

ЛИНИИ Ca II В СПОКОЙНОЙ ОБЛАСТИ НА СОЛНЦЕ I. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Ca II LINES IN A QUIET REGION ON THE SUN I. DYNAMIC PROCESSES IN THE SOLAR ATMOSPHERE

И.П. Турова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, turova@iszf.irk.ru*

С.А. Григорьева

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sgrig@iszf.irk.ru*

О.А. Ожогина

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ozhog@iszf.irk.ru*

I.P. Turova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, turova@iszf.irk.ru*

S.A. Grigoryeva

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sgrig@iszf.irk.ru*

O.A. Ozhogina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ozhog@iszf.irk.ru*

Аннотация. Исследовались колебательные процессы в спокойном Солнце вне корональной дыры на разных уровнях солнечной хромосферы. Используются спектроскопические наблюдения линий ионизованного кальция (K, H и 849.8 нм), полученные на Автоматизированном солнечном телескопе (АСТ) Саянской солнечной обсерватории. Был проведен спектральный анализ временных серий для ряда параметров линий. Выполнено сравнение результатов, полученных в данной работе, с результатами нашего исследования колебательных процессов в спокойных областях, находящихся в основании корональной дыры. Показано, что мощность колебаний выше в области спокойного Солнца вне корональной дыры. При этом имеется общая для исследованных областей тенденция уменьшения мощности колебаний с высотой для всех диапазонов частот, кроме низкочастотного, в большинстве хромосферных структур. В структурах с пониженным магнитным полем наблюдается рост мощности с высотой до высот нижней хромосферы с некоторым уменьшением ее к верхней хромосфере.

Ключевые слова: хромосфера, контуры линий Ca II, колебательные процессы.

Abstract. We have studied oscillation processes in the quiet Sun outside a coronal hole at different levels of the solar chromosphere. The study was based on spectroscopic observations of ionized calcium lines (K, H, and 849.8 nm) obtained by the Sayan Solar Observatory's Automated Solar Telescope (AST). Spectral analysis of time series for some parameters of the lines has been carried out. We have compared the results of this work with the results of our study of oscillation processes in quiet regions located at the base of a coronal hole. The oscillation power was found to be higher in the region of the quiet Sun outside a coronal hole. At the same time, for the regions under study there is a common tendency for the oscillation power to decrease with height for all frequency ranges, except for the low-frequency one, in most chromospheric structures. In structures with a weak magnetic field, the power increases with height to the lower chromosphere and decreases somewhat to the upper chromosphere.

Keywords: chromosphere, Ca II line profiles, oscillation processes.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема нагрева верхней солнечной атмосферы является одним из ключевых вопросов солнечной физики. В этом контексте важную роль играет солнечная хромосфера [Athay, 1966; Goodman, 2000; Carlsson, 2006; Judge, 2009; Srivastava et al., 2021]. Она служит своего рода интерфейсом между относительно холодной фотосферой и очень горячей короной [Judge, 2010; Jess et al., 2015] и является регионом, в котором происходит значительная часть диссипативных процессов.

Процессы, происходящие в хромосфере, связаны с ее термодинамическим состоянием. Это среда, в которой отсутствует локальное термодинамическое равновесие; нарушено ионизационное равновесие; имеют место радиативные потери, в спокойной области их

скорость составляет $4 \cdot 10^6$ эрг·см⁻²·с⁻¹ (для сравнения, в короне эта величина равна $3 \cdot 10^5$ эрг·см⁻²·с⁻¹) (см. табл. 1 [Withbroe, Noyes, 1977]). Она пронизана динамическими структурами, магнитным полем и чрезвычайно стратифицирована [Judge, 2009]. Например, для 1D-модели VAL C [Vernazza et al., 1981] на интервале высот от температурного минимума до высоты ≈ 2 Мм давление меняется на четыре порядка. Хромосферные магнитные поля влияют на распространение, конверсию и диссипацию волн.

При температурном режиме, который имеет место в хромосфере, ее вещество состоит из частично ионизованной плазмы, в которой доминируют нейтралы. Так, модель VAL C [Vernazza et al., 1981] в районе температурного минимума дает степень ионизации водорода 10^{-4} , которая увеличивается в среднюю

хромосферу до величин $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} при температурах ~ 6000 К.

Присутствие нейтралов в частично ионизованной замагниченной плазме оказывает влияние на процессы, приводящие к нагреву верхней атмосферы [Piddington, 1956; Cowling, 1956; Khomenko, Collados, 2012; Martinez-Sykora et al., 2015 и ссылки там]. Реалистичный подход к моделированию процессов, происходящих в хромосфере, основывается на положениях физики плазмы. Используется представление многожидкостной (многокомпонентной) среды. В зависимости от поставленной задачи состав плазмы может быть трехкомпонентным (электроны, ионы и нейтральные атомы), двухкомпонентным (ионы и нейтралы), а также однокомпонентным (при наличии сильной связи между электронами, ионами и нейтральными атомами) (например, [Zaqarashvili et al., 2011; Khomenko, Collados, 2012; Ballester et al., 2020]). Результаты такого моделирования показывают, в частности, что наличие нейтральных атомов в слабо ионизованной плазме усиливает диссипацию МГД-волн [Khodachenko et al., 2004], а также изменяет скорость процесса пересоединения в зависимости от степени столкновительной связи между ионами и нейтралами [Zweibel, 1989; Smith, Sakai, 2008].

Наши знания о солнечной атмосфере значительно продвинулись благодаря развитию теоретической базы и прогрессу в вычислительных средствах. Однако проблема нагрева солнечной атмосферы продолжает быть актуальной.

К настоящему времени сформировались две основные теории, касающиеся механизмов нагрева верхней атмосферы (см., например, [Rajaguru et al., 2019] и ссылки там): 1) механический нагрев волнами разного типа, включая немагнитные волны, магнитные и их комбинацию; 2) диссипация магнитной энергии вследствие различных процессов в магнитном поле.

Выполнено большое количество работ, посвященных отдельным источникам нагрева хромосферы и короны (например, [Jefferies et al., 2006; Shibata et al., 2007; Kayshap et al., 2018; Leenaarts et al., 2018]). Написаны обзоры, в которых обобщены и проанализированы результаты последних лет ([Khomenko, Santamaria, 2013; Jess et al., 2015; Martinez-Sykora et al., 2015; Ballester et al., 2018; Srivastava et al., 2021] и ссылки там).

В контексте нагрева солнечной атмосферы важным является вопрос о роли МГД-волн в переносе энергии из фотосферы в хромосферу и корону. Остается много нерешенных проблем, связанных с возможностями восполнения волновыми процессами радиативных потерь в хромосфере, переходной области и короне. Например, авторы [Molnar et al., 2021] представили наблюдения и сравнение с моделью, касающиеся распространения и затухания акустических волн с частотами от 5 до 50 мГц в разных хромосферных структурах: внутренней сетке, сетке, флоккулах и полутени. Их результаты показывают, что диссипация акустической энергии в средней хромосфере не является доминирующим механизмом нагрева, тогда как во внутренней сетке верхней хромосферы вклад акустических волн может ком-

пенсировать радиативные потери. Данные [Abbasvand et al., 2020], с другой стороны, говорят о том, что в средней хромосфере спокойного Солнца радиативные потери полностью сбалансированы поступающим потоком акустической энергии в диапазоне ~ 1 – 8 мГц.

В данной работе для исследования динамических процессов мы использовали линии К CaII, H CaII и линию инфракрасного триплетта 849.8 нм, которые являются удобным инструментом для исследования солнечной атмосферы. Линии CaII образуются в широком диапазоне высот, от нижней до средней и верхней хромосферы. Так, по результатам 3D-моделирования [Vjrogen et al., 2018], ядра линий К и H образуются на высотах ≈ 1900 км и 1750 км. Для линии 849.8 нм результаты 2D-моделирования [Pietarila et al., 2006] дают среднее значение высоты ≈ 1020 км.

Цель настоящей работы — исследование колебательных процессов на разных уровнях хромосферы в спокойной области вне корональной дыры и сравнение этих результатов с результатами для спокойных областей в основании корональной дыры.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Мы наблюдали спокойную область с координатами N05W00, расположенную вне корональной дыры. Наблюдения проводились на Горизонтальном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории 12.06.2006. Два участка спектра в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах регистрировались одновременно в IV и II порядках соответственно. Применялась ПЗС-камера Princeton Instruments 2048×2048 пикселей, с пространственным размером пикселя $0''.45$. Область на Солнце, ограниченная щелью спектрографа, составляла около $200''$ (450 пикселей). Временная серия состояла из 40 кадров со скважностью 25 с. Изображение части диска Солнца, включающее наблюдаемую область, приводится на рис. 1 (данные взяты из открытого источника [<https://SolarMonitor.org>]). Черная линия, нало-

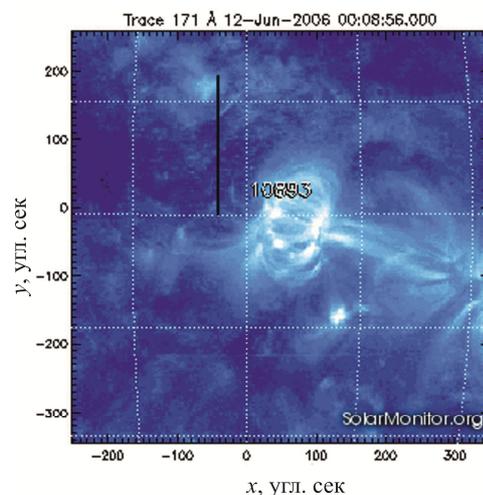


Рис. 1. Изображение части диска Солнца за 12 июня 2006 г., взятое из открытых источников. Черная полоска представляет щель спектрографа со смещением на момент начала наблюдений

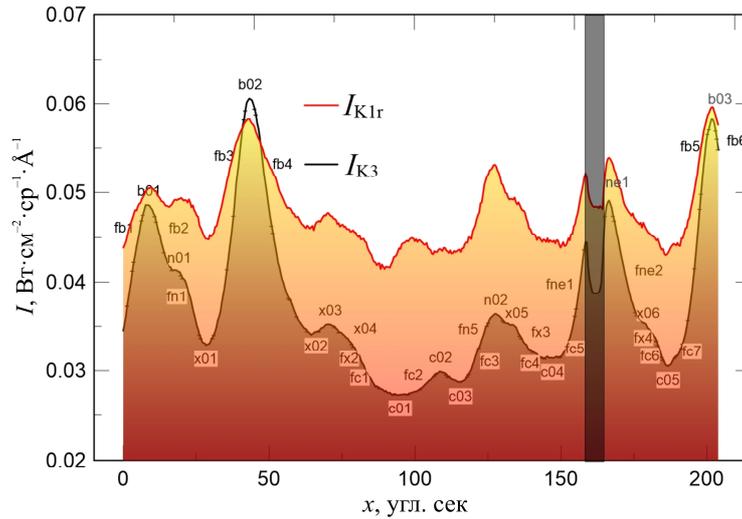


Рис. 2. Интенсивности I_{K3} (черная кривая) и I_{K1r} (красная кривая) для пространственной области N05W00 вдоль щели спектрографа, усредненные по времени наблюдения. Буквенно-численными обозначениями отмечены некоторые из выбранных хромосферных структур. Черная вертикальная полоса выделяет нить, натянутую поперек щели спектрографа

женная на изображение, показывает расположение щели спектрографа с учетом смещения на момент начала наблюдений.

