

А.В. Баранов, Н.Н. Баранова, Л.Ф. Лазарева

АНАЛИЗ АСИММЕТРИИ ПРОФИЛЕЙ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА

Нами анализировались профили круговой поляризации (r_v -профили) и остаточные интенсивности (r_l -профили) ряда магнитоактивных линий в диапазоне $\lambda\lambda$ 621,3 – 633,7 нм по спектрограммам солнечного пятна группы 289 СД от 03.08.89 г, уже использовавшиеся нами в [2]. Направление щели спектрографа было почти параллельно солнечному радиусу.

В процессе работы обнаружено, что в полутени пятна r_l - и r_v -профили показывают картину, не соответствующую следующему из теории образования линий случаю симметрии r_l -профиля и антисимметрии r_v -профиля.

Найденные особенности – неантисимметричный r_v -профиль и почти симметричный r_l -профиль в участке полутени ближе к лимбу, а также симметричный r_v -профиль и несимметричный r_l -профиль в участке полутени ближе к центру диска попадают под классификацию как два разных типа кроссовер-эффекта [1,6].

Совокупность наблюдательных данных позволяет предполагать, что в полутени пятна присутствует компонент с небольшим магнитным полем и значительными лучевыми скоростями.

Попытаемся дать количественную оценку найденных особенностей.

Для анализа ситуации воспользуемся следующим приемом.

Поскольку форма r_v -профиля линий в части полутени, обращенной к центру диска Солнца, близка к теоретической, антисимметричной, предположим, что это и есть истинный r_v -профиль, которому должен соответствовать истинный симметричный r_l -профиль. Мы знаем, что у используемых спектральных линий более глубоким является «фиолетовое» крыло, где, собственно, и находится слабый компонент. Считая «красную» половину профиля ли-

нии неискаженной частью r_l -профиля, можно восстановить истинный полный профиль интенсивности. Разность между восстановленным и наблюдаемым профилем будет давать нам информацию о «добавке», которую привносит в профиль линии движущийся компонент.

Возможны два метода реализации этого приема.

Первый – предположение, что точка $r_v=0$ является истинным центром, как это следует из теории образования линий в магнитном поле. Однако существует множество свидетельств того, что практически во всех солнечных активных образованиях, имеющих измеряемые магнитные поля, r_v -профили не антисимметричны, причем, как правило, глубже именно «фиолетовый» пик r_v -профиля. Подобна ситуация вполне типична для солнечной фотосферы. Так, в работе [9] приведены глубины «фиолетовых» и «красных» пиков r_v -профилей 59 спектральных линий, нормированные на соответствующие глубины r_v -профилей линии FeI λ 525,0.2 нм. Результаты получены для флоккула и спокойной фотосферы. Анализ таблиц работы показывает, что в 86.4% случаев «фиолетовый» пик r_v -профилей глубже «красного». Учитывая то, что профили Стокса во флоккуле и спокойной фотосфере обязаны своим параметрам преимущественно неразрешенным мелкомасштабным элементам с сильным магнитным полем, можно предполагать, что ситуация аналогична той, которая наблюдается в полутени. Усиление «фиолетового» пика r_v -профиля приводит к тому, что точка $r_v=0$ будет смещаться в коротковолновую часть спектра. В результате, есть вероятность того, что наши результаты будут обременены систематической ошибкой, величину которой, вообще говоря, практически невозможно оценить напрямую. Тем не менее, указанная процедура была нами выполнена и соответствующие профили для части линий построены.

Второй метод – использовать предположение о том, что наблюдаемые пики r_v -профилей являются истинными. Это подтверждается тем, что они, по крайней мере, у большинства линий, почти антисимметричны. В этом случае мы достаточно уверенно определяем положение пиков r_v -профилей по длине волны и, как следствие, находим центр линии как точку, соответствующую положению се-

редины отрезка соединяющего пики r_v -профиля. Определив по r_v -профилю центр неискаженной различными факторами линии, строим симметричный относительно этого центра параметр интенсивности.

