

На правах рукописи



Пулинец Мария Сергеевна

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

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2016

Работа выполнена на Кафедре физики космоса физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Антонова Елизавета Евгеньевна

Официальные оппоненты: **Клейменова Наталья Георгиевна**,
доктор физико-математических наук, профессор,
(Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН) г. Москва,
главный научный сотрудник

Веригин Михаил Иванович
доктор физико-математических наук,
(Институт космических исследований РАН), г. Москва,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.
Федорова (ФГБУ "ИПГ"), г. Москва

Защита диссертации состоится «12» октября 2016 г. в 16 час. 30 мин. на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 (19-й корпус НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и на сайтах:

http://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/936/d5b/23277597/Dissertatsiya_Pulinets.pdf

http://sinp.msu.ru/system/files/dissertations/dissertaciya_pulinec.pdf

Автореферат разослан «5» сентября 2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д501.001.45
кандидат физико-математических наук



Вохник О. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 ~ 1-2 суток) и измерения в солнечном ветре (за время ~ 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 величин 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 флуктуаций поля в подсолнечной точке магнитосферы 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.

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, написаны статьи по теме исследований. 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.

Структура и объем диссертации

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.

Содержание работы

Введение

Глава 1.

Результаты исследований магнитослоя и предсказания геомагнитной активности

- 1.1. Характеристики магнитослоя
- 1.2. Обтекание солнечным ветром магнитосферы Земли
- 1.3. Связь геомагнитной активности с условиями в солнечном ветре
- 1.4. Условия в магнитослое и баланс давлений на магнитопаузе
- 1.5. Пятиспутниковый проект THEMIS
- 1.6. Выводы к первой главе и обзор содержания работы

Глава 2.

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

- 2.1. Методика анализа данных
- 2.2. Зависимости компонент магнитного поля перед магнитопаузой от соответствующих величин в солнечном ветре
- 2.3. Уровень флуктуаций в случае квазипараллельных и квазиперпендикулярных ударных волн
- 2.4. Выводы ко второй главе

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
- 3.2. Баланс давлений на магнитопаузе во время магнитных бурь на примере магнитной бури 20 февраля 2014
- 3.3. Магнитная буря 14 ноября 2012 г.
- 3.4. Статистическое сравнение пересечений магнитопаузы в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях
- 3.5. Выводы к третьей главе

Заключение

Список литературы

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследований. Приводятся положения, выносимые на защиту. Отмечается практическая и теоретическая ценность работы, научная новизна работы и личный вклад автора. Приводится список научных конференций, на которых были представлены результаты, вошедшие в диссертацию, а также список публикаций автора по теме диссертации.

В **первой главе** приведен обзор результатов исследований турбулентности магнитослоя и связи геомагнитной активности с условиями в солнечном ветре. Приведены основные теоретические подходы, описывающие обтекание солнечным ветром магнитосферы Земли и особенности измерений параметров плазмы и магнитного поля в проекте THEMIS.

Во **второй главе** настоящей работы проведено сравнение параметров магнитного поля, полученных спутниками THEMIS, вблизи магнитопаузы, измеренных за 3 с (время оборота спутника), 30 с (интервал \sim характерного корреляционного времени) и 90 с (интервал в 3 раза превышающий характерное корреляционное время), с параметрами межпланетного магнитного поля 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 направление магнитного поля у магнитопаузы сильно отличается от направления магнитного поля в солнечном ветре вплоть до изменения знака.

В **разделе 2.1** описывается методика анализа данных, критерии отбора событий, особенности получения усредненных значений параметров магнитного поля в солнечном ветре и в магнитослое близи магнитопаузы. Были отобраны моменты времени, когда один из спутников вел регистрацию в солнечном ветре, а на другом наблюдалось пересечение магнитопаузы 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 $\pi/3$. Указывается, что отбирались такие события, в которых не регистрировались существенные вариации параметров магнитного поля в солнечном ветре: 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.

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.

