

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ
ФОРМЫ КОНТУРОВ ЛИНИИ К Ca II
В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ СОЛНЕЧНОЙ ХРОМОСФЕРЫ.
I. ОСОБЕННОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ КОНТУРОВ**

**SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS
OF K Ca II LINE PROFILE SHAPES
IN DIFFERENT STRUCTURES OF THE SOLAR CHROMOSPHERE.
I. FEATURES OF INDIVIDUAL PROFILES**

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. Исследованы контуры линии К Ca II с использованием двух временных серий спектрограмм, снятых в двух областях вблизи центра диска Солнца. В каждой области на щель спектрографа попадал участок спокойной области и флоккул. Для выделенных хромосферных структур были построены контуры линии К и определен ряд параметров, которые характеризуют пространственные и временные изменения контуров. Анализ формы контуров разных структур, относящихся к одному и тому же моменту времени, показал, что есть структуры, контуры которых почти не отличаются друг от друга на уровне фотосферы, но резко отличаются в хромосфере. Различие начинается от уровня образования участка K_1 и продолжается дальше в хромосферу. Но есть структуры, для которых различия начинаются на уровне фотосферы и продолжаются в хромосферу. Вероятно, различие формы контуров в разных структурах связано как с разными термодинамическими условиями, так и с разной топологией магнитного поля в данной точке пространства в данный момент времени. Рассмотрены временные изменения контуров линии К Ca II в элементах хромосферной сетки, связанные с процессом K_{2v} -зерен. В большинстве исследованных участков хромосферных структур развитие поярчения K_{2v} -пика происходит по «стандартному» сценарию: в момент максимальной яркости линия смещается в красную сторону. Однако наблюдаются случаи, когда поярчение K_{2v} -пика либо сопровождается сдвигом линии в фиолетовую сторону, либо сдвиг вообще отсутствует. Построены графики рассеяния для некоторых пар параметров контуров, относящихся к интенсивностям в характерных точках контура и их смещениям. Обнаружена корреляция между интенсивностями в центре и крыльях линии К. Корреляция между смещениями пиков K_{2v} и K_{2r} очень слабая или совсем отсутствует.

Ключевые слова: хромосфера, контуры линии К Ca II, K_{2v} -зерна.

Abstract. We have studied Ca II K line profiles, using two time series of spectrograms taken in two regions near the solar disk center. In each of the regions, the spectrograph slit cut out several areas of the quiet region and a plage. For the selected chromospheric structures, we have derived K line profiles and have defined a number of parameters that characterize the spatial and temporal variations of the profiles. The analysis of profile shapes in different structures belonging to the same moment of time has shown that there are structures whose profiles differ only slightly from each other in the photosphere, but differ dramatically in the chromosphere. The structures begin to differ from the level of formation of K_1 and continue to differ further in the chromosphere. There are, however, structures which begin to differ at the level of the photosphere and continue to differ in the chromosphere. The difference between profile shapes in different structures is likely to be associated both with different thermodynamic conditions and with different magnetic field topology at a given point at a given time. We have examined temporal variations of the K Ca II line profiles in structural chromospheric elements, which are caused by the process of K_{2v} -grains. In most of the studied areas of the chromospheric structures, the brightening of the K_{2v} peak develops according to the “common” scenario: at the time of maximum brightness, the line shifts toward the red side. There are, however, cases when the brightening of the K_{2v} peak occurs with a shift of the line to the violet side or with no shift at all. We have constructed scatter plots for some pairs of profile parameters related to intensities at characteristic points of the profile and their shifts. A correlation has been found between intensities in the center and wings of the K line. The correlation between shifts of the K_{2v} and K_{2r} peaks is very weak or completely absent.

Keywords: chromosphere, K Ca II profiles, K_{2v} grains.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря развитию наблюдательной техники и теоретических методов накоплен большой объем знаний о хромосфере Солнца, однако ряд вопросов, связанных с физическими процессами, происходящими в этом слое, нуждается в дальнейшем уточнении. В этом контексте представляют интерес результаты, которые могут подтвердить уже полученные ранее и добавить уверенности в достоверности последних.

Данная работа является продолжением предыдущей работы авторов [Grigoryeva et al., 2016] по исследованию линий Ca II, основанной на наблюдениях двух областей, расположенных в основании корональной дыры. Каждая область включает участок спокойной хромосферы с яркими и темными структурами и флоккула.

Цель работы — исследовать некоторые особенности пространственных и временных вариаций контуров линии K Ca II в различных хромосферных структурах.

1. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

Спектрограммы в линиях Ca II получены 3 августа 2005 г. на Горизонтальном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории. Снимки сделаны с матрицей Princeton Instrument 2048×2048 пикселей в IV порядке. Дисперсия составляет 0.0023 нм/пиксел, пространственный размер — 0.45"/пиксел. Пространственное разрешение, ограниченное условиями видимости, составляет ~2". Время экспозиции 2.5 с, каденция 30 с. Размер поверхности Солнца, ограниченный высотой щели спектрографа, составляет ~200". Все полученные кадры исправлены за темновой ток и плоское поле.

Для исследования выбраны две временные серии спектрограмм продолжительностью ~25 мин. Каждая серия состоит из 45 кадров. Снимки относятся к областям на Солнце с координатами S25W17 и S25W12 в основании обширной корональной дыры. Область S25W12 включает в себя яркую корональную точку. На снимках каждой области содержатся участки спокойной хромосферы и один флоккул.

Для каждого пространственного пиксела в каждом кадре были построены контуры линии K Ca II. Общее число контуров в обеих сериях составляет ~41 000.

Детали наблюдений и отождествления хромосферных структур подробно описаны в работе [Grigoryeva et al., 2016].

Для исследования выделены хромосферные структуры, к которым мы применили следующие обозначения:

- «n» — яркая сеточная структура («сетка»);
- «ne» — усиленная сетка;
- «c» — темная внутрисеточная структура («ячейка»);
- «b» — флоккул;
- «p» — структура с пониженной яркостью, присутствующая на снимках одной из двух серий;

- «f» — участки на границах выделенных структур;

- «x» — структура с промежуточной яркостью, которая не относится к перечисленным выше структурам.

Все структуры, кроме флоккула, относятся к элементам хромосферной сетки. Общее число структур составляет 40 для области S25W12 и 30 — для S25W17.

Структуры «n», «f», «c» близки структурам, выделенным [Reardon et al., 2008] по наблюдениям с IBIS, где участки «f» соответствуют фибриллам, а «x» — неклассифицированным участкам, которые авторы не анализируют (см. рис. 1 в [Reardon et al., 2008]). Отождествление структур выполнено по интенсивности I_{K3} вдоль щели спектрографа, усредненной по времени (I_{K3} — минимальная интенсивность в центре линии). Ход I_{K3} для двух областей приведен на рис. 1.

Большинство результатов последних лет по линиям Ca II основано на фильтровых наблюдениях. При несомненных достоинствах таких наблюдений, позволяющих получать двумерные изображения, они имеют серьезное ограничение, обусловленное полосой пропускания фильтров. Самые современные кальциевые фильтры имеют полуширину полосы пропускания 0.3 Å, в то время как вклад хромосферы в линии H и K Ca II ограничен узкими ядрами линий шириной меньше чем 0.2 Å [Reardon et al., 2009]. Исключение составляет инструмент CHROMIS

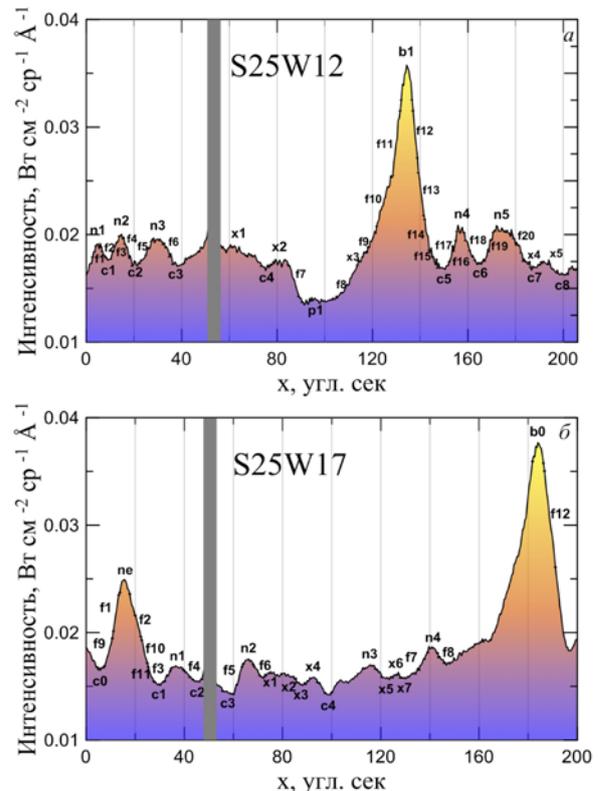


Рис. 1. Усредненная по времени интенсивность I_{K3} вдоль щели спектрографа: область S25W12 (а); область S25W17 (б). Буквенно-численные обозначения отмечают выделенные хромосферные структуры. Серая вертикальная полоса — нить, натянутая поперек щели спектрографа

