

3. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. Киев: Наукова думка, 1989. 200 с.
4. Гусейнов М. Дж. Определение напряженности магнитного поля по разным линиям поглощения // Изв. КрАО. 1969. Том 39. С. 253–264.
5. Демидов М.Л., Григорьев В.М., Пещеров В.С. Стоксометрические наблюдения общего магнитного поля Солнца: возможные проявления сильных мелкомасштабных полей // Астрон. ж. 2005. Т. 82, № 7. С.628–636.
6. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. Москва: Государственное издательство физ. – мат. литературы, 1962. 892 с.
7. Мустель Э. Р. Звездные атмосферы. Москва: Государственное издательство физ. – мат. литературы, 1960. 444 с.
8. Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М: Наука. 1985. С. 256.
9. Теплицкая Р. Б., Турчина В. Д. Магнитное усиление линий в спектрах солнечных пятен // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1970, вып. 10, С. 137–160.
10. Bumba V. Magnetic Fields in Sunspot Umbrae // ВАС. 1962. V. 13, № 2. P. 48–59.
11. Keller C. U., Solanki S. K., Steiner O., Stenflo J. O. Structure of solar magnetic fluxtubes from the inversion of Stokes spectra at disk center // Astronomy and Astrophysics. 1990. V. 233. No. 2. P. 583–597.
12. Kneer F. Line Profiles in Sunspots // Astron. and Astrophys. 1972. V.18, № 2. P. 39–47.
13. Kneer F. Profiles of Magnetically Split Lines in Sunspots // Astron. and Astrophys. 1972. V.18, № 2. P. 47–50.
14. Wittmann A. Computation and observation of Zeeman multiplet polarization in Fraunhofer lines III: Magnetic Field Structure of Spot Mt.Wilson 18488 // Solar Phys. 1972. V.36, № 1. P. 29–44.

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

ОСОБЕННОСТИ КРОССОВЕР–ЭФФЕКТА В ПОЛУТЕНИ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Нами проанализированы профили Стокса ряда магнитоактивных линий (спектральный диапазон $\lambda\lambda$ 621,3 – 633,7 нм) в спектре солнечного пятна группы 289 СД от 03.08.89 г.

В отличие от ранее выполненных работ, посвященных асимметрии и доплеровскому смещению линий, нами сделана попытка изучения аномалий профилей линий из анализа их профилей круговой поляризации γ_v и профилей интенсивности γ_I .

Были испробованы два подхода к анализу.

Первый – использование линий с максимальным видимым расщеплением, что дает возможность детального анализа профилей круговой поляризации и интенсивности. Подобный подход, насколько нам известно, для анализа доплеровских смещений в пятнах ранее не применялся.

Второй – использование линий, находящихся в непосредственной близости от теллурических линий атомарного кислорода, что заметно повышает точность совмещения профилей линий в спектрах ортогональных поляризаций и надежность определения лучевых скоростей.

Первый метод.

Визуальный просмотр поляризационных спектрограмм солнечных пятен показывает, что линий, имеющих видимое разделение компонент расщепления, намного больше, чем триплетных линий с большим расщеплением. На наш взгляд, за счет линий со сложным расщеплением, которые могут быть использованы, есть возможность существенно повысить информативность спектрограмм и точность измерений степени неоднородности магнитного поля. Поэтому нами была поставлена задача: изучить особенности параметров Стокса ряда магнитоактивных линий с простым и сложным расщеплением в полутени и тени солнечного пятна.

Наблюдения проводились в течение 1989 года на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-5 Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН в четвертом порядке спектрографа АСП-20 при обратной дисперсии 0,257 мм/нм. Использовалась поляроидная оптика, состоящая из пластинки $\lambda/4$ и призмы Волластона, установленных непосредственно за щелью спектрографа АСП-20. Получены поляризационные спектрограммы ряда пятен в спектральной области $\lambda\lambda$ 621,0–634,4 нм. Область содержит значительное количество спектральных линий с явно видимым расщеплением. Анализ наблюдательного материала показал, что в августе 1989 года были получены качественные спектрограммы с разрешением $\sim 1''$, которые и были использованы для решения поставленной задачи. Отметим, что этот же наблюдательный материал был использован для измерения в пятне вертикального градиента напряженности магнитного поля [2]