В разделе 2.2 приведены статистические результаты для параметров магнитного поля: модуля вектора, трех его компонент и часового угла. Проведено сравнение параметров магнитного поля, зарегистрированных одним из спутников непосредственно у магнитопаузы со стороны магнитослоя, с параметрами межпланетного магнитного поля, зарегистрированными другим спутником проекта перед ударной волной. На рис. 1 показаны гистограммы распределений параметров магнитного поля: распределение в солнечном ветре и три распределения величин у магнитопаузы для разных интервалов усреднения. Наиболее интересны гистограммы для z -компоненты магнитного поля. В то время как в солнечном ветре было набрано одинаковое число событий с положительным и отрицательным B_z (50 отрицательных и 50 положительных событий), в распределениях у магнитопаузы отрицательные события явно преобладают (80 против 20 для мгновенных значений, 78 против 22 для 30-секундного и 77 против 23 для 90-секундного усреднения). 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.

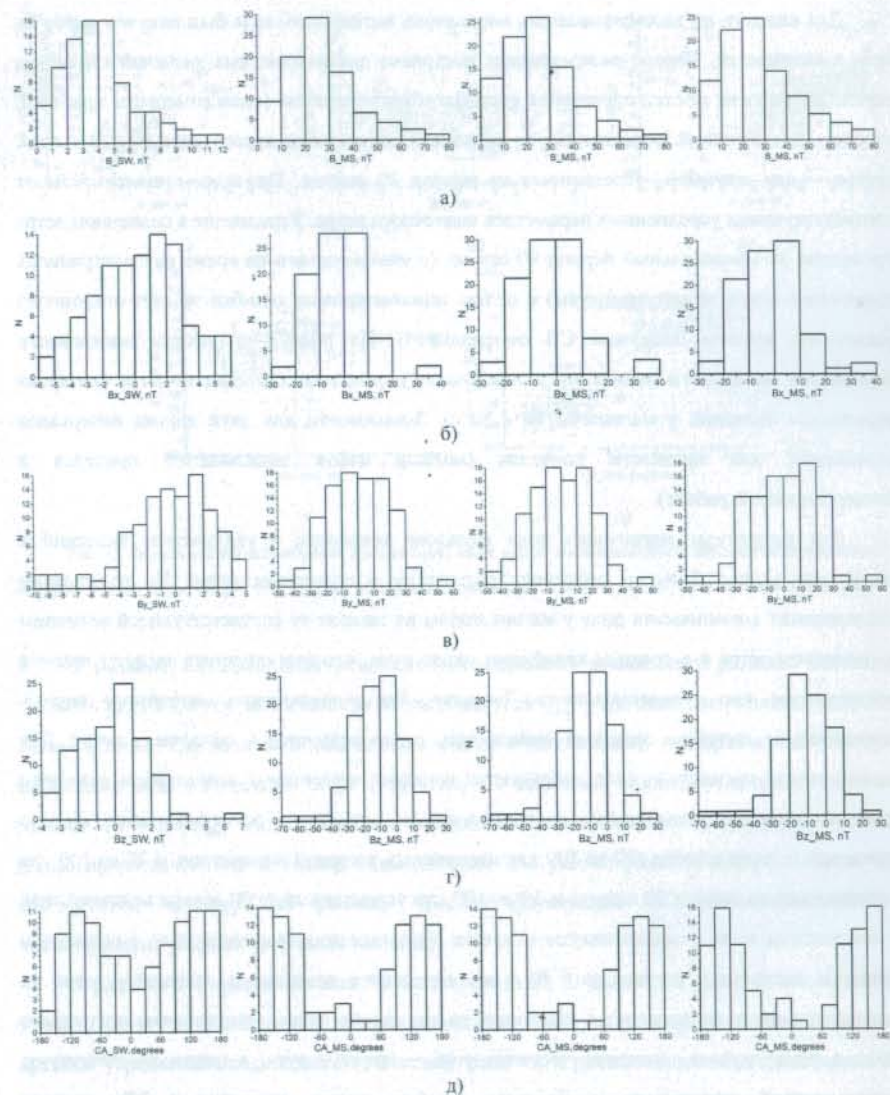


Рис. 1. Гистограммы распределений амплитуды магнитного поля (а), трех его компонент: B_x (б), B_y (в), B_z (г) и часового угла (д). Для каждого параметра приведены распределения в солнечном ветре и три распределения у магнитопаузы для разных периодов усреднения (3 с, 30 с и 90 с).

