

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию И.П. Лопина  
«Исследование волн и колебаний в продольно и поперечно-неоднородных  
солнечных магнитных волноводах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.03 – физика Солнца

Диссертация И.П. Лопина посвящена теоретическому исследованию характеристик магнитогидродинамических (МГД) колебаний магнитных трубок в солнечной атмосфере. Подобные колебания широко распространены и отличаются большим разнообразием. Поперечные колебания корональных петель с высокой амплитудой непосредственно наблюдаются телескопами ультрафиолетового диапазона. МГД колебания с более низкой амплитудой, пока недоступные непосредственной регистрации, считаются наиболее вероятной причиной возникновения квазипериодических пульсаций, наблюдаемых в микроволновом, рентгеновском и др. диапазонах. Наконец, МГД волны могут играть значительную роль в переносе энергии в солнечной атмосфере – как от фотосферы к короне (что является ключевым фактором в соответствующих моделях нагрева короны), так и от областей энерговыделения в солнечной короне во время вспышек к нижележащим слоям солнечной атмосферы. Таким образом, МГД волны и колебания могут служить как средством диагностики характеристик солнечной атмосферы (что является предметом изучения корональной сейсмологии), так и непосредственно участвовать в нагреве короны, развитии солнечных вспышек и т.д. Интерпретация наблюдений и разработка моделей процессов в солнечной атмосфере требует знания характеристик МГД волн и колебаний, т.е. их дисперсионных соотношений, условий распространения и т.д.; в свою очередь, эти характеристики существенно зависят от особенностей структуры плазмы и магнитного поля. Поэтому диссертационная работа И.П. Лопина безусловно является актуальной.

Диссертация содержит три главы. В первой главе кратко представлено современное состояние проблемы; представлены подходы, используемые для описания МГД колебаний в магнитных трубках.

Во второй главе исследуются характеристики изгибных колебаний (кинк-моды) в неоднородной среде, с учетом расширения магнитной трубки и неоднородной температуры плазмы. Получены дисперсионные уравнения для данной моды колебаний в указанных условиях. В частности, показано, что в изотермическом случае для кинк-моды отсутствует частота отсечки – в отличие от вывода, сделанного в известной работе Спрюита (1981). С другой стороны, в неизотермической атмосфере такая частота отсечки может существовать; она зависит от градиента плотности плазмы (т.е. в общем случае, от высоты) и характеристик магнитного поля. Рассматриваются, в основном, волны в хромосфере – в том числе, с использованием реалистичной модели плотности VAL-C. Показано, что МГД волны могут переносить энергию, достаточную для нагрева короны. Рассматриваются также поперечные колебания корональных магнитных петель, которые непосредственно наблюдались во время вспышек; одной из особенностей таких колебаний является одновременное наличие двух гармоник, отношение частот которых  $\omega_2/\omega_1$  отличается от ожидаемого значения 2 (меньше двух). Показано, что подобный эффект может возникнуть в неизотермических петлях с большим перепадом температур между основаниями и вершиной.

В третьей главе исследуются характеристики быстрых симметричных магнитозвуковых волн (сосисочной моды) в магнитных трубках. В отличие от существующих моделей, рассматриваются трубки с непрерывным поперечным профилем плотности плазмы. Получены дисперсионные уравнения для данной моды колебаний в

указанных условиях; найдены условия, при которых МГД волны являются захваченными и могут распространяться вдоль магнитных трубок без существенных потерь энергии. Найдена связь точки отсечки рассматриваемых МГД волн с характеристиками волноводов. Показано, что учет сглаженной границы магнитной трубки расширяет диапазон параметров, благоприятных для существования МГД колебаний с высокой добротностью. Полученные результаты используются для интерпретации квазипериодических пульсаций, наблюдавшихся в микроволновом и рентгеновском диапазонах и в линии  $H\alpha$ .

По существу диссертации представляется необходимым сделать следующие замечания:

1. В диссертации часто упоминаются «винтовые (изгибные)» волны, или же эти понятия используются как синонимы. Хотя при внимательном прочтении понятно, о чем идет речь, подобная терминология может вызвать замешательство, так как обычно под изгибными или винтовыми подразумеваются волны, в которых преобладает смещение магнитной трубки как целого в поперечном направлении или же ее закручивание в азимутальном направлении, соответственно.