[Löfdahl et al., 2018], введенный в эксплуатацию в августе 2016 г. на 1-метровом Шведском солнечном телескопе (SST). Ширина пропускания этого фильтра в настоящее время составляет около 0.13 \AA и будет доведена до 0.08 \AA в 2019 г. Очень часто используются фильтры с гораздо большей полушириной полосы пропускания (до 3 \AA). Такие наблюдения содержат смешанную информацию о большом слое солнечной атмосферы — от фотосферы до хромосферы. Спектроскопические наблюдения свободны от таких ограничений, хотя имеют и свои собственные, связанные, в частности, с дрожанием изображения на щели спектрографа. Система гидирования и система компенсации за вращение Солнца при наблюдении временных серий позволяет удерживать изображение на щели, но не справляется с мелким дрожанием, вызванным атмосферной турбулентностью. Частично компенсировать дрожание (по одной координате) удается методами постобработки. В частности, применялось совмещение последовательных кадров по максимуму коэффициента корреляции.

Мы определили ряд количественных параметров контуров линии К Са II, которые могут характеризовать изменения контуров по пространству и времени:

- I_{K3} — минимальная интенсивность в центре линии;
- I_{K2v} , I_{K2r} — интенсивности фиолетового и красного пиков соответственно;
- I_{K2v}/I_{K2r} — отношение интенсивностей пиков;
- $\Delta\lambda_{K3}$ — сдвиг минимума K_3 по оси длин волн относительно номинального центра линии;
- $\Delta\lambda_{K2v}$, $\Delta\lambda_{K2r}$ — сдвиги пиков K_{2v} и K_{2r} относительно номинального центра линии;
- $\Delta\lambda_{K2r} - \Delta\lambda_{K2v}$ — расстояние между пиками K_{2r} и K_{2v} ;
- $\Delta\lambda_{K2 \text{ ср}} = (\Delta\lambda_{K2r} + \Delta\lambda_{K2v})/2$ — средний сдвиг пиков K_{2v} и K_{2r} относительно номинального центра линии.

Была создана вычислительная программа в среде IDL для автоматического определения перечисленных параметров контуров линии. В процессе вычислений мы столкнулись с проблемой, аналогичной той, что описана в работе [Vj\o rgen et al., 2017]. Встречались случаи очень необычных контуров линии, например, с тремя пиками K_2 вместо двух, с отсутствием одного или обоих пиков K_2 или с очень большими смещениями пиков K_2 и минимума K_3 по длине волны. В некоторых из таких случаев программа давала некорректную идентификацию параметров и требовалось определять параметры вручную. Мы не приводим в статье данные об изменениях параметров контура на участках K_{1v} и K_{1r} . Участок K_{1r} плохо поддается машинной обработке, так как минимум K_{1r} очень часто отсутствует. Вследствие этого данные об интенсивности этого участка и его положении чрезвычайно зашумлены и ценность их невелика. Минимум K_{1v} зашумлен по той же причине, хотя и в меньшей степени.

2. ИЗМЕНЕНИЕ КОНТУРОВ ЛИНИИ К Са II ПО ПРОСТРАНСТВУ И ВРЕМЕНИ

Известно, что контуры линий Н и К Са II подвержены значительным изменениям как по про-

странству, так и во времени. Этот феномен исследуется на протяжении многих лет. Полученные результаты позволили значительно продвинуться в изучении солнечной хромосферы (см., среди прочих, [Pasachoff, 1970; Vappu, Sivaraman, 1971; Liu, Skumanich, 1974; Rezaei et al., 2008; Beck et al., 2008; Beck et al., 2009; Vj\o rgen et al., 2017]).

В нашей предыдущей работе [Grigoryeva et al., 2016] мы показали большое количество индивидуальных контуров линии К Са II, которые наблюдаются в выделенных нами хромосферных структурах (см. рис. 4–7 в [Grigoryeva et al., 2016]). Рассматривались контуры в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = \pm 0.5 \text{ \AA}$.

В данной работе для исследования пространственных и временных изменений контуров мы проанализировали ход интенсивности в линии К Са II на более протяженном интервале: $\Delta\lambda = \pm 2.0 \text{ \AA}$.

2.1. Изменения контуров по пространству

Для изучения пространственных вариаций контуров линии К Са II мы сравнили индивидуальные контуры, которые наблюдались в один и тот же момент времени в разных хромосферных структурах. Мы заметили, что некоторые структуры с экстремально отличающимися физическими условиями (см., например, 1D-модели семейства FAL [Fontenla et al., 2009]) показывают идентичный ход интенсивности в крыле линии. И наоборот, структуры одного и того же типа могут отличаться по величине интенсивности на всем диапазоне $\Delta\lambda = \pm(0.2-2.0) \text{ \AA}$. Для сравнения были выбраны контуры, где такие соотношения интенсивностей являются наиболее выраженными. Сравнились контуры, относящиеся к точкам, расположенным вблизи центров выбранных структур; каждый из контуров имеет минимальный сдвиг величины I_{K3} от центра линии. Такой подход позволяет более корректно сравнивать ход интенсивности в разных структурах.

На рис. 2, а–в приведены контуры, относящиеся к одному из кадров временной серии области S25W12. Все контуры даны в одинаковой шкале интенсивности и в одинаковой шкале по длине волны.

На рис. 2, а показаны контуры линии К, относящиеся к флоккулу «b1», ячейке «с2» и области пониженной яркости «p1». Бросается в глаза значительное различие контуров в области ядра линии и участков K_2 . Контуры отличаются не только по величине центральной интенсивности, но и по форме. В то же время в крыле линии в диапазоне длин волн $\Delta\lambda \approx \pm(0.5-2.0) \text{ \AA}$ интенсивности во всех трех структурах почти не отличаются друг от друга.

На рис. 2, б показаны контуры, которые наблюдаются в ячейке «с5», сетке «n4» и сетке «n5». В ядре линии и на участках K_2 контуры этих структур также отличаются друг от друга. Здесь интересен тот факт, что в диапазоне длин волн $\Delta\lambda \approx \pm(0.5-2.0) \text{ \AA}$ интенсивности в ячейке «с5» и сетке «n4» близки друг другу. Интенсивности в структурах одного типа «n4» и «n5» различаются; различие стабильно сохраняется на всем диапазоне $\Delta\lambda \approx \pm(0.5-2.0) \text{ \AA}$.

