

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

**II. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ  
МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЛИНИИ ДЛЯ УЧАСТКОВ K<sub>1</sub> И K<sub>2</sub>**

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

**II. DETERMINATION TECHNIQUE AND CORRELATION RELATIONSHIPS  
BETWEEN THE K Ca II LINE PARAMETERS FOR K<sub>1</sub> AND K<sub>2</sub> FEATURES**

**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 две области в атмосфере Солнца, находящиеся в основании корональной дыры. Вычислен ряд параметров линии К Ca II для минимумов интенсивности K<sub>1</sub> и пиков K<sub>2</sub>, которые образуются на высотах между верхней фотосферой и нижней хромосферой, и в нижней хромосфере соответственно. Уточнена методика определения сдвигов контура  $\Delta\lambda_{K1v}$  и  $\Delta\lambda_{K1r}$ ,  $\Delta\lambda_{K2v}$  и  $\Delta\lambda_{K2r}$ , включая случаи, когда их прямое нахождение затруднено. Вычислены интенсивности  $I_{K1v}$ ,  $I_{K1r}$ ,  $I_{K2v}$ ,  $I_{K2r}$ , разделения минимумов K<sub>1</sub> и пиков K<sub>2</sub>:  $SEP_{K1} = \Delta\lambda_{K1r} - \Delta\lambda_{K1v}$ ,  $SEP_{K2} = \Delta\lambda_{K2r} - \Delta\lambda_{K2v}$  соответственно. Построены графики рассеяния и определены корреляционные соотношения между параметрами, относящимися к разным уровням атмосферы.

Получены следующие результаты.

Интенсивности, которые наблюдаются в нижней и средней хромосфере связаны между собой сильнее, чем интенсивности, относящиеся к верхней фотосфере и средней хромосфере.

Структуры с усиленным магнитным полем более яркие на уровне верхней фотосферы и нижней хромосферы по отношению к структурам с более слабым полем.

Разделения минимумов K<sub>1</sub> имеют большую величину для структур с усиленным магнитным полем по отношению к структурам с более слабым полем, тогда как для разделения пиков K<sub>2</sub> картина обратная — они меньше для структур с усиленным магнитным полем. Такая зависимость имеет место не только для выбранных структур спокойной области, но и для флоккулов, хотя по флоккулам требуется дополнительная статистика.

Зависимость между сдвигами интенсивности минимумов K<sub>1</sub> и пиков K<sub>2</sub> для фиолетового и красного крыльев оказалась слабой. Это может быть связано как с существенным вкладом случайных движений

**Abstract.** We have studied two regions located at the base of a coronal hole. For the K<sub>1</sub> intensity minima and K<sub>2</sub> peaks, which form between the upper photosphere and the lower chromosphere and in the lower chromosphere respectively, a number of Ca II line parameters have been computed. We have improved the determination technique for  $\Delta\lambda_{K1v}$ ,  $\Delta\lambda_{K1r}$ ,  $\Delta\lambda_{K2v}$ ,  $\Delta\lambda_{K2r}$  line profile shifts, including certain cases when their direct determination was complicated. We have determined  $I_{K1v}$ ,  $I_{K1r}$ ,  $I_{K2v}$ ,  $I_{K2r}$  intensities, K<sub>1</sub> minima and K<sub>2</sub> peak separations  $SEP_{K1} = \Delta\lambda_{K1r} - \Delta\lambda_{K1v}$ ,  $SEP_{K2} = \Delta\lambda_{K2r} - \Delta\lambda_{K2v}$  respectively. We have constructed scatter plots and have computed correlation relationships between parameters relating to different levels of the atmosphere.

We have obtained the following results.

The intensities observed in the lower and middle chromosphere are connected closer than intensities related to the upper photosphere and middle chromosphere.

The structures with a stronger magnetic field are brighter at the upper photosphere and lower chromosphere levels as compared to the structures with a weaker magnetic field.

K<sub>1</sub> minima separations are of greater value for the structures with a stronger magnetic field relative to the structures with a weaker magnetic field, whereas K<sub>2</sub> peak separations demonstrate the opposite behavior. They are lower for the structures with a stronger magnetic field. It is true not only for the chosen structures belonging to quiet regions but also for the plage, though we need additional statistics for plages.

The relation between shifts of K<sub>1</sub> minima and K<sub>2</sub> peak intensities for violet and red wings appeared to be weak. This may be due to the considerable contribution of random movements to the velocity field at the upper photosphere and lower chromosphere levels or due to

в поле скоростей на уровнях верхней фотосферы и нижней хромосферы, так и с разностью высот образования фиолетового и красного крыльев.

**Ключевые слова:** фотосфера, хромосфера, контуры линии К Ca II.

different forming levels for the profile violet and red wings.

**Keywords:** photosphere, chromosphere, K Ca II line profiles.

## ВВЕДЕНИЕ

В нашей предыдущей работе [Турова и др., 2018], далее статья I, мы показали, что для исследованных нами пространственных областей S25W17 и S25W12 существует значимая корреляция между интенсивностями в центре и крыльях линии К Ca II. Этот вывод следует из сравнения параметров контура линии К, принадлежащих участкам K<sub>3</sub> и K<sub>2</sub>, которые образуются на высотах средней и нижней хромосферы соответственно. Однако не меньший интерес в данном контексте представляют минимумы интенсивности линии К — участки K<sub>1</sub>, которые образуются на высотах между верхней фотосферой и нижней хромосферой. В статье I эти участки не рассматривались в связи с ненадежностью их компьютерной идентификации. В настоящее время мы изменили методику отождествления участков K<sub>1</sub> и K<sub>2</sub>.

Цель данной работы — дополнить наше предыдущее исследование изучением корреляционных соотношений для участков K<sub>1</sub> и K<sub>2</sub>, отождествленных с использованием уточненной методики, а также включить ряд других корреляционных соотношений, не вошедших в статью I.

