

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра ФИЗИКИ КОСМОСА

на правах рукописи

Пулинец Мария Сергеевна

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В МАГНИТОСЛОЕ И БАЛАНС ДАВЛЕНИЙ НА
ДНЕВНОЙ МАГНИТОПАУЗЕ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
проф., д.ф.м.н. Антонова Е.Е.

Москва, 2016

Содержание

	стр.
Введение	4
Глава 1.	11
Результаты исследований магнитослоя и предсказания геомагнитной активности	
1.1. Характеристики магнитослоя	11
1.2. Обтекание солнечным ветром магнитосферы Земли	14
1.3. Связь геомагнитной активности с условиями в солнечном ветре	22
1.4. Условия в магнитослое и баланс давлений на магнитопаузе	28
1.5. Пятиспутниковый проект THEMIS	33
1.6. Выводы к первой главе и обзор содержания работы	34
Глава 2.	37
Корреляция параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитопаузы и в солнечном ветре перед ударной волной	
2.1. Методика анализа данных	37
2.2. Зависимости компонент магнитного поля перед магнитопаузой от соответствующих величин в солнечном ветре	44
2.3. Уровень флюктуаций в случае квазипараллельных и квазиперпендикулярных ударных волн	55
2.4. Выводы ко второй главе	58
Глава 3.	60
Баланс давлений на границах магнитопаузы в спокойной геомагнитной обстановке и во время магнитных бурь	
3.1. Баланс давлений на магнитопаузе при турбулентном магнитослое в спокойной геомагнитной обстановке	60
3.2. Баланс давлений на магнитопаузе во время магнитных бурь на примере магнитной бури 20 февраля 2014	75

3.3. Магнитная буря 14 ноября 2012 г.	88
3.4. Статистическое сравнение пересечений магнитопаузы в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях	97
3.5. Выводы к третьей главе	98
Заключение	100
Список литературы	103

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена изучению характеристик плазмы и магнитного поля на границе магнитосферы Земли и анализу баланса давлений на земной магнитопаузе.

Актуальность темы

Актуальность работы обусловлена фундаментальным и прикладным значениями проблемы формирования параметров плазмы и магнитного поля на границе магнитосферы.

Магнитосфера Земли и солнечный ветер являются космическими лабораториями, в которых возможно исследование плазменных процессов без внесения существенных возмущений в измеряемые параметры, что часто не удается сделать в лабораторных условиях. Исследования магнитосферы за последние годы приобрели особую актуальность, так как возникла задача предсказания космической погоды. Для успешного предсказания космической погоды необходимо выделение основных процессов, приводящих к геомагнитной активности и определение основных параметров, используемых при моделировании магнитосферы. Обычно, при создании моделей, направленных на предсказание космической погоды, используются непосредственные наблюдения Солнца и солнечной активности (за время $\sim 1\text{-}2$ суток) и измерения в солнечном ветре (за время \sim часа) до начала возмущений. Точность предсказаний, при этом, сильно варьируется от события к событию, что, как правило, не удается объяснить. При этом необходимо учитывать, что характеристики солнечного ветра претерпевают существенные изменения при переходе через бесстолкновительную ударную волну. Между ударной волной и магнитопаузой (последняя обычно считается внешней границей собственно магнитосферы) находится магнитослой. Характеристики магнитослоя и его турбулентности стали активно изучаться только последние несколько лет, что привело к пересмотру многих устоявшихся понятий. Изучение магнитослоя особенно актуально, так как параметры плазмы и магнитного поля в данной области формируют внешнее граничное условие для магнитосферы в целом. Отсутствие информации в данной области крайне затрудняет изучение влияния разных факторов на магнитосферную динамику. Необходимо отметить, что в настоящее время не получено решение даже такого основного вопроса как поддержание баланса давлений на магнитопаузе, что необходимо для анализа проникновения плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы и частиц магнитосферы в магнитослой, распределения токов на магнитопаузе и в магнитосфере, в решении целого ряда других проблем. Поэтому изучение магнитослоя и

баланса давлений на магнитопаузе входит в число основных направлений изучения магнитосферной динамики.

Цель и задачи работы

Целью работы является исследование зависимости магнитного поля вблизи подсолнечной точки дневной магнитопаузы от магнитного поля перед ударной волной и условий баланса давлений на дневной магнитопаузе в магнитосфере Земли.

В процессе исследования решались следующие задачи:

- Выделение участков траекторий спутников международного эксперимента THEMIS, на которых спутники пересекали дневную магнитопаузу, путем анализа данных наблюдений низкочастотных компонент магнитного поля и параметров плазмы.
- Получение статистических зависимостей компонент магнитного поля перед магнитопаузой от соответствующих компонент магнитного поля и часового угла непосредственно перед ударной волной и форшоком. Получение количественных характеристик указанных зависимостей при различных временах усреднения, не превышающих время распространения солнечного ветра от ударной волны до магнитопаузы.
- Демонстрация существования нерегулярных флюктуаций поля в подсолнечной точке магнитослоя у магнитопаузы, сравнительно плохо коррелирующих с магнитным полем в солнечном ветре перед ударной волной.
- Выявление особенностей соблюдения условия баланса давлений на границах магнитопаузы при магнитоспокойных и магнитовозмущенных условиях.

Основные положения, выносимые на защиту

- Существуют зависимости компонент магнитного поля и часового угла у магнитопаузы от соответствующих величин в солнечном ветре перед ударной волной при различных временах усреднения, не превышающих время распространения солнечного ветра от ударной волны до магнитопаузы. Определены характеристики выявленных зависимостей.
- Дисбаланс давлений на границах магнитопаузы в случае сравнения одновременных данных с двух спутников, находящихся один на внешней, другой - на внутренней границах магнитопаузы, как правило, невелик по сравнению с дисбалансом, полученным по данным пролета одного спутника, что свидетельствует о

быстрых изменениях параметров плазмы вблизи подсолнечной магнитопаузы.

- Статистические усредненные условия баланса давлений на магнитопаузе во время магнитных бурь отличаются от условий баланса в магнитоспокойный период. В магнитоспокойные периоды основной вклад в баланс давлений на магнитопаузе вносят давление ионов магнитослоя со стороны магнитослоя и магнитное давление со стороны магнитосферы. Во время исследованных бурь значительный вклад в интегральное давление магнитослоя вносит магнитное давление.
- Дисбаланс давлений на границах магнитопаузы сильно варьирует от события к событию и в среднем возрастает с ростом геомагнитной активности.

Научная новизна исследования заключается в том, что в ходе работы:

- Впервые проведен корреляционный анализ зависимости компонент магнитного поля непосредственно у магнитопаузы от компонент магнитного поля в солнечном ветре перед ударной волной и форшоком.
- Впервые получены статистически значимые зависимости величин магнитного поля перед магнитопаузой от соответствующих величин перед ударной волной.
- Показано, что знак B_z компоненты магнитного поля перед магнитопаузой может быть противоположен знаку B_z в солнечном ветре в ~30% случаев, что имеет существенное значение для решения задач предсказания космической погоды.
- Впервые проведен анализ баланса давлений на магнитопаузе во время магнитных бурь и сравнение условий баланса во время магнитных бурь и в магнитоспокойное время.

Практическая ценность результатов

Практическая значимость работы состоит в получении количественной информации о коэффициентах корреляции компонент магнитного поля перед ударной волной и магнитопаузой, необходимой для оценки достоверности предсказаний космической погоды.

Личный вклад диссертанта:

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором самостоятельно при консультациях с научным руководителем. Автором работы проведен отбор и анализ данных спутниковых наблюдений проекта THEMIS. Автором был самостоятельно поставлен и решен ряд задач по определению параметров магнитного поля перед ударной волной и у

магнитопаузы, впервые проведено исследование баланса давлений во время магнитных бурь.

Роль автора в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющей.

Достоверность и обоснованность изложенных в работе результатов обеспечивается использованием высокоточных экспериментальных данных эксперимента THEMIS. Результаты статистических исследований изменений компонент магнитного поля перед магнитопаузой по сравнению с компонентами поля в солнечном ветре были получены в ходе анализа 100 пересечений магнитопаузы. Результаты анализа изменений давления при буревых пересечениях магнитопаузы были получены в ходе тщательного анализа пересечений магнитопаузы во время 16 магнитных бурь за весь период эксперимента. Полученные результаты в магнитоспокойных условиях не противоречат литературным данным там, где такие данные встречаются.

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, были доложены автором лично на следующих конференциях как внутри страны, так и за рубежом:

26th IUGG General Assembly 2015, Prague, Чехия, 22 июня - 2 июля 2015;

10-я Ежегодная Конференция "Физика плазмы в солнечной системе, Москва, Институт космических исследований РАН, Россия, 16-20 февраля 2015;

40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, Россия, 2014;

9-я Ежегодная Конференция "Физика плазмы в солнечной системе, Москва, Институт космических исследований РАН, Россия, 2014;

12th Scientific Assembly International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA -2013 meeting), Merida, Mexico, August 26-31, Мексика, 2013;

8-я Ежегодная Конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», 4 - 8 февраля 2013 г., Москва, ИКИ РАН, Россия, 2013;

и др. а также на семинарах и конференциях Ломоносовские чтения в НИИЯФ МГУ.

Результаты опубликованы в 6 статьях в российских и зарубежных журналах, в 8 трудах конференций, представлены в 15 тезисах различных конференций.

Список работ автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях и главы в монографиях:

1. Пулинец М.С., М.О. Рязанцева, Е.Е. Антонова, and И.П. Кирпичев. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS. *Геомагнетизм и аэрономия*, 52(6):769–778, 2012. [DOI: 10.1134/S0016793212060084]
2. Pulinets M.S., E.E. Antonova, M.O. Riazantseva, S.S. Znatkova, and I.P. Kirpichev. Comparison of the magnetic field before the subsolar magnetopause with the magnetic field in the solar wind before the bow shock. *Advances in Space Research*, 54(4):604–616, 2014. [DOI: 10.1016/j.asr.2014.04.023].
3. Antonova E.E., I.P. Kirpichev, V.V. Vovchenko, M.V. Stepanova, M.O. Riazantseva, M.S. Pulinets, I.L. Ovchinnikov, and S.S. Znatkova. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances \sim 7–10Re, and magnetospheric current systems. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 99(07):85–91, 2013. [DOI: 10.1016/j.jastp.2012.08.013].
4. Антонова Е.Е., И.П. Кирпичев, М.О. Рязанцева, Б.В. Марьин, М.С. Пулинец, С.С. Знаткова, and М.В. Степанова. Магнитосферная суббуря и дискретные дуги полярного сияния. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия*, (6):31–38, 2012. [DOI:10.3103/S0027134912060033].
5. Знаткова С.С., Е.Е. Антонова, М.С. Пулинец, and И.П. Кирпичев. Определение толщины низкоширотного погранслоя в магнитосфере Земли, *Геомагнетизм и аэрономия*, 53(6):745–756, 2013. [DOI: 0.7868/S0016794013060175].
6. Знаткова С.С., Е.Е. Антонова, М.С. Пулинец, И.П. Кирпичев, и М.О. Рязанцева. Толщина низкоширотного погранслоя при разных уровнях флюктуаций магнитного поля в магнитослое. *Геомагнетизм и аэрономия*, 55(5):598–607, 2015. [DOI: 10.7868/S0016794015050211].

Опубликованные доклады:

1. Pulinets M.S., M.O. Riazantseva, E.E. Antonova, and I.P. Kirpichev. The characteristics of plasma and magnetic field at the subsolar magnetopause in accordancece with data of THEMIS mission. In *proceedings of 9th International Conference Problems of Geocosmos*, pages 365–370. St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, 2012.

2. Pulinets M.S., M.O. Riazantseva, E.E. Antonova, and I.P. Kirpichev. Magnetic field parameters near the subsolar magnetopause in accordance with THEMIS data. In *proceedings of XXXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena"*, pages 45–48. Apatity, Russia, 2012.
3. Pulinets M.S., M.O. Riazantseva, E.E. Antonova, I.P. Kirpichev, G.N. Zastenker, S.S. Znatkova, and M.V. Stepanova. Magnetopause pressure balance at the subsolar point in accordance with data of THEMIS mission: Event July 22 2007. In *Proceedings of the 8th International Conference "PROBLEMS OF GEOCOSMOS"*, Editor: V.S. Semenov, pages 217–222. St. Petersburg, Petrodvorets, 2010.
4. Pulinets M.S., M.O. Riazantseva, E.E. Antonova, and I.P. Kirpichev. The dependence of the magnetic field near the subsolar magnetopause on IMF in accordance with THEMIS data. In *WDS'11 Proceedings of Contributed Papers: Part II - Physics of Plasmas and Ionized Media* (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), volume 2, pages 45–51. Matfyzpress Prague (ISBN 978-80-7378-185-9), 2011.
5. Antonova E.E., I.P. Kirpichev, I.A. Kornilov, T.A. Kornilova, K.G. Orlova, I.L. Ovchinnikov, and S.S. Pulinets. Features of high latitude magnetospheric topology and magnetospheric substorms. In *Proceedings of the 32nd Annual seminar "Physics of auroral phenomena"*, 3-6 March 2009, pages 9–16, 2009.
6. Antonova E.E., I.P. Kirpichev, V.V. Vovchenko, M.O. Riazantseva, M.S. Pulinets, I.L. Ovchinnikov, S.S. Znatkova, and M.V. Stepanova. Magnetospheric storms and substorms, nature and topology of high latitude current systems. In *proceedings of XXXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena"*, pages 9–16. Apatity, Russia, 2012.
7. Antonova E.E., M.V. Stepanova, Yu.I. Yermolaev, D. Paredes-Davis, S.S. Rossolenko, I.P. Kirpichev, I.L. Ovchinnikov, K.G. Orlova, and M.S. Pulinets. Turbulence in the magnetosphere of the Earth, results of theoretical analysis and Interball observations. In *Proceedings of the International Conference "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence" (MSS-09)* 23-25 November 2009, pages 346–351. Space Research Institute of RAS Moscow, 2009.
8. Antonova E.E., V.G. Vorobjev, I.P. Kirpichev, O.I. Yagodkina, V.V. Vovchenko, M.O. Riazantseva, I.A. Kornilov, T.A. Kornilova, O.V. Kozyreva, S.S. Znatkova, M.S. Pulinets, and M.V. Stepanova. High latitude continuation of the ordinary ring current and auroral structures. In *Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos"*, pages 199–204. St. Petersburg, 2014.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 113 страниц, 57 рисунков, 2 таблицы. Список литературы содержит 121 наименование.

Глава 1.

Результаты исследований магнитослоя и предсказания геомагнитной активности

1.1. Характеристики магнитослоя

Основной особенностью обтекания магнитосферы Земли плазмой солнечного ветра является формирование бесстолкновительной ударной волны (см. монографию Плазменная гелиофизика, 2008). На ударной волне происходит сжатие и торможение плазмы солнечного ветра. Плазма нагревается и происходит поворот течения плазмы. Характерной особенностью течения плазмы за бесстолкновительной ударной волной является высокий уровень флюктуаций потока и магнитного поля. Область между ударной волной и границей магнитосферы называется переходным слоем или магнитослоем (по старой терминологии магнитошисом), а граница магнитосферы магнитопаузой. Толщина магнитослоя в подсолнечной точке составляет порядка 3 радиусов Земли и может сильно меняться в зависимости от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Первые же результаты исследований в магнитослое за магнитопаузой показали высокий уровень флюктуаций магнитного поля [Sonett et al., 1960; Coleman et al., 1960; Cahill and Amazeen, 1963; Freeman, 1964; Wolfe and Silva, 1965; Wolfe et al., 1966; Gosling et al., 1967, etc.]. В обзоре Савин и Шабанский [Модель Космоса, 1968, под ред. С.Н. Вернова, § 3. Переходная область и граница магнитосферы] на стр. 33 отмечалось, что «основной особенностью магнитного поля в переходной области оказались сильные флюктуации поля по величине и направлению». Магнитослой является чрезвычайно активной областью, наполненной различными волновыми модами, свойства которых содержат информацию о набегающем потоке солнечного ветра и которые ответственны за перенос и перераспределение энергии и импульса внутри магнитослоя (Плазменная гелиофизика, 2008). Вариации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое могут достигать значительных величин и наблюдаются в широком диапазоне временных масштабов ([Sibeck et al., 1999; Застенкер, 2008]). Уже первые результаты анализа спектров флюктуаций магнитного поля в магнитослое (см. [Fairfield and Ness, 1970] и ссылки в данной работе) показали, что наблюдаемые спектры флюктуаций сильно варьируют от события к событию (в работе [Fairfield and Ness, 1970] проводилось усреднение по получасовому интервалу только для событий, когда усредненное поле почти не менялось). В качестве источника флюктуаций рассматривались усиление за ударной волной флюктуаций солнечного ветра, раскачка волн на ударной волне и магнитопаузе и генерация внутри магнитослоя. Было показано, что в большинстве случаев

спектр флюктуаций имеет степенную форму с показателем степени в диапазоне 1-3. Возникло представление о турбулентном магнитослое – области, где существуют флюктуации с уровнем, превышающим тепловые, и фазы флюктуаций случайны. Последующие исследования подтвердили практически постоянное существование высокого уровня флюктуаций магнитного поля и потока плазмы в магнитослое (см., например, Shevrev and Zastenker [2005], Savin et al. [2005, 2008], Вайсберг и др. [2008], Borovsky [2009], Россоленко и др. [2008], Знаткова и др. [2011]). На Рис. 1 из работы Россоленко и др. [2008] показан пример наблюдений параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое по данным спутника Geotail 2 марта 1996 г. Наблюдался высокий уровень флюктуаций магнитного поля при сравнительно невысоком уровне вариаций скорости и плотности плазмы. Особый вклад в изучение турбулентности магнитослоя внесли результаты четырехспутникового проекта CLUSTER, в ходе реализации которого удалось определить многие характеристики магнитослоя (см. обзор Lucek et al. [2005]). Была определена корреляционная длина флюктуаций магнитного поля в магнитослое, составляющая согласно Gutynska et al. [2008] порядка радиуса Земли R_E . Подчеркивалось, что уровень флюктуаций в магнитослое соответствует режиму сильной турбулентности. Турбулентность магнитослоя формируется как под действием турбулентности солнечного ветра, так и в результате развития процессов на околоземной ударной волне, внутри магнитослоя и вблизи магнитопаузы. Для турбулентности магнитослоя характерна перемежаемость (области с высоким уровнем флюктуаций могут соседствовать с областями регулярного течения). Последние результаты исследований турбулентности магнитослоя и их сравнение с турбулентностью в лабораторной плазме содержатся в обзоре [Budaev, Zelenyi, Savin, 2015].

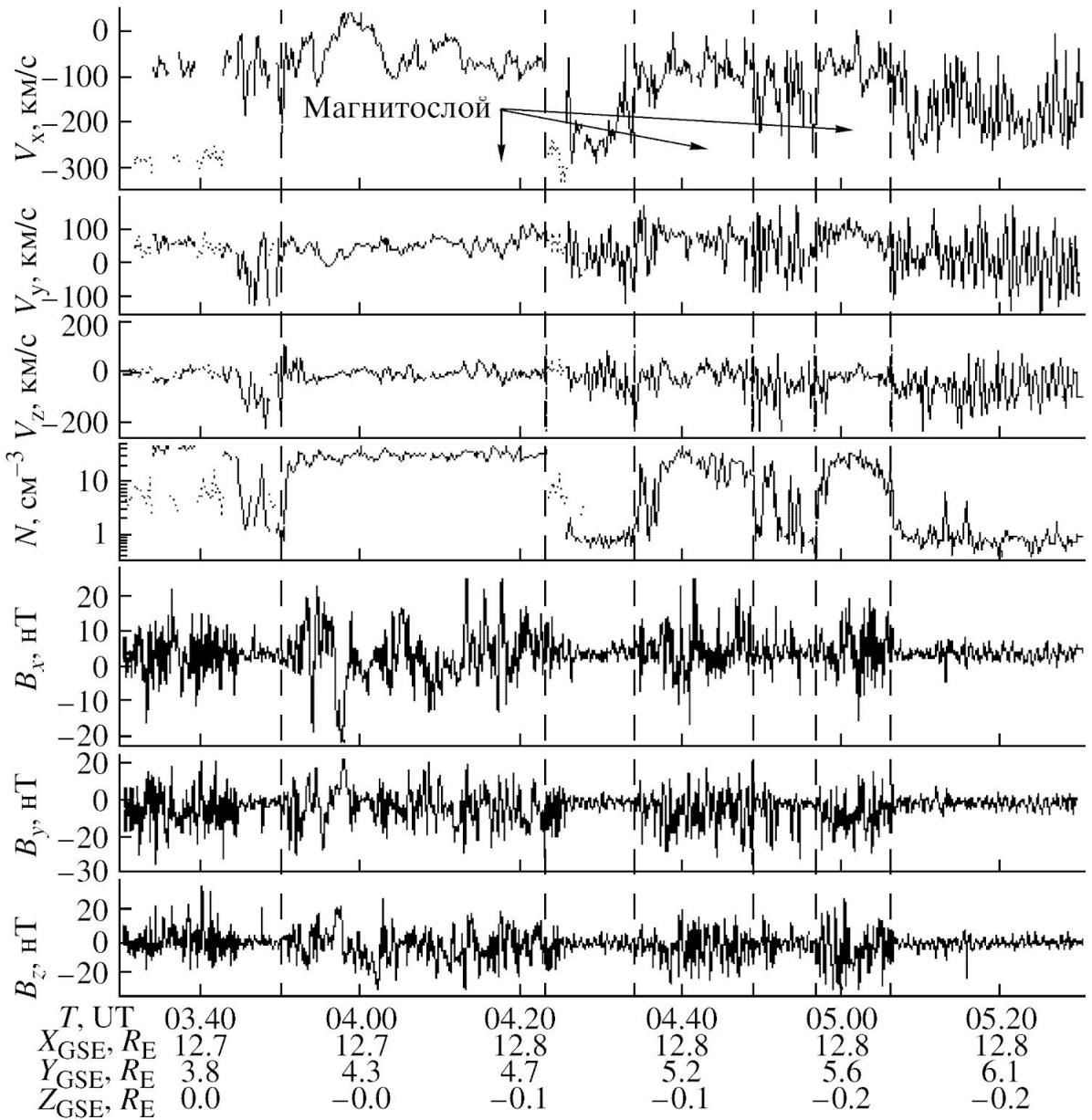


Рис. 1.1. Результаты измерений параметров плазмы и магнитного поля на спутнике *Geotail* из работы Россоленко и др. [2008].

В работе Россоленко и др. [2008] было показано, что амплитуда флюктуаций магнитного поля в магнитослое сравнима с величиной магнитного поля внутри магнитосферы. Поэтому существование таких флюктуаций необходимо учитывать при рассмотрении процессов формирования магнитопаузы и проникновения плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы. Необходимо отметить, что, несмотря на длительный период исследований магнитослоя, флюктуации магнитослоя не были должным образом исследованы в связи с решением задачи о природе геомагнитной активности, так как долгое

время доминировала точка зрения о возможности описания геомагнитной активности в рамках модели ламинарного течения (см. ниже).

Турбулизация магнитослоя наряду с проникновением в магнитослой турбулентных флюктуаций из солнечного ветра связана с возникновением больших флюктуаций поля за бесстолкновительной ударной волной и развитием неустойчивостей внутри магнитослоя. При этом наиболее изучены анизотропные (зеркальная и ионно-циклотронная) неустойчивости [Gary, 1992; Gary et al. 1993, 1994; Anderson and Fuselier, 1993, 1994; McKean et al., 1994; Pokhotelov et al., 2002, 2004, 2008; Soucek et al., 2008; Balikhin et al., 2009], обусловленные анизотропией функций распределения частиц. При малых значениях плазменного параметра $\beta=2\mu_0 p/B^2$ (где p – давление плазмы, B – модуль магнитного поля) преимущественно наблюдается развитие ионно-циклотронной неустойчивости (генерация поперечных флюктуаций), при больших β – зеркальной неустойчивости (генерация продольных флюктуаций) [Anderson et al., 1993, 1994].

1.2. Обтекание солнечным ветром магнитосферы Земли

При анализе влияния солнечного ветра (СВ) на геомагнитную активность используются измерения параметров межпланетного магнитного поля (ММП) на спутниках, находящихся в солнечном ветре (Wind, ACE и др.). Однако магнитосфера Земли взаимодействует не с плазмой солнечного ветра, а с плазмой магнитослоя, характерной особенностью которого является высокий уровень турбулентности (см. 1.1). Наиболее популярные теории взаимодействия магнитосферы Земли с солнечным ветром исходят из предположения о ламинарном характере течения при соблюдении условия вмороженности, нарушаемом только в точках или линиях пересоединения. Основной схемой процессов, объясняющей влияние ММП на геомагнитную активность, является концепция Dungey [1961]. Схема предложенной модели показана на рис. 1.2.1 а). Данная точка зрения (см рис. 1.2.1 б) из работы [Hasegawa et al., 2010]) поддерживается до настоящего времени, несмотря на результаты наблюдений в магнитослое. Необходимо отметить, что показанная на Рис. 2 схема не включает околоземную ударную волну и предполагает ламинарное течение плазмы вокруг магнитосферы.

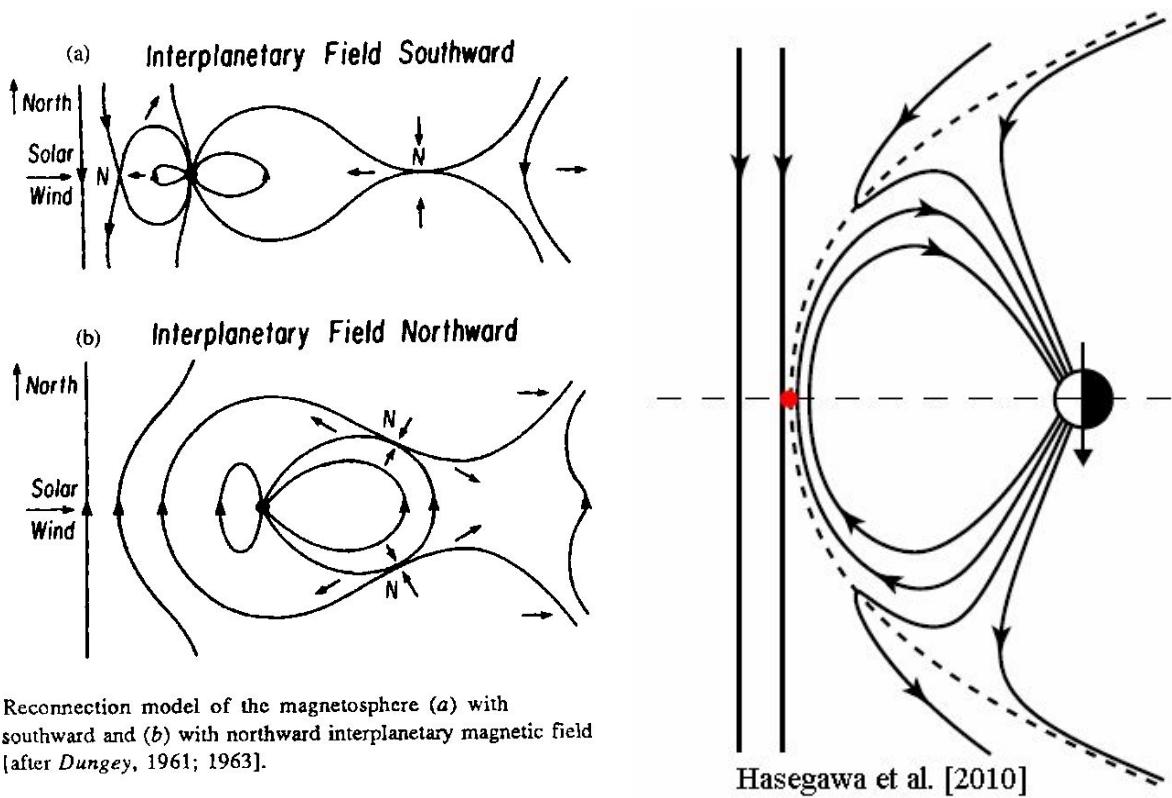
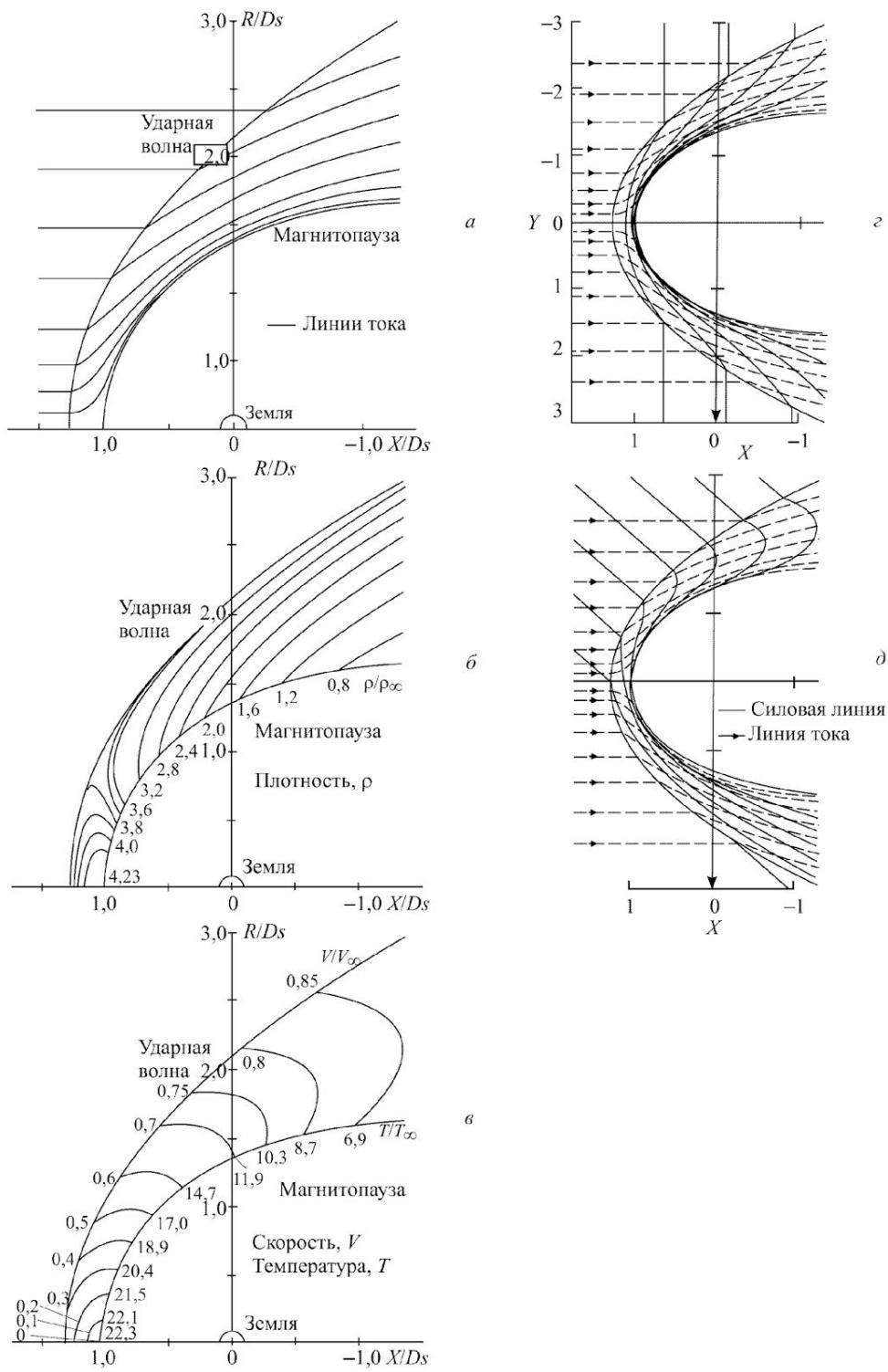


Рис. 1.2.1 а) иллюстрация к концепции Dungey, представленная в его статьях, вверху схема модели пересоединения для южного направления ММП, внизу – для северного, б) иллюстрация в современной статье [Hasegawa et al., 2010], использующая модель Dungey.

Концепция Dungey предлагала простое объяснение течения плазмы в полярной шапке в антисолнечном направлении и зависимость геомагнитной активности от направления магнитного поля в солнечном ветре, что обусловило ее популярность, несмотря на то, что картина поведения параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое явно отличается от картины распределения поля и плазмы вблизи магнитопаузы (см. 1.1.), постулируемой в моделях пересоединения на магнитопаузе. Необходимо заметить, что сам Dungey не был уверен в справедливости показанной на рис. 2 картины конвекции и в работе [Dungey, 1962] писал, рассматривая трудности разрабатываемой теории: «A further difficulty is that **the flow is probably turbulent**, particularly in the "wake" of the earth, and both Pioneer I and Explorer I observations show clear indications of some hydromagnetic form of turbulence».

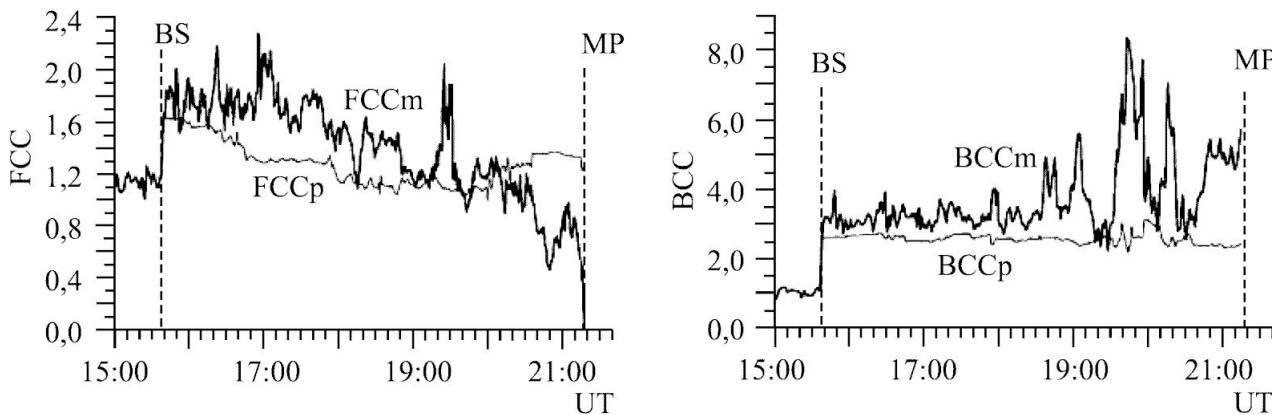
Первой магнитогидродинамической моделью течения плазмы в магнитослое являлась модель Спрайтера [Spreiter et al., 1966]. В модели не учитывалось действие магнитных сил на движение плазмы. Форма магнитопаузы определялась при решении задачи гидродинамического обтекания без магнитного поля.



*Рис. 1.2.2. Расчет по модели Спрайтера параметров плазмы в магнитослое для числа Maxa $M = 8$ и показателя адиабаты $\gamma = 5/3$: *a* — линии тока плазмы; *б* — контуры равной плотности; *в* — контуры равной скорости и температуры; *г* — силовые линии магнитного поля, перпендикулярного линии Солнце—Земля; *д* — силовые линии магнитного поля, наклоненного к линии Солнце — Земля под углом 45° .*

При решении задачи о распределении магнитного поля [Spreiter and Stahara, 1980] предполагалось выполнение условия вмороженности и задавалась форма препятствия – магнитопаузы. Считалось, что плазма не может проникать через магнитопаузу. Фактически была получена картина течения плазмы вокруг твердого препятствия.

Модель предсказывала драпировку магнитных силовых линий вокруг магнитопаузы. Проверка модели Спрайтера давала неоднозначные результаты. Так, например, вариации потока плазмы и магнитного поля в магнитослой в работах [Němeček et al., 2000; Zastenker et al. 2002] (см. также обзор [Застенкер, 2008]) сильно отличались от предсказаний модели Спрайтера. На Рис. 1.2.2 из обзора [Застенкер, 2008] показаны результат расчета по модели Спрайтера. На Рис. 1.2.3 из обзора [Застенкер, 2008] показаны результаты сравнения измерений (с индексом «*m*») и расчета по модели Спрайтера (с индексом «*p*») в относительных единицах потока ионов FCC и модуля магнитного поля BCC при прохождении спутника «Интербол-1» через магнитослой от ударной волны (BS) до магнитопаузы (MP).



*Рис. 1.2.3. Результаты сравнения измерений (с индексом <<*m*>>) и расчета по модели Спрайтера (с индексом <<*p*>>) в относительных единицах потока ионов FCC и модуля магнитного поля BCC при прохождении спутника Интербол-1 через магнитослой от ударной волны (BS) до магнитопаузы (MP) [Застенкер, 2008].*

В результате предположения о выполнении условия вмороженности в модели Спрайтера, в процессе обтекания должна возникать драпировка магнитного поля вокруг магнитопаузы (draping) и при приближении к магнитопаузе должно происходить нарастание величины магнитного поля (возникать магнитный барьер) и уменьшение плотности плазмы (plasma depression layer). Вопрос о применимости условия вмороженности для описания

течения плазмы в магнитослой остается дискуссионным. В работе [Antonova et al., 2012] суммированы доводы, свидетельствующие о нарушении условия вмороженности в магнитослой. В работе отмечалось, что в магнитослой наблюдаются электростатические флуктуации, возникают всплески электрического поля, приводящих к электростатическому ускорению частиц до энергий ~ 100 кэВ [Lutsenko and Kudela, 1999]. Вблизи магнитопаузы наблюдается сравнительно медленное течение плазмы, что не дает возможности использовать условие вмороженности, являющегося упрощенной записью обобщенного закона Ома.

Проверка условия драпировки впервые проводилась в работах [Fairfield, 1967; Behannon and Fairfield, 1969]. В работе [Fairfield, 1967] преимущественно рассматривались случаи со сравнительно большими значениями компонент ММП в плоскости X-Y, что характерно для магнитного поля вне гелиосферного токового слоя. Было продемонстрировано в среднем выполнение условия драпировки для рассмотренных событий. В работе [Behannon and Fairfield, 1969] рассматривались изменения компоненты поля, перпендикулярные плоскости эклиптики и наблюдались отклонения от условия драпировки в большом числе событий. В работе [Crooker et al., 1985] также анализировалось поле с большой компонентой в плоскости X-Y. Coleman, [2005] провел анализ вопроса о драпировке используя данные спутников Geotail, Interball-Tail (Интербо/Хвостовой зонд) и Wind. В работе [Coleman, 2005] отмечалось, что драпировка магнитного поля в соответствии с моделями газодинамического течения является не правилом, а скорее исключением. В работе [Coleman, 2005] рассматривается конкретный аспект искажений магнитного поля, а именно, как ориентация ММП в плоскости, перпендикулярной линии Солнце-Земля (часовой угол) изменяется в магнитослой на дневной стороне магнитопаузы. Часовой угол поля в магнитослой обычно оценивается по соответствующему значению межпланетного магнитного поля (ММП), измеренному спутником выше по течению солнечного ветра (СВ), полагая, что процесс сжатия и искажения существенно не изменяет часовой угол ("perfect draping") или что изменение часового угла разумно аппроксимировать газодинамической моделью. В данной работе часовой угол в магнитослой, измеренный за 36 пересечений магнитопаузы спутниками Geotail и Interball-Tail, сравнивался с данными спутника Wind. В целом, около 30% случаев, рассмотренных в данном исследовании, являются случаями "perfect draping", и изменение часового угла находится в пределах $\pm 10^\circ$, а в 70% различие не превосходит 30° . Показано, что изменения ориентации магнитного поля в магнитослой не являются систематическими и не могут быть объяснены гидродинамической моделью

сжатия солнечного ветра. Автор говорит, что в то время как средний часовой угол, наблюдаемый в магнитослое, действительно отражает ориентацию ММП с точностью до 30° , предположение, что направление магнитного поля магнитослоя в какой-либо конкретной области магнитопаузы в любой момент времени приблизительно совпадает с направлением ММП, не оправдано. Это исследование показывает, что модели пересоединения, которые предполагают ламинарное обтекание, плохо отражают распределение областей пересоединения на дневной стороне магнитопаузы. Южная ориентация ММП, как считает автор, обычно приводит в целом к южной ориентации поля в магнитослое, и аналогично для северной, восточной или западной ориентации ММП. То есть, усредненные часовые углы ММП и поля магнитослоя близки при усреднении на достаточно больших пространственных масштабах. Однако, как считает автор, не следует утверждать, что ориентация поля в магнитослое в любой данной области на дневной стороне магнитопаузы, размеры которой $< 2 R_E$, на 5-минутном интервале усреднения будет совпадать с наблюдаемой выше по потоку солнечного ветра ориентацией ММП или с предсказанием любой простой газодинамической или аналитической модели. Можно отметить, что наблюдались случаи «обратной драпировки» (см. Kaymas et al., [1996] и ссылки в данной работе) по отношению к предсказаниям МГД моделей течения плазмы. Однако количественное исследование проведено не было.

Концепция вмороженности магнитного поля в плазму солнечного ветра обычно считается экспериментально обоснованной. В качестве экспериментального подтверждения концепции вмороженности рассматривалось, например, результаты одновременных наблюдений на спутниках IMP-1 и IMP-2 [Fairfield, 1967]. Сравнение результатов измерений магнитного поля на этих спутниках показало, что особенности магнитного поля, зарегистрированные одним спутником, впоследствии с некоторой задержкой регистрируются на другом спутнике. Это согласуется с идеей, что вмороженное в плазму солнечного ветра магнитное поле переносится от Солнца со скоростью солнечного ветра. Однозначное согласно критериям 60-х соответствие особенностей на двух спутниках сохранялось даже при некоторых наблюдениях тогда, когда один из спутников находится в магнитослое, доказывая, что ММП переносится и в магнитослой. Хотя анализ рисунков в работе [Fairfield, 1967] говорит о существовании существенных различий. Анализ распределения направлений магнитного поля в магнитослое и сравнение с одновременно измеряемым ММП показывал, что в процессе переноса магнитного поля магнитослоя с плазмой солнечного ветра, обтекающей магнитопаузу, оно искажается и изменяет

ориентацию по сравнению с направлением ММП, становится касательным к магнитопаузе. Отметим, что данные выводы были сделаны при рассмотрении событий с большим значением компоненты магнитного поля в плоскости X-Y. Однако, в работе Rahmanova et al. [2015] показано, что прохождение неоднородностей солнечного ветра через магнитослой далеко не всегда сопровождаются сохранением формы неоднородности. Условие вмороженности предполагает равенство нулю электрического поля в системе отсчета солнечного ветра, что, видимо (см. Алешин и др. [2007]), далеко не всегда реализуется. В солнечном ветре постоянно наблюдаются резкие изменения параметров. Наиболее подробно изучены скачки плотности [Riazantseva et al., 2005, 2007]). Наблюдаемые вариации изменений параметров имеют нерегулярный характер и описываются в терминах турбулентности солнечного ветра. За последнее время характеристики спектров турбулентности солнечного ветра подробно изучаются (см., например, обзор Riazantseva et al. [2015]). Поэтому вопрос о применимости условия вмороженности к описанию солнечного ветра пока нельзя считать решенным.

Открытие струйных течений в магнитослое, динамическое давление в которых значительно превышает динамическое давление в солнечном ветре (см. [Amata et al. 2011; Savin et al., 2008, 2011; Dmitriev and Suvorova, 2015] и ссылки в этих работах) показало, что представления о течении плазмы в магнитослое должны быть дополнительно модифицированы. Такие струи глубоко проникают внутрь магнитосферы. На Рис. 1.2.4 из работы [Dmitriev and Suvorova, 2015] показаны результаты наблюдений проникновения плазменной струи в магнитосферу, зарегистрированной на спутниках проекта THEMIS 7 августа 2007 г.