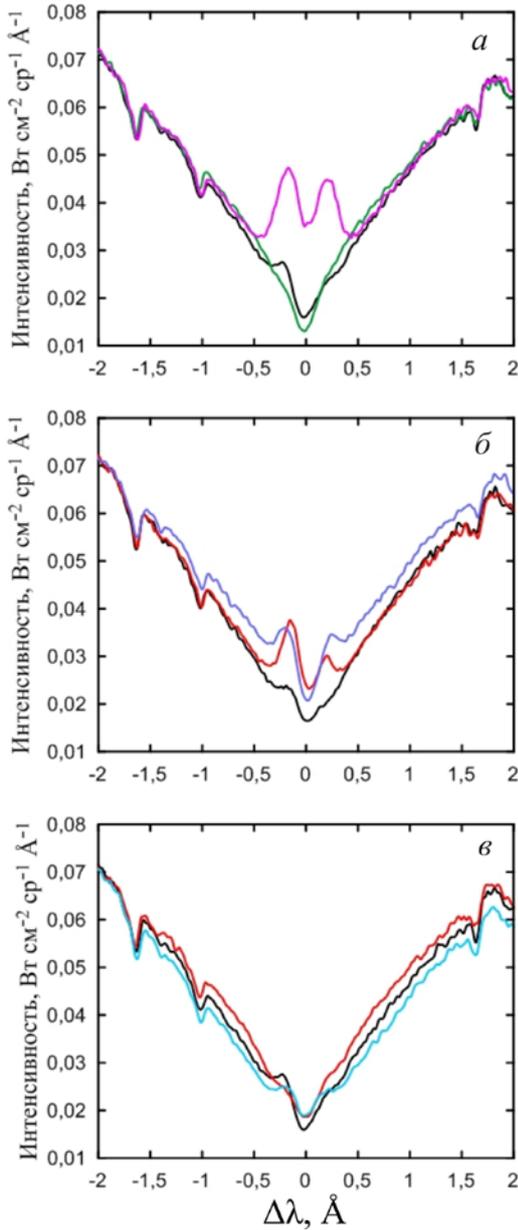


Рис. 2. Контуры линии К Ca II в разных хромосферных структурах области S25W12 для одного из моментов времени: а — флоккул «b1» (пурпурный), ячейка «с2» (черный), область пониженной яркости «p1» (зеленый); б — сетка «п5» (синий), ячейка «с5» (черный), сетка «п4» (красный); в — область промежуточной яркости «x1» (голубой), ячейка «с2» (черный), сетка «п3» (красный)

На рис. 2, в приведены контуры, относящиеся к ячейке «с2», сетке «п3» и области промежуточной яркости «x1». Интенсивности структур «п3» и «x1» в ядре линии близки друг другу, но отличаются от интенсивности ячейки «с2». В крыле линии на интервале длин волн $\Delta\lambda \approx \pm(0.2 \div 2.0)$ Å также заметны существенные различия между тремя структурами. Самое яркое крыло дает участок «п3», самое темное — участок «x1». Интенсивность линии в ячейке «с2» в этой области крыла линии занимает промежуточное положение. Мы не приводим рисунки для области S25W17, так как подобное поведение интенсивностей в ядре и крыле линии К Ca II здесь также сохраняется для ряда выбранных структур в одном из кадров временной серии этой области.

2.2. Изменения контуров во времени

Для исследования временного поведения формы контуров линии К Ca II рассматривались контуры линии в центральных точках участков всех выбранных хромосферных структур для каждого из кадров двух временных серий. Из этих контуров были отобраны те, которые имели наибольшие $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} > 1.1 \div 1.15$ и наименьшие $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} < 0.85 \div 0.99$ отношения интенсивностей. Примеры контуров с измеренными смещениями $\Delta\lambda_{K_3}$ приведены на рис. 3, а–з. Оказалось, что в большинстве случаев в момент максимального поярчения $I_{K_{2v}}$ минимум K_3 демонстрирует красное смещение (рис. 3, а, б). Это наблюдается в 45 случаях из 48 для области S25W12 и 65 случаях из 70 для области S25W17. Когда отношение пиков $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}}$ становится меньше единицы, минимум K_3 показывает синее смещение (рис. 3, д, е) — 16 случаев из 18 для области S25W12 и 40 случаев из 41 для области

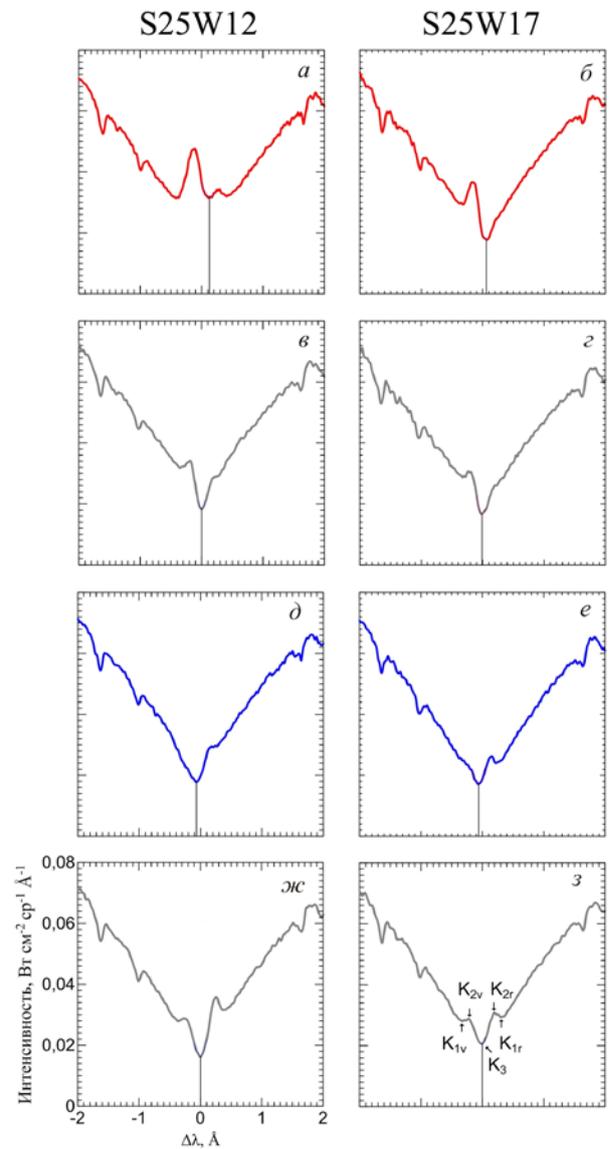


Рис. 3. Вариации смещений минимума K_3 в контурах линии К Ca II области S25W12 (левая панель) и S25W17 (правая панель) при $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} > 1$ (а–в) и $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} < 1$ (д–ж). Серый цвет кривых отмечает случаи нестандартного поведения процесса K_{2v} -зерен. Показано положение пиков K_{2v} , K_{2r} , минимумов K_{1v} , K_{1r} и K_3

Таблица 1

Статистические оценки смещений $\Delta\lambda_{K3}$

Параметр	$I_{K2v}/I_{K2r} > 1$		$I_{K2v}/I_{K2r} < 1$	
	S25W12	S25W17	S25W12	S25W17
Число точек	48	70	18	41
Минимальное смещение, Å	0	-0.01	0	-0.008
Максимальное смещение, Å	0.128	0.065	-0.07	-0.06
Диапазон, Å	0.128	0.075	0.07	0.052
Среднее смещение, Å	0.032	0.025	-0.029	-0.034
Среднее отклонение, Å	0.015	0.012	0.013	0.011

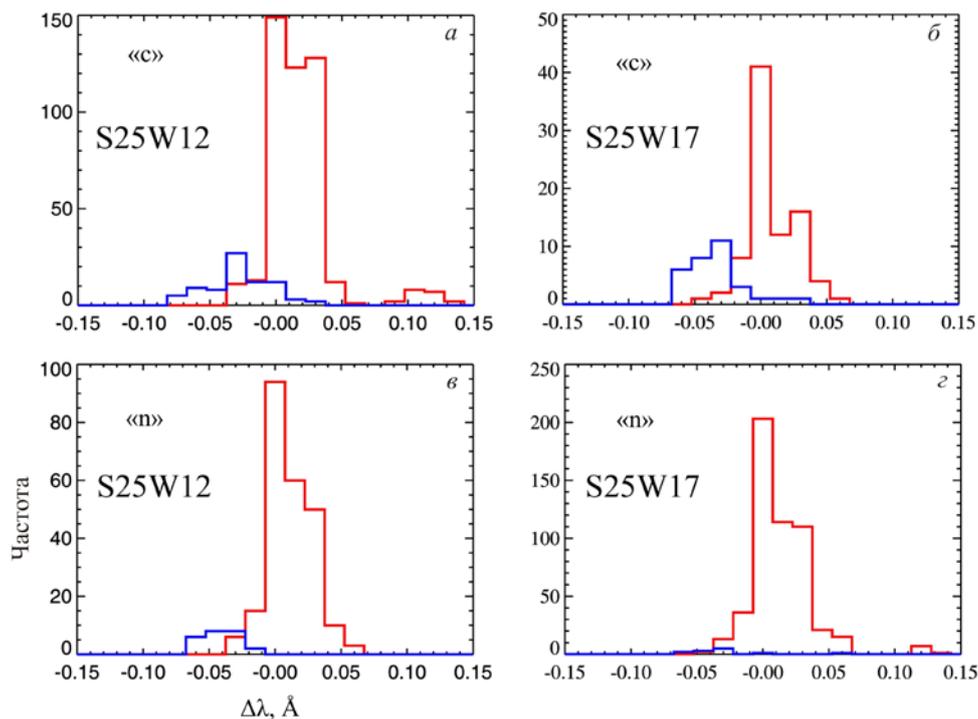


Рис. 4. Гистограммы распределений смещения центра линии $\Delta\lambda_{K3}$ для отношений $I_{K2v}/I_{K2r} > 1.15$ (красная линия) и $I_{K2v}/I_{K2r} < 0.85$ (синяя линия) в двух временных сериях для структур «с» и «п»

S25W17. На рис. 4 приводятся примеры гистограмм распределений смещения $\Delta\lambda_{K3}$ для значений отношения $I_{K2v}/I_{K2r} > 1.15$ и $I_{K2v}/I_{K2r} < 0.85$. Статистические оценки смещений даны в табл. 1.

