

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию Анастасии Сергеевны Кауфман
«ДИАГНОСТИКА АТМОСФЕРЫ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
ТРЕХМИНУТНЫХ КОЛЕБАНИЙ»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.03 - физика Солнца

Диссертация А.С. Кауфман представляет собой актуальное и оригинальное экспериментально-теоретическое исследование атмосферы над солнечными пятнами посредством анализа трехминутных колебаний с использованием новых методов собственной разработки. Работа выполнена под руководством к.ф.-м.н. С.А. Анфиногенова в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Орден Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Актуальность работы бесспорна. Она определяется следующими факторами. Солнечные пятна систематически изучаются с начала XVII века, со времени разработки первых телескопов. Пятна - одни из наиболее важных и интересных объектов на поверхности Солнца, указывающие на места выхода сильных магнитных полей из солнечных глубин. Тем не менее, до сих пор нет общепринятой количественной модели пятен. Существующие модели серьезно отличаются друг от друга. Без надежной модели, широко апробированной различными методами, крайне сложно добиться понимания процессов, происходящих в солнечной атмосфере над пятнами. В частности, это затрудняет изучение процессов нагрева солнечной хромосферы и короны, а также различных явлений солнечной активности, таких как вспышки и корональные выбросы массы (КВМ), происходящих в окрестности пятен. Эти явления оказывают существенное влияние на космическую погоду, играющую возрастающую роль в жизнедеятельности человека. Актуальность изучения атмосферы солнечных пятен также определяется недавним прогрессом в исследовании мощных вспышек на солнцеподобных звездах, достигнутом с помощью наблюдений космической обсерватории Kepler. Без глубокого понимания детальной структуры атмосферы над солнечными пятнами сложно рассчитывать и на понимание процессов, происходящих в окрестности звездных пятен.

Существует несколько способов исследования атмосферы солнечных пятен. Часть методов основана на диагностике спектров излучения, испускаемого различными слоями атмосферы на различных длинах волн. Другие методы основаны на исследовании свойств магнитогидродинамических (МГД) колебаний в солнечной атмосфере – методы МГД-сейсмологии. МГД-сейсмология особенно активно развивается на протяжении последних 20 лет и на ее основе получено множество результатов по изучению различных объектов в солнечной атмосфере. В тени пятен всегда присутствуют так называемые трехминутные колебания, представляющие собой проявления магнитоакустогравитационных (МАГ) волн. Их анализ позволяет получать информацию о физических параметрах среды распространения. Но для этого нужно иметь регулярные ряды многоуровневых наблюдений. Немаловажным дополнительным аспектом, определяющим актуальность работы, является наличие в свободном доступе огромного объема (несколько петабайт) наблюдательного материала, накопленного за последние 10 лет в рамках космического проекта “Обсерватория солнечной динамики” (SDO). Эти данные – кладезь информации о солнечной атмосфере. Необходимо подобрать ключи, чтобы открыть этот кладезь и извлечь необходимую информацию. Такими ключами являются новые, оригинальные методы обработки и анализа данных, разработанные в диссертации (см. ниже).

Во Введении диссертации дано обоснование актуальности выбранной темы, четко сформулирована цель и поставлены задачи, которые необходимо решить для достижения цели, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость работы,

сформулированы выносимые на защиту положения, приведены доводы в пользу достоверности полученных результатов, указаны способы апробации результатов, перечислены публикации по теме диссертации, отмечен личный вклад автора, приведена структура и объем диссертации, а также ее краткое содержание. Таким образом, Введение содержит всю необходимую информацию.

В первой главе дан обзор основных методов анализа наблюдений колебаний на различных уровнях солнечной атмосферы над пятнами. Особое внимание уделено методам МГД-сейсмологии, основанным на изучении частоты отсечки МАГ волн и на определении задержек трехминутных колебаний на различных уровнях солнечной атмосферы. Отмечено, что в ряде недавних работ, использующих наблюдения на нескольких уровнях, получены оценки скоростей распространения возмущений, превышающих ожидаемые фазовые скорости МАГ и звуковых волн. Высказано вполне естественное предположение, что это могло быть связано с неточностью определения высот рассматриваемых уровней. Целесообразно подчеркнута необходимость разработки новых, более точных методов оценки высот без использования моделей солнечной атмосферы, в частности, с привлечением МГД-сейсмологии.