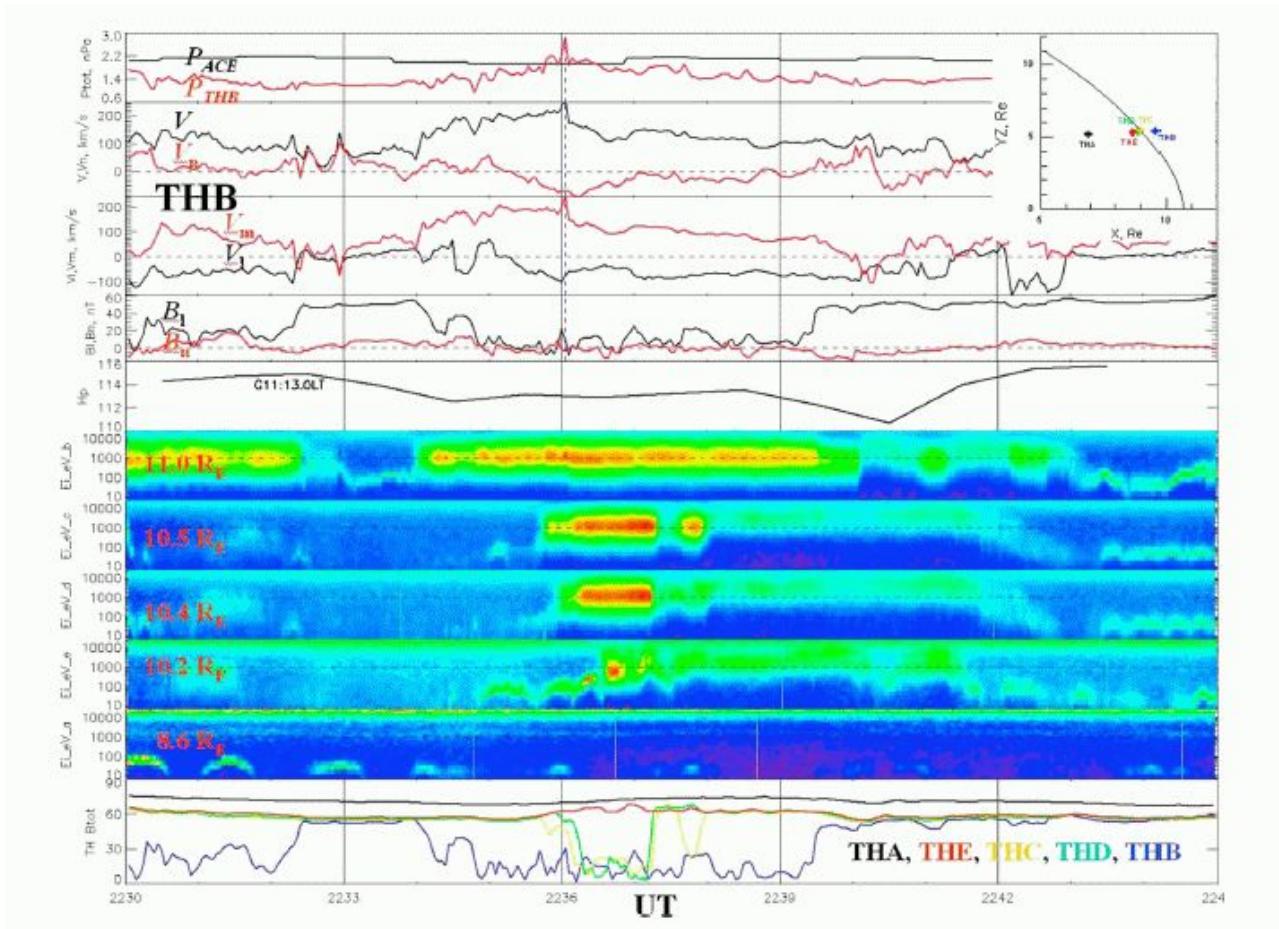


Рис. 1.2.4. Пример наблюдения проникновения плазменной струи магнитослоя в магнитосферу 7 августа 2007 г. [Dmitriev and Suvorova, 2015].

Результаты МГД моделирования обтекания солнечным ветром геомагнитного диполя позволили создать ламинарные модели течения плазмы вокруг геомагнитного диполя. Модели основывались на решении системы МГД уравнений в предположении выполнения условия вморженности магнитного поля в плазму. Тurbулентное течение плазмы в магнитослое и формирование струй повышенного давления удалось в последнее время воспроизвести в рамках гибридных моделей [Omidi et al., 2014; Karimabadi et al., 2014]. На Рис. 1.2.5 показан пример распределения концентрации плазмы и магнитного поля, полученного при гибридном моделировании течения плазмы в магнитослое из работы [Karimabadi et al., 2014].

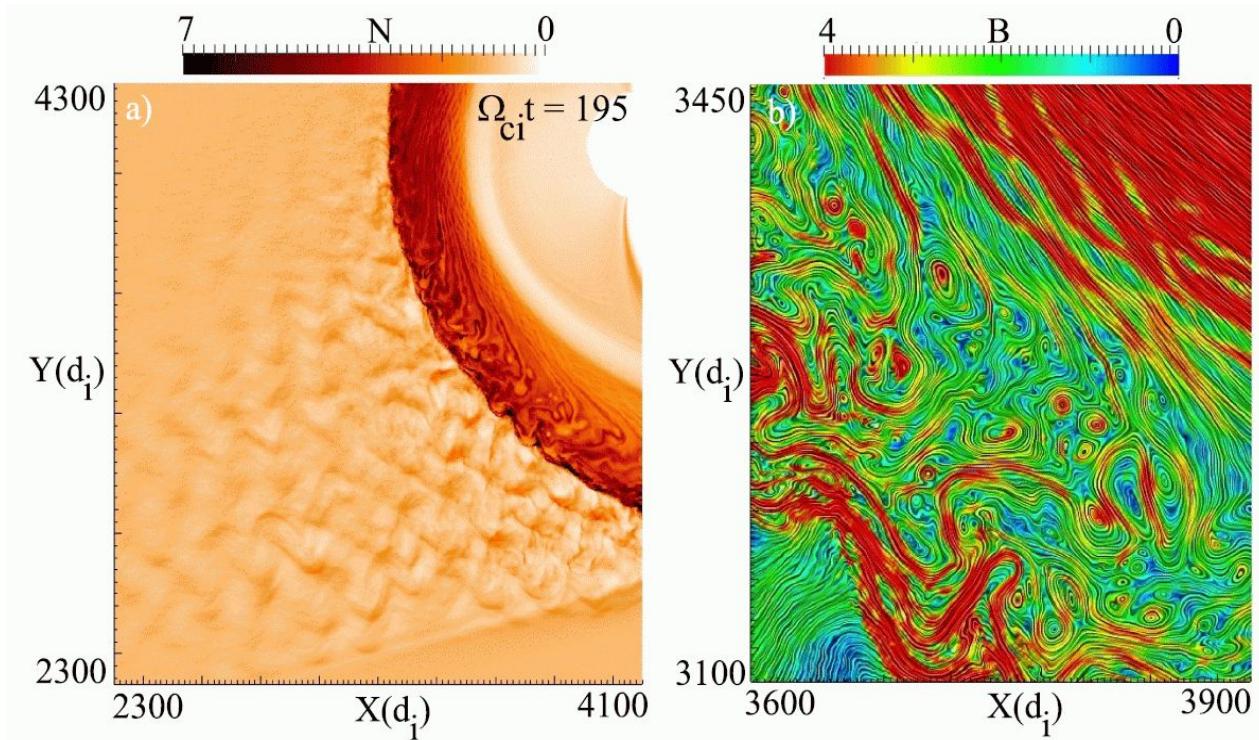


Рис. 1.2.5. Пример распределения концентрации плазмы и магнитного поля, полученного при гибридном моделировании течения плазмы в магнитослой из работы [Karimabadi et al., 2014].

1.3. Связь геомагнитной активности с условиями в солнечном ветре

Длительный период исследований солнечно-земных связей показал сильную зависимость параметров геомагнитной активности от параметров солнечного ветра. В качестве таких параметров выбирались плотность, скорость и динамическое давление солнечного ветра, направление межпланетного магнитного поля. В соответствии со схемой Данжи, направление ММП является ключевым параметром, определяющим магнитосферную динамику. Условия в магнитослой непосредственно у границы магнитосферы не рассматривались в качестве управляющего параметра.

В работе [Newell et al., 2007] было проведено исследование связи различных параметров солнечного ветра с широким спектром параметров магнитосферной активности, в том числе с геомагнитными индексами. Был исследован очень большой объем данных, охватывающий почти два солнечных цикла. Использовались почасовые показатели для сведения к минимуму статистических флуктуаций и исключения зависимости от приборных погрешностей. В работе были рассмотрены корреляции каждого из исследуемых параметров

солнечного ветра и их комбинаций (20 параметров и комбинаций) с каждым из 10 параметров геомагнитной активности. На Рис. 1.3.1 показана приведенная в работе [Newell et al., 2007] сводная таблица рассмотренных параметров, а на Рис. 1.3.2 сводная таблица полученных коэффициентов корреляций. Обращает на себя внимание низкие значения коэффициентов корреляции B_z -компоненты солнечного ветра с AE и AL индексами геомагнитной активности (0.61 для AE и 0.44 для AL), что трудно объяснить в рамках схемы Данжи.

Table 1. Twenty Candidate Solar Wind-Magnetosphere Coupling Functions and Their Origins in Roughly Historical Order

Name	Functional Form	Reference
B_z	B_z	Dungey [1961]
Velocity	v	Crooker et al. [1977]
Density	n	
p	$nv^2/2$	Chapman and Ferraro [1931]
Bs	$B_z (B_z < 0); 0 (B_z > 0)$	
Half-wave rectifier	vBs	Burton et al. [1975]
ε	$vB^2 \sin^4(\theta_c/2)$	Perrault and Akasofu [1978]
ε_2	$vB_T^2 \sin^4(\theta_c/2)$	Variant on ε
ε_3	$vB \sin^4(\theta_c/2)$	Variant on ε
Solar wind E-field	vB_T	
$E_{KL}^{1/2}$	$vB_T \sin^2(\theta_c/2)$	Kan and Lee [1979]
E_{KL}	$[vB_T \sin^2(\theta_c/2)]^{1/2}$	Variant on the Kan-Lee electric field
E_{KLV}	$v^{4/3} B_T \sin^2(\theta_c/2) p^{1/6}$	Vasyliunas et al. [1982]
E_{WAV}	$vB_T \sin^4(\theta_c/2)$	Wygant et al. [1983]
E_{WAV}^2	$[vB_T \sin^4(\theta_c/2)]^2$	Variant on E_{WAV}
$E_{WAV}^{1/2}$	$[vB_T \sin^4(\theta_c/2)]^{1/2}$	Variant on E_{WAV}
E_{WW}	$v^{4/3} B_T \sin^4(\theta_c/2) p^{1/6}$	Vasyliunas et al. [1982]
E_{SR}	$vB_T \sin^4(\theta_c/2) p^{1/2}$	Scurry and Russell [1991]
E_{TL}	$n^{1/2} v^2 B_T \sin^6(\theta_c/2)$	Temerin and Li [2006]
$d\Phi_{MP}/dt$	$v^{4/3} B_T^{2/3} \sin^{8/3}(\theta_c/2)$	This paper

Рис. 1.3.1. Предлагавшиеся для объяснения зависимости параметров геомагнитной активности от параметров солнечного ветра функции связи (coupling functions) и ссылки на работы, в которых предлагались данные функции, из работы [Newell et al., 2007].

Table 3. Correlations Between 20 Coupling Functions and 10 Indices^a

Rank, f	Λ_c	Dst	AE	AU	Goes	Kp	Auro	b2i	Φ_{pc}	AL	$\Sigma r^2/n$
1. $d\Phi_{MP}/dt$	-.845	-.796	.830	.765	-.760	.760	.741	-.720	.614	-.528	57.3%
2. E_{WAV}	-.830	-.816	.787	.734	-.751	.688	.701	-.695	.570	-.477	52.6%
3. E_{WW}	-.821	-.855	.798	.735	-.696	.700	.726	-.690	.542	-.467	52.6%
4. ε_3	-.822	-.812	.777	.718	-.737	.699	.699	-.673	.582	-.478	52.2%
5. E_{KL}	-.794	-.797	.759	.732	-.721	.709	.689	-.707	.551	-.443	51.0%
6. $E_{KLV}^{0.5}$	-.776	-.835	.772	.735	-.671	.721	.713	-.700	.528	-.433	50.8%
7. E_{wav}	-.818	-.714	.774	.741	-.731	.696	.681	-.700	.592	-.501	50.6%
8. vBs	.803	.810	-.754	-.684	.744	-.642	-.675	.648	-.560	.465	48.8%
9. $E_{KL}^{1/2}$	-.776	-.714	.732	.720	-.697	.712	.658	-.704	.561	-.453	48.2%
10. E_{SR}	-.788	-.860	.756	.706	-.586	.670	.701	.670	.476	-.410	46.9%
11. E_{TL}	-.775	-.859	.740	.675	-.581	.645	.691	-.645	.463	-.407	45.1%
12. B_s	.757	.732	-.695	-.654	.733	-.575	-.629	.620	-.549	.429	42.4%
13. ε	-.745	-.770	.670	.632	-.567	.552	.582	-.556	.365	-.338	36.6%
14. ε_2	-.707	-.735	.620	.587	-.541	.515	.554	-.532	.321	-.311	32.2%
15. E_{WAV}^2	-.698	-.654	.628	.547	-.460	.459	.537	-.462	.263	-.312	28.2%
16. B_z	.644	.476	-.610	-.556	.573	-.417	-.537	.450	-.445	.440	26.4%
17. vB_T	-.406	-.633	.385	.414	-.452	.551	.460	-.491	.344	-.132	22.6%
18. p	-.277	-.551	.312	.357	-.202	.512	.391	-.474	.217	-.085	15.3%
19. v	-.324	-.395	.374	.279	-.321	.582	.399	-.315	.254	-.251	14.7%
20. n	-.041	.102	.001	.093	.033	.058	.122	-.172	.058	.070	0.8%

^aThe coupling functions are ranked from best ($d\Phi_{MP}/dt$) to worst (n) by the total variance of the 10 indices (13 data sets, counting multiple solar cycles for Λ_c , Dst, and Kp) predicted, as given in the right-hand column.

Рис. 1.3.2. Сводная таблица, содержащая коэффициенты корреляции индексов геомагнитной активности с различными комбинациями параметров солнечного ветра, представленная в статье [Newell et al., 2007]. Λ_c – экваториальная граница каспса, Goes – угол наклона магнитного поля по измерениям на геостационарных спутниках Goes, Auro – мощность ауроральных высыпаний, определяемая по данным ультрафиолетовых наблюдений на спутнике Polar, b2i - экваториальная граница изотропных высыпаний ауроральных ионов по данным спутников DMSP, Φ_{pc} – магнитный поток в полярных шапках; Kp, Dst, AE, AU, AL – индексы геомагнитной активности.

В частности, в работе [Newell et al., 2007] было показано, что уровень корреляции Z-компоненты ММП с индексами геомагнитной активности Dst, Kp, AE, AU, и AL весьма низкий (см. таблицу на рис. 1.3.2 и рис. 1.3.3), $|r| \sim 0.4 - 0.6$. Так как часовой угол представляет собой угол между векторной суммой B_y и B_z и осью Z_{GSM} , а для B_y корреляция значений в солнечном ветре и в магнитослое достаточно хорошая (это будет показано, в том числе, и в приводимом ниже исследовании), то возникает вопрос о причинах плохой корреляции с B_z ММП.

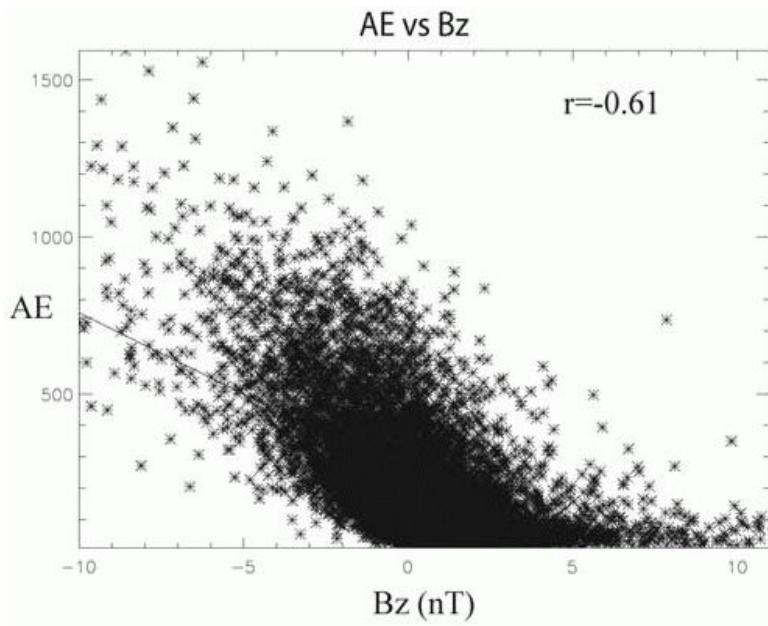


Рис. 1.3.3. Сводный рисунок распределения значений AE-индекса в зависимости от значения z-компоненты ММП, представленный в [Newell et al., 2007].

Развитие теории взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли требует учета существования высокого уровня турбулентности в магнитослое, обладающей перемежаемостью. Области и временные интервалы с высоким уровнем флюктуаций соседствуют со сравнительно ламинарными областями. Поэтому большой интерес представляет сравнение параметров магнитного поля непосредственно перед магнитопаузой с магнитным полем в солнечном ветре (ММП).

Большое число измерений ММП проведено в точке либрации. Время распространения солнечного ветра от точки либрации до Земли составляет порядка часа. Солнечный ветер сам является турбулентной средой (см. [Riazantseva et al., 2005, 2007] и ссылки в этих работах). Поэтому его параметры могут изменяться при распространении до орбиты Земли. В работе [Šafránková et al., 2009] приведены оценки достоверности наблюдения B_z компоненты магнитного поля в магнитослое при известном направлении магнитного поля в солнечном ветре. В данном статистическом исследовании была определена вероятность одновременного наблюдения совпадающих знаков B_z в солнечном ветре и магнитослое. Анализ основан на 5-минутных данных с четырех космических аппаратов (Интербол-1, IMP 8, CLUSTER, и THEMIS), работавших в различных фазах солнечного цикла в магнитослое. Данные этих спутников сравнивались с измерениями ММП на спутниках, находящихся выше по потоку солнечного ветра: Wind, ACE, THEMIS-B и базой данных OMNI.

Полученная вероятность совпадения знаков B_z в солнечном ветре и в магнитослое оказалась, по мнению авторов, очень низкой. Авторы отмечают, что данная вероятность изменяется с солнечным циклом, будучи наибольшей в солнечном минимуме. Вне зависимости от фазы солнечного цикла, эта вероятность близка к 0.5 (случайное совпадение) для значений B_z ММП, не превосходящих по модулю 1 нТл, и увеличивается с ростом величины B_z . Также говорится, что измерения в солнечном ветре на больших расстояниях (в точке либрации) не гарантируют совпадение знака B_z даже для значений, превышающих ± 9 нТл, но такие большие значения наблюдаются лишь в 3-5% случаев. Наибольшие вероятности совпадения достигается при использовании измерений непосредственно перед форшоком, как это продемонстрировано для проекта THEMIS. Результаты работы [Šafránková et al., 2009] приведены на рис. 1.3.4. Вертикальные линии отмечают определенный набор космических аппаратов для данного отрезка времени, показанного на горизонтальной оси. Кружки представляют вероятность совпадения знаков при B_z ММП = -2 ± 0.5 нТл, треугольники – вероятность при B_z ММП = -5 ± 0.5 нТл. Спутник, данные которого использовались для наблюдений в СВ, указан рядом с каждой конкретной точкой. Можно отметить четкую модуляцию с фазой солнечного цикла для обоих рассматривавшихся значений B_z ММП.

Согласно Рис. 1.3.4 исследования процессов на магнитопаузе, которые используют результаты наблюдений солнечного ветра на спутниках в точке либрации для предсказания знака B_z , могут быть недостоверными. Модуль z -компоненты ММП в течение $\sim 60\%$ времени принимает значения < 2 нТл. Поэтому вероятность того, что в магнитослое знак B_z совпадает с предсказанным, невелика. В исследовании также показано, что вероятность наблюдения одного и того же знака компоненты B_z в солнечном ветре и в определенный момент в магнитослое зависит от фазы солнечного цикла (рис. 1.3.4), увеличивается в период солнечного минимума и постепенно уменьшается с увеличением солнечной активности. Она возрастает с ростом B_z от значений, близких к 0.5 для $|B_z| \sim 1$ нТл, и достигает почти единицы для $|B_z| \sim 10$ нТл во время солнечного минимума. Увеличение вероятности во время солнечных минимумов частично компенсируется более низкими значениями B_z в солнечном ветре. Отмечалось, что методы расчета распространения солнечного ветра, используемые в базе данных OMNI, приводят к значительному улучшению корреляции для значений z -компоненты ММП по модулю больших 2 нТл, при меньших значениях эффект значительно ослабляется.

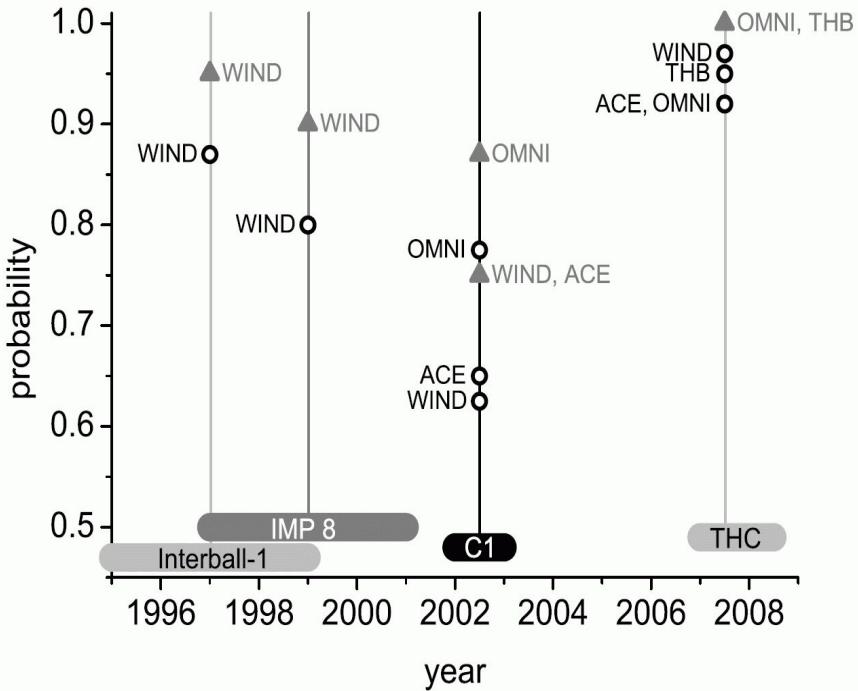


Рис. 1.3.4. Зависимость вероятности совпадения знаков z -компоненты в СВ и в магнитослое от солнечного цикла, представленная в [Šafránková et al., 2009].

Кроме того, были сделаны следующие выводы:

1. Относительное число случаев с хорошей (95%) вероятностью совпадения знаков B_z не превышает 12% ни в одной фазе солнечного цикла.
2. Применение новых методов расчета распространения солнечного ветра может значительно улучшить прогнозирование знака B_z в магнитослое для случаев, когда в солнечном ветре $|B_z| > 2$ нТл.
3. Использование данных, полученных с расстояний $< 30 R_E$ (измерения THEMIS-B), еще больше повышает вероятность совпадений во время солнечного минимума.

Авторы предполагают, что зависимость от солнечного цикла можно объяснить сложностью топологии магнитного поля Солнца во время солнечного максимума. Такая топология, вместе с общим повышением солнечной активности вблизи солнечного экватора, вероятно, приводит к образованию более мелкомасштабных структур, которые можно наблюдать в точке либрации, но которые могут миновать Землю, и наоборот.

Проведенный в работе [Šafránková et al., 2009] анализ поставил вопрос о необходимости исследований зависимости магнитного поля в магнитослое от магнитного поля в солнечном ветре для определения надежности прогнозов геомагнитной активности. Однако не все

вопросы были решены. Интерес представляло значение поля непосредственно перед магнитопаузой. Кроме того, не рассматривались B_x и B_y компоненты поля. Для оценки влияния турбулентности магнитослоя на изменение параметров магнитного поля при распространении через магнитослой до магнитопаузы надо проводить сравнение таких параметров непосредственно перед ударной волной и около магнитопаузы. При этом измерения в солнечном ветре должны проводиться выше по потоку области форшока, который вносит сильные возмущения в поток солнечного ветра перед ударным фронтом. Возможность проведения такого сравнения появилась только с реализацией пятиспутникового проекта THEMIS (см. описание проекта в работах [Angelopoulos, 2008; Sibeck and Angelopoulos, 2008]), в котором в период с июня по октябрь один из спутников значительное время проводил измерения в солнечном ветре, в то время как другой пересекал магнитопаузу в дневные часы.

1.4. Условия в магнитослое и баланс давлений на магнитопаузе

Магнитопаузой называется внешняя граница магнитного поля Земли [The physics of the magnetopause, 1995]. Данная граница обычно определяется как токовый слой, на котором магнитное поле поворачивается от направления, соответствующего направлению магнитного поля в солнечном ветре, к направлению, определяемому геомагнитным диполем. Но такая картина наблюдается далеко не всегда. Часто регистрируется вместо четкого пересечения турбулентный переход, в котором среднее направление магнитного поля теряет корреляцию с межпланетным магнитным полем [Физика плазмы солнечной системы, т. 1]. В данном случае часто приходится опираться на данные плазменных наблюдений [Fairfield, 1967]. Существование различных типов перехода от плазмы и магнитного поля магнитослоя к плазме и магнитному полю магнитосферы привели к различным оценкам толщины магнитопаузы, которые варьируют от 100 км до половины радиуса Земли. Скорость движения спутников при пересечении магнитопаузы, как правило, намного меньше скорости ее движения, которая может достигать ~ 300 км/с.

Понятие магнитопаузы было введено в работах Чепмена и Ферраро [Chapman and Ferraro, 1931a,b] на основе баланса динамического давления солнечного ветра и магнитного поля Земли. В данных работах не рассматривалось формирование бесстолкновительной ударной волны и существование магнитного поля в солнечном ветре. Последующие теоретические исследования проводились в магнитогидродинамическом приближении и включали возникновение бесстолкновительной ударной волны. Теория формирования

бесстолкновительных ударных волн разработана в работах Р.А. Сагдеева (см. [Сагдеев, 1961; Арцимович и Сагдеев, 1979]) и описывает формирование высокого уровня флюктуаций за бесстолкновительной ударной волной. Существование высокого уровня флюктуаций за бесстолкновительной околоземной ударной волной подтверждают все результаты наблюдений. Возмущения за ударной волной включают электростатическую компоненту. При магнитогидродинамическом анализе обтекания магнитосферы солнечным ветром, магнитопауза обычно рассматривалась в качестве тангенциального разрыва (например, модели Спрайтера), на котором существует баланс давлений плазмы и магнитного поля.

Статистический анализ пересечений магнитопаузы привел к созданию моделей, описывающих ее форму [Roelof and Sibeck, 1993; Petrinec and Russell, 1996; Verigin et al., 2008, 2009; Dmitriev and Suvorova, 2000; Shue et al., 1998; Wang et al., 2013 и др.]. Форма магнитопаузы зависит от параметров солнечного ветра и распределения токов внутри магнитосферы. В созданных моделях магнитопаузы входными параметрами пока являются динамическое давление солнечного ветра и B_z ММП, хотя начиная с работ [Aubry et al., 1970, 1971] известно, что форма и положение магнитопаузы зависит от геомагнитных параметров. В работах [Sibeck et al., 1991; Tsyganenko and Sibeck, 1994] было показано, что зависимость положения магнитопаузы от B_z -компоненты ММП может быть объяснена с учетом изменения токовых систем внутри магнитосферы. Такой подход хорошо стыкуется, например, с концепцией «нагружения-разгружения» магнитосферы (loading-unloading concept), предложенный в работе [Russell and McPherron, 1973] и подтвержденной многочисленными данными наблюдений [Shukhtina et al., 2005].

Форма магнитопаузы закладывается в качестве фиксированного граничного условия (приближение твердой магнитопаузы) в моделях обтекания магнитосферы солнечным ветром типа модели Спрайтера. В таких моделях считается, что внутри магнитослоя распределение магнитного поля может быть описано в предположении выполнения условия вмороженности, а поперечная к магнитопаузе компонента магнитного поля строго равна нулю. Данные предположения приводят к возрастанию магнитного поля при приближении к магнитопаузе и соответствующему уменьшению плотности плазмы, т.е. формированию области пониженной концентрации плазмы - plasma depletion layer [Zwan and Wolf, 1976]. Считалось, что применимость данного предположения подтверждается рядом наблюдений нарастания магнитного поля и падением плотности плазмы при движении от ударной волны к магнитопаузе. Однако, как показали результаты наблюдений на спутнике AMPTE/IRM [Paschmann et al., 1986, 1993; Phan et al., 1994; Phan and Paschman, 1996], такое нарастание

наблюдается только при малом сдвиге ($<45^\circ$) направления магнитного поля при переходе от магнитослоя к магнитосфере. В данных работах показано, что структура перехода от магнитослоя к магнитосфере определяется величиной сдвига направления магнитного поля, т.е. угла между направлением магнитного поля у магнитопаузы и внутри магнитосферы. Phan and Paschman [1986, 1985], Phan et al. [1994] определяли положение магнитопаузы по максимальному изменению направления магнитного поля и изменению температуры протонов. На рис. 1.4 показаны полученные методом наложения эпох в работе [Phan et al., 1994] изменения параметров плазмы и магнитного поля при пересечении магнитопаузы. Постепенное нарастание величины магнитного поля при приближении к магнитопаузе и падение плотности плазмы наблюдается только при малом ($<45^\circ$) сдвиге направления магнитного поля при переходе из магнитослоя внутрь магнитосферы (левая часть рисунка). При большом сдвиге ($>45^\circ$) плотность плазмы магнитослоя остается постоянной до пересечения магнитопаузы. Во всех исследованиях магнитослоя постоянно отмечался высокий уровень флюктуаций магнитного поля в магнитослое. Из рис. 1.4 следует, что уровень флюктуаций в магнитослое достаточно велик и в случаях с большим углом поворота значительно превышает уровень при малом угле поворота. Phan and Paschmann [1996] считали, что при малом угле поворота формируется считавшегося тогда классическим plasma depletion layer и отмечали, что формирование такого слоя только при малом угле поворота является наиболее удивительным из полученных результатов. Отсутствие plasma depletion layer и нарастания поля при большом сдвиге при приближении к магнитопаузе считалось следствием действия процессов пересоединения на магнитопаузе, хотя не приводилось доказательств возникновения ускоренных потоков плазмы, характерных для пересоединения. Существование большого уровня флюктуаций в магнитослое, несмотря на применяемый термин турбулентный магнитослой, рассматривалось только в качестве помехи в изучении пересечений магнитопаузы.

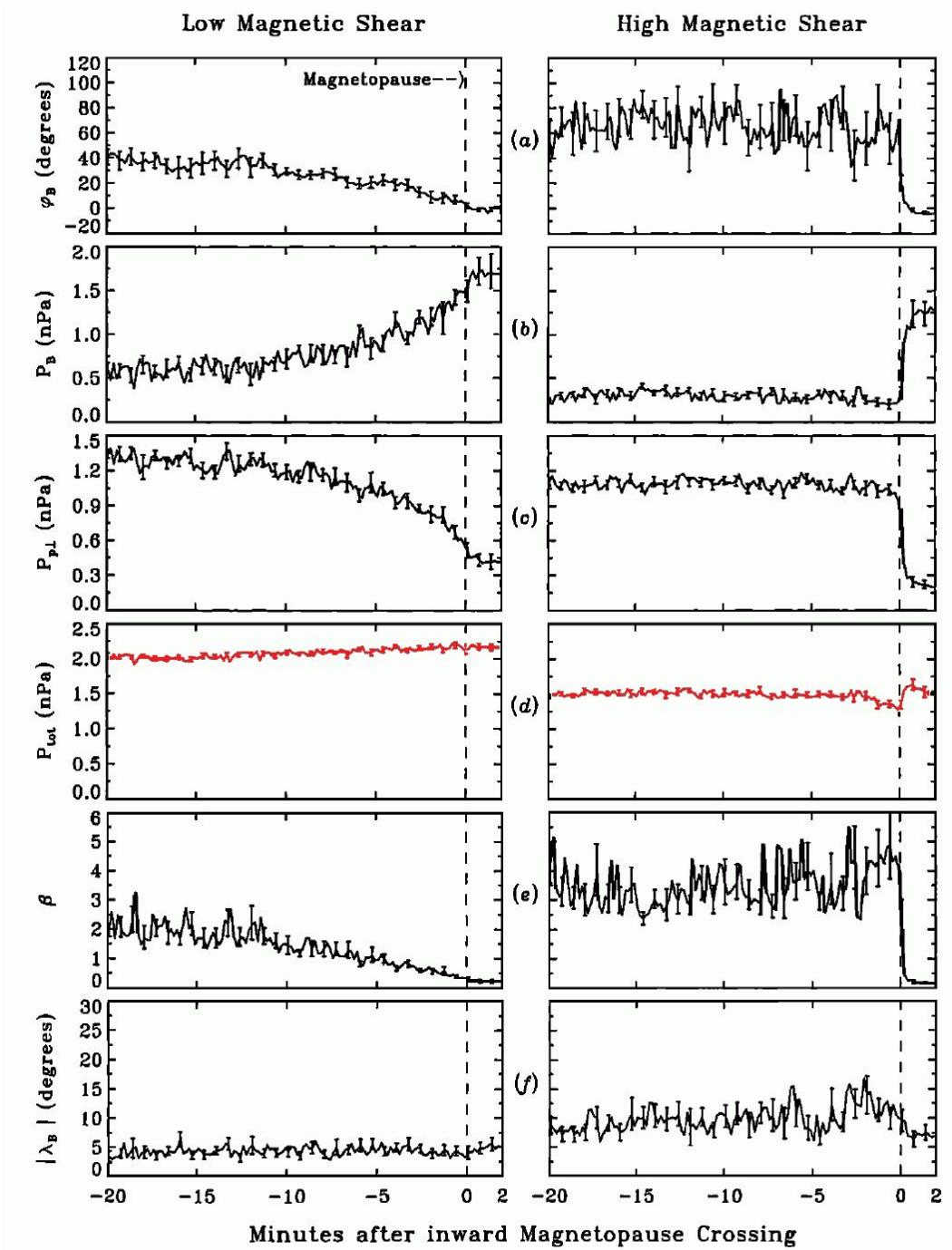


Рис. 1.4. Результаты методом наложения эпох 13 событий малого сдвига и 25 событий большого сдвига пересечений магнитопаузы. Время пересечений магнитопаузы определялось по изменению температуры протонов и максимальному вращению магнитного поля. Показаны угол вращения магнитного поля ϕ_B , магнитное давление P_B , перпендикулярное магнитному полю тепловое давление P_{\perp} , полное давление, плазменный параметр и угол увеличения поля относительно поля в магнитосфере λ_B .

В работе [Haerendel, 1978] на базе данных спутника Heos 2 также было показано, что характерные для процессов пересечения ускоренные движения плазмы не наблюдались при пересечении магнитопаузы. Последующие эксперименты регистрировали ускоренные потоки за магнитопаузой (см. [Sibeck et al., 1999]). Однако такие потоки наблюдались сравнительно редко.

Отсутствие ускоренных потоков за магнитопаузой в большинстве наблюдений приводило к предположениям о проницаемости магнитопаузы (отклонениям от строго тангенциального разрыва). Рассматривались различные механизмы (диффузия, градиентный дрейф, конечность ларморовского радиуса, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и др.). Интересная гипотеза была высказана [Haerendel, 1978]. Было предположено, что у магнитопаузы особенно в районе каспа возникает сильная вихревая диффузия. Компонента магнитного поля поперек магнитопаузы, при этом, не равна нулю и должна сильно флюктуировать.

Из рис. 1.4 следует, что при малом угле поворота крайне сложно выделить границу магнитосферы не пользуясь данными наблюдений частиц и плазмы. Давление плазмы не испытывает скачка на магнитопаузе в отличие от изменения давления при большом угле поворота. Обращает на себя внимание постоянство полного давления в обоих случаях (выделено на рисунке красным). Уменьшение концентрации при пересечении магнитопаузы связано только с возрастанием температуры частиц, формирующих примыкающее к магнитопаузе окружающее Землю плазменное кольцо [Antonova et al., 2011, 2013]. Характеристики частиц в кольце соответствуют частицам плазменного слоя, а поперечные токи являются высокоширотным продолжением кольцевого тока.

Как уже обсуждалось выше, существование высокого уровня флюктуаций в магнитослое, включая электростатические, приводит к предположению о несправедливости условия вмороженности и переносу плазмы поперек магнитных силовых линий. При этом, результаты Phan et al. [1994] показывают, что при малом сдвиге магнитного поля формируется переходная область с постепенным нарастанием давления магнитного поля до величин, характерных для магнитосферы, а при большом сдвиге существует резкий переход от параметров магнитослоя к параметрам магнитосферы. Однако в обоих случаях поддерживается баланс давлений. Отсюда следует, что изучение баланса давлений на магнитопаузе является крайне актуальным.

1.5. Пятиспутниковый проект THEMIS

Спутники международного проекта THEMIS были запущены 17 февраля 2007 года. Основной целью проекта является исследование природы суббурь. Для этого было разработано пять идентичных аппаратов, которые каждые 4 дня должны были выстраиваться в определенном порядке над наземными обсерваториями в Канаде и северной части США [Angelopoulos, 2008].

После запуска и до 15 сентября 2007 года спутники находились на малых расстояниях друг от друга на одной орбите с апогеем $15,4 R_E$ (рис. 1.5.1 а). После этого 4 месяца спутники находились в фазе становления новых орбит. С 15 декабря 2007 года и до 15 октября 2008 года часть орбиты одного из спутников лежала в солнечном ветре и достигала апогея $30 R_E$, апогей второго спутника, тоже вылетавшего в солнечный ветер, составлял $20 R_E$, третьего и четвертого – по $12 R_E$ и пятого – $10 R_E$ (рис. 1.5.1 б). Рассмотренные в диссертационной работе пересечения спутниками магнитопаузы происходили в интервалы времени, когда конфигурация орбит спутников была подобна показанной на рис. 1.5.1 б.

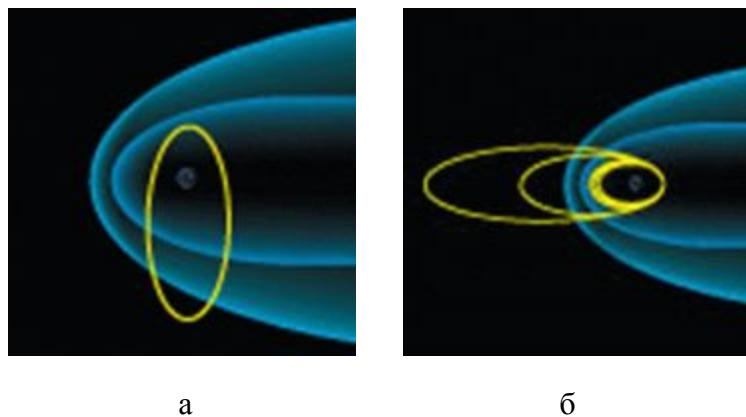


Рис. 1.5.1. Орбиты спутников проекта THEMIS: а) фаза одинаковых орбит; б) фаза с установившимися орбитами, максимальный апогей $30 R_E$.

В работе были использованы данные в основном приборов ESA и FGM. На рис. 1.5.2 представлено расположение приборов на одном из спутников проекта THEMIS. ESA - электростатический анализатор для регистрации ионов с энергиями от нескольких эВ до 25 кэВ и электронов с энергиями от нескольких эВ до 30 кэВ [McFadden et al., 2008]. Прибор ESA состоит из пары цилиндрических электростатических анализаторов с суммарными 180° и 6° -ным полями обзора. Таким образом, за период вращения проводится регистрация в 4π стерadian. Частицы регистрируются плоскими микроканальными детекторами.

Феррозондовый магнитометр FGM [Auster et al., 2008] измеряет фоновое магнитное поле и его флуктуации на низких частотах вплоть до 64 Гц. Прибор FGM регистрирует вариации магнитного поля с точностью до 0.02 нТ. В магнитометре использованы усовершенствованные технологии, которые сразу оцифровывают сигналы датчиков

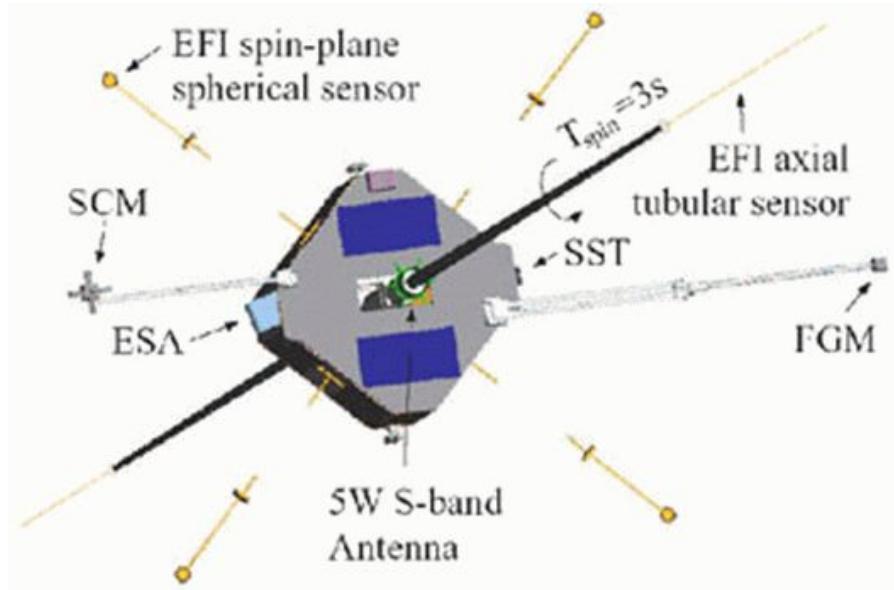


Рис. 1.5.2. Расположение приборов на одном из спутников проекта THEMIS.

Все данные спутников доступны в режиме онлайн на страницах <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> и <http://themis.ssl.berkeley.edu/>.

1.6. Выводы к первой главе и обзор содержания работы.

Результаты исследований магнитослоя – области между ударной волной и магнитопаузой продемонстрировали высокий уровень флуктуаций магнитного поля в магнитослое. Были получены первые результаты по определению характеристик турбулентности магнитослоя. Однако существование турбулентности магнитослоя не принималось и до сих пор не принимается во внимание при решении задач предсказания космической погоды. Данные предсказания на временном интервале соответствующем времени распространения солнечного ветра от точки либрации до магнитопаузы (~1-2 ч) основываются на измерениях скорости солнечного ветра, плотности, динамического давления и особенно величины и ориентации ММП. Результаты исследования [Šafránková et al., 2009] продемонстрировали сравнительно плохую корреляцию B_z ММП и B_z в магнитослое. Однако использовался сравнительно большой интервал усреднения (5 мин), значительно превышающий время распространения солнечного ветра от ударной волны до

магнитопаузы (~ 2 мин). Не рассматривались B_x и B_y компоненты поля. Не анализировалось магнитное поле непосредственно перед магнитопаузой. Учитывая наиболее популярные теории, согласно которым ключевую роль должно играть направление магнитного поля непосредственно перед магнитопаузой, необходимо было получить количественную информацию о зависимости компонент поля и часового угла перед магнитопаузой от соответствующих компонент магнитного поля в солнечном ветре перед ударной волной.