Мы изучали профили круговой поляризации и интенсивности в спектре солнечного пятна группы 289 СД от 3.08.89 (площадь $S = 580$ м. д. п., $g/R = 0,46$). Группа была долгоживущей – существовала, по-видимому, около трех оборотов и площадь в течение периода наблюдений меняла мало. Проанализированы фотогелиограммы данной группы, полученные 2, 3 и 4 августа 1989 г. на телескопе АФР-2 Уссурийской астрофизической обсерватории. Наиболее примечательным из активных процессов в группе является то, что с 3 по 4 августа произошел заметный поворот пятна по часовой стрелке, что возможно, являлось проявлением крутильных колебаний.

Всего использовано 9 магнитоактивных линий, имеющих значительный эффективный фактор Ланде g и в спектре пятна показывающих явно видимое расщепление. Из них одна (FeI λ 630,25 нм) имеет триплетное, остальные – многокомпонентное магнитное расщепление. Данные о них сведены в таблице 1, в графах которых приведены последовательно: элемент, длина волны, потенциал возбуждений нижнего уровня, логарифм сил осцилляторов, высоты образования в пятне для модели Кнеера [8] (частично взятые из указанной работы, частично – рассчитанные нами) и в фотосфере для модели HOLMU согласно [7]. В последней графе приведен эффек-

тивный фактор Ланде, рассчитанный как средневзвешенное по интенсивности расстояние групп σ -компонент от центра линии по методике, применяемой в атомной и молекулярной спектроскопии. В табл. 2 последовательно даны: длина волны линии, структура зеемановского расщепления, соответствующие интенсивности компонент расщепления и эффективный фактор Ланде.

Таблица 1

Эл-т	λ_i , нм	E_i , эВ	$Lg(gf)_i$	h_i	h_{ip}	g_i
FeI	621,34	2,22	-2,58	-125	-306	2
FeI	621,93	2,20	-2,39	-140	-326	1,667
FeI	623,26	3,65	-1,22	15	-258	2
FeI	626,51	2,18	-2,57	-130	-316	1,583
FeI	630,15	3,65	-0,56	-110	-286	1,667
FeI	630,25	3,69	-1,14	10	-264	2,5
FeI	632,27	2,59	-2,37	-110	-285	1,5
CrI	633,01	0,94	-2,49	-205	-202	1,833
FeI	633,68	3,69	-0,75	-80	-283	2

Таблица 2

Линия λ , нм	Структура расщепления	Интенсивности компонент	g_{eff}
621,34	(2), 3, 5 2	(2), 1, 1 2	2
621,93	(2, 4), 7, 9, 11, 13 -6	(2, 8), 2, 3, 3, 2 2	1,667
623,26	(0, 2), 9, 11, 13 6	(8, 6), 1, 3, 6 2	2
626,51	(1, 2, 3), 7, 8, 9, 10, 11, 12, 6	(2, 8, 18), 3, 5, 6, 6, 5, 3, 2	1,583
630,15	(2, 4), 7, 9, 11, 13 6	(2, 8), 2, 3, 3, 2 2	1,667
630,25	(0), 5 2	(1), 1 2	2,5
632,27	(0, 2, 4, 6), 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 12	(32, 30, 24, 14), 1, 3, 6, 10, 15, 21, 28 6	1,5
633,01	(0, 1, 2), 21, 22, 23, 24, 25 12	(18, 16, 10), 15, 10, 6, 3, 1 12	1,833
633,68	(2), 3, 5 2	(2), 1, 1 2	2

Анализ спектров пятна в области длин волн $\lambda\lambda$ 621,3–633,7 нм выполнен на сканере со слайд-адаптером. На каждой спектрограмме профили линий записывались в спектрах право- и левокруговой поляризации для восьми точек пятна (брались разрезы вдоль щели). Шаг поперек дисперсии составлял 35 пикселей, что соответствует 4,1" или 2,98 тыс. км на поверхности Солнца.

Второй метод.

