

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Кауфман Анастасии Сергеевны
«Диагностика атмосферы солнечных пятен по наблюдениям
трехминутных колебаний», представленную на соискание ученой
степени кандидата
физико-математических наук
по специальности 01.03.03 – физика Солнца

1. Актуальность

Исследования, связанные с изучением МГД колебаний и волн в атмосфере Солнца, сейчас переживают второе рождение. В значительной мере это объясняется созданием более совершенных наблюдательных инструментов, в первую очередь, космического базирования, а также разработкой новых методов диагностики плазмы и магнитных полей. Особенно важным представляется изучение свойств солнечных пятен, в которых концентрируется магнитное поле, ответственное, как известно, за различные проявления солнечной активности. Необходимость таких исследований следует также из того, что до сих пор остается открытым вопрос о природе нагрева верхней атмосферы Солнца - имеющиеся данные не позволяют однозначно отождествить источник нагрева солнечной хромосферы и короны.

Изучение колебательных и волновых процессов сопряжено с трудностями как вследствие их проявления на малых пространственных и временных масштабах, так и ввиду зашумленности анализируемого сигнала. С учетом неоднородности атмосферы Солнца это предполагает необходимость построения сложных математических моделей. При этом чрезвычайно полезными могут оказаться высококачественные изображения магнитных образований в различных линиях, что позволяет изучать динамику плазмы и магнитных полей на различных высотах. Все это требует привлечение новых современных численных методов исследования, которым и уделяется значительное внимание в диссертации.

В свете сказанного выше актуальность диссертационной работы Кауфман Анастасии Сергеевны, посвященной изучению трехминутных колебаний в области тени солнечных пятен, сомнений не вызывает.

2. Новизна исследования и полученных результатов

Кратко сформулируем основные результаты работы, которые были получены впервые и представляются наиболее значимыми.

- На основе методов МГД сейсмологии и результатов спутниковых наблюдений на AIA/SDO получены оценки высот формирования ультрафиолетовых линий в фотосфере/короне Солнца.
- Разработан диагностический метод смещений и задержек, позволяющий оценивать температуру и структуру атмосферы в области солнечных пятен, исходя из анализа магнитного поля и трехминутных колебаний на двух уровнях солнечной атмосферы без привлечения дополнительной информации о скорости распространения волн и высотах формирования излучения.
- Получены указания в пользу модели атмосферы пятна Фонтенлы и др. (2009), согласно которой резкий рост температуры плазмы начинается с небольших (около 1000 км) высот над уровнем фотосферы.

3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного положения, выводов и заключений соискателя, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов математического анализа и достаточным пониманием физической сущности рассматриваемых явлений. Все приводимые результаты сопровождаются строгими доказательствами и необходимыми разъяснениями. Их достоверность подтверждается наблюдениями и применением современных численных методов. Основные положения, выносимые на защиту, докладывались на конференциях и семинарах, опубликованы в открытой печати.

4. Соответствие работы требованиям

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям (пункты 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней»).

Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения и списка литературы, включающего 86 наименований. Полный объем составляет 96 страниц, содержит 22 рисунка и 4 таблицы.

Во Введении приводится обзор литературы, обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, кратко изложены содержание и основные положения диссертации с указанием их научной новизны и практической значимости.

Глава 1 посвящена описанию методов анализа медленных МГД волн в области солнечных пятен, где значения плазменного параметра бета, начиная с фотосферы, значительно меньше единицы. Особое внимание уделено методам выделения колебаний, а также диагностике геометрии магнитного поля и скорости звука между различными уровнями атмосферы солнечного пятна. Подчеркивается необходимость учета искажений, связанных с неполной пространственной совмещенностью изображений и проекционными эффектами, обусловленными отклонением распространения волн относительно луча зрения. Акцентируется внимание на необходимости задания температуры формирования спектральных линий, что в сочетании с измеренными временными задержками излучения на разных длинах волн позволяет находить высоты формирования соответствующих источников, наблюдаемых в каналах SDO/AIA.

Описывается разработанный при участии автора новый метод *смещений и задержек*, следующий из анализа многоуровневых наблюдений трехминутных колебаний, который позволяет оценивать фазовую скорость волн и высоту формирования ультрафиолетовых линий. Полученная таким образом информация о высотной структуре атмосферы может быть использована для диагностики моделей атмосфер над солнечными пятнами.

Во второй главе проанализированы наблюдения трех активных областей в ультрафиолетовом диапазоне с помощью разработанных методов. Анализ данных методом задержек позволил оценить высоту формирования линий. Полученный порядок в целом соответствует представлениям о росте температуры плазмы с высотой за исключением холодного канала 193 А и холодного канала 171 А. Это противоречие объясняется как влиянием петельных структур, так и малыми значениями задержек, что может приводить к большим относительным ошибкам. Найденные оценки высот формирования излучения находятся в согласии с моделью атмосферы солнечного пятна Фонтенлы и др. (2009). Это позволяет

естественным образом объяснить завышенные значения скорости звука.