Предметом исследования данной работы являются интенсивности в характерных точках контуров линий К, Н и 849.8 нм, а также смещения контуров в этих точках по длине волны.

Для обозначения линии 849.8 нм мы используем букву «X» (по аналогии с обозначением, предложенным [Shine, Linsky, 1974]).

Определены следующие количественные параметры:

- I_{K3} , I_{H3} — минимальные интенсивности в центрах линий К и Н;
- I_{K2v} , I_{K2r} , I_{H2v} , I_{H2r} — интенсивности фиолетового и красного пиков соответственно;
- I_{K1v} , I_{K1r} , I_{H1v} , I_{H1r} — минимальные интенсивности в фиолетовом и красном крыльях линий К и Н соответственно;
- I_{X0} — интенсивность в центре линии 849.8 нм;
- λ_{K3} — смещение минимума K_3 по оси длин волн относительно номинального центра линии;
- $\Delta\lambda_{K2v}$, $\Delta\lambda_{K2r}$ — смещения пиков K_{2v} и K_{2r} относительно номинального центра линии;
- $\Delta\lambda_{X0}$ — смещение минимума линии 849.8 нм по оси длин волн относительно номинального центра линии;
- $\Delta\lambda_{K1v}$, $\Delta\lambda_{K1r}$ — смещения минимумов K_{1v} и K_{1r} относительно номинального центра линии.

Как уже отмечалось ранее в наших статьях [Terlitskaya et al., 2006; Grigoryeva, et al., 2016; Теплицкая и др., 2009; Турова и др., 2020], мы выбирали хромосферные структуры по интенсивностям в центрах линий К CaII и 849.8 нм. Определение структур сделано в соответствии с этими работами:

- «п» — яркие сеточные структуры («сетка»);
- «пе» — усиленная сетка;
- «с» — темные внутрисеточные структуры («ячейка»);
- «b» — флоккул;

- «x» — участки с промежуточной яркостью, которые не относятся к перечисленным выше структурам.

Кроме приведенного выше списка, в данной статье рассмотрены также участки, значения интенсивностей которых близки интенсивностям на границах каждой из вышеперечисленных структур. По аналогии с принятыми нами обозначениями эти участки названы «fc», «fx», «fn», «fne», «fb».

На рис. 2 показаны усредненные по времени пространственные распределения I_{K3} и I_{K1r} . Буквенно-численные обозначения относятся к некоторым из выбранных структур. Ход обеих интенсивностей показывает небольшие пространственные различия в положениях структур на уровнях образования I_{K3} и I_{K1r} , которые могут быть вызваны атмосферной дисперсией. Эффекты атмосферной дисперсии исследуются в ряде статей, например [Simon, 1966; Reardon, 2006; Beck et al., 2008]. Величина атмосферной дисперсии является результатом двух процессов. Это изменение атмосферной рефракции с зенитным расстоянием, называемое пространственной дифференциальной рефракцией; изменение индекса рефракции воздуха с длиной волны, называемое спектральной дифференциальной рефракцией [Reardon, 2006]. Для того чтобы избежать математического определения положений различных пространственных элементов на разных уровнях атмосферы, мы определяли положения структур отдельно для каждого из этих уровней.

В данной работе исследовались пространственные и временные вариации параметров линий в выбранных структурах. Оценивалась мощность колебаний на разных уровнях солнечной атмосферы. Был проведен спектральный анализ параметров линий в каждой точке пространства исследуемой области. Применялся метод, аналогичный использованному в работах [Grigoryeva et al., 1916; Копецкий, Куклин, 1971; Турова et al., 1983; Terlitskaya et al., 1983; Турова, 1994]. Были выбраны следующие полосы частот:

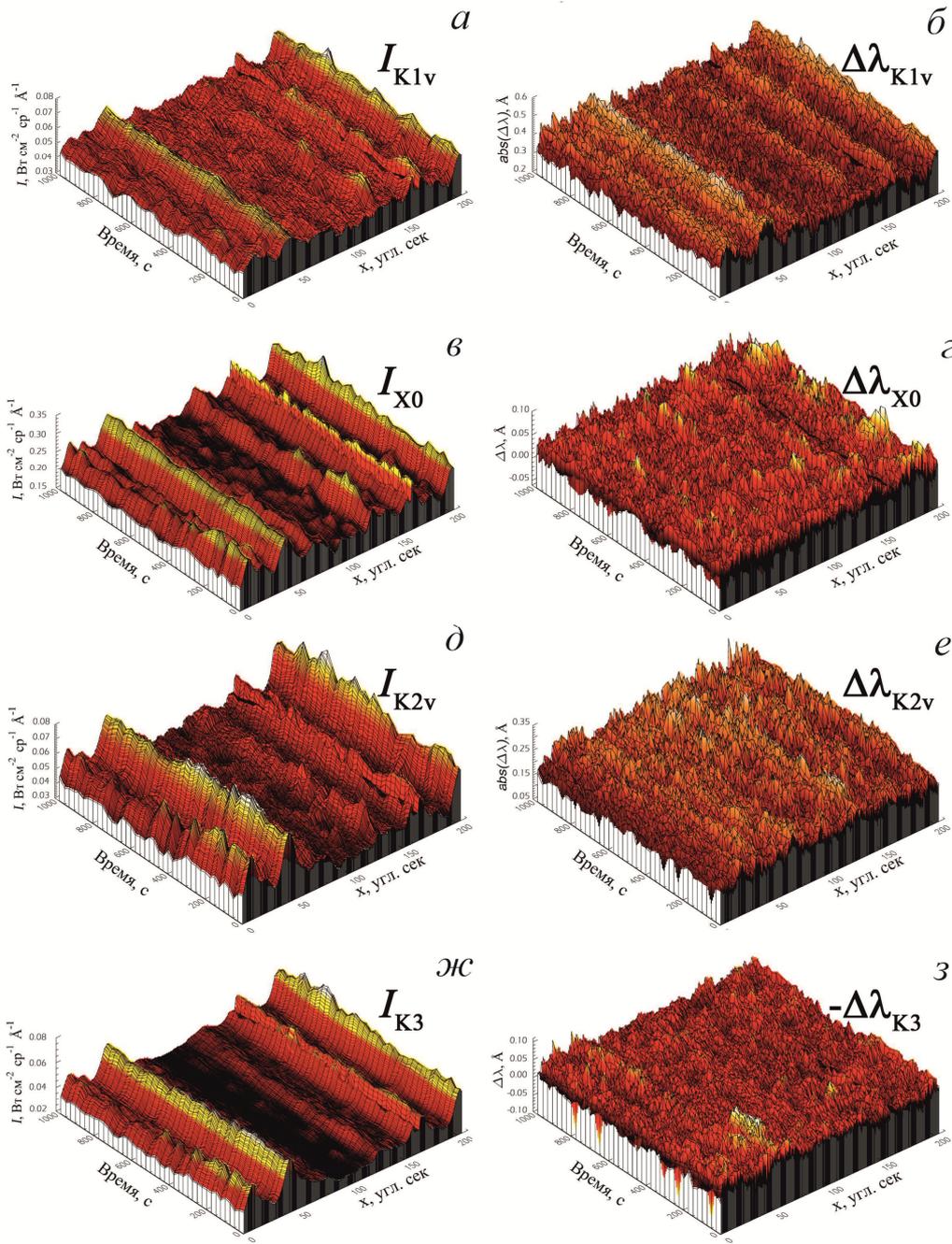


Рис. 3. Пространственно-временные распределения некоторых параметров линий К Ca II и 849.8 нм: интенсивности I_{K1v} (а); смещения $\text{abs}(\Delta\lambda_{K1v})$ (б); интенсивности I_{X0} (в); смещения $\Delta\lambda_{X0}$ (з); интенсивности I_{K2v} (д); смещения $\text{abs}(\Delta\lambda_{K2v})$ (е); интенсивности I_{K3} (ж); смещения $(-\Delta\lambda_{K3})$ (з). По осям приведены время наблюдений серии, пространственная координата (вдоль щели спектрографа) и значения параметров. Смещения линий даны в ангстремах

- 5.2–6.8 мГц (3 мин);
- 5.2–8.0 мГц (иногда применяется в литературе в качестве 3-минутного диапазона);
- 4.0–5.2 (4 мин);
- 2.4–4.0 (5 мин);
- 2.4–5.2 (5 мин+4 мин);
- 2.4–8.0 (5 мин+4 мин+3 мин);
- 1.124–2.4 (низкие частоты, «L»);
- 8.0–16.0 (высокие частоты, «H»);
- 1.124–16.0 (весь доступный нам диапазон частот, «E»).

По результатам спектрального анализа был сделан акцент на исследование распределений интен-

сности и смещений контуров линий в различных полосах частот как во всей исследуемой области, так и в отдельных хромосферных структурах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Пространственно-временное изменение параметров линий

На рис. 3 приводятся распределения по пространству и времени ряда параметров линий. Для этого рисунка были выбраны величины I_{K1v} , $\text{abs}(\Delta\lambda_{K1v})$, I_{X0} , $\Delta\lambda_{X0}$, I_{K2v} , $\text{abs}(\Delta\lambda_{K2v})$, I_{K3} , $(-\Delta\lambda_{K3})$, которые иллю-

стрируют характерные особенности поведения параметров данного типа. Величины $\Delta\lambda_{K3}$ приведены со знаком «минус» для удобства восприятия, потому что для абсолютного большинства точек минимум линии K Ca II смещен в фиолетовую сторону. На рис. 4 представлены усредненные по времени пространственные распределения параметров $\text{abs}(\Delta\lambda_{K1v})$, $\text{abs}(\Delta\lambda_{K2v})$, $\text{abs}(\Delta\lambda_{K3})$, а также пространственное распределение интегральной спектральной мощности (ИСМ) для смещений в одной из частотных полос. Для сравнения распределений $\Delta\lambda_K$ с пространственным распределением хромосферных структур на каждой панели рис. 4 приводится также распределение по пространству усредненной по времени интенсивности I_{K3} .

