

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
О.А. Похотелова на диссертацию Лукашенко Анастасии Тарасовны
«Модели магнитного поля в околосолнечном пространстве», представленную
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертация А.Т. Лукашенко посвящена актуальной теме моделирования магнитных полей в короне Солнца и гелиосфере в потенциальном приближении и связанным с этим вопросам геометрии и топологии силовых линий магнитного поля.

Потенциальное приближение часто используется при моделировании магнитных полей в короне Солнца. Оно применяется как в моделях коронального поля в целом, так и при моделировании топологических конфигураций отдельных участков короны. К моделям первой категории относятся модели потенциального поля – поверхности источника. К моделям второй категории можно отнести получившие широкое распространение модели «magnetic charge topology» МСТ. Источниками магнитного поля в короне в основном являются выходящие на уровне фотосферы трубки магнитного потока, разбросанные по поверхности Солнца. Эти источники могут сливаться, фрагментироваться, взаимно нейтрализовывать друг друга и т.д. В результате магнитное поле в короне Солнца имеет крайне сложную структуру. Существуют разные способы теоретического моделирования этой структуры. В моделях МСТ часто используется следующее упрощение: в качестве строительных блоков рассматриваются поля, создаваемые небольшим числом точечных источников. В простейшем варианте в моделях МСТ такие фиктивные источники-монополи с положительными и отрицательными зарядами располагают на фотосферной поверхности, которая при этом полагается плоской. В результате наложения полей от различных источников могут возникать нулевые точки поля. Например, в модели топологического триггера магнитное пересоединение инициируется за счёт появления и быстрого движения в короне новой нулевой точки при медленном перемещении зарядов по фотосфере. При возникновении новых нулей магнитного поля или слиянии нулевых точек и их последующем исчезновении возможно возникновение вырожденных нулевых точек, характеризующихся нелинейным поведением магнитного поля в их окрестности. Однако, в отличие от нулевых точек 1-го порядка, их общее математическое описание ранее в литературе отсутствовало.

В некоторых случаях в МСТ используются модели с зарядами не на поверхности фотосферы, а погруженными под поверхность, или с погруженными под поверхность магнитными диполями, или усложнённые иными способами. Одним из способов сделать модели МСТ более физически реалистичными было бы моделирование фотосферных потоковых трубок круговыми витками с током. Для ответа на вопрос о подходящем выборе параметров в таких моделях необходимо было

исследовать возможные варианты поведения линий поля вблизи круговых токовых витков при их различном взаимном расположении в пространстве. Также при таком моделировании могут возникать новые физические эффекты, не учитывавшиеся в изначально крайне упрощённых моделях. Так, согласно существующим представлениям, наиболее общим случаем поведения магнитных силовых линий является случай, когда те не замкнуты и не ложатся на какие-либо магнитные поверхности, а эргодически заполняют объём. Исследования последних лет показали, что хаотическое поведение линий магнитного поля может наблюдаться уже вблизи очень простых токовых систем, в частности не обладающих высокой степенью симметрии систем, составленных из круговых витков. В связи с поставленной задачей актуальным являлось подробное изучение поведения линий поля вблизи таких систем.

Целью работы являлось исследование, с применением как аналитических расчётов, так и методов математического моделирования, топологических и геометрических характеристик магнитного поля в ряде конфигураций на Солнце, во внутренней гелиосфере и в лабораторных условиях.

Научная новизна диссертационной работы Лукашенко А.Т. заключается в том, что 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 было изучено взаимное расположение областей упорядоченного и хаотического поведения линий магнитного поля в окрестности системы из двух сцепленных круговых витков с токами.

Практическая значимость работы определяется разработкой новых теоретических подходов к описанию особых точек бездивергентных векторных полей, моделирования магнитных полей в потенциальном приближении в солнечной короне и во внутренней гелиосфере, а также дальнейшего совершенствования моделей солнечных вспышек.

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 научных журналах по физике и астрономии.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и трёх приложений. Полный объём диссертации составляет 167 страниц с 52 рисунками и 19 таблицами. Список литературы содержит 140 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. **Первая глава** представляет собой обзор литературы по исследованиям геометрических и топологических характеристик линий потенциального магнитного поля.

