

УТВЕРЖДАЮ:

Директор НИИЯФ МГУ  
профессор М.И. Панасюк

А  
28 » 06 2016 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Модели магнитного поля в околосолнечном пространстве» выполнена в отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

В период подготовки диссертации соискатель Лукашенко Анастасия Тарасовна работала с 1 сентября 2015 г. в лаборатории магнитосфер планет отдела космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в должности младшего научного сотрудника. Ранее работала в отделе излучений и вычислительных методов: с 11 февраля 2009 г. по 16 марта 2014 г. в должности программиста 1-й категории, а с 17 марта 2014 г. по 31 августа 2015 г. — в должности младшего научного сотрудника.

В 2009 г. с отличием окончила физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «Физика». Зачислена на физический факультет в качестве соискателя степени кандидата физико-математических наук для сдачи экзаменов кандидатского минимума приказом № 1017ас от 13 ноября 2014 г.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. физическим факультетом Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель — профессор, доктор физико-математических наук Веселовский Игорь Станиславович, главный научный сотрудник лаборатории магнитосфер планет 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:

Диссертационная работа Лукашенко Анастасии Тарасовны посвящена разработке и усовершенствованию моделей магнитного поля в ряде конфигураций на Солнце и в лабораторных условиях.

Актуальность работы обусловлена фундаментальным значением вопросов:

- Усовершенствования модели потенциального поля–поверхности источника (английская аббревиатура PFSS) так, чтобы было обеспечено согласие с экспериментальными данными КА «Улисс», согласно которым плотность магнитного потока от Солнца не зависит от гелиошироты в околосолнечном пространстве.
- Нахождения математических методов описания нулевых точек магнитного поля порядков выше 1-го в пространстве в связи с необходимостью учёта нелинейных эффектов магнитного пересоединения, в частности при солнечных вспышках, а также описания вырожденных нулевых точек, их возникновения и распада при топологических перестройках магнитных полей на Солнце, в частности, в модели топологического триггера солнечных вспышек.
- Усовершенствования моделей «magnetic charge topology» (MCT), использующихся при моделировании магнитных полей в солнечной короне, путём замены применяемых в них фиктивных магнитных зарядов или диполей на токовые витки, что требует исследования поведения силовых линий магнитного поля при различном взаимном расположении витков в пространстве.

Наиболее существенные новые результаты, полученные соискателем:

- Предложена теоретическая модель для расчёта магнитного поля в короне в потенциальном приближении, представляющая собой модификацию модели с поверхностью источника. В этой модели магнитное поле на фотосфере задаётся по результатам наблюдений, а на удалении от Солнца модуль радиальной составляющей магнитного поля не зависит от гелиошироты, а её знак скачкообразно изменяется при переходе от одной полусферы к другой. В модели учтены экспериментальные результаты, полученные на КА «Улисс». В рамках данной модели получены общие аналитические формулы для расчёта потенциала и магнитного поля. Проведены расчёты для дипольных и квадрупольных гармоник на фотосфере.
- Получены общие принципы описания и классификации нулевых точек порядка выше 1-го потенциального магнитного поля в трёхмерном пространстве. Показано, что это описание может быть упрощено за счёт

нахождения подходящей системы базисных функций, по которым производится разложение потенциала в ряд Тейлора. Найдено, что для нулевых точек порядка выше 1-го в тех случаях, когда уравнения силовых линий в их окрестности не удаётся проинтегрировать аналитически, можно дать качественное описание геометрии этих линий путём рассмотрения поведения последних вблизи исходящих из нулевой точки лучей, на которых поле радиально или же равно нулю. Сформулирована соответствующая задача на собственные функции. Для 2-го порядка получен ряд аналитических решений общего характера. Результаты непосредственно обобщаются на произвольное векторное поле, потенциал которого удовлетворяет уравнению Лапласа.

- С использованием методов математического моделирования дано описание поведения силовых линий магнитного поля системы из двух одинаковых сцепленных перпендикулярно токовых колец, в окрестности которой существуют области как упорядоченности, так и хаотичности. Показано, что на малых расстояниях происходит приближённая намотка силовых линий на вложенные друг в друга магнитные поверхности, охватывающие каждое из токовых колец по отдельности, а на удалении — на топологически эквивалентные торам вложенные поверхности, охватывающие систему как целое, тогда как область хаотичности располагается на промежуточных расстояниях. Найдены положения наиболее крупных «магнитных островов» и численные характеристики возникающих подсистем замкнутых силовых линий.

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

- Впервые в рамках потенциального приближения предложена модель магнитного поля в солнечной короне, в которой магнитное поле на фотосферной поверхности задаётся из результатов наблюдений, а на удалении модуль радиальной его составляющей полагается равным константе, а её знак — скачком изменяющимся при переходе от одной полусферы к другой. Модель согласуется с данными КА «Улисс».
- Впервые дан алгоритм описания геометрии и топологии силовых линий магнитного поля вблизи нулевых точек потенциального магнитного поля высших порядков. Показано, как такое описание может быть упрощено посредством подходящего выбора системы базисных функций, по которым производится разложение потенциала в ряд Тейлора. Найдена общая методика получения качественных сведений о поведении линий поля вблизи нулевых точек высших порядков. Впервые дана формулировка соответствующей задачи на собственные функции для случая нулевых точек порядка выше 1-го. Для нулевых точек 2-го порядка впервые найден ряд решений, как частных, так и общего характера.
- Впервые были получены численные характеристики областей упорядоченного и хаотического поведения линий магнитного поля вблизи простейшей системы из двух сцепленных колец с токами.