Поведение смещений контура по пространству (см. рис. 3) значительно отличается от поведения интенсивностей: распределения смещений более хаотичны, чем распределения интенсивностей. Сравнение показывает, что на уровне образования K_1 ход $\Delta\lambda_{K1}$ лучше соответствует ходу интенсивностей, чем на уровнях K_2 и K_3 . На уровне K_1 пикам интенсивности в ярких магнитных структурах соответствуют высокие значения $\Delta\lambda_{K1}$ (рис. 4, а). Смещения на уровне K_2 увеличены на границах магнитных структур, а не в их центральных участках. Это подтверждается рис. 4, б, на котором приводятся усредненные по времени пространственные распределения величин $\text{abs}(\Delta\lambda_{K2v})$. Графики рассеяния для пар параметров $\Delta\lambda_{K1}-I_{K1}$, $\Delta\lambda_{K2}-I_{K2}$, приведенные на рис. 5, д, ж в статье [Гурова и др., 2020], также указывают на связь параметров на уровне K_1 и отсутствие ее на уровне K_2 . На самом верхнем исследуемом нами уровне K_3 смещения также увеличены на границах ярких магнитных структур, однако самые большие амплитуды смещений приходятся на наиболее спокойные немагнитные структуры наблюдаемой области (от 70" до 140" по оси абсцисс (рис. 4, в)). Основная колебательная мощность параметра $\Delta\lambda_{K3}$ для спокойных структур обнаружена в диапазоне 4–8 мГц. Пятиминутные колебания на этом участке пренебрежимо малы, но обнаружены небольшие колебания $\Delta\lambda_{K3}$ в диапазоне низких частот (не приводятся). Интересно, что самые большие пики мощности на частотах около 5.5 и 7 мГц найдены для структуры «с02», хотя амплитуды скорости в ней показывают существенное уменьшение (см. рис. 4, в). В структуре «с02» можно отметить некоторое увеличение яркости по сравнению с соседними структурами данного типа. Следует отметить, что распределения интегральной спектральной мощности колебаний параметров $\Delta\lambda_{K1v}$, $\Delta\lambda_{K2v}$, и $\Delta\lambda_{K3}$ по пространству имеют сложный многопиковый характер. Пространственное распределение максимальных пиков мощности в конкретной полосе частот может не соответствовать пространственному распределению максимальных смещений $\Delta\lambda_K$. Поэтому на рис. 4 для каждого из перечисленных выше параметров была выбрана та полоса частот, в которой совпадение максимальных смещений и пиков мощности по пространству было наилучшим.

Чтобы оценить степень связи между смещениями $\Delta\lambda_K$ и соответствующими им величинами I_K , а также величинами ИСМ ($\Delta\lambda_K$), приведенными на рис. 4, мы вычислили коэффициенты корреляции. Они приве-

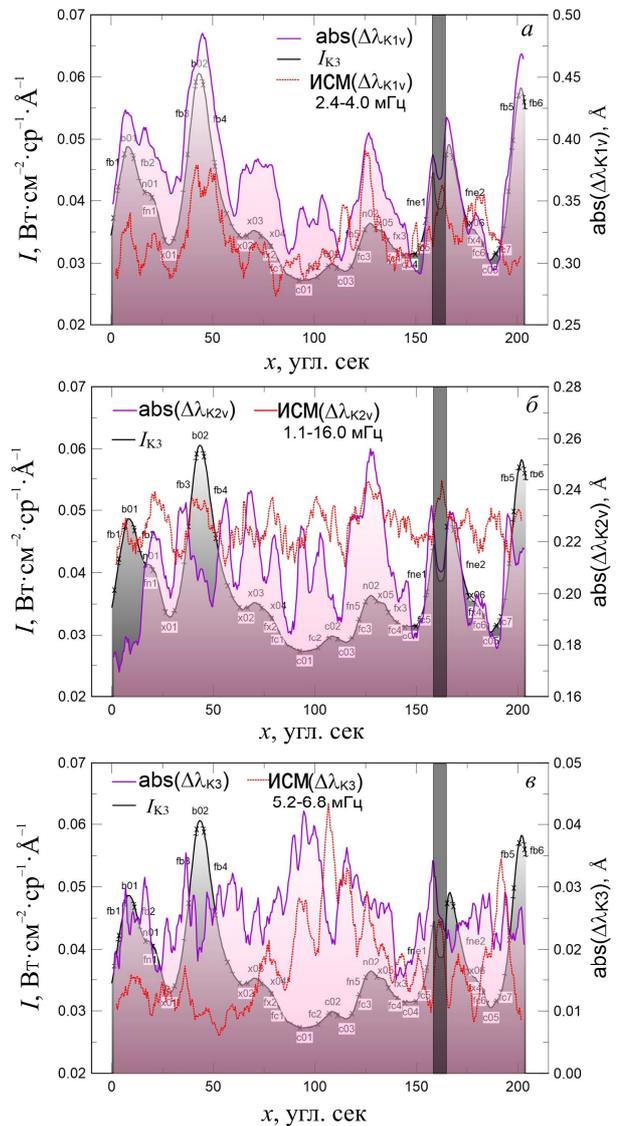


Рис. 4. Усредненные по времени смещения линии K Ca II (лиловые кривые и розовая заливка) на разных уровнях образования участков линии: $\text{abs}(\Delta\lambda_{K1v})$ (а); $\text{abs}(\Delta\lambda_{K2v})$ (б); $\text{abs}(\Delta\lambda_{K3})$ (в). Черная кривая и темная заливка отмечают пространственное распределение усредненной по времени интенсивности I_{K3} . Красные штриховые кривые отмечают пространственное распределение интегральной спектральной мощности (ИСМ) соответствующего параметра в одной из частотных полос. Остальные обозначения те же, что на рис. 2

дены в табл. 1. Строки 1–3 показывают корреляцию $\Delta\lambda_K$ с интенсивностями. Строки 4–6 относятся к интегральной спектральной мощности, причем для ИСМ рассмотрены корреляции как для всей исследуемой области, так и для половины области от 0" до 100". В третьей колонке для строк 4–6 приводится полоса частот, для которой был найден максимальный коэффициент корреляции.

Таблица 1 позволяет дать количественную оценку качественной картины, показанной на рис. 3, 4. Так, на уровне K_1 (рис. 4, а), где максимальные смещения $\Delta\lambda_{K1v}$ совпадают с пиками интенсивности I_{K1} , коэффициент корреляции усредненных по времени параметров $\Delta\lambda_{K1v}$ и I_{K1} в рассматриваемой области >0.9 .

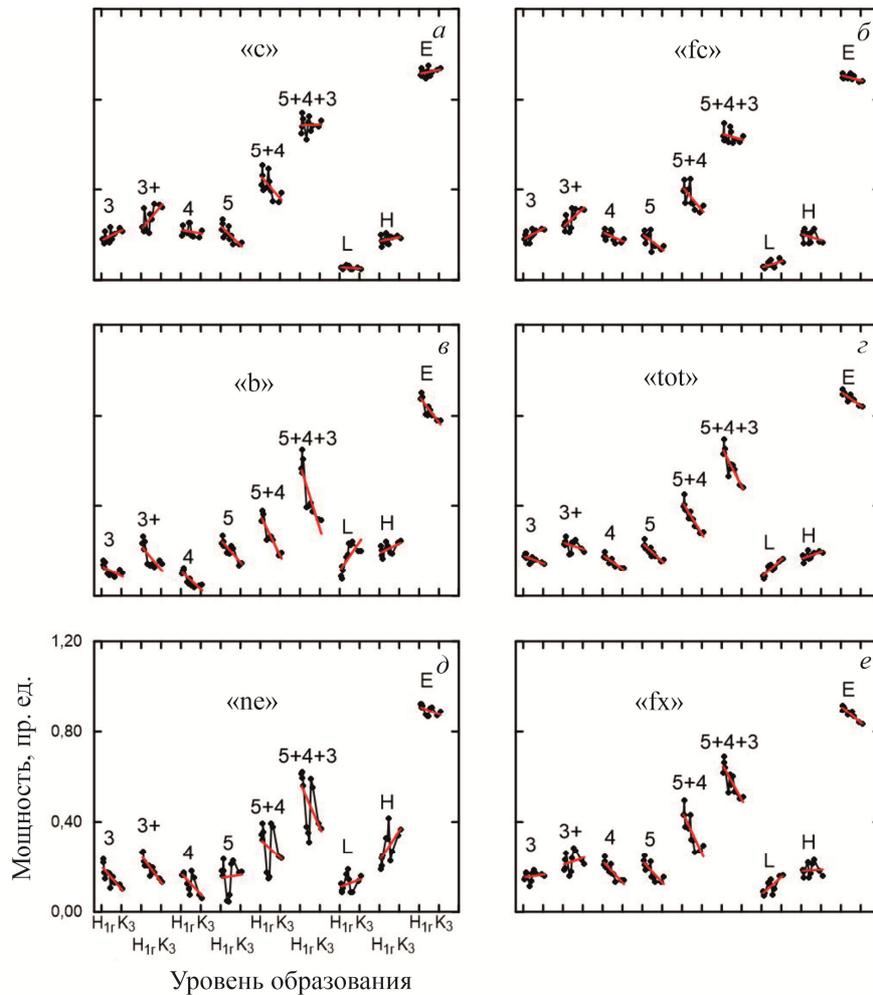


Рис. 5. Изменения с высотой пространственно-усредненной интегральной спектральной мощности колебаний интенсивности для некоторых из выбранных хромосферных структур и всей исследуемой области N05W00 (черные кривые). Красным цветом отмечены интерполированные значения. Показаны структуры: «ячейка» (а); «граница ячейки» (б); «флоккул» (в); вся исследуемая область (г); «яркая сетка» (д); «граница области с промежуточной яркостью» (е). В качестве маркеров высоты выбраны высоты образования участков: I_{H1r} , I_{K1r} , I_{H1v} , I_{K1v} , I_{H2r} , I_{K2r} , I_{H0} , I_{H2v} , I_{K2v} , I_{H3} , I_{K3} . В обозначениях на графике показаны первый и последний из них. Числа и буквы отмечают области периодов, соответствующие следующим диапазонам частот: «3» — 5.2–6.8 мГц; «3+» — 5.2–8.0 мГц; «4» — 4.4–5.2 мГц; «5» — 2.4–4.0 мГц; «5+4» — 2.4–5.2 мГц; «5+4+3» — 2.4–8.0 мГц; «L» — 1.124–2.4 мГц; «H» — 8.0–16.0 мГц; «E» — 1.124–16.0 мГц. Интегральная спектральная мощность по оси ординат дана в произвольных единицах