## 1. НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Наблюдения, использованные в данной работе, описаны в статье I и в работе [Grigoryeva et al., 2016]. Хромосферные структуры отождествлялись по интенсивности центральной части линии К Ca II. На рис. 1, а, б, заимствованном из нашей статьи I, показан ход усредненной по времени интенсивности в центре линии К вдоль щели спектрографа для пространственных областей S25W17 и S25W12. Области расположены в основании корональной дыры. Буквенно-численными обозначениями отмечены хромосферные структуры, которые были исследованы в статье I (см. также [Teplitskaya et al., 2006; Grigoryeva et al., 2016]). Выделенные хромосферные структуры обозначены следующим образом:

- «n» — яркие сеточные структуры («сетка»);
- «ne» — усиленная сетка;
- «с» — темные внутрисеточные структуры («ячейка»);
- «b» — флоккул;
- «р» — структура с пониженной яркостью, присутствующая на снимках одной из двух серий;
- «f» — участки на границах выделенных структур;
- «х» — структуры с промежуточной яркостью, которые не относятся к перечисленным выше структурам.

В каждой точке пространства для выделенных структур были построены контуры линии К Ca II. Интересующие нас параметры контуров линии рассчитывались в программе, созданной в среде IDL. Все смещения по длине волны вычислялись относи-

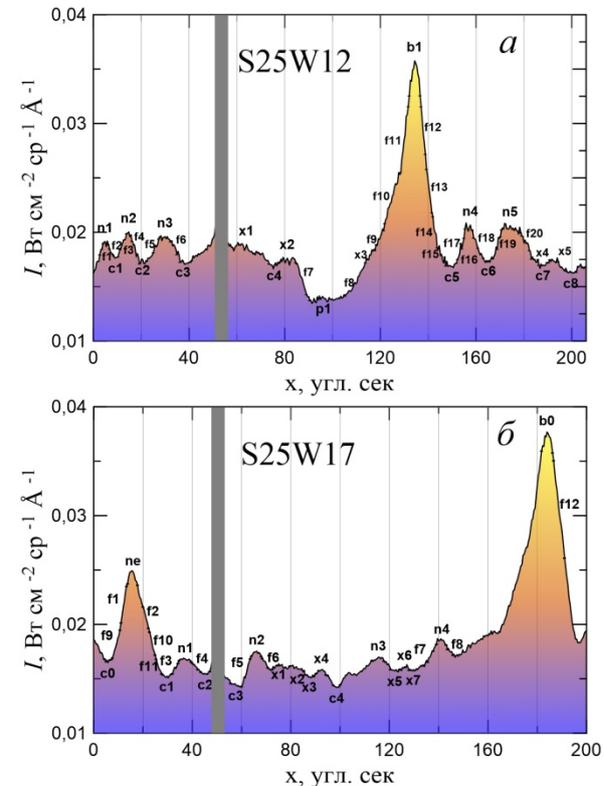


Рис. 1. Усредненная по времени интенсивность  $I_{K2}$  вдоль щели спектрографа: область S25W12 (а); область S25W17 (б). Буквенно-численными обозначения отмечены выделенные хромосферные структуры. Серая вертикальная полоса — нить, натянутая поперек щели спектрографа

тельно номинального центра линии К Ca II. Калибровка по длине волны выполнялась по FTS-атласу [Brault, Neckel, 1987]. Для нескольких (10–12) реперных линий, идентифицированных в спектре и в атласе, были вычислены центры линий и выполнена полиномиальная подгонка номеров пикселей к длинам волн. Вычисленный таким образом номинальный центр линии К Ca II использовался в качестве нуля шкалы длин волн.

### 1.1. Уточнение методики определения участков K<sub>1</sub> и K<sub>2</sub>

Контуры линии К Ca II, которые наблюдаются в спокойной хромосфере, не всегда имеют четко выраженные пики K<sub>2</sub> и минимумы K<sub>1</sub>, в отличие от контуров яркой сетки и флоккулов. На рис. 2, а показан контур линии К, на котором отчетливо выделяются пики K<sub>2</sub> и минимумы K<sub>1</sub>. Этот контур принадлежит хромосферной структуре с повышенной яркостью. Нахождение участков K<sub>2</sub> и K<sub>1</sub> для таких контуров выполняется довольно просто средствами среды IDL.

Иначе обстоит дело с контурами, один из которых приведен на рис. 2, б.

Этот контур относится к одной из темных структур области S25W17 (ячейка «с1»). Пики K<sub>2</sub> здесь

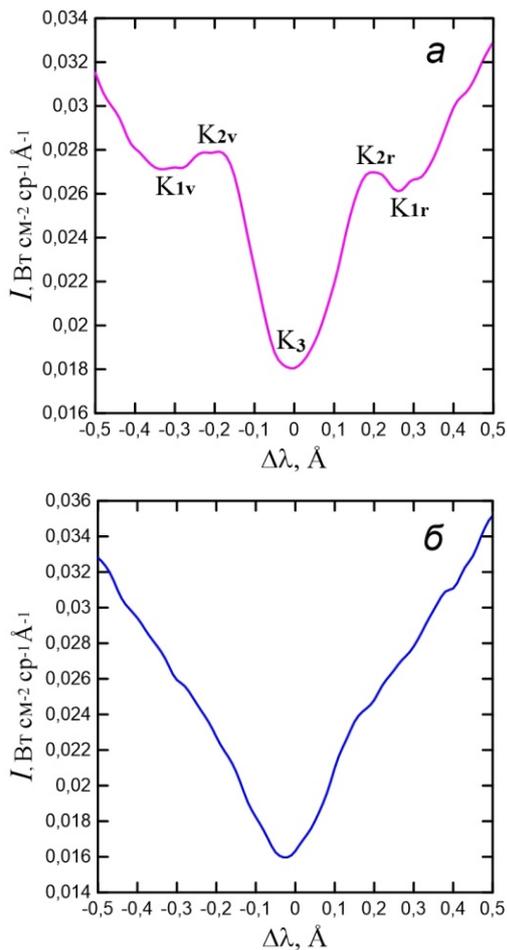


Рис. 2. Контурсы линии К Ca II в области S25W17: для хромосферной структуры с повышенной яркостью (а); для ячейки «с1» (б)

отсутствуют, на их месте появляются небольшие участки с менее крутым ходом интенсивности, напоминающие короткие плато на фоне кругого изменения интенсивности крыла. Встречаются также контурсы с почти монотонным ходом интенсивности на протяжении всего крыла. Мы наблюдали такие беспиковые контурсы в области S25W12, они описаны в статье I. В подобных случаях говорить о местоположении участков  $K_1$  и  $K_2$  можно только условно. Но данные об этих участках нам нужны для поиска взаимосвязи между ними и теми участками контура, которые образуются на других высотах в атмосфере.