Основным процессом, приводящим к формированию магнитосферной полости и ее границы магнитопаузы как в первоначальном подходе Чепмена-Ферраро, так и при МГД описании, является установление баланса давлений плазмы и магнитного поля на магнитопаузе. Соблюдение данного условия определяет форму магнитопаузы. При нарушении баланса давлений наблюдается быстрое движение магнитопаузы. Несмотря на длительную историю космических исследований, определению условий баланса давлений посвящено небольшое число работ. Были выделены пересечения с малым и большим поворотом магнитного поля на магнитопаузе. В первом случае наблюдается сравнительно плавный переход от плазмы магнитослоя к плазме магнитосферы без заметных особенностей в магнитном поле и постепенным уменьшением плотности плазмы. Во втором, наблюдается резкая граница. Сравнительно точно определить положение магнитопаузы можно только во втором случае. Для таких пересечений удается подробно исследовать баланс давлений. Однако число проанализированных и опубликованных событий сравнительно невелико.

Подробный анализ баланса давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки в магнитоспокойных условиях для 18 пересечений магнитопаузы спутниками THEMIS был проведен в работе [Знаткова и др., 2011]. Были определены динамическое, статическое давления плазмы и магнитное давление в магнитослое, магнитное давление и статическое давление плазмы внутри магнитосферы. Результаты измерений на трех спутниках при пересечении границы магнитосферы Земли вблизи подсолнечной точки показали, что имеет место соблюдение условия МГД баланса давлений на магнитопаузе с точностью, в среднем, около 7%, что подтверждает возможность, несмотря на отсутствие в плазме столкновений, использования МГД подхода при изучении процесса формирования магнитопаузы. Необходимо отметить, что все рассмотренные события имели место при северной ориентации ММП, когда магнитное поле сравнительно спокойно. Ранее не проводились исследования условий баланса давлений во время магнитных бурь. Поэтому было неясно, чем условия баланса во время бурь отличаются от условий баланса в магнитоспокойное время.

В настоящей работе будет проведено сравнение параметров магнитного поля, полученных спутниками THEMIS, вблизи магнитопаузы, измеренных за 3 с (время оборота спутника), 30 с (интервал \sim характерного корреляционного времени в соответствии с оценками [Gutynska et al., 2008]) и 90 с (интервал в 3 раза превышающий характерное корреляционное время), с параметрами ММП направление перед ударной волной и форшоком по данным спутников проекта, проводивших измерения в солнечном ветре. Целью работы является определение усредненных зависимостей параметров магнитного поля у магнитопаузы от соответствующих параметров в солнечном ветре при выбранных временах усреднения. При этом представляет интерес выделение событий, при которых магнитного поля у магнитопаузы сильно отличается от направления магнитного поля в солнечном ветре вплоть до изменения знака.

Затем будет проведена проверка соблюдения баланса давлений для различных типов событий: для случая совпадения знаков B_z в солнечном ветре и в магнитослое и для случаев несовпадений. Такое исследование требует индивидуального анализа каждого пересечения. На основе такого анализа будут получены некоторые статистические закономерности. Впервые будет рассмотрен баланс давлений во время магнитных бурь и проведено сопоставление условий баланса давлений во время магнитных бурь и в магнитоспокойных условиях. Также будет рассмотрен вопрос о роли изменений токов внутри магнитосферы в изменении условий баланса на магнитопаузе.

Глава 2.

Корреляция параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитопаузы и в солнечном ветре перед ударной волной

2.1. Методика анализа данных

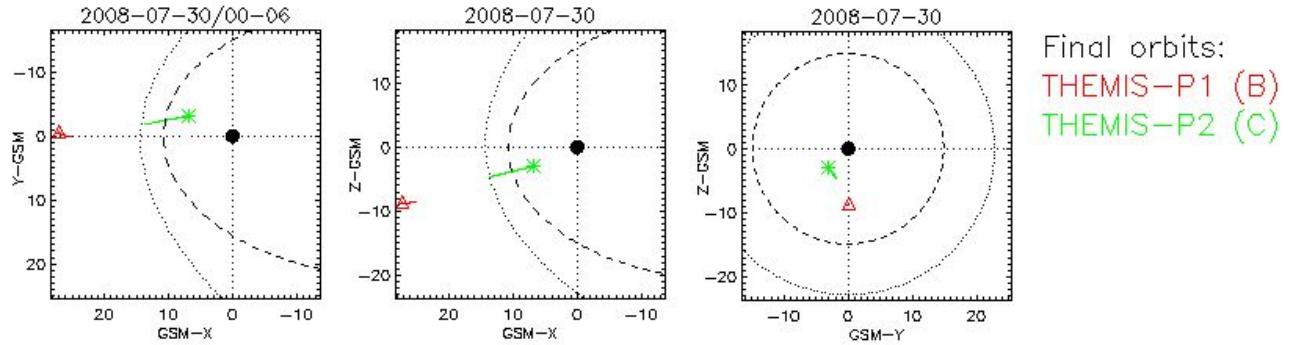
Данные для анализа были взяты с сайта <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>, где находятся в открытом доступе результаты работы различных проектов, в том числе проекта THEMIS. В ходе работы был проведен анализ данных THEMIS в летние периоды 2008, 2009 гг., когда орбиты спутников в результате прецессии развертывались таким образом, что их апогеи располагались недалеко от линии Земля-Солнце, т.е. наблюдалась конфигурация, удобная для изучения взаимодействий на дневной стороне магнитосферы Земли. Были отобраны моменты времени, когда один из спутников вел регистрацию в солнечном ветре, а другой пересекал магнитопаузу вблизи подсолнечной точки. Выбирались события, когда отклонение спутника от оси x не превышало $7 R_E$ по координатам y и z : при таком отклонении телесный угол, под которым спутник, пересекающий магнитопаузу, виден с Земли, не превышает $\pi/3$. Момент пересечения магнитопаузы фиксировался по характерным изменениям параметров плазмы и магнитного поля, определяемым по данным электростатического анализатора ESA (см. [McFadden et al. 2008]) и феррозондового магнетометра FGM (см. [Auster et al. 2008]) на спутнике. Параметры межпланетного магнитного поля (ММП) также определялись по данным FGM. Точность измерений FGM составляет 0.02 нТл. Были отобраны события, в которых не регистрировались существенные вариации параметров солнечного ветра: величина среднеквадратичного отклонения значения модуля магнитного поля от среднего за исследуемый период не превышала 2 нТл, скорость потока не превышала 650 км/с, а вариации скорости не превышали 10 км/с. При создании базы данных наблюдений в солнечном ветре исключались случаи, когда спутник находился в форшоке.

Было проведено сравнение параметров магнитного поля, зарегистрированных одним из спутников после пересечения магнитопаузы, с параметрами межпланетного магнитного поля, зарегистрированными другим спутником. В качестве анализируемых параметров использовались следующие величины: амплитуда и три компонента магнитного поля и часовой угол вектора магнитного поля. Для каждой из величин были рассчитаны средние значения и дисперсия.

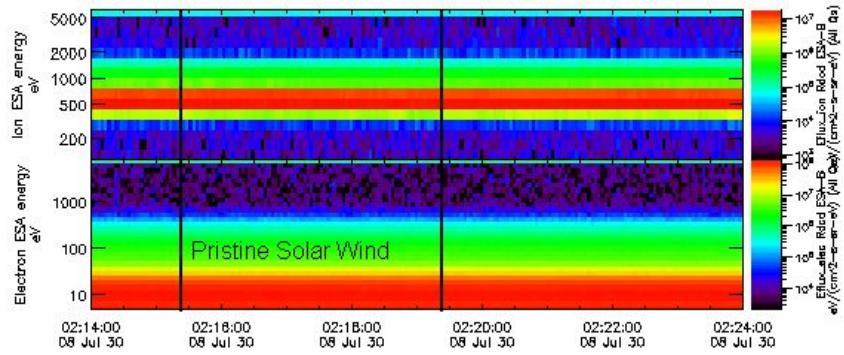
Для параметров магнитного поля вблизи магнитопаузы усреднение проводилось за период 30 и 90 секунд с момента пересечения магнитопаузы (который фиксировался

одновременно по изменениям параметров плазмы и магнитного поля). Приведены также значения магнитного поля, усредненные за оборот спутника, равный 3 с, т.е. поле непосредственно у магнитопаузы. Для параметров солнечного ветра усреднение проводилось за максимальный период 90 секунд с учетом сдвига на время распространения солнечного ветра от спутника, проводящего измерения перед форшоком, до магнитопаузы. Сдвиг рассчитывался как время прохождения солнечным ветром разности x -координат спутников в приближении радиального распространения солнечного ветра. Приборы ESA на спутниках проекта THEMIS не были рассчитаны на измерения параметров плазмы солнечного ветра. Поэтому данные по скорости солнечного ветра брались из базы данных OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Считалось, что скорость солнечного ветра не изменяется за время распространения от точки измерений до ударной волны. Было учтено, что в результате термализации в магнитослое скорость солнечного ветра уменьшается примерно в два раза. Считалось, что толщина магнитослоя составляет $\sim 2 R_E$. Для каждого случая временной сдвиг рассчитывался отдельно для конкретных координат спутников. Т.к. при расчете временного сдвига возможны ошибки порядка десятка секунд, усреднение величин в солнечном ветре производилось за максимальный период 90 секунд с целью их минимизации. Всего было проанализировано 100 событий.

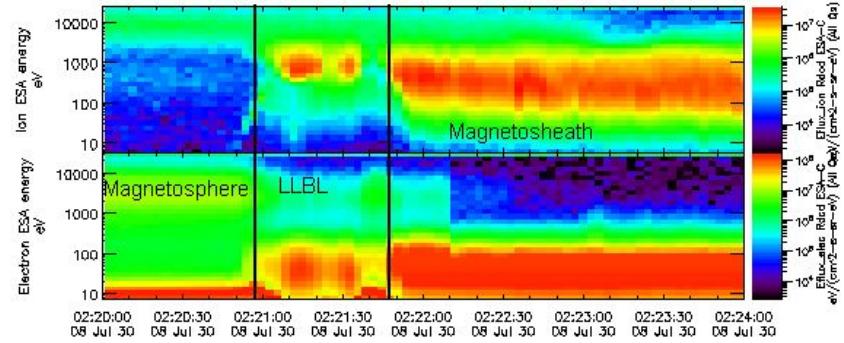
На рис. 2.1.1 в качестве примера типичного события приведено пересечение магнитопаузы и низкоширотного погранслоя (low latitude boundary layer - LLBL) спутниками проекта THEMIS 30 июля 2008 г. На рисунке показаны положения орбит спутников THEMIS-B и -C в GSM системе координат (панель а), спектrogramмы электронов и ионов со спутника THEMIS-B, находившегося за ударной волной (панель б), спектrogramмы со спутника THEMIS-C, пересекавшего LLBL и магнитопаузу (панель в). Спутник THEMIS-C из магнитосферы переходил в магнитослой. Вертикальными линиями на панели (б) выделен интервал пересечения LLBL спутником THEMIS-C. Вертикальные линии на панели (б) показывают интервал измерений в солнечном ветре спутником THEMIS-B, соответствующий выделенному интервалу на панели (в) с учетом временного сдвига на распространение солнечного ветра до магнитопаузы. Отметим, что скорость реального движения спутника намного меньше скоростей, с которыми происходит движение магнитопаузы и LLBL и наблюдается преимущественно движение погранслоев относительно спутника. Но в литературе обычно употребляются термины пересечение магнитопаузы и пограслоев.



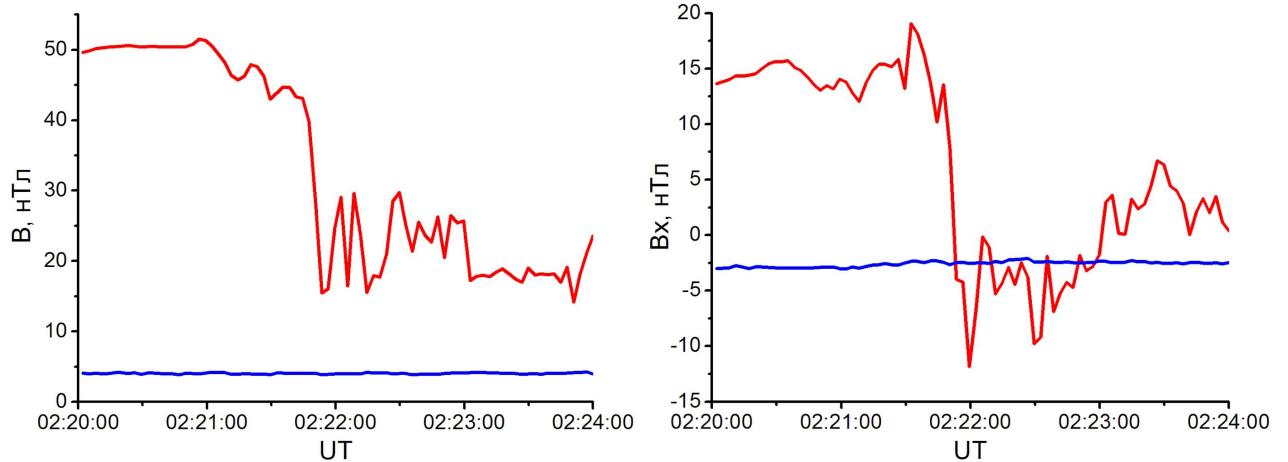
a)



б)



в)



г)

д)

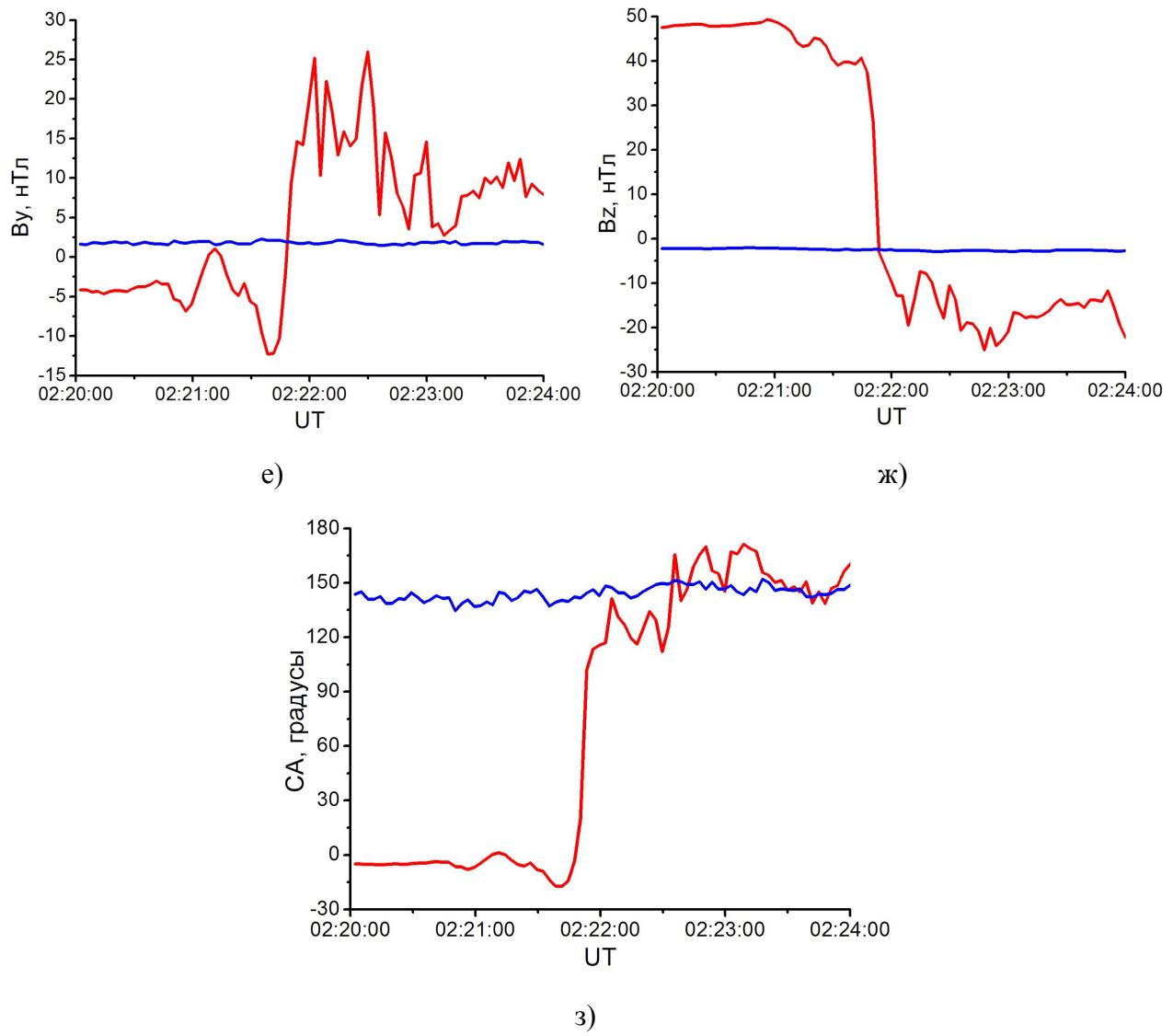
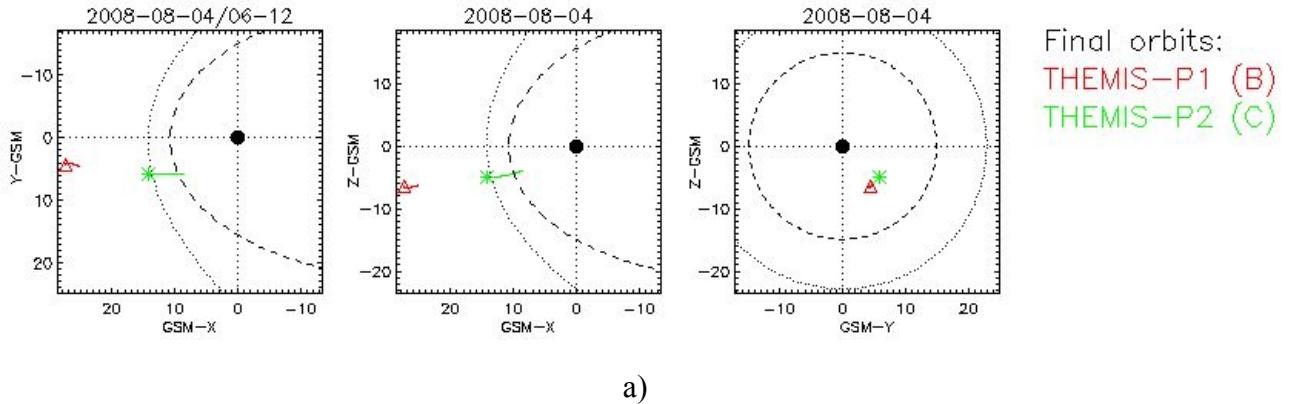


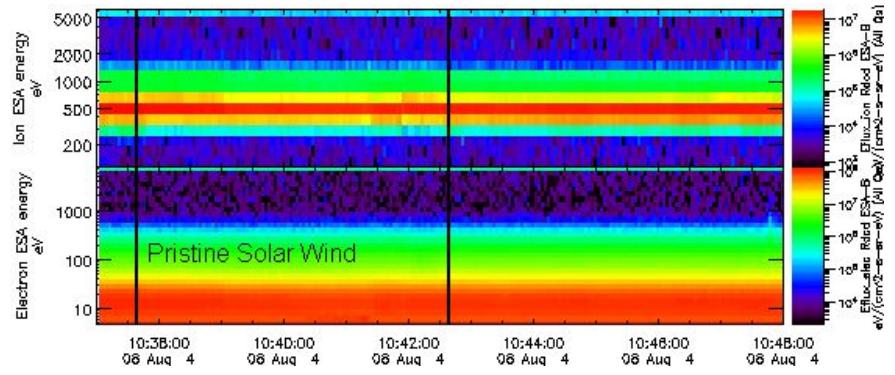
Рис. 2.1.1. Результаты измерений спутниками проекта THEMIS 30 июля 2008 г.: а) орбиты спутников, б) спектrogramмы ионов (верхняя) и электронов (нижняя) со спутника THEMIS-B, в) спектrogramмы с THEMIS-C, г) амплитуда, д) x-компоненты, е) y-компоненты, ж) z-компоненты, з) часовой угол магнитного поля. Значения у магнитопаузы показаны красной линией, в солнечном ветре – синей.

Ниже на рис. 2.1.1 на панелях (г-з) приведены соответствующие графики для амплитуды магнитного поля, трех его компонент и часового угла (данные со спутника, находившегося в СВ, смешены по времени, чтобы соответствовать данным у магнитопаузы). Красные кривые соответствуют измерениям в магнитослое, синие – в солнечном ветре. Пересечение 30 июля 2008 г. было достаточно четким, области различных популяций плазмы на энергетических спектrogramмах хорошо разделены. В течение 50 с наблюдался низкоширотный погранслой (LBL). Сначала спутник THEMIS-C находился в магнитосфере,

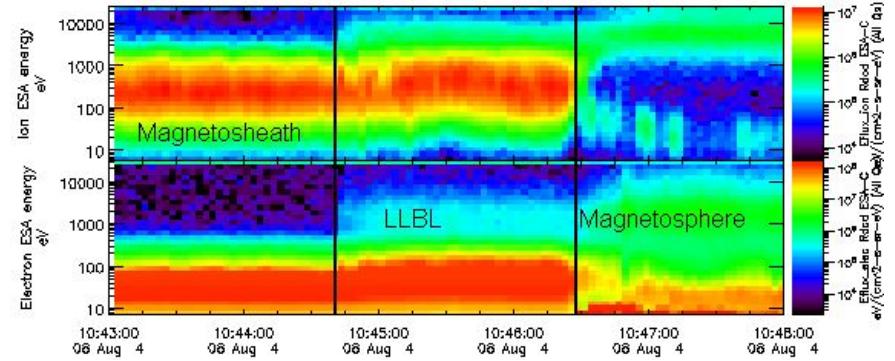
о чем свидетельствуют потоки электронов с энергией ~ 1 кэВ и ионов с энергией ~ 10 кэВ. В правой части спектрограммы наблюдаются ионы и электроны магнитослоя, характеризующиеся высокой концентрацией и средней энергией < 1 кэВ. LLBL характеризуется как область переходных значений параметров плазмы и магнитного поля. По данным THEMIS-B наблюдался спокойный солнечный ветер. По OMNI скорость потока составляла 356 км/с, рассчитанный временной сдвиг 320 с. Амплитуда межпланетного магнитного поля составляла ~ 4.1 нТл, стандартное отклонение (SD) < 0.1 нТл (см. панель г)). B_z в солнечном ветре ~ -2.7 нТл (SD ~ 0.1 нТл), B_z у магнитопаузы сразу после пересечения ~ -20 нТл (см. панель ж)), при усреднении за 30 с ~ -13 нТл (SD ~ 4 нТл), при усреднении за 90 с ~ -16 нТл (SD ~ 4 нТл). Часовой угол в СВ составлял $\sim 147^\circ$ (SD $\sim 3^\circ$), сразу после пересечения $\sim 131^\circ$, а при усреднении за 90 с $\sim 146^\circ$ (SD $\sim 18^\circ$) (см. панель з)). Видно, что в данном случае знак z -компоненты магнитного поля в магнитослое у магнитопаузы совпадает со знаком B_z в СВ.

На рис. 2.1.2 приведен другой пример типичного пересечения магнитопаузы – событие 4 августа 2008 года. LLBL наблюдается в течение 1 мин 20 с (см. панель в)). Солнечный ветер также был спокойным, скорость потока 337 км/с, смещение по времени 338 с. Амплитуда межпланетного магнитного поля составляла ~ 3.1 нТл, SD ~ 0.3 нТл (см. панель г)). Однако в отличие от события 30 июля знак B_z в данном случае меняется на противоположный по сравнению с солнечным ветром.

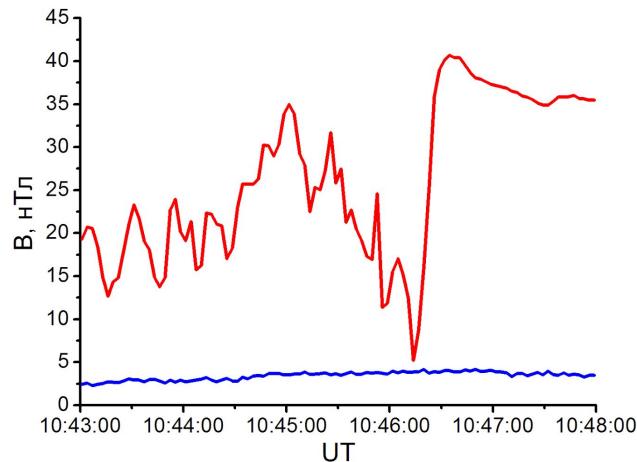




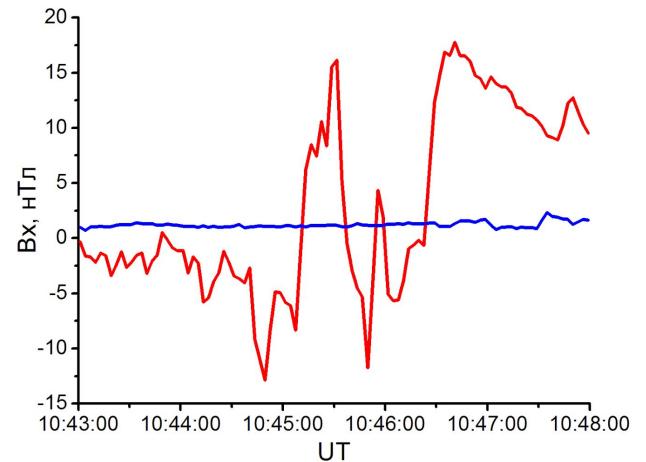
б)



в)



г)



д)

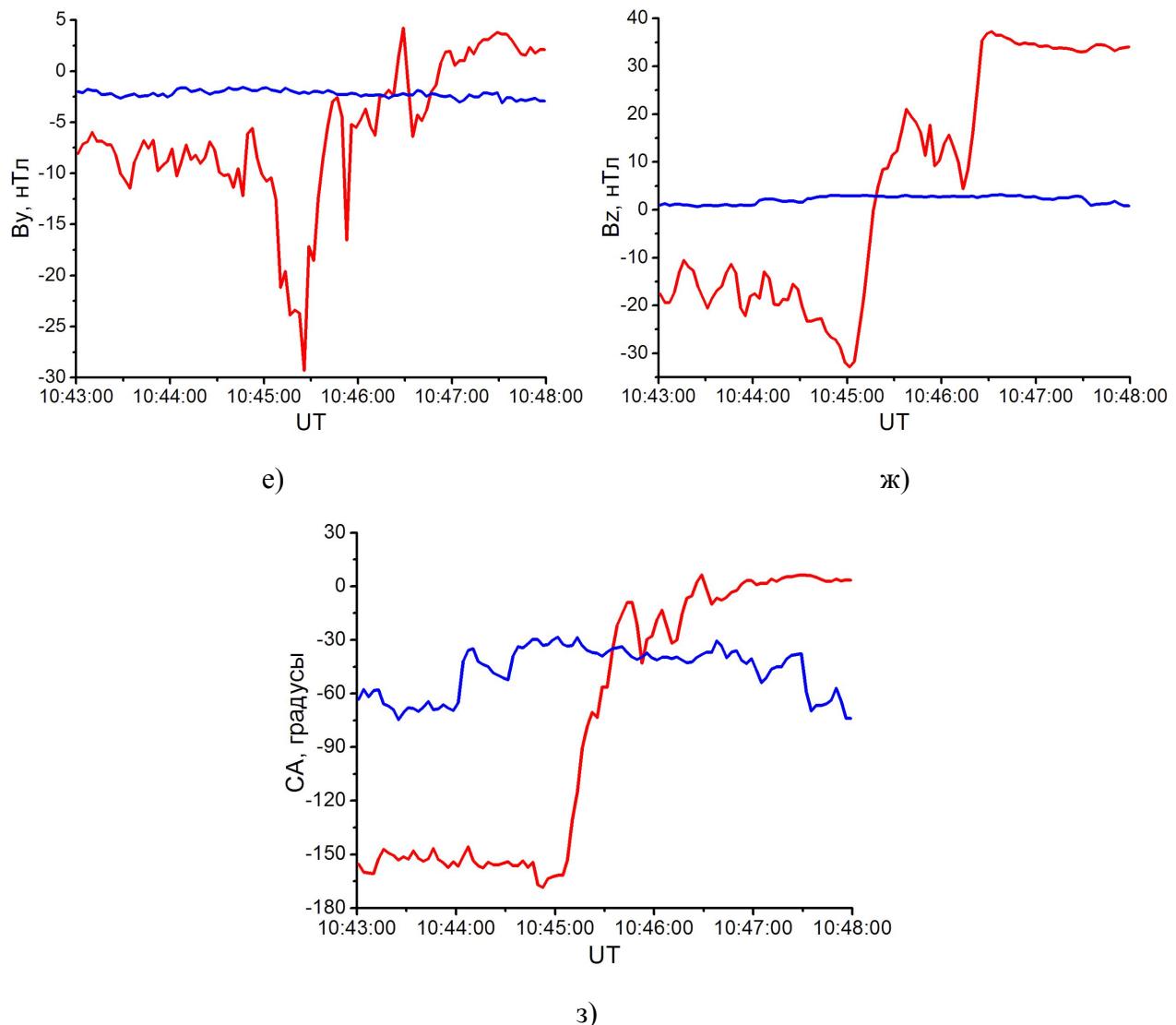


Рис. 2.1.2. Результаты измерений спутниками проекта THEMIS 4 августа 2008 г.

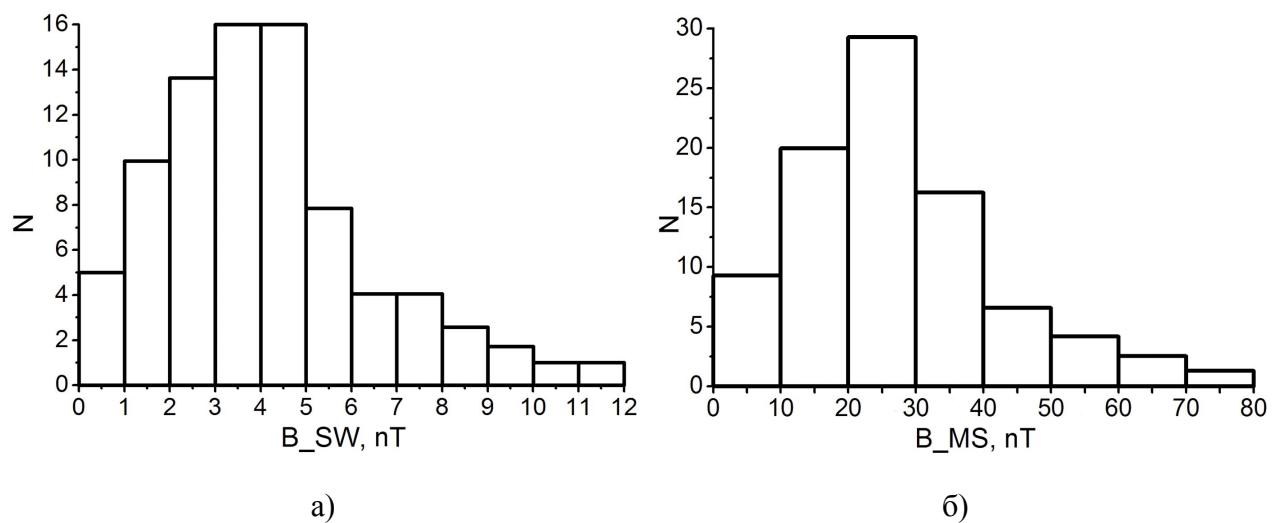
Обозначения те же, что и на рис. 2.1.1.

В солнечном ветре величина B_z в среднем за 90 секунд составляет 2.0 нТл, а у магнитопаузы сразу после пересечения достигается значение ~ -33 нТл, среднее значение за 30 секунд после пересечения составляет ~ -27 нТл ($SD \sim 4$ нТл), а при усреднении за 90 секунд ~ -21 нТл ($SD \sim 6$ нТл). Часовой угол в СВ составлял $\sim -47^\circ$ ($SD \sim 15^\circ$), сразу после пересечения $\sim -162^\circ$, а при усреднении за 90 с $\sim -156^\circ$ ($SD \sim 5^\circ$) (см. панель 3)). Таким образом, в данном случае наблюдалось существенное несовпадение ориентации магнитного поля в солнечном ветре и у магнитопаузы.

Ниже приводятся результаты статистического анализа 100 подобных событий. Каждое событие анализировалось отдельно по описанной выше методике.

2.2. Зависимости компонент магнитного поля перед магнитопаузой от соответствующих величин в солнечном ветре

На Рис. 2.2.1 – 2.2.10 приведены статистические результаты для параметров магнитного поля: модуля вектора поля, трех его компонент и часового угла для 100 исследованных событий. Рисунки 2.2.1 – 2.2.5 содержат гистограммы распределений параметров магнитного поля: сначала – распределение в солнечном ветре, затем – три распределения величин у магнитопаузы для разных интервалов усреднения. В первом случае были взяты значения параметров через 3 секунды (т.е. одно измерение спутника) после пересечения границы магнитопаузы, во втором – усредненные значения параметров за 30 секунд после пересечения (10 отсчетов прибора), в третьем случае усреднение проводилось за период 90 секунд (30 отсчетов). Для параметров солнечного ветра усреднение проводилось за период 90 секунд с учетом сдвига на время распространения солнечного ветра до магнитопаузы. Выбор интервала усреднения связан с возможными ошибками в определении времени распространения солнечного ветра от одного спутника до другого и сравнительно медленными изменениями параметров солнечного ветра по сравнению с магнитослоем. При этом усреднение в СВ проводилось за максимальный используемый период. Черные точки соответствуют мгновенным значениям после пересечения магнитопаузы, синие и красные – усредненным за 30 и 90 секунд соответственно.



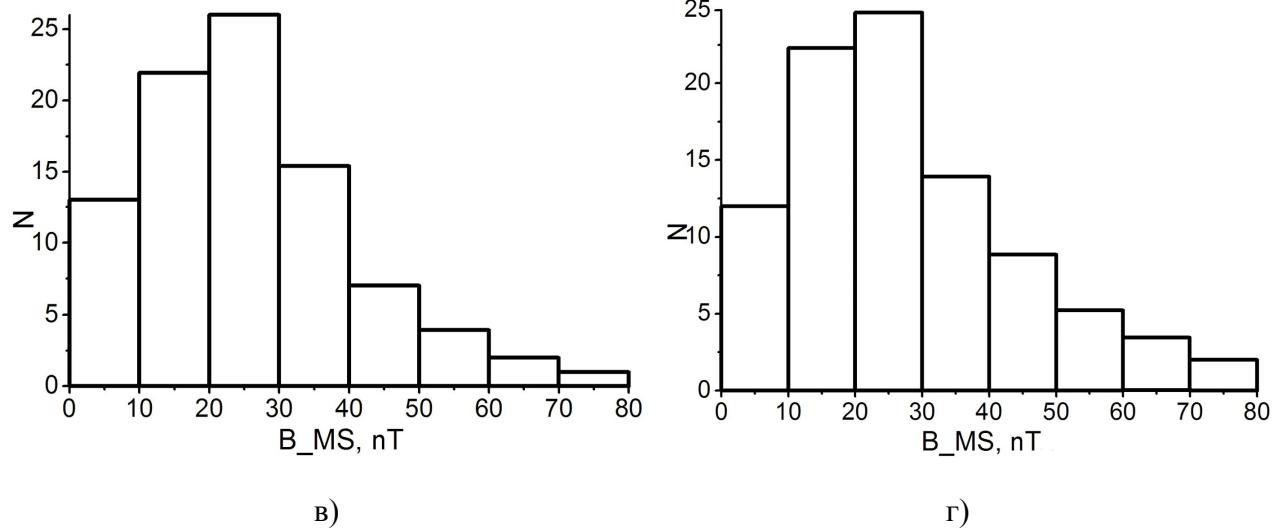
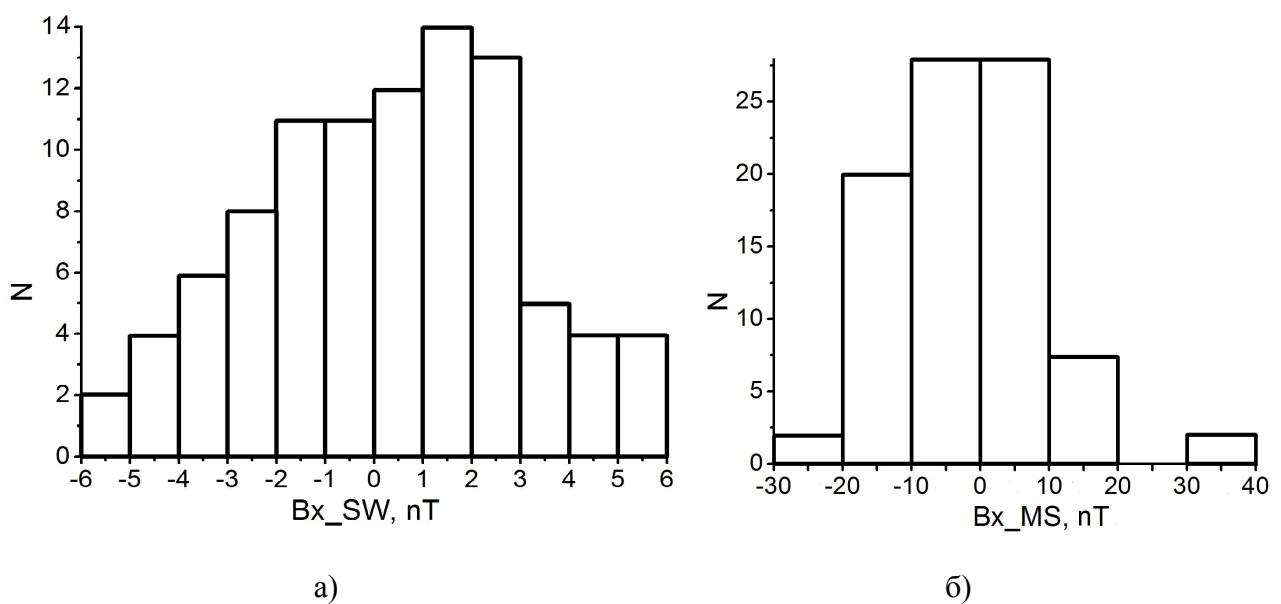
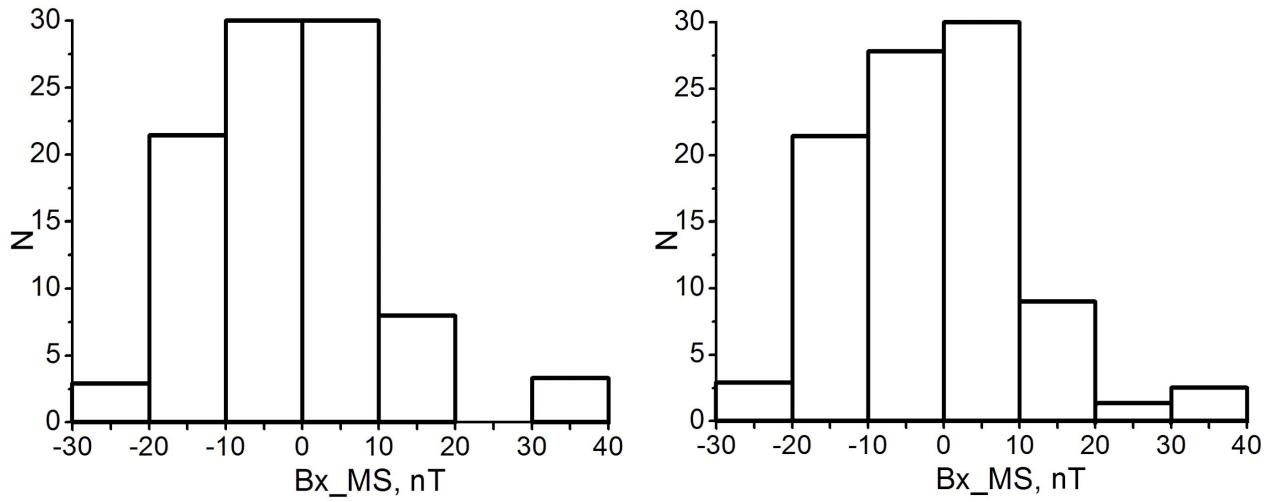


Рис. 2.2.1. Гистограммы распределения амплитуд магнитного поля для рассмотренного набора событий а) в солнечном ветре, б) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, в) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, г) усреднение за период 90 секунд.

Для усредненных значений амплитуды магнитного поля (см. Рис. 2.2.1) у магнитопаузы максимум распределения приходится на интервал от 20 до 30 нТл (см панели б, в, г). Максимум в солнечном ветре приходится на ~ 4 нТл (см панель а), т.о. усиление составляет ~ 6 раз.



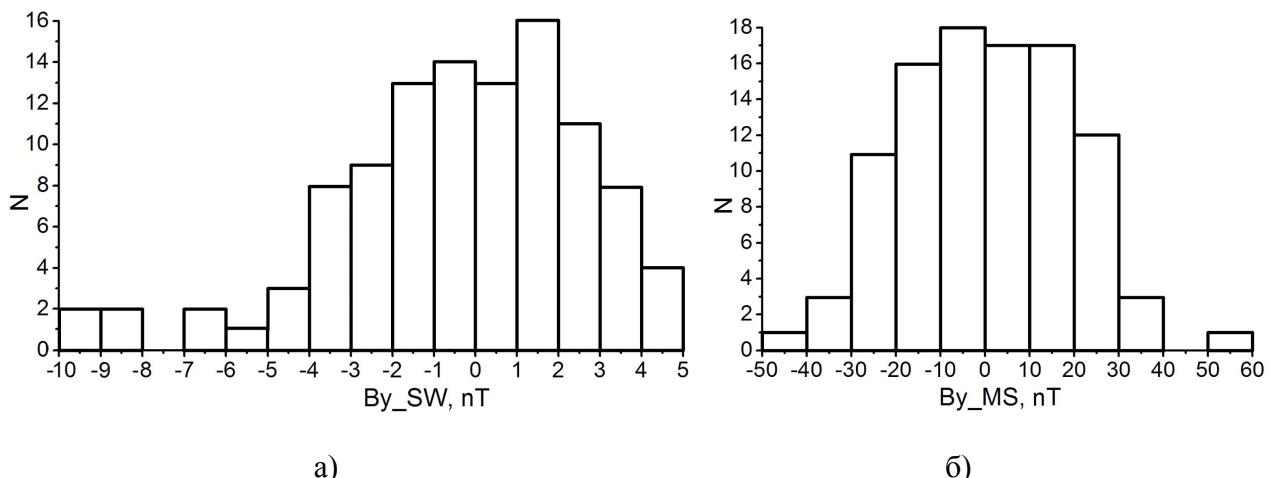


в)

г)

Рис. 2.2.2. Гистограммы распределения x-компоненты магнитного поля для рассмотренного набора событий а) в солнечном ветре, б) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, в) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, г) усреднение за период 90 секунд.