Таблица 1

Корреляция между смещениями $\Delta\lambda$, интенсивностями I и мощностью колебаний P

№	Параметры	Область	Частота, мГц	Коэффициент корреляции
1	$abs(\Delta\lambda_{K1v}) - I_{K1v}$	0"–204"	–	0.95
2	$abs(\Delta\lambda_{K2v}) - I_{K2v}$	0"–204"	–	0.13
3	$abs(\Delta\lambda_{K3}) - I_{K3}$	0"–204"	–	-0.23
4	$abs(\Delta\lambda_{K1v}) - ИСМ(\Delta\lambda_{K1v})$	0"–204"	2.4–4.0	0.32
		0"–100"	2.4–4.0	0.70
5	$abs(\Delta\lambda_{K2v}) - ИСМ(\Delta\lambda_{K2v})$	0"–204"	1.1–16.0	0.28
6	$abs(\Delta\lambda_{K3}) - ИСМ(\Delta\lambda_{K3})$	0"–204"	5.2–6.8	0.23
		0"–100"	5.2–6.8	0.45
7	$abs(\Delta\lambda_{K1v}) - P(\Delta\lambda_{K1v})$	40"–49" (b02)	1.8	0.50
		91"–96" (c01)	6.5	0.51
8	$abs(\Delta\lambda_{K2v}) - P(\Delta\lambda_{K2v})$	31"–37" (вблизи b02)	2.1	0.55
		51"–58" (вблизи b02)	12.4	0.61
		91"–96" (c01)	9.41	0.53
9	$abs(\Delta\lambda_{K3}) - P(\Delta\lambda_{K3})$	31"–37" (вблизи b02)	5.31	0.75
		91"–96" (c01)	2.33	0.63

Коэффициент корреляции параметра $\Delta\lambda_{K1v}$ с ИСМ($\Delta\lambda_{K1v}$) в 5-минутном диапазоне для половины ($0''$ – $100''$) рассматриваемой области составляет 0.7. Для всей рассматриваемой области он значительно ниже, ~ 0.3 .

Как уже упоминалось, максимальные смещения $\Delta\lambda_{K2v}$ на уровне K_2 часто приходятся не на центры магнитных структур (рис. 4, б). Наоборот, в центрах магнитных структур величина смещений уменьшается (см., например, их значения во флоккуле «b02»: положение на оси абсцисс $\approx 50''$). Коэффициент корреляции параметров $\Delta\lambda_{K2v}$ и I_{K2v} составляет ≈ 0.1 (строка 2, табл. 1).

На уровне K_3 , как видно на рис. 4, в, самые большие смещения $\Delta\lambda_{K3}$ приходятся на самую спокойную часть рассматриваемой области. Смещения, как и на уровне K_2 , невелики в центрах магнитных структур. Коэффициент корреляции параметров $\Delta\lambda_{K3}$ и I_{K3} составляет ≈ 0.2 (строка 3, табл. 1). Коэффициент корреляции параметра $\Delta\lambda_{K3}$ и интегральной спектральной мощности колебаний этого параметра в 5-минутном диапазоне по всей рассматриваемой области составляет 0.2, хотя для отдельных участков области может достигать 0.5 (строка 6, табл. 1).

Очевидно, что в разных структурах могут доминировать колебания различной частоты. Для более детального рассмотрения этого вопроса мы выбрали несколько характерных участков исследуемой области. На уровне K_1 — это два участка, первый из которых соответствует структуре «b02». Здесь максимальные смещения $\Delta\lambda_{K1v}$ и $\Delta\lambda_{K1r}$ приходятся на центр флоккула. Второй участок выбран в спокойной области — в структуре «c01». На уровне K_2 — это два участка в окрестности флоккула с максимальными смещениями $\Delta\lambda_{K2v}$ и структура «c01». На уровне K_3 — это участок в окрестности флоккула «b02» и структура «c01». Для этих участков были найдены коэффициенты корреляции смещений $\Delta\lambda_{K1v}$, $\Delta\lambda_{K2v}$, и $\Delta\lambda_{K3}$ с мощностью колебаний P в каждой точке интервала частот 1.1–16.0 мГц. Максимумы коэффициентов корреляции между P и смещениями для этих участков, а также частота, для которой мощность колебаний максимальна, приводятся в строках 7–9 табл. 1. Оказалось, что на выбранных участках полученные локальные максимумы колебаний имеют не очень высокие коэффициенты корреляции с величиной смещений линии $\Delta\lambda_K$ ($r \sim 0.5$ – 0.6). Самый высокий коэффициент корреляции (0.75) найден для участка вблизи флоккула «b02» на уровне K_3 .

2.2. Интегральная спектральная мощность колебаний интенсивности на разных уровнях солнечной атмосферы

2.2.1. Изменение интегральной спектральной мощности с высотой

Мы сравнили интегральную спектральную мощность колебаний интенсивности на разных уровнях солнечной атмосферы, используя в качестве маркеров высоту отдельных участков линий K, H, 849.8 нм. Это величины I_{H1r} , I_{K1r} , I_{H1v} , I_{K1v} , I_{H2r} , I_{K2r} , I_{X0} , I_{H2v} , I_{K2v} , I_{H3} , I_{K3} , ранжированные согласно имеющимся

в литературе данным о высотах их образования [von Uexküll, Kneer, 1995; Taroyan, Erdélyi, 2009; Judge et al., 2001; Reardon et al., 2009; Beck et al., 2009; Bjørgen, et al., 2018]. Был построен рис. 5, a–e, аналогичный рис. 13 из статьи [Grigoryeva et al., 2016]. В данной работе мы используем несколько отличающийся набор маркеров высоты и большее количество частотных диапазонов. В качестве примера на рис. 5 показан ход пространственно усредненной интегральной спектральной мощности колебаний интенсивности для отдельных структур и всей наблюдаемой области в выбранных частотных полосах.

Оказалось, что в полном диапазоне частот (1.124–16.0 мГц) мощность колебаний уменьшается с высотой в солнечной атмосфере в каждой отдельной структуре и во всем участке, вырезанном щелью спектрографа (рис. 5). Исключение составляет структура «с», в которой наблюдается небольшой рост мощности колебаний в полном диапазоне частот (рис. 5, a). Эта структура, а также структура «fc» (рис. 5, б) выделяются, кроме того, усилением с высотой 3-минутных колебаний. В структуре «с» замечен также небольшой рост высокочастотных колебаний (8–16 мГц) и незначительное уменьшение мощности низкочастотных колебаний (1.124–2.4 мГц, рис. 5, a). В структуре «fc», наоборот, высокочастотные колебания уменьшаются с высотой, а низкочастотные колебания усиливаются (рис. 5, б).

Остальные структуры, в том числе и не приведенные на рис. 5, демонстрируют уменьшение мощности колебаний во всех диапазонах частот, кроме низкочастотного и высокочастотного. Такое же поведение характерно и для всей изучаемой области на Солнце, включающей все выделенные структуры, а также участки, не вошедшие в классификацию (рис. 5, з). Исключениями являются яркая сетка, в которой замечен небольшой рост мощности 5-минутных колебаний (рис. 5, д), и граница «fx» (рис. 5, e), в которой поведение 3-минутных и высокочастотных колебаний не проявляет уверенного тренда на уменьшение или увеличение мощности колебаний.

2.2.2. Интегральная спектральная мощность колебаний интенсивности в отдельных структурах в некоторых диапазонах частот

На рис. 6 приводятся распределения интегральной спектральной мощности, вычисленной для линии K CaII по всем пространственным пикселям исследованной области N05W00. Синим и красным цветом обозначены распределения интегральной спектральной мощности на уровнях образования K_1 и K_3 соответственно. Черным цветом показан ход интенсивности I_{K3} . Нам представляется удобным рассмотреть рис. 6, опираясь на частотные диапазоны, так как распределение носит весьма сложный характер, с пиками мощности, не совпадающими с пиками яркости выделенных структур.

Диапазон частот 1.124–2.4 мГц (рис. 6, a). Мы уже отметили общий рост мощности колебаний в верхней хромосфере для этого диапазона (см. рис. 5). Максимальный пик приходится на одну из границ флоккула «b03» («fb5») на уровнях образования K_1 и K_3 .

