

# ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Кислова Романа Анатольевича на тему «СТАЦИОНАРНЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В ГЕЛИОСФЕРЕ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, по специальности 01.03.03 – физика Солнца.

Нашему вниманию предложена диссертационная работа, которая посвящена аналитическому исследованию крупномасштабных токовых слоёв в гелиосфере/солнечном ветре. Из них к настоящему времени лучше всего экспериментально изучен гелиосферный токовый слой, преимущественно находящийся в экваториальной области. Вне плоскости эклиптики измерения довольно разрознены, так что и сама возможность существования других крупномасштабных токовых слоёв на более высоких широтах остается малоисследованной.

В диссертации получены аналитические решения МГД уравнений, описывающие такие крупномасштабные образования при различных разумных предположениях о крупномасштабной структуре магнитного поля Солнца. Структура диссертации четкая и логичная. Во Введении описывается современное состояние предмета, формулируются проблемы, которые рассматриваются в последующих главах работы, описывается актуальность, новизна и значимость. В Главе 1 описывается применяемый математический аппарат, основные приближения и подходы к решению задач, рассматриваемых в последующих главах. Главы 2-4 описывают решения задач о трех различных типах крупномасштабных токовых слоев в гелиосфере.

В диссертации получены **новые фундаментальные** результаты о крупномасштабных токовых слоях в гелиосфере. На мой взгляд, из исследований, изложенных в диссертации, следуют три важных вывода: (1) количество крупномасштабных разрывов в гелиосфере не ограничивается одним обычно рассматриваемым экваториальным токовым слоем, а может быть большим; (2) некоторые из этих разрывов располагаются на высоких широтах, включая разрыв конической формы; (3) формирование и структура разрывов напрямую связаны с условиями на поверхности Солнца, так что детальные модели должны рассматривать всю систему Солнце-гелиосфера в целом. Важным результатом являются полученные решения с сепаратрисами. Они представляют большую ценность для понимания строения гелиосферного плазменного слоя (ГПС), поскольку удерживают плазму вблизи ГТС от радиального разлёта. При этом, если области замкнутых и открытых линий ММП существуют, то они будут разделены переходной областью – магнитным сепаратором. Ценность полученных решений состоит еще и в том, что система МГД уравнений очень сложна, так что во многих задачах вообще не удастся найти какие-либо реалистичные аналитические решения, тогда как в данной работе их найдено несколько.

Актуальность исследования крупномасштабных гелиосферных токовых слоев определяется (а) фундаментальной ролью токовых слоев в физике плазмы в целом и в гелиосфере в частности; (б) необходимостью интерпретации наблюдательных данных, получаемых новым поколением космических аппаратов, включая измерения вблизи Солнца и за пределами плоскости эклиптики. При этом получение аналитических решений чрезвычайно ценно, поскольку такие решения помогают формировать физические концепции и вырабатывать физическую картину исследуемых явлений, а также – интерпретировать результаты сложных численных расчетов.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием адекватного

рассматриваемым задачам аппарата современной теоретической физики, продуманным выбором приближений и допущений, и сравнением получаемых результатов с результатами предшественников. Степень обоснованности результатов высокая. Результаты работы широко апробированы: они доложены на нескольких десятках Российских и международных конференций (в некоторых из них оппонент принимал участие) и опубликованы в десяти оригинальных научных статьях.

Обратим внимание на ряд **вопросов и предложений**, возникших у оппонента при изучении диссертации соискателя.

### **1. Вопросы общего характера.**

В идеальной МГД, рассматриваемые в работе токовые слои являются бесконечно тонкими разрывами. В рамках классификации разрывов, описанной, например, в учебнике Ландау и Лифшица (т. 8), токовые слои являются тангенциальными разрывами. Как ни странно, в работе это ни разу не упоминается, хотя ссылка на учебник Ландау и Лифшица приведена. Кроме того, иногда рассматривается идеальная МГД, а иногда – конечная проводимость плазмы. Где, когда и почему предпринимаются эти переходы от одного приближения к другому, не объясняется. Некоторые конкретные вопросы общего характера и примеры неудачных пояснений приведены ниже:

- a. «Многие модели, которые принято считать “моделями ГТС”, в действительности просто описывают солнечный ветер с узким разрывом – нейтральной поверхностью ММП, на которой может быть пик плотности тока, по своей **ширине** не соответствующий ни ГТС, ни ГПС» – В идеальной МГД разрыв **бесконечно тонкий**. **Ширина** возникает из-за конечной магнитной вязкости, которая скорее всего – турбулентная. В работе не обсуждается связь между сделанными предположениями и **наблюдаемыми ширинами** разрывов.
- b. «...задачи разбиты на **подзадачи**, связанные с конкретным **способом решения...**» – почему методология ставится впереди существа дела?
- c. «Плазму между ними будем считать **конечно-проводящей**.» Хотя в самом начале делалось предположение об идеальности плазмы и вмороженности магнитного поля.
- d. Иногда делаются важные утверждения, но не поясняется их смысл, важность и возможные последствия, например: «...около сепаратрис и нейтральной плоскости будут формироваться тонкие токовые слои, при описании которых наша модель должна быть значительно видоизменена» – какой отсюда можно сделать вывод?