В статье I мы уже указывали на трудности, связанные с компьютерной обработкой контуров со слабовыраженными пиками. Код в среде IDL, который использовался в статье I, не всегда справлялся с вычислениями на участках  $K_1$  и  $K_2$ . В этих случаях приходилось менять алгоритм, подгонять его к каждому индивидуальному контуру. Такой путь мало пригоден для обработки большого объема наблюдательных данных. В настоящее время мы модифицировали алгоритм, что позволило нам работать в рамках единого подхода при обработке контуров со слабовыраженными пиками.

Тестирование показало, что наиболее точный результат при поиске расположения участков  $K_1$  и  $K_2$ , дает использование второй производной интенсивности линии К —  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$ . В работе [Grossmann-

Doerth et al., 1974] производные  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  использовались для той же самой цели, но авторы лишь кратко упоминают об этом в своей статье, без описания методики.

Применение нами данного подхода включает два шага.

*Шаг I.* Поиск экстремумов интенсивности  $I(\Delta\lambda)$  линии К Ca II, соответствующих участкам  $K_1$  и  $K_2$  на заданном интервале длин волн. Интервал поиска задается вблизи среднего значения  $\Delta\lambda_{K_2}$  участка  $K_2$ , полученного нами в статье I, которое составляет  $\pm 0.21 \text{ \AA}$  в фиолетовом и красном крыльях для обеих пространственных областей.

*Шаг II.* Если по условиям поиска первый шаг не дает результата, в качестве местоположения участков  $K_2$  и  $K_1$  принимаются значения  $\pm 0.21 \text{ \AA}$  и  $\pm 0.30 \text{ \AA}$  соответственно. Величина  $\Delta\lambda_{K_1} \approx 0.30 \text{ \AA}$  часто характеризует двухпиковые контурсы в спокойной области, для которых она легко определяется средствами IDL (например, наш рис. 2, а). Она также известна из литературных источников (см., например, [Liu, 1974, таблица; Jensen, Orral, 1963, рис. 3, 7; Grossmann-Doerth et al., 1974]).

Для реализации шага I мы находим вторую производную  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$ . Используется процедура DERIV из библиотеки IDL, которая выполняет численное дифференцирование, с применением трехточечной лагранжевой интерполяции. Контур линии задается в диапазоне  $\Delta\lambda = \pm 0.5 \text{ \AA}$  и содержит 101 точку с шагом  $0.01 \text{ \AA}$  (см. рис. 2, а, б).

В контексте данной задачи нам удобно оперировать значениями самой производной  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$ , хотя при описании методики иногда удобнее пользоваться значениями кривизны  $k$ , которая повторяет ход  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  и численно отличается от нее менее чем на 1 %. Наша задача заключается в нахождении точек, в которых  $|d^2I/d(\Delta\lambda)^2|$  на заданном интервале  $\Delta\lambda$  достигает максимального значения, при условии, что между этими точками происходит изменение знака  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$ . Другими словами, мы фиксируем переход от вогнутой формы кривой интенсивности к выпуклой, если рассматривать каждое крыло в направлении от  $\Delta\lambda = \pm 0.5 \text{ \AA}$  к центру линии.

В фиолетовом крыле анализ хода производной  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  выполняется в интервале  $\Delta\lambda = (-0.27 \div -0.16) \text{ \AA}$ . В красном крыле ход  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  анализируется в интервале  $\Delta\lambda = (0.16 \div 0.30) \text{ \AA}$ . Максимальное значение  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  в этих диапазонах  $\Delta\lambda$  указывает на точку, которая отождествляется с местоположением минимума  $K_1$ . Минимальное значение  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  указывает на точку, которая соответствует местоположению пика  $K_2$ .

На рис. 3 приведен результат вычислений для красного крыла контура, приведенного на рис. 2, б. Синей линией показана интенсивность  $I(\Delta\lambda)$  на участке поиска, зеленой линией показан ход второй производной.

Минимальная величина производной  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  находится на значении  $\Delta\lambda = 0.22 \text{ \AA}$ , что соответствует местоположению участка  $K_{2r}$ . Максимум  $d^2I/d(\Delta\lambda)^2$  располагается на значении  $\Delta\lambda = 0.25 \text{ \AA}$  и указывает на местоположение  $K_{1r}$ .

Средние значения параметров. Смещения  $\Delta\lambda$  и разделения пиков  $SEP$  даны в км/с

S25W12												
	$\Delta\lambda_{K1r}$	$\Delta\lambda_{K1v}$	$\Delta\lambda_{K2r}$	$\Delta\lambda_{K2v}$	$\Delta\lambda_{K3}$	$I_{K1r}$	$I_{K1v}$	$I_{K2r}$	$I_{K2v}$	$I_{K3}$	$SEP_{K1}$	$SEP_{K2}$
«С»	19.6	-21.4	16.0	-16.0	0.1	0.025	0.026	0.025	0.027	0.017	41.0	32.1
«П»	20.8	-23.5	15.8	-16.1	-0.3	0.027	0.028	0.028	0.029	0.020	44.3	31.9
«b»	31.6	-33.6	15.4	-12.6	2.3	0.033	0.033	0.043	0.049	0.034	65.2	28.0
«f»	19.9	-22.9	15.3	-16.4	-0.7	0.027	0.027	0.027	0.028	0.019	42.7	31.7
«x»	18.8	-21.2	15.1	-16.1	-0.6	0.025	0.026	0.025	0.026	0.018	40.0	31.5
«p»	18.5	-17.7	15.3	-15.2	-0.9	0.023	0.022	0.022	0.021	0.014	30.1	27.4
S25W17												
	$\Delta\lambda_{K1r}$	$\Delta\lambda_{K1v}$	$\Delta\lambda_{K2r}$	$\Delta\lambda_{K2v}$	$\Delta\lambda_{K3}$	$I_{K1r}$	$I_{K1v}$	$I_{K2r}$	$I_{K2v}$	$I_{K3}$	$SEP_{K1}$	$SEP_{K2}$
«С»	18.5	-21.3	15.4	-17.0	-1.1	0.024	0.024	0.024	0.024	0.015	39.8	32.4
«П»	19.3	-21.8	15.3	-15.2	-0.2	0.025	0.026	0.025	0.027	0.018	41.1	30.5
«b»	31.3	-34.0	13.7	-12.8	0.8	0.032	0.032	0.047	0.051	0.037	65.3	26.5
«f»	19.5	-22.2	15.3	-16.2	-0.6	0.025	0.026	0.026	0.027	0.018	41.7	31.4
«x»	18.2	-20.0	15.5	-15.8	-0.5	0.024	0.024	0.024	0.025	0.016	38.2	31.4