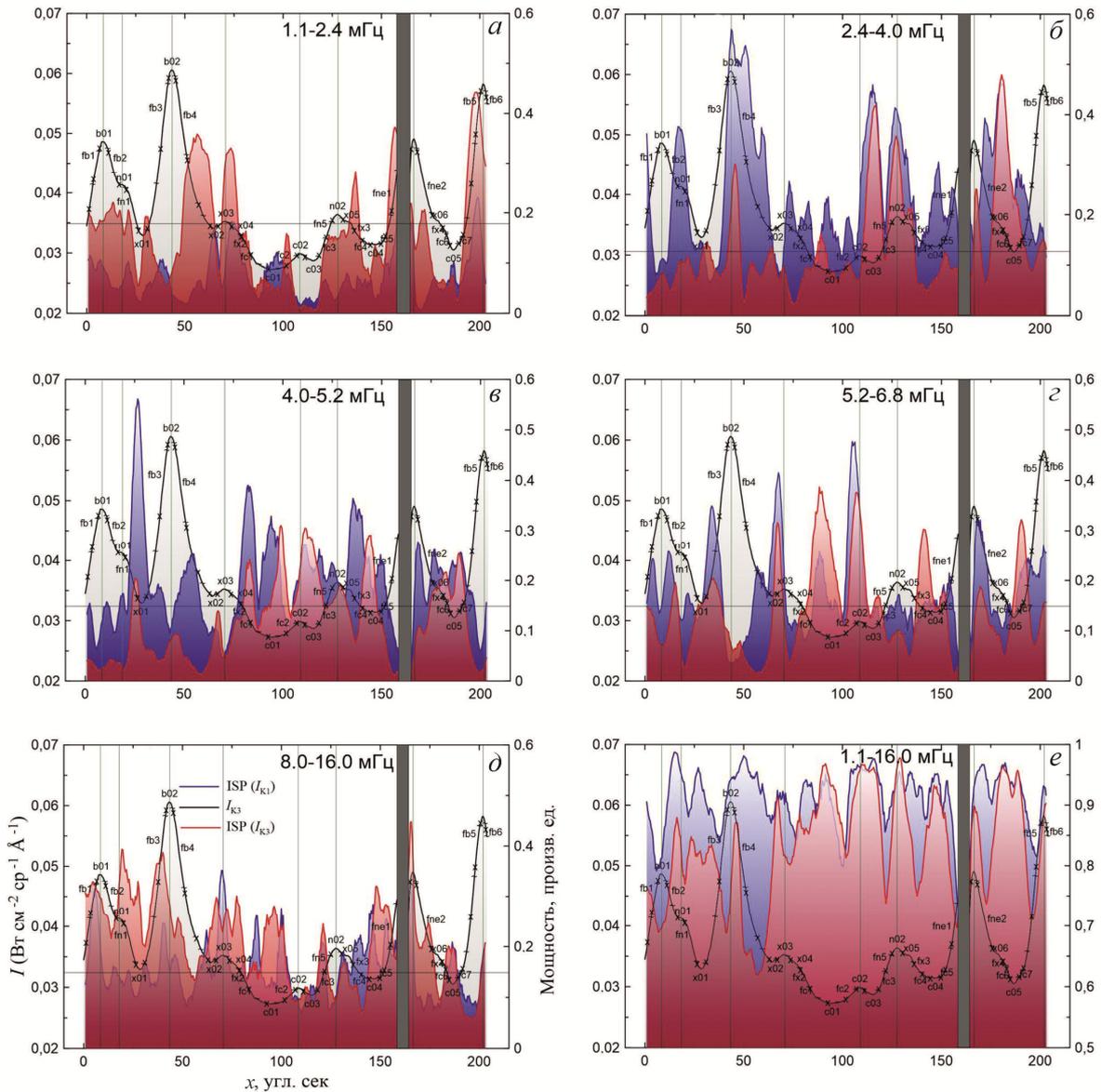


Рис. 6. Распределение интегральной спектральной мощности колебаний интенсивности в области N05W00 в нижней хромосфере (I_{K1} , голубая кривая и заливка) и в верхней хромосфере (I_{K3} , красная кривая и заливка) в нескольких частотных диапазонах: низкочастотный диапазон (а); 5-минутный диапазон (б); 4-минутный диапазон (в); 3-минутный диапазон (г); высокочастотный диапазон (д); полный доступный диапазон (е). Черная кривая и серая заливка — распределение интенсивности I_{K3} с выделенными структурами, отмеченными цифрами и буквами. Черная вертикальная полоса отмечает нить, натянутую поперек щели спектрографа. Тонкие зеленые вертикальные линии отмечают центры основных выделенных структур. Горизонтальная черная линия отмечает уровень значимости 0.95

Несколько меньшие пики приходятся на «fne1» и структуры с промежуточной яркостью «x03» и «x04». На уровне K_3 имеется также пик, относящийся к структурам «x05» и «fx3». Мощность во флоккуле «fb01» и на его границах хоть и превышает уровень значимости 0.95, но невысока. Можно отметить, что для границ «fb2», «fb3», «fb4» и границы «fne2» характерно уменьшение мощности до минимума на нижнем уровне атмосферы в районе температурного минимума. В структурах «c01»–«c05» мощность низкочастотных колебаний в основном мала и достигает минимального значения в структурах «c02» и «c03» на обоих рассматриваемых уровнях атмосферы.

Диапазон частот 2.4–4.0 мГц (рис. 6, б). В так называемой пятиминутной полосе частот можно

отметить в целом уменьшение мощности колебаний с высотой и сложное распределение мощности по исследуемой области. Исключение составляет участок пространства $x \sim 170''\text{--}180''$, где наблюдается незначительное превышение мощности на верхнем уровне. Более высокие пики мощности главным образом приходятся на границы выделенных структур, за исключением сетки «n02», в которой пики на двух атмосферных уровнях совпадают с центром структуры. Самые мощные пики на уровне образования I_{K1} приходятся на структуры «fb2», «fb3», «fb4», «c03», «n02», «fne2» и «x06». Иногда они не совпадают с пиками на уровне образования I_{K3} , где на месте пиков наблюдается пониженная мощность колебаний (структуры «fn4», «x03», «c04» и «fne2»).

Диапазон частот 4.0–5.2 мГц (рис. 6, в). В этом диапазоне мощность на уровне I_{K3} также понижена по сравнению с уровнем I_{K1} . Исключение составляют окрестности ячейки «с03», где имеется небольшое повышение мощности 4-минутных колебаний на верхнем уровне атмосферы. Наиболее высокие пики на обоих уровнях приходятся на границы, структуры с промежуточной яркостью и ячейки. Заметно понижена мощность во всех отождествленных флоккулах.

Диапазон частот 5.2–6.8 мГц (рис. 6, з). В четырех из пяти структур «с» интегральная спектральная мощность колебаний выше на верхнем уровне атмосферы. Пики мощности приходятся не на центральные части структур, а на их границы. Наибольший пик мощности принадлежит границе «fc1». В структуре «с02», которая представляет небольшое повышение яркости рядом со структурой «с01», имеется второй по величине пик мощности колебаний, но он выше на уровне образования I_{K1} . Его максимум приходится на границу «fc2». Значимые пики мощности колебаний на обоих атмосферных уровнях имеются также в структурах «x02» и «x03», «fx3» и «fc4», «fc7». Мощность колебаний заметно падает в структурах «b01», «n01», «b02» и «b03». Но в структуре «n02» и особенно на границе яркой сетки «fne2» мощность колебаний повышена, особенно на нижнем уровне атмосферы.

Диапазон частот 8.0–16 мГц (рис. 6, д). В этом довольно большом диапазоне мощность колебаний не очень велика, но в целом она выше на уровне I_{K3} . Пики мощности в основном приходятся на границы структур. В ячейках «с01», «с04» и «с05» заметны высокочастотные колебания в их центрах. Наибольший пик мощности приходится на яркую сетку «ne1» и ее границу, несколько меньшие пики имеются в «n01», «fn1» и «fb3».

Диапазон частот 1.124–16.0 мГц (рис. 6, е). В целом, мощность колебаний в полном доступном диапазоне частот немного понижена на верхнем уровне. Максимальная мощность колебаний на нижнем атмосферном уровне приходится на участки границ флоккулов «b01» и «b02». На верхнем уровне наибольшие пики мощности наблюдаются в структурах «fc1», «с02», «с03» и «n02».

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы рассмотрели пространственное распределение ряда параметров линий К CaII и 849.8 нм и их временные вариации. Были вычислены также усредненные по времени пространственные распределения этих параметров, в частности, интенсивностей и смещений линий кальция на разных уровнях образования — K_1 , X_0 , K_2 и K_3 . Как оказалось, распределения смещений и интенсивностей совпадают в нижней хромосфере, в то время как в средней хромосфере максимальные смещения линии приходятся не на центры, а на границы ярких магнитных структур (флоккулов). Это согласуется с результатами работы [Hegglund et al., 2011], в которой проводилось численное моделирование распространения волн в моделях солнечной атмосферы с различными кон-

фигурациями магнитного поля. Авторы [Hegglund et al., 2011] отмечают, что все сильные концентрации магнитного потока в нижележащих слоях связаны с областями большой амплитуды скорости в слоях, расположенных выше, и почти все области с высокой амплитудой связаны с концентрациями потоков. В отличие от результатов [Hegglund et al., 2011] на самом верхнем исследуемом нами уровне K_3 самые большие амплитуды смещений приходятся на наиболее спокойные немагнитные структуры наблюдаемой области. Среди них выделяется одна структура (см. рис. 4, в, $x=115''$) с несколько увеличенной яркостью, вероятно, связанной с локальным увеличением магнитного потока. Амплитуды смещений линии ($\Delta\lambda_{K3}$) в этой структуре существенно меньше, при этом в ней наблюдается наибольшая мощность колебаний скорости в диапазоне 5.2–8.0 мГц.

В исследуемой нами полосе частот (1.124–16.0 мГц) пики в спектре мощности (не приводится) приходятся не на низкие частоты, как можно было бы ожидать для мелкомасштабных трубок магнитного потока (например, [Khomenko et al., 2008]), а на 5.5 и 7 мГц, что также согласуется с результатами [Hegglund et al., 2011].

Мы уже упоминали, что смещения линии распределены по пространству более хаотично, чем интенсивности. Колебательная мощность $\Delta\lambda$ не всегда соответствует пространственному распределению смещений (см. рис. 4). Отсутствие убедительного соответствия колебательной мощности параметра $\Delta\lambda$ и величин самого параметра позволяет предположить, что некоторая доля смещений линии не носит периодического характера.

Рассмотрим подробнее наши результаты по колебаниям интенсивности в отдельных частотных диапазонах.

Низкочастотные колебания интенсивности регистрируются на разных уровнях солнечной атмосферы в разных линиях и разных солнечных образованиях (см., например, [Damé et al., 1984; DeForest, Gurman, 1998; McAteer et al., 2003; Srivastava et al., 2008; Ожогина, Теплицкая, 2013, 2014]). Прохождение в хромосферу волн с частотой ниже акустической частоты обрезания 5.2 мГц [Bel, Leroy, 1977; Suematsu, 1990; De Pontieu et al., 2004; Jefferies et al., 2006] может быть связано с понижением этой частоты в наклонных по отношению к направлению гравитации магнитных полях, составляющих магнитную сетку. Это происходит при выполнении условия $\beta < 1$ (β — отношение газового давления к магнитному). В согласии с этими работами полученное нами увеличение мощности низкочастотных колебаний происходит в основном на границах «fb». Похожие результаты при наблюдении колебаний интенсивности, магнитного поля и доплеровской скорости в факельных магнитных узлах получены в работах [Kobanov, Pulyaev, 2011; Chelpanov et al., 2015]. На периферии узлов авторами работы [Chelpanov et al., 2015] обнаружены колебания в диапазоне 1.5–3 мГц, а в центре узлов — в диапазоне 3–6 мГц. Авторы полагают, что такое распределение колебаний обусловлено топологией магнитного поля — вертикального в центре и наклонного на периферии. В большинстве остальных

структур, по нашим данным, мощность низкочастотных колебаний также увеличена в средней хромосфере (рис. 6, а). Низкочастотные колебания присутствуют во всех областях — и в ярких магнитных элементах, и в темных областях с пониженным магнитным полем (см. также [Grigoryeva et al., 2016]).