Для каждого из рассматриваемых параметров магнитного поля был получен 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. На рис. 2 приведены зависимости параметров магнитного поля у магнитопаузы от параметров солнечного ветра (интервал усреднения значений у магнитопаузы - 30 с). Зависимости для двух других интервалов усреднения для краткости опущены (полный набор зависимостей приведен в диссертационной работе).

Для амплитуды магнитного поля выявлена тенденция к увеличению значений у магнитопаузы при больших значениях амплитуды в солнечном ветре. По результатам исследования x -компонента 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. Для y -компоненты магнитного поля у магнитопаузы получена линейная зависимость от ее величины в солнечном ветре. Для z -компоненты магнитного поля 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, и 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. Несмотря на изменение знака z -компоненты магнитного поля в ряде случаев, значения часового угла у магнитопаузы в целом соответствуют эквивалентной зависимости, в пределах ошибок, однако примерно в 20% случаев наблюдались отклонения более чем на 90 градусов по сравнению с первоначальным направлением вектора магнитного поля.

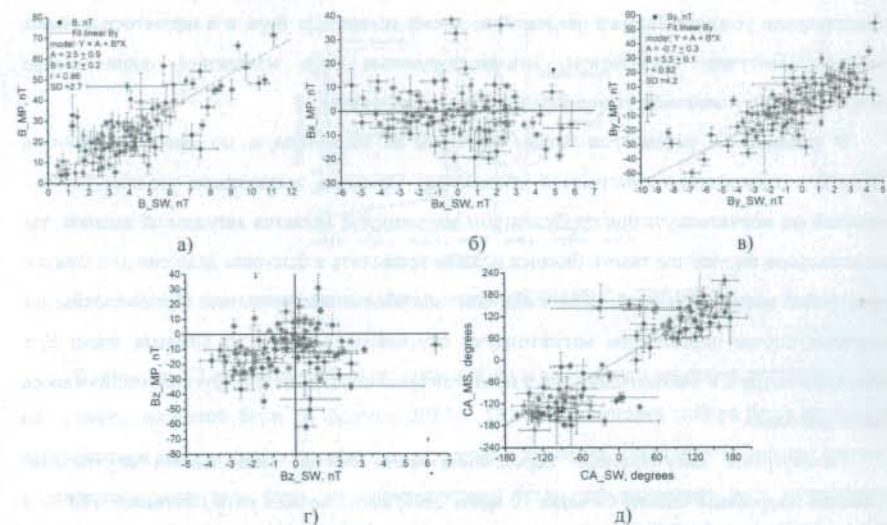


Рис. 2. Зависимости компонент магнитного поля перед магнитопаузой от соответствующих величин в солнечном ветре: для модуля магнитного поля (а), B_z (б), B_y (в), B_z (г) и часового угла (д).

В разделе 2.3 приведены результаты исследования зависимости разницы значений часового угла в СВ и у магнитопаузы от значения угла Θ_{Bn} - угла между нормалью к ударной волне в точке, где данный объем плазмы вошел в магнитослой, и направлением вектора магнитного поля в солнечном ветре. Получено, что изменение часового угла практически не зависит от угла Θ_{Bn} , т.е. зависимость величины несовпадения от типа ударной волны (квазипараллельная или квазиперпендикулярная) для рассмотренного набора событий не наблюдается, несмотря на разницу уровней флуктуаций за квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударными волнами.

В разделе 2.4 приведены выводы ко второй главе. В частности, указано, что 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.

В третьей главе проведена проверка соблюдения баланса давлений для различных типов событий: для случаев совпадения знаков B_z в солнечном ветре и в магнитослое у магнитопаузы и для случаев несовпадений. Получен ряд статистических закономерностей. Рассмотрен баланс давлений на магнитопаузе во время магнитных бурь и проведено

сопоставление условий баланса давлений во время магнитных бурь и в магнитоспокойных условиях. Получены результаты, демонстрирующие роль изменений токов внутри магнитосферы в изменении условий баланса на магнитопаузе.