Основные его отличия от первого в следующем. В области длин волн 627,0–633,7 нм отобраны спектральные линии, имеющие вблизи узкие реперные линии атомарного кислорода. Данные о них приведены в табл. 3 и 4, обозначения в которых аналогичны обозначениям в табл. 1 и 2. Здесь присутствует уже две триплетные линии – FeI λ 627,02 нм и FeI λ 630,25 нм, имеющие факторы Ланде, различающиеся в 5 раз (0,5 и 2,5 соответственно).

Использовались те же спектрограммы, однако были взяты фотометрические разрезы для центральной полутени. Положение разреза части полутени расположенной ближе к центру солнечного диска с точностью до нескольких пикселей соответствует точке на середине между первым и вторым разрезом для первого случая. Положение разреза в части полутени, расположенной ближе к лимбу с той же точностью соответствует середине между седьмым и восьмым разрезом для первого случая.

Сравнивая два набора использованных в работе спектральных линий, мы видим, что во втором методе линии в среднем имеют явно меньшие факторы Ланде, что может уменьшить точность измерения по ним величин напряженности магнитного поля.

Однако погрешности измерений компенсируется тем, что наличие реперных линий существенно увеличивает точность совмещения спектров ортогональных поляризаций. Кроме того, понятно, что использование при измерениях вторым методом лучевой скорости по линиям с триплетным расщеплением и малым фактором Ланде (таких, как FeI λ 627,02 нм) позволяет получать более точные данные.

Результаты анализа профилей приводятся дальше.

В спектре части полутени, расположенной ближе к лимбу, хорошо заметны следующие особенности параметров Стокса. Профи-

Таблица 3

Таблицы линий, использованных в первом методе

Эл-т	λ_i , нм	E_i , эВ	$Lg(gf)_i$	h_i	h_p	g_i
FeI	627,02	2,86	-2,64	-15	-224	0,5
FeI	628,06	0,86	-4,37		-304	1,45
FeI	629,10	4,73	-0,69		-192	1,5
FeI	629,78	2,22	-2,74		-300	1,0
FeI	630,15	3,65	-0,56	-	-286	1,667
FeI	630,25	3,69	-1,14	110	-264	2,5
NiI	631,47	1,93		10		1,25
FeI	631,58	4,07	-1,75		-177	1,125

Таблица 4

Таблицы линий, использованных во втором методе

Линия λ_{05} нм	Структура расщепления	Интенсивности компонент	g_{eff}
627,02	(0), 1 2	(1), 1 2	0,5
628,06	(1,2,3,4,5), 10, 11, 12, 13, 14, 15... 19 10	(2,8,18,32,50), 5, 9, 12, 14, 15, 15, 14, 12, 9, 5 2	1,45
629,10	(0, 1, 2), 6, 7, 8, 9, 10 6	(18, 16, 10), 15, 10, 6, 3, 1 2	1,5
629,78	(0, 2), 1, 3, 5 6	(8, 6), 6, 3, 1 2	1
630,15	(2, 4), 7, 9, 11, 13 6	(2, 8), 2, 3, 3, 2 2	1,667
630,25	(0), 5 2	(1), 1 2	2,5
631,47	(1, 2), 1, 2, 3, 4 2	(2, 8), 2, 3, 3, 2 2	1,25
631,58	(1, 2, 3, 4), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 4	(2, 8, 18, 32), 4, 7, 9, 10, 10, 9, 7, 4 2	1,125

ли интенсивности в большей части практически симметричны относительно центров линий, за исключением тех частей профилей, которые находятся в самом центре линий. В этих местах «красная» часть профиля, как правило, несколько глубже «фиолетовой». Поведение g_v -профилей в полутени оказалось различным для разных линий, что можно видеть из рис.1, где приведены соответствующие

профили круговой поляризации для нескольких линий второй из указанных групп (табл. 3 и 4).

