

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации **Дертеева Сергея Бадмаевича**
«Акустические волны в плазме солнечной короны», представленной на
соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.1 — Физика космоса, астрономия

Актуальность темы. Диссертационная работа посвящена исследованию волновых процессов в короне Солнца. Волны служат одним из основных механизмов переноса энергии из нижних слоёв солнечной атмосферы в корону. Поскольку наблюдаемые свойства волн и колебаний зависят от характеристик среды, в которой они распространяются, волны являются естественными зондами для диагностики корональной плазмы и позволяют получать сведения, которые трудно извлечь другими способами, — например, о магнитном поле или о функции нагрева короны. Эта идея лежит в основе быстро развивающегося раздела физики Солнца — корональной сейсмологии (*coronal seismology*), нацеленной на определение физических условий в короне по наблюдаемым в ней волновым явлениям.

Диссертация сфокусирована на продольных волнах, которые наблюдаются как вариации интенсивности КУФ-излучения и обычно интерпретируются как медленные магнитоакустические волны (волны сжатия). Их фазовая скорость несёт информацию о температуре плазмы и плазменном параметре β , а время и профиль затухания, а также зависимость затухания от периода колебаний — о теплопроводности и других процессах диссипации волновой энергии, о балансе между радиационным остыванием плазмы и её нагревом механизмом, который до конца не известен.

Другим источником диагностической информации являются наблюдаемые периодичности продольных волн. Период колебаний может определяться частотой акустической отсечки в стратифицированных нижних слоях солнечной атмосферы, что приводит к появлению трёх- и пятиминутных периодичностей. Происхождение более длинных периодов (10–30 мин), которые не удаётся приписать источникам в нижней атмосфере, остаётся неясным и составляет один из нерешённых вопросов физики Солнца.

В последние годы получили развитие космические обсерватории SDO и Solar Orbiter, обеспечивающие наблюдения волновых процессов в короне с высоким пространственным и временным разрешением. В сочетании с нерешённостью вопроса о происхождении длиннопериодических КУФ-возмущений это делает актуальной разработку адекватного описания акустических волн в корональной плазме и его применение к интерпретации наблюдаемых явлений.

Научная новизна диссертации определяется постановкой задач и подходами к их решению. Впервые по данным CHIANTI 10 с помощью интерполяции получено гладкое аналитическое выражение для функции излучения корональной плазмы в широком интервале температур от 0,5 до 10 МК; ранее использовалась локальная или кусочно-непрерывная степенная аппроксимация. Предложен подход к описанию неадиабатических акустических волн, в котором функция нагрева и охлаждения строго определена, что позволило исследовать волны в широких интервалах температуры

и плотности. В пространстве физических параметров построена детальная картина поведения акустических волн: определены области неустойчивости и нераспространения, исследованы свойства дисперсии и затухания распространяющихся волн. Показано, что в определённых условиях на затухание, наряду с теплопроводностью, решающее влияние может оказывать эффект нагрева/охлаждения. Предложен механизм генерации распространяющихся возмущений интенсивности КУФ-излучения (волн сжатия) с двумя периодами в спектре, объясняющий наблюдаемые периоды.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения её результатов в исследованиях корональных осцилляций и волновых процессов в короне Солнца. Полностью аналитическая замкнутая модель распространения акустических возмущений позволяет связать наблюдаемые свойства медленных магнитоакустических волн с конкретными физическими параметрами корональной плазмы и может использоваться для диагностики короны методами корональной сейсмологии. Разработанный подход и комплекс программных средств уже применяются при выполнении госзаданий Минобрнауки РФ.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечиваются использованием современных аналитических и численных методов гидродинамики и теории волн. В работе применены строгие математические модели и апробированные численные алгоритмы, адекватные поставленным задачам; полученные теоретические выводы внутренне непротиворечивы и подтверждены сопоставлением с данными наблюдений.

Высокий уровень результатов подтверждается также их публикацией в 13 работах: 9 из них опубликованы в рецензируемых журналах, 4 — в изданиях из перечня ВАК, 6 — в журналах, индексируемых в системах Web of Science и/или Scopus, 3 — в журналах второго квартиля (Q2). Основные результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и четырёх приложений. Объём диссертации составляет 154 страницы; работа содержит 42 рисунка и 7 таблиц.