В разделе 3.1 рассмотрен баланс давлений на магнитопаузе по данным спутников THEMIS в спокойной геомагнитной обстановке. Проверка выполнения условия баланса давлений на магнитопаузе при турбулентном магнитослое является актуальной задачей, так как локальное нарушение такого баланса должно приводить к быстрым движениям плазмы и перестройке магнитного поля, часто наблюдаемым вблизи магнитопаузы. Представлены два типичных случая пересечения магнитопаузы спутником, в одном из которых знаки B_z в солнечном ветре и в магнитослое перед магнитопаузой совпадали, а в другом фиксировалось изменение знака.

Рассмотрены многократные пересечения магнитопаузы несколькими спутниками. Проведен подробный анализ события 22 июля 2007, когда на всех пяти спутниках THEMIS последовательно регистрировались параметры магнитослоя, затем пересечение магнитопаузы и входение в магнитосферу. При этом, на 4 спутниках наблюдалось четкое пересечение магнитопаузы. Дисбаланс полного давления укладывается в 9%, 15%, 15% и 25% для четырех пересечений соответственно. Проведено сравнение значений давления попарно для трех пар 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 наблюдались быстрые движения магнитопаузы. Многоспутниковый анализ показал, что баланс давлений на магнитопаузе соблюдается с большей точностью по сравнению с результатами анализа однократного пересечения: 8% для первых двух пар пересечений магнитопаузы и 10% для третьей. На рис. 3 приведен график изменения полного давления на двух спутниках (THEMIS-C и THEMIS-E). Наблюдаемое отклонение от баланса давлений указывает на динамический характер наблюдаемых процессов.

Проведенный анализ пересечений магнитопаузы в спокойных геомагнитных условиях продемонстрировал близость к соблюдению условия баланса давлений, несмотря на высокий уровень флуктуаций магнитного поля в магнитослое. Наблюдение высокого уровня турбулентности создает проблемы для теорий крупномасштабного пересоединения на магнитопаузе, так как магнитное поле в разных точках магнитопаузы может иметь разные знаки.

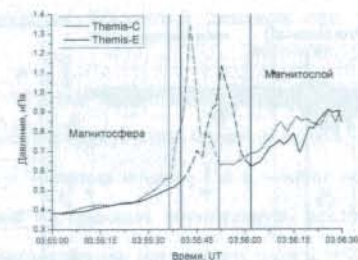


Рис. 3. Полное давление по данным пары спутников THEMIS-C и THEMIS-E.

В разделе 3.2 рассмотрен баланс давлений на магнитопаузе во время магнитных бурь на примере магнитной бури 20 февраля 2014 г. Описана методика набора базы данных по пересечениям магнитопаузы в магнитовозмущенных условиях. Подробно в качестве примера рассмотрена магнитная буря, во время которой было зафиксировано пять пересечений магнитопаузы спутниками THEMIS. Все пересечения во время этой бури имели существенно разные характеристики. На рис. 4 приведена геомагнитная обстановка во время магнитной бури 20.02.2014: а) Изменения геомагнитных индексов AU, AL, AE и AO по данным World Geomagnetic Data Center Kyoto; б) Dst-вариация; в) параметры солнечного ветра по базе данных OMNI, сверху вниз: магнитное поле B и три его компоненты B_x , B_y , B_z в координатах GSM в нТл; скорость потока V в км/с; плотность ионов n в $1/\text{cm}^3$; температура ионов T_i в К; динамическое давление P_{dyn} в нПа; плазменный параметр β . Вертикальными линиями отмечены моменты пересечения магнитопаузы спутниками.

Значение индекса Dst в момент первого пересечения магнитопаузы составляло около –60 нТл, разница давлений на границах составила около 10%. В среднем полное давление в магнитослое превышало давление внутри магнитосферы, однако магнитное давление после перехода практически оставалось на том же уровне. Уменьшение полного давления происходит за счет уменьшения давления ионной компоненты. Заметен вклад динамического давления в магнитослое в баланс давлений, но определяющего вклада динамическое давление не вносило.