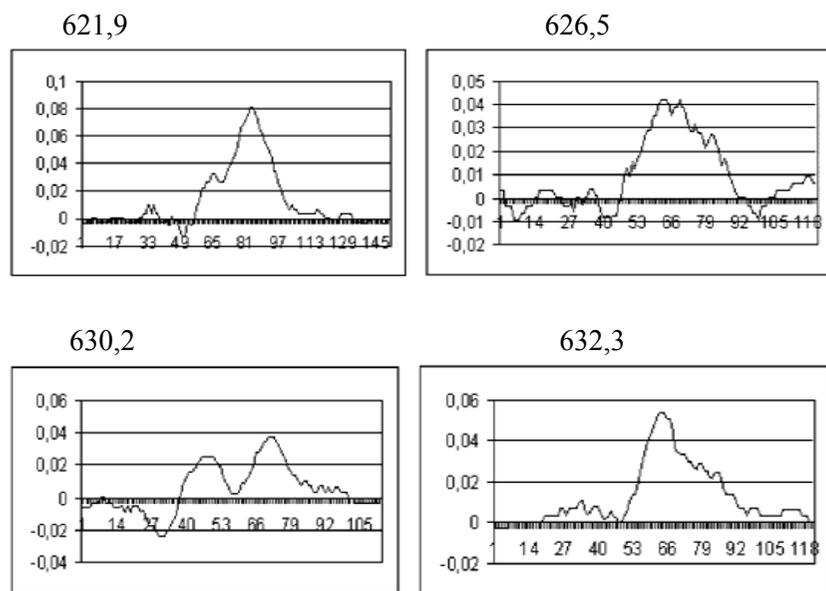


Рис.1. Профили r_v Стокса линий в дальней от центра диска Солнца полутени пятна. По оси абсцисс показана длина волны в пикселах (1 пиксел = 4,56 мÅ), по оси ординат – интенсивность в процентах

Анализ показал, что линии Fe I $\lambda\lambda$ 621,93, 626,51 и 632,27 нм, а также линия Cr I λ 633,01 нм показывают искажения, заключающиеся в том, что r_v -профили имеют пики в центре линии, а пики, соответствующие σ -компонентам в пределах ошибок отсутствуют, хотя небольшие и неглубокие участки r_v -профилей другого знака, чем центральный компонент, в местах возможного нахождения σ -компонент есть. Отметим, что вероятное положение σ -компонент найдено, исходя из оценок величин магнитного поля, полученных по остальным 5 линиям. Для остальных 5 линий формы r_v -профилей близки к обычным, хотя и на всех этих r_v -профилях отмечена явные отклонения от теории (в классическом случае r_v -

профиль линии антисимметричен относительно ее центра). Их можно объяснить наличием ошибки, связанной с неточностью определения интенсивности непрерывного спектра («смещение нуля-пункта») и действием на r_v -профили вращения плоскости поляризации.

Для объяснения такой формы r_v -профилей четырех вышеотмеченных линий необходимо предположить, что имеет место фазовый сдвиг на зеркалах. В результате этого при близком к чисто поперечному магнитном поле происходит «просачивание» в спектры круговых поляризаций r_Q -профиля (профиля линейной поляризации). Но в этом случае подобную картину показывали бы и остальные 5 линий. Кроме того, поскольку отклонения от теоретически рассчитанных профилей у разных линий различно, необходимо принимать для разных линий разные углы фазового сдвига на зеркалах. Поэтому инструментальная поляризация может объяснить эффект лишь частично.

Вероятное объяснение эффекта в том, что в данном участке пятна мы имеем наложение профилей, возникающих в образованиях с разным магнитным полем и разными лучевыми скоростями, в результате чего линии с разной величиной расщепления показывают различные r_v -профили [6,7].

На рис.2 приведены r_v -профили Стокса нескольких линий на границе тень-полутень (набор линий из табл. 3 и 4, разрез 7). Можно видеть, что линии показывают картину, более близкую к классической, хотя у всех линий, а в особенности у указанных четырех, есть заметные отклонения r_v -профиля от антисимметрии.

В части полутени, близкой к центру солнечного диска отмечен другой эффект – при почти антисимметричном параметре круговой поляризации в 82% случаев «фиолетовые» δ -компоненты линий имеет большую глубину, за счет чего r_v -профиль становится явно несимметричным относительно центра линий. Это можно видеть на рис. 3, где приведены профили круговой поляризации и интенсивности для нескольких линий первой группы.