Мы сравнили результаты симметризации r_1 -профиля, выполненной двумя указанными методами. В принципе, они дают одинаковый качественный результат – наличие в «фиолетовом» крыле смещенного доплеровской скоростью слабого профиля. Однако, в случае, когда за центр линии принимается точка, где $r_v=0$, форма восстановленного r_1 -профиля отличается от обычной. В частности, r_1 -профиль линии FeI λ 627,02 нм, имеющей малое расщепление в тени пятна, не говоря уже о полутени, с хорошей точностью может быть аппроксимирован формулой Миннарта, полученной из решения уравнения переноса излучения в линии для модели атмосферы Милна-Эддингтона [7] в среде без магнитного поля:

$$r_1(v) = 1/(1 + \eta_0 \cdot H(a, v)),$$

где η_0 – отношение коэффициента поглощения в центре линии к коэффициенту поглощения в непрерывном спектре (принято $\eta_0 = \text{const}$), $H(a, v)$ – функция Фойгта, зависящая от постоянной затухания « a » и расстояния от центра линии, выраженного в единицах доплеровской полуширины – « v ». Если $a \approx 0$, функция Фойгта совпадает с обычной гауссианой. В этом случае профиль линии имеет характерную форму, которую можно видеть у многих линий в фотосфере [5]. Для случая слабой линии ($\eta_0 < 1$) указанный профиль также близок к гауссиане. Последнее может быть критерием – достаточно грубым – для оценки правильности полученного после симметризации r_1 -профиля линии. Это относится и к другим спектральным линиям, имеющим фактор Ланде, близкий к 1 и не показывающих на r_1 -профиле явных особенностей, связанных с расщеплением линии в магнитном поле. Сказанное поясняет рис.1. где приведены r_1 -профили нескольких спектральных линий для момента времени 4:36 03.08.1989 г., исправленных двумя указанными методами. Использован спектр полутени, расположенной ближе к центру солнечного диска. Все линии, кроме двух (FeI $\lambda\lambda$ 627,02 и

629,78 нм) показывают сходную в обоих методах картину симметризации и выделения из общего профиля слабого компонента. В случае линии FeI λ 629,78 нм картина соответствует неодинаковому положению по длине волны точки $r_v=0$ и точки на середине отрезка, соединяющей пики r_1 -профиля. В результате, профиль линии, исправленный первым методом, мало похож на гауссиану. Это свидетельствует о том, что истинный центр линии и центр, найденный из условия $r_v=0$, не совпадают. Можно видеть, что подобная, но значительно менее выраженная картина отмечается и на r_1 -профиле линии FeI λ 629,10 нм. Эти обстоятельства свидетельствуют в пользу второго метода, которым для всех линий, кроме FeI λ 627,02 нм, мы будем пользоваться в дальнейшем. Для линии FeI λ 627,02 нм выбранная нами методика работает плохо. Дело в том, что из-за маленького ($g = 0,5$) фактора Ланде r_v -профиль линии измеряется с ошибкой, большей, чем у всех остальных линий и точность симметризации профиля интенсивности резко падает. Однако, эта линия остается, пожалуй, самой удобной линией для измерения лучевых скоростей. Ее ядро (a точнее, r_1 -профиль), из-за того, что слабый компонент имеет значительную лучевую скорость, не искажено, и центр линии корректно определяется как центр ее доплеровского ядра. Влияние слабого компонента наглядно показано на рис.1, где со всей очевидностью видно, что фиолетовое крыло линии FeI λ 627,02 нм явно глубже синего. Выделение наблюдаемого слабого компонента, внешне похожего на «флажок Бумбы» [4], подобным методом, явно надежнее, чем по линиям со средним ($1 < g < 1,5$) фактором Ланде, с помощью предложенной нами методики, основанной на анализе r_1 -профиля линии.

Однако, поскольку одной из дальнейших задач должно быть изучение изменения с высотой наблюдаемой лучевой скорости, использование остальных линий необходимо.

Отметим, что рассмотрение профилей интенсивности линий в спектрах участков полутени, расположенных ближе к лимбу, показывает, что искажения фиолетовой части линий отсутствуют. Более того, в значительной части случаев в этой части полутени более глубоким является уже красное крыло линий.

Пользуясь полученными с помощью предложенного метода данными, мы можем рассчитать два параметра, характеризующих смещенный компонент. Это лучевая скорость V_d (км/с), соответствующая смещению компонента по длине волны, и отношение глубины компонента к глубине линии D . Последнее, в случае двухкомпонентной модели пятна, характеризует величину вклада движущихся структур в общий профиль линий, который в большей части определяется излучением от той части вещества пятна, где отмечены сильные магнитные поля и практически нулевые доплеровские смещения.

