

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН

чл. корр. РАН

А.А. Петрукович

2020 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований
Российской академии наук

Диссертация «Стационарные токовые слои в гелиосфере» выполнена в отделе Физики космической плазмы Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Кислов Роман Анатольевич работал в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2017 году Р.А. Кислов окончил очную аспирантуру Института космических исследований РАН по специальности «Теоретическая физика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2020 г. ИКИ РАН.

Научные руководители:

- доктор физико-математических наук, Малова Хельми Витальевна, работает ведущим научным сотрудником в ФГБУН ИКИ РАН;
- кандидат физико-математических наук, Хабарова Ольга Валерьевна, работает ведущим научным сотрудником в ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Стационарные токовые слои в гелиосфере» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Диссертационная работа Кислова Романа Анатольевича посвящена МГД моделированию стационарных токовых слоёв солнечного происхождения в гелиосфере. Стационарные токовые слои представляют собой тонкие (порядка нескольких гирорадиусов протонов) и протяжённые магнито-плазменные структуры, вблизи которых происходит изменение полярности межпланетного магнитного поля и увеличение плотности тока. Наиболее

известными примерами таких структур являются тонкий гелиосферный токовый слой и окружающий его широкий гелиосферный плазменный слой, ограниченный, в свою очередь, стабильными тонкими токовыми слоями. Стационарные токовые слои - долгоживущие образования, поддерживаемые нейтральными линиями магнитного поля на Солнце, в отличие от другого класса токовых слоёв со временем жизни от секунд до минут, образующихся в турбулентной плазме солнечного ветра. В силу недостаточности наблюдений *in situ* в солнечном ветре, теоретическое изучение стационарных токовых слоёв является важной и перспективной задачей физики Солнца и космической плазмы. Построение моделей солнечного ветра с учётом наличия этих плазменных объектов позволяет частично восполнить существующие пробелы в знании структуры и свойств межпланетной среды.

В настоящее время имеется очень небольшое число моделей, в которых учитывалось возможное наличие стационарных токовых слоёв, не ассоциирующихся с гелиосферным токовым слоем. Однако эти модели либо являлись несамосогласованными, либо были применены вблизи Солнца, либо токовые слои не были основным объектом изучения. С другой стороны, пара «гелиосферный токовый слой – гелиосферный плазменный слой» ранее теоретически не рассматривались как связанное МГД образование, модель которого можно создать и изучить его основные свойства. То есть самосогласованных моделей, в которых была бы изучена структура гелиосферного плазменного слоя на различных расстояниях от Солнца, а также моделей иных стабильных токовых слоёв солнечного происхождения до работ соискателя не существовало.

Таким образом, в диссертации рассматриваются малоизученные вопросы формирования СТС различной формы (от плоских до конических) на разных гелиоширотах в разные фазы цикла солнечной активности. Соискатель адаптировал к гелиосферной плазме метод магнитных потоков, используемый в астрофизике при решении задач о моделировании осесимметричных стационарных течений. С его помощью были решены три задачи:

- (1) построение МГД модели гелиосферного плазменного слоя как системы, включающей в себя гелиосферный токовый слой,
- (2) построение МГД модели нескольких токовых слоёв солнечного происхождения при учёте недипольных гармоник магнитного поля Солнца, усиливающихся по мере удаления от минимума солнечной активности,
- (3) построение модели недавно обнаруженных конусообразных токовых слоёв в полярной гелиосфере, формирующихся внутри корональных дыр в минимуме солнечной активности.

Диссертация состоит из четырёх глав. В первой главе подробно описан метод, который используется при построении всех трёх моделей, перечислены и обоснованы основные предположения, выведены ключевые уравнения. Произведена модификация метода магнитных потоков для гелиосферной плазмы, которая заключается в рассмотрении более широкого класса решений, чем принято в астрофизике, а также в способе перехода от пространственных переменных к переменным “магнитный поток и одна из координат”.

Во второй главе решена задача (1) – о моделировании гелиосферного плазменного слоя. Последний описан как тонкий плазменный диск, внутри которого все линии магнитного поля замкнуты, а в центре расположен тонкий гелиосферный токовый слой. Решения показывают, что последний ограничен сепаратрисами, отделяющими его от открытых силовых линий магнитного поля в окружающем солнечном ветре. Даны оценки полного тока в гелиосферном токовом и плазменном слоях, толщины гелиосферного плазменного слоя, получены решения для скорости солнечного ветра, модуля радиальной компоненты магнитного поля и азимутальной компоненты плотности тока. Показано, что полученные результаты качественно согласуются с наблюдениями.