Для x-компоненты поля (Рис. 2.2.2) наблюдается преобладание отрицательных значений в солнечном ветре для рассматриваемого периода. У магнитопаузы распределения также несколько смешены в отрицательную сторону, но максимумы лежат около нуля, что соответствует представлению о магнитопаузе как о тангенциальном разрыве.



а)

б)

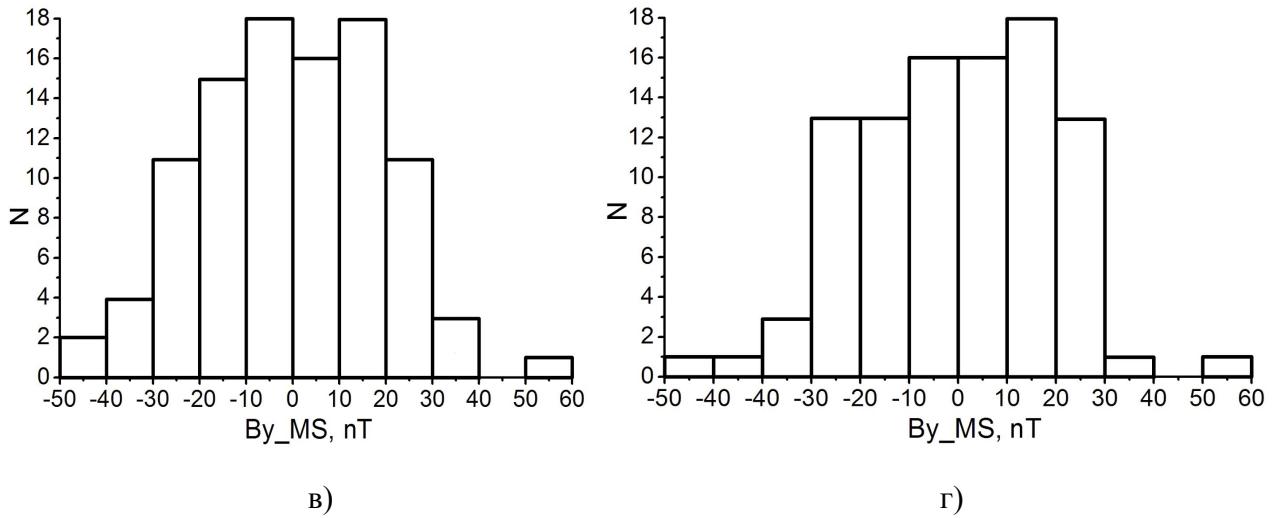
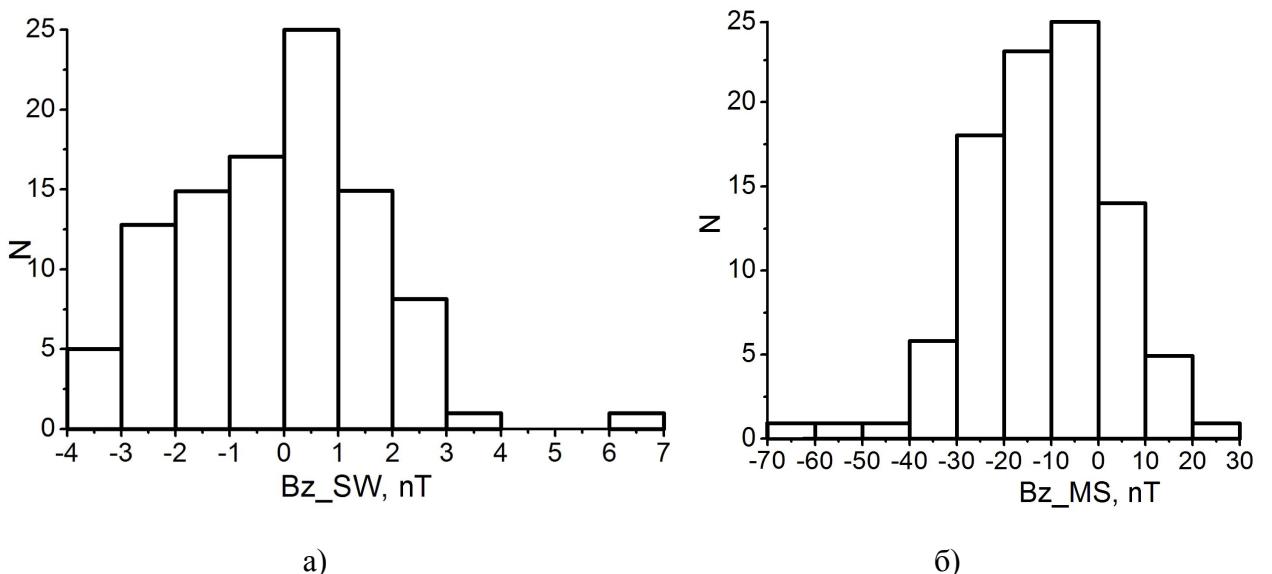


Рис. 2.2.3. Гистограммы распределения у-компоненты магнитного поля для рассмотренного набора событий а) в солнечном ветре, б) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, в) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, г) усреднение за период 90 секунд.

Распределения для у-компоненты поля у магнитопаузы в целом соответствуют распределению в солнечном ветре по количеству положительных и отрицательных событий (Рис. 2.2.3). Картина распределения качественно не меняется с увеличением периода усреднения.



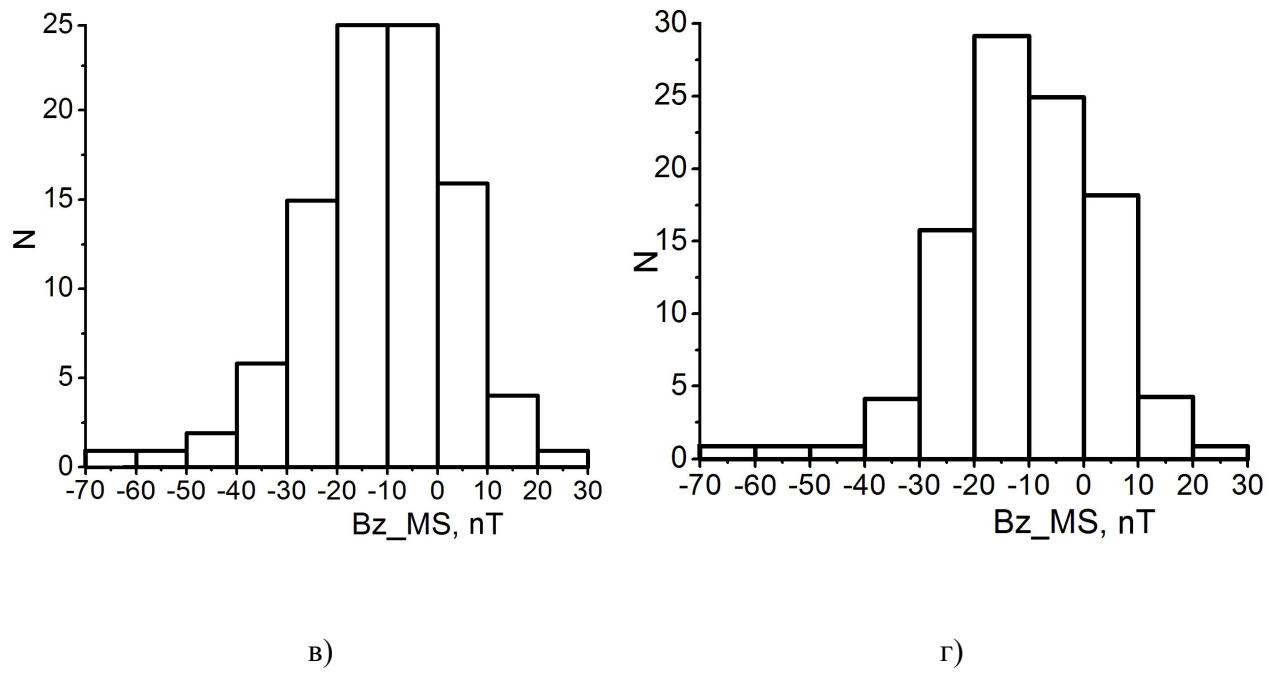


Рис. 2.2.4. Гистограммы распределения z -компоненты магнитного поля для рассмотренного набора событий а) в солнечном ветре, б) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, в) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, г) усреднение за период 90 секунд.

Наиболее интересны гистограммы для z -компоненты магнитного поля (см. Рис. 2.2.4).

В то время как в солнечном ветре одинаковое число событий с положительным и отрицательным B_z (50 отрицательных и 50 положительных событий) (Рис. 2.2.4.а), в распределениях у магнитопаузы отрицательные события явно преобладают (80 против 20 для мгновенных значений (Рис. 2.2.4.б), 78 против 22 для 30-секундного и 77 против 23 для 90-секундного усреднения) (Рис. 2.2.4.в, г). Максимум распределения в СВ лежит около нуля, у магнитопаузы для мгновенных значений максимум приходится на ~ -10 нТл, при усреднении максимум лежит между -10 и -20 нТл.

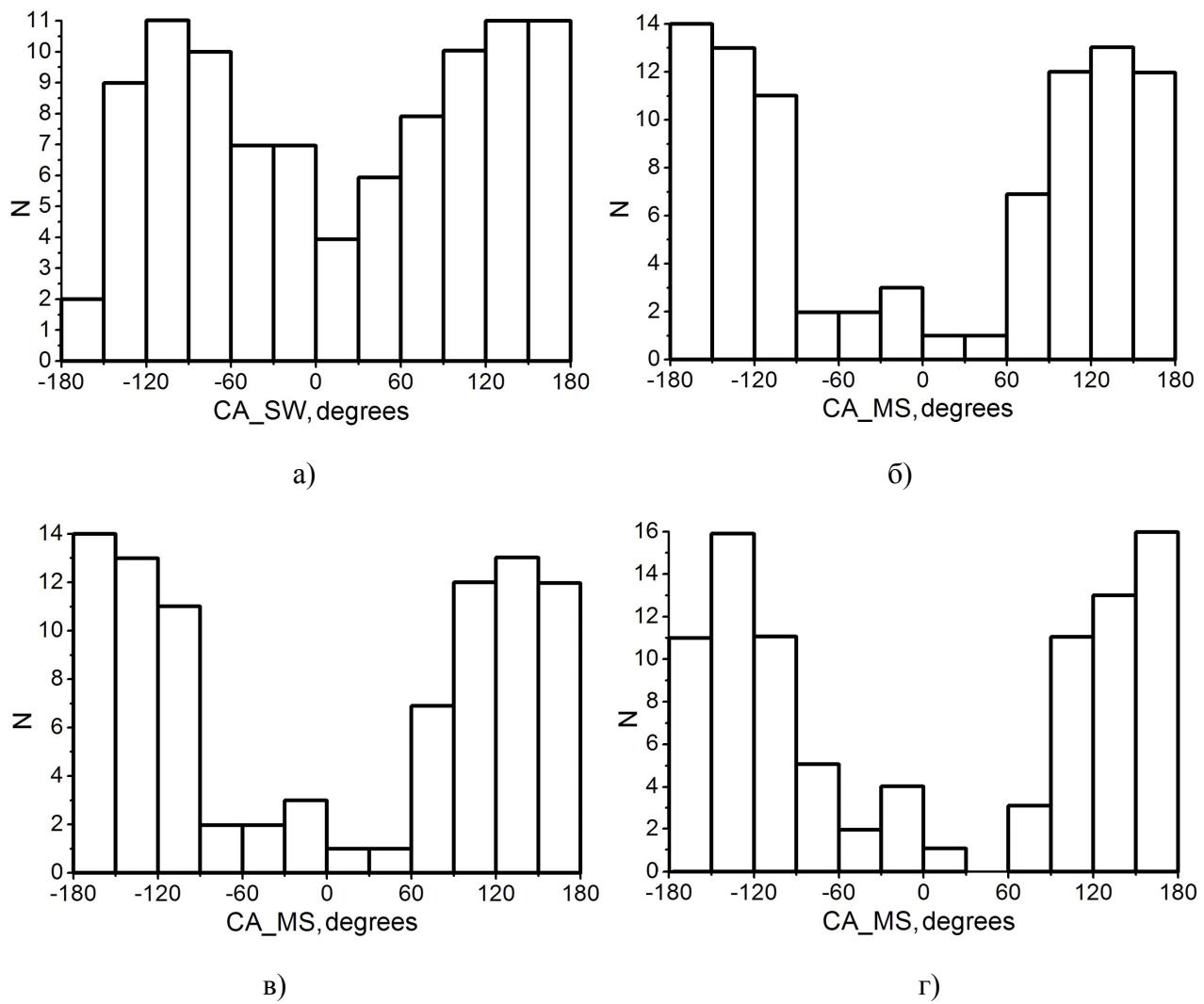


Рис. 2.2.5. Гистограммы распределения часового угла магнитного поля для рассмотренного набора событий а) в солнечном ветре, б) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, в) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, г) усреднение за период 90 секунд.

Для часового угла (Рис. 2.2.5) наблюдается равномерное распределение событий в солнечном ветре и преобладание углов у магнитопаузы, близких к 180 градусам. Причем, чем больше период усреднения, тем равномернее становится картина распределения у магнитопаузы.

На Рис. 2.2.6 – 2.2.10 приведены графики зависимостей параметров магнитного поля у магнитопаузы от параметров солнечного ветра. Для каждого параметра приведен набор из трех зависимостей. Первое распределение построено для мгновенных значений параметра через три секунды после пересечения спутником магнитопаузы (одно измерение прибора), второе – для значений, усредненных за период 30 секунд после пересечения магнитопаузы,

третье – для значений, усредненных за период 90 секунд. Приведены зависимости от соответствующих усредненных параметров солнечного ветра. Усреднение в солнечном ветре проведено за максимальный период 90 секунд (с учетом сдвига на время распространения солнечного ветра до магнитопаузы) с целью минимизировать ошибки за счет отклонения расчетного времени задержки СВ от реального. Для каждой точки также приведены ошибки, рассчитанные как среднеквадратичное отклонение за период усреднения. На графиках для мгновенных значений нанесены только ошибки для усреднения в солнечном ветре, т.к. усреднения вблизи магнитопаузы не проводилось. Цветом показано разделение событий в зависимости от значения угла между направлением межпланетного магнитного поля (ММП) и нормали к ударной волне Θ_{Bn} . Синие точки на рисунках соответствуют случаям пересечения магнитопаузы, в которых угол Θ_{Bn} был больше 60 градусов (квазиперпендикулярная ударная волна), красные соответствуют пересечениям с малыми значениями угла $\Theta_{Bn} < 30$ градусов (квазипараллельная ударная волна), серые - события с $30 < \Theta_{Bn} < 60$ соответственно.

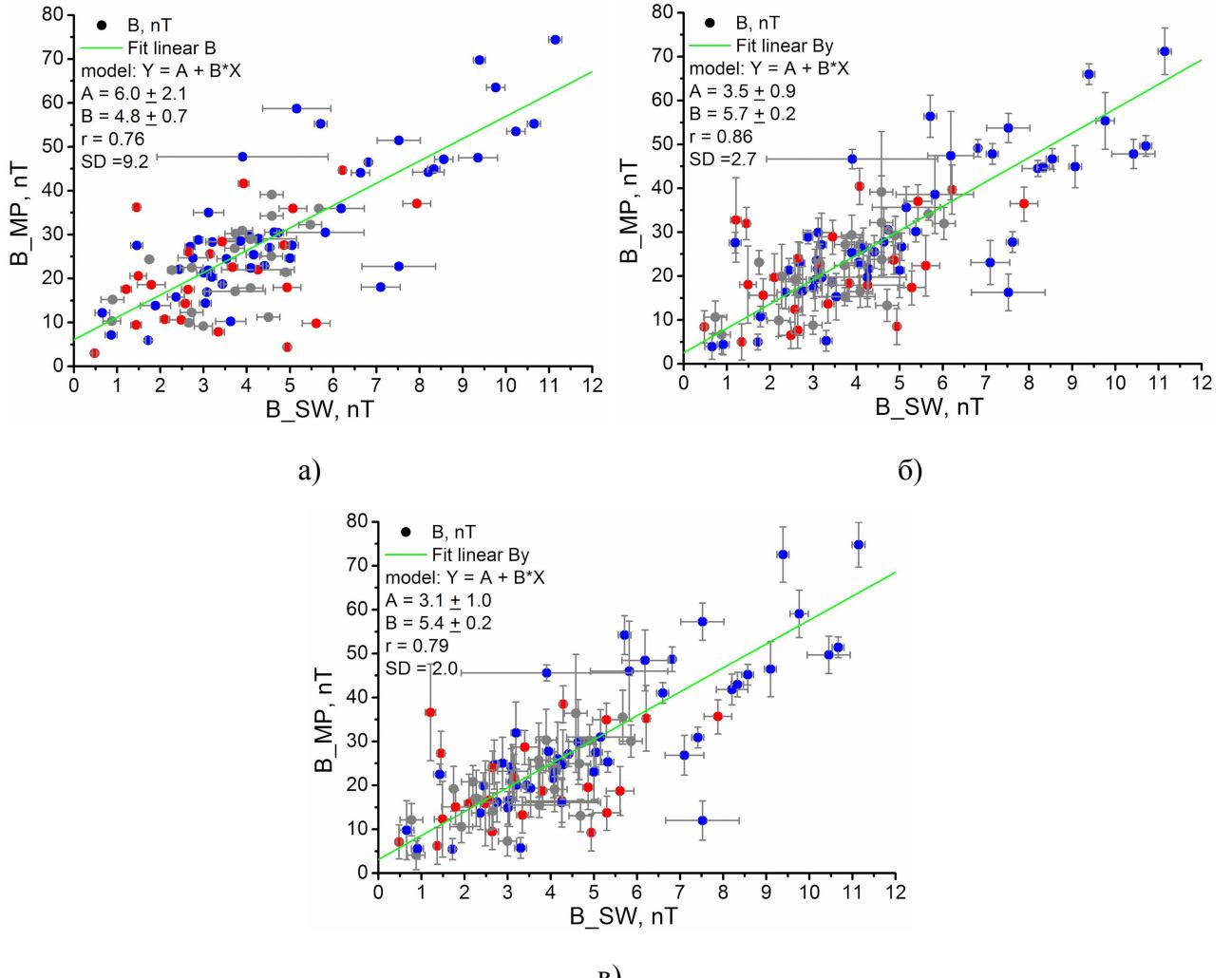


Рис. 2.2.6. Зависимость амплитуды магнитного поля у магнитопаузы для рассмотренного набора событий а) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, б) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, в) усреднение за период 90 секунд – от амплитуды в солнечном ветре.

Для амплитуды магнитного поля выявлена тенденция к увеличению значений у магнитопаузы при больших значениях амплитуды в солнечном ветре. С увеличением времени усреднения картина распределения принципиально не меняется.

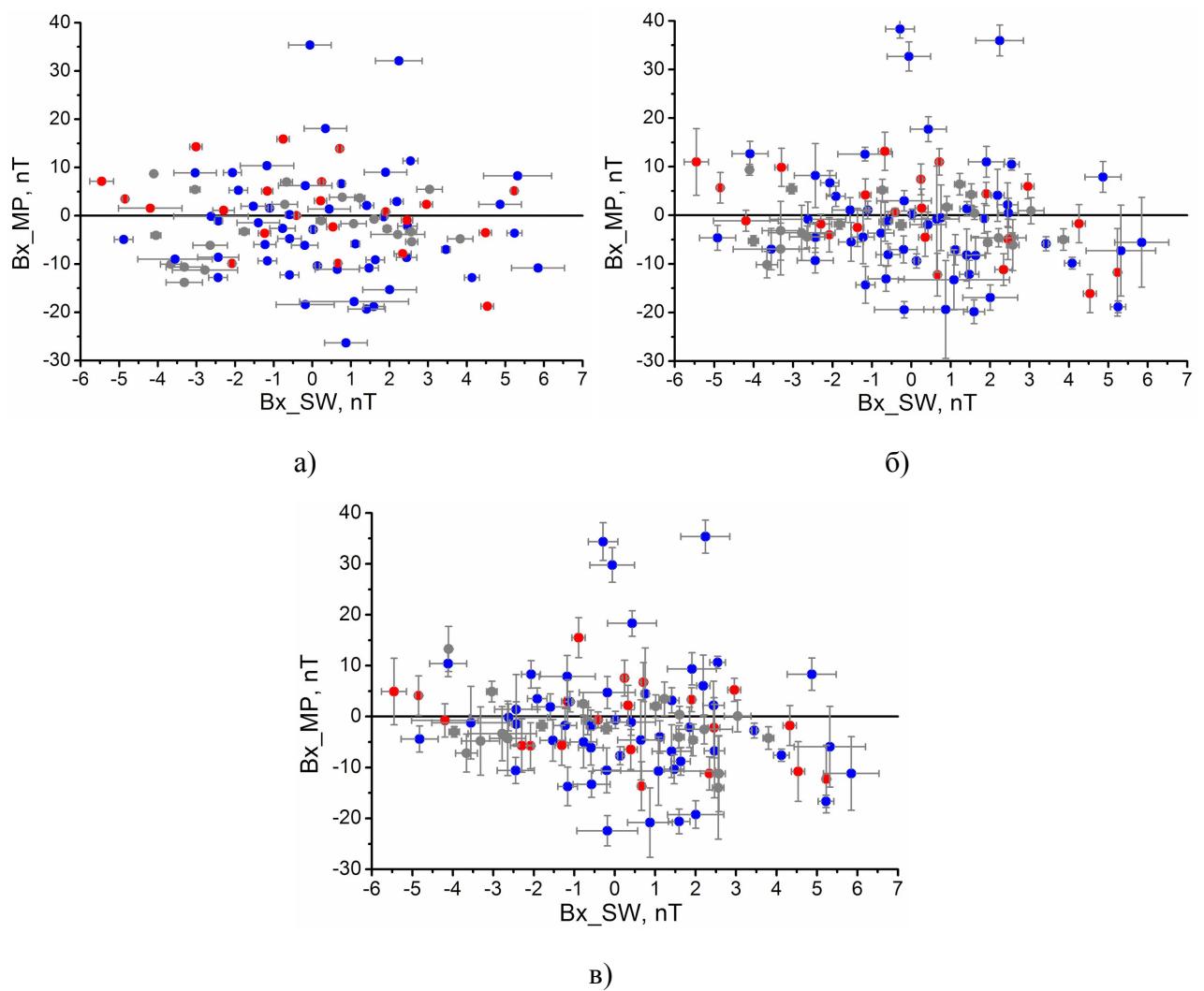


Рис. 2.2.7. Зависимость x-компоненты магнитного поля у магнитопаузы для рассмотренного набора событий а) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, б) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, в) усреднение за период 90 секунд – от x-компоненты в солнечном ветре.

По результатам исследования x -компоненты поля у магнитопаузы не зависит от соответствующей величины в солнечном ветре и в среднем колеблется около нуля, что соответствует представлению о магнитопаузе как о тангенциальном разрыве. Так же, как и для амплитуды поля, увеличение времени усреднения не изменяет характера распределения точек на графике.

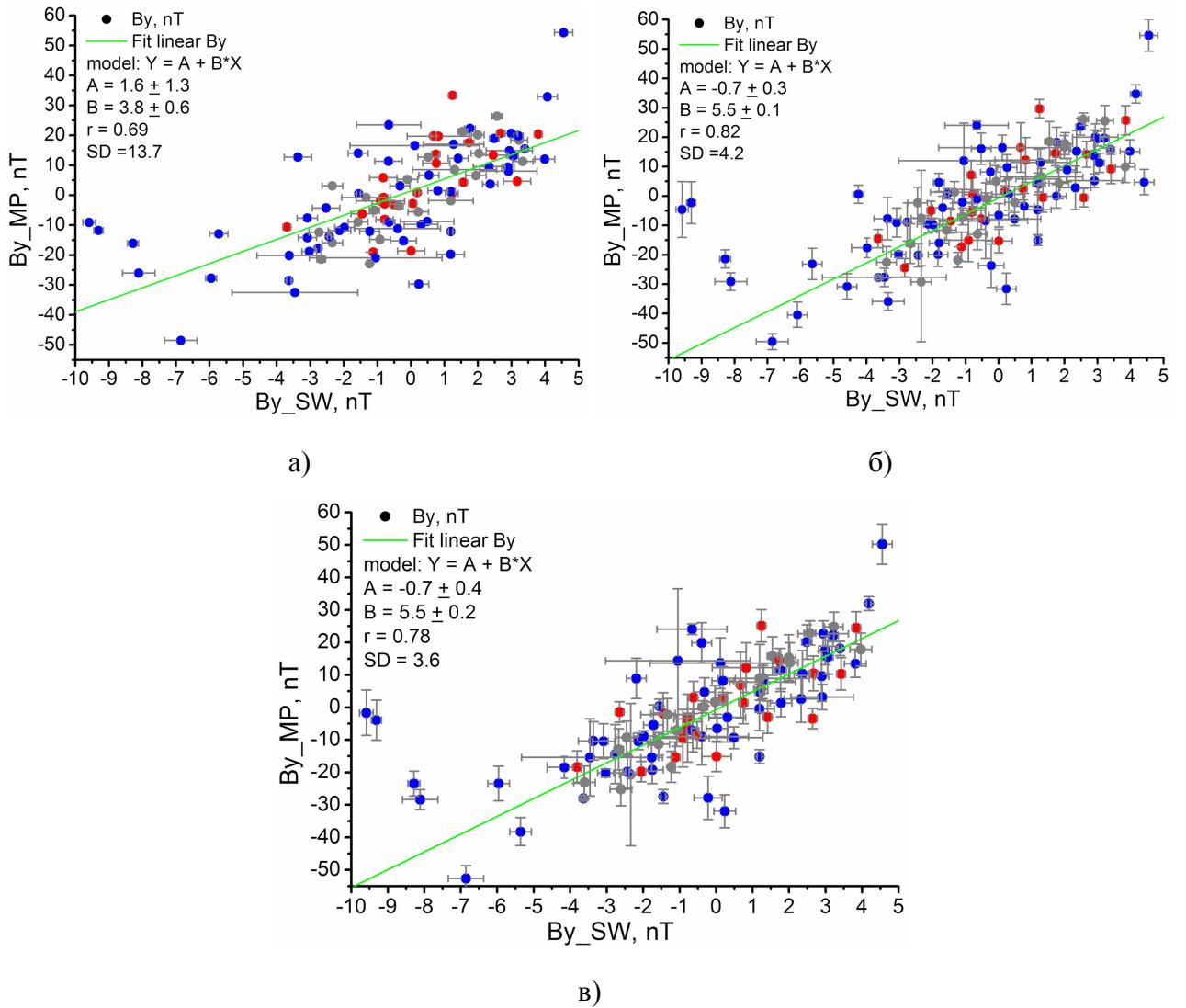


Рис. 2.2.8. Зависимость y -компоненты магнитного поля у магнитопаузы для рассмотренного набора событий, а) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, б) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, в) усреднение за период 90 секунд – от y -компоненты в солнечном ветре. На всех графиках нанесена линейная аппроксимация и указаны значения ее параметров.

Для y -компоненты магнитного поля у магнитопаузы (Рис. 2.2.8) получена хорошая линейная зависимость от ее величины в солнечном ветре, причем с увеличением периода усреднения увеличивается коэффициент корреляции, и уменьшаются ошибки параметров аппроксимации и стандартное отклонение. Для мгновенных значений после пересечения для аппроксимации по модели $B_{y_MP} = a + b \cdot B_{y_SW}$ получены значения параметров $a = 1.6 \pm 1.3$ нТл, $b = 3.8 \pm 2.6$, SD = 13.7 нТл, коэффициент корреляции $r = 0.69$ (Рис. 2.2.8.а). Для усредненных за 30 с значений $a = -0.7 \pm 0.3$ нТл, $b = 5.5 \pm 0.1$, SD = 4.2 нТл, $r = 0.82$ (Рис. 2.2.8.б). Для усредненного за период 90 секунд распределения $a = -0.7 \pm 0.4$ нТл, $b = 5.5 \pm 0.2$, SD = 3.6 нТл, $r = 0.78$ (Рис. 2.2.8.в). Все три аппроксимации совпадают в пределах ошибок.

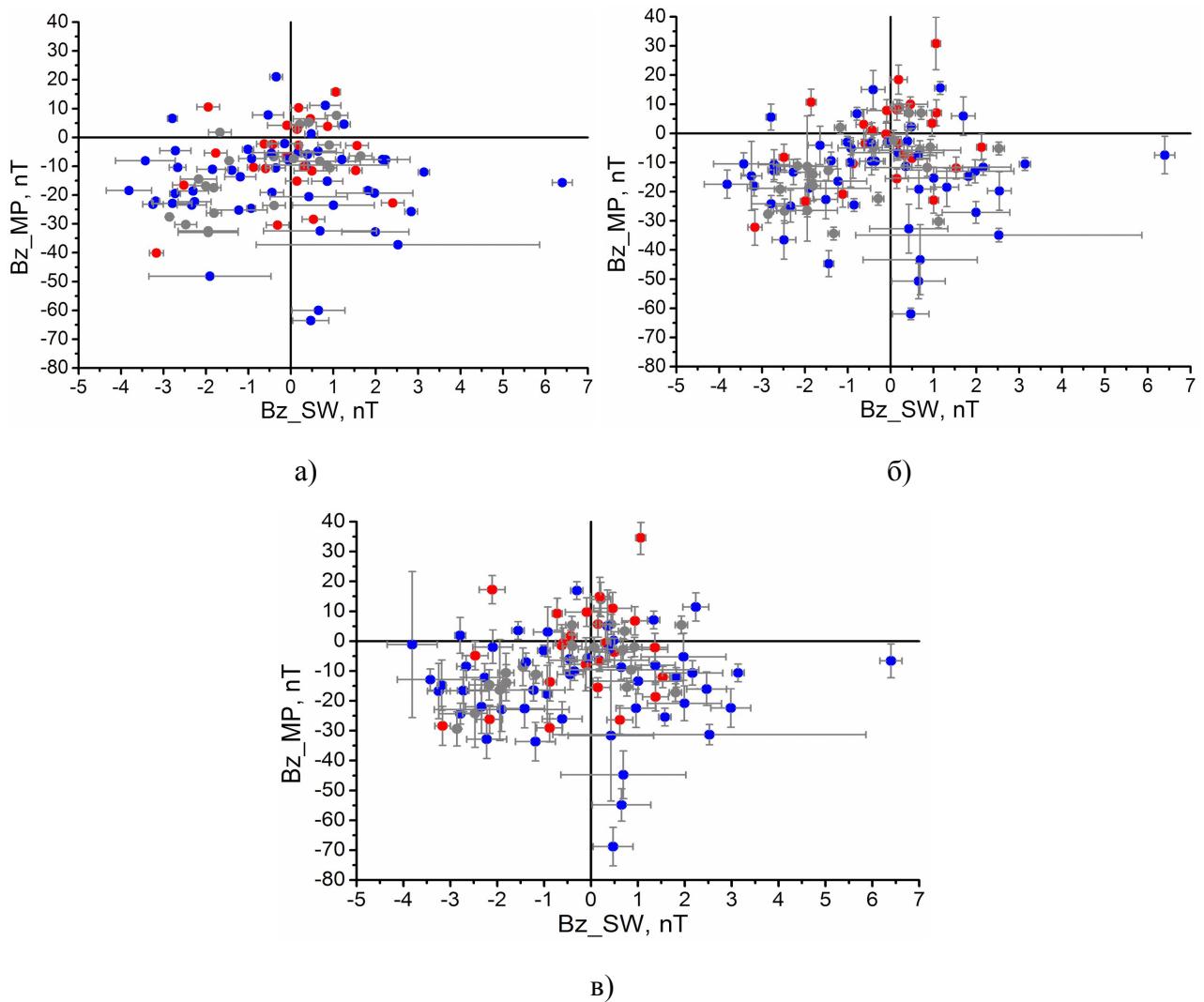


Рис. 2.2.9. Зависимость z -компоненты магнитного поля у магнитопаузы для рассмотренного набора событий, а) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, б) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, в) усреднение за период 90 секунд – от z -компоненты в солнечном ветре.

Наиболее интересны результаты, полученные для z -компоненты магнитного поля (см Рис. 2.2.9). Наблюдается нечеткая тенденция к возрастанию величины этой компоненты с увеличением соответствующего значения в солнечном ветре. Однако примерно в трети случаев (39 из 100 для мгновенных значений параметров, 33 из 100 для усредненных за период 30 секунд и 39 из 100 для усредненных за 90 секунд величин) знак z -компоненты поля у магнитопаузы меняется по сравнению со знаком поля в солнечном ветре. В нескольких случаях (6 - 8) с отрицательного значения в солнечном ветре на положительное у магнитопаузы.

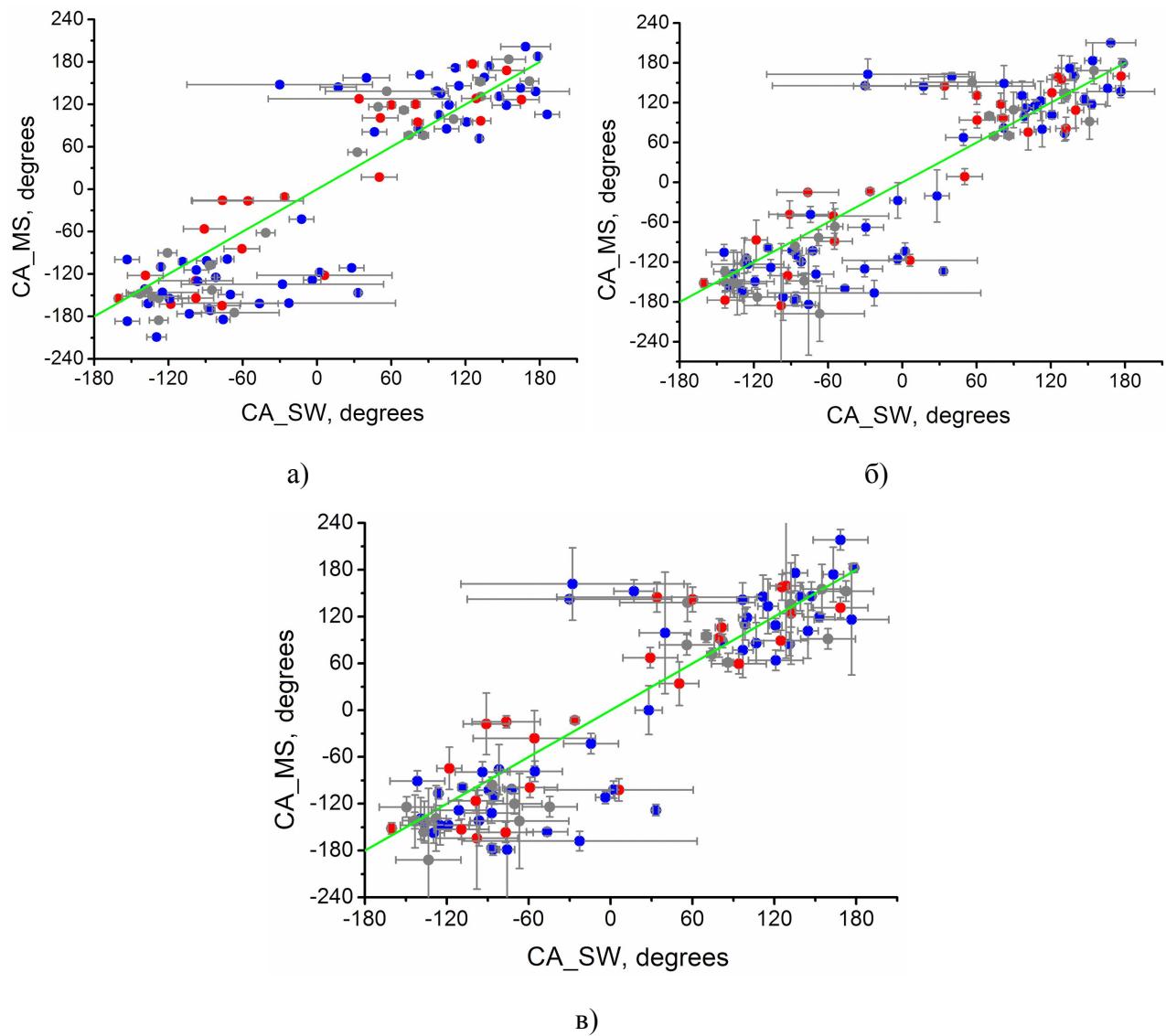


Рис. 2.2.10. Зависимость часового угла магнитного поля у магнитопаузы для рассмотренного набора событий, а) через 3 секунды после пересечения магнитопаузы, б) усреднение за период 30 секунд с момента пересечения, в) усреднение за период 90 секунд – от часового угла в солнечном ветре. На всех графиках нанесена прямая, соответствующая равенству часовых углов.

При рассмотрении изменения часового угла у магнитопаузы по сравнению с его значением в солнечном ветре были получены графики, отображенные на Рис. 2.2.10. Для наглядности на всех графиках приведена линия равных значений часовых углов в солнечном ветре и у магнитопаузы, соответствующая модели драпировки. Наблюдается значительный разброс значений часовых углов.

Ниже приведена таблица несоответствий часовых углов у магнитопаузы и в солнечном ветре. Нужно отметить, что примерно в 20% случаев наблюдались отклонения более чем на 90 градусов по сравнению с первоначальным направлением вектора магнитного поля.

Таблица 1

Число случаев с отклонением, большим чем	Для мгновенных значений	Для 30-секундного усреднения	Для 90-секундного усреднения
20 градусов	73 событий (73%)	61 событий (61%)	60 событий (60%)
30 градусов	58 событий (58%)	54 событий (54%)	45 событий (45%)
60 градусов	27 событий (27%)	28 событий (28%)	28 событий (28%)
90 градусов	20 событий (20%)	21 событий (21%)	17 событий (17%)

2.3. Уровень флюктуаций в случае квазипараллельных и квазиперпендикулярных ударных волн

В магнитослое сильно флюктуируют магнитное поле и плазменные параметры. Часто наблюдается режим, при котором $\langle B^2 \rangle / B^2 \sim 1$ [Lucek et al., 2005]. Источниками флюктуаций магнитного поля являются турбулентный солнечный ветер, область форшока околоземной ударной волны, сама ударная волна и раскачка неустойчивостей непосредственно в магнитослое и на магнитопаузе.

В ряде работ было показано [Balogh et al., 2005; Застенкер, 2008; Shevrev and Zastenker, 2005], что уровень флюктуаций параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое сильно зависит от угла между направлением межпланетного магнитного поля (ММП) и нормали к ударной волне Θ_{Bn} в том месте, где данный объем плазмы вошел в магнитослой. При переходе от квазипараллельной к квазиперпендикулярной ударной волне

уровень флюктуаций снижается. Схематический рис. 2.3.1 [Balogh et al., 2005] и рис. 2.3.2 из обзора Застенкер [2008] (см. [Shevrev and Zastenker, 2005]) иллюстрирует такую зависимость. При переходе от квазипараллельной к квазиперпендикулярной ударной волне уровень флюктуаций снижается. Существование зависимости уровня флюктуаций от положения области наблюдений за квазиперпендикулярной и квазипараллельной ударными волнами должно было бы сказаться на зависимости изменения часового угла у магнитопаузы от часового угла в солнечном ветре.

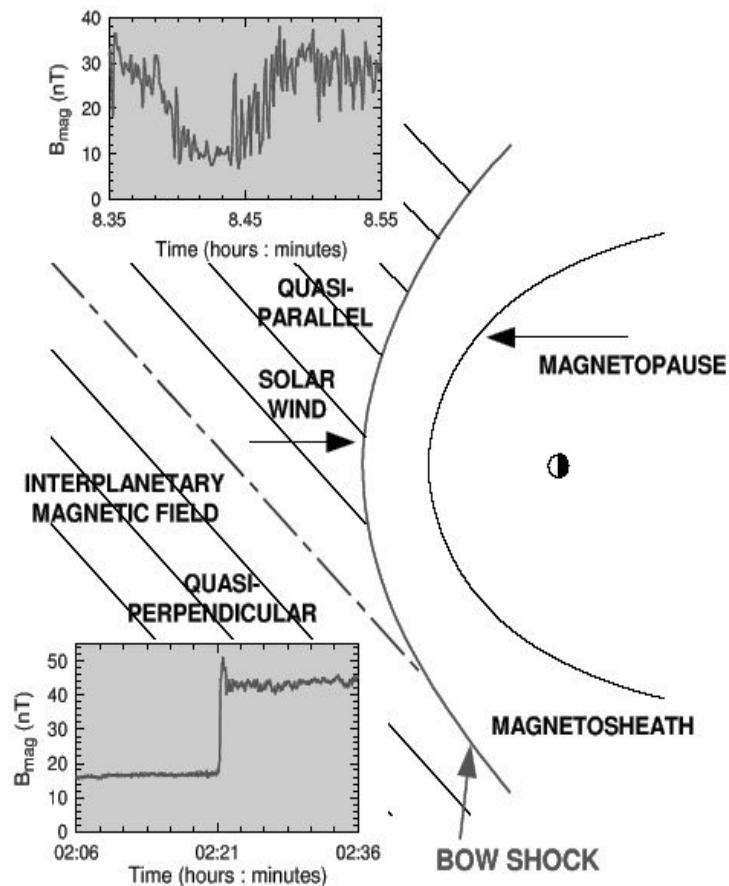


Рис. 2.3.1. Схема, иллюстрирующая изменения магнитного поля за квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударной волнами [Balogh et al., 2005].

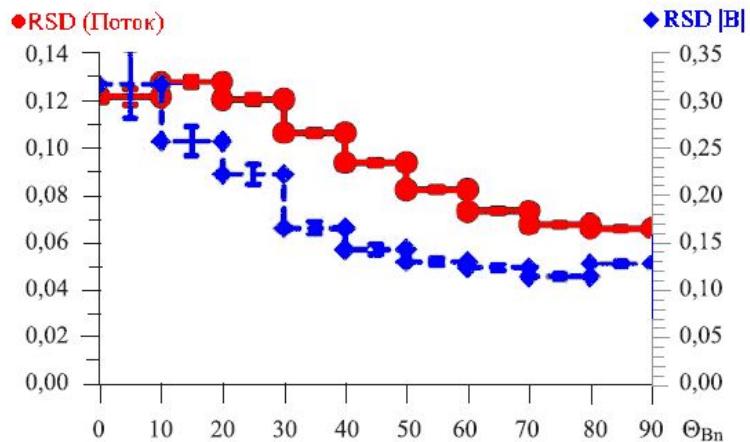


Рис. 2.3.2. Зависимость уровня относительных вариаций потока RSD (поток) и уровня относительных вариаций модуля магнитного поля RSD $|B|$ от угла Θ_{Bn} [Застенкер, 2008].

На рис. 2.3.3 показана зависимость разности значений часового угла в СВ и у магнитопаузы от значения угла Θ_{Bn} , черные точки соответствуют мгновенным значениям после пересечения магнитопаузы, синие и красные – усредненным за 30 и 90 секунд соответственно. Из анализа рис. 2.3.3 следует, что изменение часового угла практически не зависит от часового угла, т.е. зависимость величины несовпадения от типа ударной волны (квазипараллельная или квазиперпендикулярная) для рассмотренного набора событий не наблюдается несмотря на разницу уровней флюктуаций за квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударными волнами.

