуаций магнитного поля могут быть достаточны для объяснения существования наблюдаемого пограничного слоя магнитопаузы на низких широтах. Во-вторых, Tsurutani *et al.* (1981) пришел к заключению, что бесстолкновительная диффузия является постоянным механизмом формирования низкоширотного пограничного слоя магнитопаузы. Однако, Labelle and Treumann (1988a) утверждали, что наблюдаемые амплитуды флуктуаций никогда не смогут достичь уровня коэффициентов, нужных для поддержания пограничного слоя.

Считается, что дрейфовая нижнегибридная неустойчивость может инициировать на токовом слое магнитопаузы пересоединение силовых линий межпланетного магнитного поля с линиями магнитного поля Земли за счет взаимодействия волна-частица (Huba *et al.*, 1977). Нижнегибридные волны действительно наблюдались на магнитопаузе, например аппаратами Prognos, Polar и КЛАСТЕР. Используя измерения электрического и магнитного поля с аппаратов Prognos-7 и Prognos-8 Vaisberg *et al.* (1983) задокументировали наблюдения электростатических флуктуаций вокруг локальной нижнегибридной частоты на внутренней границе магнитопаузы с амплитудами 0.1-1 мВ/м. André *et al.* (2001) путем анализа данных электрического поля с четырех аппаратов КЛАСТЕР сообщили, что волны вблизи нижнегибридной частоты (десятки Гц) в окрестности магнитопаузы являются довольно повсеместным явлением. Амплитуда этих волн достигает 5 мВ/м. Квазилинейная теория предсказывает, что нижнегибридные волны могут обеспечить наибольший вклад в диффузию частиц поперек через токовый слой магнитопаузы (Labelle and Treumann, 1988b). Vale *et al.* (2002); Mozer *et al.* (2002) сообщили о наблюдении нижнегибридных волн аппаратом Polar в области с холловским током. Используя данные электрического и магнитного поля Vaivads *et al.* (2004b) идентифицировал нижнегибридные и вистлеровские моды на магнитопаузе.

В этом разделе диссертации будут исследованы во-первых, зависимость формы и плотность энергии спектров флуктуаций электромагнитного поля в окрестности магнитопаузы. Во-вторых, будут исследованы процессы переноса ионов из магнитослоя в магнитосферу, как через тонкую, так и через толстую магнитопаузу, а так же особенности в строении толстой и тонкой магнитопаузы.

Таблица 3: 16 интервалов для исследования магнитных флуктуаций в окрестности токового слоя магнитопаузы по данным высокого разрешения (с частотой опроса 22.4 или 67 Гц)

	Дата ггггммдд	Начало ччммсс	Конец ччммсс	Ось l ($l_x; l_y; l_z$)	Ось m ($m_x; m_y; m_z$)	Ось n ($n_x; n_y; n_z$)	L_B [км]	L_B [ρ_p]	Опрос [Гц]
1	20020206	081300	081500	(0.57 ; -0.53 ; 0.62)	(0.05 ; -0.78 ; -0.62)	(0.82 ; -0.32 ; 0.48)	2760	37.0	67
2	20020206	081530	081900	(-0.28 ; 0.91 ; 0.30)	(-0.68 ; -0.41 ; 0.61)	(0.68 ; -0.04 ; 0.73)	576	15.0	67
3	20020206	085045	085200	(0.43 ; 0.79 ; -0.44)	(-0.49 ; 0.62 ; 0.62)	(0.76 ; -0.05 ; 0.65)	720	17.0	67
4	20020215	234030	234200	(0.65 ; 0.24 ; 0.72)	(-0.41 ; -0.91 ; -0.06)	(0.64 ; -0.33 ; 0.69)	624	5.0	22.4
5	20020218	045830	050030	(0.82 ; 0.07 ; -0.56)	(-0.45 ; -0.68 ; -0.57)	(0.34 ; 0.73 ; 0.60)	1128	17.0	22.4
6	20020302	033030	033140	(0.70 ; 0.48 ; -0.53)	(-0.11 ; 0.80 ; 0.59)	(0.71 ; -0.35 ; 0.61)	396	4.0	67
7	20020330	131140	131155	(-0.21 ; -0.04 ; 0.98)	(0.19 ; -0.98 ; 0.00)	(0.96 ; 0.19 ; 0.21)	48	1.0	67
8	20020330	131240	131340	(-0.34 ; 0.09 ; 0.94)	(-0.25 ; -0.97 ; 0.00)	(0.91 ; -0.24 ; 0.35)	336	7.0	67
9	20020330	132730	132930	(-0.28 ; 0.07 ; 0.96)	(-0.24 ; -0.97 ; 0.00)	(0.93 ; -0.23 ; 0.29)	2010	40.0	67
10	20020423	081730	081930	(-0.33 ; 0.36 ; 0.87)	(-0.27 ; -0.92 ; 0.28)	(0.91 ; -0.14 ; 0.40)	396	21.0	22.4
11	20020510	042635	042705	(0.04 ; 0.58 ; 0.82)	(0.01 ; -0.82 ; 0.58)	(1.00 ; -0.02 ; -0.04)	450	5.0	22.4
12	20020510	042945	043005	(-0.24 ; 0.59 ; 0.77)	(-0.35 ; -0.79 ; 0.50)	(0.91 ; -0.15 ; 0.39)	30	0.3	22.4
13	20020616	004830	005000	(0.36 ; 0.78 ; -0.51)	(-0.75 ; -0.09 ; -0.66)	(-0.56 ; 0.62 ; 0.55)	408	18.0	22.4
14	20020616	005000	005230	(0.85 ; 0.50 ; -0.16)	(-0.42 ; 0.47 ; -0.77)	(-0.31 ; 0.73 ; 0.61)	2664	78.0	22.4
15	20020616	005500	005630	(0.84 ; 0.53 ; 0.11)	(-0.33 ; 0.67 ; -0.67)	(-0.42 ; 0.53 ; 0.74)	1100	8.0	22.4
16	20040221	012130	012230	(0.02 ; 0.96 ; 0.26)	(0.07 ; -0.26 ; 0.96)	(0.98 ; 0.00 ; -0.07)	750	19.0	22.4

3.2 Толщина магнитопаузы и плотность энергии магнитных флуктуаций

Используя данные о толщине токового слоя магнитопаузы из таблицы 2 для 16 из 52 пересечений оказались доступны данные магнитного поля высокого разрешения (с частотами опроса 22.4 или 67 Гц). С целью исследования свойств электромагнитных флуктуаций в окрестности 16 пересеченных токовых слоев магнитопаузы, в таблице 3 приведены дата, временной интервал, оси собственной системы координат магнитопаузы, толщина магнитопаузы (как в км, так и в ларморовских радиусах протона в магнитослое) и частота опроса в данных высокого разрешения магнитного поля. Длина интервала выбиралась примерно равной трем толщинам магнитопаузы. Центр интервала совпадает с центром магнитопаузы.

На рис. 41 и 42 изображены интегральные спектры плотности флуктуаций магнитного поля в B_L (слева), B_M (в середине) и B_N (справа) компонентах полученные с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье Cooley and Tukey (1965). Спектры представлены для 16 интервалов, расположенных со стороны магнитослоя от токового слоя магнитопаузы из таблицы 3. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в км (рис. 41) и в ларморовских радиусах протона в магнитослое (рис. 42).

Источником флуктуаций у магнитопаузы в магнитослое помимо токового слоя магнитопаузы, являются ударная волна и сам магнитослой, что вызывает нерегулярность в форме спектров. Флуктуации присутствуют на всех наблюдаемых частотах – от типичной ионно-циклотронной частоты (0.2-2 Гц) до нижнегибридной частоты (свыше 10 Гц). Видно, что флуктуации в тангенциальных компонентах магнитного поля (B_L и B_M) примерно на порядок величины мощнее, чем в нормальной компоненте магнитного поля (B_N). Средний наклон спектров в магнитослое находится в пределах $-1.8 \div -2.2$ с меньшими значениями, соответствующими более тонким магнитопаузам. Наклон -2 свидетельствует о двухмерной изотропной турбулентности. Видно так же, что максимальная плотность энергии флуктуаций наблюдается в окрестности наиболее тонких магнитопауз.

Перейдем теперь в магнитосферу, где источником плазменных неустойчивостей, а следовательно и флуктуаций электромагнитного поля, может быть только сам токовый слой магнитопаузы. На рис. 43 и 44 изображено то же, что и на рис. 41 и 42, но используя измерения магнитного поля для 16 интервалов, расположенных со стороны магнитосферы от токового слоя магнитопаузы из таблицы 3. флуктуации в тангенциальных компонентах магнитного поля (компоненты B_L и B_M)

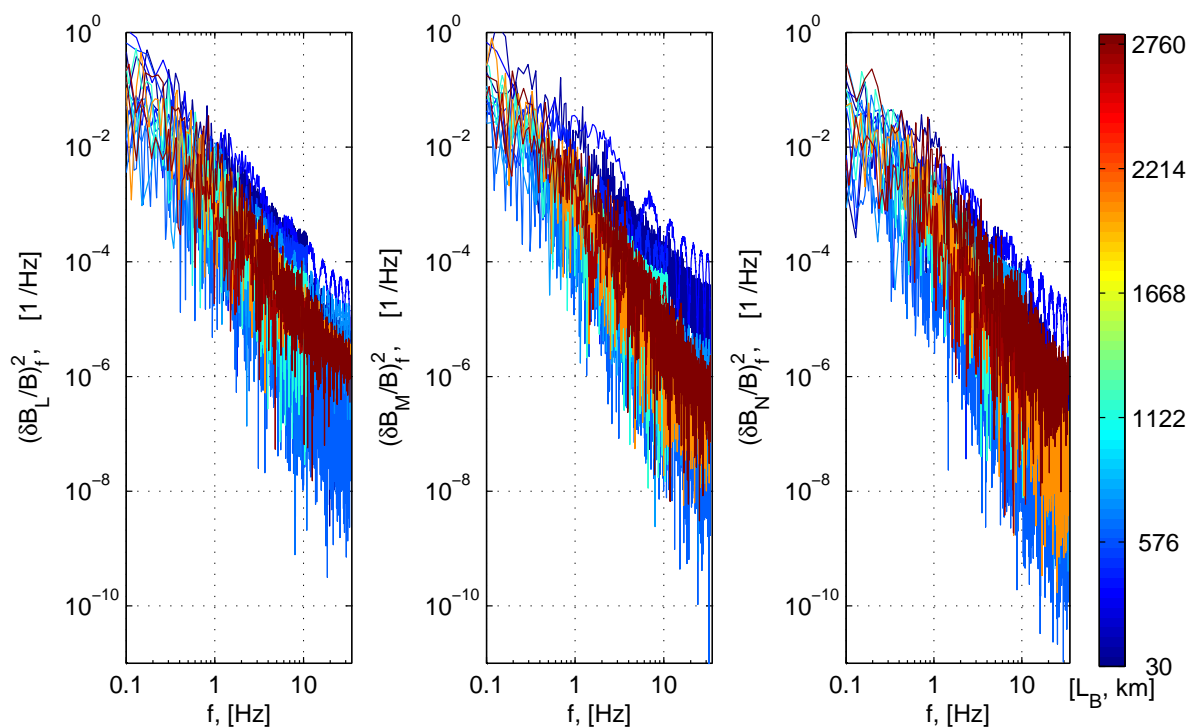


Рис. 41: Интегральные энергетические спектры флуктуаций магнитного поля в B_L (слева), B_M (в середине) и B_N (справа) компонентах полученные с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Спектры представлены для 16 интервалов, расположенных со стороны магнитослоя от токового слоя магнитопаузы из таблицы 3. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в км.

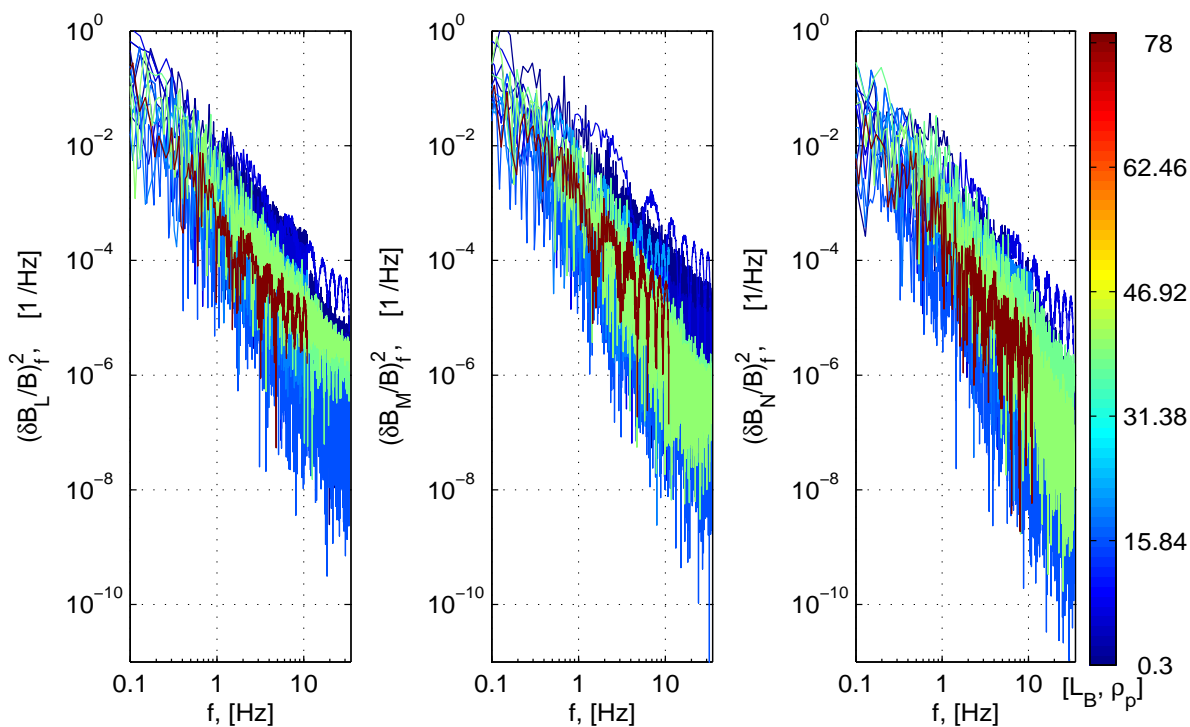


Рис. 42: То же, что на рисунке 41. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в ρ_p .

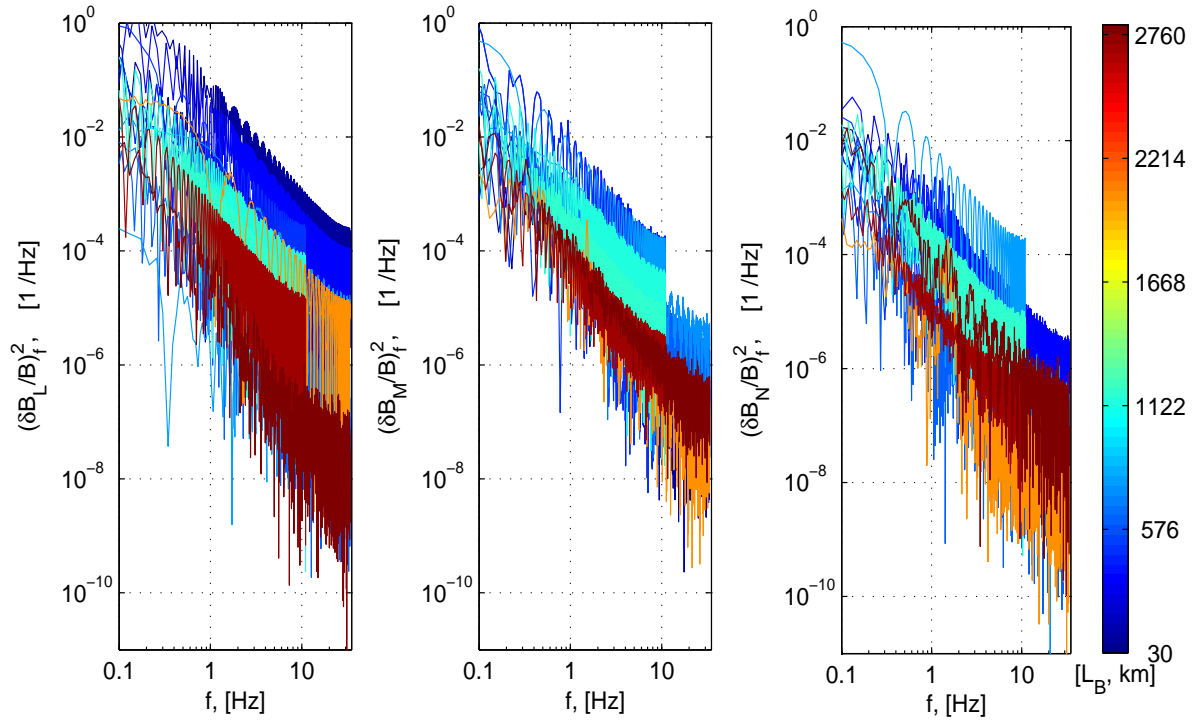


Рис. 43: Интегральные спектры плотности флуктуаций магнитного поля в B_L (слева), B_M (в середине) и B_N (справа) компонентах полученные с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Спектры представлены для 16 интервалов, расположенных со стороны магнитосферы от токового слоя магнитопаузы из таблицы 3. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в км.