В третьей главе решена задача (2) – построена модель гелиосферы, в которой ГТС может быть не единственным стационарным токовым слоем. Учтены дипольная, квадрупольная и октупольная гармоники магнитного поля Солнца и их различные комбинации. Показано, что если недипольные гармоники достаточно сильны, на Солнце появляются нейтральные линии магнитного поля помимо основного магнитного экватора, а в гелиосфере образуются крупномасштабные токовые слои (от одного до трёх в зависимости от вклада конкретных гармоник) с чередующимся направлением азимутальной и радиальной компонент плотности тока. Доказывается, что наличие квадрупольной гармоники магнитного поля на Солнце приводит к известной асимметрии север-юг, наблюдаемой в ключевых параметрах плазмы и магнитного поля гелиосферы, природа которой активно дискутируется специалистами по физике Солнца. Также показано, что из-за вытягивания линий магнитного поля вдоль токовых слоёв радиальная компонента магнитного поля вблизи экватора может уменьшаться с расстоянием медленнее, чем в моделях с предполагаемой сферической симметрией, что соответствует наблюдениям.

В четвёртой главе решена задача (3): построена модель полярного конусообразного токового слоя. Важнейшими признаками таких слоёв являются резкое падение скорости солнечного ветра по сравнению с окружающим высокоскоростным потоком из корональной дыры и локальное уменьшение плазменного бета. При моделировании предполагалось, что вблизи полюсов Солнца плотность потока массы изотопна, имеется

локальный максимум плотности плазмы и область изменённой полярности магнитного поля Солнца. Результаты МГД моделирования показывают, что вдали от Солнца свойства полярных токовых слоёв качественно согласуются с наблюдениями. Предсказано, что вблизи границ таких токовых слоёв, имеется азимутальная альфвеновская поверхность, на которой азимутальная скорость плазмы равна альфвеновской скорости. Результаты анализа наблюдательных данных аппарата Ulysses полностью подтвердили наличие такого эффекта, наблюдаемого при множественных пересечениях полярных конических токовых слоёв. В заключении подведены итоги работы. В диссертации имеются три приложения, в которых подробно обсуждаются вопросы применимости построенных моделей и другие детали исследования, прямо не относящиеся к защищаемым положениям.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Основные результаты, представляемые к защите, были получены в десяти основных работах. В пяти других публикациях Р.А. Кислова были подробно рассмотрены вопросы, связанные с основными задачами диссертационной работы. Результаты этих работ обсуждаются в диссертации, но не выносятся на защиту. В четырёх работах из десяти ключевых соискателю полностью принадлежит теоретическая часть, т.е. решение поставленных задач. В шести работах диссертант выполнял работу с соавторами в равных долях, в остальных публикациях участвовал в обсуждениях с руководителями и соавторами. Р.А. Кислов первый автор в 5 публикациях из 15-ти, из них - одна моно-работа. Постановка задач в равной степени принадлежит Р.А. Кислову и обоим научным руководителям. Все наблюдательные результаты получены одним из научных руководителей, О. В. Хабаровой, и в диссертации приведены для полноты физической картины и объяснения постановки задач, а также учитываются при выборе параметров моделей, но на защиту не выносятся.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Достоверность результатов подтверждается 15 публикациями в реферируемых научных журналах, входящих в список ВАК. Из них 6 - в высокорейтинговых журналах из квартиля Q1. Также результаты диссертационной работы были доложены автором на 28 конференциях, включая 13 международных.

Научная новизна полученных результатов

Все три модели, построенные Р.А. Кисловым, являются новыми. Ранее подобных результатов в области изучения крупномасштабных токовых слоёв никто не получал. Впервые использован метод потоков в применении к плазме солнечного ветра. Впервые получены характеристики системы гелиосферный токовый слой-гелиосферный плазменный слой на разных расстояниях от Солнца и показано, что границей гелиосферного плазменного слоя также являются токовые слои. Впервые построена модель множественных стационарных токовых слоёв, входящих в глобальную токовую систему. Впервые построена модель недавно обнаруженных конических токовых слоёв в полярной гелиосфере и предсказано наличие на них азимутальной альфвеновской поверхности.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Построенные самосогласованные одножидкостные двумерные МГД модели могут использоваться как самостоятельно, так и при построении гибридных (МГД-кинетических) моделей. Результаты моделирования могут учитываться при интерпретации наблюдений токовых слоёв в гелиосфере.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. Maiewski E. V., Kislov R. A., Khabarova O. V., Malova H. V., Popov V. Yu., Petrukovich A. A. and L. M. Zelenyi, Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Wind Key Parameters and Current Sheets in the Heliosphere: Radial and Solar Cycle Evolution, *The Astrophysical Journal*, 892, 12, 1, 2020.
2. Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V., Quasi-stationary current sheets of the solar origin in the heliosphere, *The Astrophysical Journal*, 875, 1, 2019.
3. Маевский Е.В., Кислов Р.А., Малова Х.В., Хабарова О.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А., Зеленый Л.М., Структура солнечного ветра в гелиосфере в зависимости от фазы солнечного цикла: крупномасштабная динамика гелиосферного токового слоя, *Океанологические исследования*, т. 47, № 1, с. 85–87, 2019
4. Маевский Е.В., Кислов Р.А., Малова Х.В., Хабарова О.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А., Солнечный ветер и гелиосферная токовая система в годы максимума и