Во **второй главе** диссертации описана разработанная автором модель, учитывающая данные измерений КА «Улисс», согласно которым магнитное поле Солнца не зависит от гелиошироты в околосолнечном пространстве. В прежних моделях с поверхностью источника получалась не согласующаяся с ними дипольная асимптотика на бесконечности. В связи с этим актуальным являлось такое усовершенствование известных моделей потенциального поля – поверхности источника, в котором учитывалась бы независимость радиального компонента магнитного поля от гелиошироты в околосолнечном пространстве. Автором была построена аналитическая модель, а также выполнены расчёты для низших гармоник мультипольного разложения фотосферного магнитного поля.

В **третьей главе** диссертации описаны методы, позволяющие упростить задачу рассмотрения нулей 2-го и более высоких порядков потенциального магнитного поля. Упрощение достигается за счёт поворота и масштабирования системы координат и использования в качестве базиса разложения потенциала специальным образом подобранной системы функций. Дальнейший анализ состоит в нахождении таких направлений (исходящих из нуля лучей), на которых перпендикулярная им составляющая поля обращается в нуль, и в исследовании поведения линий поля вблизи них. Получено общее решение для таких направлений в случае нулевых точек 2-го порядка. Также нулей 2-го порядка подробно рассмотрен ряд частных случаев, построены визуализации линий поля.

Результаты этой главы могут быть использованы в исследованиях по магнитному пересоединению в космической плазме. Также результаты непосредственно обобщаются на произвольное векторное поле, потенциал которого удовлетворяет уравнению Лапласа, что делает возможным их применение в различных физических приложениях.

В **четвёртой главе** рассмотрены вопросы, связанные с усовершенствованием моделей “magnetic charge topology” (МСТ) путём моделирования выходящих на фотосферную поверхность трубок магнитного потока не магнитными зарядами или диполями, как это обычно делалось ранее, а круговыми токовыми витками.

Дается подробная характеристика поведения линий магнитного поля вблизи системы из двух одинаковых, сцепленных между собой круговых токовых витков, расположенных в перпендикулярных плоскостях. Показано, что на больших расстояниях силовые линии навиваются на топологически эквивалентные торами поверхности, охватывающие её как единое целое. На малых расстояниях происходит навивание линий на топологические торы, охватывающие каждый из витков по отдельности. Переход между ними осуществляется через область хаотичности, имеющую ограниченные пространственные размеры.

Также в этой главе описаны проводившиеся автором расчёты магнитного поля в модели, созданной в Институте лазерной физики СО РАН в целях моделирования магнитного поля сверхпроводящего магнита спектрометра АМС-02, что имеет непосредственное практическое значение.

Из недостатков работы можно отметить следующие:

1. В главе 3 при рассмотрении нулевых точек высших порядков автор ограничивается потенциальным приближением. Для практических приложений, связанных с исследованиями магнитного пересоединения силовых линий, более существенный интерес представляют, однако, случаи наличия токов, что в данной главе практически не затрагивается.

2. В главе 4 рассматривается преимущественно конфигурация сцепленных колец для случая одинаковых радиусов и одинаковых по модулю сил тока. Было бы желательно, однако, если бы автор диссертации также описал, как на полученные результаты влияют небольшие изменения отношения радиусов колец или сил тока в них. В целом замечания не затрагивают основных выводов работы, выполненной на высоком научном уровне. Новизна и обоснованность выводов не вызывают сомнений. Материал диссертации изложен ясно, диссертация хорошо структурирована и оформлена.

Результаты диссертационной работы достаточно полно опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ. Работа в целом является законченным исследованием, направлена на решение важной и актуальной задачи и выполнена на высоком научном уровне.

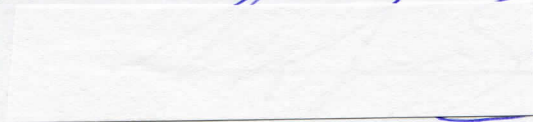
Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ и требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Автор Лукашенко Анастасия Тарасовна

заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией геоэлектродинамики (403) Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю.
Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)



Похотелов Олег Александрович
7 февраля 2017 г.

Почтовый адрес: 123242 Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр.1
Тел.: 8 (499) 254-88 05
E-mail: pokh@ifz.ru

Я, Похотелов Олег Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации А.Т. Лукашенко, и их дальнейшую обработку.



Похотелов Олег Александрович
7 февраля 2017 г.

Подпись зав. лабораторией 403, д.ф.-м.н, проф. О.А. Похотелова заверяю.
Ученый секретарь ИФЗ РАН
к.ф.-м.н.



Погорелов В.В.