

« УТВЕРЖДАЮ»

директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки «Институт  
земного магнетизма, ионосферы и  
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова»  
Российской академии наук, д.ф.-м.н.

В.Д. Кузнецов

11 ноября 2016 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова» Российской академии наук (ИЗМИРАН) на диссертацию Назаркова Ильи Сергеевича «Структура и динамика крупномасштабных токов в возмущенной магнитосфере по данным спутниковых измерений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы.

Диссертация И.С. Назаркова «Структура и динамика крупномасштабных токов в возмущенной магнитосфере по данным спутниковых измерений» выполнена на кафедре физики космоса Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Диссертация И.С. Назаркова посвящена изучению пространственной структуры и динамики магнитного поля токов хвоста магнитосферы и кольцевого тока, а также их вариаций, связанных с развитием геомагнитных возмущений. Для анализа использовались данные измерений зарубежных космических проектов THEMIS и VAP (Van Allen Probes). Многоспутниковые проекты дают возможность разделить пространственно-временные изменения параметров токовых систем в магнитосфере. Использование модели магнитного поля A2000 (параболоидная модель МГУ) в сочетании с данными измерений в солнечном ветре, позволяет обобщить получаемую в измерениях информацию на разные области магнитосферы, и объяснить вариации магнитного поля крупномасштабных токовых систем, их радиальную структуру и динамику во время геомагнитных возмущений. Возможность получения новых фундаментальных результатов об эволюции крупномасштабных токовых систем в магнитосфере обуславливает актуальность проведенного исследования.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 141 наименования. Общий объем работы составляет 105 страниц.

Во введении изложены цели исследования, актуальность и практическая значимость работы, сформулированы главные результаты, полученные в диссертации. Приведен список публикаций по результатам работы.

В первой главе представлен обзор литературы по вопросам структуры магнитосферного магнитного поля, взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, пространственной и временной эволюции магнитосферных токовых систем. Дано описание основных крупномасштабных токовых систем в магнитосфере и приведены данные об их динамике и структуре, полученные в ходе космических экспериментов. Приведены сведения по спутниковым измерениям в солнечном ветре и в магнитосфере Земли. В качестве основы принят механизм Данжи поясняющий взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли, проанализированы сведения о динамике

токового слоя хвоста магнитосферы и кольцевого тока во время геомагнитных возмущений, сформулированы вопросы для дальнейших исследований.

Во второй главе представлены методы исследований, рассмотрены основные цели и результаты многоспутниковых проектов THEMIS, VAP и POES. Дано подробное описание параболоидной модели магнитосферного магнитного поля (A2000), и модели постоянного магнитного поля Земли (IGRF), используемых в данной работе при исследовании динамики геомагнитных возмущений.

Третья глава содержит описание и применение метода восстановления радиального профиля магнитного поля от токов хвоста магнитосферы по данным измерений микроспутников THEMIS. Предложен метод вычисления магнитного поля токов хвоста магнитосферы, заключающийся в исключении из спутниковых измерений эффекта, связанного с другими токовыми системами (токами на магнитопаузе, кольцевым током, внутривоздушными индукционными токами). Проведено сопоставление измеренных значений с модельными расчетами радиального профиля магнитного поля хвоста магнитосферы. Получены оценки параметров токов в хвосте магнитосферы в спокойных и возмущенных условиях.

В четвертой главе описано формирование дополнительной токовой системы вблизи переднего края токового слоя хвоста. Для периода адиабатического сжатия магнитосферы солнечным ветром, на примере геомагнитного возмущения 14 февраля 2009 года, автором обнаружены структуры в радиальном профиле магнитного поля хвоста магнитосферы, не соответствующие модельным представлениям о структуре токового слоя. Автором дано объяснение такого несоответствия, заключающееся в наличии неучитываемой моделью переходной токовой системы, включающей в себя радиально локализованный ток в передней части токового слоя хвоста, замыкающийся на дневной магнитопаузе. Возникновение такого тока обеспечивает консервацию магнитного потока через доли хвоста в адиабатически меняющейся магнитосфере.

В пятой главе описан механизм формирования магнитных островов в ночной магнитосфере: замкнутых магнитных структур, связанных с экстремальным развитием тока поперек геомагнитного хвоста. На основе простой аналитической модели показано, какие условия следует считать благоприятными для формирования таких магнитных островов. Проведено моделирование магнитного поля для главной фазы магнитной бури 14 февраля 2009 и показано, что модель корректно воспроизводит наблюдаемую структуру магнитного поля. Показано, что геомагнитные условия на примере магнитной бури 14 февраля 2009 года, способствовали расширению магнитосферы с увеличением пространственных масштабов токовых систем, что благоприятствовало формированию структур с отрицательной суммарной  $V_z$ -компонентой магнитного поля в геомагнитном хвосте.