2. На Рис. 2.3 и 2.4 приведены графики вычисленной частоты отсечки кинк-моды в хромосфере. В то же время, не сказано, насколько полученные результаты согласуются с наблюдениями. Было бы желательно либо привести имеющиеся экспериментальные данные о частоте отсечки МГД волн в хромосфере (если они есть), либо обсудить подходы к определению этой частоты по наблюдениям. Влияет ли вариация частоты отсечки (например, из-за изменения магнитного поля, как показано на Рис. 2.4) на эффективность нагрева короны МГД волнами?

3. В разделе 2.8 сказано, что отношение гармоник поперечных колебаний  $\omega_2/\omega_1$  зависит от различных факторов, включая расширение магнитных трубок с высотой, вертикальную стратификацию плазмы и продольную неизотермичность петли. Вместе с тем, при интерпретации наблюдений рассматривается только последний фактор. Действительно ли неизотермичность является доминирующим фактором, влияющим на отношение гармоник? Как изменятся необходимые значения перепада температур  $T_a/T_f$ , если учесть также расширение магнитных трубок с высотой и неоднородность плотности плазмы?

4. В разделе 3.5 показано, что характеристики квазипериодических пульсаций (связанных, предположительно, с сосисочными модами) не могут быть объяснены в рамках «классической» модели магнитных трубок с резкой границей; сделан вывод, что профиль плотности плазмы является сглаженным и получены оценки параметров магнитных трубок. Вместе с тем, данная интерпретация также не учитывает расширение магнитных трубок с высотой. Изменение радиуса магнитной трубки естественным образом влияет на нормированное значение волнового числа  $ka$  – это может либо снять указанные противоречия с моделью магнитных трубок с резкой границей, либо, наоборот, наложить еще более жесткие ограничения на характеристики магнитных волноводов в короне.

5. Раздел 3.2 посвящен исследованию МГД колебаний в прямоугольном магнитном слое, который предполагается бесконечным в одном из направлений. В то же время, в следующем разделе (3.3) изложена более совершенная теория – а именно, теория колебаний цилиндрической магнитной трубки. Очевидно, цилиндрическая трубка является более реалистической моделью корональных магнитных петель; поэтому возникает вопрос: зачем теория колебаний в прямоугольном магнитном слое включена в диссертацию? Из текста неясно, имеет ли модель прямоугольного магнитного слоя какие-либо преимущества.

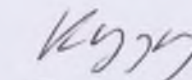
6. В тексте очень много опечаток – встречаются практически на каждой странице.



Высказанные замечания не влияют на высокую оценку диссертации в целом. Полученные результаты (перечисленные в положениях, выносимых на защиту) отличаются новизной и представляют собой значительный шаг в развитии теории МГД колебаний.

Диссертационная работа «Исследование волн и колебаний в продольно и поперечно-неоднородных солнечных магнитных волноводах» представляет собой законченное исследование и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.03 – Физика Солнца, а ее автор, Игорь Петрович Лопин, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук. Основные результаты достаточно обоснованы и достоверны, личный вклад автора является определяющим. Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов в области корональной сейсмологии и физики Солнца в целом и могут быть использованы в ГАО РАН, ГАИШ МГУ, ФИАН, САО РАН, НИРФИ, КраО, ИПФ РАН, ИСЗФ СО РАН, ФТИ РАН. Результаты исследования опубликованы в ведущих международных журналах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Зав. лабораторией радиоастрофизических исследований Солнца  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института Солнечно-Земной Физики СО РАН  
доктор физико-математических наук  
(по специальности 01.03.03 – Физика Солнца)

  
15 мая 2018 г. А.А. Кузнецов

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а  
тел.: +7 3952 564574  
e\_mail: a\_kuzn@iszf.irk.ru

Подпись А.А. Кузнецова заверяю  
Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН  
кандидат физико-математических наук





И.И. Салахутдинова