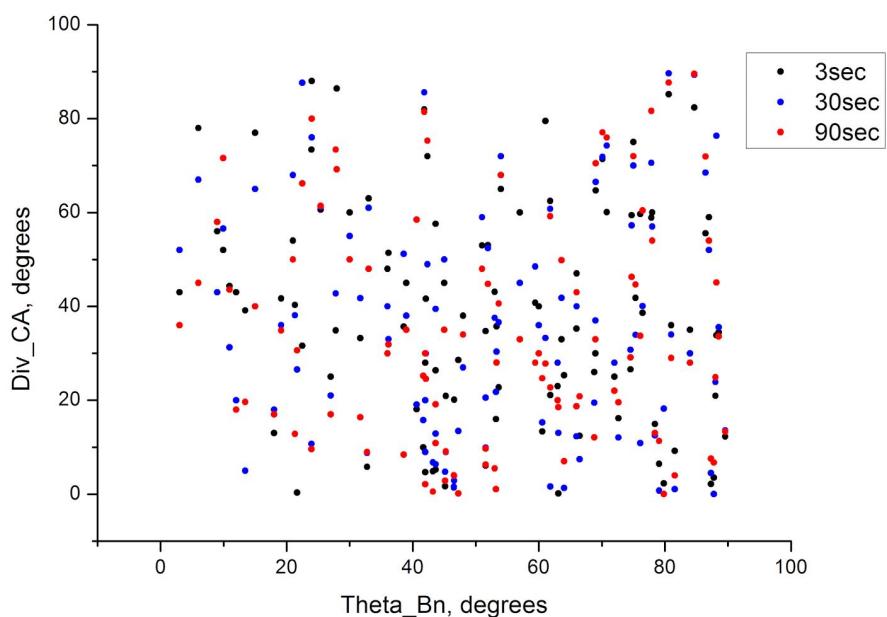


Рис. 2.3.3. Зависимость разности часовых углов у магнитопаузы и в солнечном ветре от угла Θ_{Bn}

2.4. Выводы ко второй главе

Проведенный выше анализ данных наблюдений на спутниках THEMIS согласуется с результатами работ, демонстрирующих существование высокого уровня турбулентности магнитного поля в магнитослое. В отличие от проводившихся ранее исследований в данной работе проводилось сравнение параметров магнитного поля непосредственно перед магнитопаузой вблизи ее носовой части с параметрами ММП, измеренными перед ударной волной. Удалось показать, что B_x -компоненты у магнитопаузы колеблются вблизи нуля независимо от времени усреднения, что хорошо стыкуется с существованием на магнитопаузе разрыва с характеристиками, близкими к тангенциальному разрыву. B_y -компонента у магнитопаузы, как было показано еще в стадии первоначальных исследований (см. Fairfield [1967]), сравнительно хорошо коррелирует с B_y ММП. При этом с ростом времени усреднения повышается коэффициент корреляции B_y ММП с B_y у магнитопаузы. Такие корреляции практически отсутствуют для B_z -компоненты. Наблюдаются события (~30% для усредненных значений в исследованных 100 событиях), когда знаки B_z компоненты магнитного поля в солнечном ветре не совпадают со знаком B_z у магнитопаузы. События, не удовлетворяющих принципу равенства часовых углов, составляют около 50%. Наблюдаемый слабый уровень корреляций даже при сравнительно длительном усреднении с периодом усреднения в 90 с, сравнимым со временем пересечения магнитослоя плазмой солнечного ветра, видимо, связан с турбулизацией магнитослоя. На рассмотренном наборе событий не выявлено зависимости величины изменения часового угла у магнитопаузы от самого часового угла.

ММП, особенно его B_z -компонента, относится к основным факторам, контролирующими геомагнитную активность (см. Плазменная гелиофизика [2008]). При этом обычно считается, что данный контроль осуществляется за счет процессов пересоединения ММП с полем внутри магнитосферы. Результаты многочисленных исследований турбулентности магнитослоя, включая приведенный выше анализ, дают основание пересмотреть такие представления. Высокий уровень флуктуаций магнитного поля в магнитослое даже в случае сравнительно большого времени усреднения свидетельствует в пользу того, что в разных точках непосредственно за магнитопаузой магнитное поле имеет разные направления, как правило, плохо коррелирующие с направлением ММП. Необходимо отметить, что представления о роли процессов крупномасштабного пересоединения на магнитопаузе и образования крупномасштабных нейтральных линий привлекались для объяснения сравнительно хорошей корреляции ММП с крупномасштабной магнитосферной конвекцией.

Необходимо отметить, что существование высокого уровня турбулентных флюктуаций в магнитослое может быть рассмотрено в качестве дополнительного аргумента в пользу теории крупномасштабных магнитосферно-ионосферных взаимодействий, основы которой были заложены в работах Б.А. Тверского [Тверской, 1969; Tverskoy, 1972], и которая получила статус открытия (открытие № 369 в списке регистрации открытий СССР). За последнее время накопилось достаточно много экспериментальных доказательств поддержания системы продольных токов в магнитосфере и крупномасштабной конвекции азимутальными градиентами давления магнитосферной плазмы (см. обзоры Антонова и Тверской [1996], Antonova [2004], Antonova et al. [2013, 2014], Xing et al. [2009] и ссылки в этих работах). Данный механизм возбуждения конвекции не требует проникновения электрического поля солнечного ветра внутрь магнитосферы в результате процессов крупномасштабного пересоединения. Электрическое поле утро-вечер генерируется в процессе возникновения системы продольных токов. При этом возникает ряд вопросов, решение которых требует анализа поддержании баланса давлений на магнитопаузе. Особый интерес, при этом, связан с балансом давлений во время магнитных бурь, когда в магнитосфере усиливаются системы продольных и поперечных токов, развивается мощный кольцевой ток. Анализу пересечений магнитопаузы и условий баланса давлений на магнитопаузе особенно во время магнитных бурь посвящена следующая глава.

Глава 3

Баланс давлений на границах магнитопаузы в спокойной геомагнитной обстановке и во время магнитных бурь

3.1. Баланс давлений на магнитопаузе при турбулентном магнитослое в спокойной геомагнитной обстановке

Давление плазмы относится к основным параметрам, определяющим распределение токов в плазменных системах и устойчивость плазмы (см. Арцимович и Сагдеев [1979]). Первые статистические результаты по экспериментальному изучению баланса давлений на магнитопаузе были получены в экспериментах CLUSTER на высоких широтах [Panov et al., 2008]. В работе [Знаткова и др., 2011] рассматривался баланс давлений с использованием данных THEMIS в экваториальной плоскости. Однако, в работе [Знаткова и др., 2011] баланс давлений был изучен только для одного события и в магнитоспокойных условиях. Проверка выполнения условия баланса давлений на магнитопаузе при турбулентном магнитослое является интересной задачей, так как локальное нарушение такого баланса должно приводить к быстрым движениям плазмы и перестройке магнитного поля, часто наблюдаемым вблизи магнитопаузы. Несмотря на достигнутый прогресс в исследованиях процессов формирования магнитопаузы и проникновения плазмы внутрь магнитосферы, задача далека от своего решения.

Давление в направлении перпендикулярном к магнитопаузе внутри магнитосферы имеет вид

$$P = p_{\perp} + \frac{B^2}{2\mu_0}$$

(см. Lynn Y.M. [1967], Россоленко С.С. [2009]). В данном случае учтено, что на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки $B_n = 0$, $B_t = B$, где B – полное поле, и поток плазмы через магнитопаузу отсутствует, а также анизотропия давлений плазмы. В магнитослое следует также учитывать динамическое давление плазмы:

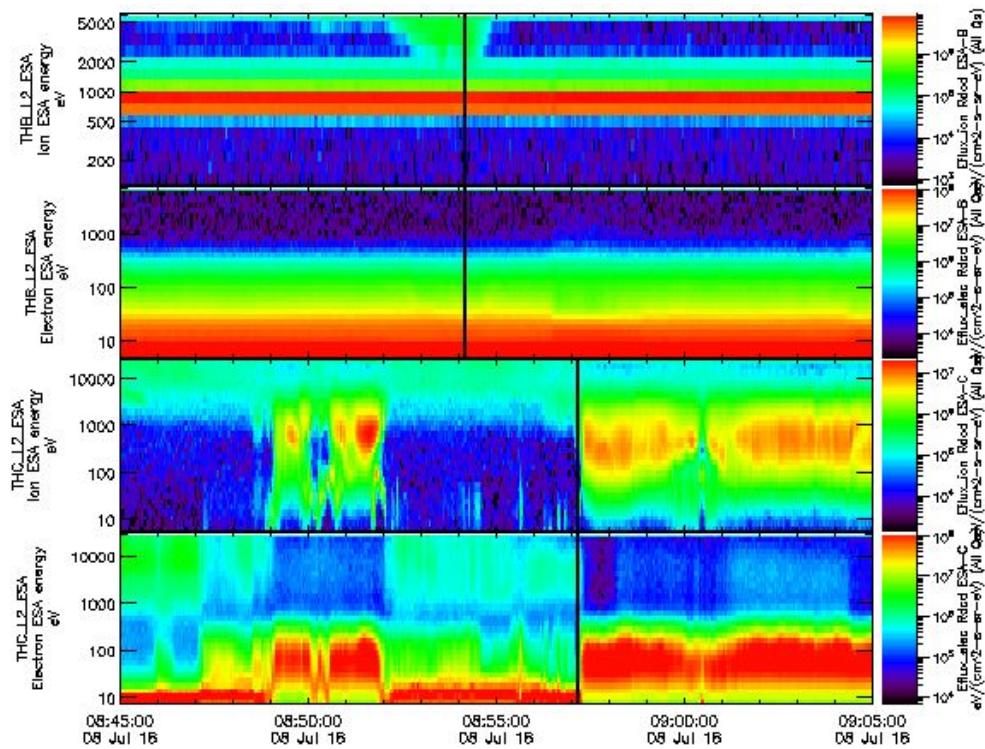
$$P = n_p m_p v_p^2 + n_e m_e v_e^2 + p_{\perp} + \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Индекс p означает протоны (ионы), e – электроны; n – концентрация, v – гидродинамическая скорость, m_p – масса протона, m_e – масса электрона, p_{\perp} и p_{\parallel} – тепловые давления плазмы

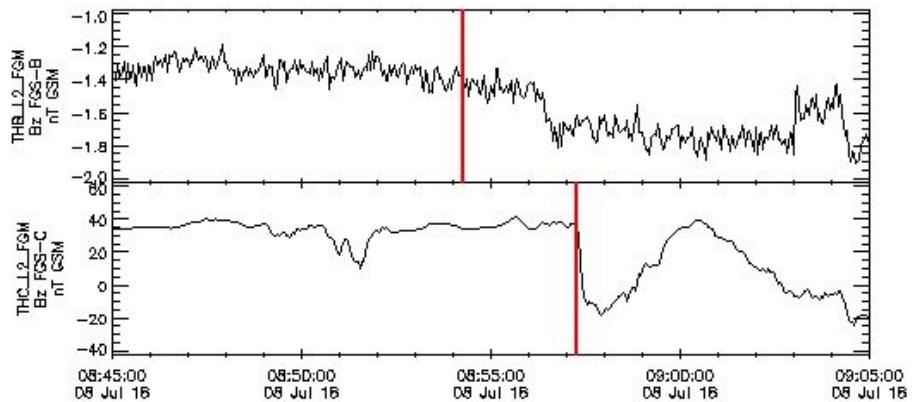
поперек и вдоль магнитного поля, B_n и B_t – компоненты магнитного поля перпендикулярно и параллельно плоскости разрыва, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Для расчета использовались перпендикулярные к магнитопаузе составляющие скорости ионов и электронов в магнитослое v . Учитывая, что полное поперечное давление оценивалось для пересечений магнитопаузы вблизи подсолнечной точки магнитосферы, можно принять, что $v_{\perp} \approx v_x$, где v_x – компонента скорости вдоль оси x . Динамическое давление ионов и электронов принималось во внимание только для измерений в магнитослое. Ниже приведены результаты анализа конкретных пересечений. Рассмотрено пересечение, когда направление B_z компоненты магнитного поля у магнитопаузы соответствовало направлению B_z ММП, случай, когда было противоположно, а также случай, когда наблюдалось пересечение одновременно несколькими спутниками.

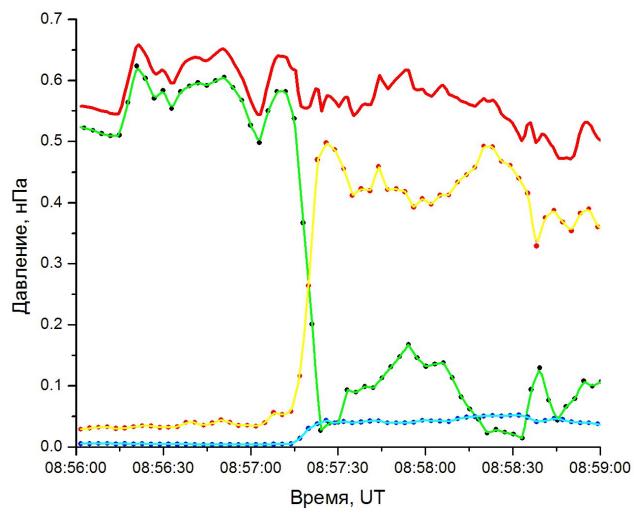
На рис. 3.1.1 представлен случай пересечения магнитопаузы спутником THEMIS-C, в то время как THEMIS-B вел регистрацию в солнечном ветре. Панель б) отражает поведение B_z -компоненты магнитного поля в солнечном ветре и у магнитопаузы. Вертикальными линиями отмечен момент пересечения магнитопаузы спутником THEMIS-C и соответствующий момент измерений на спутнике THEMIS-B с учетом временного сдвига в 177 секунд. В солнечном ветре B_z составляет ~ -1.4 нТл, у магнитопаузы ~ -20 нТл. Видно, что данное событие является примером совпадения ориентации B_z -компоненты ММП и поля магнитослоя у магнитопаузы. Необходимо отметить, что на спектрограмме спутника THEMIS-B в определенный по времени сдвигу момент наблюдалась особенность: появились ионы с энергией более 2 кэВ, что может быть следствием регистрации отраженного от ударной волны пучка ионов.



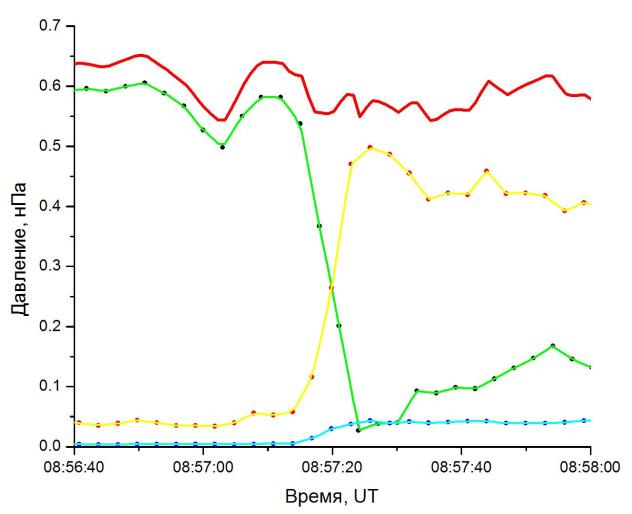
a)



б)



в)

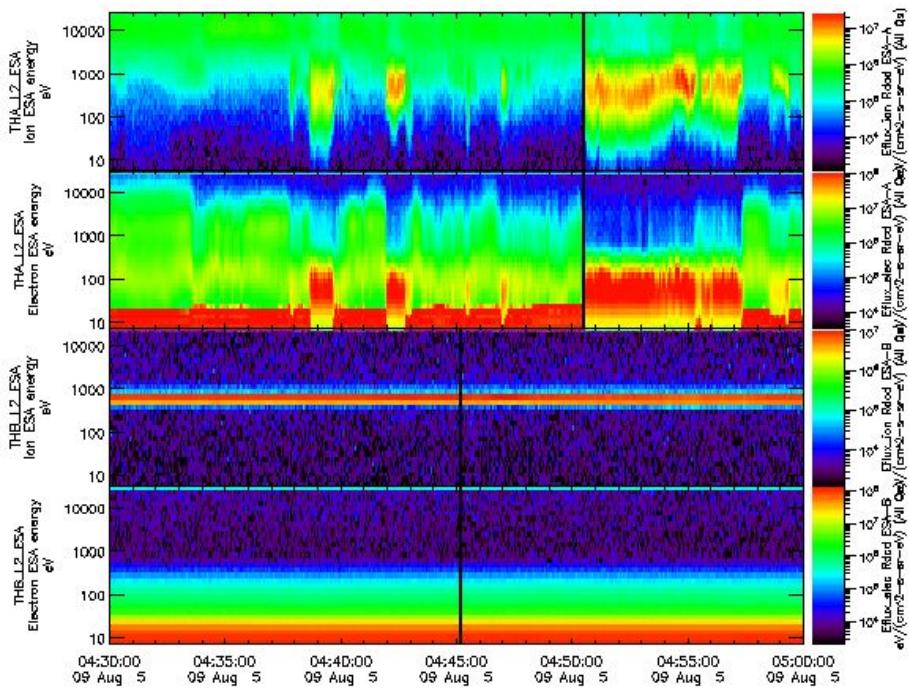


г)

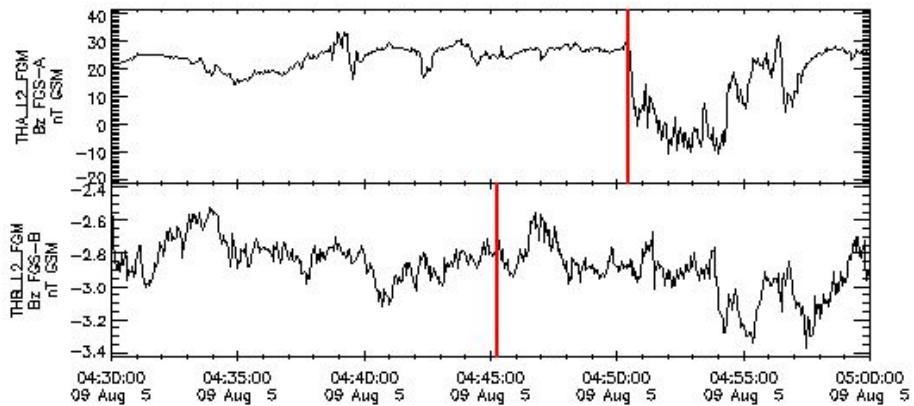
Рис. 3.1.1. Результаты измерений спутниками проекта THEMIS 30 июля 2008 г.: а) спектрограммы ионов и электронов со спутника THEMIS-B (две верхних панели), спектрограммы с THEMIS-C (две нижних панели), б) z-компоненты магнитного поля, в) изменения компонент давления и полного давления при пересечении магнитопаузе на интервале в 3 мин, г) то же, что на рисунке (в) на интервале в 1 мин 20 с. Цветами обозначены: зеленым – магнитное давление, желтым – давление ионов, голубым – электронов, красным – полное давление. Динамическое давление было мало и на графике не отражено. Вертикальными линиями отмечен момент пересечения магнитопаузы спутником THEMIS-C и соответствующий момент измерений на спутнике THEMIS-B с учетом временного сдвига в 177 секунд.

На рис. 3.1.1 в), г) приведены графики изменения полного давления и его компонент. Из графиков видно, что магнитное давление доминирует внутри магнитосферы, но составляет только около 5-20% от полного давления в магнитослое. Плазменное давление, как статическое, так и динамическое начинает преобладать в магнитослое. Также видно, что внутри магнитосферы ход полного давления определяется магнитным давлением, в магнитослое – тепловым давлением ионной компоненты плазмы. Из графика видно также, что внутри магнитопаузы наблюдается сравнительно гладкие изменения давления. Дисбаланс давлений на границах магнитопаузы составил ~ 10%.

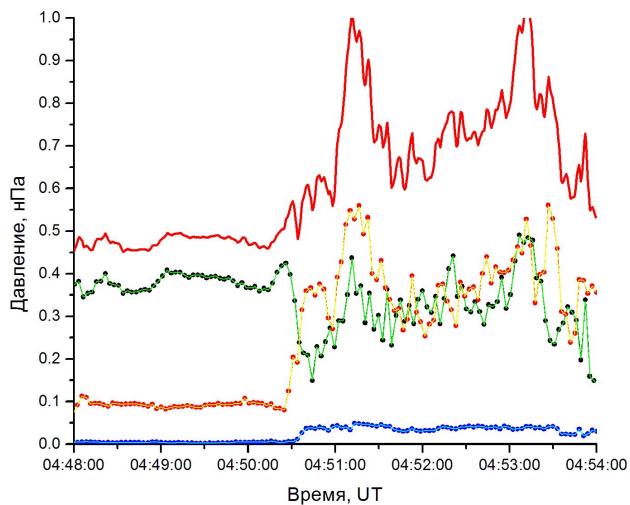
На рис. 3.1.2 показан другой пример пересечения магнитопаузы спутником THEMIS-A, когда THEMIS-B находился за ударной волной. В данном случае в солнечном ветре (рис. 3.1.2 б) z-компоненты магнитного поля имела значение ~ -2.8 нТл, а вблизи магнитопаузы она составляет $+6.6$ нТл, усредненное за 30 секунд значение: $+5.6$ нТл. Т.о. знак z-компоненты меняется с отрицательного на положительный. Внутри магнитосферы от 04:38 до 04:39 и от 04:42 до 04:43 наблюдаются особенности, похожие на проникшие через магнитопаузу плазменные струи с характеристиками магнитослоя. Из графиков на панели в) видно, что в магнитослое наблюдался очень высокий уровень турбулентности, однако изменения давлений внутри магнитопаузы также довольно гладкие и расхождение баланса давлений на границах составляет ~ 15%.



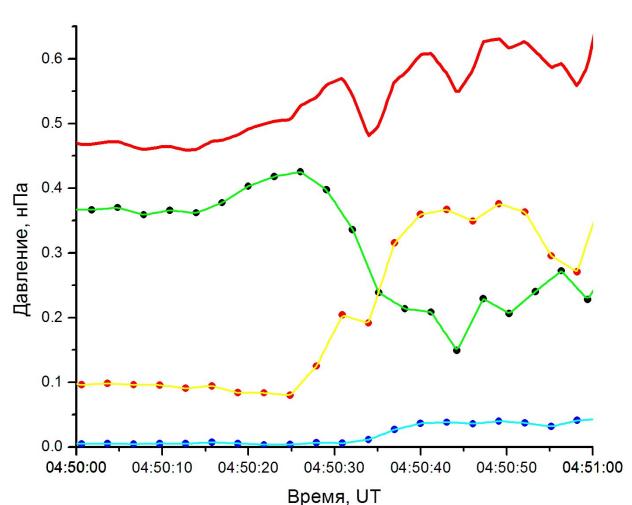
a)



б)



в)



г)

Рис. 3.1.2. Результаты измерений спутниками проекта THEMIS 30 июля 2008 г.: а) спектрограммы ионов и электронов со спутника THEMIS-A (две верхних), спектрограммы с THEMIS-B (две нижних), б) z-компоненты магнитного поля, в) изменения компонент давления и полного давления при пересечении магнитопаузе на интервале в 6 мин, г) то же, что на рисунке (в) на интервале в 1 мин баланс давлений в более крупном масштабе. Вертикальными линиями отмечен момент пересечения магнитопаузы спутником THEMIS-A и соответствующий момент измерений на спутнике THEMIS-B с учетом временного сдвига в 315 секунд.

Наибольший интерес представляют многократные пересечения магнитопаузы несколькими спутниками. Далее будет подробно рассмотрен случай пересечения магнитопаузы несколькими спутниками практически одновременно.

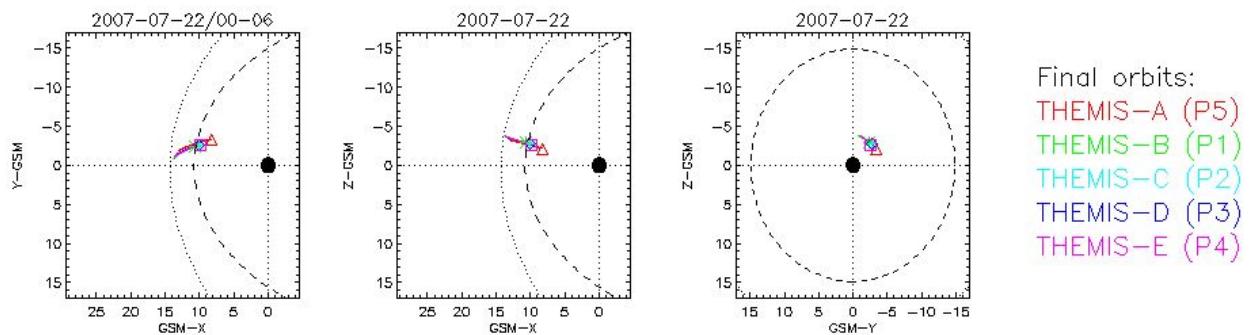
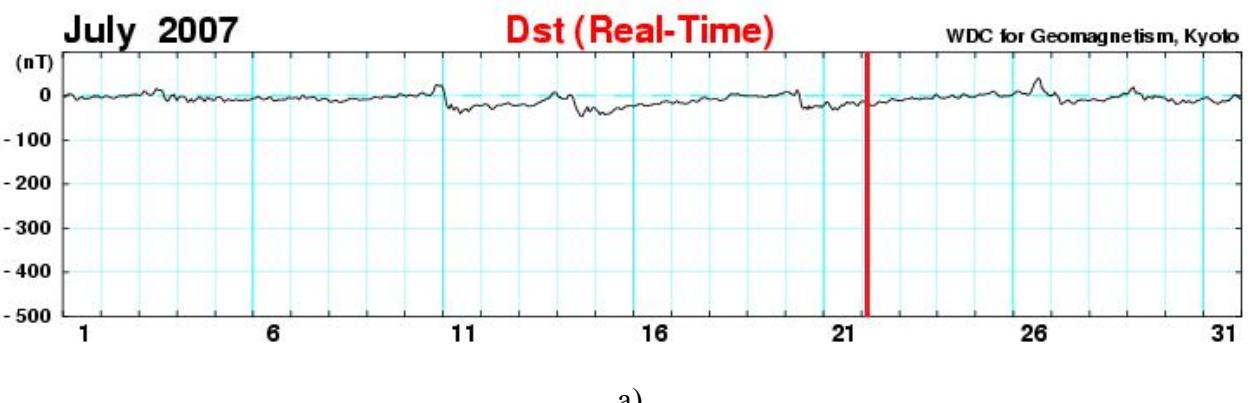
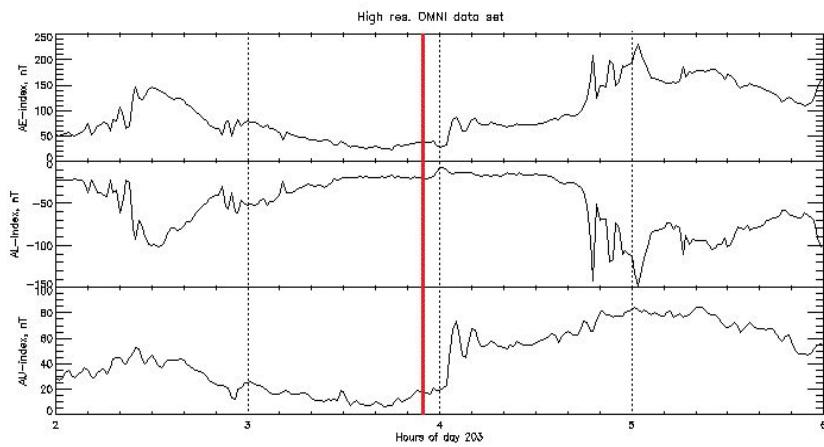


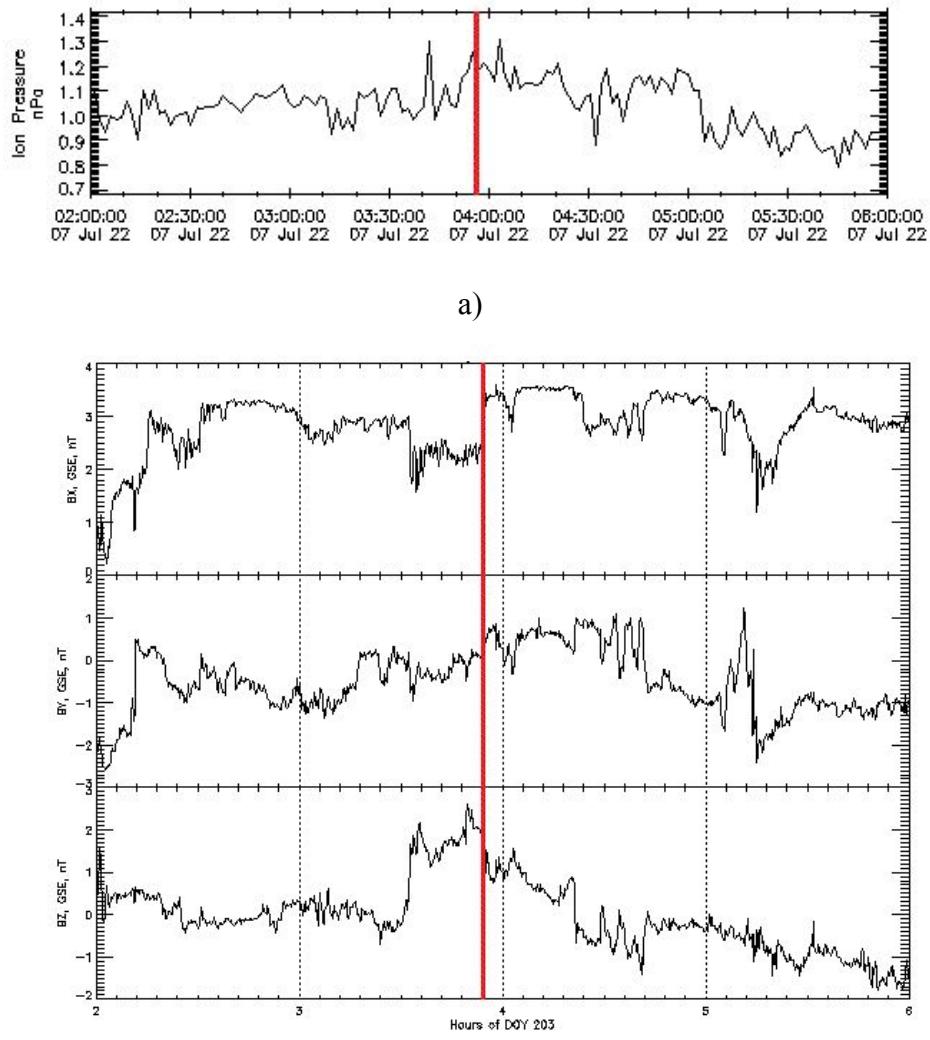
Рис. 3.1.3 Орбиты спутников THEMIS для события 22 июля 2007 года.



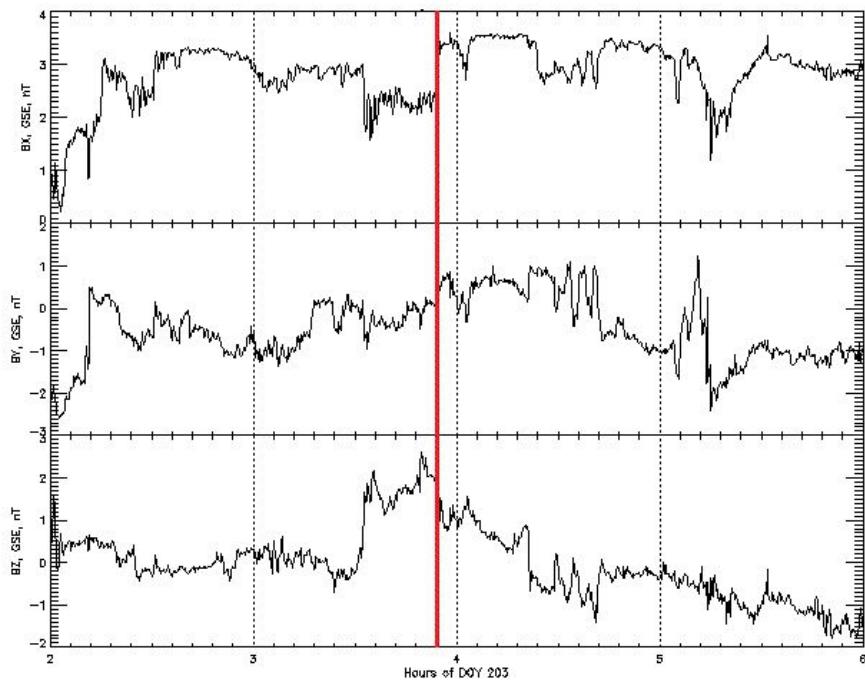


б)

Рис. 3.1.4. Геомагнитная обстановка: а) Dst-вариация, б) геомагнитные индексы по данным базы OMNI.



а)



б)

Рис. 3.1.5. Параметры солнечного ветра: а) давление ионов, б) три компоненты магнитного поля по данным OMNI.

22 июля 2007 года все пять спутников THEMIS двигались из магнитослоя в магнитосферу вблизи подсолнечной точки (отклонение по координатам y и z не превышало 3 R_E) и пересекли границу около 4:00 UT. На рис. 3.1.3 представлены орбиты спутников.

Геомагнитная обстановка в исследуемый период времени была спокойной. На рис. 3.1.4 а) приведены значения Dst по данным из центра в Киото (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), б) представлены данные OMNI, сверху вниз соответственно индексы AE, AU и AL. На рис 3.1.3 и 3.1.4 вертикальными линиями отмечен рассматриваемый случай пересечения спутниками магнитопаузы. Амплитуды геомагнитных индексов AE, AL и AU не превышали 50 нТл. Индекс Dst составлял -15 нТл. Отсутствие заметной геомагнитной активности позволяет исключить быстрые изменения положения магнитопаузы за счет изменений магнитного поля внутри магнитосферы.

На рис. 3.1.5 представлены параметры солнечного ветра, полученные по данным приборов спутника WIND и сдвинутые на время распространения солнечного ветра до спутников THEMIS. На рис 3.1.5 а) изображено динамическое давление ионов солнечного ветра, на панели б) сверху вниз показаны компоненты межпланетного магнитного поля B_x , B_y , B_z соответственно. ММП на момент пересечения имеет северную ориентацию (компонента B_z была больше нуля и составляла ~ 2 нТ). Вариации динамического давления ионов солнечного ветра были невелики (~ 0.2 нПа). Однако, в момент пересечения с учетом сдвига регистрировалось заметное изменение B_z ММП.

Из анализа значений геомагнитных индексов следует, что за исследуемый период времени ионосферные токовые системы почти не изменялись, что с учетом магнитосферно-ионосферных взаимодействий может свидетельствовать в пользу стабильности крупномасштабных магнитосферных токовых систем.

На рис. 3.1.6 показаны усредненные по углам спектrogramмы энергий ионов и электронов, построенные по данным приборов ESA на всех спутниках. THEMIS-A пересек резкую границу между плазмами магнитослоя и магнитосферы в 03:57:10 UT, THEMIS-C – в 03:55:41 UT, THEMIS-D – в 03:55:36 UT, THEMIS-E – в 03:55:44 UT. Спутник THEMIS-B резкой границы не наблюдал.

На всех панелях спектrogramмы вертикальной линией показано положение границы между магнитосферой и магнитослоем. Слева от этой линии спутники находились в магнитосфере, о чем свидетельствуют потоки электронов и ионов в широком диапазоне энергий (0.02 – 10 кэВ). Справа от линии на спектrogramме наблюдаются ионы и электроны

магнитослоя, характеризующиеся высокой концентрацией и энергией от 0.01 до ~ 1 кэВ. Для рассматриваемого события области магнитосферы и магнитослоя четко разделены, что позволяет определить положение границы.

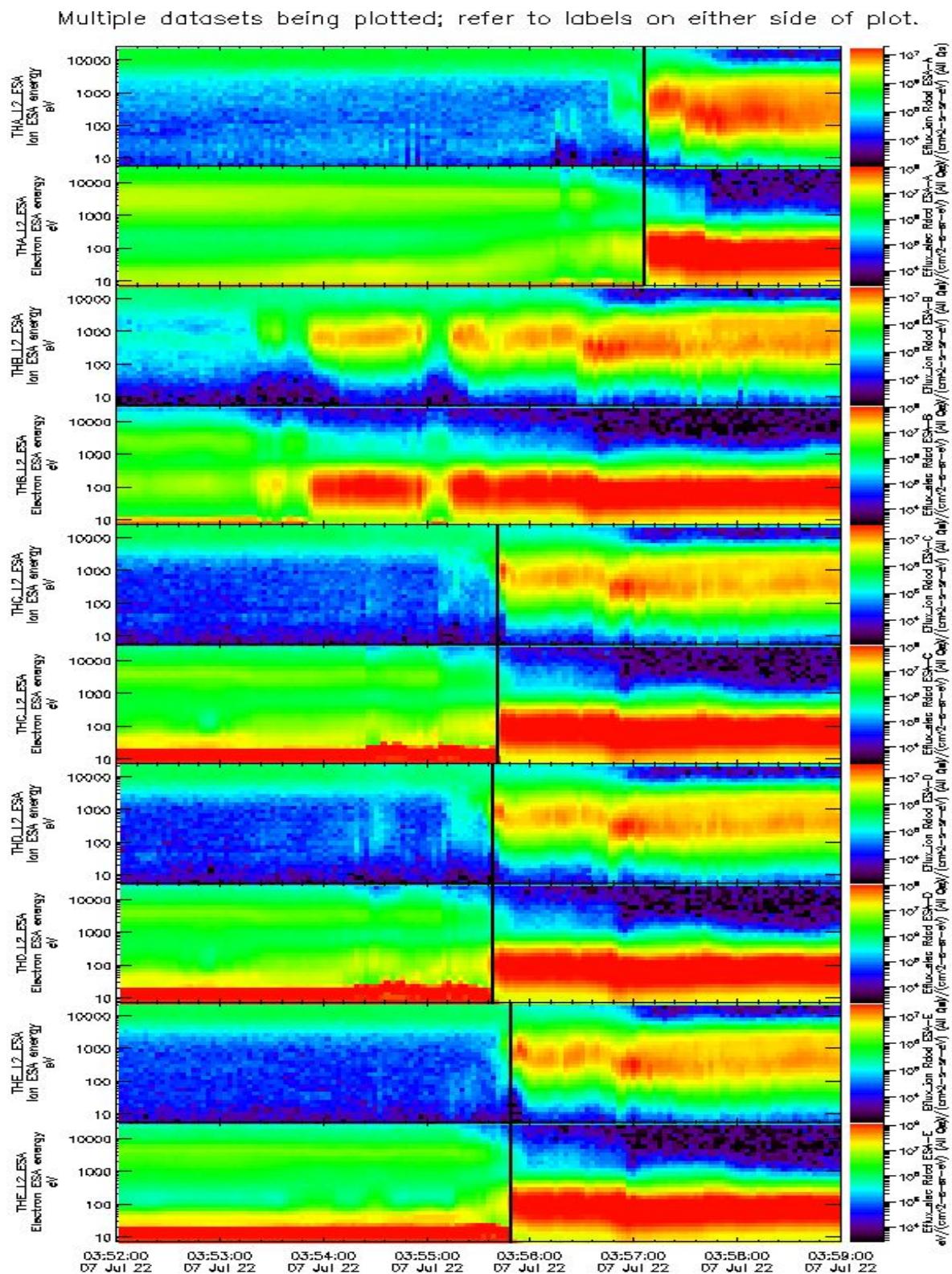


Рис. 3.1.6. Спектрограммы ионов и электронов по данным приборов ESA.

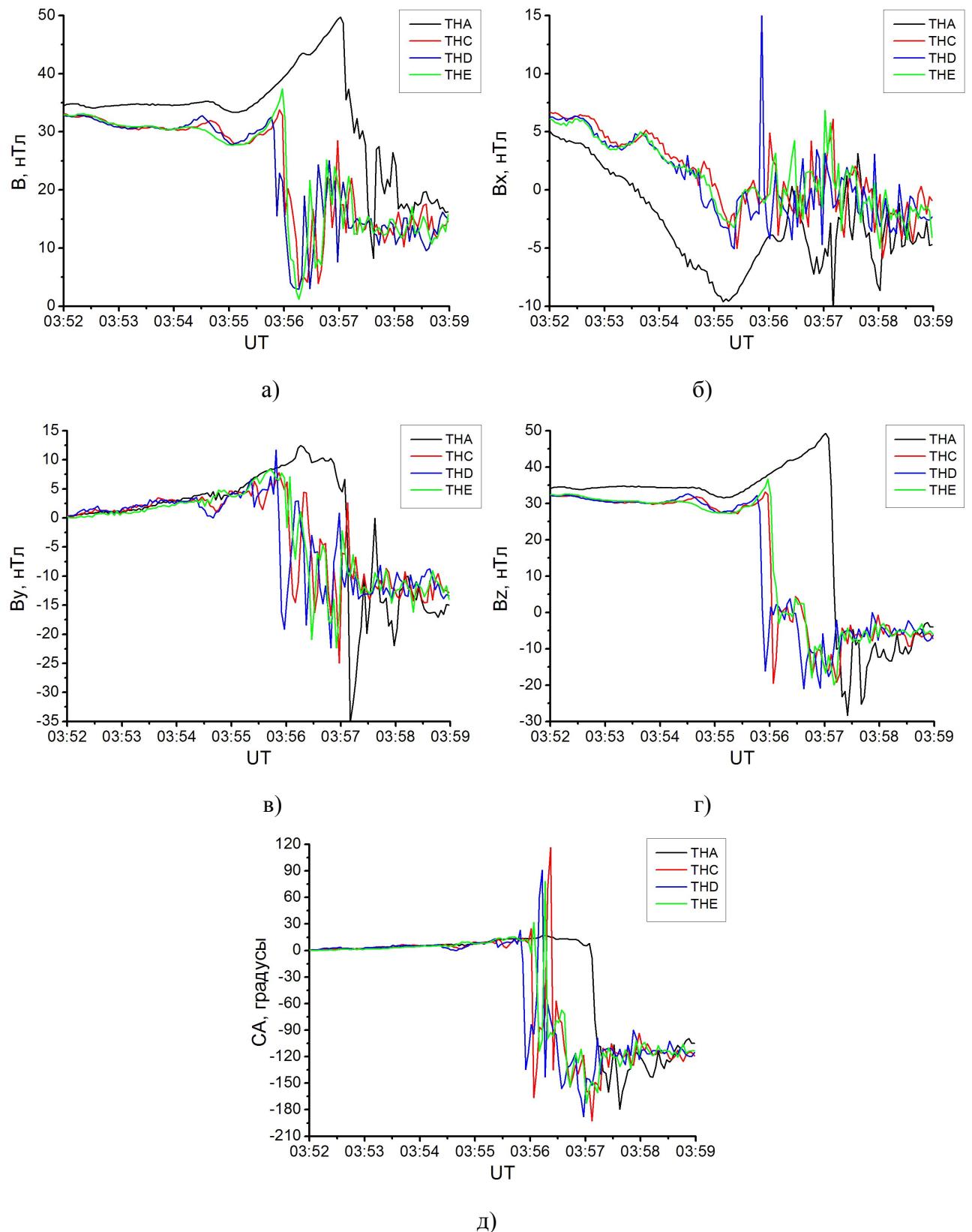


Рис. 3.1.7. Поведение компонент магнитного поля по данным спутников THEMIS-A, THEMIS-C, THEMIS-D и THEMIS-E соответственно на интервале 03:51 – 03:59 UT: а) амплитуда, б) x-компоненты, в) y-компоненты, г) z-компоненты, д) часовой угол магнитного поля.

Рис. 3.1.7 содержит графики изменения компонент магнитного поля. Видно, что данные спутников THEMIS-C, -D и -E различаются мало, так как спутники пересекали магнитопаузу с разницей по времени не более 10 секунд. Данные же THEMIS-A, пересекавшего магнитопаузу на полторы минуты позже, несколько отличаются даже внутри магнитосферы. B_z -компоненты после пересечения составляла от -16 до -28 нТл по данным разных спутников. Т.о. в данном случае знак B_z -компоненты также меняется, но в отличие от предыдущего рассмотренного случая с положительного на отрицательный. Все компоненты магнитного поля сильно флюктуируют в момент пересечения магнитопаузы. B_x -компоненту в данном событии можно только в среднем считать равной нулю. Размах колебаний превосходит 5 нТл.