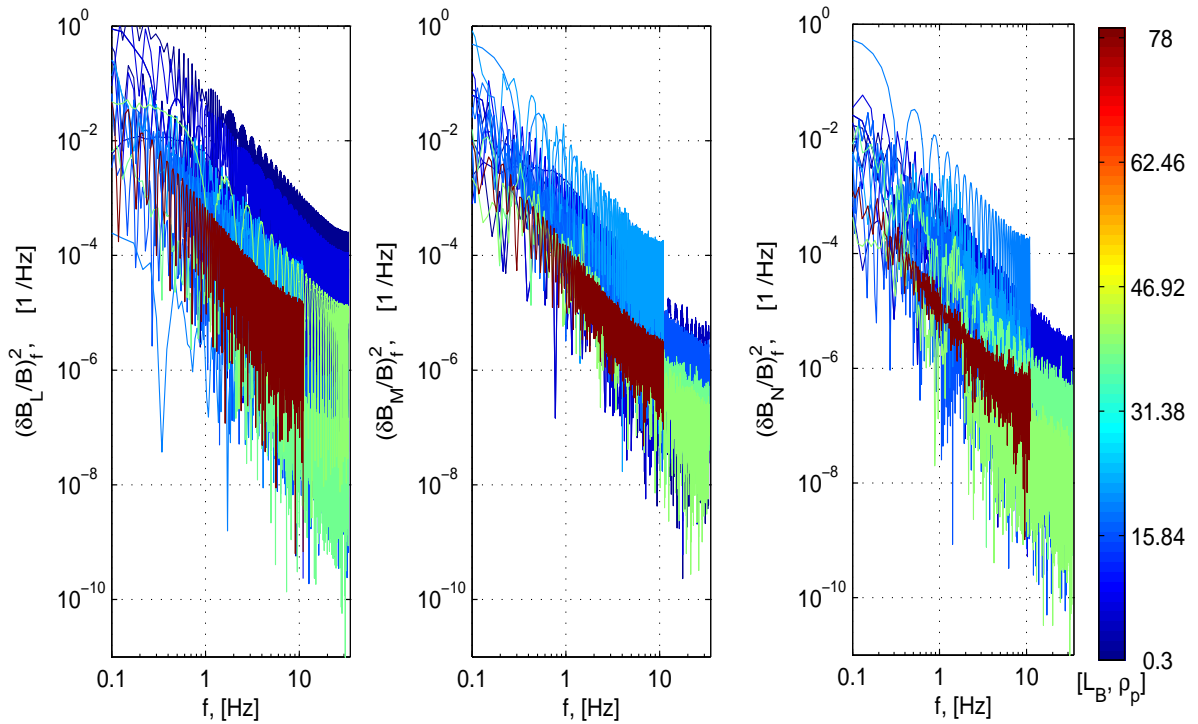


Рис. 44: То же, что на рисунке 41. Цветная шкала отображает толщину токового слоя магнитопаузы в ρ_p .

примерно на порядок величины мощнее, чем в нормальной компоненте магнитного поля (компоненте B_N), как и со стороны магнитослоя. Однако, наклон спектров гораздо стабильнее и равен примерно -1.7 . Такой наклон соответствует спектрам Колмогорова, которые отвечают идеальной, изотропной и несжимаемой гидродинамической турбулентности. В отличие от магнитных флуктуаций в магнитослое, флуктуации в магнитосфере следуют гораздо более четкой зависимости от толщины токового слоя магнитопаузы. Вероятнее всего, электромагнитные флуктуации, порожденная неустойчивостями, образованными на токовом слое магнитопаузы, возникает вследствие дрейфов частиц перпендикулярно магнитному полю в плоскости токового слоя магнитопаузы.

3.3 Структура тонкой магнитопаузы

3.3.1 Наблюдение тонкой магнитопаузы

Аппараты КЛАСТЕР пересекли магнитопаузу три раза подряд около 13:11:46, 13:13:00 и 13:28:50 UT. В эти моменты вектор магнитного поля резко изменил свое направление. Магнитослой заполнен более плотной и горячей плазмой, чем в прилегающей плазменной мантии. Плазменный параметр β был около 0.5 в магнитослое и около 0.1 в магнитосфере. Ларморовский радиус протона был около 50 и 25 км в магнитослое и магнитосфере, соответственно. Измерения в плазме магнитослоя выявили систематическое расхождение между данными измерений, сделанные детекторами CIS/HIA и CIS/CODIF. Это расхождение произошло вследствие насыщения детектора CODIF в режиме высокой чувствительности. На рис. 45 приведены данные с детектора CIS/HIA для аппаратов КЛАСТЕР-3 и КЛАСТЕР-1, и данные протонов H^+ с детектора CIS/CODIF для аппарата КЛАСТЕР-4, поскольку на аппарате КЛАСТЕР-4 детектор HIA был выключен.

Было найдено, что нормаль к токовому слою почти коллинеарна оси X_{GSM} : $\vec{N}_1 = [0.94 \ 0.17 \ 0.23]$. Разница в направлении нормали найденной, пользуясь данными каждого из четырех аппаратов КЛАСТЕР не превышала 15 градусов. Это означает, что на масштабах расстояний между аппаратами токовый слой магнитопаузы - плоский. 15 градусов соответствуют ошибке методов определения нормали, которая была эмпирически установлена меняя ширину интервала.

Определение скорости магнитопаузы методом, описанным в работе Dunlop *et al.* (2002a) (см. раздел 1.2.3) позволило определить скорость и толщину магнитопаузы. Анализ показал, что магнитопауза двигалась практически без ускорения со скоростью около 24 км/с в сторону от Солнца. Соответствующая толщина магнитопаузы составляет около 50 км, то есть порядка ларморовского радиуса протона в магнитослое. По плотности ионов можно видеть, что присутствует пограничный слой.

В диссертации произведен дополнительный анализ этого события. На рис. 45 показаны данные четырех аппаратов КЛАСТЕР 30 марта 2002 г. при пересечении магнитопаузы в промежуток времени 13:11:40-13:11:55 UT. Данные КЛАСТЕР-1, -2, -3 и -4 отображены черным, красным, зеленым и синим цветом, соответственно. Три верхние панели показывают три компоненты магнитного поля в собственной системе координат $(\vec{L}, \vec{M}, \vec{N})$ (см. раздел 1.2.1). Следующая панель демонстрирует напряженность магнитного поля. Далее изображено направление вектора магнитного поля в проекции на плоскость токового слоя магнитопаузы $\arctan(\frac{B_L}{B_M})$. Видно, что при переходе через токовый слой магнитопаузы, направление вектора

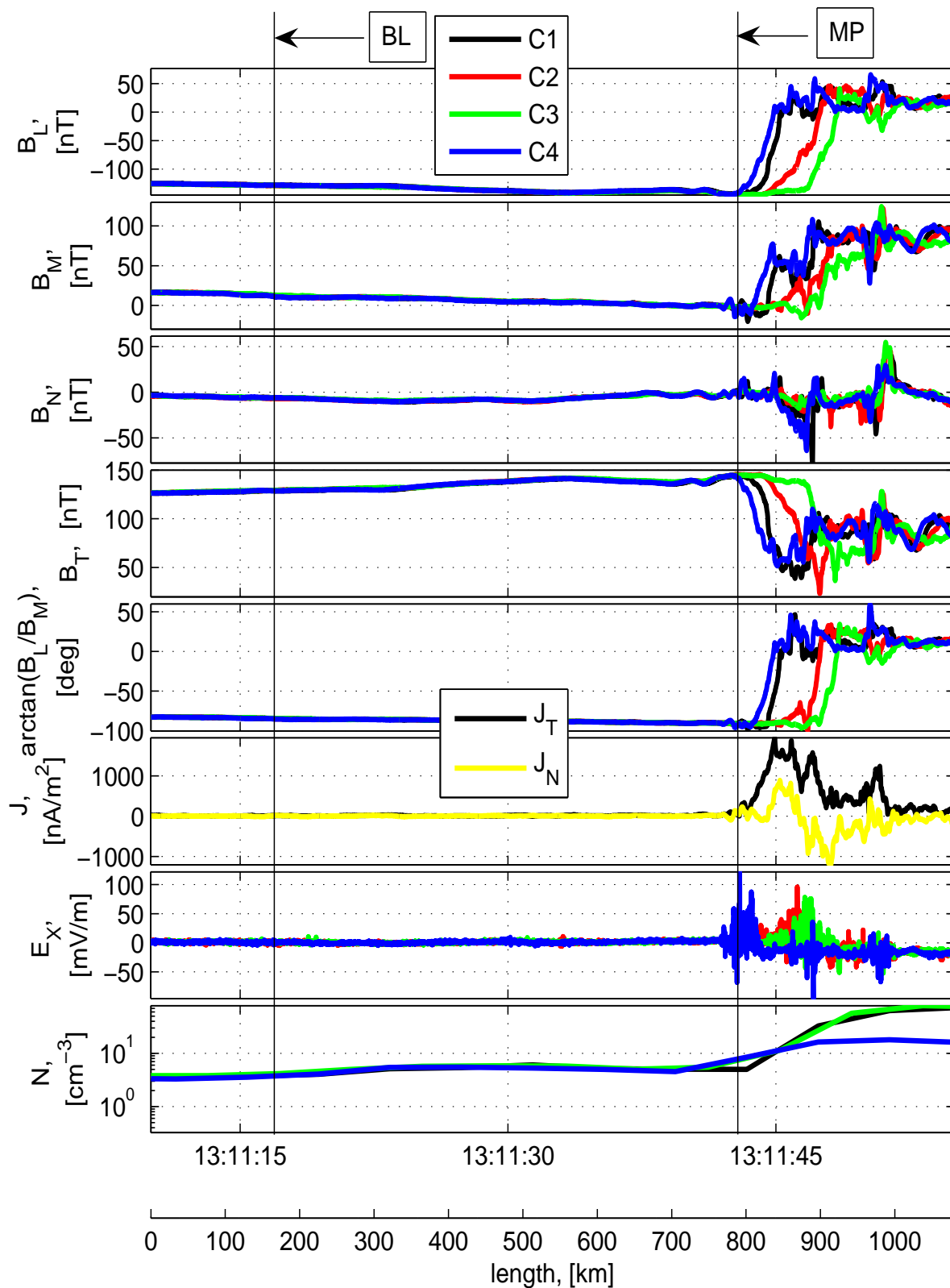


Рис. 45: Данные четырех аппаратов КЛАСТЕР 30 март 2002 г. в промежуток времени 13:11:40-13:11:55 UT. (сверху вниз) LMN компоненты магнитного поля, модуль магнитного поля, $\arctan(B_L/B_M)$, тангенциальная (черным) и нормальная (желтым) компоненты плотности тока, E_x -компонента электрического поля (примерно вдоль X_{GSE}), плотность протонов, масштаб.

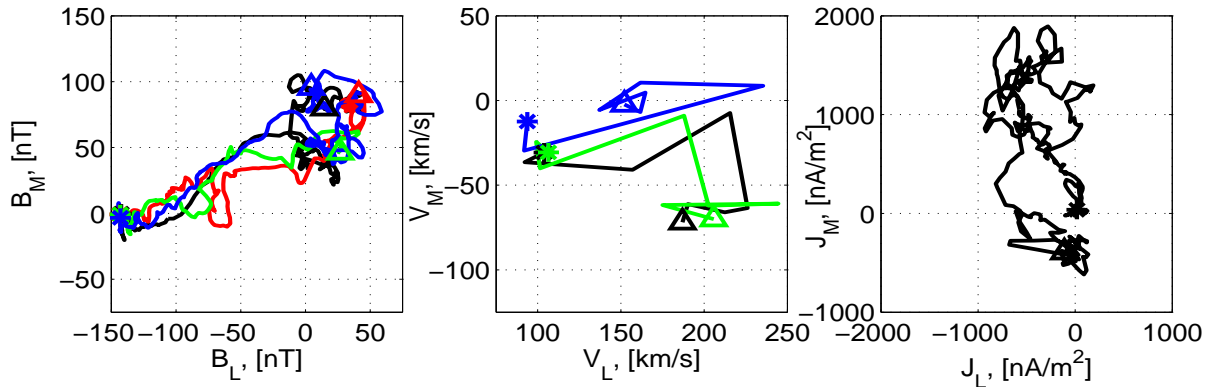


Рис. 46: Годографы магнитного поля (с частотой опроса 66 Гц), скорости (с частотой опроса 0.25 Гц) и плотности тока в плоскости токового слоя магнитопаузы 30 марта 2002 г. в промежуток времени 13:11:40-13:11:55 UT.

магнитного поля в проекции на плоскость токового слоя магнитопаузы меняется примерно на 100 градусов. Применяя метод Curlometer, который изложен в работе (Dunlop *et al.*, 2002b) (см. также раздел 1.2.4), были определены плотности тока из ротора магнитного поля. Черная и малиновая кривые на следующей панели рис. 45 показывают тангенциальную и нормальную компоненты плотности тока. Токи текут в основном в плоскости токового слоя, достигая плотностей около 2 мкА/м^2 . Нормальная компонента плотности тока демонстрирует биполярное возмущение при переходе через токовый слой магнитопаузы. Следующая панель рис. 45 X_{GSE} -компоненту электрического поля, измеренная прибором EFW с разрешением 450 Гц. Эта компонента примерна коллинеарна нормали токового слоя магнитопаузы. Наблюдения выявили сильные флуктуации в электрическом поле с амплитудами, достигающими 100 мВ/м. Они сконцентрированы на магнитосферной стороне токового слоя магнитопаузы.

На нижней панели рисунка рис. 45 показана плотность ионов, измеренная инструментом CIS на аппаратах КЛАСТЕР-1, КЛАСТЕР-3 и КЛАСТЕР-4. Градиент в плотности ионов совпадает с градиентом в магнитном поле. Однако, более низкое разрешение в данных плотности ионов дает некоторую неопределенность в положении двух градиентов относительно друг друга. Внизу рис. 45 дан так же линейный масштаб в км вдоль нормали к токовому слою.

На рис. 46 показаны годографы вектора магнитного поля по данным с частотой опроса 67 Гц, вектора скорости ионов по данным с частотой опроса 0.25 Гц и подсчитанного вектора плотности тока (в 67 точках в секунду) в плоскости токового слоя магнитопаузы. Временной интервал для годографов магнитного поля и плотности тока ограничен промежутком времени 13:11:42 - 13:11:49 UT. Магнитное поле поворачивается примерно на 100° . Плотность тока описывает петлю исходя из нуля и приходя обратно в ноль. Тот факт, что тангенциальная составляющая плотности тока направлена антипараллельно скорости указывает на то, что ток в токовом слое, вероятно, поддерживается электронами, а не ионами.

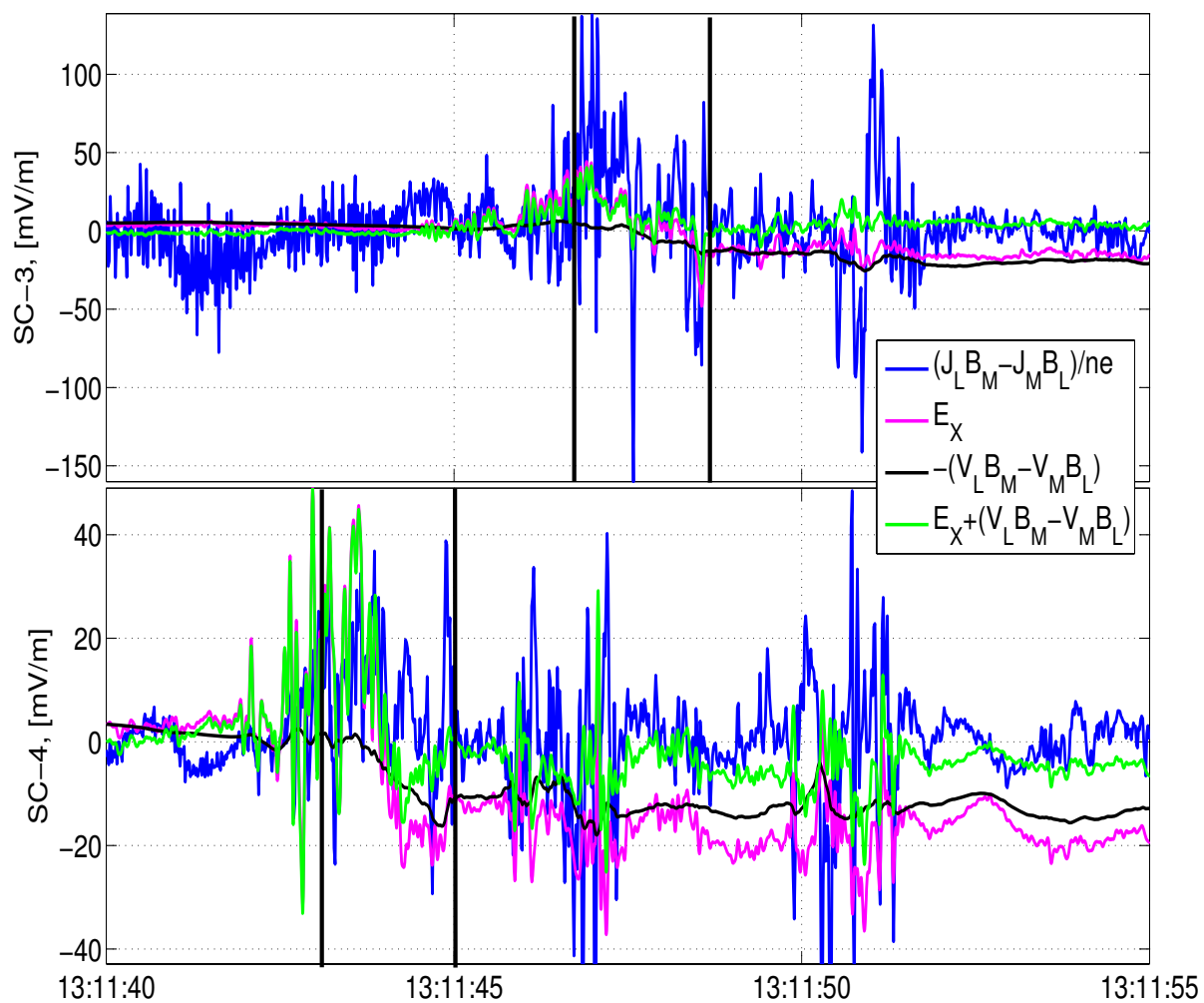


Рис. 47: Нормальные компоненты \mathbf{E} (пурпурным), $-\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (черным) и $\frac{1}{ne}\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ (голубым) членов обобщенного закона Ома, а так же сумма $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (зеленым) для аппаратов КЛАСТЕР-3 и -4 во время последовательного пересечения трех токовых слоев магнитопаузы.