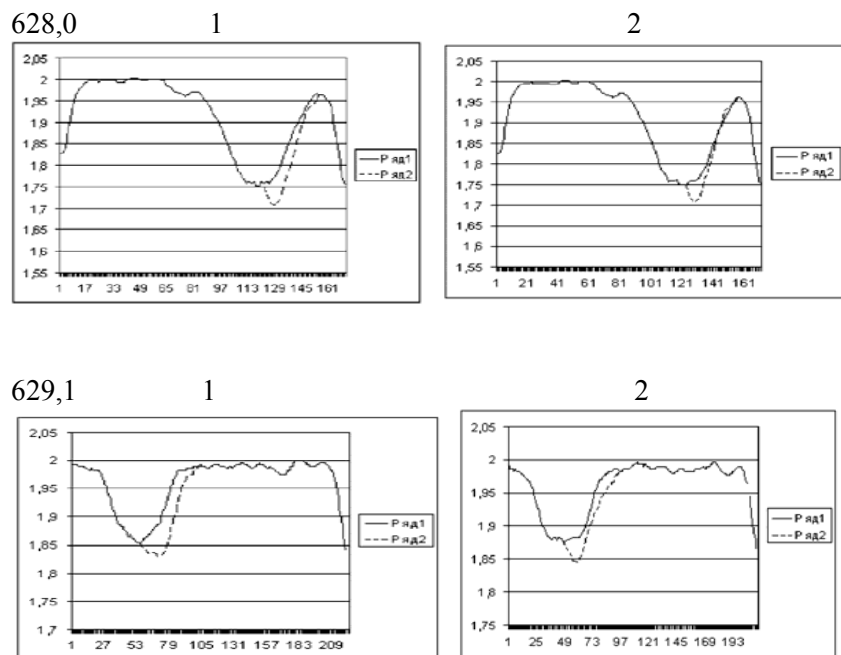


Рис. 1. Сравнение метода, использующего предположение о том, что точка $\gamma_v=0$ является истинным центром линии (обозначено цифрой 1) и метода, использующего предположение о том, что центром линии является ее середина между пиками γ_v -профилей (обозначено цифрой 2). По оси абсцисс одно деление (пиксел) соответствует $4,56 \text{ \AA}$ для длины волны $630,25 \text{ нм}$. По оси ординат приведены логарифмы интенсивности линий $\lg I$. Сплошной показан профиль линии, полу-

чающийся в результате симметризации, пунктиром – искажение профиля интенсивности движущимся компонентом

В табл. 1 приведены величины лучевой скорости и отношения глубин для указанных линий для спектрограмм, полученных в 4:36 и 4:40 03.08.1989 г. Индексом «с» обозначены данные для разрезов в полутени ближе к центру диска Солнца, индексом «l» – в части полутени, более близкой к лимбу.

Таблица 1

№	λ_0 , нм	4:36, с		4:40, с		4:36, l		4:40, l	
		V_d км/с	D	V_d км/с	D	V_d км/с	D	V_d км/с	D
1	627,0	4,5	0,09	3,7	0,18	0	0,08	-1,2	0,03
2	628,1	2,8	0,23	3,0	0,16	0	0	3,9	0,14
3	629,1	2,9	0,17	4,5	0,24	0,8	0,07	0	0,05
4	629,8	3,5	0,19	3,9	0,10	-1,2	0,05	0	0,05
5	630,1	3,4	0,13	4,6	0,11	2,6	0,06	-3,6?	0,05
6	630,2	4,3	0,29	3,3	0,31	-2,9	0,14	-2,5	0,11
7	631,5	1,2?	0,09	2,7	0,12	0	0,05	-1,9	0,04
8	631,6	2,8	0,14	2,6	0,18	-1,1	0,05	2,0?	0,08
		3,2	0,15	3,5	0,18	-0,2	0,06	-0,4	0,06

Анализируя данные табл. 1, можно видеть, что величины V_d и D имеют значительный разброс. Тем не менее видно, что для части полутени, обращенной к центру диска, все значения V_d положительны, а в количественном отношении находятся в пределах 2,6–4,6 км/с при средних значениях 3,2–3,5 км/с. Сразу отметим, что в табл. 1 со знаком «?» приведены сомнительные значения величин. Также, неуверенные значения V_d дают те профили линий, для которых значения $D \leq 0,05$. Наиболее вероятных причин малости D несколько. Это может быть малый вклад областей со слабым магнитным полем в образование суммарного профиля интенсивности линий. Вполне возможно, что потоки вещества в области малого магнитного поля имеют значительную скорость, но она направлена практически перпендикулярно к лучу зрения, вследствие чего и не выявляется при анализе профилей линий. Рассмотрение профилей, приведенных на рис.2, позволяет предположить еще одну интерес-