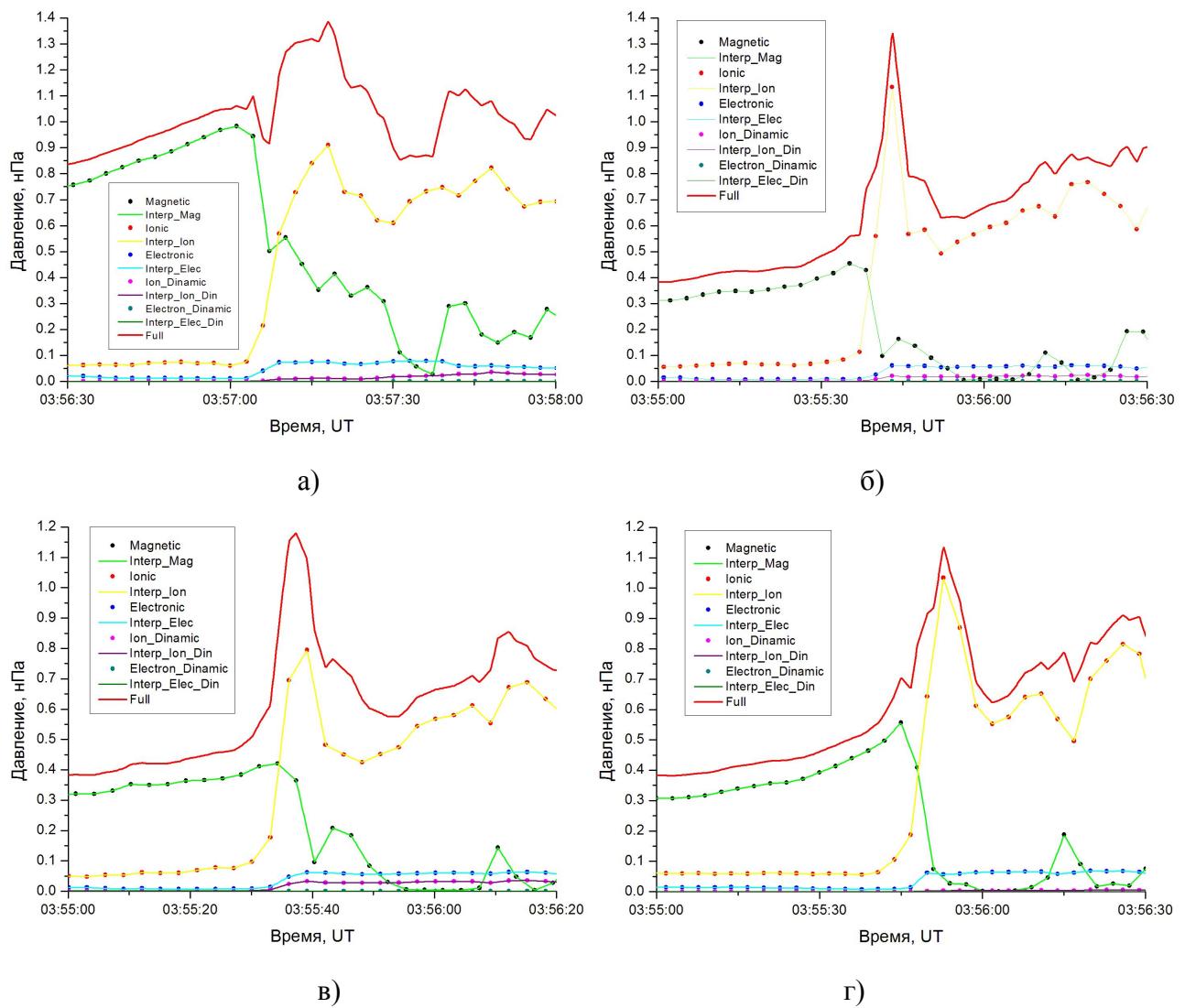


Рис. 3.1.8. Компоненты давления по данным спутников THEMIS-A а), THEMIS-C б), THEMIS-D в) и THEMIS-E г).

За рассматриваемый промежуток времени в 1.5 мин происходило фиксируемое всеми спутниками увеличение полного давления более чем в 2 раза, что может быть с учетом ошибки вычисления временного сдвига связано с ростом динамического давления солнечного ветра и приближением магнитопаузы к Земле. Однако за время пересечения самой магнитопаузы давление на ее границах почти не меняется. Анализ изменений компонент давления и полного давления (см. Рис. 3.1.8) показывает, что величины полного давления на двух границах магнитопаузы по данным THEMIS-A (рис. 3.1.8 а)) практически совпадают (составляют 1.02 нПа на магнитосферной границе и 1.12 нПа на границе магнитослоя, т.е. спустя 18 с), и их различие не превышает 9% (эта величина находится в пределах точности измерений параметров плазмы). Дисбаланс полного давления укладывается в 15% для THEMIS-C и -D и в 25% для THEMIS-E. Внутри магнитопаузы на всех спутниках фиксируется всплеск давления ионов.

Большой интерес может представлять сравнение значений давления с разных спутников, когда один находился на внутренней, а другой – на внешней границах магнитопаузы. Одновременность измерений важна в связи с тем, что параметры плазмы в турбулентной области магнитослоя изменяются очень быстро. Кроме того, следует отметить, что магнитопауза довольно быстро двигалась. На рис. 3.1.9 изображены графики полного давления попарно для трех пар спутников. Как видно из графиков, такой анализ дает гораздо большую точность соблюдения баланса давлений: 8% для пар –С и –D, –С и –E, и 10% для –D и –E. Отклонение от баланса давлений указывает на динамический характер наблюдаемых процессов.

Необходимо также иметь в виду, что область пересечения спутниками магнитопаузы смешена примерно на $1.5R_E$ от плоскости земного экватора. На рис. 3.1.10 приведена магнитная конфигурация, рассчитанная для рассматриваемого события в рамках модели Цыганенко-2001 (см. Tsyanenko, N.A., [2002a, 2002b]). Сплошными кривыми показано рассчитанное положение магнитных силовых линий с учетом баланса давлений на магнитопаузе, пунктиром показаны модельные силовые линии, выходящие за пределы магнитопаузы (и, соответственно, не описывающие реальную магнитную конфигурацию). Звездочками с цифрами на них показано положение минимумов поля на магнитных силовых линиях и величина поля в минимуме. Квадратики показывают положение максимума поля между минимумами и значение поля в максимуме.

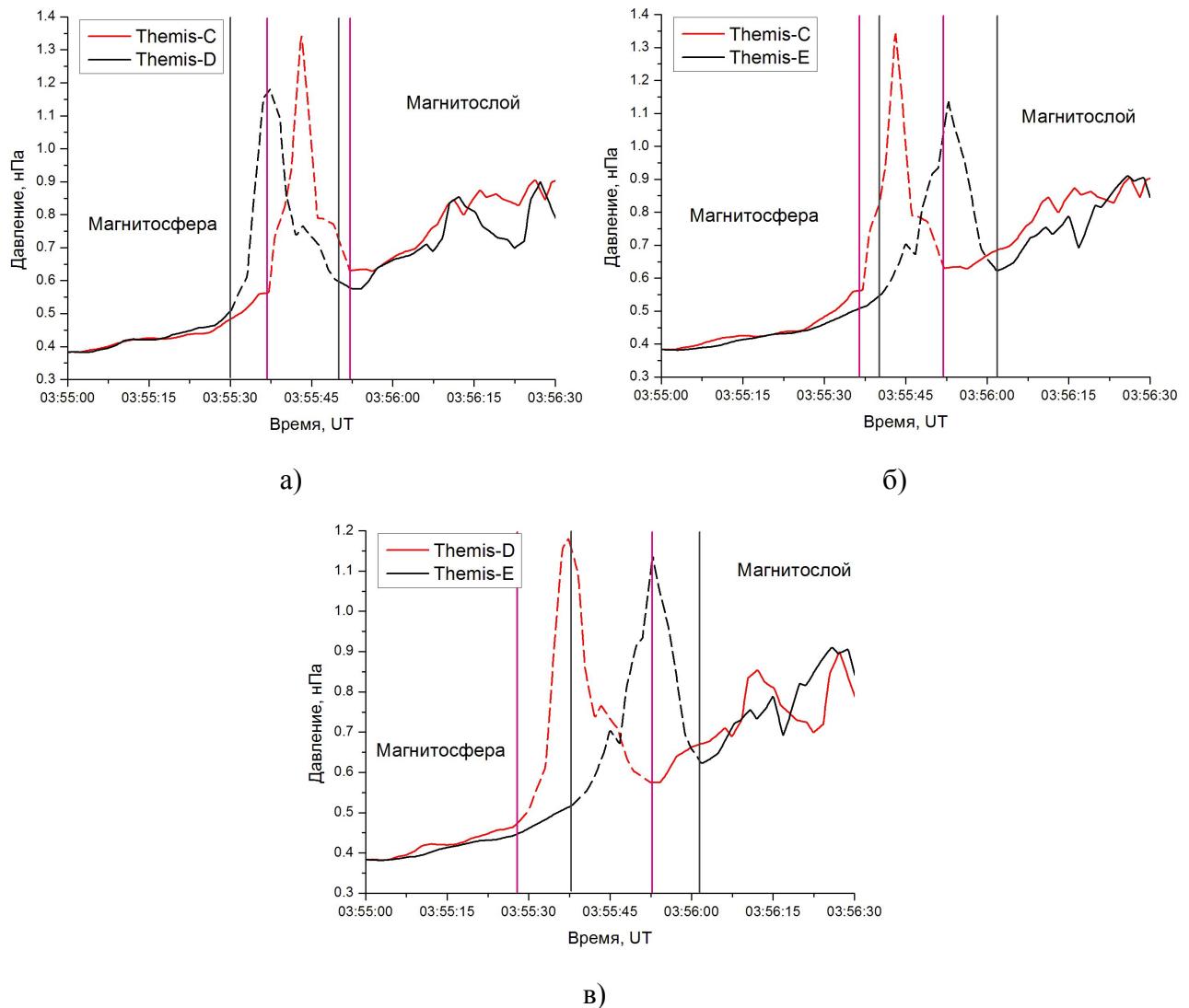


Рис. 3.1.9. Полное давление попарно по данным спутников THEMIS-C а), THEMIS-D б) и THEMIS-E в).

Анализ рис. 3.1.10 показывает, что измеренные вариации магнитного поля в магнитослое сопоставимы с минимальными значениями магнитного поля на дневных магнитных силовых линиях. Поэтому, было бы трудно анализировать баланс давлений вдали от плоскости X-Y GSM системы координат.

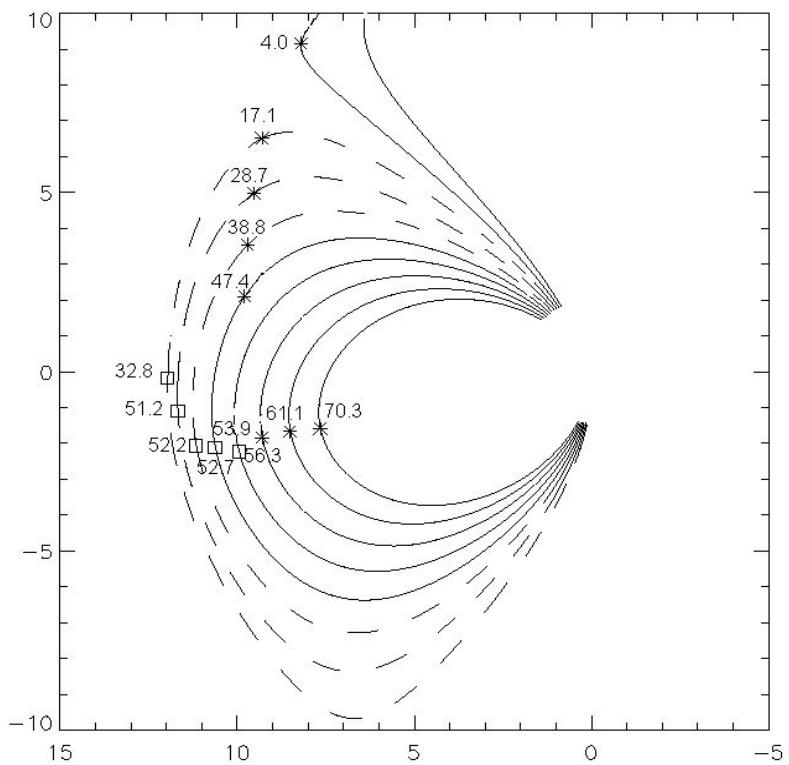


Рис. 3.1.10. Модель конфигурации магнитных силовых линий на дневной стороне 22 июля 2007 г.

Отметим, что существенное затруднение в задачу определения величины полного давления со стороны магнитослоя вносится также уже упоминавшийся высокий уровень флюктуаций всех параметров плазмы и магнитного поля в этой области. Из рис. 3.1.7 г) видно, что компонента B_z магнитного поля несколько раз проходит через ноль, т.е. магнитное поле в магнитослой меняло знак.

Проведенный анализ пересечений магнитопаузы в спокойных геомагнитных условиях продемонстрировал близость к соблюдению баланса давлений, несмотря на высокий уровень флюктуаций магнитного поля в магнитослой. Наблюдения высокого уровня турбулентности создает проблемы для теорий крупномасштабного пересоединения на магнитопаузе, так как магнитное поле в разных точках магнитопаузы может иметь разные знаки. На рис. 3.1.11 показана схема, иллюстрирующая данное утверждение.

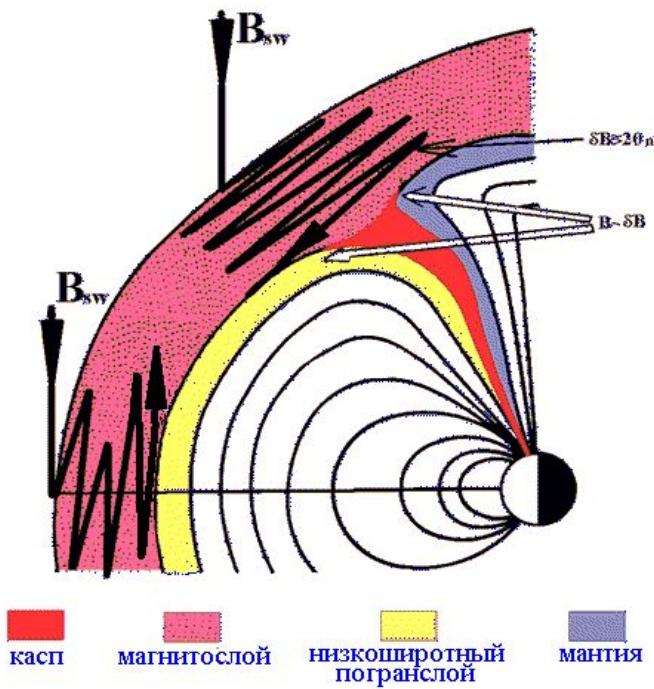


Рис. 3.1.11. Схема распределения магнитного поля в магнитослое из главы 18 в монографии Exploring the solar wind [Antonova et al., 2012].

Необходимо отметить, что представления о роли процессов крупномасштабного пересоединения на магнитопаузе и образования крупномасштабных нейтральных линий привлекались для объяснения сравнительно хорошей корреляции ММП с крупномасштабной магнитосферной конвекцией. Однако, коэффициенты корреляции ММП с геомагнитными индексами, как правило, сравнительно невелики (см. материала раздела 1.3, Troshichev et al., [2011]). Практически постоянно наблюдается высокий уровень флуктуаций электрического поля в полярной шапке (см. Головчанская И.В., Козеллов Б.В. [2010] и ссылки в данной работе). Реальная картина магнитного поля у магнитопаузы сильно отличается от общепринятой теоретической, что помогает понять низкие значения коэффициентов корреляции B_z в солнечном ветре и геомагнитных индексов.

Изменения давления частиц и магнитного поля как в магнитослое, так и внутри магнитосферы приводят к смещениям положения магнитопаузы. Такие смещения могут быть связаны как с изменениями параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое, так и изменениями параметров плазмы и магнитного поля внутри магнитосферы. Однако роль различных процессов, приводящих к таким смещениям, пока мало исследована. В отдельных случаях баланс давлений может соблюдаться с относительно высокой точностью. Так, в

работе [Знаткова и др., 2011] зарегистрировано пересечение магнитопаузы, при котором дисбаланс давлений не превышал 3%. Дополнительные трудности связаны с возможностью локального нарушения баланса давлений за счет неоднородного распределения параметров плазмы в магнитослое [Lemaire, 1977, 1985; Echim and Lemaire, 2000, 2002], что приводит к локальному проникновению плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы. Данные теоретические представления были подтверждены экспериментально (см. 1.2). Динамическое давление в зарегистрированных струях значительно превышает динамическое давление в солнечном ветре. Такие течения глубоко проникают внутрь магнитосферы. Особый интерес представляют практически не обсуждавшиеся случаи магнитных бурь, при которых изменения параметров плазмы и магнитного поля внутри магнитосферы в результате взаимодействия геомагнитной ловушки с солнечным ветром особенно заметны.

3.2. Баланс давлений на магнитопаузе во время магнитных бурь на примере магнитной бури 20 февраля 2014

В этой части работы был тщательно изучен весь период функционирования спутников THEMIS с момента запуска (2007 год) до настоящего времени. За это время была зафиксирована 91 магнитная буря (в расчет принимались возмущения, в которых индекс Dst опускался ниже -50 нТл). Из них таких бурь, во время которых хотя бы один из спутников THEMIS пересекал магнитопаузу, оказалось 32. Из последних 16 пригодны для расчета баланса давлений (в остальных случаях либо в источнике не хватает данных по скоростям частиц, из-за чего расчет давления невозможен, либо не удается выделить момент пересечения из-за сильных флюктуаций всех параметров).

Эти 16 магнитных бурь были тщательно проанализированы. Как правило, в течение одной бури спутники несколько раз пересекают магнитопаузу, каждое пересечение анализируется отдельно. Удалось проанализировать 57 пересечений во время магнитных бурь.

Данное исследование актуально потому, что вопрос баланса давлений во время бурь до сих пор не разъяснён и ранее не исследовался. Между тем, возможность анализа буревых пересечений принципиально не отличаются от пересечений в спокойных условиях. Более того, даже при больших отрицательных Dst есть очень чёткие пересечения с согласованным изменением всех параметров и очень малым дисбалансом давлений. Для подтверждения сходства было проведено статистическое сравнение исследованных буревых пересечений с ранее изученными пересечениями магнитопаузы в спокойных условиях. Результаты будут

показаны далее. Ниже представлен подробный анализ двух сравнительно больших магнитных бурь, вошедших в данное исследование.

Магнитная буря 20 февраля 2014 года характерна тем, что пересечения магнитопаузы спутниками THEMIS во время этой бури имели существенно разные характеристики, картины пересечений существенно отличаются друг от друга.

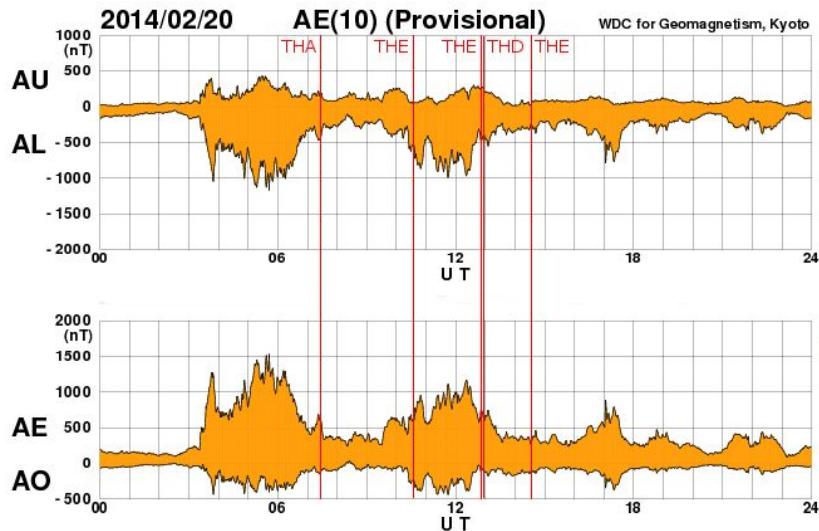


Рис. 3.2.1. Изменения геомагнитных индексов AU , AL , AE и AO по данным World Geomagnetic Data Center Kyoto.

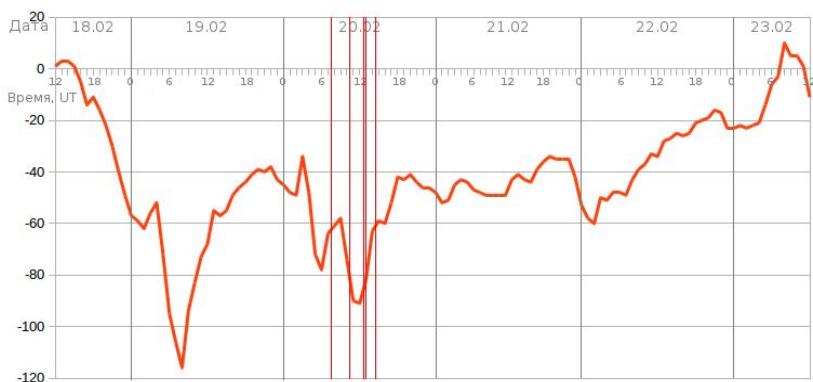


Рис. 3.2.2. Dst вариация во время магнитной бури 20.02.2014.

На рис. 3.2.1 показаны параметры геомагнитной обстановки во время этой бури. Вертикальными линиями отмечены моменты пересечения спутниками магнитопаузы. Данная магнитная буря относится к классу больших магнитных бурь, длительность ее составила больше четырех суток. 20 февраля наблюдалось два минимума Dst в 6 и в 12 часов UT (см. Рис. 3.2.1б). В первом локальном минимуме $Dst = -78$ нТл, во втором $Dst = -91$ нТл. В рассматриваемом случае пересечения магнитопаузы не совпали с какими-либо характерными особенностями вариаций геомагнитных параметров. Первое пересечение в

7:25 UT произошло при уменьшении авроральных индексов, то есть на спаде авроральной активности (см. Рис. 3.2.1а). Второе пересечение в 10:35 UT перед максимумом бури во время взрывной фазы суббури. Последние три пересечения (в 12:50, 12:55 и 14:30 UT) происходили во время фазы восстановления бури. Во время всех пяти пересечений наблюдались относительно большие вариации геомагнитных индексов. В ходе анализа принималось во внимание, что скорость движений магнитопаузы намного превосходит скорость движения спутника. Поэтому спутник практически стоит на месте и мимо него проходит движущаяся магнитопауза.

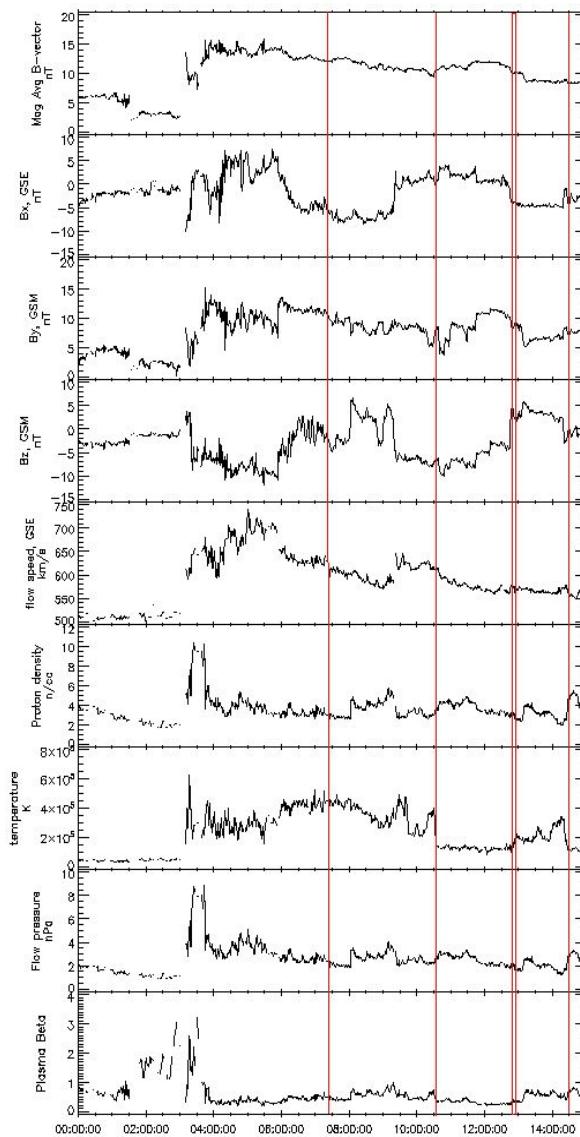


Рис. 3.2.3. Параметры солнечного ветра по базе данных OMNI, сверху вниз: магнитное поле B и три его компонента B_x , B_y , B_z в координатах GSM в нТл; скорость потока V в км/с; плотность ионов n в $1/\text{см}^3$; температура ионов T_i в К; динамическое давление P_{dyn} в нПа; плазменный параметр β .

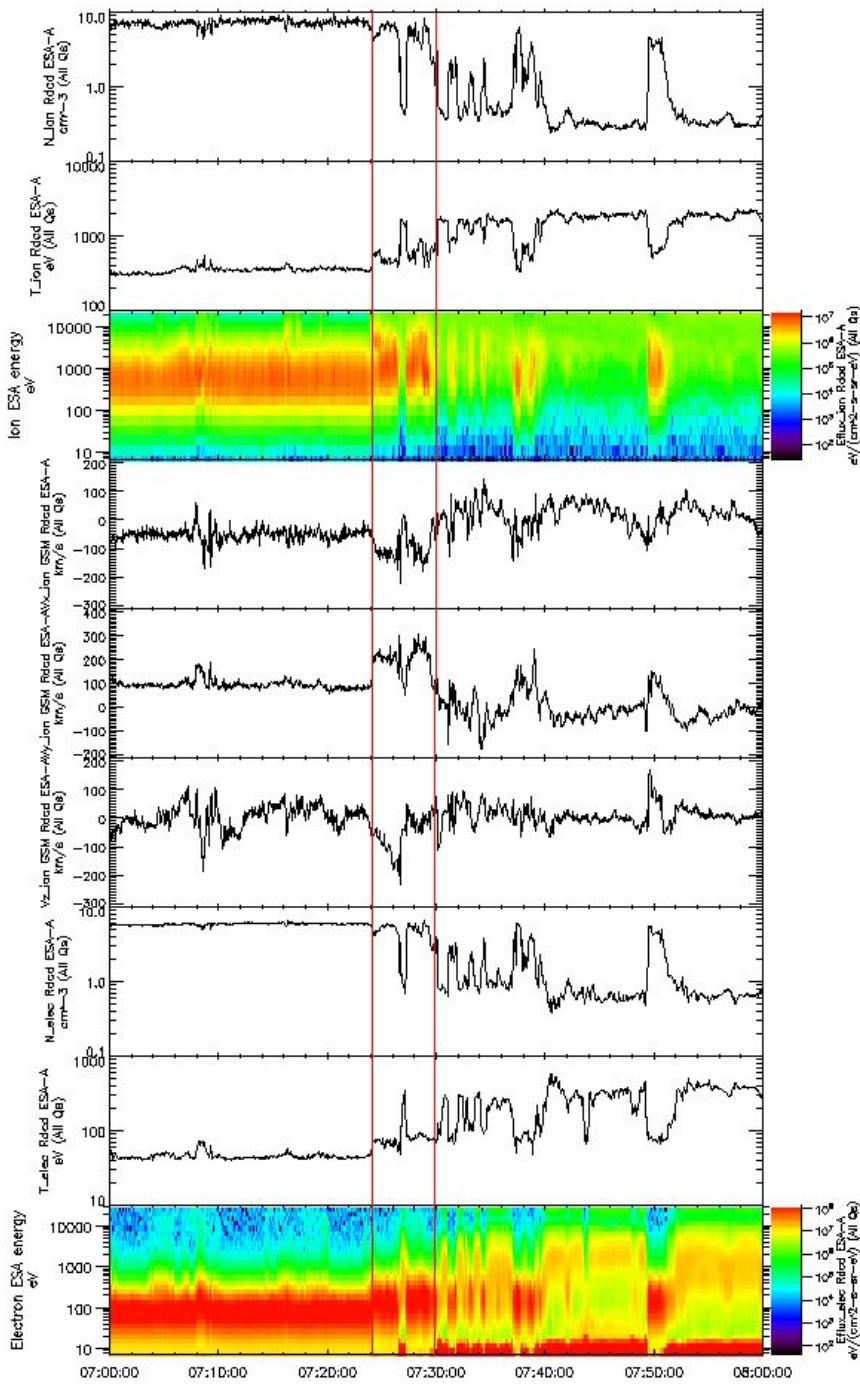


Рис. 3.2.4. Пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-A. На панелях сверху вниз: плотность, температура, спектrogramма ионов; три компоненты скорости ионов в системе GSM; плотность, температура и спектrogramма электронов.

Первым пересек магнитопаузу спутник THEMIS-A в 07:25 UT. Спутник двигался из магнитослоя в магнитосферу (см. рис. 3.2.4). Вертикальными линиями здесь и далее отмечены границы магнитопаузы, которые определялись одновременно по изменениям магнитных и плазменных данных на спутнике.

На рис. 3.2.5 а) приведен график для модуля и компонент магнитного поля по данным спутника. Видны резкие изменения всех трех компонент, при том, что величина магнитного поля остается практически неизменной. На рис. 3.2.5 б) приведен график изменения компонент полного давления. Для получения непрерывных кривых изменения компонент полного давления данные со спутника были интерполированы. Необходимость в этом возникла в связи с тем, что отсчеты времени приборов ESA и FGM не совпадают, и для получения полного давления необходимо было складывать интерполированные значения.

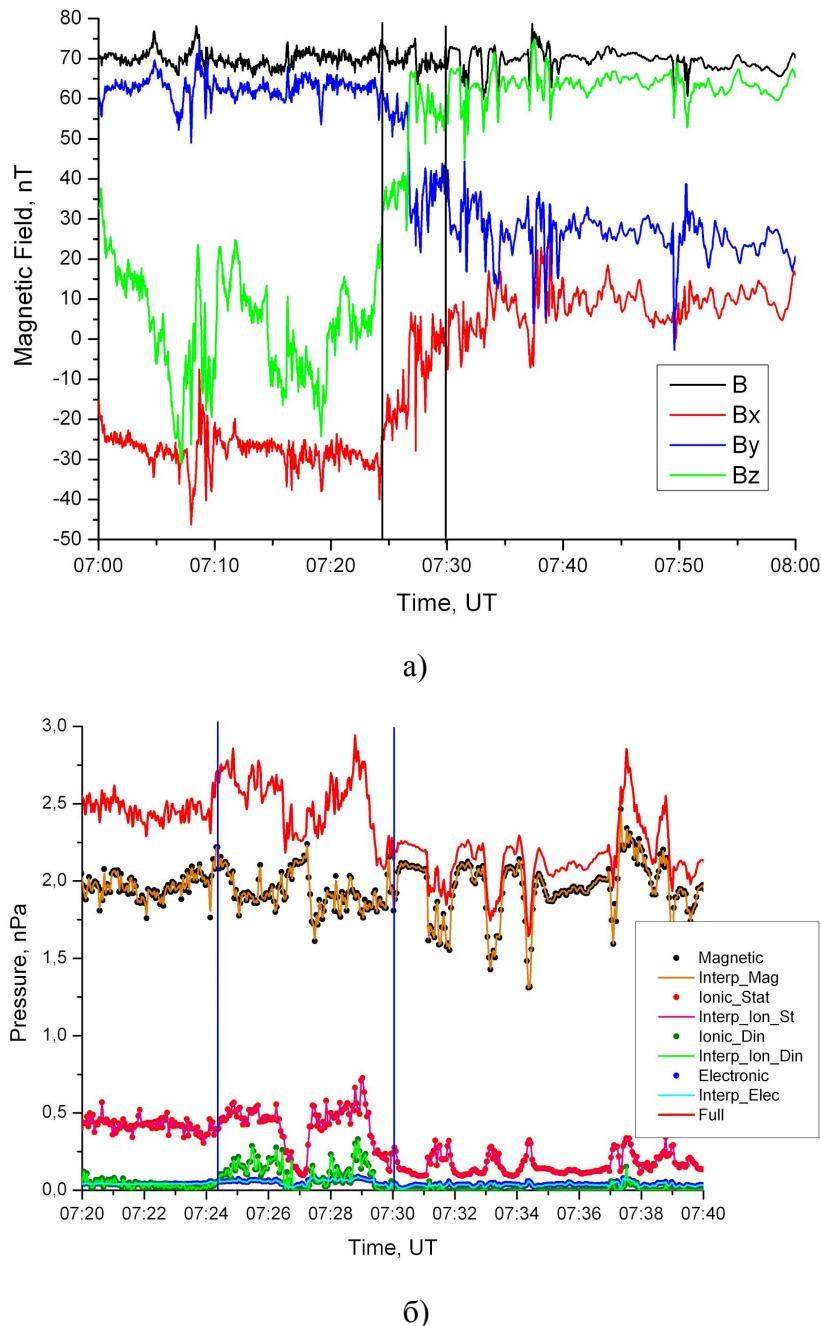


Рис. 3.2.5 (а) Компоненты магнитного поля по данным спутника, (б) график изменения компонент полного давления во время пересечения.

Значение индекса Dst в момент перехода составляло порядка – 60 нТл. Разница давлений на границах составила около 10%. Видно, что в среднем полное давление в магнитослое больше, однако магнитное давление после перехода практически остается на том же уровне, уменьшение полного давления происходит за счет уменьшения давления ионной компоненты (см. рис. 3.2.5). Динамическое давление также выше в магнитослое, но определяющего вклада не вносит.

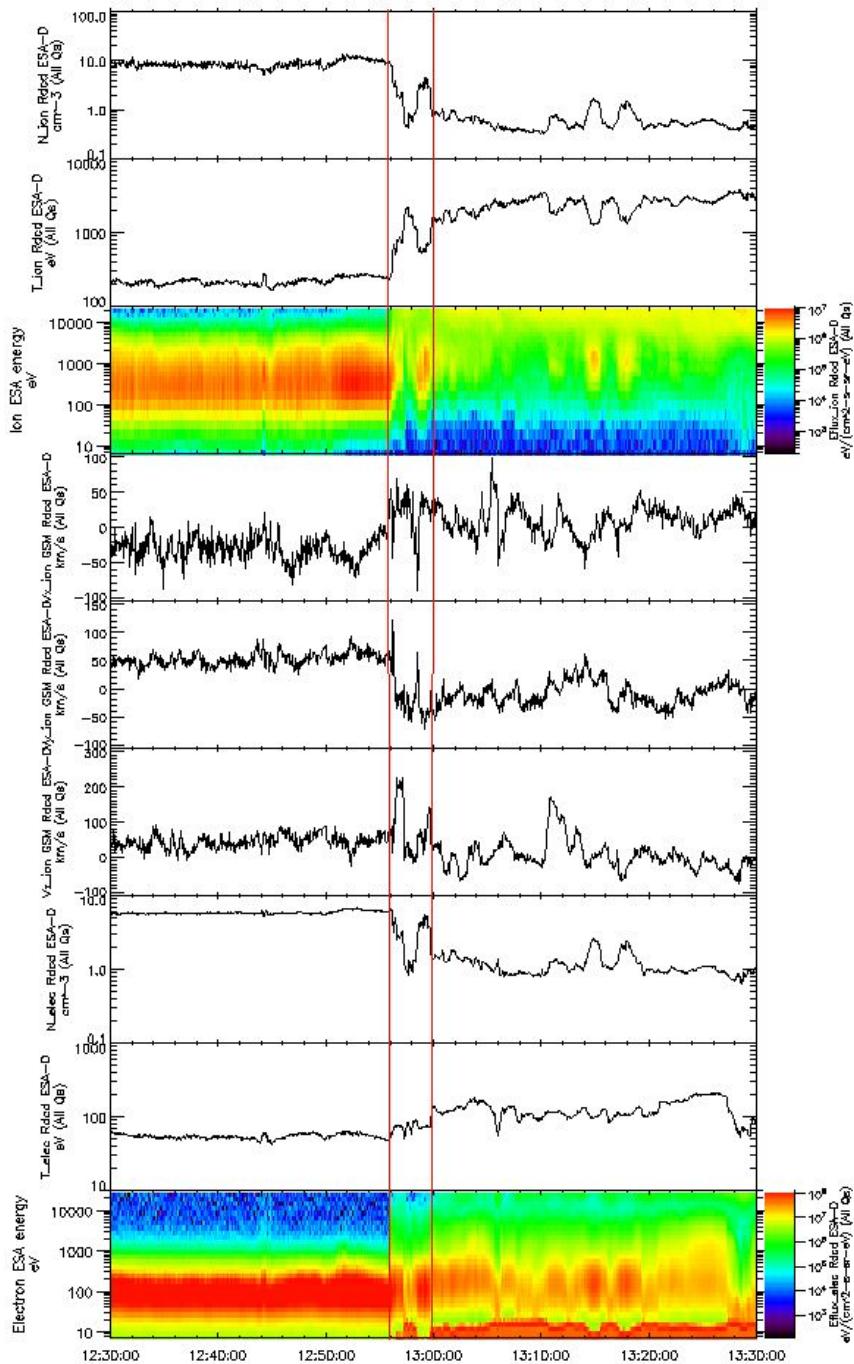


Рис. 3.2.6. Пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-D. На панелях сверху вниз: плотность, температура, спектrogramма ионов; три компоненты скорости ионов в системе GSM; плотность, температура и спектrogramма электронов.

На рис. 3.2.6 - 3.2.7 показано пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-D в 12:55 UT. Спутник двигался из магнитослоя в магнитосферу. Значение индекса Dst в момент перехода составляло – 88 нТл. Разница давлений на границах магнитопаузы составила около 25%. На рис. 3.2.7 (а) видно очень резкое изменение значения z-компоненты магнитного поля с -40 нТл в магнитослое до 60 нТл в магнитосфере. Спутник наблюдает существенное проседание полного давления в магнитосфере после пересечения, причем уменьшаются значения всех составляющих полного давления. Магнитное давление при этом остается существенно преобладающим.

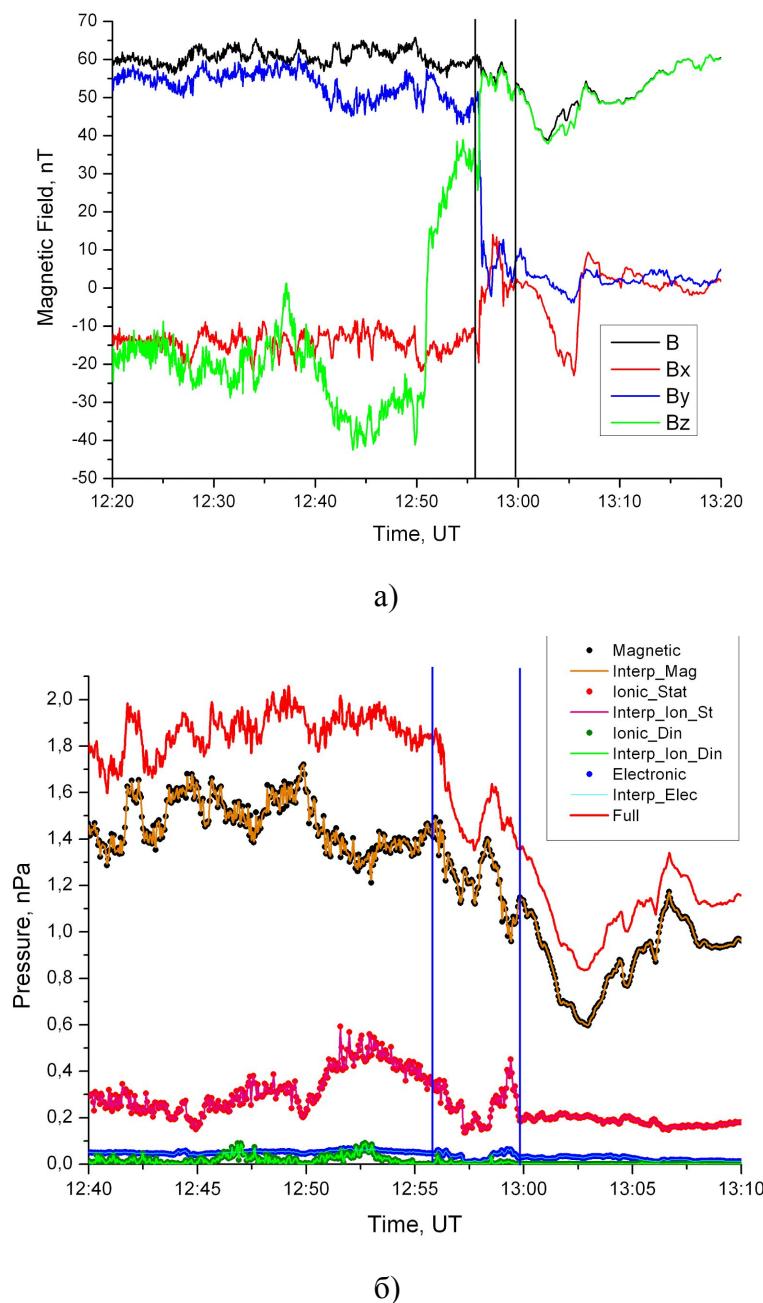


Рис. 3.2.7. а) Компоненты магнитного поля по данным спутника THEMIS-D, б) график изменения компонент полного давления во время пересечения.

На рис. 3.2.8 - 3.2.9 показано пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-E в 10:35 UT. Спутник двигался из магнитосферы в магнитослой. В данном случае спутник наблюдал очень тонкую магнитопаузу, пересечение произошло всего за несколько отсчетов приборов на спутнике.