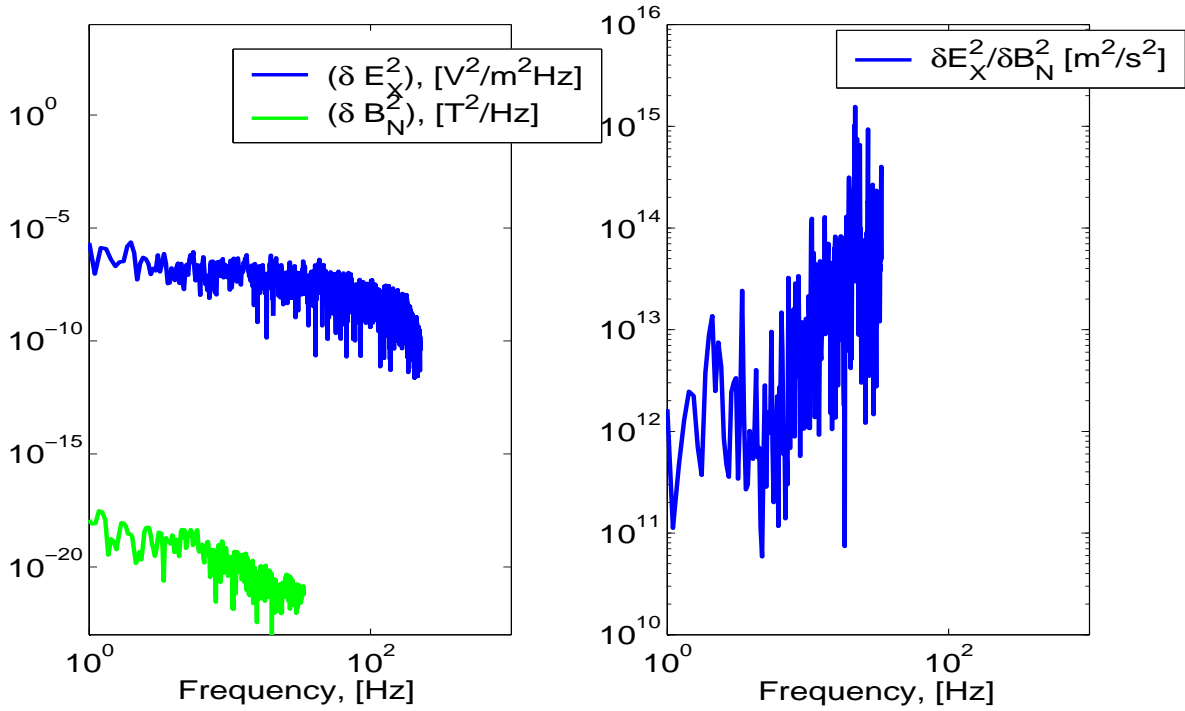


Рис. 48: (слева) Спектральная плотность энергии электрических и магнитных флуктуаций, наблюдаемая внутри токового слоя 30 марта 2002 г. в промежуток времени 13:11:44-13:11:48 UT. (справа) Отношение энергии флуктуаций в электрическом поле к энергии флуктуаций в магнитном поле за тот же промежуток времени.

3.3.2 Роль электрического поля в тонкой магнитопаузе

Запишем обобщенный закон Ома для одножидкостной плазмы:

$$\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] = \eta \mathbf{j} + \frac{1}{ne} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] - \frac{1}{ne} \nabla \cdot p_e + \frac{m_e}{ne^2} \frac{\delta \mathbf{j}}{\delta t}, \quad (30)$$

где \mathbf{E} – вектор электрического поля, \mathbf{v} – вектор скорости плазмы, \mathbf{B} – вектор магнитного поля, η аномальное сопротивление, \mathbf{j} – вектор плотности тока, n – плотность ионов, e – элементарный заряд, p_e – электронный тензор плотности, m_e – масса электрона.

Два члена в левой части описывают электрического поле в движущейся плазме. Члены справа описывают аномальное сопротивление, холловский ток, давление электронов и инерцию электронов. Эти члены отвечают за нарушение вмерозенности силовых линий магнитного поля.

Интересно сравнить роль этих членов на тонком токовом слое. Имея измерения электрического и магнитного поля, скорости ионов, и подсчитав плотность тока, можно сравнить три члена обобщенного закона Ома, а именно: два члена в левой части уравнения и холловский член $\frac{1}{ne} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$. Рис. 47 показывает поведение \mathbf{E} (пурпурным), $-\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (черным) и $\frac{1}{ne} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$ (голубым), а так же сумму $\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$ (зеленым). Черные вертикальные линии соответствуют границам токового слоя магнитопаузы. При условии, что токовый слой магнитопаузы является плоским и движется равномерно две тангенциальные компоненты вектора плотности тока были подсчитаны используя выражение (21).

Применение метода Curlometer (см. Dunlop *et al.* (2002b) и раздел 1.2.4) для

оценки плотности тока на токовом слое магнитопаузы неточно при применении к токовому слою с толщиной меньше, чем расстояния между аппаратами. Поэтому можно рассмотреть члены обобщенного закона Ома только в проекции на нормаль токового слоя в промежуток времени 13:11:40-13:11:55 для аппаратов КЛАСТЕР-3 и КЛАСТЕР-4.

Здесь, флуктуации электрического поля с частотами свыше 67/2 Гц были отфильтрованы, так как это частота Найквиста для измерений магнитного поля. Во время пересечения магнитопаузы плотность ионов для КЛАСТЕР-4 умножена на коэффициент 10 для коррекции ошибки в измерениях CIS/CODIF вследствие насыщения. В измерениях КЛАСТЕР-3 и КЛАСТЕР-4 значение электрического поля почти всегда близко значению выражения $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]_N$, когда аппараты находились вне токового слоя (вне промежутка времени 13:11:44-13:11:48 UT). Следовательно, силовые линии магнитного поля были заморожены в плазму. Однако, на токовом слое возникает сильное электрическое поле, которое компенсирует холловский член обобщенного закона Ома $E \sim \frac{1}{ne} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$.

3.3.3 Диффузия за счет волн вблизи нижнегибридной частоты

Проведем диагностику моды флуктуаций в данных электромагнитного поля. Спектральные плотности электрических и магнитных флуктуаций, наблюдаемые в окрестности токового слоя магнитопаузы показаны на рис. 48. Оцененная нижнегибридная частота

$$f_{LH} = \frac{eB}{2\pi\sqrt{m_p m_e}}, \quad (31)$$

где m_p – масса протона, равна 10-90 Гц.

Соотношение между спектральными компонентами плотности энергии в флуктуациях электрического поля δE^2 и флуктуациях магнитного поля δB^2 , нормированных на локальную альфвеновскую скорость V_A (около 1000 км/с) находится в пределах

$$10 < \frac{\delta E^2}{V_A^2 \delta B^2} < 10^3 \quad (32)$$

То есть основная энергия сосредоточена в флуктуациях электрического поля. Таким образом, наблюдаемые волны являются электростатическими.

Квазилинейная теория предсказывает, что нижнегибридные волны могут привести к диффузии частиц через токовый слой (Labelle and Treumann, 1988a):

$$D_{\perp LH} \approx D_B \sqrt{\frac{\pi m_e}{2 m_p} \frac{\rho_i^2}{L_B^2}} \leq 5 \times 10^6 \frac{m^2}{s}, \quad (33)$$

где $D_B = \frac{kT_e}{16eB}$ – коэффициент диффузии Бома, k – константа Больцмана, T_e – температура электронов, ρ_i – ларморовский радиус ионов, а L_B – толщина токового слоя.

Имея данные с четырех аппаратов КЛАСТЕР можно посчитать плотность тока, и, таким путем оценить аномальную частоту столкновений и получить коэффициент диффузии, который напрямую включает нелинейные эффекты взаимодействия волна-частица. Из теории Власова о взаимодействии волна-частица следует выражение для бесстолкновительной частоты (Tanaka and Sato, 1981):

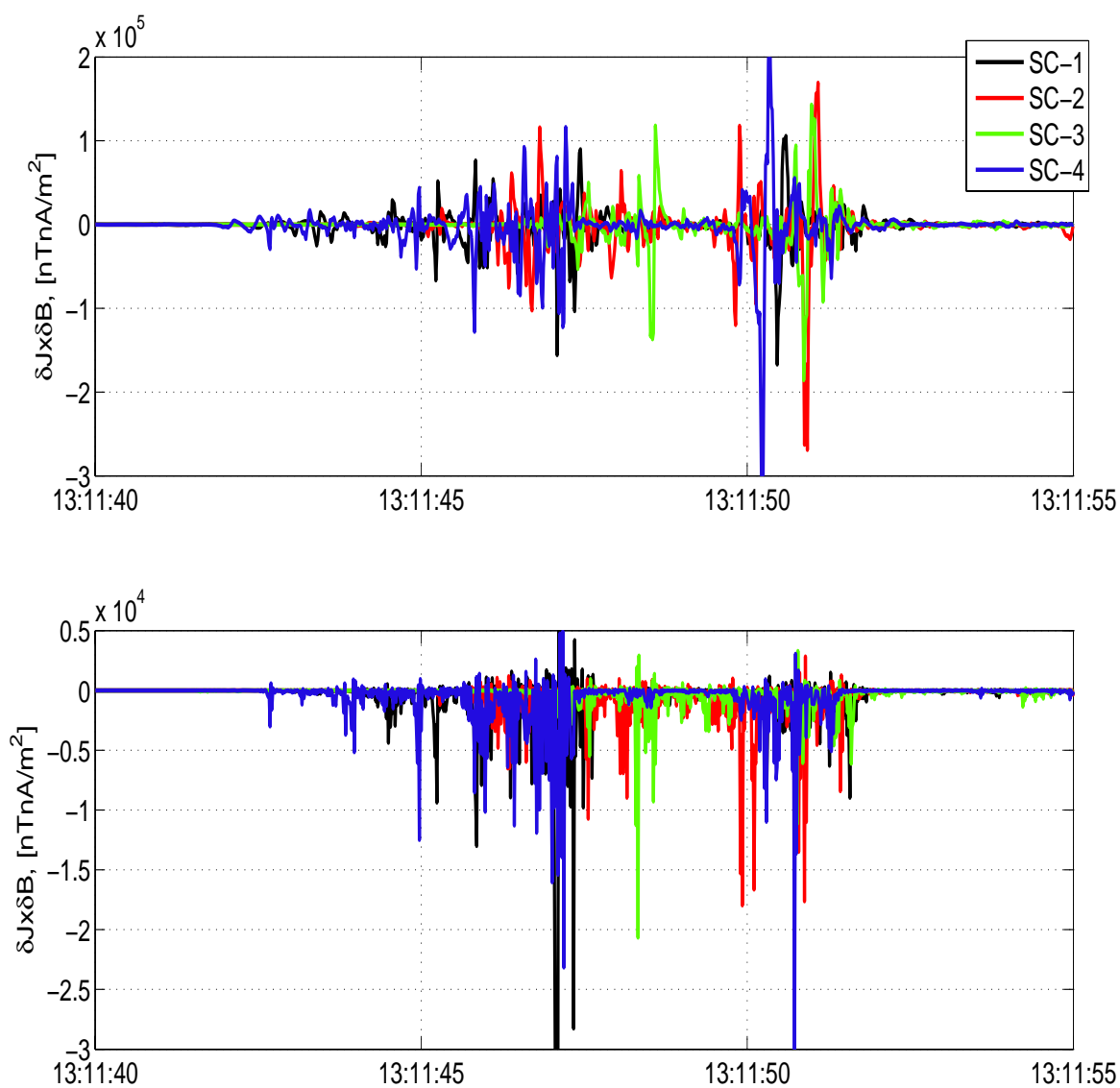


Рис. 49: Нормальная компонента векторного произведения флуктуаций магнитного поля и тока в диапазоне частот 1-67/2 Гц (вверху) и 4-67/2 Гц (внизу) для четырех аппаратов КЛАСТЕР (см. легенду для цветной кодировки).

$$\nu_{an} = \frac{1}{n_e m_e V} (e \langle \delta n \delta \mathbf{E} \rangle + \langle [\delta \mathbf{j} \times \delta \mathbf{B}] \rangle) \quad (34)$$

Оно зависит от двух членов, а именно, от корреляции флуктуаций электрического поля и плотности плазмы и от корреляции флуктуаций магнитного поля и плотности тока. Угловые скобки указывают на усреднение по ансамблю. Предполагая квазистационарность, усреднение по ансамблю можно заменить на усреднение по времени.

Входящий в уравнение 34 электростатический член был оценен научной группой КЛАСТЕР в Swedish Institute of Space Physics (De Keyser *et al.*, 2005). Используя формулу (21) можно посчитать тангенциальные компоненты вектора плотности тока для каждого аппарата КЛАСТЕР при условии, что токовый слой магнитопаузы – плоский и движется равномерно. Это, в свою очередь, позволит посчитать векторное произведение флуктуаций плотности тока и магнитного поля вдоль нормали к токовому слою (показано на рис. 49). Взятые только флуктуации свыше 1 Гц (вверх) и 4 Гц (вниз). Флуктуации с периодом 1 с соответствуют половине времени пересечения магнитопаузы. Нижняя граница в 4 Гц все еще ниже, чем нижняя граница диапазона нижнегибридных волн. Однако, в работе Vaisberg *et al.* (1983) показано, что наблюдаемые нижнегибридные волны так же затрагивают частоты, которые меньше, чем теоретические оценки нижней границы диапазона нижнегибридных волн. Верхний предел определяется частотой опроса в данных магнитного поля, и равен соответствующей частоте Найквиста 67/2 Гц.

Видно, что среднее значение векторного произведения флуктуаций плотности тока и магнитного поля может достигать 5 нТ мкА/м². Чтобы оценить коэффициент диффузии, воспользуемся соотношением (35), которое связывает его с аномальной частотой столкновений (34):

$$D_{an} = \frac{\nu_{an}}{\epsilon_0 \mu_0 \omega_{pe}^2} \quad (35)$$

При скорости протонов около 200 км/с (не показана на рис.) и плотности около 10 см⁻³ вклад флуктуаций плотности тока и магнитного поля в диапазоне частот 1-33.5 Гц в коэффициент диффузии составляет порядка 5 × 10⁹ м²/с, то есть порядка коэффициента диффузии Бома. Согласно работе Silin and Büchner (2005) электростатический вклад за счет флуктуаций электрического поля и плотности может быть в несколько раз больше. Vale *et al.* (2002) сообщил, что аномальное сопротивление за счет нижнегибридной турбулентности примерно в 100 раз меньше. Однако во-первых, в своих оценках они используют формулу квазилинейной теории из Coroniti (1985), которая не включает электромагнитный вклад. Во-вторых, в их работе использованы данные с частотой Найквиста, которая существенно ниже верхней границы частот нижнегибридного диапазона.

3.3.4 Обсуждение

В данном разделе был проведен анализ пересечения тонкой магнитопаузы на высоких широтах 30 марта 2002 г. Данный анализ выявил, что токовый слой магнитопаузы является плоским на масштабах расстояний между аппаратами. Нормаль токового слоя примерно параллельна оси X_{GSM} . Магнитопауза двигалась со скоростью 24 км/ч в сторону от Солнца. Толщина магнитопаузы была 50 км, то есть примерно один ларморовский радиус протона в магнитослое.

Токовый слой является локально открытым, о чем свидетельствует ненулевое среднее значение B_N -компоненты магнитного поля. Направление вектора магнитного поля в проекции на плоскость токового слоя магнитопаузы вращается примерно на 100 градусов. Основные токи текут вдоль токового слоя. Их плотности могут достигать 2 мкА/м². Сильные электростатические флуктуации наблюдаются у магнитосферной стороны токового слоя магнитопаузы в нижнегибридном диапазоне (10-90 Гц). Градиент в данных плотности ионов совпадает с градиентом в B_L -компоненте магнитного поля

Вне токового слоя компонента электрического поля в направлении нормали к токовому слою равна значению нормальной компоненты вектора $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$, то есть магнитное поле заморожено в плазму. Внутри токового слоя, однако, нормальная компонента электрического поля сбалансирована холловским членом обобщенного закона Ома: $E_N \sim \frac{1}{ne} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]_N$. В последнем случае условие замороженности поля в плазму нарушается.

Тот факт, что тангенциальная составляющая плотности тока направлена антипараллельно скорости указывает на то, что ток в токовом слое, вероятно, поддерживается электронами, а не ионами.

Чтобы понять роль электромагнитных флуктуаций на перенос массы и момента через магнитопаузу, был оценен коэффициент диффузии. Квазилинейная теория предсказывает, что нижнегибридные волны могут приводить к наибольшему коэффициенту диффузии по сравнению с другими известными модами (Labelle and Treumann, 1988a). Квазилинейная оценка, сделанная согласно формуле (33), порядка $D_{ql} \sim 5 \times 10^6$ м²/с. Однако, наблюдения показывают, что действительный коэффициент диффузии выше. Полный вклад флуктуаций магнитного поля и плотности тока в диапазоне частот от 1 до 33.5 Гц составляет $D_{an} \sim 5 \times 10^8$ м²/с – порядка коэффициента диффузии Бома. Это произошло вследствие нелинейных эффектов, которые учитывают корреляцию флуктуаций магнитного поля и плотности тока $[\delta \mathbf{j} \times \delta \mathbf{B}]$.

