

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
А.А. ФЕДЯНИН



«сентябрь» 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

*(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу **ДЕРТЕЕВА Сергея Бадмаевича** на тему «**Акустические волны в плазме солнечной короны**» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1. Физика космоса, астрономия»*

Диссертационная работа *Дертеева Сергея Бадмаевича* «Акустические волны в плазме солнечной короны» состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Объем диссертации составляет 154 страницы. Имеется 42 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований.

Диссертационная работа посвящена изучению волновых процессов в солнечной атмосфере. Автором предложен новый подход к интерпретации наблюдаемых «двухпериодических» волн сжатия в солнечной короне. На основе разработанной модели даются оценки некоторых характеристик плазмы, недоступных к определению прямыми наблюдениями.

Основное содержание диссертационной работы

Во **введении** приведено общее описание содержания диссертации, описаны актуальность темы, новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы ее цели и основные задачи, перечислены основные результаты, выносимые на защиту.

Глава 1 имеет обзорный характер. В ней приведены необходимые сведения по теме исследования, обозначены актуальные вопросы и задачи. Представлены опубликованные разными авторами результаты наблюдений квазипериодических колебаний интенсивности излучения в различных структурах солнечной короны, интерпретируемых как распространение волн сжатия плазмы вдоль линий магнитного поля. Наблюдаемые скорости распространения оценены авторами ниже соответствующей скорости звука. В глобальном спектре многих рассмотренных колебаний присутствует несколько максимумов, соответствующих двум характерным периодам: около 5 мин и около 20 мин. При этом периоды не являются стабильными во времени, что показывает вейвлет-анализ. Зачастую длинный период в наблюдениях является более акцентированным и продолжительным. 5-минутные колебания ассоциируются некоторыми авторами с 5-минутными акустическими колебаниями на солнечной фотосфере, провоцирующими некоторый отклик в короне. Интерпретация 20-минутных колебаний остается открытой. Все представленные «двухпериодические» колебания сведены в общую таблицу с оценкой скоростей распространения, наблюдаемых периодов и длин затухания.

В **главе 2** дано описание выбранного автором подхода к изучению акустических волн в короне. Считается, что возмущение представляет собой медленную магнитозвуковую волну, распространяющуюся вдоль направления магнитного поля. В случае слабо неоднородных медленно меняющихся корональных структур с сильным магнитным полем описание медленной магнитозвуковой волны формально совпадает с акустическим приближением обычной звуковой волны, распространяющейся вдоль магнитного поля, как вдоль некоторого волновода без взаимодействия с его стенками. По этой причине модель возмущенной среды состоит из уравнений обычной гидродинамической среды с уравнением состояния идеального газа. Главной особенностью модели является учет теплопроводности и функций нагрева и охлаждения плазмы. Теплопроводность определена классическим выражением электронной теплопроводности, функция нагрева выбрана постоянной на единицу массы, функция объемного охлаждения интерполирована в корональном диапазоне температур из табличной функции, рассчитанной на основе атомной базы данных CHIANTI 10.

В главе 3 решается стандартная задача на малые возмущения в исследуемой модельной среде. Полученные решения исследуются в диапазоне параметров плазмы, характерных для солнечной короны. Продемонстрированы специфические особенности распространения звуковых волн в неадиабатических средах: затухание и дисперсия под действием теплопроводности и температурных особенностей функции охлаждения. Действие атомарной вязкости в качестве диффузионного механизма оценено как пренебрежимо малое. Показано, что в корональных условиях групповая скорость относительно наблюдаемого диапазона волновых чисел имеет локальный минимум, обусловленный процессом теплопереноса. Найденная особенность в поведении звуковых волн является ключевой для дальнейшей интерпретации наблюдательных данных.

В главе 4 производится интерпретация описанных в главе 1 наблюдений колебаний интенсивности в различных магнитных структурах солнечной короны на основе построенной модели распространения неадиабатических звуковых волн. Автор предполагает, что «двухпериодические» возмущения образуются в результате эволюции импульсного широкополосного возмущения в основании корональной магнитной структуры. В результате на изменение плотности плазмы и как следствие интенсивности теплового излучения воздействуют два широкополосных пакета возмущений, распространяющихся с одной групповой скоростью. Коротковолновый пакет имеет характерный период колебаний вблизи 5 мин и большую степень затухания, связанную с действием теплопроводности. Длинноволновый пакет обладает меньшим затуханием, но большей дисперсией, связанной с процессом остывания, и производит характерные периоды колебаний интенсивности в диапазоне 10-20 мин. Коротковолновый пакет (с коротким периодом колебаний) в начале распространения имеет большую интенсивность и замыкает длинноволновые колебания (с длинным периодом) на вейвлет диаграмме. Длинноволновый пик в процессе затухания коротковолнового постепенно проступает на глобальном спектре, а затем диспергирует. Модель помимо физической интерпретации позволяет оценить по наблюдениям температуру и концентрацию плазмы, пространственный масштаб исходного импульсного возмущения и длину затухания звуковых волн.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

В **приложениях** приведены табличные и графические результаты.

