

Утверждаю:

Директор Федерального научного центра  
Институт прикладной физики РАН  
член-корреспондент РАН  
А.М. Сергеев



« 05 » апреля 2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации М.С. Рудермана

«Изгибные волны и колебания в магнитных трубках в солнечной атмосфере»,  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальностям 01.03.03 — физика Солнца и 01.02.05 — механика жидкости, газа и  
плазмы

Начиная с полёта Skylab в 70-х годах прошлого столетия стало понятно, что солнечная атмосфера сильно неоднородна, причем основополагающую роль в её конфигурации играет магнитная поле. Начиная с конца прошлого века новое поколение космических аппаратов приносит постоянно увеличивающееся количество наблюдательных данных, связанных с волновыми и колебательными процессами в солнечной атмосфере. Важность наблюдений волн и колебаний в солнечной атмосфере определяется тем, что они позволяют получить информацию о физических процессах на Солнце, которую, зачастую, нельзя получить другими методами. При этом особую роль здесь играют так называемые изгибные колебания магнитных трубок или магнитных петель. Изгибные колебания корональных магнитных петель в настоящее время являются одним из основных инструментов новой и быстро развивающейся ветви солнечной физики – корональной сейсмологии. Для успешного применения сейсмологических методов для исследования солнечной атмосферы необходимо было создать адекватную теорию изгибных колебаний корональных петель. Решению этой проблемы посвящена докторская диссертация М.С. Рудермана. Заметим, что хотя исследования колебательных и волновых процессов в корональных магнитных петлях проводятся в течение четырёх десятилетий, они пока далеки от завершения. Поэтому тема диссертации М.С. Рудермана, несомненно, актуальна и практически значима.

Основные исследования, отраженные в диссертации М.С. Рудермана, сосредоточены на теоретическом анализе изгибных волн и колебаний корональных магнитных петель. Комплексное исследование затрагивает разные аспекты теории: роль изменения плотности, размера и формы сечения вдоль петли, эффекты кривизны и

кручения петли, влияние продольных токов и течений, влияние охлаждения петли на свойства изгибных колебаний. Исследовано также затухание изгибных колебаний вследствие резонансного поглощения и влияние на него нелинейности. Общим для всех этих исследований является использование асимптотической теории волн и колебаний, в которой малым параметром является отношение характерного поперечного размера петли к её длине. Широкий комплекс исследованных проблем и полученные при этом научные результаты, несомненно, вносят существенный вклад в корональную сейсмологию.

Текст диссертации представлен на 369 страницах, а сами результаты диссертации содержатся в 30 публикациях. Все статьи опубликованы в престижных международных журналах, содержащихся в списке ВАК. По итогам проведенных исследований автором сформулировано 10 основных результатов.

Диссертация состоит из трёх частей. Первая часть является вводной. Во второй части рассматриваются распространяющиеся изгибные волны, в третьей – стоячие волны. Первая часть содержит 3 главы, вторая 5 и третья 12 глав. В первой части выведено уравнение, описывающее изгибные волны в магнитной трубке с круговым сечением, в которой плотность плазмы и радиус сечения изменяются вдоль петли. Это уравнение использовано для исследования безотражательного распространения изгибных волн вдоль корональных петель, а также для анализа влияния изменения плотности и радиуса поперечного сечения вдоль петли на собственные частоты стоячих волн в корональных петлях. Показано, что учёт расширения корональной петли приводит к уменьшению оценки шкалы высот, полученной на основе одновременного наблюдения фундаментальной моды и первого обертона изгибных колебаний. Полученное уравнение впоследствии широко использовалось в работах других авторов.

В третьей части диссертации исследованы стоячие изгибные волны в магнитных трубках с эллиптическим сечением. Показано, что в этом случае имеется две фундаментальные моды с разными собственными частотами. Обе моды линейно поляризованы, одна вдоль большой оси эллиптического сечения, а другая - вдоль малой. Аналогичные результаты получены для каждого обертона. Обсуждается приложение полученных результатов к корональной сейсмологии. В частности, предсказана возможность наблюдения двух близких частот, отличающиеся приблизительно на 20%, в данных наблюдений изгибных колебаний корональных петель. Эти результаты тесно связаны с исследованием вертикальных и горизонтальных колебаний плоских корональных петель. Показано, что искривление петли вызывает отклонение сечения трубки от кругового, что, в свою очередь, приводит к появлению двух фундаментальных мод изгибных колебаний, поляризованных соответственно в вертикальной и

горизонтальной плоскостях и имеющих в общем случае различные частоты.