3.4 Структура толстой магнитопаузы

3.4.1 Наблюдение толстой магнитопаузы

10 мая 2002 г. около 04:27 UT четыре аппарата КЛАСТЕР пересекли на высоких широтах утреннюю сторону магнитосферу Земли, находясь около точки (6.4; -9.5; 5.6) Re в GSM системе отсчета. В этой системе отсчета четыре аппарата формировали тетраэдр с расстояниями $\chi_{14} = (-26; 32; 102)$, $\chi_{24} = (-115; -13; 32)$, $\chi_{34} = (-32; 77; 0)$ км. Колеблющаяся магнитопауза пересекла квартет КЛАСТЕР несколько раз с первым пересечением в промежуток времени 4:26:53.5-4:26:59.5 UT. Нормаль магнитопаузы, определенная методом минимума вариации магнитного поля, почти коллинеарна нормали, полученной методом, описанным в главе 1.2.3: $N_{MP} \simeq (0.99; -0.02; -0.04)$ в GSM системе отсчета. В дальнейшем будет использоваться всегда собственная система координат магнитопаузы (см. раздел 1.2.1). Скорость магнитопаузы в направлении нормали, полученная методами из раздела 1.2.3, равна примерно 90 км/с. Магнитопауза двигалась в сторону Земли. Зная скорость магнитопаузы и длительность градиента в B_L -компоненте вектора магнитного поля при переходе через магнитопаузу, была найдена толщина магнитопаузы около 450 км, то есть $L_B/\rho_p \simeq 5$ и 7 для протонов в магнитослое и магнитосфере, соответственно. Здесь L_B – толщина магнитопаузы, ρ_p ларморовский радиус

теплового протона. Таким образом, условие для возбуждения дрейфовой ионно-циклотронной неустойчивости было выполнено:

$$\frac{L}{\rho_i} \leq 7 < \sqrt{\frac{m_i}{8m_e}} \simeq 15. \quad (36)$$

С помощью метода Curlometer (см. Dunlop *et al.* (2002b) и раздел 1.2.4) была оценена пиковая плотность тока 0.7 мкА/м^2 . Эта оценка подтверждается через закон Ампера, записанный в виде

$$j = \frac{c}{4\pi} \frac{\Delta B}{L_B}, \quad (37)$$

где ΔB изменение в B_L -компоненте магнитного поля при переходе через магнитопаузу.

Для анализа были использованы данные магнитного поля собранные инструментом FGM с частотой опроса 22.4 Гц (Balogh *et al.*, 1993). Плазменные моменты измерялись с разрешением 4 с прибором CIS (Rème *et al.*, 2001).

Рис. 50 показывает данные четырех аппаратов КЛАСТЕР 10 мая 2002 г. в промежуток времени $4:26:35\text{--}4:27:05 \text{ UT}$. Магнитопауза была обнаружена между $4:26:53.5 \text{ UT}$ и $4:26:59.5 \text{ UT}$. Три верхние панели отображают измерения компонент магнитного поля в собственной системе координат магнитопаузы. Четвертая панель показывает напряженность магнитного поля. На пятой панели изображен угол проекции вектора магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы. При переходе через магнитопаузу вектор магнитного поля меняет направление на 170 градусов. Заметим, что основное изменение направления происходит примерно за 1.5 с , то есть на масштабах около 130 км вдоль направления нормали к токовому слою магнитопаузы, внутри магнитной ямы, в которой напряженность магнитного поля падает с 30 нТ до 5 нТ . В данной главе токовый слой магнитопаузы определен этим вращением. Следующая панель показывает плотность протонов. Поскольку часто в магнитослое детектор CODIF дает заниженные результаты измерений из-за насыщения прибора, на панели представлены так же данные, собранные детектором HIA с аппаратов КЛАСТЕР-3 КЛАСТЕР-1, а так же данные CODIF H^+ с аппарата КЛАСТЕР-4 с целью продемонстрировать пригодность измерений детектором CODIF. Изменение плотности при переходе через магнитопаузу составляет около 6 см^{-3} . Так же можно видеть наличие разряженного пограничного слоя ($\bar{n}=2 \text{ см}^{-3}$) в магнитосфере, сопровождающийся плавным понижением напряженности магнитного поля в промежуток времени $4:26:47\text{--}4:26:53.5 \text{ UT}$. Внутри магнитопаузы, напротив между разряженным пограничным слоем и токовым слоем магнитопаузы наблюдается так же плотный пограничный слой ($\bar{n}=5 \text{ см}^{-3}$).

Рис. 51 показывает Морле-вэйвлетные (Daubechies, 1992) спектры плотности энергии магнитных флуктуаций в диапазоне частот $0.4\text{--}2 \text{ Hz}$ для B_L -, B_M - и B_N -компонент вектора магнитного поля, измеренные аппаратом КЛАСТЕР-4 10 мая 2002 г. в промежуток времени $4:26:35\text{--}4:27:05 \text{ UT}$. Спектры для других аппаратов похожи, что означает, что наблюдаемые волны возбуждены по крайней мере на масштабах расстояний между аппаратами (около 100 км). Большая часть энергии флуктуаций сосредоточена в B_M -компоненте магнитного поля вокруг сдвинутой на величину доплеровского сдвига протонно-циклотронной частоты Ω_{cp} (изображено черным). При дивергенции магнитного поля равной нулю волновой вектор наблюдаемых возмущений должен лежать в плоскости (L,N). Кроме того, это гово-

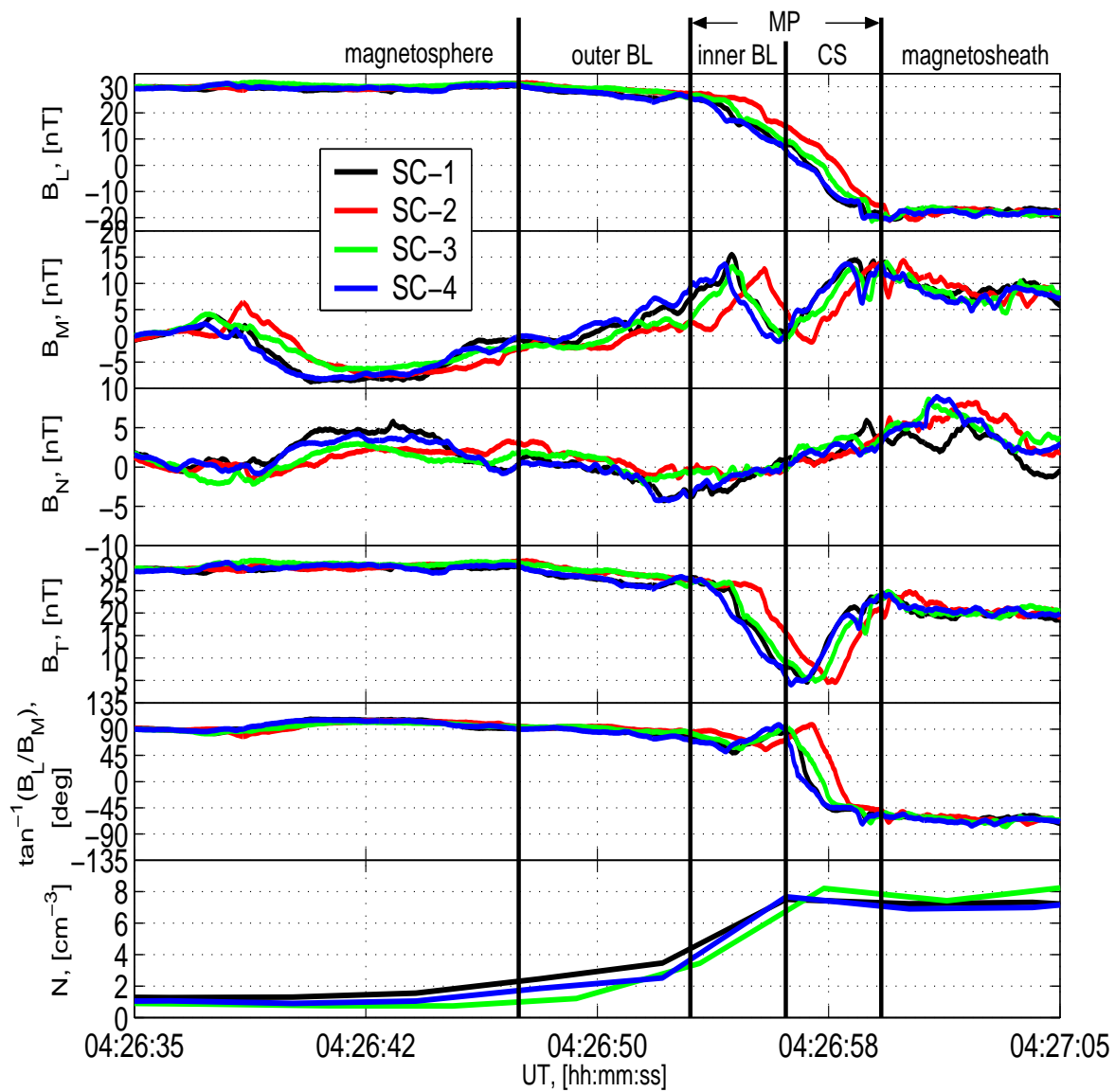


Рис. 50: Данные квартета КЛАСТЕР (см. легенду для цветной кодировки) 10 мая 2002 г. в промежуток времени 04:26:35-04:27:05 UT: L, M и N компоненты магнитного поля; модуль магнитного поля; направление магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы); плотность протонов.

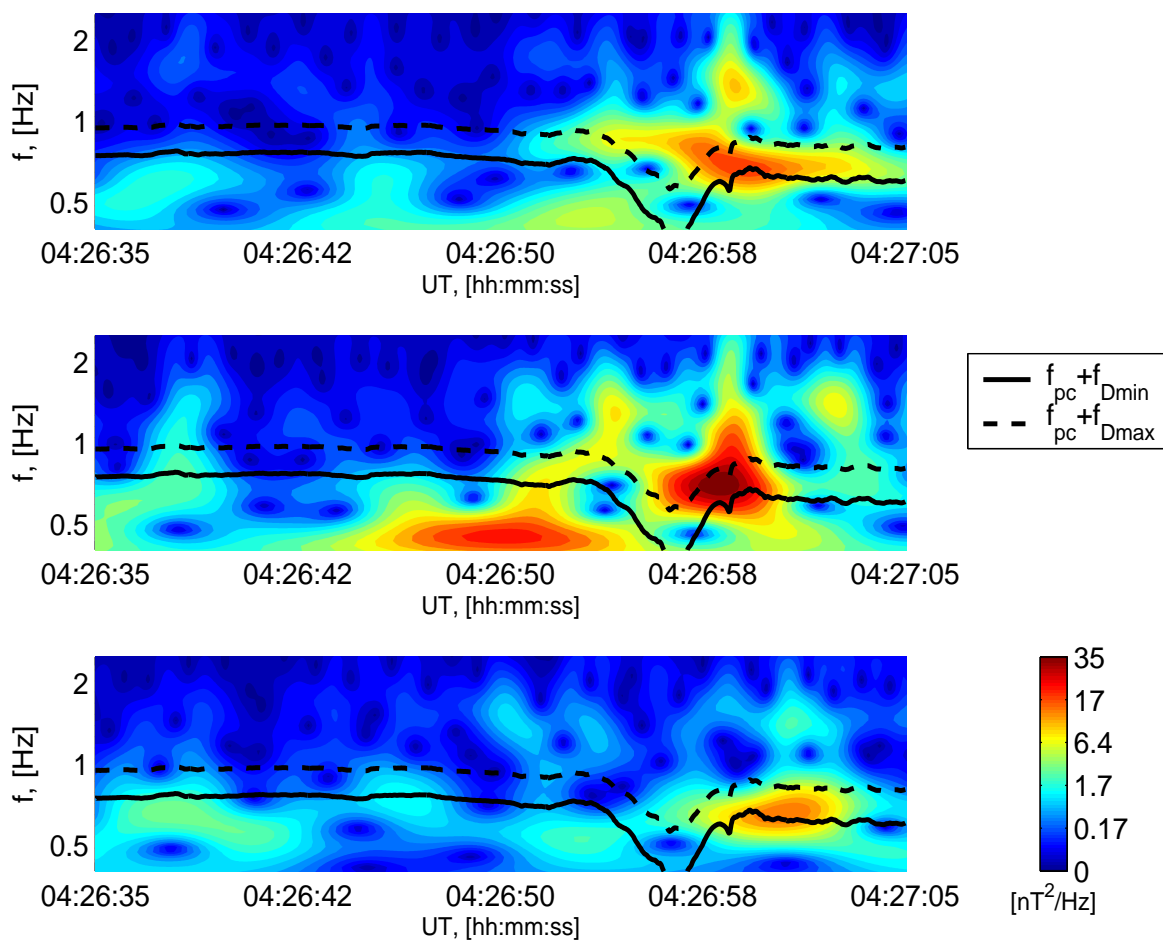


Рис. 51: Эволюция плотности энергии флуктуаций в B_L (вверху), B_M (в середине) и B_N (внизу) компонентах магнитного поля, измеренного КЛАСТЕР-4 10 мая 2002 г. в промежутке времени 04:26:35-04:27:05 UT. Протонно-циклотронная частота f_{pc} , скорректированная на минимальный и максимальный сдвиг Доплера, обозначена черным (см. легенду).

рит о линейной поляризации волн. Заметим, что амплитуда флуктуаций намного меньше напряженности магнитного поля в магнитосфере:

$$\frac{\delta B}{|B_{MSP}|} \leq \frac{1}{6}. \quad (38)$$

Изучим дисперсионные свойства наблюдаемых магнитных флуктуаций применив метод разности фаз (см. раздел 1.2.5) к B_M -компоненте вектора магнитного поля. Не получилось выявить корреляцию между аппаратами КЛАСТЕР для B_N -компоненты вектора магнитного поля, однако применение указанного метода для B_L -компоненты вектора магнитного поля дает очень схожие результаты. Чтобы избежать влияния флуктуаций, связанных с токовым слоем магнитопаузы из сигнала были отфильтрованы частоты, соответствующие длительности токового слоя ($1/\tau \simeq 0.2$ Hz). Чтобы получить величину и направление волнового вектора возмущений независимо от метода минимума вариации магнитного поля, применим метод сдвига фаз к трем парам аппаратов: 1-4, 2-3 и 3-4. Таким образом был получен волновой вектор в системе отсчета

$$\left(\frac{\vec{\chi}_{14}}{|\chi_{14}|}; \frac{\vec{\chi}_{23}}{|\chi_{23}|}; \frac{\vec{\chi}_{34}}{|\chi_{34}|} \right), \quad (39)$$

где $\vec{\chi}_{\alpha\beta}$ радиус-вектор с началом в местонахождении аппарата α и концом в местонахождении аппарата β .

Имея эту информацию можно перейти в собственную систему отсчета магнитопаузы и представить окончательные результаты на рис. 52. Верхняя часть рисунка 52 содержит амплитуду волнового вектора. Амплитуда волнового вектора $k=0.02-0.04$ рад/км. Ей соответствует длина волны $2\pi/k=150-250$ км. Для сравнения с характерными ионными масштабами заметим, что длина волны составляет примерно 2-3 ларморовских радиуса протонов в магнитослое ρ_p и примерно в 1.5-2.5 превосходит длину свободного пробега протонов ($c/w_{pi} \approx 100$ км). Нижняя часть отображает угол между нормалью токового слоя магнитопаузы и направлением волнового вектора. Волны распространяются перпендикулярно плоскости токового слоя магнитопаузы в сторону Земли (см. рис. 53). Заметим, что применение метода сдвига фаз к любому другому набору из трех пар аппаратов КЛАСТЕР дает очень схожую картину. Полагая, что дивергенция магнитного поля равна нулю, с помощью метода минимума вариации магнитного поля было определено направление оси волнового вектора исследуемых флуктуаций в диапазоне частот 0.4-2 Гц в направлении, параллельном нормали токового слоя магнитопаузы: $\langle k \rangle_{minVar} \simeq (-0.15; -0.04; 0.95)$ (собственные значения соотносятся, как 2:3:1) в собственной системе отсчета магнитопаузы. Здесь $\langle k \rangle_{minVar}$ среднее значение четырех волновых векторов с четырех аппаратов КЛАСТЕР. Движение магнитопаузы вносит доплеровский сдвиг в частоте наблюдаемых электромагнитных флуктуаций. Поскольку магнитопауза движется к Земле, флуктуации были обнаружены на более высокой частоте в системе отсчета КЛАСТЕР. Следовательно, реальная частота наблюдаемых волн меньше, чем наблюдаемая на $(\mathbf{k}, \mathbf{V}_N)(2\pi)^{-1}$, где \mathbf{k} волновой вектор и \mathbf{V}_N скорость магнитопаузы. Напомним, что \mathbf{k} и \mathbf{V}_N примерно коллинеарны. Для длины волнового вектора 0.02-0.04 рад/км при скорости магнитопаузы 90 км/с получаем, что за счет эффекта Доплера частота наблюдаемых электромагнитных флуктуаций сдвинется на 0.3-0.5 Гц выше относительно шкалы частот на рис. 51. На этом рисунке черной пунктирной линией с учетом доплеров-

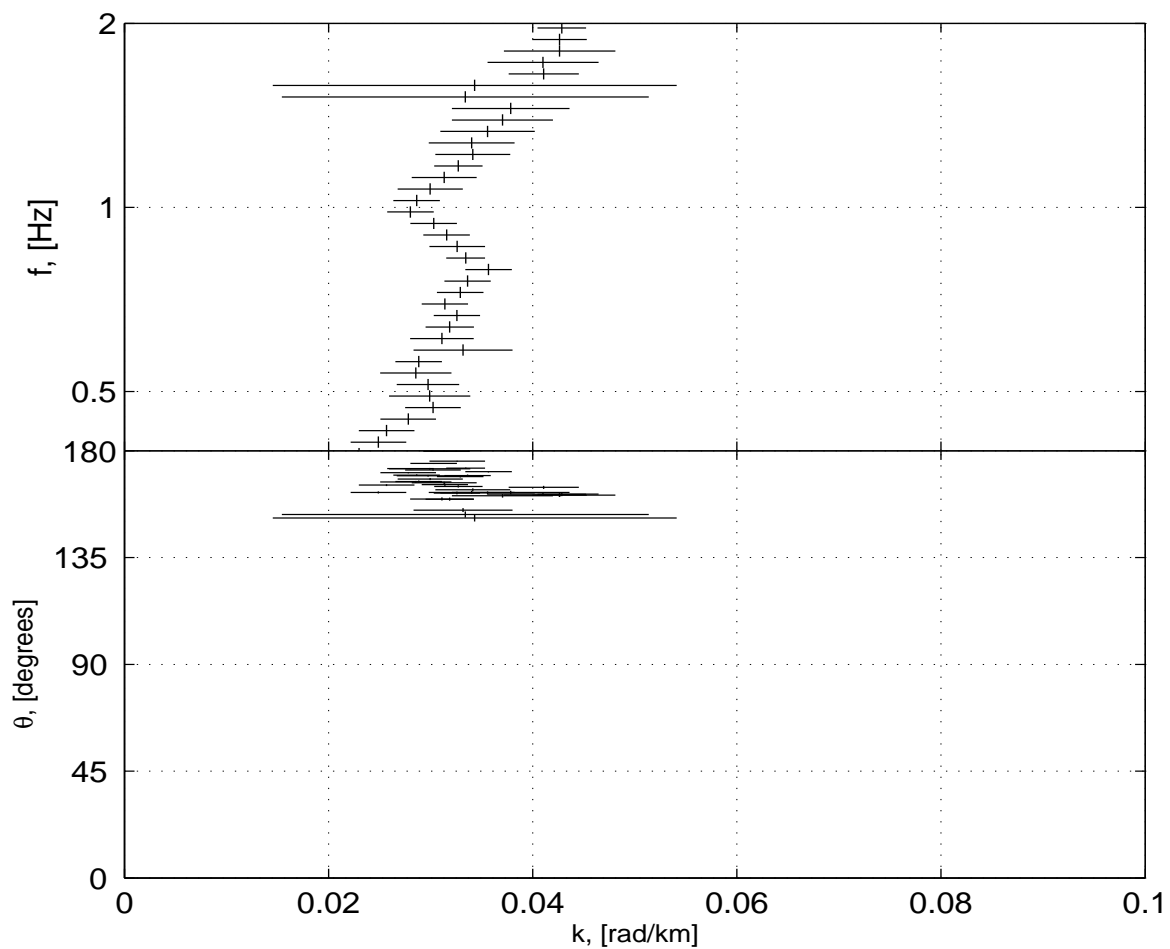


Рис. 52: Амплитуда восстановленного волнового вектора (вверху) и угол между волновым вектором и нормалью к токовому слою (внизу).