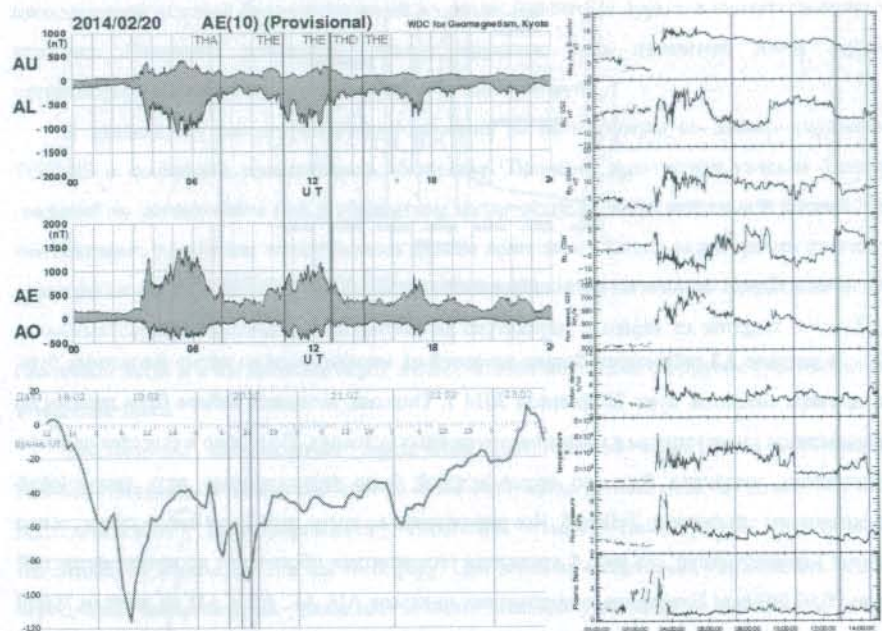


Рис. 4. Геомагнитная обстановка для магнитной бури 20.02.2014.

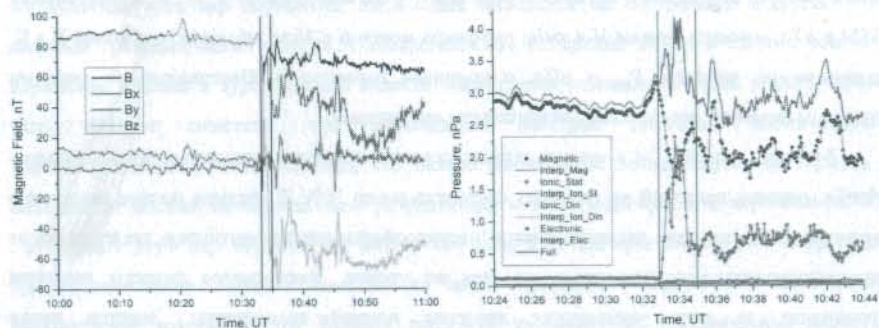


Рис. 5. Изменения магнитного поля и давления плазмы при пересечении магнитопаузы спутником THEMIS-E в 10:35 UT.

Для второго пересечения (спутник THEMIS-D) значение индекса Dst в момент перехода составляло -88 нТл, дисбаланс составил около 25%. Наблюдалось очень резкое изменение значения z-компоненты магнитного поля и существенное проседание полного давления в магнитосфере после пересечения, причем уменьшаются значения всех

составляющих полного давления. Магнитное давление при этом остается существенно преобладающим.

На рис. 5 показаны изменения магнитного поля и интегрального давления плазмы по данным спутника THEMIS-E при пересечении магнитопаузы в 10:35 UT. Спутник наблюдал очень тонкую магнитопаузу. Значение индекса Dst в момент перехода составляло -72 нТл. Величины полного давления на границах магнитопаузы практически равны. Наблюдался резкий скачок значения z-компоненты магнитного поля с +90 в магнитосфере до -80 в магнитослое. Также резко изменились значения y-компоненты, x-компонента флутуирует около нуля. На рис. 5 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 наблюдается возрастание уровня флукуаций.

При следующем пересечении магнитопаузы спутником THEMIS-E в 12:50 UT Dst в момент перехода было равно -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, 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. Dst в момент пятого перехода составляло -61 нТл. Разница давлений на границах магнитопаузы составила около 20%, наблюдается значительная разница уровня полного давления в магнитослое и в магнитосфере.