ную возможность. Линия FeI λ 627,02 нм показывает изменение знака разности глубин фиолетового и красного крыла. Часть получаемого при вычитании крыльев профиля, расположенного ближе к центру линии, показывает наличие лучевой скорости, направленной от наблюдателя и имеющей величину ~ 1 км/с. Вероятно, мы видим здесь проявление обычного эффекта Эвершеда. При этом исправление V_d с учетом проекции дает скорость движения вещества ~ 2 км/с, т.е. типичные для эффекта Эвершеда значения. Второй пик показывает наличие лучевых скоростей, направленных к наблюдателю и имеющих величину ~ 2 км/с.

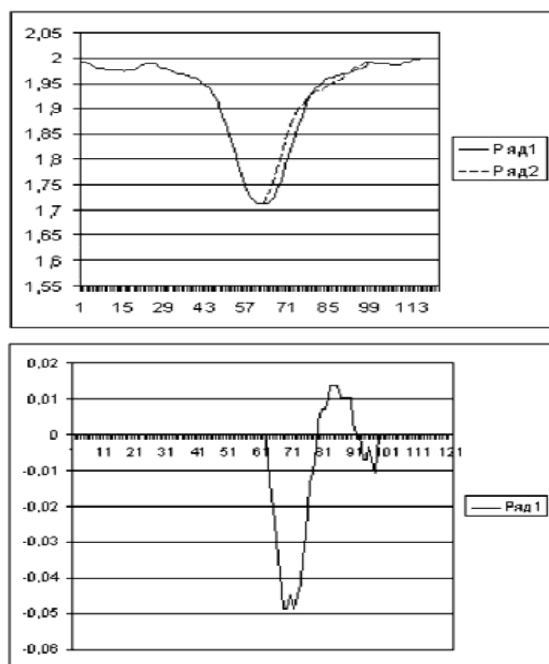


Рис. 2. Профиль интенсивности линии FeI λ 627,02 нм и величина D. Получены в $4^h 40^m$ 03.08.89 г в части полутени, близкой к лимбу. Слева приведен логарифм интенсивности $\lg I$, справа – D. Сплошной показан профиль линии, получающийся в результате симметризации, пунктиром – искажение профиля интенсивности движущимся компонентом

Рассмотрение профилей линий в части полутени со стороны лимба показывает, что почти для всех линий лучевая скорость меньше, чем в части полутени, близкой к центру. Более того, ряд линий показывает нулевые или малые отрицательные значения лучевой скорости. Наиболее надежная линия, FeI λ 630,25 нм, уверенно показывает отрицательные значения лучевой скорости с величиной 2,5–2,9 км/с. Средние значения лучевой скорости составляют $-(0,2-0,4)$ км/с. При этом напряженности магнитного поля в данных участках полутени очень близки к величине поля в полутени со стороны центра диска, т.е. физические условия в этих участках одинаковы, по крайней мере в областях с сильным магнитным полем. Следует отметить, что в половине случаев для указанных линий в этом случае значения $D \leq 0,05$, т.е. эти данные неуверенны. Тем не менее, оставшаяся часть линий результат подтверждает

Представилось интересным выяснить, как найденные особенности проявляют себя в тени солнечного пятна. С этой целью для линий, использованных в первом методе, выполнены фотометрические разрезы поперек дисперсии, захватывающие как тень, так и полутень пятна. Результаты сведены в табл. 2. В первой графе табл. 2 приведены номера линий в соответствие с табл.1, во второй – номера фотометрических разрезов. Приведенная во второй графе величина N_v – это выраженное в эрстедах расстояние пика r_v –профиля от центра линии. N_v в пятне, как правило, несколько выше напряженности магнитного поля H , и только в случае продольного поля или при больших H можно считать, что $N_v \approx H$ [8].

Проанализируем полученные данные.