После этого представлено описание двух новых, оригинальных методов, разработанных непосредственно автором диссертации и основанных на измерении задержек, наблюдаемых в разных каналах инструмента AIA/SDO: 1) метод задержек и 2) метод задержек и смещений. Первый метод более простой. Он опирается на ряд предположений. Во-первых, что трехминутные колебания распространяются в тени пятна вертикально снизу вверх со звуковой скоростью. Во-вторых, для определения скорости звука на разных слоях используются табличные значения температуры формирования излучения в каналах AIA/SDO. Однако эти значения получены из модели солнечной атмосферы. Следовательно, результаты применения метода модельно зависимы. Они, по сути, позволяют лишь оценить относительные высоты формирования слоев излучения, детектируемого в различных канал AIA/SDO, в приближении использованной модели. Автор диссертации прекрасно понимает этот недостаток. Второй метод более совершенен, он позволяет оценить расстояние, среднюю фазовую скорость медленной магнитозвуковой (ММЗ) волны, среднюю скорость звука и температуру плазмы между излучающими слоями над пятном без привлечения модели атмосферы. Таким образом, он может использоваться для проверки моделей атмосферы над пятном. Однако и этот метод не является полностью самодостаточным. Он требует знания угла наклона магнитного поля между излучающими слоями. Поскольку в хромосфере, переходном слое и короне магнитное поле пока надежно и рутинно не измеряется, приходится использовать фотосферные векторные магнитограммы и методы магнитной экстраполяции. Это не значит, что разработанный метод сложноприменим. В настоящее время методы экстраполяции уже достаточно развиты. Для этого могут использоваться магнитограммы прибора HMI/SDO, получаемые почти одновременно с изображениями AIA/SDO.

Собственно, это и сделано во второй главе, в которой первый и второй метод применены к наблюдательным данным SDO. Сначала с помощью метода задержек выполнена оценка высот уровней излучения в каналах AIA/SDO 1700, 1600, 304, 171 и 193 Å для трех активных областей NOAA 11131, 11582 и 11711. После этого к наблюдательным данным применен второй разработанный метод задержек и смещений. С его помощью для тех же активных областей были вычислены расстояние между температурным минимумом (1600 Å) и переходной областью (304 Å) и фазовая скорость медленной МАГ волны, сделаны оценки усредненной скорости звука и температуры плазмы в тени пятна. Основным результатом главы 2 является то, что полученные оценки высот уровней излучения предполагают отсутствие хромосферы как протяженной зоны (~1000 км) между температурным минимумом и переходной областью в тени пятен. Это новый и важный результат. Он показывает, что некоторые известные модели могут неадекватно описывать высотную структуру тени солнечных пятен и требуют уточнения.

Более того, этот результат объясняет, почему в некоторых работах были получены скорости МГД волн, существенно превышающие оценки скорости звука. Это могло быть связано с тем, что использовались модельные значения высот формирования излучения, рассчитанные в предположении наличия протяженной хромосферы над тенью пятна, которой на самом деле может и не быть. Тут важно отметить, что аналогичный результат был получен в работе (Stupishin et al., Solar Physics, 293, 13, 2018) на основе совершенно иного подхода - анализа и моделирования наблюдений в микроволновом диапазоне с помощью РАТАН-600. Это весомый довод в пользу достоверности обсуждаемого результата.

Третья глава посвящена сейсмологической диагностике поперечного распределения температуры в корональных веерообразных структурах, связанных с солнечными пятнами. Здесь автор диссертации продемонстрировал умение использовать коды численного МГД-моделирования Lare2D и прямого моделирования КУФ излучения FoMo, широко используемые в области физики Солнца в настоящее время. С использованием этих кодов было выполнено моделирование распространения ММЗ волн в веерообразных структурах над пятнами и синтезированы искусственные изображения в каналах AIA/SDO 171 и 193 Å. Рассмотрены две модели веерообразных структур: 1) с более горячим центром и холодной периферией и 2) с более холодным центром и горячей периферией. На основе анализа серий синтетических изображений получен интересный результат. Для первой модели фазовая задержка между сигналом в канале 193 Å относительно канала 171 Å увеличивается с удалением от центра веерообразной структуры, а для второй модели ситуация обратная. Далее это характерное свойство использовано для диагностики поперечного распределения температуры в веерообразных структурах в двух активных областях NOAA 11582 и 11711. В результате анализа данных AIA/SDO в каналах 171 и 193 Å для обеих областей установлен рост задержки с расстоянием, и на основе этого сделан вывод, что исследованные структуры содержат более горячую сердцевину и относительно более холодную периферию. Это новый результат. Я не встречал аналогичных результатов в литературе. Этот результат ждет проверки в будущем. Тем не менее, важно подчеркнуть, что этот результат получен оригинальным методом, в основе которого лежит комплексный подход: а) численное МГД моделирование, б) прямое моделирование излучения в каналах КУФ излучения инструмента AIA/SDO, в) применение сейсмологических методов к наблюдательным данным. Использование такого подхода – передний край исследований в физике Солнца. Отрадно, что в России есть молодые исследователи, способные работать на таком высоком уровне.

Диссертация, в целом, хорошо оформлена, написана простым, ясным языком, четко структурирована.

Тем не менее, к качеству оформления есть ряд небольших замечаний:

1) Дублируется определение частоты отсечки МАГ волн, выражения (1.2) на стр. 38 и (1.4) на стр. 44;

2) Не приведена цветовая шкала на Рис.1.5 (стр. 47), вследствие чего сложно понять числовые значения смещений волн;

3) На стр. 76 дана ссылка на рис.3.5 вместо 3.4;

4) Список литературы составлен не единообразно. В части ссылок сначала идут авторы, затем название публикации. Но есть ряд ссылок с обратной последовательностью;

5) В диссертации довольно много (мною замечено 67) опечаток, грамматических и пунктуационных ошибок.