### **2. Изложение материала.**

Хотя в целом изложение материала логичное, в работе встречаются весьма странные повороты и отклонения от логики повествования. В частности, часто сообщается о том, что в данной работе НЕ РАССМАТРИВАЕТСЯ. В других случаях вместо того, чтобы привести конкретное уравнение, дается словесное описание того, как оно выглядит, либо должно выглядеть. Примеры неудачного изложения материала приведены ниже.

- a. «В данной работе эти эффекты **не рассматриваются**.» – зачем нам знать о том, что в работе не рассматривается?
- b. «вопрос о том, из-за чего возникают эти условия, **остаётся**

**неисследованным.»**

- c. «...задача одновременно описать низкие – **не ставится.**»
- d. «...модификации модели магнитного поля Солнца по Фиск–Паркеру» – что это такое?
- e. «...высокоширотного конического токового слоя в гелиосфере, ранее никем не ставилась, не решалась и **является абсолютно** уникальной» – утверждения, что решение уникальное было бы достаточно.
- f. «(19) с учётом (9,10) имеет вид (13) относительно электрического потенциала и  $\Phi$ ».
- g. «с учётом (18) следует уравнение относительно  $b$  и  $\Phi$ , аналогичное (13).»
- h. Стр. 76: «Стоит отметить, что газодинамическое давление в солнечном ветре преобладает над тепловым и магнитным.» – на самом деле, это «стоило отметить» в самом начале диссертации.
- i. «Плотность тока, текущая вдоль силовых линий, определяется продольной проекцией закона Ома:» и дальше приводится векторное уравнение, а не уравнение в проекции.
- j. «В представленной в данном разделе модели при задании недипольного МПС условия на концентрацию и скорость вблизи Солнца не меняются – они остаются такими же, как и при полностью дипольном МПС, поэтому минимум скорости солнечного ветра оказывается вне токовых слоёв. В реальности они могут “подстраиваться” под неоднородности в широтном распределении магнитного поля вблизи Солнца. Но данная модель предназначена не для описания конкретного случая, а для а) описания **картины в целом** и б) выяснения физических причин, приводящих **к тем или иным особенностям** в пространственных распределениях параметров плазмы и ММП.» ???
- k. «...Ulysses и возможных будущих миссий вне плоскости эклиптики» – Возможно, следовало бы упомянуть какие-то миссии, причем не только будущие, но и ныне работающие (Parker Solar Probe и Solar Orbiter)?
- l. «Модель имеет значение, во-первых, для интерпретации наблюдений [Khabarova et al. 2017], во-вторых, как **идейная основа** для развития более точной модели.» – Что в данном контексте значит «идейная основа»?
- m. Встречаются повторяющиеся (совпадающие) уравнения; напр., (68) и (89)
- n. «Таким образом, **нельзя сказать**, что представленная здесь модель является продолжением на большие расстояния модели [Burger et al. 2008].» – А что можно сказать?
- o. «Помимо указанного различия, настоящая модель и модель [Burger et al. 2008] **отличаются технически**, поскольку используют совершенно разные методы» – и что из этого следует? Зачастую, один и тот же результат удается получить различными методами.
- p. «Можно проделать аналогичную работу для актуальных для изучения КТС дат, предположения (9–11) могут быть проверены и, с учётом наблюдательных данных, модифицированы для создания более развитой модели.» – Кто это будет делать?