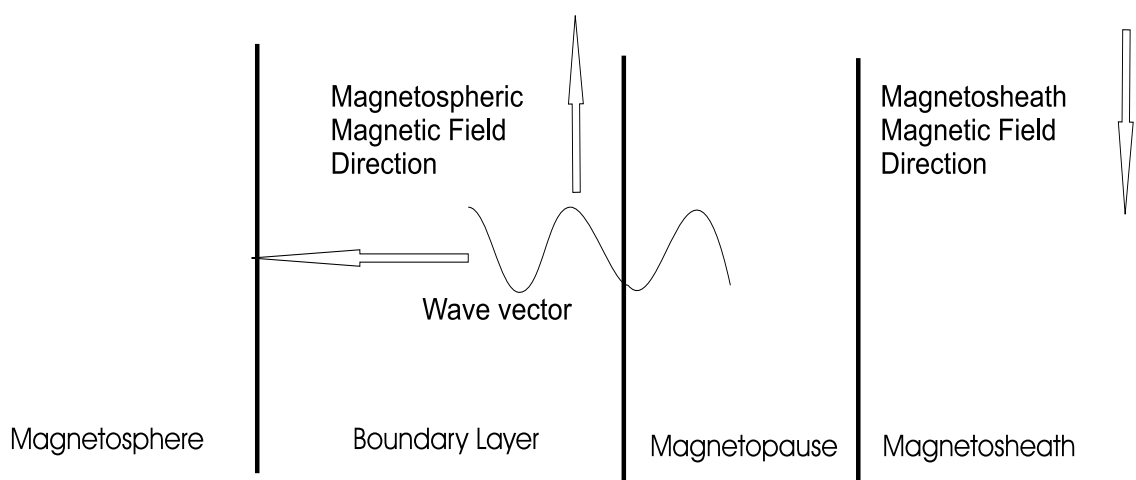


Рис. 53: Схематическое изображение конфигурации магнитного поля с двух сторон магнитопаузы и направления распространения волны.

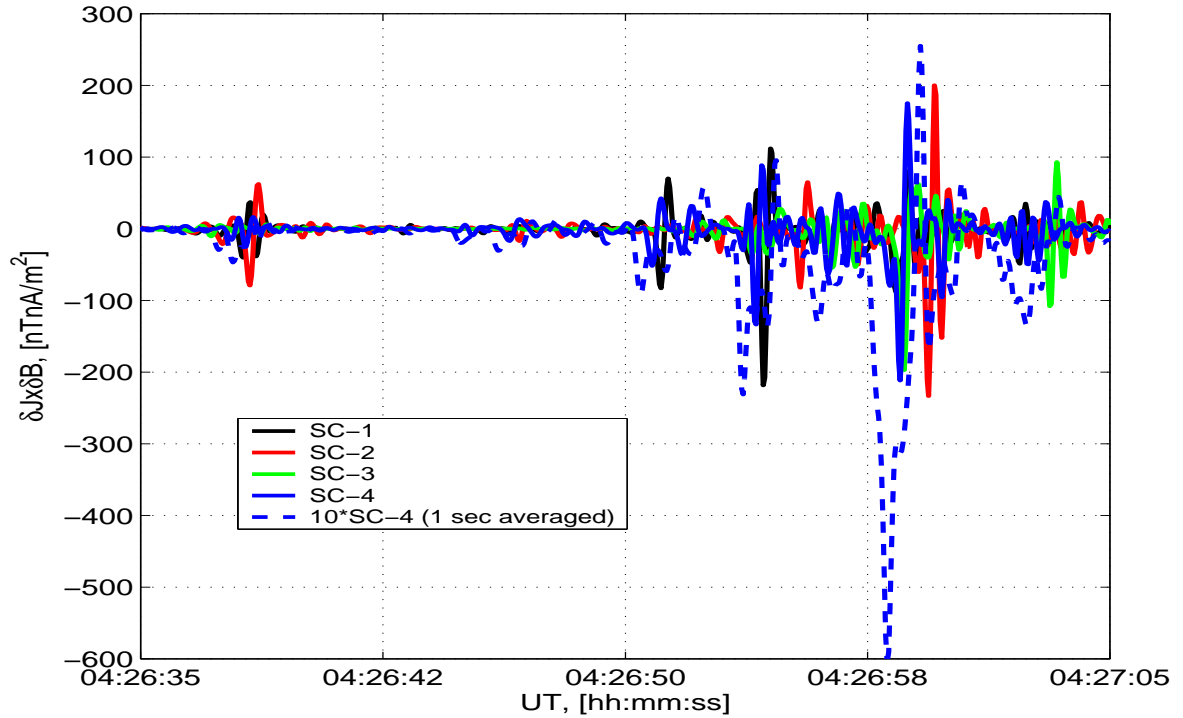


Рис. 54: Нормальная компонента векторного произведения флуктуаций магнитного поля тока в диапазоне частот между 0.4 и 2 Гц 10 мая 2002 г. в промежуток времени 4:26:35–4:27:05 UT квартетом КЛАСТЕР. Цветная кодировка расшифрована в легенде рисунка. Пунктиром показано усредненное в окне шириной в 1 сек. значение $(\delta j \times \delta B)_N$ для КЛАСТЕР-4, умноженное на коэффициент 10 для лучшей видимости.

ского сдвига показана локальная протонно-циклотронная частота Ω_{pc} в системе отсчета, движущейся с магнитопаузой.

3.4.2 Диффузия за счет волн вблизи ионно-циклотронной частоты

Важно выяснить, способны ли наблюдаемые электромагнитные волны в плазме привести к формированию наблюдаемых пограничных слоев через бесстолкновительную диффузию протонов магнитослоя в магнитосферу. Путем многоспутникового анализа было получено, что наблюдаемые электромагнитные волны вблизи частоты Ω_{ic} имеют длину около 150–250 км, а их волновой вектор направлен примерно перпендикулярно токовому слою магнитопаузы в сторону Земли. Принимая во внимание, что присутствуют флуктуации плотности совместно с электромагнитными флуктуациями (with $\delta n/n \approx 0.01 - 0.1$ согласно данным о потенциале аппарата, собранными прибором EFW с частотой опроса 5 Гц [A. Vaivads, частное сообщение]) наблюдаемые волны могут, вероятно, являются волнами сжатия. Оценим коэффициент бесстолкновительной диффузии для рассмотренного пересечения высокоширотной магнитопаузы. Квазилинейная теория предсказывает для волн вблизи частоты Ω_{ic} коэффициент диффузии

$$D_{ql} = 10^6 \times \sqrt{\delta B^2 \Delta f} W_r / B^2, \quad (40)$$

где W_r энергия резонансных протонов в кэВ, B напряженность магнитного поля в нТ, а $\sqrt{\delta B^2 \Delta f}$ интегральная плотность энергии флуктуаций в нТ/Гц^{1/2}

(Tsurutani and Thorne, 1982). Энергетический максимум распределения потока протонов в токовом слое и прилегающих пограничных слоях (около 0.4 кэВ, см. рис. 55), средняя интенсивность магнитного поля (20 нТ) и пиковое значение $\sqrt{\delta B^2 \Delta f}$ ($\sqrt{30}$ нТ/Гц^{1/2}), см. рис. 51) получаем квазилинейную оценку коэффициента диффузии $D_{ql} \leq 2 \times 10^4$ м²/с.

С другой стороны, зная, что температура протонов на магнитопаузы была около 0.5 кэВ, определено, что значение плазменного параметра β около двух на границах магнитопаузы и вплоть до 10 в магнитной яме. Для бесстолкновительной размагниченной плазмы можно оценить поперечный коэффициент диффузии в приближении случайного блуждания

$$D_{rw} = \frac{\Delta x^2}{\Delta t}, \quad (41)$$

взяв пространственный масштаб Δx длине свободного пробега иона λ_i и временной масштаб Δt равный обратному значению эффективной частоты столкновений ν . Теория Власова показывает, что

$$\nu = \frac{1}{(n_i m_i V)} (e \langle \delta n \delta \mathbf{E} \rangle + \langle \delta \mathbf{j} \times \delta \mathbf{B} \rangle), \quad (42)$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю (Tanaka and Sato, 1981). К сожалению нельзя было определить корреляцию флуктуаций плотности протонов и электрического поля поскольку эксперимент EFW на борту КЛАСТЕР функционировал только с разрешением 4 с [Y. Khotyaintsev, частное сообщение]. Однако, можно оценить порядок величины электромагнитной составляющей. Рис. 54 отображает подсчитанное значение величины $\delta \mathbf{j} \times \delta \mathbf{B}$ (для флуктуаций в диапазоне 0.4-2 Гц) вдоль нормали к токовому слою для четырех аппаратов КЛАСТЕР. Флуктуации плотности токов были подсчитаны используя формулу (21). Предполагая квазистационарность, заменим усреднение по ансамблю на усреднение по времени. Усредненное за одну секунду значение величины $\delta \mathbf{j} \times \delta \mathbf{B}$ для аппарата КЛАСТЕР-4 показано на рис. 54 пунктирной линией. Взяв среднее значение на магнитопаузе порядка 1 нТА/м², $V = v_{th,p} \simeq 300$ км/с (тепловая скорость протонов) и $n_i \simeq 3$ см⁻³ получим $D_{rw} = \lambda_i^2 \nu \approx 2.0 \times 10^6$ м²/с.

Уже это значение превышает квазилинейную оценку ионно-циклотронных волн на два порядка. Кроме того, наблюдения коррелирующих флуктуаций всеми четырьмя аппаратами КЛАСТЕР означают, что область диффузии составляет по меньшей мере 100 км в диаметре (расстояние между аппаратами). Чтобы ответить на вопрос о достаточности найденного коэффициента диффузии для наполнения наблюдаемых пограничных слоев, проверим, может ли $D_{rw} \cdot \Delta n_p / \Delta x_{bl}$ обеспечить наблюдаемый поток протонов в пограничных слоях. Здесь Δn_p изменение плотности протонов на масштабах Δx_{bl} . Зная, что, например для плотного пограничного слоя поток протонов равен $v_{th,p} \cdot n_p$, где $n_p \approx 8$ см⁻³ плотность протонов магнитослоя, $\Delta n_p \approx 4$ см⁻³ и $\Delta x_{bl} \approx 300$ км получим, что $D_{rw} \cdot \Delta n_p / \Delta x_{bl} \approx 3v_{th,p} \cdot n_{MSH}$, то есть оценка коэффициента диффузии D_{rw} примерно в три раза превосходит коэффициент диффузии, требуемый для наполнения плотного пограничного слоя.

3.4.3 Обсуждение

В отличие от переноса на тонком токовом слое, в данной главе найдено, что перенос плазмы магнитослоя через толстую магнитопаузу с толщиной в несколько лармо-

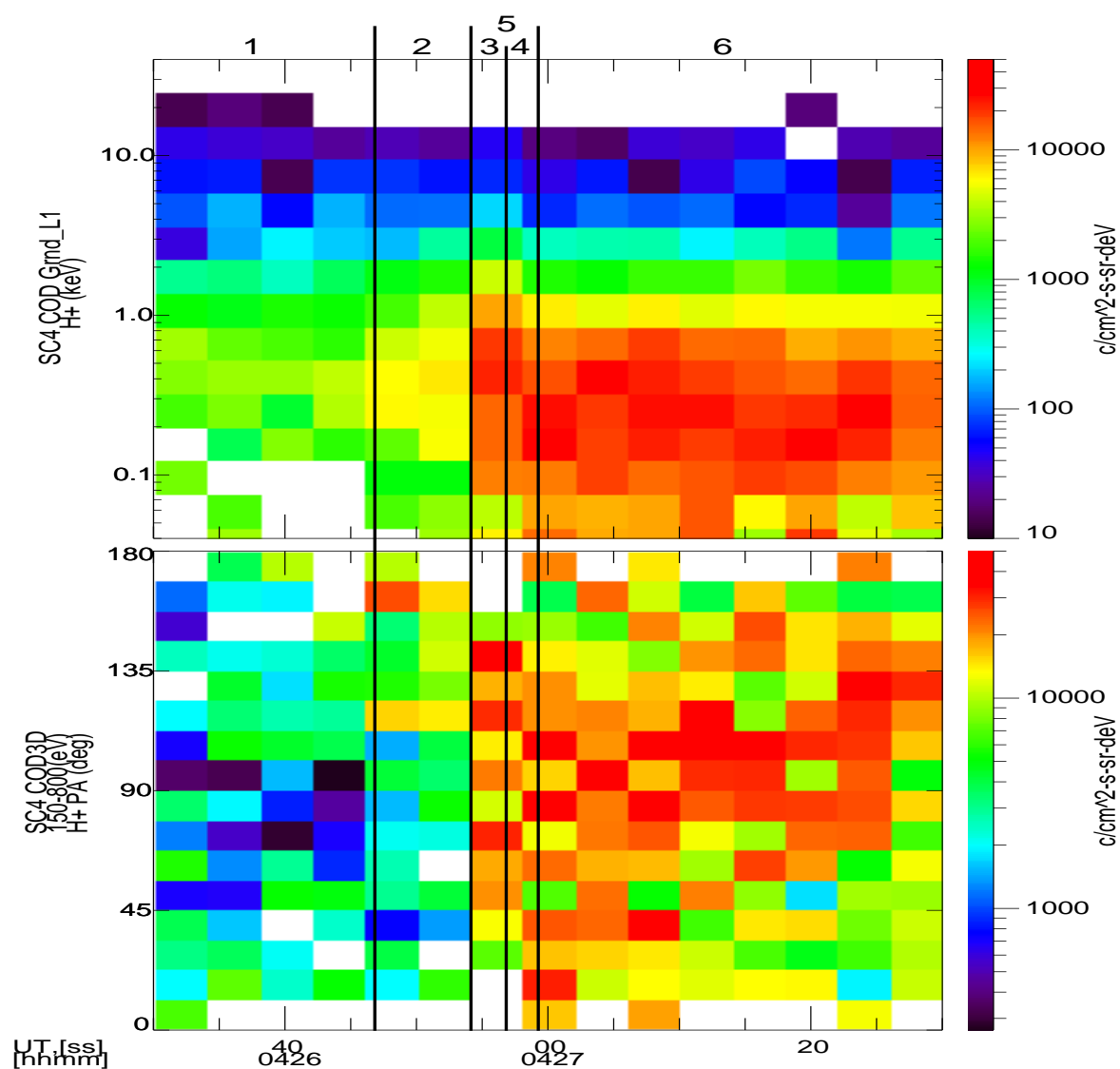


Рис. 55: Поток протонов измеренный инструментом CIS/ CODIF на борту КЛАСТЕР-4 10 мая 2002 г. (сверху) и распределение направления движения протонов (с энергиями 150-800 эВ) по отношению к направлению вектора магнитного поля (внизу) в промежуток времени 4:26:30-4:27:30 UT. Вертикальные линии разделяют области 1 (магнитосфера), 2 (внешний разреженный пограничный слой), 3 (внутренний плотный пограничный слой), 4 (токовый слой), 5 (магнитопауза) и 6 (магнитослой).