Все положения, выносимые на защиту, получены в ходе оригинального исследования автора. Они строго обоснованы, являются новыми и имеют существенную научную значимость. Результаты будут использоваться в ГАИШ МГУ, ИЗМИРАН, ИКИ РАН, ФИАН, ГАО РАН, ИСЗФ СО РАН, САО РАН и других научных учреждениях, где ведутся работы по физике Солнца.

Все положения, выносимые на защиту, опубликованы в 2 статьях в ведущих астрономических рецензируемых изданиях (“Астрономический журнал” и “Solar Physics”) из списка ВАК, а также в сборниках трудов 4 конференций и научных школ, неоднократно докладывались на российских и международных тематических конференциях и семинарах.

По существу работы имеются следующие замечания:

1) К методу задержек. На стр. 45 диссертации указано, что “Для оценки скорости распространения волны (см. уравнение (1.5)) использовались температуры формирования излучения, опубликованные на официальном сайте SDO/AIA <http://aia.lmsal.com/public/instrument.htm>”. Однако температура между слоями не постоянна, она может меняться высотой. Это особенно актуально для переходного слоя. Не очевидно, какая конкретно бралась температура для оценки скорости звука между слоями – нижнего слоя, верхнего слоя или средняя. Это стоило бы указать четко.

2) Результаты оценки расстояния между излучающими слоями и скорости распространения волны зависят от угла между вектором магнитной индукции и лучом зрения. В работе брался расчет поля для высоты $h_1=500$ км (стр. 48). Однако высота h_1 довольно условна. Реальная высота формирования излучения, детектируемого в канале AIA/SDO 1600 Å, могла отличаться от h_1 . Стоило бы исследовать вопрос влияния выбора высоты h_1 на результаты. Кроме того, в работе указано (стр. 48), что “трехминутные колебания являются медленными магнито-акустическими колебаниями и распространяются вдоль линий магнитного поля”. Во-первых, распространяющиеся колебания принято называть волнами. Во-вторых, известно, что медленные магнитоакустические волны могут распространяться и под углом к магнитному полю. Влияние этого фактора на результаты, к сожалению, не обсуждены.

3) В работе выполнена оценка скорости звука и температуры между температурным минимумом (по наблюдениям в канале AIA 1600 Å) и переходной зоной (AIA 304 Å) с учетом дисперсии и без привлечения модельной информации о высотах этих областей или скорости распространения волн, и сделан вывод о том, что результаты измерений согласуются с новейшей моделью Фонтенлы и др. (2009) для атмосферы тени пятна. Однако в статье Фонтенлы и др. (стр. 486, конец третьего абзаца сверху) отмечено, что хромосфера для моделей тени и полутени пятна все еще находится в стадии разработки и будет дополнительно улучшена и обсуждена в последующих работах. Я не нашел соответствующих опубликованных работ. Таким образом, нужно с осторожностью относиться к этим моделям и не стоит их рассматривать как завершенные. Это обстоятельство следовало бы отметить в диссертации.

4) В главе 3 выполнена сейсмологическая диагностика поперечного распределения температуры в корональных магнитных структурах только для двух из трех активных областей, исследованных ранее в главе 2, а именно NOAA 11582 (2 октября 2012 г.) и NOAA 11711 (6 апреля 2013 г.). При этом не указано, по какой причине не исследована NOAA 11131 (8 декабря 2010 г.). Это следовало бы сделать. В противном случае возникает естественный вопрос: в чем причина? Связано ли это с принципиально иной магнитной геометрией области NOAA 11131, с менее качественными данными, с противоречивыми результатами диагностики этой области или с чем-то еще?

5) Проведенный анализ веерообразных корональных структур в активных областях NOAA 11711 и 11582, показал, что наблюдаемая задержка между каналами AIA/SDO 171 и 193 Å увеличивается с расстоянием от точки основания, что согласуется с моделью с горячим ядром и холодной периферией. Это интересный результат. Однако не очевидно, почему рассматривались только такая модель и противоположная ей (с горячей периферией и холодным ядром). Стоило бы привести пояснения. Также имело бы смысл привести ссылки на работы, в которых другими способами изучалась температура плазмы в веерообразных структурах и сопоставить результаты.

Все указанные замечания не являются принципиальными при оценке работы и не снижают ценности полученных научных результатов.

Считаю, что диссертация Анастасии Сергеевны Кауфман «ДИАГНОСТИКА АТМОСФЕРЫ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ТРЕХМИНУТНЫХ КОЛЕБАНИЙ», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03. – физика Солнца, является завершённой научной работой и содержит новые важные результаты. Работа полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Кандидат физико-математических наук (специальность 01.03.03 – физика Солнца),
старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических
исследований Российской академии наук (ФГБУН ИКИ РАН)

Иван Викторович Зимовец



14 января 2020 г.

Профсоюзная ул. 84/32, Москва, Россия, 117997
ivanzim@iki.rssi.ru
8-916-517-50-20



Подпись к.ф.-м.н., с.н.с. И.В. Зимовца заверяю
Ученый секретарь ИКИ РАН
к.ф.-м.н., А.М. Садовский