- минимума солнечной активности, *Космические исследования*, т.56, №6, с.394-403, 2018а.
5. Маевский Е.В., Кислов Р.А., Малова Х.В., Хабарова О.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А., Моделирование магнитоплазменных структур в солнечном ветре, *Учёные записки физического факультета Московского Университета*, №5, 1850307, 2018б.
 6. Хабарова О.В., Обридко В.Н., Кислов Р.А., Малова Х.В., Бемпорад А., Зелёный Л.М., Кузнецов В.Д., Харшиладзе А.Ф., Эволюция скорости солнечного ветра с расстоянием от Солнца в зависимости от фазы цикла. Сюрпризы от Ulysses и неожиданности по данным наблюдений короны. *Физика плазмы*, т.44, №9, с. 752-766, 2018.
 7. Маевский Е.В., Кислов Р.А., Малова Х.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А., Модель солнечного ветра в гелиосфере на низких и высоких широтах, *Физика плазмы*, т.44, №1, с.89-101, 2018.
 8. Кислов Р.А., МГД–модель высокоширотного токового слоя в гелиосфере, *Учёные записки физического факультета Московского Университета*, №4, 1740704, 2017.
 9. Khabarova O.V., Malova H.V., Kislov R.A., Zelenyi L.M., Obridko V.N., Kharshiladze A.F., Tokumaru M., Sokół J.M., Grzedzielski S., Fujiki K., High-latitude Conic Current Sheets in the Solar Wind, *The Astrophysical Journal*, 836, 1, 2017.
 10. Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V., A new stationary analytical model of the heliospheric current sheet and the plasma sheet, *Journal of Geophysical Research, Journal of Geophysical Research*, 120, 2015.
 11. O. Malandraki, O. Khabarova, R. Bruno, G. P. Zank, G. Li, B. Jackson, M. M. Bisi, A. Greco, O. Pezzi, W. Matthaeus, A. G. Chasapis, S. Servidio, H. Malova, R. Kislov, F. Effenberger, J. le Roux, Y. Chen, Q. Hu, & N. E. Engelbrecht, Current sheets, magnetic islands, and associated particle acceleration in the Wind as Observed by Ulysses near the Ecliptic Plane, *The Astrophysical Journal*, *The Astrophysical Journal*, 881, 2, 2019.
 12. Мингалёв О.В., Хабарова О.В., Малова Х.В., Мингалёв И.В., Кислов Р.А., Мельник М.Н., Сецко П.В., Зелёный Л.М., Zank G.P., Моделирование Ускорения протонов в магнитном острове в складке гелиосферного токового слоя, *Астрономический Вестник*, т.53, №1, с.34-60, 2019.
 13. Veselovsky I.S., Kislov R.A., Malova H.V., Khabarova O.V., The model of a collisionless current sheet in a homogeneous gravity field, *Physics of Plasmas*, 23, 102902, 2016.
 14. Кислов Р.А., Малова Х.В., Васько И.Ю., Двумерная МГД-модель магнитодиска Юпитера, *Космические Исследования*, т.53, №5, с. 1-14, 2015.

15. Кислов Р.А., Малова Х.В., Васько И.Ю., Модель магнитодиска Юпитера, Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика и астрономия, №1, с. 79-83, 2013.

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения исследования опубликованы в указанных статьях.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.03.03 - Физика Солнца»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «01.03.03 - Физика Солнца»: «Солнечный ветер и гелиосфера» и «Солнечно-земная физика и солнечно-земные связи».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Кислова Романа Анатольевича «Стационарные токовые слои в гелиосфере» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 Физика Солнца.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики космической плазмы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 10 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 10 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от « » июня 2020 г.

Зам. председателя НТС отдела 54 ИКИ РАН

д.ф.-м.н.,



Д.Р. Шкляр

Секретарь НТС отдела 54 ИКИ РАН

к.ф.-м.н.



Л.С. Рахманова