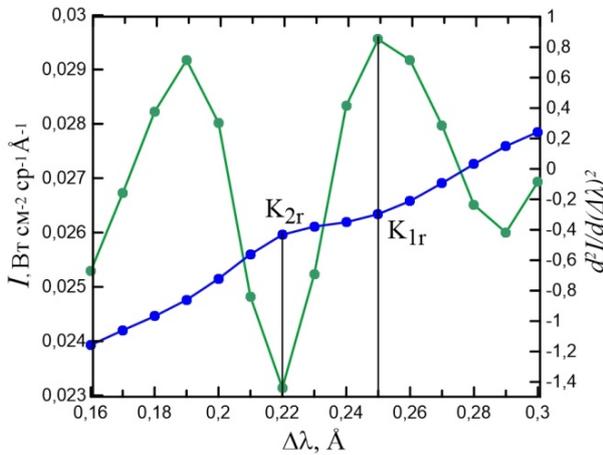


Рис. 3. Результат поиска положения участков  $K_1$  и  $K_2$  для красного крыла контура линии  $K$ , приведенного на рис. 2, б. Синий цвет — интенсивность, зеленый цвет — вторая производная интенсивности на участке поиска. Вертикальными линиями отмечены положения участков  $K_1$  и  $K_2$

Применение данного метода к контурам со слабо-выраженными пиками показало, что метод обладает довольно высокой чувствительностью по отношению к незначительным изменениям интенсивности в крыле линии. Например, при величине кривизны  $k \approx |0.2|$  может иметь место картина, качественно подобная рис. 3, однако при такой маленькой величине  $k$  наблюдаемый изгиб не может считаться пиком. В качестве слабого пика мы принимаем участок крыла, на котором величина  $k \geq |0.8|$ . Примером такого контура может служить контур на рис. 2, б. Если в обоих крыльях контура указанное условие не выполняется, контур считается беспиковым.

Следует отметить, что контуры с четкими пиками часто показывают большее расстояние между участками  $K_2$  и  $K_1$ , чем контуры, у которых явные пики отсутствуют. Это заметно, например, при сравнении контуров, приведенных на рис. 2, а, б. Так, на рис. 2, а разница  $\Delta\lambda_{K2} - \Delta\lambda_{K1}$  приблизительно равна  $\pm 0.08 \text{ \AA}$ ,

тогда как на рис. 2, б эта величина составляет  $\approx \pm 0.03 \text{ \AA}$ .

## 2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ОТДЕЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КОНТУРОВ

Мы исследовали возможные зависимости между следующими параметрами:

- $I_{K1v}, I_{K1r}$  — интенсивности фиолетового и красного минимума соответственно;
- $\Delta\lambda_{K1v}$  и  $\Delta\lambda_{K1r}$  — сдвиги минимумов  $K_{1v}$  и  $K_{1r}$  относительно номинального центра линии;
- $I_{K2v}, I_{K2r}$  — интенсивности фиолетового и красного пиков;
- $\Delta\lambda_{K2v}$  и  $\Delta\lambda_{K2r}$  — сдвиги пиков  $K_{2v}$  и  $K_{2r}$  относительно номинального центра линии;
- $I_{K3}$  — минимальная интенсивность в центре линии;
- $\Delta\lambda_{K3}$  — сдвиг минимума  $K_3$  по оси длин волн относительно номинального центра линии;
- $SEP_{K1}$  — разделение минимумов  $K_1$ , равно  $\Delta\lambda_{K1r} - \Delta\lambda_{K1v}$ ;
- $SEP_{K2}$  — разделение пиков  $K_2$ , равно  $\Delta\lambda_{K2r} - \Delta\lambda_{K2v}$ .

Средние значения параметров приведены в таблице. Для всех возможных комбинаций пар перечисленных параметров были построены графики рассеяния, вычислены средние коэффициенты корреляции и, кроме того, построены гистограммы, показывающие, как распределяются значения параметров для различных хромосферных структур. На рис. 4–6 приведены типичные примеры графиков рассеяния для отдельных пар параметров.

Детальное рассмотрение полученных результатов удобнее выполнять, разделив параметры на три группы: интенсивности, сдвиги пиков и минимумов, разделение минимумов  $K_1$  и пиков  $K_2$ .