Практическая значимость результатов: в диссертационной работе разработаны новые теоретические подходы к описанию особых точек бездивергентных

векторных полей, моделированию магнитных полей в потенциальном приближении в солнечной короне, а также дальнейшему совершенствованию модели топологического триггера солнечных вспышек.

Личный вклад диссертанта: лично автором были поставлены все математические задачи и проведены расчётные работы по ним. Постановка задач исследования, планирование работ, обсуждение результатов и публикация основных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем. Роль автора в получении положений, выносимых на защиту, является определяющей.

Достоверность и обоснованность изложенных в работе результатов обеспечивается согласованностью с выводами литературных источников по теме диссертации в тех случаях, когда такие результаты имеются. Выполненные численные расчёты были перепроверены путём использования различных методов счёта. Основные положения диссертации публиковались в ведущих журналах по механике, астрономии и геомагнетизму.

#### Апробация работы

По результатам диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, включённых в перечень ВАК. Основные результаты опубликованы в работах:

1. Лукашенко А.Т. Об описании потенциального векторного поля без источников вблизи нулевых точек высших порядков в пространстве // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1, математика, механика. № 4. С. 18–22. 2016.
2. Lukashenko A.T., Veselovsky I.S. General principles of describing second- and higher-order null points of a potential magnetic field in 3D // Geomagnetism and Aeronomy. V. 55, № 8. P. 1152–1158. 2015.
3. Веселовский И.С., Лукашенко А.Т. Статистика изолированных и сложных геомагнитных бурь по материалам базы данных «АРЕV» за 23-й цикл солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53, № 5. С. 635–644. 2013.
4. Веселовский И.С., Лукашенко А.Т. Модель магнитного поля во внутренней гелиосфере с учётом выравнивания радиальной напряжённости в короне Солнца // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. Т. 46, № 2. С. 162–172. 2012.
5. Веселовский И.С., Лукашенко А.Т. Хаотическое поведение линий магнитного поля вблизи простейших токовых систем // Тр. XIX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2015». СПб, 2015. С. 55–58.
6. Лукашенко А.Т., Веселовский И.С. О принципах описания нулевых точек высших порядков магнитного поля в пространстве // Тр. XIX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2015». СПб, 2015. С. 261–264.
7. Веселовский И.С., Лукашенко А.Т. О переменном знаке потоков энергии и вещества вблизи Солнца // Труды Всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика 2014», ISSN 0552-5829. СПб, 2014. С. 83–86.

8. Лукашенко А.Т., Веселовский И.С. О геометрии потенциального магнитного поля вблизи нулевых точек 2-го и высших порядков // Труды Всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика 2014», ISSN 0552-5829. СПб, 2014. С. 263–266.
9. Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Vchivkov K.V., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Ponomarenko A.G., Veselovsky I.S., Lukashenko A.T. On the interaction effects of ionospheric plasma with dipole magnetic field of the spectrometer AMS-02 moving onboard of international space station // 2009 International Conference on Space Science and Communication (IconSpace 2009). 2009. P. 96–101.

Результаты диссертации были доложены автором лично на следующих конференциях и семинарах:

- Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 15–19 февраля 2016
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015-2. МИФИ, Москва, Россия, 22–26 декабря 2015
- XIX Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2015». Пулковое, Санкт-Петербург, Россия, 5–9 октября 2015
- 597<sup>th</sup> WE-Heraeus-Seminar «Stochasticity in Fusion Plasmas». Physikzentrum Bad Honnef, Germany, 10–12 September 2015
- XII Международная Казанская летняя школа-конференция «Теория функций, её приложения и смежные вопросы». Республика Татарстан, Россия, 27 июня–3 июля 2015
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. МИФИ, Москва, Россия, 16–21 февраля 2015
- Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 16–20 февраля 2015
- XVIII всероссийская ежегодная конференция с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика – 2014». Пулковое, Санкт-Петербург, Россия, 20–24 октября 2014
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 30 января–4 февраля 2012
- Седьмая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 6–10 февраля 2012
- Шестая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 14–18 февраля 2011

а также представлены на:

- IAGA-III Symposium: «Heliospheric physics during and after a deep solar minimum». Luxor, Egypt, 12–17 November 2011
- AGU Chapman conference on currents in geospace and beyond. Dubrovnik, Croatia, 22–27 May 2016

В целом полученные в диссертации результаты состоят в нахождении топологических и геометрических характеристик магнитного поля в ряде его конфигураций. Ценность научной работы соискателя заключается в развитии и усовершенствовании моделей магнитного поля на Солнце и в лабораторных условиях.

Результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и одобрены на научном семинаре по космической электродинамике лаборатории магнитосфер планет ОКН НИИЯФ МГУ, на семинаре «Астрофизика космических лучей и физика космоса» НИИЯФ МГУ, а также на семинарах в Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт» и Институте физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН и на 22-й конференции-школе «Актуальные проблемы физики и технологий» в Институте общей физики РАН (ИОФ РАН) имени А.М. Прохорова.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Модели магнитного поля в околосолнечном пространстве» Лукашенко Анастасии Тарасовны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Заключение принято на заседании Совета отдела космических наук НИИЯФ МГУ.

Присутствовало на заседании 16 чел. Результаты голосования «за» — 16 чел., «против» — 0 чел., «воздержались» — 0 чел., протокол №2 от «18» мая 2016 г.

Заведующий лабораторией магнитосфер планет ОКН

д.ф.-м.н.

И.И. Алексеев

Секретарь совета ОКН

к.ф.-м.н.

Е.А. Сигаева