### 3. Терминология, обозначения и единицы измерения.

Не все термины, используемые в работе, определены. Во многих случаях обращает на себя внимание очень вольное обращение с уравнениями и единицами измерения. Смешиваются единицы измерения из различных систем единиц (СГС и СИ) и пр.; например:

- a. «высотно–интегрированная проводимость короны» – это что?
- b. «Уравнение состояния плазмы имеет вид:  $P=nT$  (1)» – где постоянная Больцмана и что включает в себя  $n$ ?
- c. В ряде случаев не определены переменные. Например, индекс « $r$ » у поля и скорости не определен.
- d. «Величина магнитного давления  $P=B^2/8\pi$  при  $B = 1$  нТл составляет приблизительно  $0.05 \cdot 10^{-10}$  эрг/см<sup>3</sup>,». Здесь уравнение взято в системе СГС, а величина поля – в системе СИ. Давление приводится в эрг/см<sup>3</sup>, тогда как на самом деле оно измеряется в дин/см<sup>2</sup>

### 4. Оценки точности.

При обсуждении точности решений и их соответствия наблюдениям (или другим моделям) употребляются поэтические эпитеты, а объективные метрики нигде не приводятся. Например:

- a. Решения, показанные на Рисунках 25–27, **качественно согласуются** с наблюдениями.
- b. «сепаратрисы будут расположены **не слишком далеко** от экватора»
- c. «Приведённое решение находится **в удовлетворительном согласии** с наблюдаемыми величинами»
- d. «Построенная модель **качественно согласуется** с наблюдениями.»
- e. «Выражение (73) **качественно согласуется** с (51), но является более удобным.»
- f. «построение модели магнитоплазменного равновесия, результаты которой **качественно согласуются** с наблюдениями»
- g. «**...небольшие отличия** могут быть обнаружены...»
- h. «**...нахождения формы КТС с приемлемой точностью.**»
- i. «Здесь **не утверждается**, что это единственно возможный вариант. Автор лишь проиллюстрировал с помощью рассмотренных случаев идею о том, что **гелиосфера может быть устроена сложнее, чем предполагалось ранее**. Такие эффекты как отсутствие осевой симметрии интересны сами по себе, но **принципиально не меняют** крупномасштабную структуру солнечного ветра.»

### 5. Язык и опечатки.

Хотя опечаток немного, имеется большой простор для улучшения языка работы. Главная проблема, на мой взгляд, состоит в отсутствии единого литературного стиля произведения: строгий язык теоретической физики временами уступает место языку художественной литературы, включая поэтические эпитеты (см. выше). Несколько примеров неудачных формулировок приведены ниже:

Отзыв Флейшман: Кислов



- a. «Представление об основаниях линий магнитного поля вблизи Солнца является частным случаем и верно лишь тогда, когда вращение Солнца как проводящей сферы в магнитном поле – единственная причина появления электрического поля на его поверхности. Действительно: если известно  $\Psi$ , вызванное другими источниками, то можно найти с помощью (22) функцию  $\Omega$ , и она не обязана быть равной угловой скорости плазмы где-либо вблизи Солнца.» – что все это значит?
- b. «...означает, что **учитываются оценки о роли силы тяжести** (см. выше)...»
- c. Опечатка: «Поскольку азимутальное магнитное поле спадает при удалении от Солнца *быстрее* радиального, спираль оказывается сильно скрученной»
- d. «Выражения (84–86) содержат радиус как в левой, так и в правой частях. Т.е. **речь идёт об интегральных уравнениях**» – нет: (86) – только в правой части
- e. «Таким образом, в работе решены все поставленные задачи и получены результаты, не противоречащие наблюдениям, а **в некоторых случаях даже стимулирующие** наблюдательные исследования **в определённом направлении.**» – что это значит??

В целом, исследование, представленное в диссертации, дает решение цикла взаимосвязанных задач о крупномасштабных токовых слоях в гелиосфере, что имеет важное значение в гелиофизике. Важность полученных результатов доминирует над выявленными недочетами. Отмеченные недостатки не касаются фундаментальных вопросов, изложенных в диссертации, и положений, вынесенных на защиту, но указывают на потенциал дальнейших исследований и профессионального роста диссертанта. Соответствие результатов, полученных диссертантом, мировому уровню следует из их публикации в наиболее престижных российских и международных журналах, и их цитирования в работах российских и зарубежных исследователей. Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов, работающих в области физики Солнца, гелиофизики и космической погоды, и могут быть использованы в ГАО, САО, ИКИ, ГАИШ, ИЗМИРАН, ИСЗФ и др. Результаты исследований опубликованы в журналах, перечень которых утвержден ВАК; автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Кислова Романа Анатольевича «СТАЦИОНАРНЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В ГЕЛИОСФЕРЕ» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.03 – физика Солнца, а ее автор Кислов Роман Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико–математических наук.

Distinguished Research Professor,  
Center for Solar–Terrestrial Research,  
New Jersey Institute of Technology, США  
д.ф.м.н.  
Fleishman G.D.

Флейшман Г.Д.  
Ведущий научный сотрудник  
ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН



12 October 2020