Предварительно отметим, что первые приведенные разрезы соответствуют полутени (1 и 8) и границе тень–полутень(2 и 7), остальные относятся к тени. Видно, что для части полутени, обращенной к центру диска, все значения V_d положительны, имеют большой разброс, а в количественном отношении находятся в пределах 2,4–5,0 км/с при среднем значении 3,8 км/с. Для участка на границе тень–полутень, обращенной к центру диска, значения V_d тоже положительны, а в количественном отношении находятся в пределах 3,3–4,9 км/с при среднем значении 4,1 км/с.

Таблица 2

Линия	№	$H_v, \text{Э}$	V_d км/с	D	Линия	$H_v, \text{Э}$	V_d км/с	D	Линия	$H_v, \text{Э}$	V_d км/с	D
1	1	2220	4,5	0,30	2	2330	3,7	0,29	3	2120	2,4	0,17
	2	2520	4,7	0,31		2660	3,9	0,34		2330	4,9	0,34
	3	2980	3,5	0,36		3090	3,9	0,32		2640	5,1	0,17
	4	3040	4,8	0,10		3110	2,6	0,05		2770	4,7	0,26
	5	3070	2,7	0,28		3150	4,5	0,12		2640	5,5	0,18
	6	3180	3,1	0,31		3100	4,3	0,14		2640	4,0?	0,05
	7	2950	4,4	0,29		2950	3,3	0,24		2620	-4,0	0,10
	8	2210	-1,0	0,06		2870	4,1?	0,12		2430	-3,7	0,10
4	1	2360	3,7	0,33	5	2320	3,8	0,15	6	2080	3,3	0,40
	2	2390	3,3	0,26		2590	4,1	0,20		2420	4,2	0,45
	3	3010	2,1	0,14		3020	4,3	0,16		2760	4,6	0,39
	4	3130	4,1?	0,05		3280	4,3	0,29		2780	3,9	0,32
	5	3250	3,8	0,14		3280	4,8	0,21		2800	3,7	0,21
	6	2930	4,0	0,14		3110	4,3	0,29		2860	3,4	0,17
	7	2750	3,2	0,07		2940	1,3	0,06		2570	-2,0	0,09
	8	—	2,7	0,09		2760	2,1	0,14		2135	1,6	0,09
7	1	2120	3,1	0,29	8	2590	4,3	0,24	9	2560	5,0	0,29
	2	2520	3,5	0,25		2960	4,2	0,30		2700	3,8	0,20
	3	2760	2,7	0,22		3300	4,2	0,34		3390	5,0	0,15
	4	3110	4,5	0,33		3380	4,2	0,25		3400	5,4	0,28
	5	3020	4,2	0,19		3280	4,3	0,27		3330	4,7	0,35
	6	2900	4,0	0,18		2630	3,5	0,19		3270	6,1	0,19
	7	3200	4,2	0,10		2330	1,2?	0,05		2970	4,5?	0,11
	8		3,2	0,05		1980	3,8	0,19		2210	0	0?

В части полутени, расположенной дальше от центра диска, значения V_d в количественном отношении находятся в пределах от -4,1 до 4,4 км/с при среднем значении -0,2 км/с. Для участка на границе тень-полутень, обращенной к лимбу, значения V_d в количественном отношении находятся в пределах -4,5–3,8 км/с при среднем значении 0,52 км/с.

Проанализировано распределение лучевой скорости в тени пятна. Если отбросить два сомнительных случая, величины V_d положительны, находятся в пределах 2,6–5,5 км/с при среднем значении

4,3 км/с. Налицо то, что в тени пятна возможны лучевые скорости той же, а может быть даже несколько большей величины, чем в полутени и на границе тень-полутень.

В табл. 3 приведены соответствующие средние величины V_d (км/с) и D для всех восьми разрезов. Усредненная картина показывает, что выделенные профили слабого компонента в тени пятна и в части полутени имеют примерно одинаковую лучевую скорость, ≈ 4 км/сек. В то же время, на границе тень-полутень и в части полутени расположенной ближе к лимбу скорость резко падает и, возможно, даже меняет знак.

Таблица 3

№	1	2	3	4	5	6	7	8
V_d км/с	3,8	4,1	3,9	4,1	4,2	4,2	0,6	-0,2
D	0,27	0,29	0,25	0,20	0,22	0,18	0,12	0,09

Из полученных данных можно сделать несколько выводов.

