

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Крымская астрофизическая обсерватория РАН»



А.Н. Ростопчина-Шаховская

### **О Т З Ы В**

официального оппонента на диссертацию

Дертеева Сергея Бадмаевича

«Акустические волны в плазме солнечной короны», представленной  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

#### **Актуальность темы**

Благодаря проведению наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением в ультрафиолетовом диапазоне, которые стали возможны с запуском орбитальной станции TRACE в апреле 1998 г., было убедительно показано, что магнитогидродинамические (МГД) колебания в короне Солнца реально существуют. Это событие ознаменовало рождение нового перспективного направления исследований, до этого существовавшего лишь на бумаге, названного корональной сейсмологией. Открылось новое окно возможностей не только для диагностики плазмы и магнитных полей, но и для изучения одного из наиболее загадочных явлений физики Солнца – высокой температуры солнечной короны.

Особое место среди различных МГД мод, возбуждаемых в корональных магнитных петлях, занимают медленные магнитозвуковые (ММЗ) или акустические моды ввиду следующих причин. Во-первых, эти моды сжимают плазму, тем самым эффективно модулируя ультрафиолетовое излучение. Во-

вторых, они распространяются вдоль магнитных силовых линий корональных петель, выступающих в роли волноводов. В-третьих, акустические моды быстро затухают, что позволяет получить важную информацию о параметрах плазмы на больших масштабах не только Солнца, но и звезд. Наконец, по крайней мере, в линейном приближении они описываются сравнительно простыми дисперсионными соотношениями.

Несмотря на то, что акустические моды хорошо изучены, тем не менее многие вопросы остаются открытыми. В частности, в последнее время вновь вырос интерес к изучению свойств функции нагрева, учет которой заметно усложнил описание акустических волн даже в линейном приближении, вместе с тем позволив выявить ряд новых интересных эффектов, связанных в значительной мере с сильной зависимостью радиационных потерь от температуры плазмы  $T$  и содержания элементов в атмосфере Солнца. Причем, поскольку акустические волны распространяются в виде цугов, а их характерные периоды могут достигать десятков минут, то возникла необходимость в детальном изучении свойств волновых пакетов, тесно связанных с механизмом генерации акустических волн. Неослабевающий интерес к ММЗ-модам в значительной мере объясняется еще и тем, что, согласно современным представлениям, в солнечной короне зарождаются наиболее мощные процессы энерговыделения, сопровождаемые солнечными вспышками и выбросами массы. Следовательно, благодаря изучению акустических волн можно получить чрезвычайно ценную и полезную информацию о природе нестационарных солнечных явлений.

В свете вышесказанного, актуальность диссертационной работы Дертеева Сергея Бадмаевича, посвященной изучению акустических волн в короне Солнца, сомнений не вызывает.

## **Научная новизна и значимость работы**

Отмечу результаты, которые были получены диссертантом впервые.

1. По данным CHIANTI 10 с помощью интерполяции в аналитическом виде построена гладкая функция излучения корональной плазмы в широком интервале температур от 0.5 до 10 МК, позволяющая получить более надежные результаты о дисперсионных особенностях акустических волн.
2. Разработана методика для описания корональных неадиабатических линейных акустических волн с заданной функцией нагрева и охлаждения, которая может быть использована для изучения волн с постоянной удельной функцией нагрева.
3. В рамках принятой модели изучены дисперсионные особенности акустических волн и определены условия неустойчивости и нераспространения, что согласуется с некоторыми наблюдениями.
4. Исходя из дисперсионных характеристик и неадиабатичности акустических волновых пакетов предложен механизм генерации распространяющихся возмущений интенсивности КУФ-излучения с двумя локальными максимумами в спектре мощности.

**Научная и практическая значимость** работы определяется дальнейшим развитием теории неадиабатических линейных акустических волн в короне Солнца, учитывающей наличие источника нагрева, а также возможностью совершенствования методов диагностики. Диссертантом было создано программное обеспечение, повышающее эффективность исследований волновых явлений в короне Солнца. Полученные результаты расширяют наши знания о нестационарных явлениях в солнечной атмосфере и могут быть

использованы для построения физических моделей процессов энерговыделения. Их рекомендуется использовать в ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН, ГАО РАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, КраО РАН, УАФО ИПА РАН и многих других отечественных и зарубежных астрономических организациях.

**Достоверность полученных результатов** зиждется на детальном анализе спутниковых наблюдений с применением современных методов их обработки, а также фундаменте, заложенным основоположниками калмыцкой школы солнечной физики. Она подтверждена признанием при обсуждении на семинарах, всероссийских и международных конференциях; применением современных математических моделей, апробированных алгоритмов и методов математических расчетов, а также сопоставлением полученных теоретических оценок с наблюдательными данными. Публикациями в рецензируемых журналах, включая периодические издания с квартилем Q2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, высока и не вызывает сомнений.