В пятой главе третьей части диссертации изучены колебания неплоских корональных петель, оси которых имеют не только кривизну, но и кручение. Показано, что эти колебания описываются тем же уравнением, что и колебания плоских петель, так что наличие кручения не влияет непосредственно на частоты изгибных колебаний. Основным следствием кручения оси петли является изменение направления поляризации вдоль петли. Показано, что направление поляризации линейно поляризованной волны изменяется вдоль трубки таким образом, что угол между направлением поляризации и направлением главной нормали к оси петли остаётся постоянным. Получен критерий, позволяющий определить является ли наличие узла в наблюдаемых поперечных колебаниях эффектом проекции или проявлением первого обертона.

В настоящее время не ясно, являются ли корональные петли однородными в поперечном сечении, или состоят из множества отдельных тонких нитей. Кроме того, иногда наблюдаются изгибные колебания не одной корональной петли, а коллективные колебания нескольких близких петель. В связи с этим возникает задача об исследовании коллективных колебаний нескольких параллельных магнитных трубок. В диссертации исследование этой проблемы проводится на примере коллективных колебаний двух параллельных магнитных трубок. Показано, что в этом случае существует две фундаментальные моды колебаний с разными частотами. То же самое оказывается верным и для каждого обертона. Основным результатом этого исследования связан с приложением к корональной сейсмологии. В частности, отношение периодов фундаментальной моды и первого обертона может быть использовано для получения оценки шкалы высот в короне. Показано, что оценка шкалы высот, полученная на основании модели петли, состоящей из двух параллельных трубок, совпадает с оценкой, полученной в предположении однородной трубки. Этот результат позволяет сделать предположение, что оценка шкалы высот не зависит от того, является ли корональная петля однородной, или состоит из множества отдельных тонких нитей.

Большинство наблюдаемых изгибных колебаний корональных петель затухает в течение нескольких периодов. В четвёртой главе второй части исследовано резонансное затухание распространяющихся изгибных волн в магнитной трубке с плотностью, изменяющейся в тонком переходном слое от большего значения внутри трубки к меньшему в окружающей среде. В пятой главе второй части диссертации выведено уравнение для нелинейных распространяющихся волн. С помощью численного решения этого уравнения показано, что нелинейность может существенно повысить эффективность

резонансного затухания и, следовательно, уменьшить расстояние, на котором затухает волна.

В третьей части диссертации рассматривается резонансное затухание стоячих волн однородной магнитной трубки с плотностью, не меняющейся в продольном направлении. Получено выражение для декремента, важным свойством которого является то, что он пропорционален отношению толщины переходного слоя, в котором плотность изменяется от величины внутри трубки до величины снаружи, к радиусу трубки. На основе полученного результата предложен метод определения внутренней структуры корональных петель на основе наблюдаемого затухания изгибных колебаний. Показано, что в корональной петле, изгибные колебания которой наблюдались на космическом аппарате TRACE 14 июля 1998 года, отношение толщины переходного слоя к радиусу поперечного сечения петли составляло приблизительно 0.23. Предложенный метод оценки толщины переходной области использовался впоследствии многими другими авторами. Указанные выше результаты обобщены М.С. Рудерманом на случай, когда плотность плазмы изменяется вдоль петли. Показано, что в случае, когда отношение плотности в переходном слое к плотности внутри петли зависит только от радиальной координаты, а отношение плотностей вне и внутри петли постоянно (случай однородной стратификации), отношение времени затухания к периоду колебаний такое же, как и в случае однородной петли. Полученный результат позволяет распространить метод определения внутренней структуры петли по наблюдаемому затуханию её изгибных колебаний на петли с плотностью, изменяющейся вдоль петли.

Исследование резонансного затухания изгибных колебаний продолжено в десятой, одиннадцатой и двенадцатой главах третьей части диссертации. Наиболее интересные результаты получены в одиннадцатой главе, где исследовано резонансное затухание колебаний двух охлаждающихся корональных петель в предположении, что характерное время охлаждения много больше периода колебаний. Здесь выведено выражение для адиабатического инварианта, который сохраняется в отсутствие резонансного затухания. Сохранение адиабатического инварианта приводит к увеличению амплитуды изгибных колебаний. В том случае, когда имеется резонансное затухание, возможен баланс между увеличением амплитуды вследствие охлаждения и уменьшением вследствие резонансного затухания. В результате возможно существование слабо затухающих колебаний. Такие колебания также иногда наблюдаются.