2.3. Соотношения между интенсивностями и смещениями контура в центре и крыле линии

Для исследования зависимостей между различными параметрами контуров линии К Са II в каждой хромосферной структуре мы использовали выборки, содержащие все пространственные точки, принадлежащие данной структуре (например, все пространственные точки всех участков структуры «с»), во все моменты времени. В табл. 2 приводятся вычисленные средние коэффициенты корреляции между выбранными параметрами линии К Са II. В двух верхних строках таблицы даны координаты областей пространства, обозначения хромосферных структур и количество точек для каждой выборки.

Мы также построили графики рассеяния для всех пар параметров, перечисленных в табл. 2. На рис. 5 приведены графики рассеяния для пар параметров $\Delta\lambda_{K3} - I_{K2v}/I_{K2r}$, $\Delta\lambda_{K2v} - \Delta\lambda_{K2r}$, $I_{K2r} - I_{K2v}$, и $I_{K2v} - I_{K3}$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на довольно скромный набор нашей выборки для исследования пространственных вариаций контуров, нетрудно заметить особенности поведения интенсивности линии К Са II в разных хромосферных структурах. Контуров, приведенные на рис. 2, а-в, позволяют сравнить между собой ход интенсивностей в ядре, на участках K_2 и в крыле линии.

Как отмечалось в разделе 2.1, самые большие отличия контуров наблюдаются в их центральных частях. При сравнении контуров для разных структур в диапазоне $\Delta\lambda \approx \pm 0.3$ Å следует обратить внимание на две характеристики — минимальную интенсивность

Таблица 2

Средние коэффициенты корреляции ρ_{cp} для различных пар параметров контура линии К Ca II в разных хромосферных структурах

№	Параметры Число точек	S25W12						S25W17				
		«с» 3375	«п» 2205	«b» 495	«f» 2115	«x» 2745	«p» 1530	«с» 1935	«п» 2430	«b» 495	«f» 2160	«x» 3195
1	$\Delta\lambda_{K2v}-\Delta\lambda_{K2r}$	-0.08	-0.17	-0.02	-0.11	0.04	0.02	0.14	0.18	-0.11	0.03	0.18
2	$\Delta\lambda_{K2r}-I_{K2r}$	0.51	0.06	0.07	0.16	0.30	0.72	0.23	0.12	0.13	-0.04	0.44
3	$\Delta\lambda_{K2v}-I_{K2r}$	-0.33	-0.17	-0.20	-0.12	-0.08	-0.01	-0.11	0.07	-0.17	-0.03	-0.09
4	$\Delta\lambda_{K2r}-I_{K2v}$	0.34	0.01	0.22	0.05	0.12	0.03	0.16	0.10	0.34	0.03	0.36
5	$\Delta\lambda_{K2v}-I_{K2v}$	-0.20	0.26	0.06	0.09	0.07	-0.71	-0.01	0.27	-0.11	0.20	0.14
6	$\Delta\lambda_{K2r}-\Delta\lambda_{K3}$	0.31	0.22	0.29	0.19	0.29	0.17	0.36	0.44	0.41	0.29	0.47
7	$\Delta\lambda_{K2v}-\Delta\lambda_{K3}$	0.25	0.29	0.34	0.10	0.10	-0.21	0.46	0.68	0.14	0.51	0.54
8	$\Delta\lambda_{K3}-I_{K2v}/I_{K2r}$	0.46	0.59	0.70	0.58	0.63	0.17	0.54	0.46	0.70	0.66	0.58
9	$I_{K2r}-I_{K2v}$	0.66	0.49	0.29	0.51	0.48	0.25	0.71	0.77	-0.03	0.66	0.57
10	$I_{K2r}-I_{K3}$	0.38	0.53	0.41	0.48	0.42	0.30	0.72	0.86	0.51	0.78	0.42
11	$I_{K2v}-I_{K3}$	0.35	0.53	0.63	0.41	0.49	0.33	0.68	0.82	0.20	0.70	0.39
12	$(\Delta\lambda_{K2r}-\Delta\lambda_{K2v})-\Delta\lambda_{K2v}$	-0.75	-0.72	-0.61	-0.76	-0.73	-0.77	-0.63	-0.59	-0.76	-0.67	-0.66
13	$(\Delta\lambda_{K2r}-\Delta\lambda_{K2v})-\Delta\lambda_{K3}$	0.03	-0.02	0.03	0.06	0.12	0.28	-0.05	-0.15	0.17	-0.14	-0.07
14	$(\Delta\lambda_{K2r}-\Delta\lambda_{K2v})-I_{K2v}$	0.58	-0.02	0.14	0.20	0.35	0.63	0.14	-0.12	0.30	-0.12	0.16
15	$(\Delta\lambda_{K2r}-\Delta\lambda_{K2v})-I_{K3}$	0.06	-0.33	-0.33	-0.23	0.05	0.11	-0.03	-0.27	-0.24	-0.29	-0.17
16	$(\Delta\lambda_{K2r}-\Delta\lambda_{K2v})-I_{K2v}/I_{K2r}$	-0.18	-0.26	-0.01	-0.13	-0.08	-0.15	-0.14	-0.28	0.13	-0.16	-0.15
17	$\Delta\lambda_{K2cp}-\Delta\lambda_{K2v}$	0.70	0.58	0.59	0.68	0.76	0.78	0.74	0.74	0.69	0.70	0.78
18	$\Delta\lambda_{K2cp}-\Delta\lambda_{K3}$	0.41	0.39	0.44	0.21	0.26	-0.06	0.54	0.72	0.41	0.55	0.66
19	$\Delta\lambda_{K2cp}-I_{K2v}$	-0.19	-0.06	0.22	-0.28	-0.26	-0.58	0.10	0.24	0.17	0.16	0.32
20	$\Delta\lambda_{K2cp}-I_{K3}$	-0.15	-0.14	-0.03	-0.12	-0.03	-0.20	0.03	0.07	-0.13	-0.09	0.02
21	$\Delta\lambda_{K2cp}-I_{K2v}/I_{K2r}$	-0.14	0.17	0.26	-0.04	-0.11	-0.72	0.02	0.15	0.16	0.25	0.21

I_{K3} и форму контура. Именно по величине минимальной интенсивности I_{K3} выполнялось отождествление хромосферных структур в пространственных областях S25W12 и S25W17 (см. рис. 1, а, б). Хотя величины I_{K3} в индивидуальных контурах могут несколько отличаться от усредненных по времени значений, приведенных на рис. 1, а, б, подобие их хода сохраняется в пределах исследуемых пространственных областей.

Форма контура в области ядра линии К и участков K_2 зависит от физических условий в средней и нижней хромосфере, где образуются эти участки. Здесь важна совокупность таких факторов, как температурная стратификация и поле скоростей, которое определяется динамическим состоянием среды в

данный момент времени в данном месте. Причем влияние температурной стратификации главным образом отражается на участках K_2 .

