

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук  
Ю.Д. Жугжды 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 разработке и усовершенствованию моделей магнитного поля в солнечной короне и внутренней гелиосфере. **Целью работы** является 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. **Актуальность** темы диссертационной работы Лукашенко А.Т. определяется тем, что процессы в плазменных системах существенно зависят от топологии и геометрии силовых линий магнитного поля.

**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 порядков выше 1-го потенциального магнитного поля. 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 в окрестности простейшей системы из двух сцепленных колец 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 достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

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

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. Во вводной **первой главе** даётся краткий обзор исследований 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. Тем самым учитывается существование тонкого токового слоя в гелиосфере. Этот принципиально важный физический факт не был ясен априори. Он не был корректно отражён в прежних работах при постановке классической задачи с внутренними граничными условиями на сфере. В результате получались решения с неправильной асимптотикой на бесконечности. Поэтому актуальным являлось такое усовершенствование известных моделей потенциального поля – поверхности источника, в котором учитывалась бы независимость радиальной составляющей магнитного поля от гелиошироты в околосолнечном пространстве. Автором была построена аналитическая модель, выполнены расчёты для низших

гармоник мультипольного разложения фотосферного магнитного поля, а также получены выражения для существующих в системе поверхностных токов.

В **третьей главе** диссертации описаны методы, позволяющие упростить задачу рассмотрения нулей 2-го и более высоких порядков потенциального магнитного поля в трёхмерном случае. Ранее в литературе было систематически рассмотрено поведение силовых линий магнитного поля вблизи нулей 1-го порядка. Автором диссертации была впервые получена общая методика описания нулей магнитного поля, применимая для более высоких порядков. 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, называемых в диссертации реперами), на которых перпендикулярная им составляющая поля обращается в нуль, и в исследовании поведения линий поля вблизи них. Для этого необходимо решить сформулированную автором задачу на собственные функции. Для нулей 2-го порядка автором в качестве её решения получены как общие уравнения, которые далее решаются стандартными численными методами, так и многочисленные аналитические выражения для частных случаев. В особых точках магнитного поля единственность решения уравнений силовых линий нарушается, при этом в нулевой точке могут оканчиваться как изолированные силовые линии, так и составленные из них поверхности. На ряде примеров автором было показано, как вблизи нулей высших порядков линии магнитного поля демонстрируют большее многообразие вариантов поведения, чем для 1-го порядка.

Полученные результаты непосредственно обобщаются на произвольное векторное поле, потенциал которого удовлетворяет уравнению Лапласа.

Результаты 3-й главы диссертации могут быть использованы как в исследованиях по магнитному пересоединению в космической, а также лабораторной плазме, так и представлять интерес для других физических приложений, в которых фигурируют векторные поля, потенциал которых задан как линейная комбинация шаровых или сферических функций.

В **четвёртой главе** рассмотрено поведение силовых линий магнитного поля системы из двух одинаковых сцепленных перпендикулярно токовых колец, вблизи которой имеются области как упорядоченности, так и хаотичности. Показано, что в окрестности этой системы существуют топологически различные области упорядоченного поведения линий поля, переход между которыми осуществляется через область хаотического их поведения,

имеющую, однако, ограниченные пространственные размеры. Проведены подробные численные расчёты, приведён ряд иллюстраций, показывающих как трёхмерную картину линий поля, так и картины, образующиеся в результате пересечения ими секущей плоскости.

Из недостатков работы можно отметить следующие:

1. В главе 3 можно было бы частично сократить очень подробно написанную обзорную часть, посвящённую нулевым точкам магнитного поля на плоскости и 1-го порядка в пространстве.

2. Имеются также замечания по оформлению работы. Можно отметить, что на рис. 4.7 много деталей, подчас показанных чересчур мелко (например, изображённые точки пересечения с замкнутыми линиями поля). Возможно, также имело бы смысл поместить некоторые пояснения не в подписи, а непосредственно на самом рисунке. То же касается и рис. 4.12.

Однако указанные замечания не влияют на высокую оценку работы в целом. Полученные в работе результаты обладают существенной новизной, а диссертация представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком уровне. Результаты диссертации могут служить хорошей основой для дальнейших исследований. Материалы диссертации были представлены на 14-ти международных и российских конференциях и опубликованы в 4-х статьях в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью удовлетворяет критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Лукашенко Анастасия Тарасовна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник ИЗМИРАН  
профессор, доктор физ.-мат. наук

Ю.Д. Жугжда

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени  
Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

142190, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН

Тел.: + \_\_\_\_\_ e-mail: [yzhugzhda@mail.ru](mailto:yzhugzhda@mail.ru)

Подпись проф., д.ф.-м.н. Жугжды Ю.Д. завер

Учёный секретарь ИЗМИРАН к.ф.-м.н.

А.И. Рез