ровских радиусов ρ_p может произойти за счет взаимодействия волна-частица вблизи ионно-циклотронной частоты. Действительно, наблюдается повышение диффундировавших потоков протонов с энергией, соответствующей фазовой скорости наблюдаемых волн. Это можно увидеть на рис. 55, который отображает так же питч-угловые распределения, измеренные инструментами CIS/CODIF на борту SC-4 10 мая 2002 г. в промежуток времени 4:26:30-4:27:30 UT. Между магнитосферой (до 4:26:47 UT) и магнитослоем (после 4:26:59.5 UT) наблюдается не только токовый слой, но и два пограничных слоя на магнитосферной стороне магнитопаузы: плотный пограничный слой сразу за магнитопаузой и разреженный пограничный слой левее магнитопаузы. Рис. 55 показывает, что средняя энергия в пограничном слое (4:26:47-4:26:53.5 UT) около 0.2–0.5 кэВ. Это соответствует скоростям протонов в 200–300 км/с. С другой стороны, фазовая скорость $v_{ph} = \omega/k$ наблюдаемых волн составляет около 200 км/с (см. рис. 52). То есть, фазовая скорость наблюдаемых волн хорошо соответствует скорости протонов в пограничных слоях. Питч-угловое распределение протонов демонстрирует, что в плотном пограничном слое протоны видны на углах 90–150 градусов относительно направления вектора магнитного поля. Часть этих протонов (с энергиями, превосходящими 300 эВ) может попасть в плотный пограничный слой за счет эффектов конечного гирорадиуса (см. например работу Amata *et al.* (2006)), поскольку ларморовские радиусы таких протонов превосходят толщину токового слоя 130 км. Однако, присутствие квази-перпендикулярной (с питч-углами около 110–150 градусов) популяции протонов при пересечении токового слоя (04:26:56.5–04:26:59.0 UT), плотного пограничного слоя (04:26:53.5–04:26:56.5 UT) и далее в разреженном пограничном слое (04:26:46.5–04:26:53.5 UT, здесь с уже более сконцентрированными питч-углами около 110–120 градусов) указывает на происходящее взаимодействие с наблюдаемыми волнами вблизи Ω_{ic} . В рассмотренном примере длина волн в 2–3 меньше, чем толщина магнитопаузы. Таким образом, время взаимодействия на магнитопаузе ограничено 2–3 волновыми периодами. Оценим импульс, который может быть сообщен протонам наблюдаемыми волнами за такое время взаимодействия, а затем проверим, достаточен ли такой импульс будет, чтобы увеличить ларморовский радиус протонов до толщины магнитопаузы. Запишем уравнение движения в виде

$$m_p \frac{\Delta v}{T} = e v_{ph} \delta B, \quad (43)$$

где m_p - масса протона, Δv - изменение скорости за период T , δB амплитуда волны, и взяв $T \approx 1.5$ с, $v_{ph} \approx 200$ км/с, $\delta B \approx 3$ нТ (в среднем) получаем $\Delta v \approx 1000$ км/с. Ускорение протона приводит к достаточно большому ларморовскому радиусу:

$$\rho_p = \frac{v_{th,p}}{\omega_{pe}}. \quad (44)$$

Таким образом, получено, что лишь за один период взаимодействия наблюдаемые волны могут, в среднем, сообщить импульс протонам, что их гирорадиус в магнитослое (90 км) увеличится в три раза ($\Delta v/v_{th,p} \approx 3.3$). То есть, уже два периода взаимодействия достаточны, чтобы протоны обрели импульс, необходимый для проникновения через всю магнитопаузу толщиной 450 км.

Согласно работам Nykyri *et al.* (2003) и Sundkvist *et al.* (2005a) возникновение электромагнитных волн вблизи ионно-циклотронной частоты в горловине каспа объясняется наличием неоднородных потоков плазмы. Локализованность флукту-

аций магнитного поля на градиенте плотности в рассмотренном примере говорит о дрейфовой ионно-циклотронной неустойчивости в качестве основной причины возбуждения с градиентом плотности в качестве источника свободной энергии.

3.5 Выводы

Анализ магнитных флуктуаций в окрестности магнитопаузы по данным магнитного поля, измеренным с частотой опроса 22.4 и 67 Гц аппаратами КЛАСТЕР во время 16 пересечений магнитопаузы, выявил, что плотность энергии флуктуаций магнитного поля во всем наблюдаемом диапазоне частот, от ионно-циклотронной частоты до нижнегибридной частоты, достигает наибольших значений на самых тонких токовых слоях. Данная зависимость проявляется особенно четко со стороны магнитосферы. Это говорит о дрейфовой природе флуктуаций с градиентами давления в качестве источника свободной энергии. При этом, наклон спектров плотности энергии флуктуаций магнитного поля со стороны магнитослоя (коэффициент наклона $k=-2.0$) оказался круче, чем со стороны магнитосферы ($k=-1.75$), а плотность энергии флуктуаций в касательных к токовому слою магнитопаузы компонентах магнитного поля доминирует.

Изучение уникального пересечения тонкого токового слоя магнитопаузы с толщиной 50 км (один ларморовский радиус теплового протона магнитослоя) по данным магнитного поля, измеренным с частотой опроса 67 Гц, электрического поля, измеренным с частотой опроса 450 Гц и плазменным данным, измеренным с частотой опроса 0.25 Гц аппаратами КЛАСТЕР 30 марта 2002 г., обнаружило, что плотности тока могут достигать 2-3 мкА/м², что более, чем на два порядка превосходит все оценки плотности тока по данным предыдущих миссий, а так же все измерения плотности тока аппаратами КЛАСТЕР в сезоны, когда расстояния между аппаратами превосходили 600 км. Сильное перпендикулярное поле 30-40 мВ/м сбалансировано холловским членом обобщенного закона Ома $E_N = \frac{1}{ne}(\mathbf{j} \times \mathbf{B})_N$. Мощные флуктуации электрического поля с амплитудами до 100 мВ/м в диапазоне нижнегибридной частоты 10-90 Гц присутствуют на градиенте плотности у магнитосферной стороны токового слоя магнитопаузы. Уже флуктуации магнитного поля и плотности тока вблизи нижнегибридной частоты могут привести к значениям коэффициента диффузии протонов магнитослоя через токовый слой магнитопаузы, достигающим 5.0×10^8 м²/с, что на два порядка превышает оценку, произведенную квазилинейным методом.

Изучение случая пересечения толстой магнитопаузы с толщиной 450 км (пять ларморовских радиусов теплового протона магнитослоя) по данным магнитного поля, измеренным с частотой опроса 22.4 Гц и плазменным данным, измеренным с частотой опроса 0.25 Гц аппаратами КЛАСТЕР 10 мая 2002 г., показало, что основной токовый слой магнитопаузы, определенный областью вращения магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы сосредоточен на масштабах, в несколько раз меньше толщины магнитопаузы (130 км). На всей толщине магнитопаузы, а так же в прилегающем пограничном слое со стороны магнитосферы присутствуют флуктуации магнитного поля вблизи локальной протонно-циклотронной частоты 0.4-2 Гц с амплитудами до 20 раз большими напряженности магнитного поля в магнитосфере. Этим флуктуациям магнитного поля соответствуют волны длиной 150-250 км с волновым вектором, направленным перпендикулярно плоскости токового слоя магнитопаузы в сторону Земли. При этом, протоны магнитослоя, влетающие в магнитосферу в направлении волнового вектора со скоростью, рав-

ной фазовой скорости волн, что характерно для взаимодействия волна-частица. Коэффициент диффузии протонов магнитослоя через магнитопаузу при взаимодействии волна-частица за счет флуктуаций магнитного поля и плотности тока вблизи протонно-циклотронной частоты 2.0×10^6 м²/с на два порядка превосходит оценку, полученную квазилинейным методом, и совпадает, по порядку величины, с коэффициентом диффузии, требуемым для образования пограничного слоя с наблюдаемым градиентом плотности.

Положения, выносимые на защиту

1. Установившееся на средних широтах сверхальфвеновское течение плазмы магнитослоя замедляется до субальфвеновских скоростей над каспом и за ним. При этом тепловое и магнитное давление увеличиваются в 2-4 раза.
2. На средних и высоких широтах скорость магнитопаузы не превосходит 180 км/с (в три раза медленнее, чем на низких широтах), имея среднее 60 км/с (в 1.3 раза медленнее, чем на низких широтах) и медиану 50 км/с. Скорость магнитопаузы с прилегающей мантией меньше - не превышает 70 км/с. Толщина магнитопаузы может быть от 50 до 6000 км, со средним 1600 км (в 1.8 раза толще, чем на низких широтах) и медианой 800 км. Магнитопауза с прилегающей мантией, в среднем, в два раза тоньше, чем дневная магнитопауза. В гирорадиусах протона ρ_p средняя толщина была $30\rho_p$ (в 3 раза толще, чем на низких широтах), а медиана $10\rho_p$. Плотность токов в токовом слое магнитопаузы может быть от 20 до 1300 нА/м², со средним 600 нА/м² и медианой 200 нА/м². Плотность токов магнитопаузы с прилегающей мантией, в среднем, в два раза выше, чем дневной магнитопаузы.
3. Существует два вида токового слоя магнитопаузы тангенциального типа: а) напряженность магнитного поля изменяется через слой монотонно, а ток течет только перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; поворот поля через слой происходит на всей толщине магнитопаузы. б) напряженность магнитного поля имеет минимум в центре слоя; в минимуме ток течет в основном перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; слева и справа от минимума ток в поперечном направлении ослабевает; при этом появляются продольные токи, которые противоположно направлены с двух сторон минимума; основной поворот поля через слой происходит в минимуме на масштабах в 2-3 раза меньших толщины магнитопаузы.
4. Мощность флуктуаций магнитного поля вблизи магнитопаузы увеличивается с уменьшением толщины магнитопаузы во всем наблюдаемом диапазоне частот (от ионно-циклотронной до нижегибридной частоты). Мощность флуктуаций в касательных к магнитопаузе компонентах поля больше, чем в нормальной компоненте.
5. Вероятным механизмом переноса протонов в магнитосферу через тонкую магнитопаузу (один гирорадиус протона магнитослоя) является взаимодействие волна-частица вблизи нижегибридной частоты. Наблюдаемые амплитуды флуктуаций магнитного поля и плотности тока могут привести к коэффициенту диффузии около 5.0×10^8 м²/с, что на два порядка больше квазилинейной оценки.
6. Вероятным механизмом переноса протонов из магнитослоя в магнитосферу через толстую магнитопаузу является взаимодействие волна-частица вблизи ионно-циклотронной частоты. Наблюдаемые амплитуды флуктуаций магнитного поля и плотности тока могут привести к коэффициенту диффузии около 2.0×10^6 м²/с, что на два порядка больше квазилинейной оценки.

Список литературы

- Amata, E., Savin, S., Andre, M., Dunlop, M., Khotyaintsev, Y., Marcucci, M., Fazakerley, A., Bogdanova, Y., Decreau, P., Rauch, J., Trotignon, J., Skalsky, A., Romanov, A., Buechner, J., Blecki, J., and Rème, H. (2006). Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 1. Boundary structure and motion. *Nonlin. Processes Geophys.*, **13**, 365–376.
- Anderson, R. R., Eastman, T. E., Harvey, C. C., Hoppe, M. M., Tsurutani, B. T., and Etcheto, J. (1982). Plasma waves near the magnetopause. *J. Geophys. Res.*, **87**, 2087–2107.
- André, M., Behlke, R., Wahlund, J.-E., Vaivads, A., Eriksson, A.-I., Tjulin, A., Carozzi, T. D., Cully, C., Gustafsson, G., Sundkvist, D., Khotyaintsev, Y., Cornilleau-Wehrin, N., Rezeau, L., Maksimovic, M., Lucek, E., Balogh, A., Dunlop, M., Lindqvist, P.-A., Mozer, F., Pedersen, A., and Fazakerley, A. (2001). Multi-spacecraft observations of broadband waves near the lower hybrid frequency at the Earthward edge of the magnetopause. *Ann. Geophys.*, **19**, 1471–1481.
- André, M., Vaivads, A., Buchert, S. C., Fazakerley, A. N., and Lahiff, A. (2004). Thin electron-scale layers at the magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, 3803.
- Aubry, M. P., Kivelson, M. G., and Russel, C. T. (1971). Motion and structure of the magnetopause. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1673–1696.
- Avanov, L. A., Fuselier, S. A., and Vaisberg, O. L. (2001). High-latitude magnetic reconnection in sub-Alfvénic flow: Interball tail observations on May 29, 1996. *J. Geophys. Res.*, **106**, 29 491–29 502.
- Axford, W. I. and Hines, C. O. (1961). A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms. *Can. J. Phys.*, **39**, 1433–+.
- Bale, S. D., Mozer, F. S., and Phan, T. (2002). Observation of lower hybrid drift instability in the diffusion region at a reconnecting magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 33–1.
- Balikhin, M. A., de Wit, T. D., Alleyne, H. S. C. K., Woolliscroft, L. J. C., Walker, S. N., Krasnosel'skikh, V., Mier-Jedrzejowicz, W. A. C., and Baumjohann, W. (1997). Experimental determination of the dispersion of waves observed upstream of a quasi-perpendicular shock. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 787–790.
- Balogh, A., Cowley, S. W. H., Dunlop, M. W., Southwood, D. J., Thomlinson, J. G., Glassmeier, K. H., Musmann, G., Lühr, H., Acuña, M. H., Fairfield, D. H., Slavin, J. A., Riedler, W., Schwingenschuh, K., Kivelson, M. G., Elpic, R. C., Primdahl, F., Roux, A., Tsurutani, B. T., and Neubauer, F. M. (1993). *The Cluster Magnetic Field Investigation: scientific objectives and instrumentation*, pages 95–114. ESA SP-1159: Cluster: Mission, Payload and Supporting Activities.
- Balogh, A., Dunlop, M. W., Cowley, S. W. H., Southwood, D. J., Thomlinson, J. G., Glassmeier, K. H., Musmann, G., Luhr, H., Buchert, S., Acuna, M. H., Fairfield, D. H., Slavin, J. A., Riedler, W., Schwingenschuh, K., and Kivelson, M. G. (1997). The Cluster Magnetic Field Investigation. *Space Sci. Rev.*, **79**, 65–91.

- Balogh, A., Carr, C. M., Acuña, M. H., Dunlop, M. W., Beek, T. J., Brown, P., Fornaçon, K.-H., Georgescu, E., Glassmeier, K.-H., Harris, J., Musmann, G., Oddy, T., and Schwingenschuh, K. (2001). The Cluster Magnetic Field Investigation: overview of in-flight performance and initial results. *Ann. Geophys.*, **19**, 1207–1217.
- Beall, J. M., Kim, Y. C., and Powers, E. J. (1982). Estimation of wavenumber and frequency spectra using fixed probe pairs. *J. App. Phys.*, **53**, 3933–3940.
- Belova, E. V., Blecki, J., Denis, M., Zelenyi, L. M., and Savin, S. P. (1991). Excitation of ion-cyclotron waves at the magnetosphere boundary. *Sov. J. Pl. Phys.*, **17**, 952–961.
- Berchem, J. and Russell, C. T. (1982a). Magnetic field rotation through the magnetopause - ISEE 1 and 2 observations. *J. Geophys. Res.*, **87**, 8139–8148.
- Berchem, J. and Russell, C. T. (1982b). The thickness of the magnetopause current layer - ISEE 1 and 2 observations. *J. Geophys. Res.*, **87**, 2108–2114.
- Blecki, J., Kossacki, K., Klimov, S. I., Nozdrachev, M. N., Omelchenko, A. N., Savin, S. P., and Sokolov, A. Y. (1987). ELF/ULF plasma waves observed on Prognoz-8 near the Earth's magnetopause. *Artificial Satellites, Space Physics*, **22**, 5–16.
- Cahill, L. J. and Amazeen, P. G. (1963). The Boundary of the Geomagnetic Field. *J. Geophys. Res.*, **68**, 1835.
- Cargill, P. J., Lavraud, B., Owen, C. J., Grison, B., Dunlop, M. W., Cornilleau-Wehrin, N., Escoubet, C. P., Paschmann, G., Phan, T. D., Rezeau, L., Bogdanova, Y., and Nykyri, K. (2005). Cluster at the Magnetospheric Cusps. *Space Sci. Rev.*, **118**, 321–366.
- Chapman, S. and Ferraro, V. (1930). A new theory of magnetic storms. *Nature*, **16**, 129.
- Cooley, J. W. and Tukey, J. W. (1965). An Algorithm for the Machine Computation of the Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*, **19**, 297–301.
- Coroniti, F. V. (1985). Space plasma turbulent dissipation - Reality or myth? *Space Sci. Rev.*, **42**, 399–410.
- Crooker, N. U., Greenwald, R. A., Hesse, M., Hudson, M. K., Hughes, W. J., Lyons, L. R., Maynard, N. C., Russell, C. T., and Siscoe, J. L. (1999). *Report from the first geospace environment modeling GEM campaigns: 1991-1997*. Space science center, EGPS, UCLA.
- Cummings, W. D. and Coleman, Jr., P. J. (1968). Magnetic Fields in the Magnetopause and Vicinity at Synchronous Altitude. *J. Geophys. Res.*, **73**, 5699–+.
- Daubechies, I., editor (1992). *Ten lectures on wavelets*. CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics, Lectures delivered at the CBMS conference on wavelets, University of Lowell, Mass., June 1990, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1992.
- De Keyser, J. and Roth, M. (1997a). Equilibrium conditions for the tangential discontinuity magnetopause. *J. Geophys. Res.*, **102**, 9513–9530.