Отдельно следует остановиться на контуре, который наблюдается в области пониженной яркости «р1». Мы уже писали о контурах этой области в нашей предыдущей работе [Grigoryeva et al., 2016]. В ней приведены также беспиковые контуры, которые наблюдались в структурах «с» и «х». Беспиковые контуры подробно исследованы в работе [Rezaei et al., 2008]. По данным этих авторов, такие контуры составляют $\approx 25\%$ от числа наблюдаемых ими контуров. Для воспроизведения такой формы контуров они использовали несколько 1D статических моделей, а также модель Holweger—Müller [Holweger,

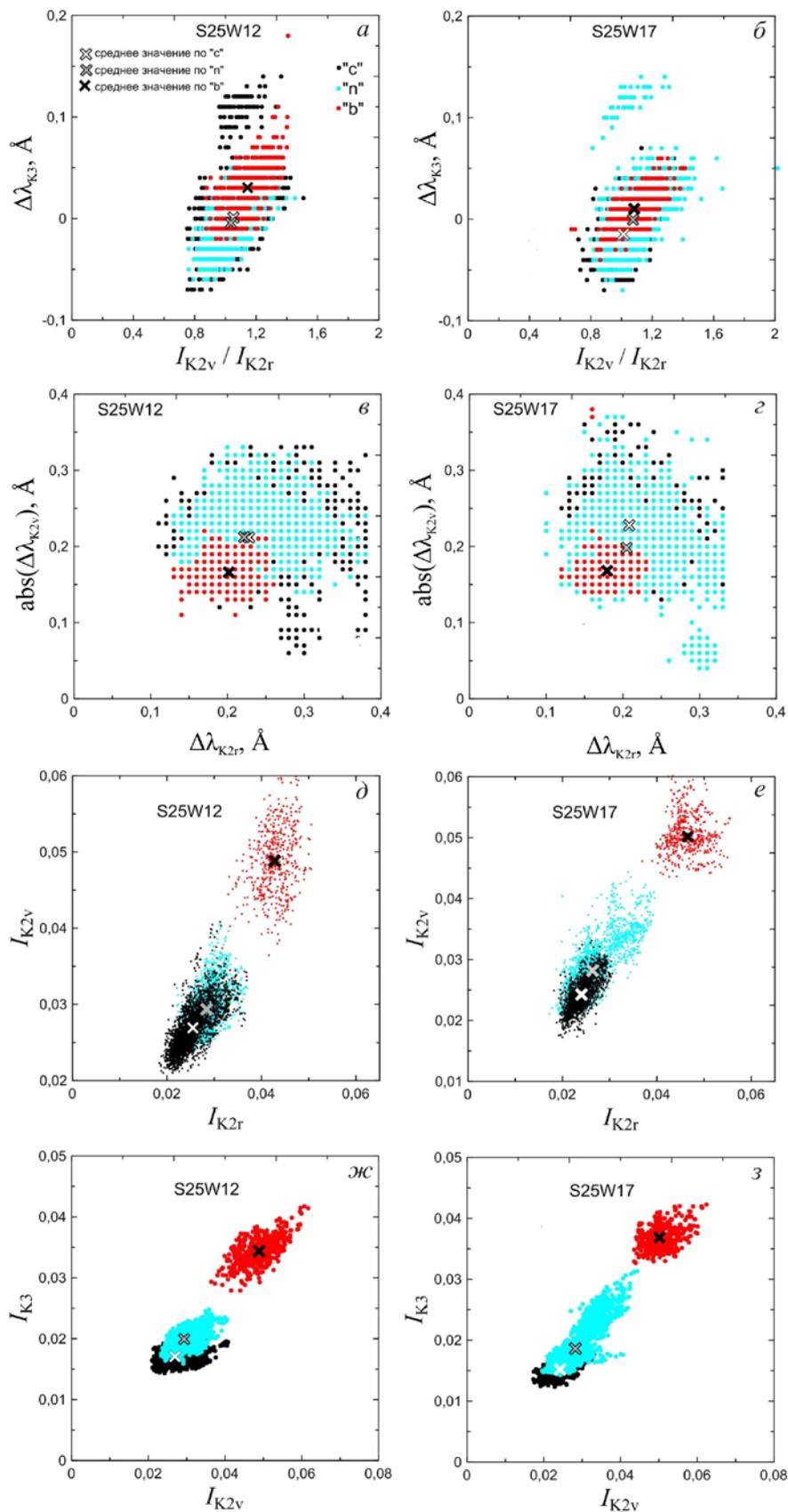


Рис. 5. Графики рассеяния различных пар параметров контура линии К Ca II для структур «с», «п», «б» в областях S25W12 (левая панель) и S25W17 (правая панель): а, б — смещения центра линии $\Delta\lambda_{K3}$ в зависимости от отношения интенсивностей I_{K2v}/I_{K2r} ; в, з — смещения фиолетового пика $\Delta\lambda_{K2v}$ в зависимости от смещений красного пика $\Delta\lambda_{K2r}$; д, е — интенсивности фиолетового пика I_{K2v} в зависимости от интенсивности красного пика I_{K2r} ; ж, з — интенсивности минимума K_3 в зависимости от интенсивности фиолетового пика I_{K2v} . Черные кружки относятся к структурам «с»; голубые кружки — к структурам «п», красные кружки — к структурам «б». Интенсивности даны в тех же единицах, что и на рис. 3

Müller, 1974]. Однако ни одна из рассмотренных ими гидростатических моделей с хромосферным ростом температуры не смогла воспроизвести беспикутовую форму контура.

Что касается интенсивностей в крыльях линии, то здесь мы столкнулись с неожиданным фактом, который представлен на рис. 2, а, б. На рис. 2, а показаны контуры, принадлежащие структурам с экстремально отличающимися физическими условиями: флоккулу «b1», ячейке «с2» и области пониженной яркости «р1». Интенсивности крыльев линии К в этих структурах почти не отличаются в противоположность интенсивностям в их центральных частях. Такой ход интенсивностей начинается от значения $\Delta\lambda = \pm 2 \text{ \AA}$ и заканчивается вблизи значений $\Delta\lambda$, которые соответствуют местоположению участков K_{1v} и K_{1r} ($\Delta\lambda \approx \pm(0.3 \div 0.5 \text{ \AA})$). На рис. 2, б идентичные интенсивности наблюдаются в крыльях линии для ячейки «с5» и сетки «п4». Аналогичная картина в крыле линии H Ca II наблюдалась в работе [Beck et al., 2008], в которой сравнивались усредненные контуры для области со слабым магнитным полем и области, в которой магнитное поле не обнаружено.

Иначе на рис. 2, б выглядит контур линии в сетке «п5». Он ярче, чем контур в ячейке «с5» на всем интервале $\Delta\lambda = \pm 2 \text{ \AA}$. Кроме того, он ярче, чем контур в сетке «п4» в области крыла от значения $\Delta\lambda = \pm 2 \text{ \AA}$ до местоположения участков K_{1v} и K_{1r} . При этом в центре линии контур в сетке «п5» темнее и имеет более симметричные пики K_2 , чем контур сетки «п4». Существенное различие в интенсивностях контуров для однотипных структур в один и тот же момент времени может свидетельствовать либо о том, что они находятся на разных стадиях динамического процесса, свойственного структурам данного типа, либо о том, что даже в структурах одного типа могут работать разные процессы, приводящие к эмиссии в линии К Ca II. Если сравнить контуры сетки «п5» и ячейки «с5» и учесть, что в сеточных структурах присутствуют более сильные магнитные поля, чем в ячейках, то для более яркого контура сетки «п5» можно воспользоваться предположением [Beck et al., 2008] о магнитном нагреве хромосферы. При этом увеличивается интенсивность линии в спектральном диапазоне, включающем крыло линии. Однако эти авторы не исключают ситуации, когда увеличение интенсивности в крыле линии может быть не связано с процессом нагрева, а являются результатом сдвига шкалы оптической глубины при наличии магнитного поля.

Ход интенсивностей линии К для структур, представленных на рис. 2, в, выглядит более ожидаемым для сетки «п3» и ячейки «с2». По всему диапазону $\Delta\lambda = \pm 2 \text{ \AA}$ контур сетки ярче контура ячейки, за исключением пика K_{2v} , который в ячейке ярче, чем в сетке. На участке промежуточной яркости «x1» крыло линии более темное, чем в ячейке «с2», хотя ядро линии более яркое.

Из рис. 2, а–в следует, что ход интенсивности в крыле линии К, т. е. на уровне фотосферы, не всегда может однозначно указывать на тип эмиссии, которая будет иметь место в хромосфере. Видно,

что даже при идентичных интенсивностях в области крыла для отдельных структур кардинальные отличия контуров начинаются от уровня образования участков K_1 , который находится между верхней фотосферой и нижней хромосферой. Вероятно, в этих слоях начинают проявляться процессы, которые приводят к формированию эмиссии, наблюдающейся в средней хромосфере.