Первый касается степени надежности полученных данных. Во время анализа профилей выяснилось, что наиболее надежной является картина, получаемая по линиям FeI $\lambda\lambda$ 627,02 и 630,25 нм. Линия FeI λ 630,25 нм дает надежные результаты из-за хорошей точности определения g_v -профилей. Линия FeI λ 627,02 нм удобна для определения лучевой скорости за счет того, что она имеет фактор Ланде $g = 0.5$. В результате, ее профиль интенсивности I_1 даже при значительных величинах напряженности магнитного поля является достаточно узким для того, чтобы в результате доплеровского смещения искомая часть профиля проявлялась в ее крыле. Наиболее сложным является определение характеристик профилей Стокса для линий с $1.0 \leq g \leq 1.5$. Основной причиной трудности является то, что максимум глубины слабого компонента приходится как раз на участок наибольшей крутизны профилей интенсивности используемых линий. В результате, даже относительно небольшие ошибки совмещения профилей ортогональных поляризацій этих линий могут приводить к заметным ошибкам в определении профилей. Как назло, заметная часть линий, находящихся вблизи кислородных реперов, имеют как раз такой фактор Ланде (см. табл. 1 и 2). Тем не

менее, во всех случаях эти линии подтверждают результаты, полученные по линиям с большим фактором Ланде.

Анализ данных показывает, что «фиолетовая» асимметрия, прослеживаемая в ядре и разрезах части полутени, более близкой к лимбу, достаточно плавно переходит в почти симметричную картину для параметра интенсивности и характерную для кроссовер-эффекта картину для параметра круговой поляризации. Общая картина – это явная связь найденных потоков вещества, кроссовер-эффекта и эффекта Эвершеда [3], т. е. существует наложение и, возможно, взаимодействие трех типов вещества с разным магнитным полем и разными скоростями.

Анализ профилей выявленного в работе слабого компонента показывает, что реального расщепления в нем мы не видим. Это может быть связано с тем, что в потоке вещества имеется почти параллельное поверхности и, соответственно, почти перпендикулярное лучу зрения, магнитное поле, в котором отдельные компоненты расщепления линии не разрешаются. Однако, примерно в 15% случаев, параметр круговой поляризации показывает и явно видимое расщепление, соответствующее слабому компоненту. Оценка величины поля по расстоянию между выделенными указанными выше методами пиками слабого компонента позволяет предположить, что в движущейся среде присутствует магнитное поле с напряженностью, составляющей $\approx 0.4-0.5$ от напряженности магнитного поля тени пятна. Это очень хорошо согласуется с результатами В.Н.Обридко [9], которым показано, что в пятне присутствует слабый компонент с явно меньшим полем, чем в темном компоненте тени пятна.

Работа выполнена при поддержке Программы №16 Президиума РАН, совместного интеграционного проекта 07_П_СО_02-450 ДВО РАН – СО РАН и проекта 06_01_П16_59 ДВО РАН, получившего поддержку по разделу I «Конкурса проектов ДВО РАН, тематика которых соответствует программам фундаментальных исследований Президиума РАН и отделений РАН» на 2006 – 2008 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.В., Баранова Н.Н., Лазарева Л.Ф. Особенности кроссовер-эффекта в полутени солнечного пятна. Результаты наблюдений // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. (Тр. УАФО, т. 11, вып. 11).
2. Баранов А.В., Лазарева Л.Ф. Анализ профилей Стокса спектральных линий со сложной структурой расщепления и проблема измерения магнитного поля в солнечном пятне // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 20–33 (Тр. УАФО, т. 9, вып. 9).
3. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. Москва: Мир, 1967. 2...с.
4. Бумба В. Результаты исследования эффекта Эвершеда одиночных солнечных пятен // Известия КрАО. 1960. Вып. 23. С. 212–252.
5. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. Киев: Наукова думка, 1989. 200 с.
6. Гусейнов М. Дж. О природе кроссовер-эффекта в спектрах солнечных пятен // Изв. КрАО. 2002. Т. 98. С. 17–26.
7. Григорьев В.М., Демидов М.Л., Пецеров В.С., Жигалов В.В. Кроссовер-эффект в спектре Солнца как звезды. 2002
8. Мустель Э. Р. Звездные атмосферы. Москва: Государственное издательство физ. – мат. литературы, 1960. 444 с.
9. Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М: Наука. 1985. С. 256.
10. Solanki S. K., Pantellini F.G.E., Stenflo J.O. Lines in the Wavelength $\lambda\lambda$ 4300–6700 Å with Large Stokes V Amplitudes Outside Sunspots // Solar Phys. 1987. V.107, №1, P. 57–61