Последнее пересечение магнитопаузы спутником THEMIS-E произошло в 14:30 UT (см. рис. 6). Значение индекса Dst в момент перехода составляло -61 нТл. Разница давлений на границах магнитопаузы составила ~20%. Уровень флукуаций в магнитослое также значительно выше, наибольший среди всех пересечений магнитопаузы во время исследуемой магнитной бури. Это один из немногих случаев буревых пересечений, когда в магнитослое вклад ионного давления в полное становится больше вклада магнитной компоненты. Однако через некоторое время (~ 18 минут) после пересечения магнитная компонента снова становится преобладающей.

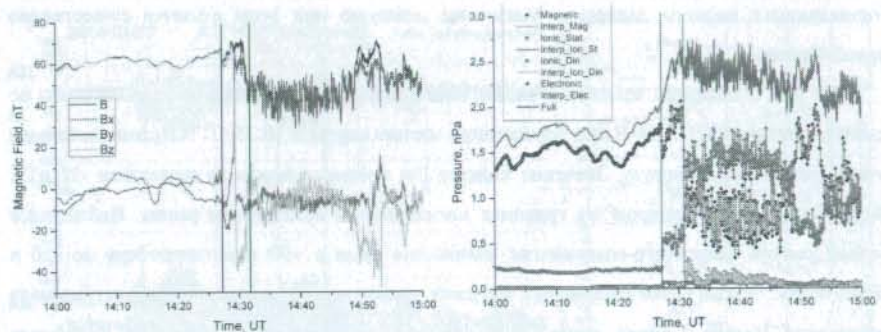


Рис. 6. Графики изменений магнитного поля и давления плазмы при пересечении магнитопаузы спутником THEMIS-E в 14:30 UT.

Во всех рассматриваемых пересечениях наблюдался дисбаланс давлений внутри и вне магнитопаузы и высокий уровень флуктуаций в магнитослое. Одновременно регистрировались высокие значения индексов авроральной электроструи. 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 разделе 3.3. подробно проанализирована Магнитная буря 14 ноября 2012 г. Данная буря характерна тем, что момент пересечения спутником магнитопаузы практически совпал с минимумом Dst, кроме того наблюдался наибольший среди всех рассмотренных событий дисбаланс давлений - 40%. В момент пересечения параметры солнечного ветра и ММП были относительно стабильны ($B_x = -12$ нТл, $B_y = -8$ нТл, $B_z = 1$ нТл, $P_{\text{dyn}} = 2$ нПа), Dst = -108 нТл. Пересечение произошло не в подсолнечной точке, поэтому при анализе использовались системы координат GSM и специальная система координат LMN: вектор \mathbf{n} направлен по нормали к модельной магнитопаузе, вектор \mathbf{l} лежит в плоскости \mathbf{n} и Z системы координат GSM, а вектор \mathbf{m} дополняет тройку. В качестве модельной магнитопаузы использовалась модель магнитопаузы Shue et al. [1998].

При пересечении магнитопаузы из магнитослоя в магнитосферу происходит резкое изменение направления магнитного поля, также имеет место резкое падение плотности плазмы и нарастание температуры (см. рис. 7). 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. Наблюдается резкое изменение угла поворота вектора магнитного поля ϕ_B . До пересечения магнитопаузы полное давление в течение 15 мин постепенно нарастает, однако его значения на границах получасового интервала практически совпадают.