В шестой главе автором показана связь потоков ионов возмущенного экваториального пояса на низких высотах и динамики кольцевого тока. Автором дано объяснение наблюдаемой спутниками VAP и NOAA/POES энергетической дисперсии на главной фазе магнитной бури 27-28 февраля 2014 года.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Несомненным достоинством работы является сочетание экспериментального и теоретического подходов при разработке новых эффективных методов работы с данными спутниковых измерений. В частности, автором развит метод выделения из спутниковых измерений магнитного поля токового слоя геомагнитного хвоста, что позволило определить его пространственную структуру в экстремально спокойный период солнечной активности 2008-2009 годов.

Автором разработана и программно реализована процедура восстановления радиального распределения магнитного поля хвоста магнитосферы по данным многоточечных измерений аппаратов THEMIS в сочетании с данными расчетов по моделям IGRF и A2000 в программной среде IDL.

Получены оценки характерных параметров хвоста магнитосферы в период экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг. Обнаружено, что в спокойных геомагнитных условиях передний край хвоста магнитосферы наблюдался на расстояниях 10-12  $R_E$ , интенсивность  $B_s$ -компоненты магнитного поля составляла около 20 нТл.

Показано, что во время главной фазы бури 13-14 февраля 2009 г. наблюдалось смещение токов геомагнитного хвоста до 7-8  $R_E$ , а интенсивность поля возрастала до 60 нТл. Показано, что увеличение пространственных размеров магнитосферы вследствие ослабления давления солнечного ветра в эпоху 2008-2009 ответственно за низкие уровни Dst-вариации во время геомагнитных возмущений.

Особый интерес вызывает результат исследований, позволяющий пролить свет на механизмы формирования замкнутых магнитных конфигураций в хвосте магнитосферы (магнитных облаков), связанных с усилением тока поперек хвоста магнитосферы.

Получены новые результаты, основанные на анализе одновременных измерений потоков частиц на орбитах приэкваториальных аппаратов VAP (Van Allen Probes) и полярных спутников NOAA/POES. Сопоставление данных прямых измерений потоков частиц кольцевого тока и вариаций потоков частиц тех же энергий на полярных орбитах позволило объяснить изменения формы спектра частиц кольцевого тока во время магнитных бурь.

Диссертация оформлена на современном уровне, рисунки выполнены качественно, тексты написаны ясным языком.

В целом оценивая работу И.Назаркова положительно, следует отметить, что в диссертации имеются недостатки.

1. параболоидная модель магнитосферы A2000, разрабатываемая в МГУ, описывает квазистационарный режим формирования магнитосферы, что ограничивает ее применение при анализе динамических событий и возмущений в период магнитных бурь. Для анализа сложных ситуаций находит применение модель магнитосферы Цыганенко (T01 и T04) и автору следовало бы попытаться для сравнения использовать эту модель. Это существенно повысило бы ценность работы И.Назаркова.

2. Период наблюдений системы микроспутников THEMIS составляет более 5 лет, за который было проанализировано более 100 событий в магнитосфере Земли. Автор выбрал один случай из большого ряда, что представляется существенным недостатком всей работы. Можно надеяться, что исследования по авторским методикам будут продолжены и результаты будут более убедительными и обоснованными.

3. В динамике магнитосферы особую роль играет область ближнего хвоста, где магнитосферное магнитное поле изменяет свою конфигурацию от вытянутого в хвост на удаленной границе к квазидипольной форме вблизи Земли. Следовало бы оценить скорость и пространственный масштаб процесса деполяризации при развитии буревых ситуаций.

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. Результаты работы следует использовать при анализе данных будущих спутниковых экспериментов. Разработанные методы имеют практическую ценность и, несомненно, могут использоваться при оценке состояния околоземного пространства в рамках прогнозирования космической погоды. Достоверность результатов диссертации гарантируется сравнением результатов аналитических и численных вычислений и сравнением с экспериментальными данными. Новизна и научная значимость результатов диссертации бесспорны.

Результаты работы докладывались на ряде семинаров, международных конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах, включённых в список ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Полученные автором результаты могут использоваться в ИКИ, ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ, ИФЗ, ПГИ, ИСЗФ, СИБИЗМИР и других научных учреждениях.

Диссертационная работа И.С.Назаркова является законченным научным исследованием, имеющим общенаучную и практическую ценность, что свидетельствует о достаточно высокой научной квалификации её автора. В соответствии с вышеизложенным, диссертационная работа Назаркова Ильи Сергеевича «Структура и динамика крупномасштабных токов в возмущенной магнитосфере по данным спутниковых измерений», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы, полностью соответствует критериям, установленным действующим "Положением о порядке присуждения ученых степеней" №842 от 24.09.2013г., а автор, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени.

Отзыв составил главный научный сотрудник ИЗМИРАН  
д.ф.-м.н.



А.Н. Зайцев

Результаты диссертации обсуждались публично и были одобрены на открытом заседании секции Ученого совета ИЗМИРАН по направлению «Магнетизм Земли и планет» 16 ноября 2016 г.