Анализ контуров линии К в разных хромосферных структурах, относящихся к одному тому же моменту времени, показывает, что их форма зависит как от температурной стратификации, так и от динамического режима во всем слое образования линии — от фотосферы до средней хромосферы.

Одно из динамических явлений, связанных с изменениями контуров линий Ca II во времени, — это так называемые яркие зерна (вспышки или точки в другой терминологии), обнаруженные первоначально во внутренних частях хромосферной сетки. В ряде работ [например, Cram, 1974; Cram et al., 1977; Cram, Dame, 1983; Rutten, Uitenbroek, 1991; Kamio, Kurokawa, 2006; Beck et al., 2008] картина вариаций контура линий Ca II, связанных с яркими зернами, была описана следующим образом. Возникает поярчение в крыльях линии, которое распространяется к ее центру. В это же время ядро линии постепенно смещается в красную сторону. Появляется сильное поярчение на фиолетовой стороне от центра линии при значительном ослаблении или отсутствии пика с красной стороны, т. е. $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} > 1$. Эти поярчения и называются K_{2v} -зернами. Минимум K_3 в момент K_{2v} -вспышки максимально смещен в красную сторону. Затем происходит резкое затухание зерна, а минимум K_3 смещается в фиолетовую сторону. Иногда при этом наблюдаются поярчения красного пика K_{2r} , т. е. $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} < 1$. Такая картина изменений контура линии была названа стандартной в обзоре [Rutten, Uitenbroek, 1991]. Размер K_{2v} -зерна, по различным оценкам, составляет 0.7–3 угл. сек [Liu, 1974; Beck et al., 2008; Vecchio et al., 2009]. Периодичность появления K_{2v} -зерен была определена как 3 мин.

Процесс генерации слабыми акустическими ударами K_{2v} -зерен был промоделирован в работе [Carlsson, Stein, 1997]. Было найдено довольно хорошее соответствие модели и описанной выше картины. В эти же годы были опубликованы и другие предположения о физике процесса K_{2v} -зерен [см., Kalkofen, 1996 и ссылки там].

Однако дальнейшие наблюдения выявили, что, во-первых, периодичность появления зерен может занимать не только трехминутный диапазон [Kalkofen, 1996; Lites et al., 1999; Beck et al., 2008]. В нашей работе [Grigoryeva et al., 2016] было также показано, что K_{2v} -зерна имеют сложный спектральный состав колебаний. Во-вторых, ход изменений в контуре линии может отличаться от стандартной картины. И, в третьих, зерна могут встречаться не только во внутренних частях хромосферной сетки, но и во внешних ярких частях [Rutten, Uitenbroek, 1991; Kalkofen, 1996, 1997; Lites et al., 1999; Beck et al., 2008].

Проведенное в нашей работе исследование показало, что большинство смещений K_3 соответствует картине «стандартной» эволюции $I_{K_{2v}}$ -зерен. Были обнаружены и отклонения от стандартной картины. Это можно видеть на рис. 3, в, з, ж, з. Как показывает табл. 2, есть случаи, когда минимум K_3 в момент вспышки K_{2v} -зерна оказывается смещенным не в красную, а в фиолетовую сторону (3 случая из 48 для области S25W12 и 5 случаев из 70 для области S25W17). Имеются также случаи красного смещения минимума K_3 в моменты минимального отношения $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}}$. Однако следует подчеркнуть, что для обеих серий в структурах «п» и «с» преобладает тенденция стандартной картины — смещения центра линии K_3 в красную сторону для больших значений отношения $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}}$ и в фиолетовую сторону — для малых (рис. 4). Такая же тенденция заметна и для структур «f», «x», «b» (графики не приводятся).

Также можно отметить, что количество контуров, для которых отношение $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} < 0.85$, значительно меньше, чем количество контуров, для которых $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} > 1.15$ (рис. 4). Контуров с интенсивностью красного пика K_{2r} , большей, чем интенсивность фиолетового пика K_{2v} , встречаются редко. Положительная асимметрия контуров ($I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}} > 1$), по модельным вычислениям [Björge et al., 2017], вызвана комбинацией потока вверх на высоте 1.2 Мм и потока вниз на высоте 2.4 Мм и увеличением функции источников на высоте 1.2 Мм.

По наблюдениям в ранних работах [см., например, Lites et al., 1993 и ссылки там] колебательные процессы во внутренних и внешних частях хромосферной сетки различаются. В работе [Lites et al., 1993] утверждается, что в момент вспышки в сетке всегда происходит одновременное поярчение фиолетового и красного пиков. Низкочастотные колебания ($f < 3$ мГц), наблюдаемые в сетке, по их данным, не коррелированы с колебаниями в нижележащих слоях и ограничены хромосферными слоями, в отличие от более высокочастотных колебаний в «ячейке». На основании этих наблюдений Lites et al. [1993] делают вывод, что колебания в «сетке» и «ячейке» имеют фундаментальные отличия. Наблюдения [Vecchio et al., 2009] по фотосферной линии Fe I 709.0 нм и хромосферной линии Ca II 854.2 нм с высоким пространственным разрешением (0.166"/пиксел) показали, что чисто акустические трехминутные вертикальные колебания не повсеместны. Даже в спокойных внутренних частях хромосферной сетки трехминутные колебания занимают 25–30 % площади. Они значительно подавлены из-за присутствия наклонных фибрилл и более мелко-масштабных элементов магнитного поля. Магнитное поле в значительной степени определяет динамические процессы в хромосферной сетке. Шоки с различными характеристиками наблюдаются как в областях «сетки», так и в областях «ячейки» [Reardon et al., 2008].

В нашей работе [Grigoryeva et al., 2016] мы подробно исследовали встречаемость K_{2v} -зерен в различных хромосферных структурах. Оказалось, что K_{2v} -зерна происходят в любой из рассмотренных нами структур. Рисунок 3, б настоящей работы,

представляющий один из примеров K_{2v} -зерна в сетке, показывает явную асимметрию интенсивностей фиолетового и красного пиков во время фазы максимума.

Полученные нами результаты свидетельствуют о разнообразии колебательных процессов в хромосферной сетке. Вероятно, во многом это связано с тем, что магнитное поле оказывает влияние не только на процессы, происходящие в магнитных «сетках», но и на процессы, происходящие в «ячейках».

Для того чтобы установить возможные связи между выбранными парами параметров контуров линии K (см. табл. 2), были построены графики рассеяния. Мы использовали, как уже упоминалось в разделе 2.3, выборки, содержащие все пространственные точки однотипных хромосферных структур во все моменты времени временной серии. Эти графики отражают общие свойства структур. Они не связаны напрямую с различными локальными динамическими процессами, происходящими в хромосферной сетке. Тем не менее, графики рассеяния смещения $\Delta\lambda_{K3}$ в зависимости от отношения интенсивностей $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}}$ (рис. 5, а, б) указывают на наличие отмеченной выше для K_{2v} -зерен тенденции: смещение $\Delta\lambda_{K3}$ увеличивается при увеличении отношения интенсивностей $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}}$, хотя имеется значительный разброс значений. Высокая корреляция этих параметров отмечается в работе [Rezaei et al., 2007].

Можно отметить слабую корреляцию или ее отсутствие между параметрами $\Delta\lambda_{K_{2v}}$ и $\Delta\lambda_{K_{2r}}$ (табл. 2). Это подтверждают и графики рассеяния для этой пары параметров (рис. 5, в, з). Пики K_{2v} и K_{2r} смещаются практически независимо друг от друга. Частично отсутствие корреляции можно было бы объяснить тем, что не всегда можно определить положение пика K_{2v} . Еще в большей степени это относится к пику K_{2r} . Но, при отсутствии проблемы с определением пиков во флоккулах, их смещения также не коррелированы. Кроме того, во всех структурах интенсивности $I_{K_{2v}}$ и $I_{K_{2r}}$ при тех же проблемах с определением положения пиков имеют коэффициенты корреляции, значимо отличающиеся от нуля. Это можно видеть и на графиках рассеяния, приведенных на рис. 5, д, е. Исключение составляет флоккул из области S25W17 (см табл. 2 и рис. 5, е).