**Интенсивности.** Можно отметить высокую корреляцию  $I_{K1v}$  и  $I_{K1r}$  (см. рис. 4, а, б), причем наиболее сильная корреляция приходится на флок-

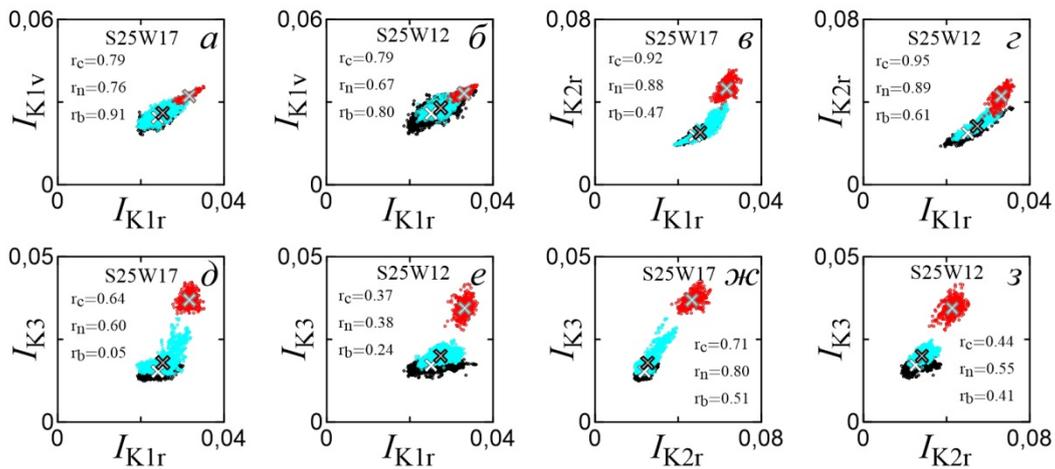


Рис. 4. Графики рассеяния интенсивностей, относящихся к различным участкам контура линии К Ca II, образующимся на разных высотах солнечной атмосферы в областях S25W17 и S25W12. Цветом отмечены выделенные хромосферные структуры: черный — для структуры «с»; голубой — для структуры «п»; красный — для «б». Крестиками отмечены средние значения распределений: белый крестик — для структуры «с»; темно-серый крестик — для структуры «п»; светло-серый крестик — для структуры «б». Интенсивности даны в тех же единицах, что и на рис. 1

кул и ячейки из двух областей. Эта корреляция ожидается, так как минимумы  $K_1$  образуются на близких высотах. Тем не менее, они ниже чрезвычайно высоких корреляций, полученных для интенсивностей в одноименных крыльях на уровнях образования  $K_1$  и  $K_2$  для ячеек и сетки (рис. 4, в, г). Корреляции  $I_{K_1}$  и  $I_{K_2}$  приблизительно равны для фиолетового и красного крыльев (графики для фиолетового крыла не приводятся). Более низкая корреляция  $I_{K_1}$  и  $I_{K_2}$  найдена для флоккула из области S25W17 (0.47 для красного крыла и 0.38 для фиолетового). Значительно меньшие корреляции отмечаются для интенсивностей на уровнях  $K_1$  и  $K_3$  (рис. 4, д, е). Для флоккула серии S25W17 корреляции интенсивностей на уровнях  $K_1$  и  $K_3$  близки к нулю ( $\sim 0.05$ ). Корреляции интенсивностей на уровнях  $K_1$  и  $K_3$  для всех выделенных структур меньше, чем корреляции интенсивностей на уровнях  $K_2$  и  $K_3$  (рис. 4, ж, з).

**Сдвиги пиков и минимумов.** Найдено, что корреляция положений минимумов  $K_1$  в фиолетовом и красном крыльях невелика (рис. 5, а), так же как и корреляция положений пиков  $K_2$  в фиолетовом и красном крыльях (рис. 5, б). И для минимумов  $K_1$ , и для пиков  $K_2$  более высокая корреляция отмечается в структурах «с» и «п». Корреляции между положениями минимумов  $K_1$  и положением минимума линии  $K_3$  также невелики (напр., рис. 5, в). Корреляции между положениями максимумов  $K_2$  и положением минимума  $K_3$  для всех структур больше, чем аналогичные корреляции для минимумов  $K_1$  (напр., рис. 5, г).

Имеются корреляции между положениями минимумов  $K_1$  и положениями одноименных пиков  $K_2$  ( $K_{1v}$  и  $K_{2v}$ ,  $K_{1r}$  и  $K_{2r}$ ) (графики не приводятся). Особенно они высоки в красном крыле для структур «с» ( $r_c > 0.70$  для области S25W17), промежуточных по яркости структур «х» ( $r_x \approx 0.80$  для области S25W17), и, неожиданно, для структуры с пониженной яркостью «р» ( $r_p > 0.80$ ). Последний результат, скорее всего, нельзя считать надежным в силу беспиковой формы контуров структуры «р». Перекрестные кор-

реляции, например, между положениями фиолетовых минимумов  $K_1$  и красных пиков  $K_2$ , очень малы ( $\approx 0.02$ ), немного увеличиваясь во флоккуле (до 0.2).

Высокие корреляции для обеих областей найдены между положениями минимумов  $K_1$  и значениями интенсивности  $I_{K_1}$  в одноименных крыльях (рис. 5, д). Немного меньшая, но значительная корреляция имеется между положениями минимумов  $K_1$  и интенсивностями пиков  $K_2$  (рис. 5, е). Перекрестная корреляция, например, между сдвигами участков линии  $\Delta\lambda_{K_{1v}}$  и интенсивностью  $I_{K_{1r}}$ , меньше. Перекрестная корреляция на уровне образования  $K_2$ , например, между сдвигами участков линии  $\Delta\lambda_{K_{2r}}$  и интенсивностью  $I_{K_{2v}}$ , значительно меньше, чем на уровне образования  $K_1$  (рисунки не приводятся), как и в случае одноименных крыльев (рис. 5, д, ж). Корреляции между сдвигами минимумов  $K_1$  и интенсивностью  $I_{K_3}$ , сдвигами пиков  $K_2$  и интенсивностью  $I_{K_3}$  невелики, за несколькими исключениями (см. рис. 5, з, и).