Мы видим, что картина совершенно не совпадает с той, которая наблюдается в участке полутени, обращенной к лимбу. Асимметрия r_v -профиля хорошо выражена у линий Fe I $\lambda\lambda$ 628,06,

629,10, 630,15, 630,25 и 531,58 нм. Отметим, что такую же картину показывает линия Fe I λ 631,53 нм, не вошедшая в наши списки по той причине, что она имеет в красном крыле выраженную бленду. Остальные три, имеющие меньший фактор Ланде по сравнению с вышеперечисленными линиями, асимметрии g -профиля в ядрах линий не показывают. Однако у них есть общая особенность – их «фиолетовые» крылья заметно сильнее «красных». Особенно хорошо это заметно по линии Fe I λ 627,02 нм, имеющей самый маленький ($g = 0,5$) фактор Ланде из всех рассматриваемых линий.

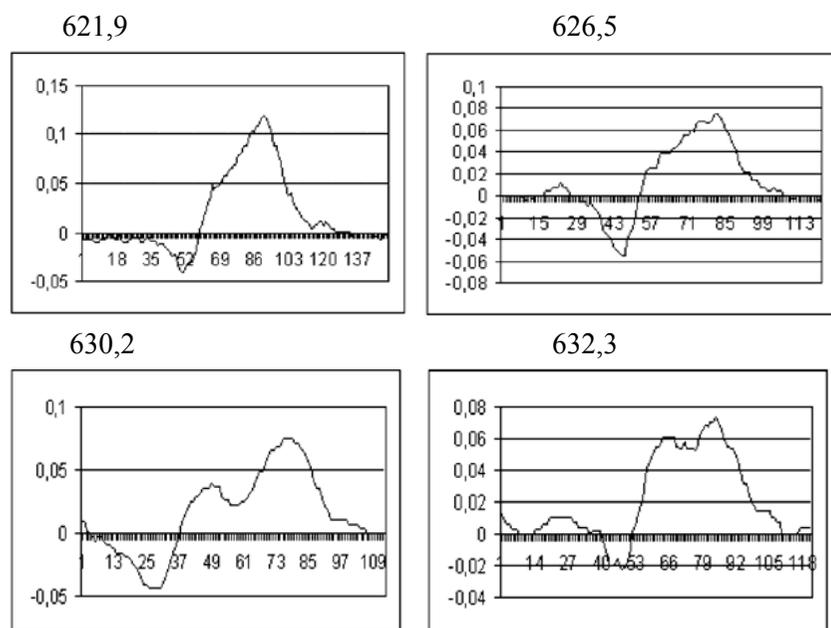


Рис.2. Профили g_v для линий в пятне на границе тень–полутень. По оси абсцисс показана длина волны в пикселах (1 пиксел = 4,56 мÅ), по оси ординат – интенсивность в процентах

Это не может быть объяснено наличием у линий бленд – слишком маловероятно, чтобы все выбранные линии имели бы блендированные «фиолетовые» крылья. Обращает на себя внимание

и то, что подобной особенности у рассматриваемых в работе линий в точках полутени, расположенных ближе к лимбу, не отмечается. Мы считаем, что эта картина может быть объяснена только наличием в первом и отсутствии во втором случае значительных лучевых скоростей в указанных участках полутени.