Актуальность выполненной работы не вызывает сомнений. Современные высокоточные наблюдения колебаний в различных структурах солнечной короны создали новое направление в исследовании Солнца и высокотемпературной космической плазмы, получившей название корональной сейсмологии. Исследования в этой области основываются на построении упрощенных, но обладающих физической ясностью, моделях корональных волн. Сопоставление подобных моделей с наблюдениями позволяет независимо оценить некоторые параметры корональной плазмы, такие как температура или концентрация, а также определить недоступные для наблюдений в корональных условиях величины, например, напряженность магнитного поля. Диссертационная работа направлена на построение такой востребованной модели «двухпериодических» волн сжатия.

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 9 - в рецензируемых журналах (3 - в журналах из перечня ВАК и 6 - в журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus, из них 3 статьи - в журналах квартиля Q2). Основные результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также научных семинарах Калмыцкого государственного университета имени Б.Б. Городовикова. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы. Все результаты, представленные в диссертации, являются **новыми**. Применяемые в диссертации методы и подходы, полученные выводы и положения, выносимые на защиту, хорошо **обоснованы**.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Новый подход к изучению акустических волн в плазме солнечной короны, включающий классическую теплопроводность, постоянный удельный нагрев и глобальную гладкую аналитическую функцию излучения, рассчитываемую интерполяцией по данным CHIANTI.

2. Области неустойчивости и нераспространения линейных акустических волн в пространстве физических параметров корональной плазмы, температуры и плотности.

3. Действие теплопроводности приводит к разделению периодов акустических волн на две области, где свойства затухания и дисперсии линейных волн принципиально различаются. Граница между ними определяется минимумом групповой скорости.

4. Свойства затухания и дисперсии акустических волн в короне создают физический эффект, заключающийся в разделении начального локализованного акустического импульса на два отдельных возмущения, характеризующихся своими максимумами в спектре.

5. Распространяющиеся возмущения интенсивности КУФ-излучения с двойным максимумом в спектре можно рассматривать как последовательности отдельных локализованных акустических возмущений, генерируемых импульсными возмущениями у нижней границы короны.

Теоретическая значимость работы состоит в построении самосогласованной модели формирования «двухпериодических» волн сжатия, наблюдаемых в различных магнитных структурах солнечной короны, а также определении областей неустойчивости и нераспространения линейных звуковых волн в пространстве физических параметров корональной плазмы.

Практическая значимость работы состоит в независимой оценке температуры и концентрации плазмы, пространственного масштаба исходного импульсного возмущения и длины затухания звуковых волн в наблюдавшихся «двухпериодических» колебаниях интенсивности излучения в солнечной короне, что расширяет диагностические возможности современной корональной сейсмологии.

Результаты исследования могут быть использованы в ряде отечественных и зарубежных учреждений (прежде всего занимающихся в том числе исследованиями Солнца), таких как ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, АКЦ ФИАН, ФИАН, ИСЗФ СО РАН, КраО РАН, ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ КалмГУ и др.

Замечания по содержанию диссертации.

Все математические процедуры, используемые автором диссертации при построении модели «двухпериодических» колебаний, выполнены корректно. Границы применимости модели соответствуют физическим условиям высокотемпературной плазмы солнечной короны. Интерпретация результатов наблюдений произведена с должной аккуратностью. Результаты опубликованы в ведущих мировых журналах по физике Солнца. Однако в тексте диссертации допущены некоторые вольности в используемых формулировках:

1. Главное замечание относится к формулировке 1 положения, выносимого на защиту. Выражение «новый подход» на мой взгляд подразумевает применение некоторого нового или не использовавшегося ранее в данной области исследований математического аппарата. Используемый автором в действительности подход является в некотором смысле классическим: гидродинамика идеального газа с учетом теплопроводности, постулируемого нагрева и объемного лучистого охлаждения. На это сам автор многократно указывает на страницах диссертации, ссылаясь на основополагающую статью Филда «Тепловая неустойчивость» 1965 года. К защите стоит представлять не «подход», а конкретную одномерную гидродинамическую модель идеального газа с электронной теплопроводностью, постоянным нагревом на единицу массы и лучистым охлаждением на основе базы данных CHIANTI 10 – простую, но достаточную для решения поставленной задачи.