- De Keyser, J. and Roth, M. (1997b). Erratum: “Equilibrium conditions for the tangential discontinuity magnetopause” [Journal of Geophysical Research, 102, 9513–9530 (1997)]. *J. Geophys. Res.*, **102**, 19 943–19 944.
- De Keyser, J. and Roth, M. (1998a). Equilibrium conditions and magnetic field rotation at the tangential discontinuity magnetopause. *J. Geophys. Res.*, **103**, 6653–6662.
- De Keyser, J. and Roth, M. (1998b). Magnetic field rotation at the dayside magnetopause: AMPTE/IRM observations. *J. Geophys. Res.*, **103**, 6663–6674.
- De Keyser, J., Dunlop, M. W., Owen, C. J., Sonnerup, B. U. Ö., Haaland, S. E., Vaivads, A., Paschmann, G., Lundin, R., and Rezeau, L. (2005). Magnetopause and Boundary Layer. *Space Sci. Rev.*, **118**, 231–320.
- Delcourt, D. C. and Sauvaud, J.-A. (1998). Recirculation of plasma sheet particles into the high-latitude boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **103**, 26 521–26 532.
- Dudok de Wit, T., Krasnosel’skikh, V. V., Bale, S. D., Dunlop, M. W., Lühr, H., Schwartz, S. J., and Woolliscroft, L. J. C. (1995). Determination of dispersion relations in quasi-stationary plasma turbulence using dual satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2653–2656.
- Dungey, J. W. (1961). Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 47–48.
- Dunlop, M. W. and Balogh, A. (2005). Magnetopause current as seen by Cluster. *Ann. Geophys.*, **23**, 901–907.
- Dunlop, M. W., Balogh, A., and Glassmeier, K.-H. (2002a). Four-point Cluster application of magnetic field analysis tools: The discontinuity analyzer. *J. Geophys. Res.*, **107**, 24–1.
- Dunlop, M. W., Balogh, A., Glassmeier, K.-H., and Robert, P. (2002b). Four-point Cluster application of magnetic field analysis tools: The Curlometer. *J. Geophys. Res.*, **107**, 23–1.
- Dunlop, M. W., Lavraud, B., Cargill, P., Taylor, M. G. G. T., Balogh, A., Réme, H., Decreau, P., Glassmeier, K.-H., Elphic, R. C., Bosqued, J.-M., Fazakerley, A. N., Dandouras, I., Escoubet, C. P., Laakso, H., and Marchaudon, A. (2005). Cluster Observations of the CUSP: Magnetic Structure and Dynamics. *Surveys Geophys.*, **26**, 5–55.
- Eastman, T. E. and Hones, Jr., E. W. (1979). Characteristics of the magnetospheric boundary layer and magnetopause layer as observed by Imp 6. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2019–2028.
- Eastman, T. E., Fuselier, S. A., and Gosling, J. T. (1996). Magnetopause crossings without a boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **101**, 49–58.
- Eastman, T. E., Boardsen, S. A., Chen, S.-H., Fung, S. F., and Kessel, R. L. (2000). Configuration of high-latitude and high-altitude boundary layers. *J. Geophys. Res.*, **105**, 23 221–23 238.
- Elphic, R. C. and Russell, C. T. (1979). *ISEE-1 and 2 magnetometer observations of the magnetopause, in ESA SP-148: Magnetospheric Boundary Layers (edited by J. Lemaire). pp. 43-50.*

- Escoubet, C. P., Schmidt, R., and Goldstein, M. L. (1997). Cluster - Science and Mission Overview. *Space Sci. Rev.*, **79**, 11–32.
- Fedorov, A., Dubinin, E., Song, P., Skalsky, A., and Budnik, E. (2001). Structure of the flank magnetopause for horizontal IMF: INTERBALL 1 observations. *J. Geophys. Res.*, **106**, 25 419–25 436.
- Fedorov, A., Budnik, E., and Sauvaud, J.-A. (2002). On the origin of the high-latitude boundary layer. *Adv. Space Res.*, **30**, 2763–2770.
- Frank, L. A. (1971). Plasma in the earth's polar magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, **76**, 5202–5219.
- Fränz, M. and Harper, D. (2002). Heliospheric coordinate systems. *Planet. Space Sci.*, **50**, 217–233.
- Galeev, A. A. (1983). Plasma processes within the magnetosphere boundaries. *Space Sci. Rev.*, **34**, 213–220.
- Galeev, A. A. and Zelenyi, L. M. (1976). Tearing instability in plasma configurations. *ZhETF*, **70**, 2133–2151.
- Gendrin, R. (1983). Magnetic turbulence and diffusion processes in the magnetopause boundary layer. *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 769–771.
- Gladd, N. T. and Huba, J. D. (1979). Finite beta effects on the drift-cyclotron instability. *Phys. Fluids*, **22**, 911–922.
- Glassmeier, K.-H., Motschmann, U., Dunlop, M., Balogh, A., Acuña, M. H., Carr, C., Musmann, G., Fornaçon, K.-H., Schweda, K., Vogt, J., Georgescu, E., and Buchert, S. (2001). Cluster as a wave telescope - first results from the fluxgate magnetometer. *Ann. Geophys.*, **19**, 1439–1447.
- Gosling, J. T., Thomsen, M. F., Bame, S. J., Elphic, R. C., and Russell, C. T. (1990). Plasma flow reversals at the dayside magnetopause and the origin of asymmetric polar cap convection. *J. Geophys. Res.*, **95**, 8073–8084.
- Gosling, J. T., Thomsen, M. F., Bame, S. J., Elphic, R. C., and Russell, C. T. (1991). Observations of reconnection of interplanetary and lobe magnetic field lines at the high-latitude magnetopause. *J. Geophys. Res.*, **96**, 14 097–+.
- Gringauz, K. I., Zastenker, G. N., and Khokhlov, M. Z. (1974). Variations in Position of Magnetopause from Data of Charged Particle Traps on Prognoz and Prognoz-2 Satellites. *Cosm. Res.*, **12**, 815.
- Grison, B., Sahraoui, F., Lavraud, B., Chust, T., Cornilleau-Wehrlin, N., Rème, H., Balogh, A., and André, M. (2005). Wave particle interactions in the high-altitude polar cusp: a Cluster case study. *Ann. Geophys.*, **23**, 3699–3713.
- Gustafsson, G., Bostrom, R., Holback, B., Holmgren, G., Lundgren, A., Stasiewicz, K., Ahlen, L., Mozer, F. S., Pankow, D., Harvey, P., Berg, P., Ulrich, R., Pedersen, A., Schmidt, R., Butler, A., Fransen, A. W. C., Klinge, D., Thomsen, M., Falthammar, C.-G., Lindqvist, P.-A., Christenson, S., Holtet, J., Lybekk, B., Sten, T. A., Tanskanen, P., Lappalainen, K., and Wygant, J. (1997). The Electric Field and Wave Experiment for the Cluster Mission. *Space Sci. Rev.*, **79**, 137–156.

- Haaland, S., Sonnerup, B., Dunlop, M., Balogh, A., Georgescu, E., Hasegawa, H., Klecker, B., Paschmann, G., Puhl-Quinn, P., Rème, H., Vaith, H., and Vaivads, A. (2004a). Four-spacecraft determination of magnetopause orientation, motion and thickness: comparison with results from single-spacecraft methods. *Ann. Geophys.*, **22**, 1347–1365.
- Haaland, S., Sonnerup, B. U. Ö., Dunlop, M. W., Georgescu, E., Paschmann, G., Klecker, B., and Vaivads, A. (2004b). Orientation and motion of a discontinuity from Cluster curlometer capability: Minimum variance of current density. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, 10804–+.
- Haerendel, G., Paschmann, G., Sckopke, N., and Rosenbauer, H. (1978). The frontside boundary layer of the magnetosphere and the problem of reconnection. *J. Geophys. Res.*, **83**, 3195–3216.
- Hapgood, M. A. (1992). Space physics coordinate transformations - A user guide. *Planet Space Sci.*, **40**, 711–717.
- Heppner, J. P., Sugiura, M., Skillman, T. L., Ledley, B. G., and Campbell, M. (1967). OGO-A Magnetic Field Observations. *J. Geophys. Res.*, **72**, 5417–+.
- Holzer, R. E., McLeod, M. G., and Smith, E. J. (1966). Preliminary Results from the Ogo 1 Search Coil Magnetometer: Boundary Positions and Magnetic Noise Spectra. *J. Geophys. Res.*, **71**, 1481.
- Hones, E. W., Asbridge, J. R., Blame, S. J., Montgomery, M. D., Singer, S., and Akasofu, S.-I. (1972). Measurements of magnetotail Plasma Flow Made with Vela 4B. *J. Geophys. Res.*, **77**, 5503–5522.
- Huba, J. D., Gladd, N. T., and Papadopoulos, K. (1977). The lower-hybrid-drift instability as a source of anomalous resistivity for magnetic field line reconnection. *Geophys. Rev. Lett.*, **4**, 125–126.
- Kaufmann, R. L. and Konradi, A. (1973). Speed and thickness of the magnetopause. *J. Geophys. Res.*, **78**, 6549–6568.
- Khotyaintsev, Y. V., Vaivads, A., Retinò, A., André, M., Owen, C. J., and Nilsson, H. (2006). Formation of Inner Structure of a Reconnection Separatrix Region. *Phys. Rev. Lett.*, **97**(20), 205003–+.
- Klimov, S., Romanov, S., Amata, E., Blecki, J., Büchner, J., Juchniewicz, J., Rustenbach, J., Triska, P., Woolliscroft, L. J. C., Savin, S., Afanas'ev, Y., de Angelis, U., Auster, U., Bellucci, G., Best, A., Farnik, F., Formisano, V., Gough, P., Grard, R., Grushin, V., Haerendel, G., Ivchenko, V., Korepanov, V., Lehmann, H., Nikutowski, B., Nozdrachev, M., Orsini, S., Parrot, M., Petrukovich, A., Rauch, J. L., Sauer, K., Skalsky, A., Slominski, J., Trotignon, J. G., Vojta, J., and Wronowski, R. (1997). ASPI experiment: measurements of fields and waves on board the INTERBALL-1 spacecraft. *Ann. Geophys.*, **15**, 514–527.
- Klimov, S. I., Nozdrachev, M. N., Triska, P., Voita, I., and Galeev, A. A. (1986). Investigation of plasma waves with the BUDVAR combined wave diagnostics complex on Prognoz-10-Intercosmos. *Cosmic Res.*, **24**, 177–184.
- Labelle, J. and Treumann, R. A. (1988a). Current-driven lower hybrid waves at the inner edge of the ring current. *J. Geophys. Res.*, **93**, 2591–2598.

- Labelle, J. and Treumann, R. A. (1988b). Plasma waves at the dayside magnetopause. *Space Sci. Rev.*, **47**, 175.
- Landau, L. D. and Lifshitz, E. M. (1959). *Fluid mechanics*. Course of theoretical physics, Oxford: Pergamon Press, 1959.
- Lavraud, B., Fedorov, A., Budnik, E., Thomsen, M. F., Grigoriev, A., Cargill, P. J., Dunlop, M. W., Rème, H., Dandouras, I., and Balogh, A. (2005a). High-altitude cusp flow dependence on IMF orientation: A 3-year Cluster statistical study. *J. Geophys. Res.*, **110**, 2209–+.
- Lavraud, B., Rème, H., Dunlop, M. W., Bosqued, J.-M., Dandouras, I., Sauvaud, J.-A., Keiling, A., Phan, T. D., Lundin, R., Cargill, P. J., Escoubet, C. P., Carlson, C. W., McFadden, J. P., Parks, G. K., Moebius, E., Kistler, L. M., Amata, E., Bavassano-Cattaneo, M.-B., Korth, A., Klecker, B., and Balogh, A. (2005b). Cluster Observes the High-Altitude CUSP Region. *Surv. Geophys.*, **26**, 135–175.
- Le, G. and Russell, C. T. (1994). The thickness and structure of high beta magnetopause current layer. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2451–2454.
- Le, G., Blanco-Cano, X., Russell, C. T., Zhou, X.-W., Mozer, F., Trattner, K. J., Fuselier, S. A., and Anderson, B. J. (2001). Electromagnetic ion cyclotron waves in the high altitude cusp: Polar observations. *J. Geophys. Res.*, **106**, 19 067–19 080.
- Lundin, R. (1985). *Plasma composition and flow characteristics in the magnetospheric boundary layers connected to the polar cusp*, pages 9–32. The polar cusp. Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 1985, p. 9-32.
- Motschmann, U., Woodward, T. I., Glassmeier, K.-H., and Dunlop, M. W. (1995). Array Signal Processing Techniques. In K.-H. Glassmeier, U. Motschmann, and R. Schmidt, editors, *ESA SP-371: Proceedings of the Cluster Workshops, Data Analysis Tools and Physical Measurements and Mission-Oriented Theory*, pages 79–86.
- Motschmann, U., Woodward, T. I., Glassmeier, K. H., Southwood, D. J., and Pinçon, J. L. (1996). Wavelength and direction filtering by magnetic measurements at satellite arrays: Generalized minimum variance analysis. *J. Geophys. Res.*, **101**, 4961–4966.
- Mozer, F. S., Bale, S. D., and Phan, T. D. (2002). Evidence of Diffusion Regions at a Subsolar Magnetopause Crossing. *Phys. Rev. Lett.*, **89**(1), 015 002.
- Mozer, F. S., Bale, S. D., Phan, T. D., and Osborne, J. A. (2003). Observations of Electron Diffusion Regions at the Subsolar Magnetopause. *Physical Review Letters*, **91**(24), 245 002–+.
- Narita, Y., Glassmeier, K.-H., Fornaçon, K.-H., Richter, I., Schäfer, S., Motschmann, U., Dandouras, I., Rème, H., and Georgescu, E. (2006). Low-frequency wave characteristics in the upstream and downstream regime of the terrestrial bow shock. *J. Geophys. Res.*, **111**, 1203.
- Nykyri, K., Cargill, P. J., Lucek, E. A., Horbury, T. S., Balogh, A., Lavraud, B., Dandouras, I., and Rème, H. (2003). Ion cyclotron waves in the high altitude cusp: CLUSTER observations at varying spacecraft separations. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 12–1.

- Panov, E., Savin, S., Büchner, J., and Korth, A. (2007). Current Sheet Thickness of the Outer Boundary of the Earth's Magnetosphere as observed by CLUSTER. *Cosmic Res.*, **45**, 284–288.
- Panov, E. V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Khotyaintsev, Y., Nikutowski, B., Savin, S., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., and Rème, H. (2006a). CLUSTER spacecraft observation of a thin current sheet at the Earth's magnetopause. *Adv. Space Res.*, **37**, 1363–1372.
- Panov, E. V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Savin, S. P., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., and Rème, H. (2006b). CLUSTER observation of collisionless transport at the magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 15 109–+.
- Parker, E. N. (1958). Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *Astrophys. J.*, **128**, 664–676.
- Paschmann, G. and Daly, W. P. (1998). *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. ISSI Scientific Report SR-001*, Nordweek, The Netherlands, ESA Publications Division.
- Paschmann, G., Haerendel, G., Skopke, N., Rosenbauer, H., and Hedgecock, P. C. (1976). Plasma and magnetic field characteristics of the distant polar cusp near local noon - The entry layer. *J. Geophys. Res.*, **81**, 2883–2899.
- Paschmann, G., Baumjohann, W., Skopke, N., Sonnerup, B., and Papamastorakis, I. (1990). The magnetopause and boundary layer for small magnetic shear - Convection electric fields and reconnection. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1829–1832.
- Paschmann, G., Haaland, S., Sonnerup, B. U. Ö., Hasegawa, H., Georgescu, E., Klecker, B., Phan, T. D., Rème, H., and Vaivads, A. (2005). Characteristics of the near-tail dawn magnetopause and boundary layer. *Ann. Geophys.*, **23**, 1481–1497.
- Pedersen, A., Cattell, C. A., Mozer, F., Falthammar, C.-G., Lindqvist, P.-A., Formisano, V., and Torbert, R. (1984). Quasistatic electric field measurements with spherical double probes on the GEOS and ISEE satellites. *Space Sci. Rev.*, **37**, 269–312.
- Peredo, M., Slavin, J. A., Mazur, E., and Curtis, S. A. (1995). Three-dimensional position and shape of the bow shock and their variation with Alfvénic, sonic and magnetosonic Mach numbers and interplanetary magnetic field orientation. *J. Geophys. Res.*, **100**, 7907–7916.
- Phan, T., Frey, H. U., Frey, S., Peticolas, L., Fuselier, S., Carlson, C., Rème, H., Bosqued, J.-M., Balogh, A., Dunlop, M., Kistler, L., Mouikis, C., Dandouras, I., Sauvaud, J.-A., Mende, S., McFadden, J., Parks, G., Moebius, E., Klecker, B., Paschmann, G., Fujimoto, M., Petrinec, S., Marcucci, M. F., Korth, A., and Lundin, R. (2003). Simultaneous Cluster and IMAGE observations of cusp reconnection and auroral proton spot for northward IMF. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 16–1.
- Phan, T. D. and Paschmann, G. (1996). Low-latitude dayside magnetopause and boundary layer for high magnetic shear 1. Structure and motion. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7801–7816.
- Phan, T.-D., Paschmann, G., and Sonnerup, B. U. Ö. (1996). Low-latitude dayside magnetopause and boundary layer for high magnetic shear 2. Occurrence of magnetic reconnection. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7817–7828.

