

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель декана  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

д.ф.м.н. профессор А.В. Козарь



\_\_\_\_\_ 2016 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Диссертация «Магнитное поле в магнитослое и баланс давлений на дневной магнитопаузе» выполнена на кафедре Физики космоса физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

В период подготовки диссертации соискатель Пулинец Мария Сергеевна обучалась в аспирантуре физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова на кафедре Физики космоса с 2012 по 2016 г., работала в Отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в должности младшего научного сотрудника по совместительству на  $\frac{1}{2}$  ставки с 2012 г. По настоящее время.

В 2012 г. окончила физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «физика атомного ядра и частиц».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 году физическим факультетом Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор Антонова Елизавета Евгеньевна, главный научный сотрудник Отдела космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

#### **По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

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



**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  $\sim 1-2$  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.

**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 решены 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 флуктуаций 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.

### **Новые результаты, полученные соискателем.**

Показано, что:

- Нерегулярные флуктуации поля в подсолнечной точке магнитослоя у магнитопаузы сравнительно плохо коррелируют с магнитным полем в солнечном ветре перед ударной волной.
- 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.
- Показано, что 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  $V_z$  компоненты магнитного поля перед магнитопаузой может быть противоположен знаку  $V_z$  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.

**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 более чем 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.

### **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.

### **Оценка выполненной соискателем работы**

Полученные в данной работе результаты представляют значительный интерес и важны для развития теории солнечно-земных связей и вопроса проникновения плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы и частиц магнитосферы в магнитослой. Данные, полученные соискателем, актуальны при создании новых моделей взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

**Ценность научных работ соискателя** заключается в том, что полученные результаты важны для развития теории взаимодействия плазмы солнечного ветра с магнитным полем Земли, в частности, в работах предоставлены новые данные по зависимости магнитного поля вблизи подсолнечной точки дневной магнитопаузы от магнитного поля перед ударной волной и условиям баланса давлений на дневной магнитопаузе в магнитосфере Земли.



## 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 Ломоносовских чтениях в НИИЯФ МГУ.

## Основные материалы диссертации изложены и опубликованы в следующих работах

(6 статей в российских и зарубежных журналах из перечня ВАК, 8 трудов конференций)

1. Пулинец М.С., М.О. Рязанцева, Е.Е. Антонова, И.П. Кирпичев. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS. *Геомагнетизм и аэрномия*, 52(6):769–778, 2012.

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  $\sim 7$ – $10R_E$ , 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 суббурия и дискретные дуги полярного сияния. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия*, (6):31–38, 2012.

5. Знаткова С.С., Е.Е. Антонова, М.С. Пулинец, and И.П. Кирпичев. Определение толщины низкоширотного погранслоя в магнитосфере Земли. *Геомагнетизм и аэрномия*, 53(6):745–756, 2013. doi:10.7868/S0016794013060175.

6. Знаткова С.С., Е.Е. Антонова, М.С. Пулинец, И.П. Кирпичев, and М.О. Рязанцева. Толщина низкоширотного погранслоя при разных уровнях флуктуаций магнитного поля в магнитослое. *Геомагнетизм и аэрномия*, 55(5):598–607, 2015.



7. 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 accordance with data of THEMIS mission. In *proceedings of 9th International Conference Problems of Geocosmos*, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, p. 365–370. 2012.

8. 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"*, Apatity, Russia, p. 45–48. 2012.

9. 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, St. Petersburg, Petrodvorets, p. 217–222. 2010.

10. 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), Matfyzpress Prague (ISBN 978-80-7378-185-9) volume 2, p. 45–51, 2011.

11. 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.

12. 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.

13. E.E. Antonova, M.V. Stepanova, Yu I. Yermolaev, D. Paredes-Davis, I.P. Kirpichev, S.S. 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.

14. 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.

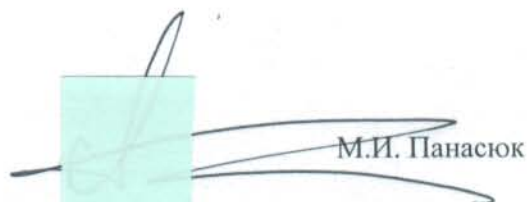
Диссертация удовлетворяет требования ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в частности, содержит решение научной задачи, имеющей значение для развития физики земной магнитосферы.

Диссертация «Магнитное поле в магнитослое и баланс давлений на дневной магнитопаузе» Пулинец Марии Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы».

Заключение принято на заседании Совета отдела космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Присутствовало на заседании 16 чел. Результаты голосования - единогласно, протокол №2 от 23 июня 2016 г.

Председатель совета ОКН  
д.ф.-м.н., проф.



М.И. Панасюк

Секретарь совета ОКН  
к.ф.-м.н.



Е.А. Сигаева

Заключение рассмотрено и утверждено на заседании Ученого совета Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына и отделения ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Протокол № 7 от 24 июня 2016 г.

Председатель Ученого совета  
д.ф.-м.н., проф.



М.И. Панасюк

Ученый секретарь Ученого совета  
Профессор



С.И. Страхова