Высокочастотный диапазон 8–16 МГц в наших наблюдениях намного шире остальных выбранных диапазонов, но его вклад в колебательную мощность не очень велик. Наибольшее увеличение мощности высокочастотных колебаний в средней хромосфере приходится на границы ярких структур, включая два флоккула (рис. 6, д). Мощность высокочастотных колебаний увеличивается также в ряде структур с низкой яркостью. В целом по исследуемой области мощность высокочастотных колебаний немного увеличена в верхней хромосфере, при этом распределение ее по структурам достаточно хаотично (рис. 6, д). В работе [Gafeira et al., 2017] по наблюдениям в линии Н Са II обнаружены высокочастотные колебания интенсивности и ширины линии в тонких фибриллах. Ответ на вопрос о вкладе высокочастотных волн в нагрев солнечной атмосферы остается неоднозначным. Например, в обзоре [Srivastava et al., 2021] отмечается, что в настоящее время роль высокочастотных волн в энергетическом балансе атмосферы Солнца недооценена. С другой стороны, во многих работах, посвященных исследованию высокочастотных колебаний, делается вывод о том, что энергия этих колебаний слишком мала для поддержания температурного роста в верхних слоях солнечной атмосферы, например [Carlsson et al., 2007; Fossum, Carlsson, 2006]. Дальнейшее обсуждение выводов, полученных в работах [Fossum, Carlsson, 2005a, б, 2006], показало, что результаты этих авторов, скорее всего, связаны с недостаточным пространственным разрешением TRACE (см. например, [Cuntz et al., 2007]). В работе [Cuntz et al., 2007] приводятся аргументы в пользу того, что высокочастотные акустические волны (10–50 МГц) достаточны для нагрева немагнитной солнечной хромосферы. В работе [Bello Gonzalez et al., 2010] показано, что в частотном диапазоне 5.2–10 МГц для высоты ~250 км акустический поток превышает радиативные потери. Одномерное численное моделирование [Shoda, Yokoуama, 2018] показало, что высокочастотные колебания (20–25 МГц), наблюдаемые в хромосферных спикулах, возникают в хромосфере вследствие конверсии продольных волн в поперечные. Поток энергии этих высокочастотных волн невелик, он в несколько раз меньше, чем полный поток энергии, поэтому необходимо рассматривать вместе низкочастотные и высокочастотные волны. Высокочастотные МГД-волны (9–17 МГц) обнаружены также в мелкомасштабных структурах по наблюдениям флуктуаций яркостной температуры [Jafarzadeh et al., 2021].

В отличие от низкочастотных и высокочастотных колебаний, 5-минутные колебания, по нашим результатам, ослабляются в средней хромосфере в большинстве выделенных структур (см. рис. 5). Исключением является яркая сетка, в которой интегральная спектральная мощность колебаний изменяется немонотонно с высотой практически во всех рас-

смотренных диапазонах частот. Мы вычислили коэффициенты корреляции 5-минутных колебаний в верхней фотосфере и верхней хромосфере для выбранных структур (не приводятся). Наши результаты показывают, что на этих уровнях существует высокая корреляция 5-минутных колебаний в спокойной области вне корональной дыры (рис. 6, б). Эти результаты не согласуются с выводами [Chelpanov et al., 2021], которые не обнаружили общих колебаний в фотосфере и хромосфере вне корональной дыры. Из наших наблюдений и из наблюдений [Kayshap et al., 2018] следует, что различные участки выбранной для исследования области по-разному участвуют в распространении или нераспространении 5-минутных волн. В выводах [Kayshap et al., 2018] особо отмечено, что волны из фотосферы могут распространяться вверх до переходной области как в форме 3-минутных волн, так и (в некоторых местоположениях) 5-минутных. Мы полагаем, что для однозначного ответа необходимо большее количество наблюдений.

По нашим результатам, 5-минутные колебания наблюдаются не только в ярких магнитных структурах. Например, в двух из трех наблюдавшихся флоккулах «b01» и «b03» (рис. 6, б) мощность 5-минутных колебаний понижена. Вопрос о распространении 5-минутных колебаний в усиленных магнитных полях является обсуждаемым в литературе. Так, в работе [Senteno et al., 2006] показано, что 5-минутные волны распространяются из фотосферы в хромосферу в факельной области. Примером такого распространения могут служить наши структуры «ne1», «n02» и «b01» (рис. 6, б). Тем не менее, по нашим данным наибольшая мощность 5-минутных колебаний в средней хромосфере оказалась не в ярких магнитных структурах, а в структурах с меньшей яркостью. Это согласуется с выводами [Khomenko et al., 2008] о том, что 5-минутные волны могут также распространяться в хромосферу в почти вертикальных мелкомасштабных трубках магнитного потока, в которых время радиативной релаксации мало. Это также согласуется с результатами [Gupta et al., 2013], где показано, что 5-минутные колебания (2.76–4.02 МГц) присутствуют в основном в темных немагнитных областях. Интересные результаты получены в работе [Rajaguru et al., 2019], авторы которой наблюдали прохождение волн с частотой 2–4.0 МГц в изолированных почти вертикальных трубках магнитного потока, а также уменьшение их амплитуды с высотой. Прохождение этих волн связывается с уменьшением акустической частоты обрезания вследствие уменьшения времени радиативной релаксации. Затухание волн с высотой объясняется укрупнением и диссипацией волн. Картина распределения 5-минутных волн в целом представляется достаточно сложной. Неоднозначность может усугубляться интерференцией волн от близких источников, рассмотренной в работе [Heggland et al., 2011], авторы которой моделировали прохождение волн в наклонных и вертикальных магнитных полях.

Как 4-минутные, так и 3-минутные колебания ослаблены в ярких магнитных элементах (как, например, флоккулы «b01», «b02» на рис. 6, в, з). Исключе-

Таблица 2

Отношения $ISM_{N05W00}/ISM_{S25W12}$ и $ISM_{N05W00}/ISM_{S25W17}$

Уровень	$ISM_{N05W00}/ISM_{S25W12}$					$ISM_{N05W00}/ISM_{S25W17}$				
	3 мин	4 мин	5 мин	L	E	3 мин	4 мин	5 мин	L	E
K ₁	1.47	1.37	1.28	1.29	1.43	1.48	1.07	1.20	1.27	1.32
K ₃	1.85	1.42	1.28	1.25	1.54	1.44	0.93	1.20	1.58	1.34

нием является граница яркой сетки «ne1», где колебания в 3-минутном диапазоне усилены, особенно в нижней хромосфере. В основном эти колебания встречаются в ячейках с максимумами на их границах и усилены в этих структурах на верхнем уровне. Распределение мощности в 3-минутном и 4-минутном диапазонах близко к результатам [Lites et al., 1993; Gupta et al., 2013]. Подобная картина для 3-минутного диапазона поддерживается модельными расчетами распространения волн [Hegglund et al., 2011], где авторы показали, что волны 3-минутного диапазона доминируют в районах со слабым магнитным полем.

Как уже упоминалось, наши результаты показали, что мощность в 3-минутном и 4-минутном диапазонах увеличена в верхней хромосфере в структурах со слабым магнитным полем (рис. 5, а, б и рис. 6, в, г). Усредненная по всем структурам мощность 3-минутных колебаний уменьшается в верхней хромосфере по сравнению с верхней фотосферой, как и мощность 4-минутных и 5-минутных колебаний (см. рис 5, г). Четырехминутные колебания довольно редко рассматриваются отдельно в литературе. Например, на спектрах мощности, вычисленных [Deubner, Fleck, 1990], имеются пики именно в этой полосе частот как для темных, так и для ярких элементов хромосферной сетки. Отдельно данная полоса частот рассматривалась в работе [Кобанов, 2000], в которой исследовались колебания в нижней хромосфере. Пики в 4-минутной полосе частот отчетливо видны в спектрах мощности, полученных [Chelpanov et al., 2015], исследовавших колебания интенсивности, доплеровской скорости и магнитного поля в центрах солнечных факелов и на их периферии. Усиление мощности на частоте 4 мГц найдено [Jafarzadeh et al., 2021] по наборам данных с самыми слабыми магнитными полями.

Ослабление мощности колебаний с высотой в нашем диапазоне частот 2.4–8 мГц (см. рис. 5) аналогично результату, полученному в работе [Mein, Schmieder, 1981] для спокойной области. Эти авторы использовали наблюдения в линиях CaII и MgI и диапазон частот 2.5–8.3 мГц, который практически совпадает с нашим диапазоном. Они получили ослабление потока волновой энергии из фотосферы в хромосферу (до высоты ≈1500 км) приблизительно на порядок (рис. 3, б в работе этих авторов).

Для рассмотрения возможной взаимосвязи колебаний в одних и тех же структурах на разных атмосферных уровнях мы вычислили коэффициенты корреляции для различных наборов выбранных параметров. Выявилась очень неоднородная картина. Оказалось, что в ряде структур на трех уровнях атмосфер (K₁, K₂ и K₃) корреляция колебаний отсутствует во всех частотных полосах. В некоторых структурах имеется корреляция колебаний только

между двумя из трех атмосферных уровней, например между K₁ и K₂, или между K₂ и K₃. Для того чтобы понять, как и где распространяются колебания, мы планируем в следующей работе включить в рассмотрение полученные при проведении спектрального анализа фазовые соотношения.