2. Неудачная на мой взгляд формулировка приоритета в исследованиях на стр. 11 и стр. 80: «Действие нагрева и радиационного охлаждения на акустические волны заключается в колебаниях функции нагрева и охлаждения вблизи ее равновесного значения, то есть в образовании дисбаланса между нагревом и охлаждением. Впервые этот эффект в акустических волнах был описан в работах Колоткова и др. [60], Завершинского и др. [140]». Действие функций нагрева и охлаждения на решение задачи малых колебаний в гидродинамике в общем виде описано за полвека до указанных авторов в той же статье Филда «Тепловая неустойчивость» 1965 года. Общий случай магнитогидродинамической среды рассмотрен в не процитированной в диссертации статье Сомова, Джалилова и Штауде «Особенности энтропийных и магнитозвуковых волн в

оптически тонкой космической плазме» 2007 года. Должно быть, автором подразумевались некоторые более частные результаты Колоткова и др. и Завершинского и др.

3. На стр. 19 сказано: «В короне, где плазменная бета принимает значения порядка 10^{-2} , быстрые магнитоакустические колебания происходят практически перпендикулярно полю». В сильном магнитном поле быстрые магнитозвуковые волны распространяются изотропно. Это явление носит название магнитного звука и проявляется в том числе в образовании крупномасштабных волн в солнечной атмосфере.

4. Во Введении аббревиатура КУФ-излучение вводится без расшифровки.

5. В разделе 2.5 вычисленные коэффициенты даны как точно равные 10 и 1 соответственно. Неясно, точные это значения или приближенные, и с какой точностью для них выбирались расчетные параметры. Неясно, насколько эти параметры модельны/реалистичны.

6. В работе не указан и не обоснован выбор тех или иных использованных вейвлетов. Не указаны числовые статистические характеристики двух обнаруженных акустических возмущений – даны только описательные слова «узкий», «широкий», «острый», «хорошая локализация», «плохая локализация» и т.д.

7. В правой части рисунка 4.4 на стр. 106 в легенде перечислены моменты времени, но на графиках нет указания, каким кривым эти моменты времени соответствуют. То же замечание относится к аналогичному рисунку в автореферате на стр. 14.

8. В таблице 4.1 на стр. 108 не расшифрованы значения символов t и E . Непонятно, как именно соотносятся отдельные части рисунка 4.8 с элементами таблицы 4.1, о чем сказано на стр. 111: «Результаты моделирования показаны на рисунке 4.8 и собраны в таблицу 4.1».

9. Текст диссертации во многих местах написан небрежно в разговорном стиле, особенно это касается введения. В тексте присутствуют многочисленные опечатки, затрудняющие восприятие материала. Перечислю только наиболее существенные из них, опуская орфографические:

- на стр. 17 в 8 и 12 пунктах работ автора опечатки в DOI ссылках: «<https://doi.org/10.1007/sll>» вместо «<https://doi.org/10.1007/s11>» из-за чего ссылки оказываются нерабочими. Кроме того, в 12 пункте неверно указан

том (240 вместо 299) и лишняя «Р.» перед номером статьи. Это же замечание касается автореферата.

- на стр. 111 в фразе «в таблице 4.1 приводятся расстояния, на которых формируются два максимума» должна быть таблица 4.2;

- на стр. 116 в фразах «Объяснение содержится в рисунке 6» и «наблюдается также в таблице 3» указаны несуществующие номера рисунков и таблиц, все номера состоят из 2 чисел. Там же в фразе «Со временем второй максимум растёт (рисунок 4.4)» ошибочная ссылка на рисунок 4.5;

- в подписи к рисунку 4.12 и тексте на стр. 123 в фразах «имеющие вид небольших светлых пятен» должны быть «небольшие темные пятна»;

- другие опечатки иногда доходят до комичных, как на стр. 59: «На рисунке его график показан нерпой линией» - но не вносят фактических ошибок в текст;

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных соискателем исследовательских работ и носят рекомендательный характер.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация С.Б. Дертеева представляет собой законченное исследование модели формирования «двухпериодических» колебаний, наблюдаемых в некоторых структурах солнечной короны. Оно вносит значительный вклад в методологию корональной сейсмологии. Дает возможную физическую интерпретацию образования нескольких пиков в глобальном Фурье спектре некоторых волновых процессов в солнечной атмосфере. На основе предложенной модели произведена оценка характеристик плазмы в известных по литературным источникам наблюдениях «двухпериодических» колебаний.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих отечественных и международных рецензируемых журналах, во многих публикациях соискатель является первым автором.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Дертеева Сергея Бадмаевича «Акустические волны в плазме солнечной короны» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1. Физика космоса, астрономия».

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 19 членов Совета из 26. Результаты голосования: «за» – 19; «против» – 0; «воздержалось» – 0. Протокол № 9 от «30» сентября 2026 г.

Отзыв составил
старший научный сотрудник отдела физики Солнца ГАИШ МГУ, кандидат физико-математических наук Л.С. Леденцов. Телефон: +7 (495) 939-16-44. Адрес электронной почты: leonid.ledentsov@gmail.com.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Секретарь Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
кандидат физико-математических наук

А.А. Татарникова

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН



К.А. Постнов

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

Телефон: +7 (495) 939-10-00

Адрес электронной почты: info@org.msu.ru