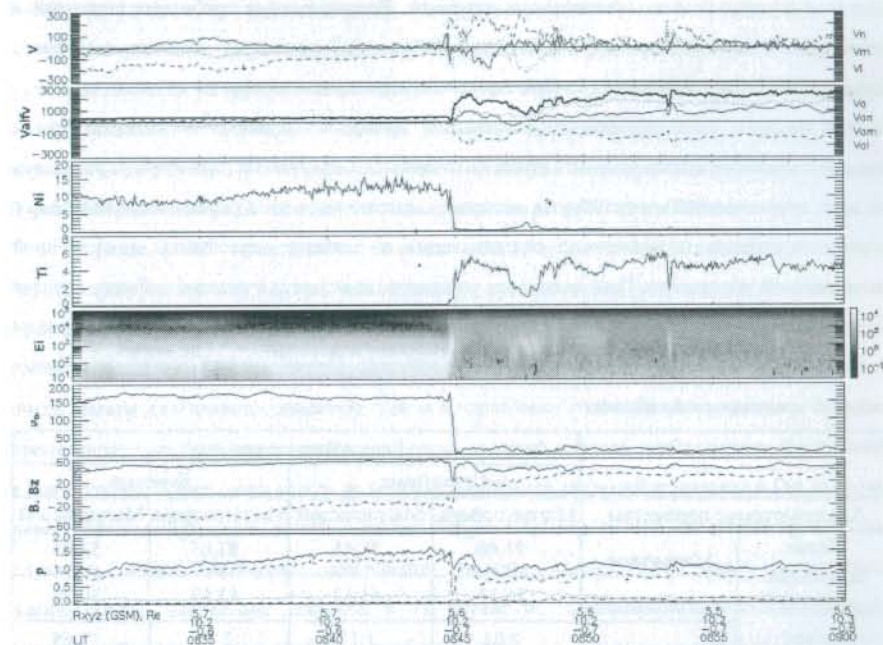


Рис. 7. Изменения параметров плазмы и магнитного поля на получасовом интервале вблизи максимума магнитной бури 14.11.2012 г. Сверху вниз: скорость течения плазмы V вдоль векторов LMN в км/с, локальная альфвеновская скорость V_{alf} вдоль векторов LMN в км/с, плотность ионов N в $1/\text{см}^3$, температура ионов T_i в K° , спектрограмма 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.

В рассматриваемом случае наблюдалась магнитопауза с большим сдвигом ориентации магнитного поля, что должно было бы приводить к развитию процессов пересоединения и формированию вращательного разрыва. Компоненты поля вдоль модельной магнитопаузы

на порядок превысили компоненту поля поперек. Кроме того, на магнитопаузе наблюдается скачок плотности плазмы более чем на порядок величины. Поэтому наблюдаемое событие не может рассматриваться в качестве вращательного разрыва. 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. Возникновение дисбаланса давлений и изменение положения магнитопаузы при стабильных параметрах магнитослоя может являться следствием изменений токовых систем внутри магнитосферы.

В разделе 3.4 проведено статистическое сравнение пересечений магнитопаузы в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. 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. Сравнительный анализ указанных событий представлен в таблице:

		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	

Выделены 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 флуктуаций давления. 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 варьирует для разных случаев пересечений магнитопаузы. В среднем дисбаланс больше для буревых пересечений, величина дисбаланса составляла от ~2% до ~40%.

В разделе 3.5 представлены 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 четкие 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 флуктуаций в магнитослое. 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 буревых пересечений магнитопаузы являлось преобладающим.

Представленные 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 флуктуирует и может даже по знаку не совпасть 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.

В заключении суммированы описанные ранее выводы и указана необходимость дальнейших подробных исследований в данной области. Отмечено, что проведенный анализ результатов наблюдений позволяет выявить ряд новых закономерностей.

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 фолшоком.
- 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.

Список работ автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях:

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 астрономия*, 52(6):769–778, 2012. [DOI:10.1134/S0016793212060084]
2. Pulinet 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. Yovchenko, M.V. Stepanova, M.O. Riazantseva, M.S. Pulinet, I.L. Ovchinnikov, and S.S. Znatkova. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances $\sim 7-10R_E$, 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 астрономия*, 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 флуктуаций магнитного поля в магнитослое. *Геомагнетизм и астрономия*, 55(5):598–607, 2015. [DOI: 10.7868/S0016794015050211].

Опубликованные доклады:

1. Pulinet M.S., M.O. Riazantseva, E.E. Antonova, and I.P. Kirpichev. The characteristics of plasma and magnetic field at the subsolar magnetopause in accordance 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.I.P. Kirpichev Rossolenko, 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.

Подписано в печать 25.07.2016 г.
 Бумага офсетная. Печать цифровая.
 Формат А4/2. Усл. печ. л.1.
 Заказ № 404. Тираж 100 экз.
 Типография «КОПИЦЕНТР»
 119234, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д.20
 Тел. 8 (495) 213-88-17
 www.autoreferat1.ru