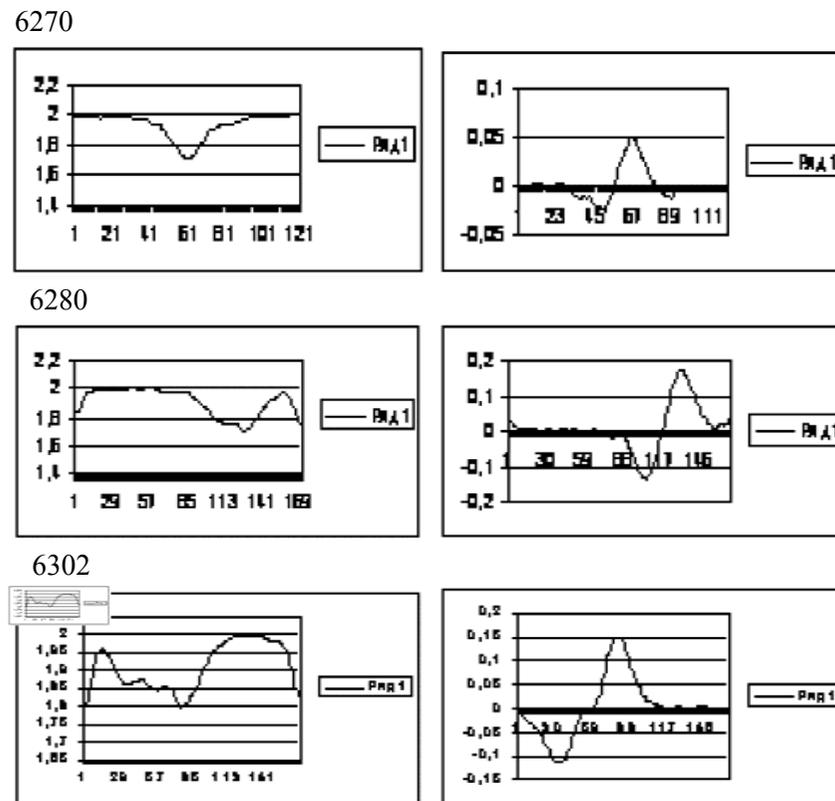


Рис. 3. Параметры Стокса: логарифм интенсивности (слева) и круговой поляризации для верхнего разреза. По оси абсцисс показана длина волны в пикселах (1 пиксел = 4,56 мÅ), по оси ординат – интенсивность в процентах для g_v -профилей и логарифм интенсивности lgI для g_r -профилей. Набор линий согласно табл. 3 и 4

Следовательно, асимметрия параметра интенсивности может быть объяснена предположением о наличии в верхних слоях диапазона эффективного образования линий потоков вещества с характерными скоростями несколько километров в секунду и явно малым магнитным полем. Ситуация, в общем, сходна с эффектом Эвершеда, при объяснении которого обычно предполагается наложение друг на друга двух полей скоростей. В то же время, найденные особенности – неантисимметричный v -профиль и почти симметричный r -профиль в участке полутени ближе к лимбу, а также симметричный v -профиль и несимметричный r -профиль в участке полутени ближе к центру диска попадают под классификацию как два разных типа кроссовер-эффекта [7].

Можно сделать несколько предварительных выводов.

Первое – пятно находилось на спокойной фазе развития и являлось достаточно типичным представителем этого класса активных явлений. Следовательно, кроссовер-эффект в том виде, в котором мы его наблюдали, может быть вполне типичным явлением для пятен.

Второе – поскольку картина симметрии одного и антисимметрии другого профиля Стокса, сохраняя в основном подобие для всех линий, в то же время сильно меняется, можно предполагать, что оптическая толщина поля скоростей, вызывающего асимметрии, сравнима с диапазоном оптических глубин образования используемых линий.

Для того, чтобы исказить крыло магнитоактивной линии, в полутени необходимы лучевые скорости порядка нескольких километров в секунду, что характерно как для кроссовер-эффекта, так и для эффекта Эвершеда [3].

Непосредственно из рис.4, анализируя v -профили линий, можно видеть, что движущийся со значительной скоростью компонент компактен (не «размазан» по длине волны), т.к. не расширены «фиолетовые» пики v -профилей. Следовательно, величина магнитного поля в движущейся части вещества такова, что величина расщепления используемых линий меньше, чем их доплеровская полуширина [1].

Работа выполнена при поддержке Программы №16 Президиума РАН, совместного интеграционного проекта 07_II_CO_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. Поведение экстремумов профилей Стокса магнитоактивных линий в спокойной солнечной фотосфере // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 3–14. (Тр. УАФО; т.8, вып.8).
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. 30–33. (Тр. УАФО; т.8, вып.8).
3. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. Москва: Мир, 1967. 384 с.
4. Бумба В. Результаты исследования эффекта Эвершеда одиночных солнечных пятен // Известия КрАО. 1960. Т. 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. Обридо В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М: Наука. 1985. 256 с.
8. Kneer F. Line Profiles in Sunspots // Astron. and Astrophys. 1972. V.18, № 2. P. 39–47.