Не обнаружено существенной корреляции между параметром $\Delta\lambda_{K_{2r}} - \Delta\lambda_{K_{2v}}$ и остальными параметрами, за двумя исключениями. Существует очевидная корреляция $\Delta\lambda_{K_{2r}} - \Delta\lambda_{K_{2v}}$ со смещением $\Delta\lambda_{K_{2v}}$ и корреляция $\Delta\lambda_{K_{2r}} - \Delta\lambda_{K_{2v}}$ с интенсивностью $I_{K_{2v}}$ в структурах со слабым магнитным полем «с» и «р» области S25W12.

Имеется высокая корреляция среднего сдвига пиков $\Delta\lambda_{K2\text{ ср}}$ со сдвигами $\Delta\lambda_{K_{2v}}$ и $\Delta\lambda_{K3}$. Этот параметр слабо коррелирует с интенсивностями $I_{K_{2v}}$, I_{K3} и отношением $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}}$, за исключением высокой корреляции $\Delta\lambda_{K2\text{ ср}}$ с $I_{K_{2v}}$ и $I_{K_{2v}}/I_{K_{2r}}$ для структуры со слабым магнитным полем «р».

Высокая корреляция отмечается для пар параметров $I_{K_{2r}} - I_{K3}$ и $I_{K_{2v}} - I_{K3}$ области S25W17. Особенно высока она для структур «с» и «п». Интенсивность контура линии в этих структурах имеет

тенденцию одновременно изменяться и в крыльях, и в центре линии. Во флоккуле корреляция ниже. В области S25W12 корреляции пар параметров $I_{K_{2r}}-I_{K_3}$ и $I_{K_{2v}}-I_{K_3}$ ниже, чем в области S25W17. Отмеченные тенденции можно видеть на рис. 5, e, z, где приведены графики рассеяния I_{K_3} в зависимости от $I_{K_{2v}}$ для двух областей. Значимая корреляция интенсивностей в ядре и крыльях линии К Са II отмечалась в работе [Grossmann-Doerth et al., 1974]. Авторы объясняли полученные результаты распределением функции источников. Эмпирическая функция источников увеличена на большом диапазоне высот солнечной атмосферы, приблизительно от 600 до 2000 км (см. рис. 8 в [Grossmann-Doerth et al., 1974]). Такой интерпретации не противоречат и результаты 3D-моделирования [Björge et al., 2017] (см. их рис. 8, d). Различия корреляций в двух областях пространства, S25W17 и S25W12, для пар параметров $I_{K_{2r}}-I_{K_3}$ и $I_{K_{2v}}-I_{K_3}$, образующихся в нижней и средней хромосфере, могут быть связаны с различием физических условий в этих областях. Напомним, что область S25W17 расположена в основании центральной части корональной дыры, а область S25W12 находится под периферией яркой корональной точки вблизи границы корональной дыры (см. рис. 1 из [Grigoryeva et al., 2016]). Связь между процессами, происходящими на уровнях образования K_{2v} (K_{2r}) и K_3 , может быть ослаблена в случае возможной локально закрытой магнитной топологии [Vecchio et al., 2009] в области S25W12.

ВЫВОДЫ

1. В хромосферных структурах разного типа, наблюдающихся в один и тот же момент времени, может иметь место ситуация, когда принадлежащие этим структурам контуры линии К Са II почти не отличаются друг от друга на уровне фотосферы. Различия начинаются от уровня формирования участка K_1 , который образуется между верхней фотосферой и нижней хромосферой. Вместе с тем, есть структуры, для которых различия начинаются в фотосфере и продолжают в хромосферу. Это наблюдается не только в разных структурах, но и в структурах одного и того же типа. Вероятно, особенности контуров линии К Са II, наблюдающиеся в разных хромосферных структурах, обусловлены не только и не столько различием температурной стратификации, но главным образом характером динамического процесса и структурой магнитного поля, которые присутствуют в данный момент времени в данной точке пространства.

2. Временные вариации контуров линии К Са II свидетельствуют о многообразном характере колебаний в хромосферной сетке. K_{2v} -зерна встречаются во всех выделенных хромосферных структурах. Преобладает тенденция стандартного развития процесса K_{2v} -зерен, хотя встречаются и отклонения от него.

3. Объединенные по однотипным структурам параметры контуров линии демонстрируют значимую корреляцию интенсивностей в центре и крыльях линии, особенно для структур «с» и «п» области S25W17, находящейся в основании центральной

части корональной дыры. Для таких же структур из области S25W12 корреляции интенсивностей $I_{K_{2v}}$ и $I_{K_{2r}}$ с I_{K_3} ниже, что может быть связано с расположением области в основании периферийной части яркой корональной точки вблизи границы корональной дыры.

Обнаружено, что между смещениями пиков K_{2v} и K_{2r} для обеих исследованных областей корреляция слабая или вообще отсутствует.

Полученные результаты требуют дальнейшего исследования с привлечением наблюдательного материала по другим областям на Солнце.

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>.

Авторы выражают благодарность В.М. Григорьеву за ценные обсуждения. Авторы благодарят рецензента за критические замечания и конструктивные предложения по содержанию рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bappu M.K.V., Sivaraman K.R. K emission-line widths and the solar chromosphere // *Solar Phys.* 1971. V. 17. P. 316–330.
- Beck C., Schmidt W., Rezaei R., Rammacher W. The signature of chromospheric heating in Ca II H spectra // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 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 chromosphere I. Velocity statistics // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 507. P. 453–467. DOI: [10.1051/0004-6361/200911851](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911851).
- Björge J.P., Sukhorukov A.V., Leenaarts J., et al. Three-dimensional modeling of the Ca II H&K lines in the solar atmosphere // *ArXiv:1712.01045v1* [astro-ph.SR]. 2017.
- Carlsson M., Stein R.F. Formation of solar calcium H and K bright grains // *Astrophys. J.* 1997. V. 481. P. 500–514.
- Cram L.E. High resolution spectroscopy of the disk chromospheres // *Solar Phys.* 1974. V. 37. P. 75–83.
- Cram L.E., Damé L. High spatial and temporal resolution observations of the solar Ca II H line // *Astrophys. J.* 1983. V. 272. P. 355–361.
- Cram L.E., Brown D.R., Beckers J.M. High resolution spectroscopy of the disk chromospheres. V. Space-time variations observed simultaneously in seven lines // *Astron. Astrophys.* 1977. V. 57. P. 211–220.
- Fontenla J.M., Curdt W., Haberleiter M., et al. Semiempirical models of the solar atmosphere. III. Set of non-LTE models for far-ultraviolet/extreme-ultraviolet irradiance computation // *Astrophys. J.* 2009. V. 707. P. 482–502.
- Grigoryeva S.A., Turova I.P., Ozhogina O.A. Studying Ca II K line profile shapes and dynamic processes in the solar chromosphere at the base of a coronal hole // *Solar Phys.* 2016. V. 291. P. 1977–2002. DOI: [10.1007/s11207-016-0951-9](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0951-9).
- Grossmann-Doerth U., Kneer F., von Uexküll M. Properties of the solar Ca II K-line at high spatial resolution // *Solar Phys.* 1974. V. 37. P. 85–94.
- Holweger H., Müller E.A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // *Solar Phys.* 1974. V. 39. P. 19–30.
- Kalkofen W. Chromospheric oscillations in K_{2v} bright points // *Astrophys. J.* 1996. V. 468. L. 69–72.
- Kalkofen W. Oscillations in chromospheric network bright points // *Astrophys. J.* 1997. V. 486. L. 145–148.
- Kamio S., Kurokawa H. The relation between Ca bright grains and oscillations in the photosphere // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 450. P. 351–358. DOI: [10.1051/0004-6361:20054174](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054174).

Lites B.W., Rutten R.J., Kalkofen W. Dynamics of the solar chromospheres. I. Long-period network oscillations // *Astrophys. J.* 1993. V. 414. P. 345–356.

Lites B.W., Rutten R.J., Berger T.E. Dynamics of the solar chromospheres. II. Ca II H_{2v} and K_{2v} grains versus internetwork fields // *Astrophys. J.* 1999. V. 517. P. 1013–1033.

Liu S.-Y. Direct observational evidence for the propagation and dissipation of energy in the chromospheres // *Astrophys. J.* 1974. V. 189. P. 359–365.