Мы сравнили колебательные процессы, происходящие в двух областях спокойного Солнца, расположенных в основании корональной дыры, и одной области вне корональной дыры. Оказалось, что и в нижней, и в верхней хромосфере мощность колебаний интенсивности выше в области вне корональной дыры в большинстве диапазонов частот. Исключением является 4-минутный диапазон частот, где на обоих уровнях хромосферы эта тенденция выражена слабо или отсутствует. В табл. 2 приведены отношения усредненной по всем пространственным структурам интегральной спектральной мощности колебаний интенсивности линии K CaII в различных частотных диапазонах для области, расположенной вне корональной дыры, к ISM в двух областях, расположенных в основании корональной дыры на уровнях нижней и верхней хромосферы (K₁ и K₃).

Тем не менее, ход интегральной спектральной мощности колебаний интенсивности с высотой мало отличается в трех областях (см. [Grigoryeva et al., 2016]). Результаты представлены на рис. 5, 6 и 13 в работе [Grigoryeva et al., 2016]. Видно, что основное свойство поведения колебаний интенсивности с высотой — уменьшение их мощности во всех диапазонах частот, кроме низкочастотного (1.124–2.4 мГц). Мощность колебаний в среднем также увеличивается с высотой в 3-минутном диапазоне (5.2–6.8 мГц) в структурах с пониженным магнитным полем. В данном контексте для нас интересен результат, полученный в работе [Abbasvand et al., 2020]. В немагнитных районах спокойной области для высоты образования линии CaII 854.2 нм вычисленный акустический поток полностью компенсирует радиативные потери на уровне средней хромосферы 1000–1400 км. Максимальный вклад в спектр мощности дают частоты 6–7 мГц. В то же время на высотах 1600–1900 км вклад акустического потока недостаточен для компенсации радиативных потерь, здесь требуется дополнительный поставщик энергии. Наши результаты по частотным диапазонам 5.2–6.8 мГц, 5.2–8.0 мГц для структур с пониженным магнитным полем (см. рис. 5) показывают качественное сходство с результатом [Abbasvand et al., 2020]. Интегральная спектральная мощность в этих двух диапазонах имеет немонотонный ход, но максимального значения достигает в нижней хромосфере (1000–1300 км) и снижается к уровню образования K₃ (~1750–1900 км). Эта тенденция для структур с пониженной и промежуточной яркостью также

прослеживается в нашей работе ([Grigoryeva et al., 2016], рис. 13), где мы исследовали две области в основании корональной дыры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На уровне нижней хромосферы распределения смещений линии во флоккулах совпадают с распределением интенсивности, в то время как в верхней хромосфере максимальные смещения линий приходятся не на центральные части флоккулов, а на их границы.

2. Интегральная спектральная мощность колебаний интенсивности линий Ca II в полной полосе частот 1.124–16 мГц, а также в 3-минутном, 4-минутном и 5-минутном диапазонах уменьшается с высотой от уровня нижней хромосферы до высоты верхней хромосферы почти во всех структурах.

3. В низкочастотном диапазоне регистрируется рост мощности колебаний от нижней хромосферы до верхней почти во всех структурах.

4. В 3-минутном диапазоне мощность колебаний в структурах с пониженным магнитным полем достигает максимального значения в нижней хромосфере и немного снижается в верхней хромосфере.

5. Интегральная спектральная мощность колебаний в высокочастотном диапазоне в большинстве структур увеличивается с высотой.

Сравнение результатов исследования областей спокойного Солнца, расположенных в основании корональной дыры, и области, расположенной вне дыры (настоящая работа), показало, что существует как сходство, так и отличие в проявлении динамических процессов в одних и тех же диапазонах частот в областях с разной структурой магнитного поля. Общие тенденции содержатся в пунктах 2, 3, 4. Наблюдаемое нами отличие заключается в том, что интегральная спектральная мощность колебаний интенсивности линии Ca II в целом выше в области вне корональной дыры.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Копецкий М., Куклин Г.В. К вопросу об 11-летней вариации средней продолжительности жизни групп солнечных пятен. *Исслед. по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца*. М.: Наука, 1971. Вып. 2. С. 167–179.

Ожогина О.А., Теплицкая Р.Б. Изменение от центра к краю колебаний яркости солнечной хромосферы по линиям Ca II. *Письма в АЖ*. 2013. Т. 39, № 4. С. 310–320. DOI: [10.7868/S0320010813030030](https://doi.org/10.7868/S0320010813030030).

Ожогина О.А., Теплицкая Р.Б. Изменение от центра к краю диска низкочастотных колебаний яркости солнечной хромосферы по линиям Ca II. *Письма в АЖ*. 2014. Т. 40, № 6. С. 404–415. DOI: [10.7868/S0320010814060060](https://doi.org/10.7868/S0320010814060060).

Теплицкая Р.Б., Турова И.П., Ожогина О.А. Колебания интенсивности в основаниях корональных дыр. *Письма в АЖ*. 2009. Т. 35, № 10. С. 789–800.

Турова И.П., Григорьева С.А., Ожогина О.А. Пространственные и временные вариации формы контуров линии K Ca II в различных структурных образованиях солнечной хромосферы. II. Методика определения и корреля-

ционные соотношения между параметрами линии для участков K₁ и K₂. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 4. С. 10–17. DOI: [10.12737/szf-64202002](https://doi.org/10.12737/szf-64202002).

Abbasvand V., Sobotka M., Švanda M., et al. Observational study of chromospheric heating by acoustic waves. *Astron. Astrophys.* 2020. Vol. 642. A52. DOI: [10.1051/0004-6361/202038559](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038559).

Athay R.G. Radiative energy loss from the solar chromosphere and corona. *Astrophys. J.* 1966. Vol. 146. P. 223–240.

Ballester J.L., Alexeev I., Collados M., et al. Partially ionized plasmas in astrophysics. *Space Sci. Rev.* 2018. Vol. 214, iss. 2, A58. DOI: [10.1007/s11214-018-0485-6](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0485-6).

Ballester J.L., Soler R., Terradas J., Carbonell M. Nonlinear coupling of Alfvén and slow magnetoacoustic waves in partially ionized solar plasmas. *Astron. Astrophys.* 2020. Vol. 641, A48. 17 p. DOI: [10.1051/0004-6361/202038220](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038220).

Beck C., Schmidt W., Rezaei R., Rammacher W. The signature of chromospheric heating in Ca II H spectra. *Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 479. P. 213–227. DOI: [10.1051/0004-6361:20078410](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20078410).

Beck C., Khomenko E., Rezaei R., Collados M. The energy of waves in the photosphere and lower chromospheres. I. Velocity statistics. *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 507. P. 453–467. DOI: [10.1051/0004-6361/200911851](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911851).

Bel N., Leroy B. Analytical study of magneto-acoustic gravity waves. *Astron. Astrophys.* 1977. Vol. 55. P. 239–243.

Bello González N., Flores Soriano M., Kneer F., Okunev O. On the energy flux in acoustic waves in the solar atmosphere. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. 2010. Vol. 81. P. 757–762.

Björger J.P., Sukhorukov A.V., Leenaarts J., et al. Three-dimensional modeling of the Ca II H and K lines in the solar atmosphere. *Astron. Astrophys.* 2018. Vol. 611, A62. DOI: [10.1051/0004-6361/201731926](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731926).

Carlsson M. Chromospheric modeling. *ASP Conference Ser.* 2006. Vol. 354. P. 291–300.

Carlsson M., Hansteen V.H., de Pontieu B., et al. Can high frequency acoustic waves heat the quiet Sun chromosphere? *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2007. Vol. 59. P. S663–S668.

Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Oscillations and wave propagation in different solar magnetic features. *ASP Conference Ser.* 2006. Vol. 358. P. 465–470.

Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Yu. Characteristics of oscillations in magnetic knots of solar faculae. *Astronomy Rep.* 2015. Vol. 59, no. 10. P. 968–973. DOI: [10.1134/S1063772915090036](https://doi.org/10.1134/S1063772915090036).

Chelpanov A., Kobanov N., Chelpanov M., Kiselev A. Propagating oscillations in the lower atmosphere under coronal holes. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296. Article id. 179. 13 p. DOI: [10.1007/s11207-021-01909-y](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01909-y).

Cowling T.G. The dissipation of magnetic energy in an ionized gas. *MNRAS*. 1956. Vol. 116. P. 114–124.

Cuntz M., Rammacher W., Musielak Z.E. Acoustic heating of the solar chromosphere: present indeed and locally dominant. *Astrophys. J.* 2007. Vol. 657. P. L57–L60.

Damé L., Gouttebroze P., Malherbe J.-M. Observation and analysis of intensity oscillations in the solar K-line. *Astron. Astrophys.* 1984. Vol. 130. P. 331–340.

DeForest C.E., Gurman J.B. Observation of quasi-periodic compressive waves in solar polar plumes. *Astrophys. J.* 1998. Vol. 501. P. L217–L220.

De Pontieu B., Erdélyi R., James S.P. Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows. *Nature*. 2004. Vol. 430. P. 536–539. DOI: [10.1038/nature02749](https://doi.org/10.1038/nature02749).

Deubner F.-L., Fleck B. Dynamics of the solar atmosphere. III. Cell-network distinction of chromospheric oscillations. *Astron. Astrophys.* 1990. Vol. 228. P. 506–512.

Fossum A., Carlsson M. Response functions of the ultraviolet filters of TRACE and the detectability of high-frequency acoustic waves. *Astrophys. J.* 2005a. Vol. 625. P. 556–562.