**Разделение минимумов  $K_1$  и пиков  $K_2$ .** Графики рассеяния указывают на высокие корреляции между разделением минимумов  $K_1$  и интенсивностью на том же уровне атмосферы  $I_{K_1}$  для всех структур (рис. 6, а). Высокие корреляции имеются также между разделением минимумов  $K_1$  и интенсивностью пиков  $I_{K_2}$  (рис. 6, б). Корреляции с интенсивностью  $I_{K_3}$  меньше (рис. 6, в). Наибольшая корреляция разделения пиков  $K_2$  с интенсивностью  $I_{K_1}$  отмечается для флоккула «б» (рис. 6, г). Корреляция разделения пиков  $K_2$  с интенсивностью  $I_{K_2}$  и  $I_{K_3}$  невелика (рис. 6, д, е). Высокие корреляции между разделением пиков на уровнях образования участков  $K_2$  и  $K_1$  отмечаются для структур «с» (см. рис. 6, ж) и «х» ( $r_x = 0.60$ , рисунок не приводится).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Найденные с помощью описанной выше методики параметры дали возможность исследования солнеч-

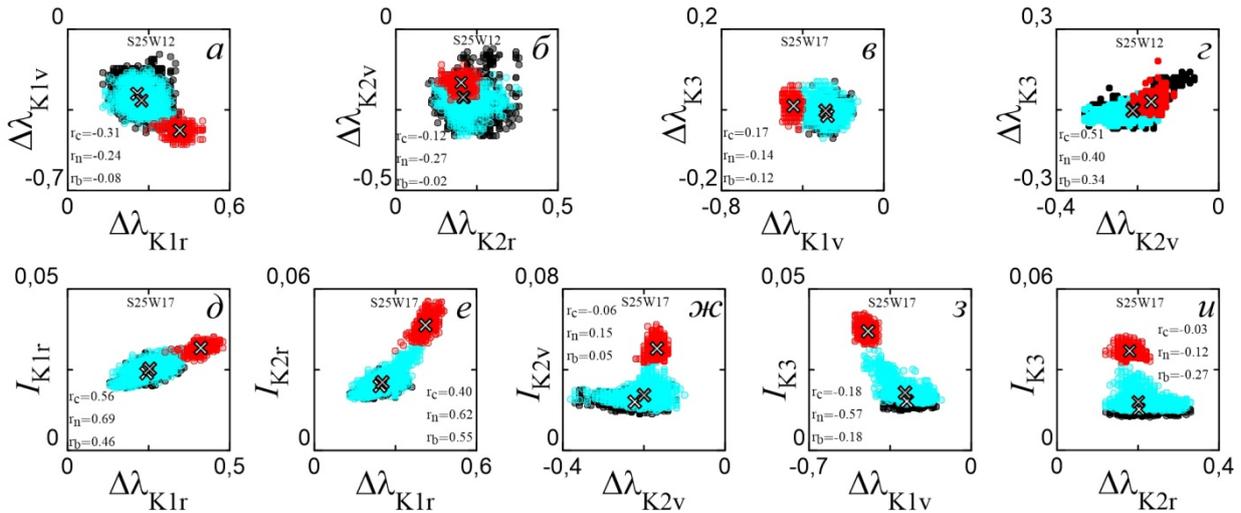


Рис. 5. Графики рассеяния смещений различных участков контура линии К Ca II. Смещения  $\Delta\lambda$  даны в ангстремах. Обозначения те же, что и на рис. 4

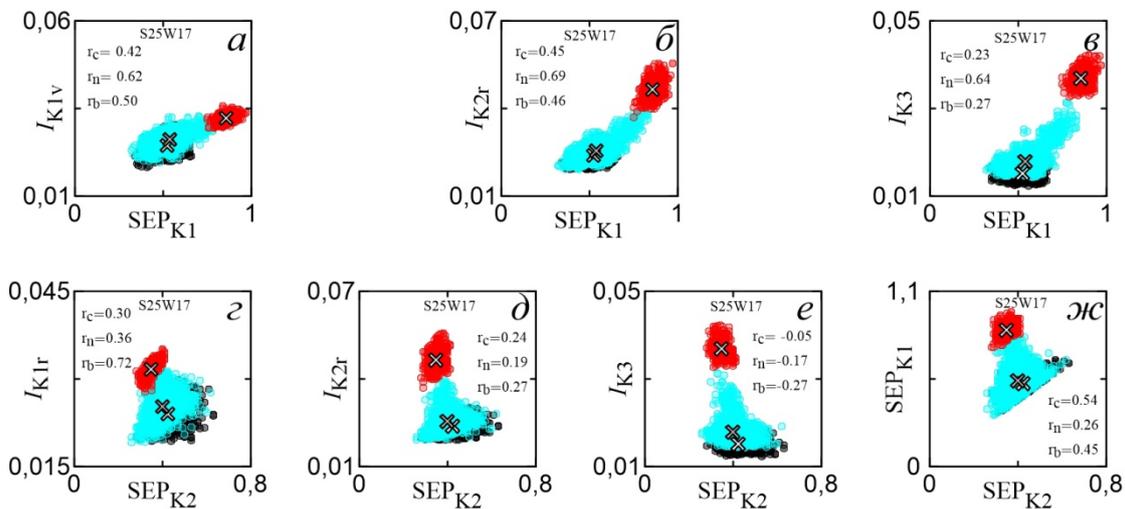


Рис. 6. Графики рассеяния для разделений минимумов  $K_1$  и пиков  $K_2$ . Обозначения те же, что на рис. 4. Разделения пиков и минимумов даны в ангстремах

ной атмосферы в обширном диапазоне высот, от фотосферы до средней хромосферы. Полученные корреляционные соотношения позволили нам проследить, насколько тесно связанные вычисленные нами параметры, относящиеся к высотам между верхней фотосферой и нижней хромосферой (участки контура  $K_{1v}$  и  $K_{1r}$ ), с параметрами, относящимися к нижней хромосфере (участки контура  $K_{2v}$  и  $K_{2r}$ ) и к средней хромосфере (участок  $K_3$ ).

Оказалось, что корреляции интенсивностей на уровнях  $K_1$  и  $K_3$  (рис. 4, д, е) для всех выделенных структур меньше, чем корреляции интенсивностей на уровнях  $K_2$  и  $K_3$  (рис. 4, ж, з). Исходя из того, что интенсивность  $I_{K3}$  не отражает локальную температуру средней хромосферы, можно предположить, что  $I_{K3}$  должна коррелировать с интенсивностью в более низких слоях солнечной атмосферы, где функция источников достаточно тесно связана с функцией Планка. Казалось бы, она должна коррелировать с интенсивностью  $I_{K1}$ . Наши наблюдения не соответствуют этой картине. Возможно, нужна

другая методика сопоставления величин на этих уровнях, учитывающая сложный процесс переноса излучения.