Метод *смещений и задержек* для линий 304 и 1600 Å позволил оценить расстояние между температурным минимумом и переходной областью, которое составило 500-800 км. Полученные результаты предполагают наличие протяженного температурного минимума до высоты около 1000 км, где происходит резкий скачок температуры от 3500 К до корональных значений.

В *третьей* главе исследована возможность использования медленных МГД волн для диагностики поперечного распределения температуры в корональных структурах над солнечным пятном. С помощью кода *Lare 2D* проведено численное моделирование распространения этих мод, построены синтетические ультрафиолетовые изображения с помощью программного кода *FoMo*, моделирующего ультрафиолетовое излучение. Рассмотрены две модели веерообразной структуры: горячее ядро – холодная периферия и наоборот. Это позволило обнаружить задержку между появлением медленной МГД волны в разных каналах крайнего ультрафиолетового излучения. По мнению автора, обнаруженное явление можно объяснить как зависимость фазовой скорости от температуры, так и малой оптической толщиной источников, проецированных на картинную плоскость.

5. Замечания по диссертации

Среди замечаний хотелось бы отметить следующие.

При проведении моделирования автор исходил из магнитограмм *NMI/SDO*, которые из-за эффекта насыщения сигнала нельзя считать надежными для магнитных полей с напряженностью более 2–2.5 кГс. Вследствие этого к оценкам, полученным, по крайней мере, на уровне фотосферы следует относиться с осторожностью. Правомерность данного замечания еще более усиливается, если принять во внимание, что медленные МГД моды ведут себя подобно звуковым только в том случае, когда плазменный параметр бета гораздо меньше единицы. В частности, для фотосферы это предполагает, что напряженность магнитного поля должна превышать, по меньшей мере, 2–3 кГс. В работе также мало уделяется внимание проблеме отождествления мод колебаний и нелинейным эффектам. Не следует исключать, что большую роль в атмосферах пятен могут играть быстрые МГД моды. В диссертации

не обсуждается отражение волн и возможность генерации эванесцентных колебаний. При определении скорости звука (уравнение 1.5) было бы также полезно учесть частичную ионизацию и влияние атомов гелия, что может давать заметные погрешности при проведении диагностики. В случае полной ионизации плазмы под корнем в уравнении 1.5 должна стоять двойка (давление создают не только ионы, но и электроны). В работе иногда встречаются повторения. Например, формула для скорости звука встречается трижды (см. уравнения 1.2, 1.4, 1.12). Текст статьи содержит опечатки и неудачные фразы. Так, например, достаточно трудно понять, что имел в виду автор, прибегнув к следующему определению (стр.72): «Синтетические изображения – это то, как бы наблюдатель видел распространение колебаний если бы он наблюдал плазму из нашей численной модели в линиях КУФ диапазона». Иногда встречаются жаргонные выражения (см., например, на стр.42 и 78 «распространение 3-мин колебаний»). Обращает внимание и небрежно оформленный Список литературы.

Однако сделанные замечания и отмеченные недостатки ни в коей мере не умаляют достоинств диссертационной работы А.С. Кауфман ввиду важности и сложности затронутых проблем. Соискатель прекрасно владеет прикладными методами исследования и умело ими пользуется.

Вывод

Оценивая работу в целом, следует отметить ее высокий теоретический уровень, а также актуальность и перспективность проведенных исследований. Соискатель разработал и адаптировал комплекс программ для исследования волновых явлений в тонкой пучково-плазменной системе. Автору удалось получить новые, интересные результаты, которые вносят определенный вклад в понимание природы колебаний в области солнечных пятен и расширяют диагностические возможности МГД сейсмологии, что может иметь важное прикладное значение.

Автореферат отражает в полной мере содержание работы. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня ВАК, включенных в библиографическую базу данных Web of Science и Scopus, 4 – в сборниках трудов конференций.

Считаю, что диссертация Кауфман Анастасии Сергеевны «Диагностика атмосферы солнечных пятен по наблюдениям трехминутных колебаний» является законченной работой,

выполнена на высоком научном уровне и отвечает всем требованиям ВАК при Минобрнауки России согласно критериям п.9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а соискатель заслуживает присвоения научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – физика Солнца.

10.01.2020

Ведущий научный сотрудник
отдела физики Солнца и Солнечной
системы КрАО РАН,
доктор физ.-мат. наук

Ю.Т. Цап

Телефон: +79780204196
Email: yur@craocrimea.ru

Подпись Ю.Т. Цап заверяю
Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Крымская астрофизическая обсерватория
Российской академии наук» (ФГБУН "КрАО РАН")



А.Н. Ростопчина-Шаховская