Liu S.-Y., Skumanich A. An empirical interpretation for the time evolution of the Ca II line // *Solar Phys.* 1974. V. 38. P. 109–115.

Löfdahl M.G., Hillberg T., de la Cruz Rodriguez J., et al. A data-processing and metadata-generating pipeline for CHROMIS and CRISP // *ArXiv:1804.03030v1 [astro-ph.IM]*. 2018. P. 1–17.

Pasachoff J.M. Fine structure in Ca II on the solar disk // *Solar Phys.* 1970. V. 12. P. 202–215.

Reardon K.P., Lepreti F., Carbone V., Vecchio A. Evidence of shock-driven turbulence in the solar chromospheres // *Astrophys. J.* 2008. V. 683. L. 207–210. DOI: [10.1086/591790](https://doi.org/10.1086/591790).

Reardon K.P., Uitenbroek K., Cauzzi G. The solar chromospheres at high resolution with IBIS III. Comparison of Ca II K and Ca II 854.2 nm imaging // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 500. P. 1239–1247. DOI: [10.1051/0004-6361:200811223](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200811223).

Rezaei R., Schlichenmaier R., Beck C.A.R., et al. Relation between photospheric magnetic field and chromospheric emission // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 466. P. 1131–1144. DOI: [10.1051/0004-6361:20067017](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20067017).

Rezaei R., Bruls J.H.M.J., Schmidt W., et al. Reversal-free Ca II H profiles: a challenge for solar chromosphere modeling in quiet inter-network // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 484. P. 503–509. DOI: [10.1051/0004-6361:20079050](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079050).

Rutten R.J., Uitenbroek H. Ca II H_{2v} and K_{2v} cell grains // *Solar Phys.* 1991. V. 134. P. 15–21.

Vecchio A., Cauzzi G., Reardon K.P. The solar chromospheres at high resolution with IBIS. II. Acoustic shocks in the quiet internetwork and the role of magnetic fields // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 494. P. 269–286. DOI: [10.1051/0004-6361:200810694](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810694).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 20 марта 2018 г.).

REFERENCES

Bappu M.K.V., Sivaraman K.R. K emission-line widths and the solar chromosphere. *Solar Phys.* 1971, vol. 17, pp. 316–330.

Beck C., Schmidt W., Rezaei R., Rammacher W. The signature of chromospheric heating in Ca II H spectra. *Astron. Astrophys.* 2008, vol. 479, pp. 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 chromosphere I. Velocity statistics. *Astron. Astrophys.* 2009, vol. 507, pp. 453–467. DOI: [10.1051/0004-6361/200911851](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911851).

Björge J.P., Sukhorukov A.V., Leenaarts J., Carlsson M., de la Cruz Rodríguez, J., Scharmer G.B., Hansteen V.H. Three-dimensional modeling of the Ca II H&K lines in the solar atmosphere. *ArXiv:1712.01045v1 [astro-ph.SR]*. 2017.

Carlsson M., Stein R.F. Formation of solar calcium H and K bright grains. *Astrophys. J.* 1997, vol. 481, pp. 500–514.

Cram L.E. High resolution spectroscopy of the disk chromospheres. *Solar Phys.* 1974, vol. 37, pp. 75–83.

Cram L.E., Damé L. High spatial and temporal resolution observations of the solar Ca II H line. *Astrophys. J.* 1983, vol. 272, pp. 355–361.

Cram L.E., Brown D.R., Beckers J.M. High resolution spectroscopy of the disk chromospheres. V. Space-time variations observed simultaneously in seven lines. *Astron. Astrophys.* 1977, vol. 57, pp. 211–220.

Fontenla J.M., Curdt W., Haberreiter M., Harder J., Tian H. Semiempirical models of the solar atmosphere. III. Set of non-LTE models for far-ultraviolet/extreme-ultraviolet irradiance computation. *Astrophys. J.* 2009, vol. 707, pp. 482–502.

Grigoryeva S.A., Turova I.P., Ozhogina O.A. Studying Ca II K line profile shapes and dynamic processes in the solar chromosphere at the base of a coronal hole. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, pp. 1977–2002. DOI: [10.1007/s11207-016-0951-9](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0951-9).

Grossmann-Doerth U., Kneer F., von Uexküll M. Properties of the solar Ca II K-line at high spatial resolution. *Solar Phys.* 1974, vol. 37, pp. 85–94.

Holweger H., Müller E.A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen. *Solar Phys.* 1974, vol. 39, pp. 19–30.

Kalkofen W. Chromospheric oscillations in K_{2v} bright points. *Astrophys. J.* 1996, vol. 468, L. 69–72.

Kalkofen W. Oscillations in chromospheric network bright points. *Astrophys. J.* 1997, vol. 486, L. 145–148.

Kamio S., Kurokawa H. The relation between Ca bright grains and oscillations in the photosphere. *Astron. Astrophys.* 2006, vol. 450, pp. 351–358. DOI: [10.1051/0004-6361:20054174](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054174).

Lites B.W., Rutten R.J., Kalkofen W. Dynamics of the solar chromospheres. I. Long-period network oscillations. *Astrophys. J.* 1993, vol. 414, pp. 345–356.

Lites B.W., Rutten R.J., Berger T.E. Dynamics of the solar chromospheres. II. Ca II H_{2v} and K_{2v} grains versus internetwork fields. *Astrophys. J.* 1999, vol. 517, pp. 1013–1033.

Liu S.-Y. Direct observational evidence for the propagation and dissipation of energy in the chromospheres. *Astrophys. J.* 1974, vol. 189, pp. 359–365.

Liu S.-Y., Skumanich A. An empirical interpretation for the time evolution of the Ca II line. *Solar Phys.* 1974, vol. 38, pp. 109–115.

Löfdahl M.G., Hillberg T., de la Cruz Rodriguez J., Vissers G., Scharmer G.B., Hagfors Haugan S.V., Fredvik T. A data-processing and metadata-generating pipeline for CHROMIS and CRISP // *ArXiv:1804.03030v1 [astro-ph.IM]*. 2018, pp. 1–17.

Pasachoff J.M. Fine structure in Ca II on the solar disk. *Solar Phys.* 1970, vol. 12, pp. 202–215.

Reardon K.P., Lepreti F., Carbone V., Vecchio A. Evidence of shock-driven turbulence in the solar chromospheres. *Astrophys. J.* 2008, vol. 683, L. 207–210. DOI: [10.1086/591790](https://doi.org/10.1086/591790).

Reardon K.P., Uitenbroek K., Cauzzi G. The solar chromospheres at high resolution with IBIS III. Comparison of Ca II K and Ca II 854.2 nm imaging. *Astron. Astrophys.* 2009, vol. 500, pp. 1239–1247. DOI: [10.1051/0004-6361:200811223](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200811223).

Rezaei R., Schlichenmaier R., Beck C.A.R., Bruls J.H.M.J., Schmidt W. Relation between photospheric magnetic field and chromospheric emission. *Astron. Astrophys.* 2007, vol. 466, pp. 1131–1144. DOI: [10.1051/0004-6361:20067017](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20067017).

Rezaei R., Bruls J.H.M.J., Schmidt W., Beck C., Kalkofen W., Schlichenmaier R. Reversal-free Ca II H profiles: a challenge for solar chromosphere modeling in quiet inter-network. *Astron. Astrophys.* 2008, vol. 484, pp. 503–509. DOI: [10.1051/0004-6361:20079050](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079050).

Rutten R.J., Uitenbroek H. Ca II H_{2v} and K_{2v} cell grains. *Solar Phys.* 1991, vol. 134, pp. 15–21.

Vecchio A., Cauzzi G., Reardon K.P. The solar chromospheres at high resolution with IBIS. II. Acoustic shocks in the quiet internetwork and the role of magnetic fields. *Astron. Astrophys.* 2009, vol. 494, pp. 269–286. DOI: [10.1051/0004-6361:200810694](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810694).

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (accessed March 20, 2018).

Как цитировать эту статью

Турова И.П., Григорьева С.А., Ожогина О.А. Пространственные и временные вариационные контуры линии К Ca II в различных структурных образованиях солнечной хромосферы. I. Особенности индивидуальных контуров. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 3–13. DOI: [10.12737/szf-44201801](https://doi.org/10.12737/szf-44201801).