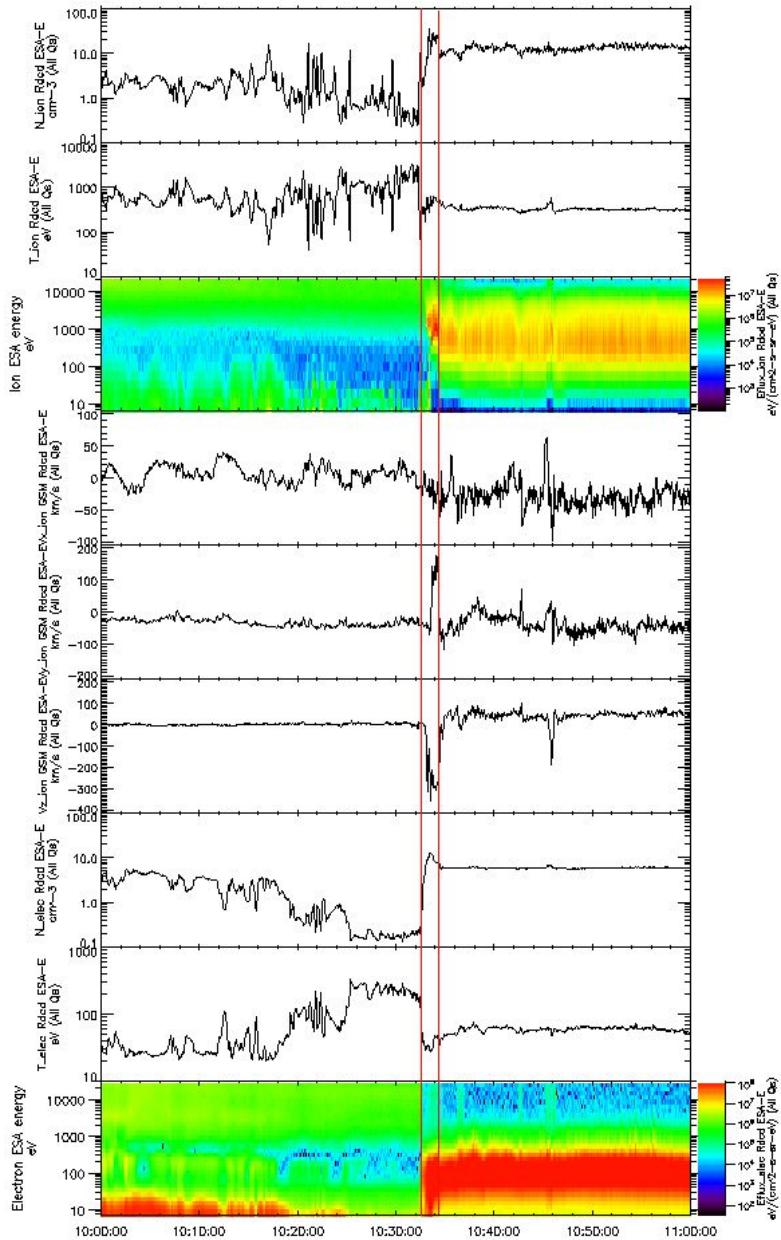
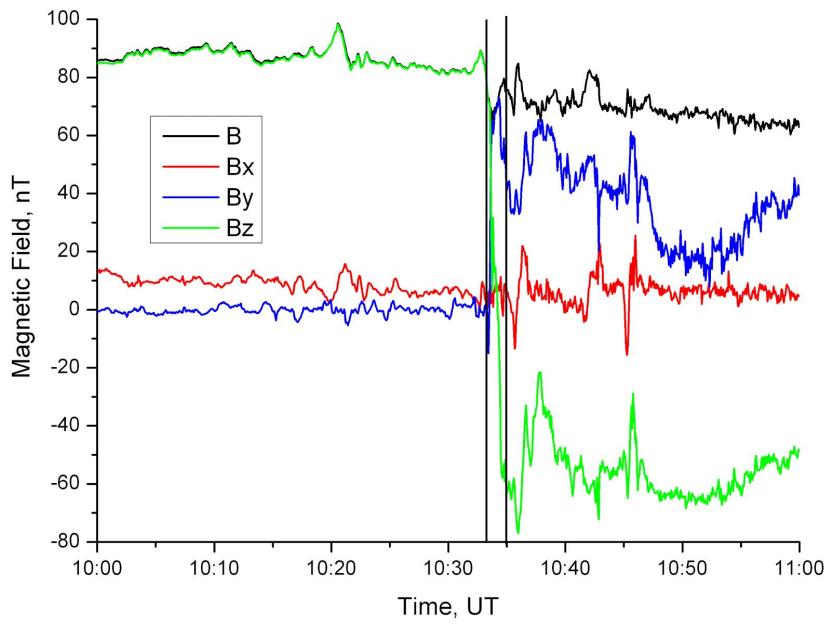
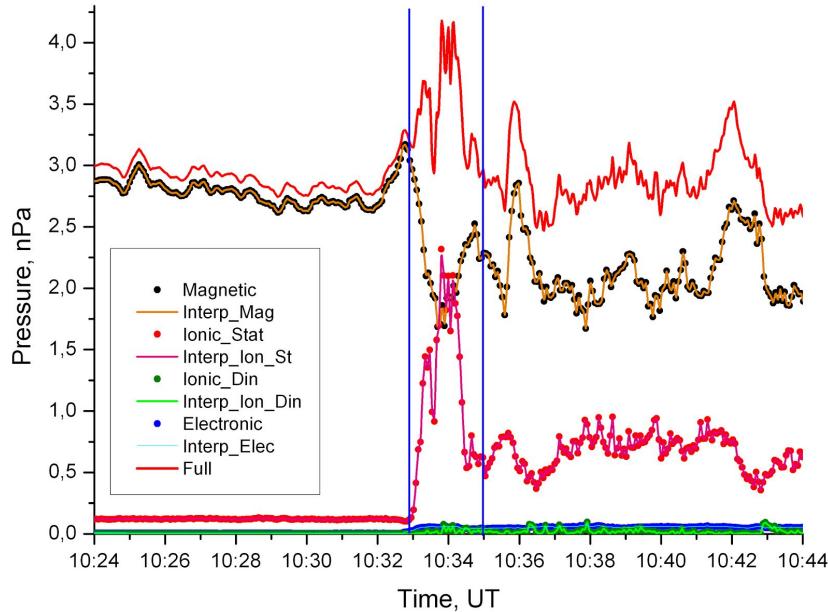


Рис. 3.2.8. Пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-E. На панелях сверху вниз: плотность, температура, спектrogramма ионов; три компоненты скорости ионов в системе GSM; плотность, температура и спектrogramма электронов.



a)



б)

Рис. 3.2.9. (а) Компоненты магнитного поля по данным спутника THEMIS-E, (б) график изменения компонент полного давления во время пересечения.

Значение индекса Dst в момент перехода составляло порядка -72 нТл. Величины полного давления на границах магнитопаузы практически равны. На рис. 3.2.9 а) виден резкий скачок значения z-компоненты магнитного поля с +90 в магнитосфере до -80 в магнитослое. Также резко изменились значения у-компоненты. X-компонента осталась около нуля. На рис. 3.2.9 б) видно, что в магнитосфере полное давление практически полностью

определяется магнитной компонентой, после пересечения магнитопаузы вклад магнитного давления все еще остается наибольшим, но около 30% вносит ионное давление плазмы. После пересечения уровень флюктуаций возрастает.

На рис. 3.2.10 - 3.2.11 показано пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-E в 12:50 UT. Спутник двигался из магнитослоя в магнитосферу.

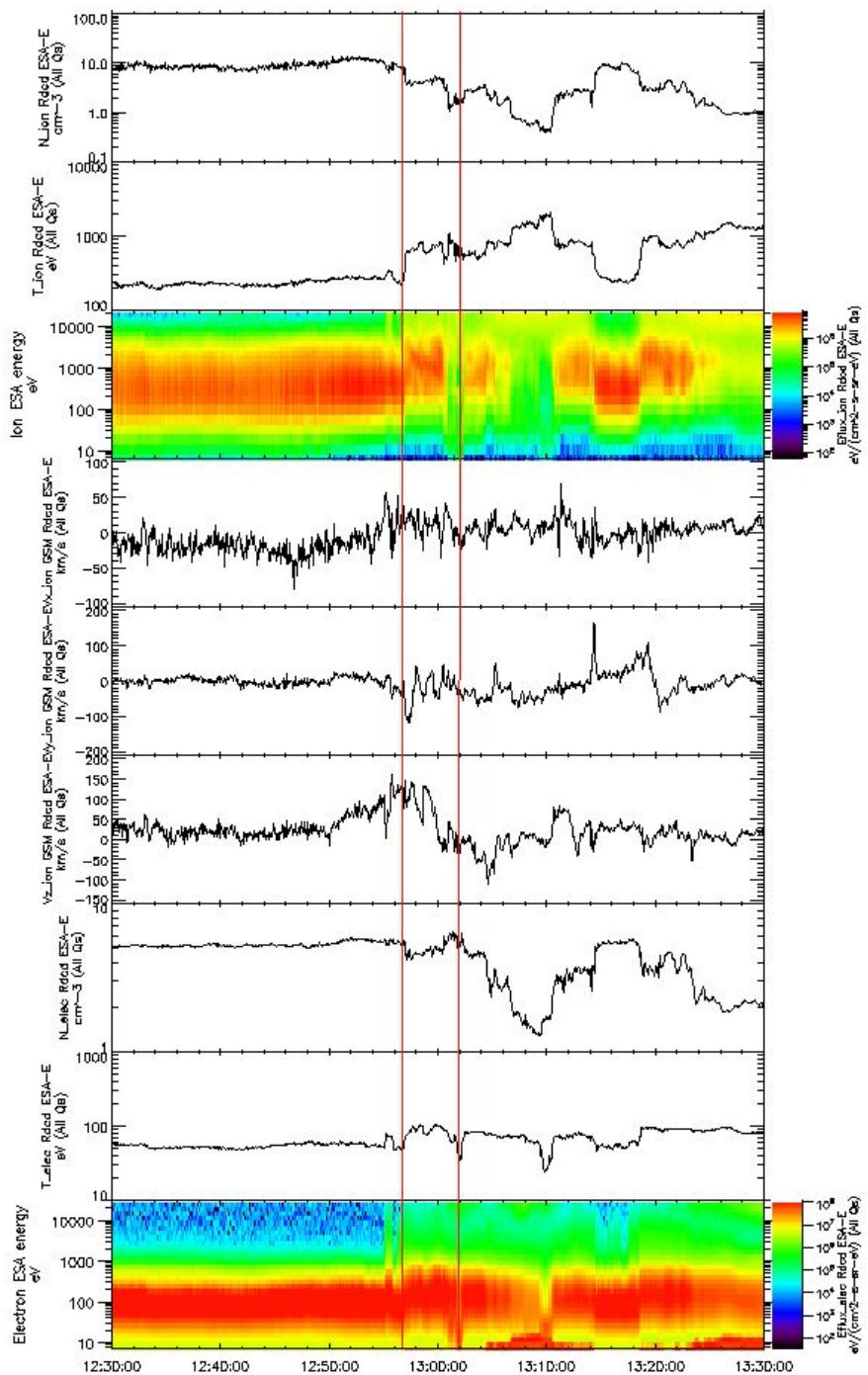
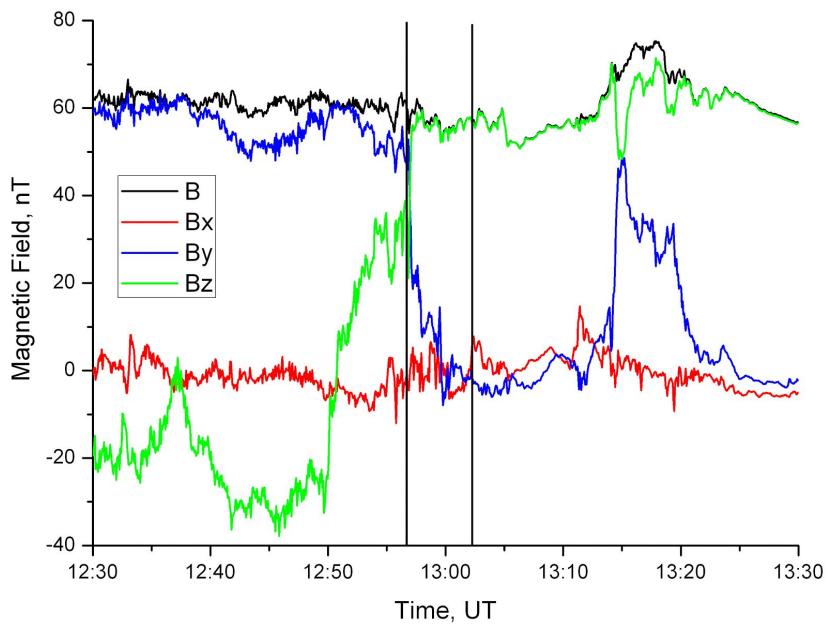
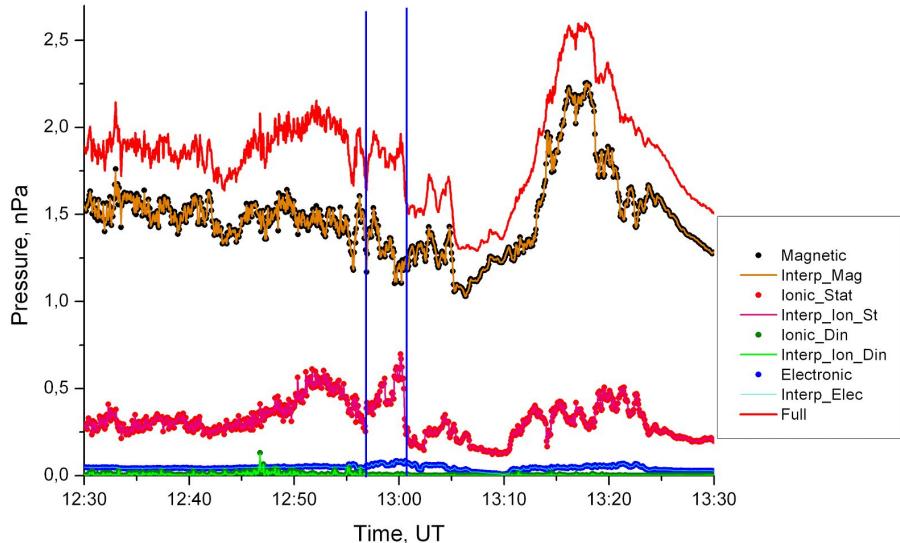


Рис. 3.2.10. Пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-E. На панелях сверху вниз: плотность, температура, спектrogramма ионов; три компонента скорости ионов в системе GSM; плотность, температура и спектrogramма электронов.



a)



б)

Рис. 3.2.11. а) Компоненты магнитного поля по данным спутника THEMIS-E, б) график изменения компонент полного давления во время пересечения.

Значение индекса Dst в момент перехода составляло порядка -88 нТл. Разница давлений на границах магнитопаузы составила около 20%. Это пересечение практически совпало по времени с пересечением магнитопаузы спутником THEMIS-D, который наблюдал похожую картину пересечения. Однако в данном случае в магнитосфере после небольшого проседания на спутнике наблюдается резкое возрастание величины полного давления. Изменения происходят в основном за счет изменений магнитной составляющей.

На рис. 3.2.12 - 3.2.13 показано пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-E в 14:30 UT. Спутник двигался из магнитосферы в магнитослой.

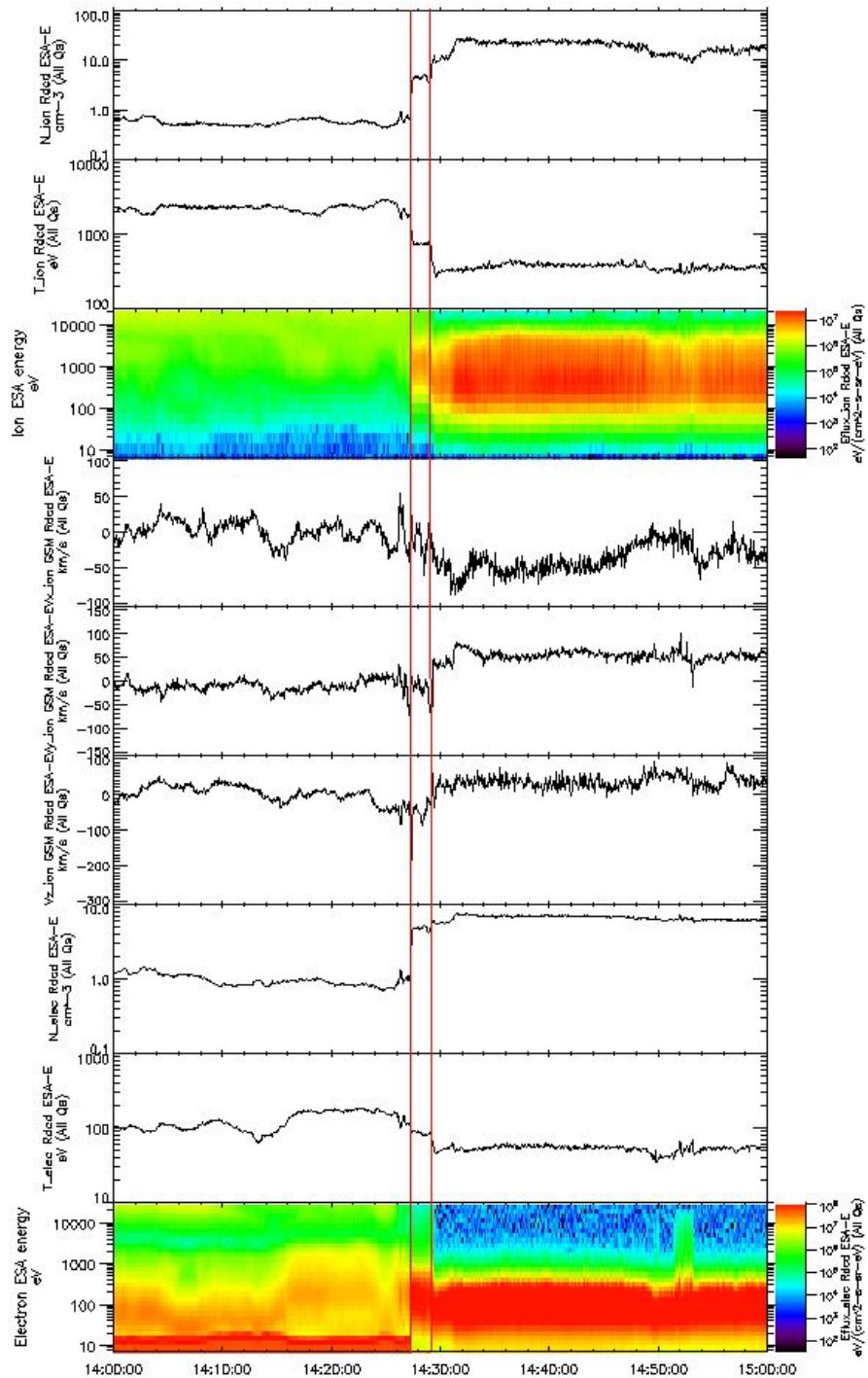
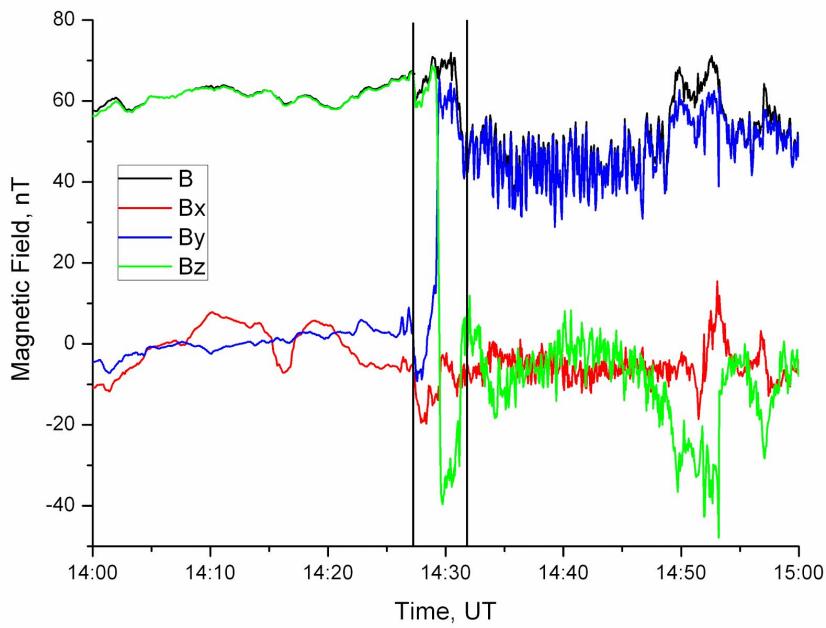
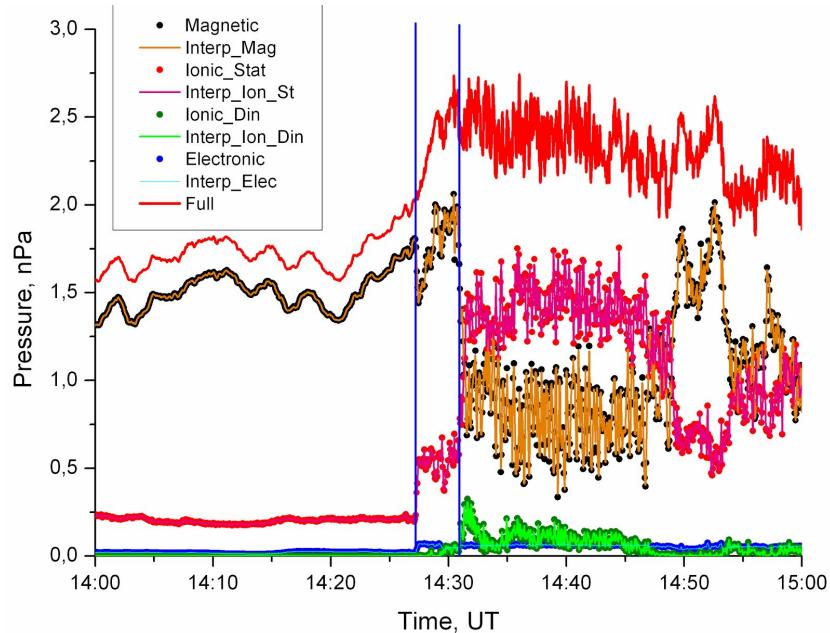


Рис. 3.2.12. Пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-E. На панелях сверху вниз: плотность, температура, спектrogramма ионов; три компоненты скорости ионов в системе GSM; плотность, температура и спектrogramма электронов.



a)



б)

Рис. 3.2.13. а) Компоненты магнитного поля по данным спутника THEMIS-E, б) график изменения компонент полного давления во время пересечения, в) то же в увеличенном временном масштабе (пересечение 5).

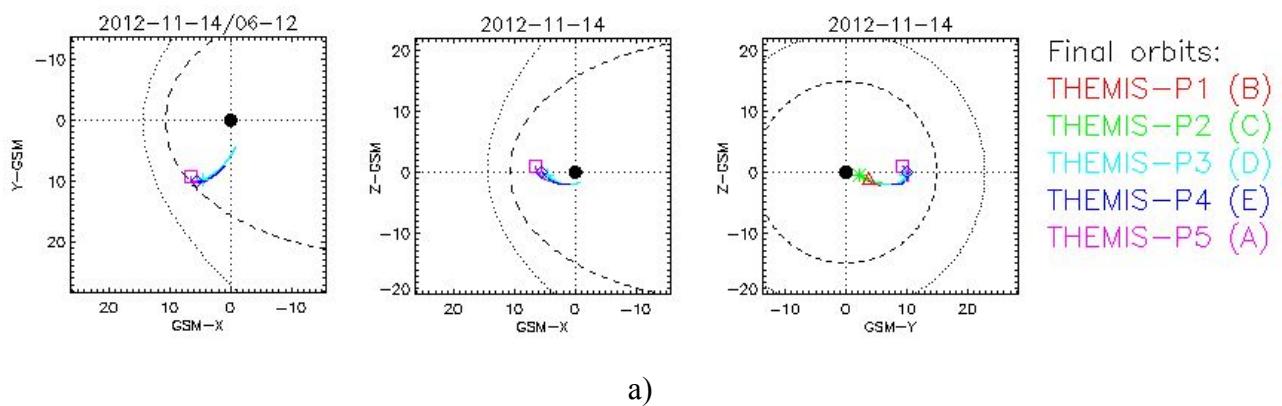
Значение индекса Dst в момент перехода составляло порядка -61 нТл. Разница давлений на границах магнитопаузы составила около 20%. В данном случае наблюдается значительная разница уровня полного давления в магнитослое и в магнитосфере (см. рис. 3.3.13 б)). Уровень флюктуаций в магнитослое также значительно выше, наибольший среди всех

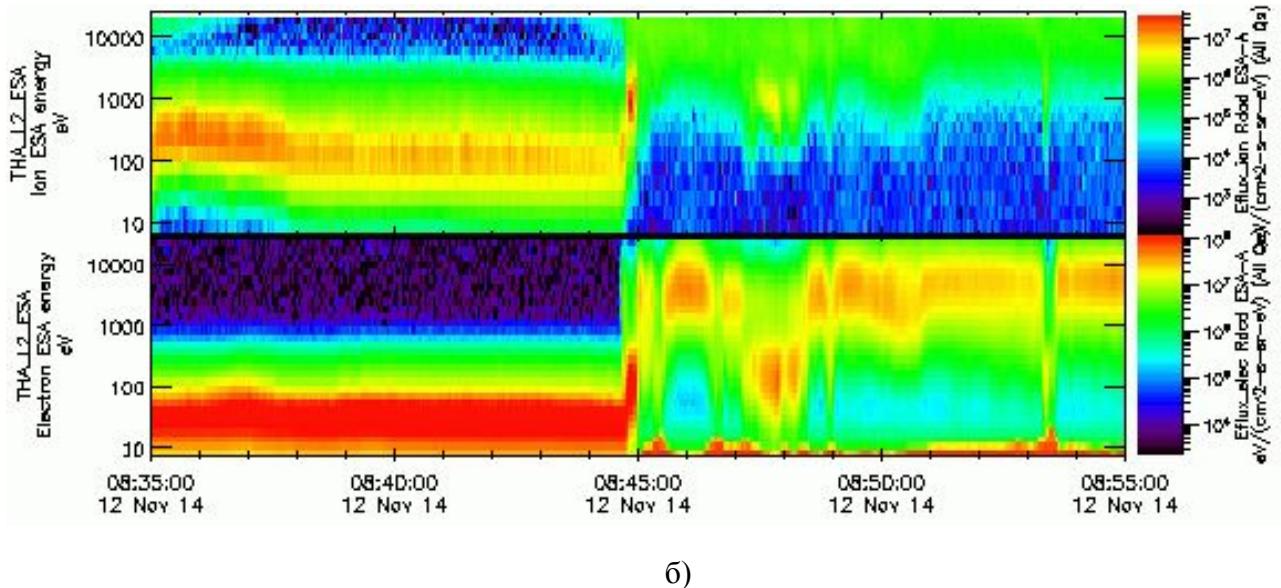
пересечений магнитопаузы во время исследуемой магнитной бури. Это один из немногих случаев буревых пересечений, когда в магнитослой вклад ионного давления в полное становится больше вклада магнитной компоненты. Однако через некоторое время после пересечения магнитная компонента снова становится преобладающей.

Во всех рассматриваемых пересечениях наблюдался дисбаланс давлений внутри и вне магнитопаузы и высокий уровень флюктуаций в магнитослой. Одновременно регистрировались высокие значения индексов авроральной электроструи. Рис. 3.2.3 показывает, что во время пересечений параметры солнечного ветра были относительно стабильны. Несмотря на то, что в данном случае трудно сделать однозначный вывод о причинах изменения положения магнитопаузы, высокие значения авроральных индексов говорят об изменении токов внутри магнитосферы. В поддержку роли данного механизма может свидетельствовать пересечение магнитопаузы во время магнитной бури 14 ноября 2012 г., рассматриваемое ниже.

3.3. Магнитная буря 14 ноября 2012 г

Рассмотрим магнитную бурю 14 ноября 2012 г., для которой имело место пересечение магнитопаузы вблизи максимума бури и удалось получить четкое подтверждение роли изменений токовых систем внутри магнитосферы в изменении положения магнитопаузы. Данная буря изучалась также в работах [Hwang et al., 2015; Dixon et al., 2015; Moya et al., 2015] на геостационарных спутниках и спутниках проекта Van Allen. Рассматриваемая магнитная буря относится к классу больших магнитных бурь. На рис. 3.3.1 показаны положение орбит спутников THEMIS (а) и спектрограммы электронов и ионов при пересечении магнитопаузы спутником THEMIS-A (б).





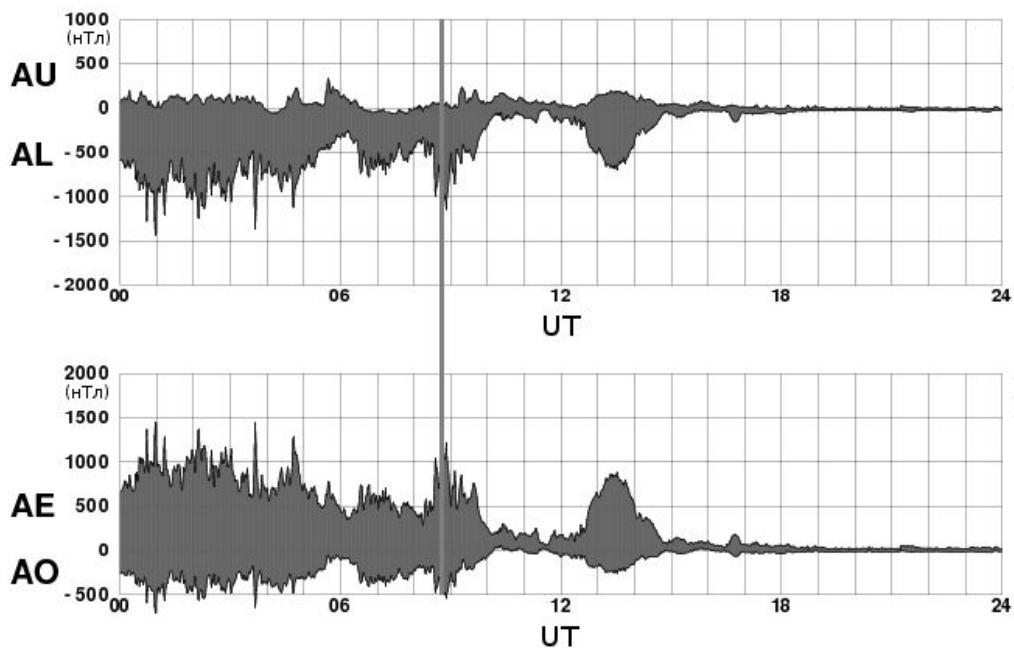
б)

Рис. 3.3.1. Положение орбит спутников THEMIS (а) и спектrogramмы электронов и ионов при пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-A (б).

На рис. 3.3.2 показана Dst вариация для данной бури (а) и изменения геомагнитных индексов AU, AL, AE и AO по данным World Geomagnetic Data Center Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). На рис. 3.3.3 показаны вариации параметров солнечного ветра по данным OMNI. Вертикальная линия на рисунках 3.4.2-3.4.3 показывает момент пересечения магнитопаузы спутником THEMIS-A в 08:45 UT. Буря 14 ноября 2012 г. может рассматриваться в качестве классического события, при котором в течении суток происходило регулярное падение Dst и последующее восстановление, не сопровождаемые изменениями производной Dst. В момент пересечения магнитопаузы параметры солнечного ветра и ММП были относительно стабильны ($B_z = -12$ нТл, $B_y = -8$ нТл, $B_x = 1$ нТл, $P_{dyn} = 2$ нПа). Пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-A имело место вблизи максимума бури при высоких значениях AL индекса геомагнитной активности.



a)



б)

Рис. 3.3.2. Dst вариация во время магнитной бури 14.11.2012 г (а) и изменения геомагнитных индексов AU, AL, AE и AO по данным World Geomagnetic Data Center Kyoto во время бури 14.11.2012 г.

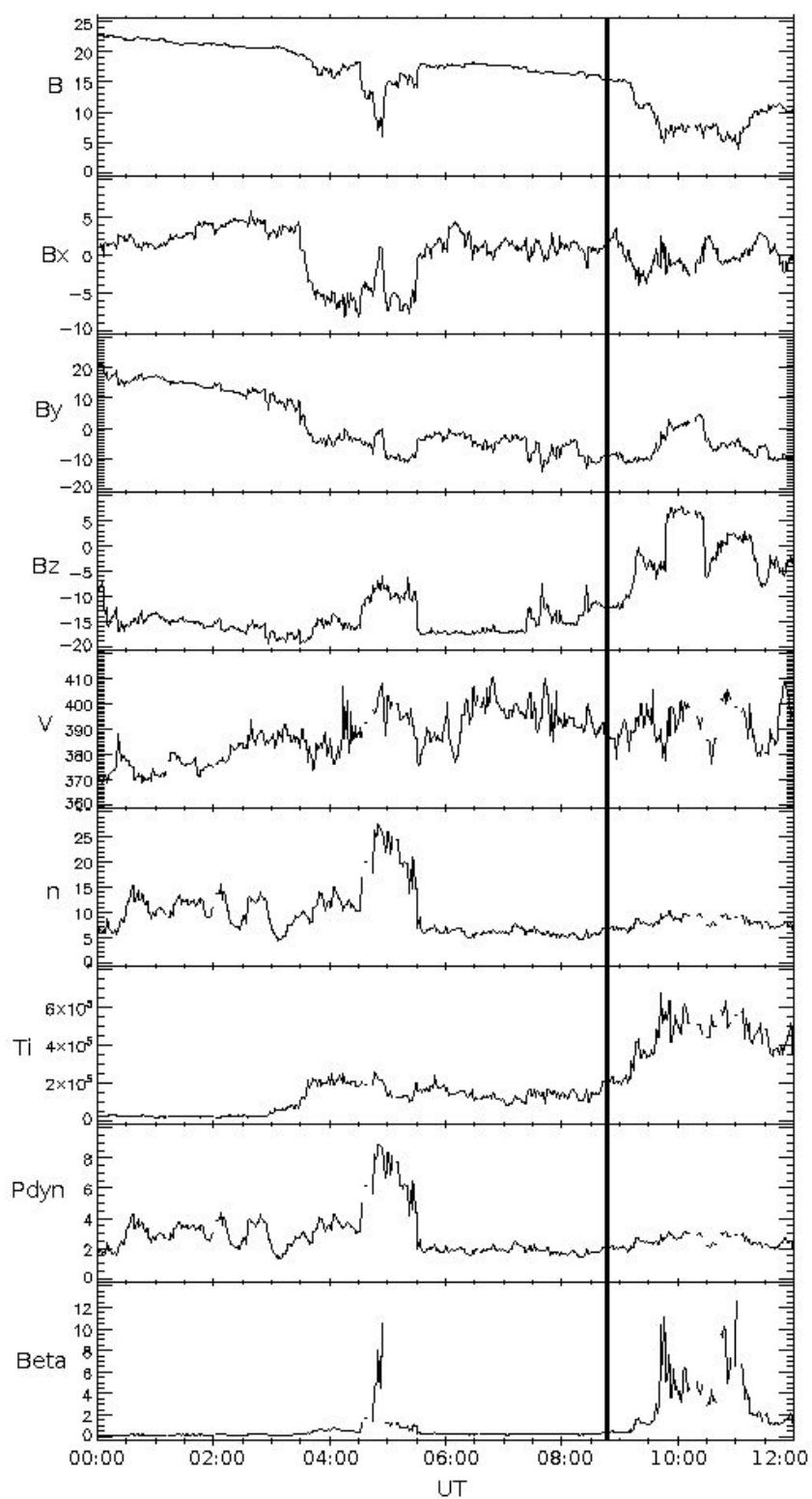


Рис. 3.3.3. Параметры солнечного ветра по базе данных OMNI во время магнитной бури 14.11.2012 г. Сверху вниз: магнитное поле B и три его компонента B_x , B_y , B_z в координатах GSM в нТл; скорость солнечного ветра V в км/с; плотность ионов n в $1/\text{см}^3$; температура ионов T_i в К; динамическое давление P_{dyn} в нПа; плазменный параметр β .

Наибольший интерес представляют изменения параметров плазмы и магнитного поля в получасовом интервале от 08:30 до 09:00 UT (см. рис. 3.3.4), в центре которого в 08:45 UT в пределах ~ 1.5 мин было зафиксировано пересечение магнитопаузы. Пересечение произошло не в подсолнечной точке. Поэтому при анализе использовались системы координат GSM и специальная система координат LMN. В системе координат LMN вектор **n** направлен по нормали к модельной магнитопаузе, вектор **I** лежит в плоскости **n** и **Z** системы координат GSM, а вектор **m** дополняет тройку. В качестве модельной магнитопаузы использовалась модель магнитопаузы Shue et al. [1998]. На панелях рис. 3.3.4 сверху вниз: скорость течения плазмы вдоль векторов LMN (синяя кривая – вдоль нормали, красная – вдоль координаты L, зеленая – вдоль координаты M), локальная альфеновская скорость $V_A = B/\mu_0 \rho$ (B – магнитное поле, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, ρ - плотность плазмы) вдоль векторов LMN (черная кривая - модуль скорости, синяя - нормальная к модельной магнитопаузе компонента скорости, красная - компонента вдоль координаты L, зеленая - компонента вдоль координаты M), плотность ионов, температура ионов, спектrogramма ионов, угол поворота магнитного поля, модуль магнитного поля (сплошная линия) и B_z компонента магнитного поля в GSM системе координат (пунктир), давление плазмы и магнитного поля (голубая линия - интегральное давление, синяя - магнитное давление $B^2/2\mu_0$, красная - давление ионов, зеленая - давление электронов). Динамическое давление во время пересечения было мало и на рисунке не показано. Угол поворота магнитного поля ϕ_B равен 0° , если его проекция (на плоскость LM) и проекция поля непосредственно под магнитопаузой сонаправлены, и $\phi_B=90^\circ$ при ортогональности этих проекций [Paschman et al., 1986; Phan e al., 1994].

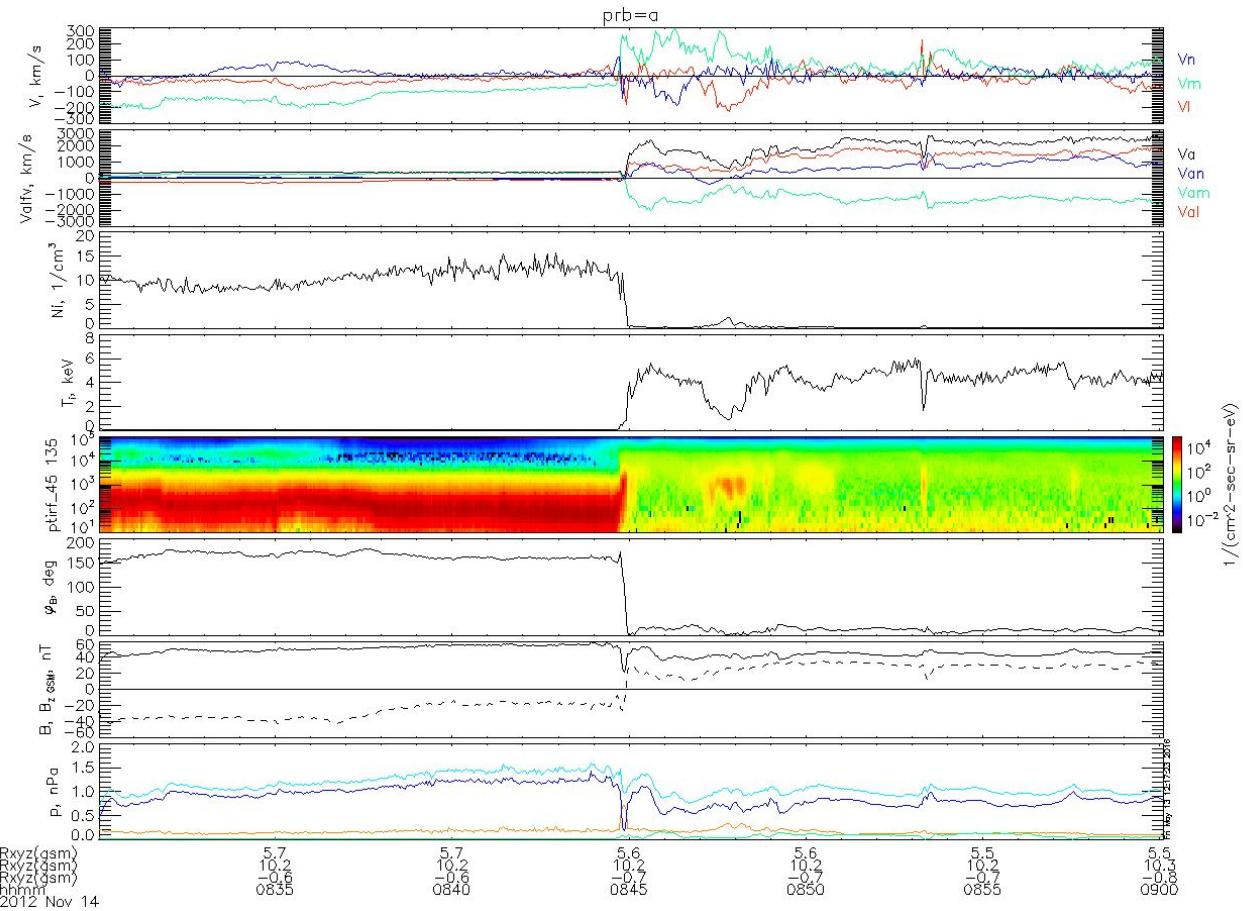


Рис. 3.3.4. Изменения параметров плазмы и магнитного поля на получасовом интервале вблизи максимума магнитной бури 14.11.2012 г. Сверху вниз (для обозначений смотри текст): скорость течения плазмы V вдоль векторов LMN в км/с, локальная альфеновская скорость V_{alf} вдоль векторов LMN в км/с, плотность ионов N_i в $1/\text{см}^3$, температура ионов T_i в K° , спектrogramма ионов - по вертикальной шкале энергия ионов E_i в эВ; угол поворота магнитного поля ϕ_B в градусах; модуль магнитного поля B и B_z компонента магнитного поля в GSM системе координат в нТл; давление плазмы, магнитного поля и интегральное давление P в нПа.

Рассмотрим проекции вектора магнитного поля на плоскости (X,Y) и (X,Z) GSM системы координат (см. рис. 3.3.5). Анализ угла поворота вектора магнитного поля Φ_B свидетельствует о том, что рассматриваемое пересечение относится к классу пересечений с большим «сдвигом» магнитного поля в соответствии с классификацией [Paschman et al., 1986; Phan et al., 1994]. Интервал между векторами магнитного поля составляет 6 мин при усреднении 2 мин. В нижнем левом углу представлен масштабный вектор. При пересечении магнитопаузы из магнитосфера происходит резкое изменение направления

магнитного поля, также имеет место резкое падение плотности плазмы и нарастание температуры. Увеличивается величина скорости течения и амплитуда флуктуаций. Большие скорости течения наблюдаются как вдоль магнитопаузы (L и M направления), так и поперек магнитопаузы в направлении N. При этом непосредственно под магнитопаузой течение плазмы имеет нормальную компоненту, направленную вглубь магнитосферы.

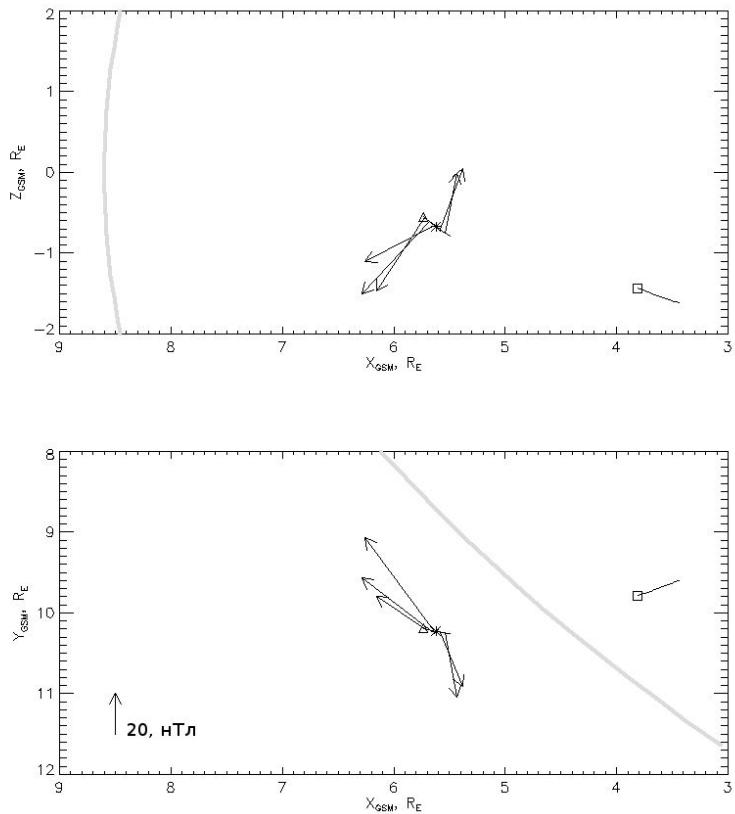


Рис. 3.3.5. Изменения направления магнитного поля при пересечении магнитопаузы в проекции на плоскости (X,Z) и (X,Y) GSM системы координат. Треугольник показывает начальное положение спутника THEMIS-A. Звездочка обозначает момент пересечения магнитопаузы. Серыми линиями изображены проекции модельной магнитопаузы Shue et al. [1998].