Распределения, полученные для интенсивностей  $I_{K1v}$  и  $I_{K2v}$  (рис. 7, а, б), построены для структур «с», «п» и «б» области S25W17. Видно, что структурам с большей величиной магнитного поля, соответствуют большие значения интенсивностей на уровнях образования участков  $K_1$  и  $K_2$ , т. е. в верхней фотосфере и нижней хромосфере. Подобный результат для  $I_{K1v}$  и  $I_{K2v}$  получен в работе [Leenaarts et al., 2018] по фильтровым наблюдениям структур разной яркости, расположенных в активной области.

Найдена очень слабая корреляция между сдвигами минимумов  $K_1$  в фиолетовом и красном крыльях —  $\Delta\lambda_{K1v}$  и  $\Delta\lambda_{K1r}$  (рис. 5, а). Такая же ситуация повторяется для пиков  $K_2$ , т. е. для величин  $\Delta\lambda_{K2v}$  и  $\Delta\lambda_{K2r}$  (рис. 5, б). Возможно, это связано с тем, что на уровнях образования минимумов  $K_1$  и пиков  $K_2$  преобладают случайные, а не систематические волновые движения. Кроме того, слабая корреляция может

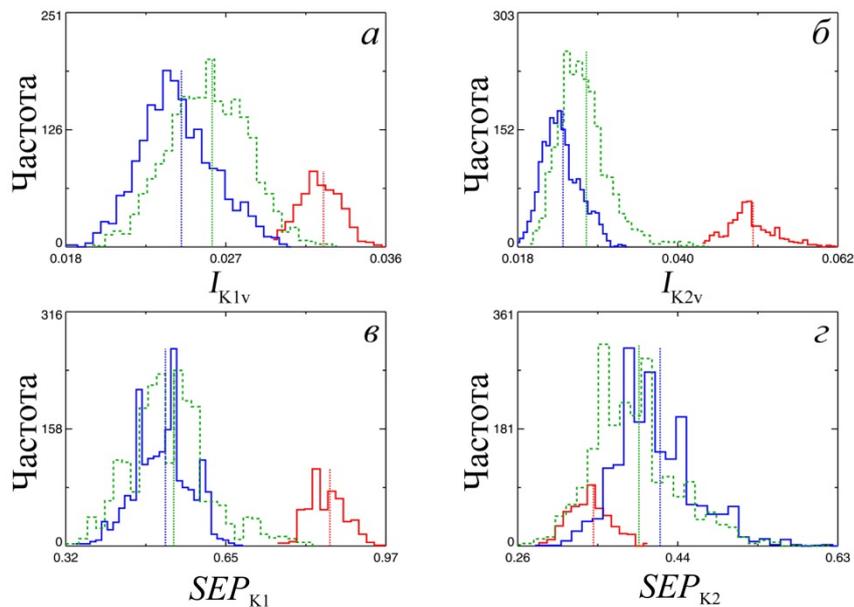


Рис. 7. Гистограммы распределений интенсивностей  $I_{K1v}$ ,  $I_{K2v}$ , разделений минимумов  $SEP_{K1}$ , разделений пиков  $SEP_{K2}$  для области S25W17. Распределение структур «с» обозначено синим цветом, «п» — зеленым и «в» — красным. Вертикальные линии отмечают средние значения распределений

быть связана с различием в высотах образования фиолетового и красного крыльев. По результатам 3D-моделирования, выполненного в работе [Vjörgen et al., 2018], на примере трех моделей показано, что пик  $K_{2r}$  образуется немного ниже, чем пик  $K_{2v}$ . Вследствие этого, в слоях образования  $K_{2v}$  и  $K_{2r}$  динамические процессы, происходящие в данный момент времени, могут быть различны. В пользу такого предположения говорит и более существенная корреляция между положениями одноименных минимумов  $K_1$  и максимумов  $K_2$  (например  $\Delta\lambda_{K1v}$  и  $\Delta\lambda_{K2v}$ ), чем перекрестная корреляция  $\Delta\lambda_{K1v}$  и  $\Delta\lambda_{K2r}$ .

Результаты наших вычислений для разделения минимумов  $SEP_{K1}$  показали, что увеличение интенсивности в структурах с усиленным магнитным полем сопровождается уширением контура на уровне образования  $K_1$  по отношению к структурам с более слабым полем. На рис. 7, в приведены распределения параметра  $SEP_{K1}$  для структур «с», «п», «в» области S25W17. Видно, что средние значения параметра  $SEP_{K1}$  больше для структур с усиленным магнитным полем.

Аналогичная картина разделения минимумов  $K_1$  приводится в работе [Grossmann-Doerth et al., 1974], выполненной по спектральным наблюдениям линии K Ca II для областей в ячейках и на их границах (см. их рис. 7 и табл. II). Качественно похожее распределение для разделения минимумов  $K_1$  получено в работе [Leenaarts et al., 2018].

Сравнение наших величин  $SEP_{K1}$  для ячейки с разделениями минимумов  $K_1$ , полученными по наблюдениям спокойной области в работе [Vjörgen et al., 2018], показывает, что результаты обоих исследований согласуются между собой (см. их рис. 12). Средние значения  $SEP_{K1}$ , приведенные в таблице, попадают в центральную часть распределения для разделения минимумов  $K_1$  на рис. 12 этих авторов.

На уровне образования  $K_2$  картина иная, чем на уровне образования  $K_1$ . Здесь имеет место обратная зависимость параметра  $SEP_{K2}$  от интенсивностей  $I_{K1}$ ,  $I_{K2}$  и  $I_{K3}$  (рис. 6, г–е). Распределения  $SEP_{K2}$  для структур «с», «п», «в» показаны на гистограмме (рис. 7, г). Видно, что средние значения  $SEP_{K2}$  для структур с усиленным магнитным полем меньше, чем для структур со слабым магнитным полем. Особенно это заметно для флоккула. Для него не только среднее значение  $SEP_{K2}$ , но и все распределение находится в левом крыле самых низких значений распределений для структур «с», «п». Похожий результат получен в работе [Kianfar et al., 2020], выполненной на основе широкополосных изображений в ядрах линий H и K Ca II. Авторы нашли, что разделение пиков  $K_2$  в яркой структуре заметно меньше, чем вне ее. Они предположили, что это может быть индикатором либо более низкой скорости микротурбулентности в ярких структурах, либо расположенного выше начала хромосферного роста температуры.