- Fossum A., Carlsson M. High-frequency acoustic waves are not sufficient to heat the solar chromospheres. *Nature*. 2005b. Vol. 435. P. 919–921. DOI: [10.1038/nature03695](https://doi.org/10.1038/nature03695).
- Fossum A., Carlsson M. Determination of the acoustic wave flux in the lower solar chromospheres. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 645. P. 579–592.
- Gafeira R., Jafarzadeh S., Solanki S.K., et al. Oscillations on width and intensity of slender CaII H fibrils from SUNRISE/SuFI. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2017. Vol. 229. Article id. 7. 6 p. DOI: [10.3847/1538-4365/229/1/7](https://doi.org/10.3847/1538-4365/229/1/7).
- Goodman M.L. On the mechanism of chromospheric network heating and the condition for its onset in the sun and other solar-type stars. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 533. P. 501–522.
- Grigoryeva S.A., Turova I.P., Ozhogina O.A. Studying Ca II line profile shapes and dynamic processes in the solar chromospheres at the base of a coronal hole. *Solar Phys.* 2016. Vol. 291. P. 1977–2002. DOI: [10.1007/s11207-016-0951-9](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0951-9).
- Gupta G.R., Subramanian S., Banerjee D., et al. Nature of quiet Sun oscillations using data from the *Hinode*, TRACE, and SOHO spacecraft. *Solar Phys.* 2013. Vol. 282. P. 67–86. DOI: [10.1007/s11207-012-0146-y](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0146-y).
- Heggland L., Hansteen V. H., De Pontieu B., Carlsson M. Wave propagation and jet formation in the chromospheres. *Astrophys. J.* 2011. Vol. 743. Article id. 142. 27 p. DOI: [10.1088/0004-637X/743/2/142](https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/142).
- Jafarzadeh S., Wedemeyer S., Fleck B., et al. An overall view of temperature oscillations in the SOLAR chromosphere with ALMA. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2021. Vol. 379. 28 p. DOI: [10.1098/rsta.2020.0174](https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0174).
- Jefferies S.M., McIntosh S.W., Armstrong J.D., et al. Magnetoacoustic portals and the basal heating of the solar chromospheres. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 648. P. L151–L155. DOI: [10.1086/508165](https://doi.org/10.1086/508165).
- Jess D.B., Morton R.J., Verth G., et al. Multiwavelength studies of MHD waves in the solar chromosphere. An overview of recent results. *Space Sci. Rev.* 2015. Vol. 190. P. 103–161. DOI: [10.1007/s11214-015-0141-3](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0141-3).
- Judge P.G. New perspectives on the photosphere/corona interface (Keynote). *ASP Conference Ser.* 2009. Vol. 415. P. 7–14.
- Judge P.G. The chromosphere: gateway to the corona?... Or the purgatory of solar physics? *Memorie della Societa Astronomica Italiano*. 2010. Vol. 81. P. 543–552.
- Judge P.G., Tarbell T.D., Wilhelm K. A study of chromospheric oscillations using the SOHO and TRACE spacecraft. *Astrophys. J.* 2001. Vol. 554. P. 424–444.
- Kayshap P., Murawski K., Srivastava A.K., et al. Vertical propagation of acoustic waves in the solar internetwork as observed by IRIS. *MNRAS*. 2018. Vol. 479. P. 5512–5521. DOI: [10.1093/mnras/sty1861](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1861).
- Khodachenko M.L., Arber T.D., Rucker H.O., Hanslmeier A. Collisional and viscous damping of MHD waves in partially ionized plasmas of the solar atmosphere. *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 422. P. 1073–1084. DOI: [10.1051/0004-6361:20034207](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034207).
- Khomenko E., Collados M. Heating of the magnetized solar chromosphere by partial ionization effects. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 747. P. 87–98. DOI: [10.1088/0004-637X/747/2/87](https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/2/87).
- Khomenko E., Santamaria I.C. Magnetohydrodynamic waves driven by p-modes. *J. Physics Conf. Ser.* 2013. Vol. 440, iss. 1. Article id. 012048. DOI: [10.1088/1742-6596/440/1/012048](https://doi.org/10.1088/1742-6596/440/1/012048).
- Khomenko E., Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Channeling 5 minute photospheric oscillations into the solar outer atmosphere through small-scale vertical magnetic flux tubes. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 676. P. L85–L88.
- Kobanov N.I. Lower chromospheres oscillations near 4 mHz. *Astron. Astrophys. Trans.* 2000. Vol. 19, iss. 2. P. 103–113. DOI: [10.1055/6790008241354](https://doi.org/10.1055/6790008241354).
- Kobanov N.I., Pulyaev V.A. Spatial distribution of oscillations in faculae. *Solar Phys.* 2011. Vol. 268. P. 329–334. DOI: [10.1007/s11207-010-9581-9](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9581-9).
- Leenaarts J., de la Cruz Rodríguez J., Danilovic S., et al. Chromospheric heating during flux emergence in the solar atmosphere. *Astron. Astrophys.* 2018. Vol. 612. A28. DOI: [10.1051/0004-6361/201732027](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732027).
- Lites B.W., Rutten R.J., Kalkofen W. Dynamics of the solar chromosphere. I. Long-period network oscillations. *Astrophys. J.* 1993. Vol. 414. P. 345–356.
- Martinez-Sykora J., de Pontieu B., Hansteen V., Carlsson M. The role of partial ionization effects in the chromospheres. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373, iss. 2042. P. 20140268–20140268. DOI: [10.1098/rsta.2014.0268](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0268).
- McAteer R.T.J., Gallagher P.T., Williams D.R., et al. Observational evidence for mode coupling in the chromospheric network. *Astrophys. J.* 2003. Vol. 587. P. 806–817.
- Mein N., Schmieder B. Mechanical flux in the solar chromospheres. III. Variation of the mechanical flux. *Astron. Astrophys.* 1981. Vol. 97. P. 310–316.
- Molnar M.E., Reardon K.P., Cranmer S.R., et al. High-frequency wave power observed in the solar chromosphere with IBIS and ALMA. *Astrophys. J.* 2021. Vol. 920. Article id. 125. 21 p. DOI: [10.3847/1538-4357/ac1515](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac1515).
- Piddington J.H. Solar atmospheric heating by hydromagnetic waves. *MNRAS*. 1956. Vol. 116. P. 314–323.
- Pietarila A., Socas-Navarro H., Bogdan T., et al. Simulation of quiet-Sun waves in the CaII infrared triplet. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 640. P. 1142–1152.
- Rajaguru S.P., Sangeetha C.R., Tripathi D. Magnetic fields and the supply of low-frequency acoustic wave energy to the solar chromospheres. *Astrophys. J.* 2019. Vol. 871. Article id. 155. 15 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aaf883](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf883).
- Reardon K.P. The effects of atmospheric dispersion on high-resolution solar spectroscopy. *Solar Phys.* 2006. Vol. 239. P. 503–517. DOI: [10.1007/s11207-006-0283-2](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0283-2).
- Reardon K.P., Uitenbroek H., Cauzzi G. The solar chromospheres at high resolution with IBIS. III. Comparison of CaII K and CaII 854.2 nm imaging. *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 500. P. 1239–1247. DOI: [10.1051/0004-6361/200811223](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811223).
- Shibata K., Nakamura T., Matsumoto T., et al. Chromospheric anemone jets as evidence of ubiquitous reconnection. *Science*. 2007. Vol. 318. P. 1591–1594. DOI: [10.1126/science.1146708](https://doi.org/10.1126/science.1146708).
- Shine R.A., Linsky J.L. Physical properties of solar chromospheric plages. II: Chromospheric plage models. *Solar Phys.* 1974. Vol. 39. P. 49–77.
- Shoda M., Yokoyama T. High-frequency spicule oscillations generated via mode conversion. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 854. Article id. 9. 10 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aaa54f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa54f).
- Simon G.W. A practical solution of the atmospheric dispersion problem. *Astronom. J.* 1966. Vol. 71, no. 3. P. 190–194.
- Smith P.D., Sakai J.I. Chromospheric magnetic reconnection: two-fluid simulations of coalescing current loops. *Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 486. P. 569–575. DOI: [10.1051/0004-6361:200809624](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200809624).
- Srivastava A.K., Kuridze D., Zaqarashvili T.V., Dwivedi B.N. Intensity oscillations observed with *Hinode* near the south pole of the Sun: leakage of low frequency magneto-acoustic waves into the solar corona. *Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 481. P. L95–L98. DOI: [10.1051/0004-6361:20079328](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079328).
- Srivastava A.K., Ballester J.L., Cally P.S., et al. Chromospheric heating by magnetohydrodynamic waves and instabilities. *JGR Space Phys.* 2021. Vol. 126. e2020JA029097. DOI: [10.1029/2020JA029097](https://doi.org/10.1029/2020JA029097).
- Suematsu Y. Influence of photospheric 5-minute oscillations on the formation of chromospheric fine structures. *Progress of Seismology of the Sun and Stars. Lecture Notes in Physics*. Berlin, Heidelberg. Springer. 1990. Vol. 367. P. 211–214. DOI: [10.1007/3-540-53091-6_83](https://doi.org/10.1007/3-540-53091-6_83).
- Taroyan Y., Erdelyi R. Heating diagnostics with MHD waves. *Space Sci. Rev.* 2009. Vol. 149. P. 229–254. DOI: [10.1007/s11214-009-9506-9](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9506-9).
- Teplitzkaya R.B., Turova I.P., Kuklin G.V. The study of the dynamic process of umbral flashes. *Publ. Debrecen Helio-physical Obs.* 1983. Vol. 5. P. 267–284.

Teplitskaya R.B., Ozhogina O.A., Turova I.P. Brightness distribution at the base of a coronal hole. *Astron. Lett.* 2006. Vol. 32, no. 2. P. 120–127. DOI: [10.1134/S106377370602006X](https://doi.org/10.1134/S106377370602006X).

Turova I.P. On the unusual H ϵ emission in a sunspot umbra spectrum. *Solar Phys.* 1994. Vol. 150. P. 71–79.

Turova I.P., Teplitskaya R.B., Kuklin G.V. The study of umbral flashes in the umbrae of two sunspots. *Solar Phys.* 1983. Vol. 87. P. 7–22. DOI: [10.1007/BF00151155](https://doi.org/10.1007/BF00151155).

Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet sun. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1981. Vol. 45. P. 635–725. DOI: [10.1086/190731](https://doi.org/10.1086/190731).

von Uexküll M., Kneer F. Oscillations of the Sun's chromospheres. VII. K grains revisited. *Astron. Astrophys.* 1995. Vol. 294. P. 252–259.

Withbroe G.L., Noyes R.W. Mass and energy flow in the solar chromosphere and corona. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1977. Vol. 15. P. 363–387. DOI: [10.1146/annurev.aa.15.090177.002051](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.15.090177.002051).

Zaqarashvili T.V., Khodachenko M.L., Rucker H.O. Magnetohydrodynamic waves in solar partially ionized plasmas: two-fluid approach. *Astron. Astrophys.* 2011. Vol. 529. A82. DOI: [10.1051/0004-6361/201016326](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016326).

Zweibel E.G. Magnetic reconnection in partially ionized gases. *Astrophys. J.* 1989. Vol. 340. P. 550–557.

URL: <https://SolarMonitor.org> (дата обращения 22 февраля 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Турова И.П., Григорьева С.А., Ожогина О.А. Линии CaII в спокойной области на Солнце. I. Динамические процессы в солнечной атмосфере. *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 2. С. 12–25. DOI: [10.12737/szf-92202302](https://doi.org/10.12737/szf-92202302).