Во введении обоснованы актуальность, новизна, научная и практическая значимость, а также достоверность результатов и выводов диссертационной работы. Представлен анализ современного состояния исследований магнитогидродинимических волн в короне Солнца, на основе которого сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

В первой главе рассмотрены медленные магнитоакустические волны (волны сжатия) в солнечной короне. Проведён обзор наблюдательных данных и существующих моделей, обозначены нерешённые вопросы, включая вопрос о механизме возникновения двухпериодичности в акустических волнах и вопрос о зависимости длины затухания этих волн от частоты.

Во второй главе представлена модель неадиабатических акустических волн, включающая аналитические модели функций нагрева и радиационных потерь в корональной плазме, полученные с помощью кубических сплайнов и применимые в широком диапа-

зоне температур. Получено дисперсионное соотношение для акустических волн с учётом функций нагрева и радиационных потерь.

В третьей главе представлено численное решение дисперсионного уравнения, полученного во второй главе. Определены области нераспространения волн. Рассмотрено асимптотическое поведение акустических волн в предельных случаях больших и малых длин волн. Изучена зависимость затухания волн от периода колебаний в рамках предложенной аналитической модели. Показано, что рассматриваемая модель предсказывает наличие двух режимов для акустических волн — коротковолнового и длинноволнового, которые разделены минимумом групповой скорости. Коротковолновый режим характеризуется слабой дисперсией и сильным затуханием, а длинноволновый — наоборот. Отмечено, что положение минимума определяет основные свойства волны. Проведено сопоставление модельного времени затухания, полученного в линейном приближении, с наблюдаемыми величинами; получено хорошее согласие теории и наблюдений.

В четвёртой главе рассмотрены двухпериодические колебания. Предложен механизм возникновения двойной периодичности за счёт влияния минимума групповой скорости, который приводит к разделению входящего широкополосного импульса на два волновых пакета. Рассмотрены признаки действия предложенного механизма, которые можно обнаружить в данных с помощью вейвлет-анализа: паттерны «головастик», «бумеранг» и широкополосный спектр с двумя пиками. Выполнено моделирование дисперсионной эволюции локализованного акустического импульса. Показано, что такой импульс по мере распространения в короне распадается на два отдельных широкополосных апериодических импульса — коротковолновый и длинноволновый, которые в суммарном вейвлет-спектре проявляются в виде двухпиковой структуры. Выполнено сравнение вейвлет-спектров квазипериодических пульсаций, наблюдаемых в яркостных кривых солнечных вспышек, с теоретическими расчётами автора; показано хорошее качественное соответствие теории и наблюдений. Выдвинута гипотеза, что квазипериодические осциллирующие возмущения плотности, наблюдаемые в короне, являются результатом дисперсионной эволюции повторяющихся локализованных возмущений в нижних слоях солнечной атмосферы.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. В приложениях приведены результаты расчётов в виде таблиц и графиков.

Замечания по диссертации. Работа в целом производит благоприятное впечатление. Вместе с тем по тексту диссертации можно сделать следующие замечания.

1. **С. 63.** Пренебрежение вязкостью обосновывается тем, что «число Рейнольдса можно считать малым». Однако малое Re означает как раз преобладание вязких сил, а для пренебрежения вязкостью нужно $Re \gg 1$. По-видимому, в тексте допущена опечатка и должно быть: «можно считать большим».
2. **С. 80.** Пропущено отрицание: сказано, что «волна распространяется при $k < k_0 = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-1}$ », тогда как из написанного на с. 77–79 и рис. 3.2 следует, что волна не распространяется на больших длинах волн (малых k). Похоже, что и здесь допущена опечатка и должно быть «волна не распространяется при $k < k_0$ ».
3. **С. 93 и с. 30.** Вывод о применимости линейного приближения на с. 93, где сказано,