Некоторым "минусом" диссертации является ее "сжатость", связанная с желанием автора включить описание всех результатов в текст. Кроме того проведенный анализ изгибных колебаний и волн ограничивается рассмотрением лишь так называемых

захваченных мод. Из рассмотрения исключены волны, излучаемые колеблющейся трубкой во внешнюю среду. Энергетические потери на излучение таких волн, в принципе, могут превышать потери на резонансное поглощение, рассмотренное в диссертации. Следует отметить также, что большинство задач (за исключением раздела 3.4) было исследовано без учета наличия электрических токов в корональных магнитных петлях. При достаточно больших значениях электрических токов через поперечное сечение трубки ( до  $10^{11} \div 10^{12} A$  во вспышечно активных петлях) возникающая азимутальная компонента магнитного поля может вносить заметные коррективы в полученные результаты. Здесь следовало бы привести соответствующие критерии. Из конкретных замечаний необходимо также отметить следующие:

- Уравнение, описывающее распространение нелинейных изгибных волн, которое выведено в пятой главе второй части диссертации, получено в предположении, что плазма несжимаема, а магнитное поле отсутствует вне трубки. Сделанные предположения вполне оправданы в случае волн, распространяющихся в фотосфере. Однако использование этого уравнения для описания волн в короне требует дополнительных обоснований.

- Уравнения, описывающие вертикальные и горизонтальные колебания, которые выведены в третьей главе третьей части, решены только для петель, высота которых много меньше расстояния между основаниями. Это предположение плохо согласуется с наблюдениями.

- Исследование резонансного затухания изгибных колебаний двух параллельных магнитных трубок, представленное в десятой главе третьей части, проведено только в частном случае идентичных трубок. Представляется желательным провести его в общем случае.

- В одиннадцатой главе третьей части исследовано резонансное затухание остывающих петель в предположении, что время затухания много больше периода колебаний. В результате оказывается, что увеличение амплитуды колебаний вследствие охлаждения может компенсировать уменьшение амплитуды за счёт резонансного затухания лишь в случае, когда это затухание очень слабое. Это, в свою очередь, возможно только когда отношение толщины переходного слоя, в котором изменяется плотность, к радиусу петли очень мало, порядка 0.01 – 0.02. Поскольку типичное значение этого параметра равно 0.2 – 0.3, это означает, что охлаждение петли с характерным временем, много большим периода, не может объяснить существование незатухающих колебаний.

Отмеченные недостатки не снижают общее, весьма положительное, впечатление от диссертации М.С. Рудермана: она, вне всякого сомнения, является докторской. В ней выполнено комплексное теоретическое исследование волн и колебаний в магнитных

трубках в солнечной атмосфере. Полученные результаты обладают новизной и вносят существенный вклад в корональную сейсмологию и в понимание физических процессов в солнечной атмосфере.

Диссертация написана ясно и четко. Автореферат правильно отражает ее содержание. Все результаты опубликованы в ведущих международных журналах. Автор неоднократно делал доклады на международных конференциях. Он хорошо известен специалистам в области солнечной физики. Результаты диссертации могут быть использованы в научных институтах и университетах, в которых проводятся исследования в области солнечной физики, в частности в Институте Космических Исследований РАН, Институте Прикладной Физики РАН, Институте Проблем Механики РАН им.А.Ю. Ишлинского, Институте Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения Радиоволн, МГУ им М.В. Ломоносова и др.

Диссертация обсуждалась на семинаре Отдела астрофизики и физики космической плазмы ИПФ РАН.

Диссертация М.С. Рудермана удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Михаил Соломонович Рудерман, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.03.03 – физика Солнца и 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы


Отзыв составил:

Зав. сектором Физики плазменных процессов в атмосферах Солнца и планет ИПФ РАН  
д.ф.-м.н. (специальность 01.03.03), профессор Зайцев В.В.,

Федеральный научный центр Институт прикладной физики РАН, 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46, Тел.: +7 831- 416-06-59,

e-mail: [za130@appl.sci-nnov.ru](mailto:za130@appl.sci-nnov.ru)

д.ф.-м.н., профессор



Зайцев В.В.

Отзыв утвержден на семинаре Отдела астрофизики и физики космической плазмы ИПФ РАН.

Руководитель семинара член-корреспондент РАН



Кочаровский В.В.