### **Личный вклад автора**

Участие в постановке задач, аналитические расчеты и численные эксперименты. Разработка алгоритмов на основе прикладных математических программ. Вывод и численный анализ дисперсионного уравнения акустических волн выполнены автором самостоятельно. Подготовка публикаций и докладов.

### **Замечания по диссертационной работе**

Существенным недостатком работы является пренебрежение неоднородностью плазмы и магнитных полей. Действительно, характерная длина линейной акустической волны  $\lambda \sim c_s P \sim 30\,000$  км, где мы приняли скорость звука  $c_s = 150$  км/с и период  $P = 200$  с. Между тем характерная шкала

высот  $S$  при  $T = 1$  МК составляет около 50000 км. Поскольку длина волны  $\lambda$  сопоставима с  $S$ , то пренебрежение неоднородностью плазмы и соответственно действием силы тяжести может приводить к заметным погрешностям.

На стр.46 сказано, что «постоянная функция нагрева  $H$  это распространенный подход при решении подобных задач, поскольку определение причин нагрева и, следовательно, вида функции нагрева затруднительно. Заметим, что в данной постановке (см. уравнение 1.5) имеется в виду приток энергии, приходящийся на единицу объема. Более естественным было бы использование постоянного притока энергии на единицу массы». Вновь на стр. 57 автор отмечает, что «мы рассматриваем удельный нагрев следующего вида  $H = \rho\Lambda$ , т.е. подразумевается приток тепла в единицу массы. На наш взгляд, такой подход более оправдан в сравнении с традиционным, где считается постоянным приток тепла в единицу объема, то есть  $H = \rho^2\Lambda$ ». Между тем приведенное выше утверждение требует более убедительного обоснования. Про сути, диссертант считает, что нагрев единицы объема плазмы пропорционален ее плотности  $\rho$ , поэтому функция нагрева и потерь  $L = \rho h - \rho^2\Lambda$ . Размерностные соображения, как мне кажется, здесь играют вторичную роль. Было бы также полезно обсудить, хотя бы качественно, влияние различных функциональных зависимостей нагрева на полученные результаты.

В диссертации следовало бы уделить больше внимания проблеме модуляции излучения и фазовым соотношениям между возмущенной скоростью и интенсивностью акустических мод, что могло бы оказаться полезным для проведения диагностики плазмы.

Диссертант оставил без внимания вопрос о вкладе акустических волн в нагрев корональной плазмы, между тем механизм волнового нагрева корональной плазмы все еще остается одним из наиболее популярных.

В тексте диссертации встречаются опечатки. Например, на стр.46 «берется температура теплых корональных петель  $T = 1$  МК и плотность порядка  $10^{12} \text{ кг м}^{-3}$ , соответствующая концентрации частиц  $10^6 \text{ см}^{-3}$ ».

Вместе с тем отмеченные выше замечания ни в коей мере не умоляют высокий научный уровень и значимость полученных автором результатов, а наиболее существенные из них могут быть им учтены в дальнейших публикациях.

### **Заключение**

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 9 - в работах, размещенных в рецензируемых журналах, 4 - в журналах из перечня ВАК, 6 - в журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 3 – в журналах квартиля Q2.

Опубликованные труды в полной мере отражают содержание диссертации. Полученные результаты имеют важное значение для дальнейшего развития теории неадиабатических линейных акустических волн в короне Солнца, а также методов диагностики плазмы и магнитных полей корональных структур. Работа является законченным исследованием и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Материал изложен ясно и грамотно. Продуманный научный стиль изложения свидетельствует о высоком творческом потенциале диссертанта. По каждой главе имеются выводы. Автореферат, в котором представлены основные этапы и результаты исследования, соответствует содержанию работы.

Диссертация представляет собой заверченный научно-исследовательский труд, выполненный на актуальную тему. Она полностью соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней» (пункты 9-14). Диссертационная работа Дертеева Сергей Бадмаевича на тему «Акустические волны в плазме солнечной короны» отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Дертеев Сергей Бадмаевич,

заслуживает присуждения ему степени ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник Отдела физики Солнца и Солнечной системы  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская  
астрофизическая обсерватория РАН»



Ю.Т. Цап

21.09.2026

Подпись заверяю

Начальник ОК



А.С. Семенова



ФГБУН «КраО РАН»

пгт. Научный

Бахчисарайский р-н.

Республика Крым, 298409

Телефон: +7-(36554)-71161

E-mail: crao@inbox.ru