- что скорость плазмы «может достигать значительных значений, до 10% от звуковой скорости», но «в большинстве случаев она гораздо меньше», противоречит данным с. 30, где приведены 5,5%, 9,5% и 17% звуковой скорости и прямо указано, что для таких колебаний нужен нелинейный подход.
4. **С. 101.** Автор даёт нестандартное определение квазипериодических осцилляций: «Напомним, что под квазипериодическими осцилляциями понимается поведение временного сигнала, вейвлет-спектр которого имеет два и более ясно выраженных максимума». Два пика в глобальном вейвлет-спектре указывают скорее на множественную периодичность. Квазипериодические осцилляции вполне могут иметь всего один широкий пик в спектре. Если автор предпочитает использовать такое нестандартное определение квазипериодичности, ему следовало бы явно указать на его «рабочий» характер.
 5. **С. 114.** «мы должны предположить, что волны сжатия распространяются с дозвуковой скоростью». Вывод о дозвуковом распространении волн сжатия недостаточно обоснован. Наблюдаемая в картинной плоскости скорость систематически занижена за счёт проекционного эффекта: $v_{\text{набл}} = v_{\text{ист}} \sin \theta$. Автору следовало бы учесть влияние проекционных эффектов или хотя бы указать на их наличие.
 6. **С. 101–117 (§4.1–4.3).** Понятия, уместные для описания узкополосных возмущений (групповая скорость, период), применены к широкополосному импульсу в диспергирующей и диссипативной среде. Из-за этого в §4.3 возникло мнимое противоречие (равные v_g «волн-двойников» при их разделении с течением времени). Применение языка описания узкополосных возмущений в контексте распространения широкополосных импульсов следовало бы ограничить или явно оговорить.
 7. **С. 110–112, 124.** Автор определяет плотность плазмы и ширину импульса путём подгонки под два наблюдаемых периода. Корректность подгонки в случае, когда число свободных параметров равно числу наблюдаемых величин, вызывает сомнения и требует независимой проверки. Такая проверка в диссертации, к сожалению, не представлена.
 8. **С. 20–21, 23, 27.** В диссертации встречаются перепутанные ссылки. Например, в разных местах [54] приписана двум разным работам (Ireland и др. и «Кришна Прасад и др.»).
 9. **Оформление рисунков.** Подписи к ряду рисунков оказываются на другой странице, чем сам рисунок, а нередко разрываются и переносятся на следующую (рис. 1.4, 1.14, 2.5, 3.6, 4.6).
 10. **Опечатки.** В диссертации присутствует большое количество опечаток. Некоторые из них, к сожалению, искажают смысл. Например, на с. 46 плотность указана как $10^{12} \text{ кг м}^{-3}$ при концентрации частиц 10^6 см^{-3} ; на самом деле такой концентрации отвечает плотность порядка $10^{-15} \text{ кг м}^{-3}$, то есть значение завышено на 27 порядков. Практически по всему тексту четвёртой главы единицы измерения скоростей указаны как «км/с» при значениях в м/с, что при буквальном прочтении делает групповые скорости акустических возмущений субрелятивистскими (более 100 000 км/с).

Перечисленные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение. Диссертационная работа Дертеева Сергея Бадмаевича является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством и содержащей решение задач, имеющих значение для физики Солнца. Личный вклад автора состоит в постановке и решении всех перечисленных задач, разработке аналитической модели неадиабатических акустических волн в корональной плазме, проведении численных расчётов и сопоставлении их результатов с данными наблюдений. Полученные результаты достоверны и обладают научной новизной.

Материалы диссертации прошли широкую апробацию: они доложены на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 13 работах, в том числе в рецензируемых журналах из перечня ВАК и в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По своему содержанию диссертационная работа соответствует специальности 1.3.1 — Физика космоса, астрономия и удовлетворяет критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней (пп. 9–11), утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Таким образом, автор диссертации, Дертеев Сергей Бадмаевич, безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 — Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Ордена
Трудового Красного Знамени Института
солнечно-земной физики Сибирского
отделения Российской академии наук,
Россия, 664033, Иркутск,
ул. Лермонтова, 126А
тел.: (3952) 56-45-31
e-mail: anfinogentov@iszf.irk.ru

 / С. А. Анфиногентов/
« 18 » сентября 2026 г.

Подпись Анфиногентова С. А. удостоверяю

Учёный секретарь ИСЗФ СО РАН,
кандидат физико-математических наук



 / И. И. Салахутдинова/
« 18 » сентября 2026 г.