- Pincon, J. L. and Lefeuvre, F. (1991). Local characterization of homogeneous turbulence in a space plasma from simultaneous measurements of field components at several points in space. *J. Geophys. Res.*, **96**, 1789–1802.
- Reme, H., Bosqued, J. M., Sauvaud, J. A., Cros, A., Dandouras, J., Aoustin, C., Bouyssou, J., Camus, T., Cuvilo, J., Martz, C., Medale, J. L., Perrier, H., Romefort, D., Rouzaud, J., D'Uston, C., Mobius, E., Crocker, K., Granoff, M., Kistler, L. M., Popecki, M., Hovestadt, D., Klecker, B., Paschmann, G., Scholer, M., Carlson, C. W., Curtis, D. W., Lin, R. P., McFadden, J. P., Formisano, V., Amata, E., Bavassano-Cattaneo, M. B., Baldetti, P., Belluci, G., Bruno, R., Chionchio, G., di Lellis, A., Shelley, E. G., Ghielmetti, A. G., Lennartsson, W., Korth, A., Rosenbauer, H., Lundin, R., Olsen, S., Parks, G. K., McCarthy, M., and Balsiger, H. (1997). The Cluster Ion Spectrometry (cis) Experiment. *Space Sci. Rev.*, **79**, 303–350.
- Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J. M., Dandouras, I., Lavraud, B., Sauvaud, J. A., Barthe, A., Bouyssou, J., Camus, T., Coeur-Joly, O., Cros, A., Cuvilo, J., Ducay, F., Garbarowitz, Y., Medale, J. L., Penou, E., Perrier, H., Romefort, D., Rouzaud, J., Vallat, C., Alcaydé, D., Jacquy, C., Mazelle, C., D'Uston, C., Möbius, E., Kistler, L. M., Crocker, K., Granoff, M., Mouikis, C., Popecki, M., Vosbury, M., Klecker, B., Hovestadt, D., Kucharek, H., Kuenneth, E., Paschmann, G., Scholer, M., Sckopke, N., Seidenschwang, E., Carlson, C. W., Curtis, D. W., Ingraham, C., Lin, R. P., McFadden, J. P., Parks, G. K., Phan, T., Formisano, V., Amata, E., Bavassano-Cattaneo, M. B., Baldetti, P., Bruno, R., Chionchio, G., di Lellis, A., Marcucci, M. F., Pallochia, G., Korth, A., Daly, P. W., Graeve, B., Rosenbauer, H., Vasyliunas, V., McCarthy, M., Wilber, M., Eliasson, L., Lundin, R., Olsen, S., Shelley, E. G., Fuselier, S., Ghielmetti, A. G., Lennartsson, W., Escoubet, C. P., Balsiger, H., Friedel, R., Cao, J.-B., Kovrazhkin, R. A., Papamastorakis, I., Pellat, R., Scudder, J., and Sonnerup, B. (2001). First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.*, **19**, 1303–1354.
- Rosenbauer, H., Gruenwaldt, H., Montgomery, M. D., Paschmann, G., and Sckopke, N. (1975). Heos 2 plasma observations in the distant polar magnetosphere - The plasma mantle. *J. Geophys. Res.*, **80**, 2723–2737.
- Russell, C. T. (1971). Geophysical Coordinate Transformations. *Cosmic Electrodynamics*, **2**, 184–196.
- Russell, C. T. (2000). Polar Eyes the Cusp. In R. A. Harris, editor, *Cluster-II Workshop: Multiscale/Multipoint Plasma Measurements, Proceedings of the Workshop held at Imperial College, London, UK, 22-24 September 1999. Paris: European Space Agency (ESA), 2000, ESA-SP, vol. 449, ISBN: 9290927968, p.47*, pages 47–55.
- Russell, C. T. and Elphic, R. C. (1978). Initial ISEE magnetometer results - Magnetopause observations. *Space Sci. Rev.*, **22**, 681–715.
- Russell, C. T., Gosling, J. T., Zwickl, R. D., and Smith, E. J. (1983). Multiple spacecraft observations of interplanetary shocks ISEE three-dimensional plasma measurements. *J. Geophys. Res.*, **88**, 9941–9947.
- Russell, C. T., Petrinec, S. M., Zhang, T. L., Song, P., and Kawano, H. (1997). The effect of foreshock on the motion of the dayside magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1439–1442.

- Savin, S., Zelenyi, L., Romanov, S., Sandahl, I., Pickett, J., Amata, E., Avanov, L., Blecki, J., Budnik, E., Büchner, J., Cattell, C., Consolini, G., Fedder, J., Fuselier, S., Kawano, H., Klimov, S., Korepanov, V., Lagoutte, D., Marcucci, F., Mogilevsky, M., Nemecek, Z., Nikutowski, B., Nozdrachev, M., Parrot, M., Rauch, J., Romanov, V., Romantsova, T., Russell, C., Safrankova, J., Sauvaud, J., Skalsky, A., Smirnov, V., Stasiewicz, K., Trotignon, J., and Yermolaev, Y. (2004). Magnetosheath-cusp interface. *Ann. Geophys.*, **22**, 183–212.
- Savin, S., Skalsky, A., Zelenyi, L., Avanov, L., Borodkova, N., Klimov, S., Lutsenko, V., Panov, E., Romanov, S., Smirnov, V., Yermolaev, Y., Song, P., Amata, E., Consolini, G., Fritz, T. A., Buechner, J., Nikutowski, B., Blecki, J., Farrugia, C., Maynard, N., Pickett, J., Sauvaud, J. A., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Khotyaintsev, Y., and Stasiewicz, K. (2005a). Magnetosheath Interaction with the High Latitude Magnetopause. *Surv. Geophys.*, **26**, 95–133.
- Savin, S., Zelenyi, L., Amata, E., Buechner, J., Blecki, J., Greco, A., Klimov, S., Lopez, R. E., Nikutowski, B., Panov, E., Pickett, J., Rauch, J. L., Romanov, S., Song, P., Skalsky, A., Smirnov, V., Taktakishvili, A., Veltry, P., and Zimbardo, G. (2005b). Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause: Dynamic flow chaotization. *Planet. Space Sci.*, **53**, 133–140.
- Savin, S., Amata, E., Andre, M., Dunlop, M., Khotyaintsev, Y., Decreau, P. M. E., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Buechner, J., Nikutowski, B., Blecki, J., Skalsky, A., Romanov, S., Zelenyi, L., Buckley, A. M., Carozzi, T. D., Gough, M. P., Song, P., Reme, H., Volosevich, A., Alleyne, H., and Panov, E. (2006). Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 2. Hall dynamics, mass and momentum transfer. *Nonlin. Processes Geophys.*, **13**, 377–392.
- Savin, S. P., Romanov, S. A., Fedorov, A. O., Zelenyi, L., Klimov, S. I., Yermolaev, Y. I., Budnik, E. Y., Nikolaeva, N. S., Russell, C. T., Zhou, X.-W., Urquhart, A. L., and Reiff, P. H. (1998). The cusp/magnetosheath interface on May 29, 1996: Interball-1 and polar observations. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2963–2966.
- Savin, S. P., Zelenyi, L. M., Romanov, S. A., Klimov, S. I., Skalsky, A. A., Galeev, A. A., Smirnov, V. N., Nozdrachev, M. N., Yermolaev, Y. I., Avanov, L. A., Amata, É., Blecki, J., Buechner, J., Nikutowski, B., Dubinin, É. M., Nemecek, Z., Pedersen, A., Rauch, J. L., Rustenbach, J., Sauvaud, J. A., Song, P., and Stasiewicz, K. (2001). Turbulent Boundary Layer at the Border of Geomagnetic Trap. *J. Exper. Theor. Phys. Lett.*, **74**, 547–551.
- Scholer, M. and Treumann, R. A. (1997). The Low-Latitude Boundary Layer at the Flanks of the Magnetopause. *Space Sci. Rev.*, **80**, 341–367.
- Sibeck, D. G., Lopez, R. E., and Roelof, E. C. (1991). Solar wind control of the magnetopause shape, location, and motion. *J. Geophys. Res.*, **96**, 5489–5495.
- Silin, I. and Büchner, J. (2005). Small-scale reconnection due to lower-hybrid drift instability in current sheets with sheared fields. *Phys. Plasmas*, **12**, 2320.
- Song, P., Elphic, R. C., and Russell, C. T. (1988). ISEE 1 and 2 observation of the oscillating magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 744–747.

- Song, P., Russell, C. T., Fitzenreiter, R. J., Gosling, J. T., Thomsen, M. F., Mitchell, D. G., Fuselier, S. A., Parks, G. K., Anderson, R. R., and Hubert, D. (1993). Structure and properties of the subsolar magnetopause for northward interplanetary magnetic field - Multiple-instrument particle observations. *J. Geophys. Res.*, **98**, 11 319–+.
- Sonnerup, B. U. O. (1980). Theory of the low-latitude boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **85**, 2017–2026.
- Sonnerup, B. U. O. and Ledley, B. G. (1979). Ogo 5 magnetopause structure and classical reconnection. *J. Geophys. Res.*, **84**, 399–405.
- Sonnerup, B. U. O. and Scheible, M. (1998). Minimum and maximum variance analysis. in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data, ISSI SR-001*, edited by G. Paschmann and P. W. Daly, p. 1850, ESA Publ. Div., Noordwijk, Netherlands.
- Sonnerup, B. U. O., Papamastorakis, I., Paschmann, G., and Luehr, H. (1990). The magnetopause for large magnetic shear - Analysis of convection electric fields from AMPTE/IRM. *J. Geophys. Res.*, **95**, 10 541–10 557.
- Sonnerup, B. U. Ö., Haaland, S., Paschmann, G., Dunlop, M. W., Rème, H., and Balogh, A. (2006). Orientation and motion of a plasma discontinuity from single-spacecraft measurements: Generic residue analysis of Cluster data. *J. Geophys. Res.*, **111**, 5203–+.
- Sundkvist, D., Krasnoselskikh, V., Shukla, P. K., Vaivads, A., André, M., Buchert, S., and Rème, H. (2005a). In situ multi-satellite detection of coherent vortices as a manifestation of Alfvénic turbulence. *Nature*, **436**, 825–828.
- Sundkvist, D., Vaivads, A., André, M., Wahlund, J.-E., Hobara, Y., Joko, S., Krasnoselskikh, V. V., Bogdanova, Y. V., Buchert, S. C., Cornilleau-Wehrlin, N., Fazakerley, A., Hall, J.-O., Rème, H., and Stenberg, G. (2005b). Multi-spacecraft determination of wave characteristics near the proton gyrofrequency in high-altitude cusp. *Ann. Geophys.*, **23**, 983–995.
- Tanaka, M. and Sato, T. (1981). Simulations on lower hybrid drift instability and anomalous resistivity in the magnetic neutral sheet. *J. Geophys. Res.*, **86**, 5541–5552.
- Tsurutani, B. T. and Thorne, R. M. (1982). Diffusion processes in the magnetopause boundary layer. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 1247–1250.
- Tsurutani, B. T., Smith, E. J., Thorne, R. M., Russell, C. T., Anderson, R. R., Gurnett, D. A., Parks, G. K., and Lin, C. S. (1981). Wave-particle interactions at the magnetopause - Contributions to the dayside aurora. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 183–186.
- Tsyganenko, N. A. (1987). Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels. *Planet. Space Sci.*, **35**, 1347–1358.
- Vaisberg, O. L., Galeev, A. A., Zelenyi, L. M., Zastenker, G. N., Omelchenko, A. N., Klimov, S. I., Savin, S. P., Yermolaev, Y. I., Smirnov, V. N., and Nozdrachev, M. N. (1983). The fine structure of the magnetopause according to Prognoz-7 and Prognoz-8 satellite measurements. *Cosm. Res.*, **21**, 57–63.

- Vaivads, A., André, M., Buchert, S. C., Wahlund, J.-E., Fazakerley, A. N., and Cornilleau-Wehrlin, N. (2004a). Cluster observations of lower hybrid turbulence within thin layers at the magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, 3804.
- Vaivads, A., Khotyaintsev, Y., André, M., Retinò, A., Buchert, S. C., Rogers, B. N., Décréau, P., Paschmann, G., and Phan, T. D. (2004b). Structure of the Magnetic Reconnection Diffusion Region from Four-Spacecraft Observations. *Phys. Rev. Lett.*, **93**(10), 105 001.
- Zwan, B. J. and Wolf, R. A. (1976). Depletion of solar wind plasma near a planetary boundary. *J. Geophys. Res.*, **81**, 1636–1648.

Список публикаций

Результаты данной работы опубликованы в международных реферируемых журналах:

Panov, E.V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Khotyaintsev, Y., Nikutowski, B., Savin, S.P., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. CLUSTER spacecraft observation of a thin current sheet at the Earth's magnetopause. *Adv. Space Res.* (2005), V. 37, PP. 1363-1372, doi:10.1016/j.asr.2005.08.024.

Panov, E.V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Savin, S.P., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. CLUSTER observation of collisionless transport at the magnetopause. *Geophys. Res. Lett.* (2006), V. 33, P. L15109, doi:10.1029/2006GL026556.

Panov, E.V., Savin, S.P., Büchner, J., Korth, A. Current Sheet Thickness of the Outer Boundary of the Magnetosphere as Observed by Four CLUSTER Satellites. *Cosm. Res.* (2007), V.45, P. 268-272, doi:10.1134/S0010952507030136.

Panov, E.V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Savin, S.P., Rème, H., Fornaçon, K.-H. The non-cusp Earth's magnetopause observed by CLUSTER. *J. Geophys. Res.* (2007), *in press*.

а так же представлены на международных научных конференциях:

Panov, E.V., Büchner, J., Korth, A., Fränz, M., Nikutowski, B., Savin, S., Balogh, A., Rème, H., Andre, M. Turbulence at the Earth's magnetopause, (доклад) Summer school "Analysis techniques for turbulent plasmas", Калабрия, Италия (2004)

Panov, E.V., Büchner, J., Korth, A., Fränz, M., Nikutowski, B., Glaßmeier, K.-H. CLUSTER observations of thin current sheets at the Earth's magnetopause, (постер) Deutsche Physikalische Gesellschaft, Берлин, Германия (2005)

Panov, E.V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Nikutowski, B., Savin, S., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. CLUSTER observation of lower-hybrid drift waves at the magnetopause in magnetic field fluctuations. (постер) European Geosciences Union General Assembly, Вена, Австрия (2005)

Panov, E.V., Büchner, J., Korth, A., Fränz, M., Savin, S., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. Cluster observations of current sheets at the Earth's magnetopause, (постер) Deutsche Physikalische Gesellschaft, Хайдельберг, Германия (2006)

Panov, E.V., Büchner, J., Korth, A., Fränz, M., Savin, S., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. Macroscopic properties of the current sheets at the high-latitude Earth's magnetopause, (постер) 36th COSPAR Scientific Assembly, Пекин, Китай (2006)

Panov, E.V., Büchner, J., Korth, A., Fränz, M., Savin, S., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. Magnetopause transport due to electromagnetic plasma waves near the ion-cyclotron frequency, (доклад) 36th COSPAR Scientific Assembly, Пекин, Китай (2006)

Автор диссертации принимал участие в следующих работах на другие темы:

Panov, E.V., Amossov, S.A. Estimation of the guarantee fund sufficiency for the derivatives exchange, *Derivatives Use, Trading & Regulation* (2005) V. 10, PP. 361-372.

Savin, S., Zelenyi, L., Amata, E., Buechner, J., Blecki, J., Greco, A., Klimov, S., Lopez, R.E., Nikutowski, B., Panov, E.V., Pickett, J., Rauch, J.L., Romanov, S., Song, P., Skalsky, A., Smirnov, V., Taktakishvili, A., Veltry, P., Zimbardo, G. Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause: Dynamic flow chaotization *Pl. Space Sci.* (2005) V. 53, P. 133-140, doi. 10.1016/j.pss.2004.09.037

Savin, S., Skalsky, A., Zelenyi, L., Avanov, L., Borodkova, N., Klimov, S., Lutsenko, V., Panov, E.V., Romanov, S., Smirnov, V., Yermolaev, Y., Song, P., Amata, E., Consolini, G., Fritz, T.A., Buechner, J., Nikutowski, B., Blecki, J., Farrugia, C., Maynard, N., Pickett, J., Sauvaud, J.A., Rauch, J.L., Trotignon, J.G., Khotyaintsev, Y., Stasiewicz, K. Magnetosheath Interaction with the High Latitude Magnetopause *Surv. Geophys.* (2005) V. 26, P. 95-133, doi. 10.1007/s10712-005-1874-4

Savin, S., Amata, E., Andre, M., Dunlop, M., Khotyaintsev, Y., Decreau, P.M.E., Rauch, J.L., Trotignon, J.G., Buechner, J., Nikutowski, B., Blecki, J., Skalsky, A., Romanov, S., Zelenyi, L., Buckley, A.M., Carozzi, T.D., Gough, M.P., Song, P., Reme, H., Volosevich, A., Alleyne, H., Panov, E.V. Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 2. Hall dynamics, mass and momentum transfer. *Nonlin. Process. Geophys.* (2006) V. 13, P. 377-392.

Kuznetsov, E.A., Savin, S.P., Amata, E., Dunlop, M., Khotyaintsev, Y., Zelenyi, L.M., Panov, E.V., Buechner, J., Romanov, S.A., Blecki, J., Rauch, J.L., Nikutowski, B. Strong space plasma magnetic barriers and Alfvénic collapse *J. Exp. Theor. Phys. Lett.* (2007), V.85, P. 288-293.

Благодарности

Автор диссертации глубоко признателен сообществу им. Макса Планка за финансовую поддержку во время работы над диссертацией. Хотелось бы сказать огромное спасибо отделу аспирантуры ИКИ РАН в лице Светланы Евгеньевны Громовой и Ольги Михайловны Образцовой, а так же Дитеру Шмитту (Dieter Schmitt) – руководителю научно-исследовательской школы при Институте изучения Солнечной системы им. Макса Планка за быстрое и четкое решение всех формальных вопросов.

Выражаю благодарность группе FGM в лице Карла-Хайнца Форнасона (Karl-Heinz Fornacon) и Карла-Хайнца Глассмейера (Karl-Heinz Glaßmeier), группе CIS в лице Энри Рема (Henry Rème) и Янниса Дандураса (Iannis Dandouras) и группе EFW в лице Юрия Хотянцева и Андриса Вайвадса (Andris Vaivads) за предоставленную возможность работы с данными КЛАСТЕР, а так же Маркусу Фрэнцу (Markus Fränz), Акселу Корту (Axel Korth), Бернду Никутовски (Bernd Nikutowski).

Выражаю благодарность Виктору Андреевичу Сергееву, Владимиру Семеновичу Семенову и Елизавете Евгеньевне Антоновой за внимание, оказанное к результатам диссертации.

В высшей степени хотелось бы поблагодарить официальных оппонентов Виктора Львовича Красовского и Игоря Ивановича Алексева, а так же ведущую организацию в лице Анатолия Ефимовича Левитина и Владимира Дмитриевича Кузнецова за аккуратное чтение и взвешенную критику к диссертации, и, особенно, научных руководителей – Сергея Петровича Савина и Йорга Бюхнера (Jörg Büchner), а так же директора ИКИ РАН Льва Матвеевича Зеленого за оказанную мне честь, доверив работу по теме диссертации.

За постоянную поддержку во время написания диссертации адресую самые теплые слова благодарности моей семье.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Copyright ©Copernicus GmbH 2007
ISBN 978-3-936586-71-8
Copernicus GmbH, Katlenburg-Lindau
Druck: Schaltungsdienst Lange. Berlin
Printed in Germany