Магнитное давление в магнитослое в несколько раз превышает давление плазмы, т.е. в данном случае и магнитослой, и магнитосфера характеризуются как области с малым плазменным параметром $\beta=2\mu_0 p/B^2$, где p - давление плазмы. Исключением является интервал от 08:44:16 до 08:44:57 внутри области большого изменения угла ϕ_B , в котором резко локально нарастает давление плазмы и падает давление магнитного поля при интегральном уменьшении давления. До пересечения магнитопаузы давление в течение 15

мин постепенно нарастает. Внутри магнитосферы в области с характеристиками, соответствующими низкоширотному погранслою (LBL), падает концентрация плазмы и увеличивается магнитное давление. При пересечении магнитопаузы в целом наблюдается падение интегрального давления и вариации магнитного поля с амплитудами $\sim 5\text{--}10$ нТл и периодами ~ 1 мин, которые в соответствии с обзором [Клейменова, 2007] попадают в диапазон Pc-4/Pi-2. Максимальная разница давлений до и после магнитопаузы составляет $\sim 40\%$. Можно отметить, что полное давление практически совпадает на границах получасового интервала и составляет 1 нПа. Наблюданное ускоренное движение плазмы у магнитопаузы внутри магнитосферы может быть связано с наблюдаемым падением интегрального давления в момент пересечения.

Рассмотренное событие показывает, что несмотря на длительную историю изучения процессов на границе магнитосферы, многие вопросы остаются нерешенными (см. ниже). Поэтому сложно идентифицировать рассматриваемое событие в рамках сложившихся подходов. На первых этапах исследований магнитопауза магнитосферы Земли рассматривалась в качестве тангенциального разрыва в областях, где нормальная к магнитопаузе компонента поля равна нулю, или в качестве вращательного разрыва в областях пересоединения магнитного поля магнитосферы и магнитослоя [Физика магнитосферы, 1972]. На тангенциальном разрыве при изотропии давления в системе отсчета, где разрыв неподвижен, должно существовать равенство интегральных давлений вне и внутри магнитосферы. Во вращательном разрыве должна существовать компонента магнитного поля поперек магнитопаузы и не изменяться плотность плазмы. При учете анизотропии давления на вращательном разрыве должно происходить только небольшое изменение плотности [Fuselier et al., 1993]. Последующие наблюдения показали, что на магнитопаузе в результате сдвига скорости течения может развиваться неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, действовать механизмы диффузационного и импульсного проникновения плазмы внутрь магнитосферы, не описываемые в рамках МГД разрывов.

В рассматриваемом случае наблюдалась магнитопауза с большим сдвигом ориентации магнитного поля, что должно было бы приводить к развитию процессов пересоединения и формированию вращательного разрыва. Точное определение величины магнитного поля по нормали к магнитопаузе невозможно из-за недостаточной точности приборов и постоянно наблюдаемых флуктуаций магнитного поля. Было проведено определение нормальной компоненты магнитного поля к модельной магнитопаузе Shue et al. [1998], полученной при усреднении большого числа наблюдений, и компонент поля вдоль магнитопаузы.

Компоненты поля вдоль модельной магнитопаузы на порядок превысили компоненту поля поперек магнитопаузы. Кроме того, на магнитопаузе наблюдается скачок плотности плазмы более чем на порядок величины. Поэтому наблюданное событие не может рассматриваться в качестве вращательного разрыва, что подтверждает выводы работы [Fuselier et al., 1993]. В данной работе утверждалось, что магнитопауза никогда не может быть рассмотрена в качестве стационарного одномерного вращательного разрыва. В ходе рассматриваемого пересечения был зарегистрирован большой дисбаланс давлений плазмы и магнитного поля вне и внутри магнитосферы. На концах получасового интервала, в середине которого было зарегистрировано пересечение магнитопаузы, наблюдались близкие значения интегрального давления. При этом динамическое давление солнечного ветра и параметры ММП по данным базы OMNI за рассматриваемые 30 мин сравнительно мало изменялись (см. рис. 3.3.3). Принимая во внимание большой скачок плотности плазмы и указание на отсутствие компоненты магнитного поля, перпендикулярной к магнитопаузе, можно предположить, что магнитопауза в данном случае является движущимся тангенциальным разрывом.

Скорость движения спутника THEMIS-A на порядок меньше измеренных скоростей движения плазмы. Поэтому за время наблюдений положение спутника в GSM системе координат практически не изменилось (см. рис. 3.3.5). Наблюданное пересечение произошло за счет резкого перемещения магнитопаузы по направлению к Солнцу. Давление плазмы внутри магнитосферы после пересечения практически не изменилось. Поэтому смещение магнитопаузы можно связывать с изменениями магнитного поля внутри магнитосферы и соответствующими изменениями режима обтекания магнитосферы солнечным ветром.

Вариации авроральных индексов четко демонстрируют изменения токовых систем внутри магнитосферы. В экваториальной плоскости наблюдались вариации магнитного поля, что хорошо соответствует одновременно наблюдаемым изменениям AL индекса на рис. 3.4.2. За 15 минут до пересечения магнитопаузы наблюдались относительно небольшие вариации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое с нарастанием давления магнитного поля с 1 до 1.5 нПа. Поэтому изменение положения магнитопаузы и наблюдаемое падение интегрального давления естественно связать с изменениями условий внутри магнитосферы. До пересечения развивалась главная фаза бури. В момент пересечения регистрировались большие значения AL индекса, указывающие на развитие взрывной фазы магнитосферной суббури и резкие изменения токовых систем внутри магнитосферы при магнитосферно-ионосферных взаимодействиях. Поэтому возникновение дисбаланса давлений и изменения положения магнитопаузы при стабильных параметрах магнитослоя

может являться следствием изменений токовых систем внутри магнитосферы в соответствии с работами [Sibeck et al., 1991; Tsyganenko and Sibeck, 1994]. Отметим, что увеличение AL индекса, как было показано еще в начале исследований суббури [Russell and McPherron, 1973] и подтверждено многочисленными данными наблюдений [Shukhtina et al., 2005], сопровождается падением магнитного поля в хвосте магнитосферы и инжекцией частиц в область кольцевого тока (loading-unloading concept).

3.4. Статистическое сравнение пересечений магнитопаузы в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях

Далее приведены некоторые статистически усредненные особенности поведения полного давления и его компонент при пересечении магнитопаузы во время бурь. Проанализированы 57 событий пересечений магнитопаузы во время 16 магнитных бурь. Анализируемые параметры усреднялись по всем пересечениям магнитопаузы, которые удалось выделить. Сравнение проводилось с соответствующими параметрами, усредненными по набору пересечений в спокойной геомагнитной обстановке. При сравнении усредненных величин в каждом событии сначала было произведено усреднение на временном интервале 30 секунд по обеим сторонам магнитопаузы, затем усреднение по набору событий.

Таблица 2.

		Геомагнитные условия			
		Спокойные		Буревые	
Анализируемые параметры		Магнитосфера	Магнитослой	Магнитосфера	Магнитослой
Вклад компонент давления в полное давление (в %)	Магнитное	71,66	32,45	81,05	53,85
	Ионное	26,13	61,12	13,83	30,36
	Динамическое	0,04	1,17	3,32	13,65
	Электронное	2,17	5,26	2,80	2,14
Величина давления на границах магнитопаузы, нПа		1,36	1,38	2,57	2,93
Флуктуации полного давления на границах магнитопаузы (усреднение за 30 сек), %		2,58	13,80	3,08	20,43

Среднее время пересечения МП (по данным спутников), сек		13,24	37,50
Мгновенный дисбаланс давлений на границах	в %	11,57	26,18
	в нПа	0,16	0,72
Усредненный дисбаланс давлений на границах	в %	16,83	31,11
	в нПа	0,23	0,86

Сравнительный анализ указанных событий представлен в таблице 2. Отмечены особенности поведения давления и его компонент во время магнитных бурь. Магнитное давление во многих случаях являлось преобладающим не только внутри магнитосферы, но и в магнитослое. При усреднении по многим пересечениям видно, что вклад магнитной компоненты давления в полное давление значительно выше при возмущенных геомагнитных условиях. Плазменное давление повышается при выходе в магнитослой, но в среднем его вклад в полное давление существенно меньше, чем в спокойных условиях.

Во время бурь возрастает величина флюктуаций давления. Время прохождения магнитопаузы спутниками в среднем также возрастает.

В целом величина давления на границах магнитопаузы во время бурь примерно в два раза превышает среднее давление в спокойных условиях.

Точность соблюдения баланса давлений сильно варьируется для разных случаев пересечений магнитопаузы. В среднем дисбаланс больше для буревых пересечений. В исследованных случаях величина дисбаланса составляла от ~ 2% до ~ 40%.

3.5. Выводы к третьей главе

Исследованные случаи пересечений магнитопаузы при возмущенных геомагнитных условиях, в основном, не отличаются от пересечений в спокойных условиях. Даже при больших отрицательных Dst наблюдаются очень чёткие пересечения с согласованным изменением всех параметров и очень малым дисбалансом давлений. Как и в спокойных геомагнитных условиях, так и во время магнитных бурь можно наблюдать очень высокий уровень турбулентных флюктуаций в магнитослой. Корреляции между величиной дисбаланса давлений и значением Dst во время пересечения магнитопаузы не наблюдается. Во время одной и той же магнитной бури разные спутники могут наблюдать совершенно разную картину во время пересечений магнитопаузы. Магнитное давление в 51 случае из

проанализированных 57 событий пересечений магнитопаузы являлось преобладающим.

Представленные выше результаты говорят о том, что поведение плазмы и магнитного поля в магнитослое не может быть достоверно предсказано только на основе данных солнечного ветра. Магнитное поле в магнитослое, как правило, сильно флюктуирует и может даже по знаку не совпадать с магнитным полем в солнечном ветре. Поскольку параметры магнитослоя перед магнитопаузой непосредственно влияют на магнитосферу, получают объяснение сравнительно невысокие уровни корреляций геомагнитной активности с параметрами солнечного ветра и ММП.

Основной целью задач «космической погоды» является предсказание динамики магнитосферы во время магнитных бурь (см., например, Ермолаев и др. [2010], Yermolaev et al. [2010]). Тurbulentность магнитослоя сильно усложняет решение данной задачи, несмотря на то, что во время магнитных бурь поведение магнитного поля в магнитослое в среднем имеет более регулярный характер (существенный вклад в отличие от спокойных условий вносит магнитное давление). При анализе влияния условий на границе магнитосферы на динамику магнитосферы во время магнитных бурь надо также учитывать изменение положения магнитопаузы и, видимо, ее формы и, соответственно, условий обтекания магнитосферы при изменениях токовых систем внутри магнитосферы. При этом надо принимать во внимание (см., например, [Troshichev and Janzhura, 2012]), что существуют варьирующие со временем временные задержки между изменениями в солнечном ветре и изменениями различных магнитосферных токовых систем. Поэтому улучшения предсказаний «космической погоды» потребует учета турбулентных процессов на границе магнитосферы и контроля динамики токовых систем внутри магнитосферы.

Заключение

Подробнее рассматривая научную новизну работы можно отметить, что в результате впервые проведенного анализа одновременных наблюдений трех компонент магнитного поля и часового угла в солнечном ветре перед ударной волной и в магнитослой непосредственно перед магнитопаузой при усреднениях в 3 с (разрешение использованных данных), 30 с (~ времени корреляций магнитного поля в турбулентном магнитослое) и 90 с (~ времени прохождения солнечного ветра от подсолнечной точки ударной волны до магнитопаузы) показано, что:

1. Модуль магнитного поля у магнитопаузы, в целом, коррелирует с модулем магнитного поля в солнечном ветре с коэффициентом корреляции $r = 0.79$, стандартном отклонении $SD = 2,0$ и усредненным коэффициентом усиления 3.1 ± 1.0 .
2. B_x компонента магнитного поля у магнитопаузы колеблется вблизи нуля независимо от времени усреднения, что хорошо стыкуется с предположением о существовании на магнитопауде разрыва с характеристиками, близкими к тангенциальному разрыву.
3. B_y компонента магнитного поля у магнитопаузы сравнительно хорошо коррелирует с B_y ММП. С увеличением времени усреднения повышается коэффициент корреляции B_y ММП с B_y у магнитопаузы с коэффициентом корреляции 0.78 при стандартном отклонении $SD = 3,6$.
4. Корреляция B_z у магнитопаузы с B_z ММП практически отсутствует. В ~30% случаев для рассмотренного набора событий знак B_z – компоненты магнитного поля вблизи подсолнечной точки не совпадает со знаком B_z – компоненты ММП.
5. При анализе 100 событий показано, что изменение часового угла практически не зависит от часового угла.

В отличие от проводившихся ранее исследований в данной работе проводилось сравнение параметров магнитного поля в магнитослой непосредственно перед магнитопаузой вблизи ее носовой части с параметрами ММП, измеренными перед ударной волной. В целом, подтверждено существование высокого уровня турбулентных флюктуаций магнитного поля в магнитослой. Продемонстрированное изменение знака B_z компоненты поля перед магнитопаузой по сравнению с B_z ММП в ~30% случаев помогает объяснить сравнительно низкие коэффициенты корреляции при анализе зависимости геомагнитной активности от магнитного поля в солнечном ветре.

Впервые проведен сравнительный анализ баланса давлений в подсолнечной точке магнитопаузы в магнитоспокойных условиях и во время магнитных бурь. Выделены пересечения магнитопаузы во время 16 магнитных бурь. Показано, что

1. Магнитное давление в 51 случае из проанализированных 57 событий пересечений магнитопаузы являлось преобладающим (т.е. превышало вклад остальных компонент давления) не только внутри магнитосферы, но и в магнитослое.
2. В результате статистического анализа установлено, что вклад магнитного давления в баланс давлений на магнитопаузе в магнитовозмущенные периоды составляет значительную часть полного давления в магнитослое (~54% от величины полного давления) в отличии от магнитоспокойных периодов, при которых преобладает вклад давления плазмы (~61%).
3. Зарегистрировано возрастание величины флуктуаций полного давления во время магнитных бурь.
4. Анализ времен пересечения магнитопаузы одиночным спутником во время бурь показал тенденцию к увеличению толщины магнитпаузы.
5. Зарегистрировано увеличение давления на границе магнитопаузы во время бурь (примерно, в среднем, в 2 раза для исследованных событий) по сравнению с магнитоспокойными условиями.
6. Определены средние значения дисбаланса давлений во время бурь, составляющие от ~ 2% до ~ 40%.
7. Показано, что при больших дисбалансах давления возникает быстрое (со скоростями ~100 км/с) движение магнитопаузы.

Полученные результаты по анализу магнитных бурь относятся к ограниченному числу событий, что связано с крайне низким уровнем геомагнитной активности в исследованный временной период. Более тщательная проверка полученных результатов потребует многоспутниковых измерений при пересечениях магнитопаузы.

Одновременно с получением описанных в диссертации результатов, автором в составе авторского коллектива проводились работы по исследованиям магнитосферной динамики (см. [Антонова и др., 2012; Antonova et al., 2011, 2012, 2013]) определению зависимостей характеристик низкоширотного погранслоя от характеристик магнитослоя (см. [Знаткова и др., 2013, 2015; Znatkova et al., 2016]).

В заключении автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю проф. Е.Е.Антоновой. Автор искренне благодарен также И.П. Кирпичеву, С.С. Знатковой, М.О. Рязанцевой, совместно с которыми велась работа по проблемам турбулентности магнитослоя, а так же всем, кто помогал цennыми советами как в практической обработке результатов исследования, так и в их теоретическом анализе. Автор также благодарен сотрудникам кафедры Физики космоса физического факультета МГУ и ОКН НИИЯФ МГУ за внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин И.М., Застенкер Г.Н., Рязанцева М.О., Трубачев О.О. О возможной роли электростатического потенциала в формирование резких границ мелкомасштабных и среднемасштабных структур солнечного ветра// Косм. Исслед. Т. 45. № 2. С. 1-6. 2007.
2. Антонова Е.Е., Тверской Б.А. О природе электрических полей во внутренней магнитосфере Земли// Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 2. С. 1-18. 1996.
3. Антонова Е.Е. Радиальные градиенты давления в магнитосфере Земли и величина Dst-вариации// Геомаг. Аэрономия. Т. 41. № 2. С. 148-156. 2001.
4. Антонова Е.Е., Кирпичев И.П., Рязанцева М.О., Марьин Б.В., Пулинец М.С., Знаткова С.С., Степанова М.В. Магнитосферная суббуря и дискретные дуги полярного сияния// Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. В. 6. Р. 31–38. 2012.
5. Арцимович Л.А., Р.З. Сагдеев, Физика плазмы для физиков, М., Атомиздат, 1979, 320 с.
6. Вайсберг О.Л., Смирнов В.Н., Застенкер Г.Н., Савин С.П., Веригин М.И. Взаимодействие солнечного ветра с внешней магнитосферой Земли. Раздел 4.2. Главы 4. Магнитосфера Земли (под ред. В.Ю. Трахтенгерца, А.Г. Демехова). Плазменная гелиофизика, т. 1., под ред. Л.М. Зеленого, М.: Физматлит, С. 378-422. 2008.
7. Головчанская И.В., Козелов Б.В. Свойства электрической турбулентности в ионосфере полярной шапки// Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 5. С. 603-615. 2010.
8. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури// Космические исследования. Т. 48. № 6. С. 499–515. 2010.
9. Знаткова С.С., Антонова Е.Е., Застенкер Г.Н., Кирпичев И.П. Баланс давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки по данным наблюдений спутников проекта THEMIS// Космические исследования. Т. 49. №1. С. 5-23. 2011.
10. Застенкер Г.Н., Чашей И.В. Мелкомасштабные и нестационарные процессы: турбулентность и волны Раздел 3.5. Главы 3. Гелиосфера (под ред. И.С. Веселовского, Ю.И. Ермолаева). Плазменная гелиофизика, т. 1., под ред. Л.М. Зеленого, М.: Физматлит, С. 378-422. 2008.

11. Знаткова С.С., Антонова Е.Е., Пулинец М.С., Кирпичев И.П. Определение толщины низкоширотного погранслоя в магнитосфере Земли// Геом. Аэрон.Т. 53. № 6. С. 745–756, 2013.
12. Знаткова С.С., Антонова Е.Е., Пулинец М.С., Кирпичев И.П., Рязанцева М.О. Толщина низкоширотного погранслоя при разных уровнях флюктуаций магнитного поля в магнитослой// Геомаг. Аэрон. Т. 55. № 5. С. 598–607, 2015.
13. Клейменова Н. Г, Геомагнитные пульсации, Модели Космоса. Т. 1. С. 611-626. 2007.
14. Плазменная гелиофизика, т. 1, под ред. Л.М. Зеленого, М.: Физматлит, 670 с. 2008.
15. Пулинец М.С., М.О. Рязанцева, Е.Е. Антонова, and И.П. Кирпичев. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 769–778. 2012.
16. Россоленко С.С. Баланс давления на магнитопаузе и характеристики низкоширотного пограничного слоя в магнитосфере Земли. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., 2009.
17. Савин Б.И., Шабанский В.П. Солнечный ветер и магнитосфера. § 3. Переходная область и граница магнитосферы. Модель Космоса, под ред. С.Н. Вернова. Изд. МГУ. С. 5-99. 1968.
18. Сагдеев Р.З. Бесстолкновительные ударные волны в разреженной плазме // ЖТФ. Т. 31. С. 1185. 1961.
19. Тверской Б.А. Об электрических полях в магнитосфере Земли// ДАН СССР. Т. 188. № 3. С. 575-578. 1969.
20. Физика магнитосферы. Ред. Д. Вильямс и Дж. Мид. М.: Мир, 1972. 592 с. (перевод Magnetospheric physics, ed. D.I. Williams and G.D. Mead, 1968).
21. Amata E., Savin S. P., Ambrosino D., Bogdanova Y. V., Marcucci M. F., Romanov S., Skalsky A. High kinetic energy density jets in the Earth's magnetosheath: A case study// Planet. Space Sci. V. 59. P. 482–494. doi:10.1016/j.pss.2010.07.021. 2011.
22. Angelopoulos V. The THEMIS Mission// Space Sci. Rev. V. 141. P. 5–34. doi: 10.1007/s11214-008-9336-1. 2008.
23. Anderson B. J., Fuselier S. A. Magnetic pulsations from 0.1 to 4.0 Hz and associated plasma properties in the earth's subsolar magnetosheath and plasma depletion layer // J. Geophys. Res. Vol. 98. P. 1461-1479. 1993.

24. Anderson B. J., Fuselier S. A., Gary S. P., Denton R. E. Magnetic spectral signatures in the Earth's magnetosheath and plasma depletion layer // *J. Geophys. Res.* Vol. 99. P. 5877-5891. 1994.
25. Antonova E.E. Magnetostatic equilibrium and current systems in the Earth's magnetosphere// *Adv. Space Res.* V. 33. P. 752-760. 2004.
26. Antonova E.E., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Pulinets M.S., Znatkova S.S., Orlova K.G., Stepanova M.V. Topology of high latitude magnetospheric currents. In *The Dynamic Magnetosphere*, IAGA Special Sopron Book Series 3, page 201-210, 2011.
27. Antonova Elizaveta E., Maria S. Pulinets, Maria O. Riazantseva, Svetlana S. Znatkova, Igor P. Kirpichev, and Marina V. Stepanova, Exploring the solar wind, ed. Marian Lazar, Chapter 18, Turbulence in the magnetosheath and the problem of plasma penetration inside the magnetosphere. INTECH Croatia, ISBN 978-953-51-0339-4, page 417-438, 2012.
28. Antonova E.E., Kirpichev I.P., Vovchenko V.V., Stepanova M.V., Riazantseva M.O., Pulinets M.S., Ovchinnikov I.L., Znatkova S.S. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances ~7–10re, and magnetospheric current systems// *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* V. 99. No 7. P. 85–91. doi:10.1016/j.jastp.2012.08.013. 2013.
29. Aubry M.P., Russell C.T., Kivelson M.G. Inward motion of the magnetopause before a substorm// *J. Geophys. Res.* V. 75. P. 7018-7031. 1970.
30. Aubry M.P., Kivelson M.G., Russell C.T. Motion and structure of the magnetopause// *J. Geophys. Res.* V. 76. P. 1673-1696, 1971.
31. Auster H.U., Glassmeier K.H., Magnes W., Aydogar O. et. al. The THEMIS fluxgate magnetometer// *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 235–264. doi: 10.1007/s11214-008-9365-9. 2008.
32. Balikhin M. A., Sagdeev R. Z., Walker S. N., Pokhotelov O. A., Sibeck D. G., Beloff N., Dudnikova G. THEMIS observations of mirror structures: Magnetic holes and instability threshold// *Geophys. Res. Lett.* V. 36. L03105. doi:10.1029/2008GL036923. 2009.
33. Balogh A., Schwartz S.J., Bale S.D., Balikhin M.A. et al. Cluster at the Bow Shock: Introduction// *Space Sci. Rev.* V. 118. P. 155–160. 2005.
34. Behannon K.W., Fairfield D.H. Spatial variations of the magnetosheath magnetic field// *Planet. Space Sci.* V. 17. P. 1803-1816. 1969.

35. Budaev V.P., Zelenyi L.M., Savin S.P. Generalized self-similarity of intermittent plasma turbulence in space and laboratory plasmas// *J. Plasma Phys.* V. 81. 395810602. doi:10.1017/S0022377815001099. 2015.
36. Cahill L. J., Amazeen P. G. The boundary of the geomagnetic field// *J. Geophys. Res.* V. 68. P. 1835–1843. doi:10.1029/JZ068i007p01835. 1963.
37. Chapman S., Ferraro V.C.A. A new theory of magnetic storms// *Terr. Magn. Atmos. Electr.* V. 36. P. 77-97. 1931a.
38. Chapman S., Ferraro V.C.A. A new theory of magnetic storms// *Terr. Magn. Atmos. Electr.* V. 36. P. 171-196. 1931b.
39. Coleman P.J., Sonett C.P., Judge D.L., Smith E.J. Some preliminary results of the Pioneer V magnetometer experiment// *J. Geophys. Res.* V. 65. P. 1856–1857. doi:10.1029/JZ065i006p018561960. 1960.
40. Coleman I. J. A multi-spacecraft survey of magnetic field line draping in the dayside magnetosheath// *Ann. Geophys.* V. 23. P. 885–900. 2005.
41. Crooker N.U., Luhmann J.G. , Russell C.T., Smith E.J., Spreiter J.R, Stahara S.S. Magnetic field drapping against the dayside magnetopause// *J. Geophys. Res.* V. 90. No A4. P. 3505-3510. 1985.
42. Dixon, P., et al. Multipoint observations of the open-closed field line boundary as observed by the Van Allen Probes and geostationary satellites during the 14 November 2012 geomagnetic storm// *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 120. P. 6596–6613. doi:10.1002/2014JA020883. 2015.
43. Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Three dimensional artificial neural network model of the dayside magnetopause// *J. Geophys. Res.* V. 105. No A8. P. 18909–18918. doi:10.1029/2000JA900008. 2000.
44. Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Large-scale jets in the magnetosheath and plasma penetration across the magnetopause: THEMIS observations// *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 120. P. 4423–4437. doi:10.1002/2014JA020953. 2015.
45. Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and auroral zone// *Phys. Rev. Lett.* V. 6. No 1. P. 47-49. 1961.
46. Dungey J.W. The interplanetary magnetic field and the auroral zones// *Ionospheric research*, Scientific report No. 157. March 15, 1962.
47. Echim M.M., Lemaire J.F. Laboratory and numerical simulations of the impulsive penetration mechanism// *Space Sci. Rev.* V. 92. P. 565-601. 2000.

48. Echim J., Lemair J. Positive density gradients at the magnetopause: interpretation in the framework of the impulsive penetration mechanism// *J. Atmos. Solar-Terr. Physics.* V. 64. P. 2019-2028. doi:10.1016/S1364-6826(02)00229-8. 2002.
49. Fairfield D.H. The ordered magnetic field of the magnetosheath// *J. Geophys. Res.* V. 72. No 23. P. 5865-5877. 1967.
50. Fairfield D.H., Ness N.F. Magnetic field fluctuations in the Earth's magnetosheath// *J. Geophys. Res.* V. 75. No 1. P. 6050-6060. 1970.
51. Freeman J. W. The Morphology of the Electron Distribution in the Outer Radiation Zone and near the magnetospheric boundary as observed by Explorer 12// *J. Geophys. Res.* V. 69. No 9. P. 1691-1723. doi:10.1029/JZ069i009p01691. 1964.
52. Fuselier S.A., Shelley E.G., Klumpar D.M. Mass density and pressure changes across the dayside magnetopause// *J. Geophys. Res.* V. 98. № A3. P. 3935-3942. doi:10.1029/92JA02236. 1993.
53. Gary S. P. The mirror and ion cyclotron anisotropy instabilities // *J. Geophys. Res.* V. 97. P. 8519-8529. 1992.
54. Gary S. P., Fuselier S. A., Anderson B. J. Ion anisotropy instabilities in the magnetosheath // *J. Geophys. Res.* V. 98. P. 1481-1488. 1993.
55. Gary S. P., Convery P. D., Denton R. E. et al. Proton and helium cyclotron anisotropy instability thresholds in themagnetosheath // *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 5915-5921. 1994.
56. Gosling J.T., Asbridge J.R., Bame S.J., Strong I.B. Vela 2 measurements of the magnetopause and bow shock positions// *J. Geophys. Res.* V.72. No 1. P. 101-112. doi:10.1029/JZ072i001p00101. 1967.
57. Gutynska O., Němeček Z., Šafránková J. Correlation length of magnetosheath fluctuations: Cluster statistics// *Ann. Geophys.* V. 26. P. 2503–2513. 2008.
58. Haerendel G., Pashmann G., Scopke N., Rosenbauer H., Hedgecock C. The frontside boundary layer of magnetosphere and the problem of reconnection. *J. Geophys. Res.* V. 83. P. 3195-3216. doi:10.1029/JA083iA07p03195. 1978.
59. Hasegawa H. et al. Evidence for a flux transfer event generated by multiple X-line reconnection at the magnetopause// *Geophys. Res. Lett.* V. 37. L16101. doi:10.1029/2010GL044219. 2010.
60. Howe H. C., Binsack J. H. Explorer 33 and 35 plasma observations of magnetosheath flow. *J. Geophys. Res.* V. 77. P. 3334. doi:10.1029/JA077i019p03334. 1972.
61. Hwang, K.-J., et al. The global context of the 14 November 2012 storm event// *J. Geophys.*

- Res. Space Physics. V. 120. P. 1939–1956. doi:10.1002/2014JA020826. 2015.
- 62. Karimabadi H., Roytershteyn V., Vu H. X., Omelchenko Y. A., Scudder J., Daughton W., Dimmock A., Nykyri K., Wan M., Sibeck D., Tatineni M., Majumdar A., Loring B., Geveci B. The link between shocks, turbulence, and magnetic reconnection in collisionless plasmas// Physics of Plasmas. V. 21. 062308. doi: 10.1063/1.4882875. 2014.
 - 63. Kaymaz Z., Luhmann J.G ., Fedder J.A., Lyon J.G., Spreiter J.R ., Stahara S. S. Evidence for reverse draping of magnetosheath field around the magnetosphere in IMP 8 observations for northward interplanetary magnetic field// J. Geophys. Res. V. 101, NO. A6. P. 13321-13326, 1996.
 - 64. Lemaire J. Impulsive penetration of filamentary plasma elements into the magnetospheres of the Earth and Jupiter// Planet. Space Sci. V. 25. P. 887–890. doi:10.1016/0032-633(77)90042-3. 1977.
 - 65. Lemaire J. Plasmoid motion across a tangential discontinuity (with application to the magnetopause)// J. Plasma Phys. V. 33. № 3. P. 425–436. 1985.
 - 66. Lucek E. A., Constantinescu D., Goldstein M.L., Pickett J., Pinçon J.L., Sahraoui F., Treumann R.A., Walker S.N. Chapter 5. The Magnetosheath// Space Sci. Rev. V. 118. P. 95–152. doi:10.1007/s11214-005-3825-2. 2005.
 - 67. Lutsenko V.N., Kudela K. Almost monoenergetic ions near Earth's magnetosphere boundaries// Geophys. Res. Lett. V. 26. No 3. P. 413-416. 1999.
 - 68. Lynn Y.M. Discontinuities in an anisotropic plasma// The Physics of Fluids. V. 10. № 10. P. 2278-2280. 1967.
 - 69. McFadden J.P., Carlson C.W., Larson D., Ludlam M., Abiad R., Elliott B., Turin P., Marckwordt M., Angelopoulos V. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration // Space Sci. Rev. V. 141. P. 277–302. doi: 10.1007/s11214-008-9440-2. 2008.
 - 70. Moya P.S., Pinto V.A., Vicas A.F., Sibeck D.G., Kurth W.S., Hospodarsky G.B., Wygant J. R. Weak kinetic Alfvén waves turbulence during the 14 November 2012 geomagnetic storm: Van Allen Probes observations// J. Geophys. Res. Space Physics. V. 120. P. 5504–5523. doi:10.1002/2014JA020281. 2015.
 - 71. Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F. J. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables// J. Geophys. Res. V. 112. A01206. doi:10.1029/2006JA012015. 2007.

72. Němeček Z., Šafránková J., Zastenker G.N., Pišoft P., Paularena K.I., Richardson J.D. Observations of the radial magnetosheath profile and a comparison with gasdynamic model predictions// *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 17. P. 2801–2804. 2000.
73. Omidi N., Sibeck D., Gutynska O., Trattner K.J. Magnetosheath filamentary structures formed by ion acceleration at the quasi-parallel bow shock// *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 119. P. 2593–2604. doi:10.1002/2013JA019587. 2014.
74. Panov E.V., Büchner J., Fränz M., Korth A., Savin S. P., Réme H., Fornacon K.-H. High-latitude Earth's magnetopause outside the cusp: Cluster observations// *J. Geophys. Res.* V. 113. doi:10.1029/2006JA012123. 2008.
75. Paschman G., Papamastorakis W., Baumjohann W., Sckopke N., Carlson C.W., Sonnerup B.U.Ö., Lühr H., The magnetopause for large magnetic shear: AMPTE/IRM observations// *J. Geophys. Res.* V. 91. No A10. P. 11099-1115. 1986.
76. Paschmann G., Baumjohann W., Sckopke N., Phan T.-D. Structure of the dayside magnetopause for low magnetic shear// *J. Geophys. Res.* V. 98. No A8. P. 13409-13422. 1993.
77. Phan T.-D, Paschman G., Baumjohann W., Sckopke N., Lühr H. The magnetosheath region adjacent to the dayside magnetopause: AMPTE/IRM observations // *J. Geophys. Res.* V. 99. № A1. P. 121-141. 1994.
78. Phan T.-D, Paschman G. Low-latitude dayside magnetopause and boundary layer for high magnetic shear: Structure and motion// *J. Geophys. Res.* V. 101. No A4. P. 7801-7815. 1996.
79. Petrinec S.M., Russell C.T. An empirical model of the size and shape of the magnetopause// *Geophys. Res. Lett.* V. 20. P. 2695–2698. 1993.
80. Pokhotelov O.A., Treumann R.A., Sagdeev R.Z., Balikhin M.A., Onishchenko O.G., Pavlenko V.P., Sandberg I. Linear theory of the mirror instability in non-Maxwellian space plasmas// *J. Geophys. Res.* V. 107. No A10. 1312. doi:10.1029/2001JA009125. 2002.
81. Pokhotelov O.A., Sagdeev R.Z., Balikhin M.A., Treumann R.A. Mirror instability at finite ion-Larmor radius wavelengths// *J. Geophys. Res.* V. 109. A09213. doi:10.1029/2004JA010568. 2004.
82. Pokhotelov O.A., Sagdeev R.Z., Balikhin M.A., Onishchenko O.G., Fedun V.N. Nonlinear mirror waves in non-Maxwellian space plasmas// *J. Geophys. Res.* V. 113. A04225. doi:10.1029/2007JA012642. 2008.

83. Pulinets M.S., Antonova E.E., Riazantseva M.O., Znatkova S.S., Kirpichev I.P. Comparison of the magnetic field before the subsolar magnetopause with the magnetic field in the solar wind before the bow shock// *Adv. Space Res.* V. 54. No 4. P. 604–616. doi:10.1016/j.asr.2014.04.023. 2014.
84. Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Safrankova J., Modification of small- and middle-scale solar wind structures by the bow shock and magnetosheath: Correlation analysis// *Planet. Space Sci.* V. 115. P. 12-18. doi:10.1016/j.pss.2015.03.003. 2015.
85. Riazantseva M.O., Zastenker G.N., Richardson J.D., Eiges P.E. Sharp boundaries of small- and middle-scale solar wind structures// *J. Geophys. Res.* V. 110. A12110. doi:10.1029/2005JA011307. 2005.
86. Riazantseva M.O., Khabarova O.V., Zastenker G.N., Richardson J.D. Sharp boundaries of solar wind plasma structures and their relationship to solar wind turbulence// *Adv. Space Res.* V. 40. P. 1802–1806. 2007.
87. Riazantseva M.O., Budaev V.P., Zelenyi L.M., Zastenker G.N., Pavlos G.P., Safrankova J., Němeček Z., Prech L., Nemec F. Dynamic properties of small-scale solar wind plasma fluctuations// *Phil. Trans. R. Soc. A* 373. 20140146. doi:10.1098/rsta.2014.0146. 2015.
88. Roelof E.C., Sibeck D.G. The magnetopause shape as a bivariate function of IMF B_z and solar wind dynamic pressure// *J. Geophys. Res.* V. 98. P. 21421–21450. 1993.
89. Russell C. T., McPherron R. L. The magnetotail and substorms// *Space Sci. Rev.* V. 15. P. 205–266. 1973.
90. Šafránková J., Hayosh M., Gutynska O., Němeček Z., Prech L. Reliability of prediction of the magnetosheath B_z component from interplanetary magnetic field observations// *J. Geophys. Res.* V. 114. A12213. doi:10.1029/2009JA014552. 2009.
91. Savin S., Skalsky A., Zelenyi L., Avanov L. et al. Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause// *Surveys in Geophysics.* V. 26. P. 95-133. doi:10.1007/s10712-005-1874-4. 2005.
92. Savin S., Amata E., Zelenyi L., Budaev V., Consolini G., Treumann R., Lucek E., Šafránková J., Němeček Z., Khotyaintsev Y., André M., Büchner J., Alleyne H., Song P., Blecki J., Rauch J.L., Romanov S., Klimov S., Skalsky A. High kinetic energy jets in the Earth's magnetosheath: Implications for plasma dynamics and anomalous transport// *JETP Letters.* V. 87. P. 593–599. 2008.
93. Savin S., Budaev V., Amata E., Zelenyi L., Sibeck D., Lutsenko V., Borodkova N., Zhang H., Angelopoulos V., Šafránková J., Němeček Z., Blecki J., Büchner J., Kozak L.,

- Romanov S., Skalsky A., Krasnoselsky V. Dynamic interaction of plasma flow with boundary layer of geomagnetic trap// JETP Letters. V. 93. P. 827–846. 2011.
94. Shevrev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // Planet. Space Sci. V. 53. P. 95-102. 2005.
95. Shue J. H., Song P., Russel C.T. et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions// J. Geophys. Res. V. 103A. P. 17 691–17 700. doi:10.1029/98JA01103. 1998.
96. Shukhtina M.A. , Dmitrieva N.P., Popova N.G. , Sergeev V.A., Yahnin A.G., Despirak I.V. Observational evidence of the loading-unloading substorm scheme// Geophys. Res. Lett. V. 32. doi:10.1029/2005GL023779. 2005.
97. Sibeck D.G., Lopez R.E., Roelof E.C. Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion// J. Geophys. Res. V. 96. No A4. P. 5489–5495. doi:10.1029/90JA02464. 1991.
98. Sibeck D.G., Paschmann G., Treumann R. A., Fuselier S. A., Lennartsson W., Lockwood M., Lundin R., Ogilvie K. W., Onsager T. G., Phan T.-D., Roth M., Scholer M., Sckopke N., Stasiewicz K., Yamauchi M. Chapter 5 - Plasma Transfer Processes at the Magnetopause// Space Sci. Rev. V. 88. Issue 1/2. P. 207-283. doi:10.1023/A:1005255801425. 1999.
99. Sibeck D.G., Angelopoulos V. THEMIS science objectives and mission phases// Space Sci. Rev. V. 141. P. 35–59. doi: 10.1007/s11214-008-9393-5. 2008.
100. Sibeck D.G., Lopez R.E., Roelof E.C. Solar wind control of the magnetopause shape, loation and motion// J. Geophys. Res. V. 96. No A4. P. 5489–5495. doi:10.1029/90JA02464. 1991.
101. Sonett C.P., Judge D.L., Sims A.R., Kelso J.M. A radial rocket survey of the distant geomagnetic field// J. Geophys. Res. Vol. 65, P. 55. doi:10.1029/JZ065i001p000551960. 1960.
102. Soucek J., Lucek E., Dandouras I. Properties of magnetosheath mirror modes observed by Cluster and their response to changes in plasma parameters// J. Geophys. Res. V. 113. A04203. doi:10.1029/2007JA012649. 2008.
103. Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere// Planet. Space Sci. V. 14. P. 223–253. 1966.
104. Spreiter J.R., Stahara S.S. A new predictive model for determining solar wind terrestrial planet interaction// J. Geophys. Res. V. 85. No A12. P. 6769–6777. 1980.

105. Tátrallyay M., Erdös G., Németh Z., Verigin M.I., Vennerstrom S., Multispacecraft observations of the terrestrial bow shock and magnetopause during extreme solar wind disturbances// *Ann. Geophys.* V. 30. P. 1675–1692. doi:10.5194/angeo-30-1675-2012. 2012.
106. The physics of the magnetopause. Ed. P. Song, B.U.Ö. Sonnerup, M.F. Thomsen. *Geophysical monograph* 90. 1995.
107. Troshichev O., Sormakov D., Janzhura A. Relation of PC index to the geomagnetic storm Dst variation// *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 73. P. 611–622. doi:10.1016/j.jastp.2010.12.015. 2011.
108. Troshichev O., Janzhura A. Space weather monitoring by ground based means, PC index. Springer. 2012. 287 p.
109. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure// *J. Geophys. Res.* V. 107. No A8. doi:10.1029/2001JA000219. 2002a.
110. Tsyganenko, N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations// *J. Geophys. Res.* V. 107. No A8. doi: 10.1029/2001JA000220. 2002b.
111. Tsyganenko N.A., Sibeck D.G. Concerning flux erosion from the dayside magnetosphere// *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 13425-13436. 1994.
112. Tverskoy B. A. Electric fields in the magnetosphere and the origin of trapped radiation// *Solar-Terrestrial Physics*, edited by E. R. Dyer, Dordrecht, Holland. P. 297-317. 1972.
113. Verigin M.I., Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Zastenker G.N., Nikolaeva N. Analytical model of the near Earth magnetopause according to the Prognoz and Interball satellite data// *Sol.–Terr. Phys.* V. 1. Issue 12. P. 133–137. 2008.
114. Verigin M.I., Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Zastenker G.N., Nikolaeva N. Analytical model of the near-Earth magnetopause according to the data of the Prognoz and Interball satellite data// *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 49. No 8. P. 1176-1181. doi:10.1134/S0016793209080283. 2009.
115. Wang Y., Sibeck D.G., Merka J., Boardsen S.A., Karimabadi H., Sipes, Šafránková J., Jelínek K., Lin R. A new three-dimensional magnetopause model with a support vector regression machine and a large database of multiple spacecraft observations// *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 118. P. 2173–2184. doi:10.1002/jgra.50226. 2013.

116. Wolfe J.H., Silva R.W., Myers M.A. Observations of the Solar Wind during the flight of Imp 1// *J. Geophys. Res.* V. 71. P. 1319–1340. doi:10.1029/JZ071i005p01319. 1966.
117. Wolfe J.H., Silva R.W. Explorer 14 Plasma Probe Observations during the October 7, 1962 Geomagnetic Disturbances// *J. Geophys. Res.* V. 70. No15. P. 3575-3579. doi:10.1029/JZ070i015p03575. 1970.
118. Xing X., Lyons L.R., Angelopoulos V., Larson D., McFadden J., Carlson C., Runov A., Auster U. Azimuthal plasma pressure gradient in quiet time plasma sheet// *Geophys. Res. Lett.* V. 36. No 14. L14105. doi:10.1029/2009GL038881. 2009.
119. Yermolaev Yu. I., Nikolaeva N. S., Lodkina I. G., Yermolaev M. Yu. Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and CME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis// *Ann. Geophys.* V. 28. No 12. P. 2177-2186. 2010.
120. Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., Němeček Z. et al. Multispacecraft measurements of plasma and magnetic field variations in the magnetosheath: Comparison with Spreiter models and motion of the structures// *Planet. Space Sci.* V. 50. № 5-6. P. 601-612. 2002.
121. Zwan B. J., Wolf R. A. Depletion of solar wind plasma near a planetary boundary // *J. Geophys. Res.* Vol. 81. P. 1636-1648. 1976.