Полученные нами величины  $SEP_{K2}$  согласуются с результатами [Vjörgen et al., 2018] для разделения пиков  $K_2$  по наблюдениям в спокойной области. Как средние значения  $SEP_{K2}$ , так и большая часть индивидуальных значений, достаточно высоки, больше 22 км/с. Они попадают в центральную часть распределения, приведенного на рис. 12 [Vjörgen et al., 2018].

Подводя итоги выполненной работы, отметим следующее.

Интенсивности, которые наблюдаются в нижней и средней хромосфере, связаны между собой сильнее, чем интенсивности, относящиеся к верхней фотосфере и средней хромосфере.

Структуры с усиленным магнитным полем более яркие на уровне верхней фотосферы и нижней хромосферы.

Слабая зависимость между сдвигами  $\Delta\lambda_{K1v}$  и  $\Delta\lambda_{K1r}$  и между сдвигами  $\Delta\lambda_{K2v}$  и  $\Delta\lambda_{K2r}$  может быть обусловлена как значительной ролью случайных движений по сравнению с систематическими волновыми движениями, так и разностью высот образования фиолетового и красного крыльев, или действием обоих факторов.

В контурах, принадлежащих структурам с усиленным магнитным полем, величина разделения минимумов  $K_1$  больше, чем в структурах с более слабым магнитным полем.

Для разделения максимумов  $K_2$  имеет место обратная зависимость от интенсивностей  $I_{K1}$ ,  $I_{K2}$ ,  $I_{K3}$  по сравнению с разделением минимумов  $K_1$ . Средние значения  $SEP_{K2}$  для структур с усиленным магнитным полем меньше, чем для структур с более слабым полем. Нужно отметить, что, в отличие от статистики по структурам «с» и «п», статистика по структурам «в» невелика. Очевидно, что для корректных утверждений о поведении контура в сильном магнитном поле флоккула нужен дополнительный материал для сравнения. Это является целью наших дальнейших исследований.

Авторы благодарят рецензентов за чрезвычайно полезные замечания.

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

Турова И.П., Григорьева С.А., Ожогина О.А. Пространственные и временные вариации формы контуров линии К Ca II в различных структурных образованиях солнечной атмосферы. 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).

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. V. 611. A62. DOI: [10.1051/0004-6361/201731926](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731926).

Brault J.W., Neckel, H. Spectral Atlas of Solar Absolute Disk-Averaged and Disk-Center Intensity from 3290 to 12510 Å. 1987. URL: [<http://www.hs.uni-hamburg.de/forsch/einbl/html>] (дата обращения 5 июня 2020 г.).

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. 85–97.

Jensen E., Orral F.Q. Observational study of macroscopic inhomogeneities in the solar atmosphere. IV. Velocity and intensity fluctuations observed in the K line // *Astrophys. J.* 1963. V. 138. P. 252–270.

Kianfar S., Leenaarts J., Danilovic S., et al. Physical properties of bright Ca II K fibrils in the solar chromosphere // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 637. A1. DOI: [10.1051/0004-6361/202037572](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037572).

Leenaarts J., de la Cruz Rodriguez J., Danilovic S., et al. Chromospheric heating during flux emergence in the solar atmosphere // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 612. A28. DOI: [10.1051/0004-6361/201732027](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732027).

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

Teplitskaya R.B., Ozhogina O.A., Turova I.P. Brightness distribution at the base of a coronal hole // *Astron. Lett.* 2006. V. 32, N 2. P. 120–127. DOI: [10.1134/S106377370602006X](https://doi.org/10.1134/S106377370602006X).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/305> (дата обращения 5 июня 2020 г.).

## REFERENCES

Björger J.P., Sukhorukov A.V., Leenaarts J., Carlsson M., de la Cruz Rodriguez J., Scharmer G.B., Hansteen V.H. 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).

Brault, J.W., Neckel, H.: Spectral Atlas of Solar Absolute Disk-Averaged and Disk-Center Intensity from 3290 to 12510 Å. 1987. URL: [<http://www.hs.uni-hamburg.de/forsch/einbl/html>] (accessed June 5, 2020).

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. 85–97.

Jensen E., Orral F.Q. Observational study of macroscopic inhomogeneities in the solar atmosphere. IV. Velocity and intensity fluctuations observed in the K line. *Astrophys. J.* 1963, vol. 138, pp. 252–270.

Kianfar S., Leenaarts J., Danilovic S., de la Cruz Rodriguez J., Diaz Baso C.J. Physical properties of bright Ca II K fibrils in the solar chromosphere. *Astron. Astrophys.* 2020, vol. 637, A1. DOI: [10.1051/0004-6361/202037572](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037572).

Leenaarts J., de la Cruz Rodriguez J., Danilovic S., Scharmer G., Carlsson M. 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).

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

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, pp. 120–127. DOI: [10.1134/S106377370602006X](https://doi.org/10.1134/S106377370602006X).

Turova I.P., Grigoryeva S.A., Ozhogina O.A. Spatial and temporal variations of K Ca II line profile shapes in different structures of the solar chromospheres. I. Features of individual profiles. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 3–11. DOI: [10.12737/stp-44201801](https://doi.org/10.12737/stp-44201801).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/305> (accessed June 5, 2020).

Как цитировать эту статью:

Турова И.П., Григорьева С.А., Ожогина О.А. Пространственные и временные вариации формы контуров линии К Ca II в различных структурных образованиях солнечной хромосферы. II. Методика определения и корреляционные соотношения между параметрами линии для участков  $K_1$  и  $K_2$ . *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 4. С. 10–17. DOI: [10.12737/szf-64202002](https://doi.org/10.12737/szf-64202002).