

А.В.Баранов, С.Г.Можаровский

ПРОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ В СОЛНЕЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ РАСЩЕПЛЕНИЯ

Для 13 спектральных линий железа и одной линии хрома в диапазоне длин волн $\lambda\lambda$ 621,3–633,7 нм выполнены решения системы уравнений переноса излучения с учетом аномальной дисперсии. Использована модель солнечного пятна Книра. Расчет велся для значения напряженности магнитного поля 2400 и 2800 Э, углы наклона силовых линий полагались равными 60° и 75° .

Проведенные расчеты показали, что профили круговой поляризации имеют инверсию вблизи центра линии FeI λ 630,2 нм. Из остальных линий наиболее заметную инверсию V-профиля имеют линии FeI λ 623,2 нм и CrI λ 633,0 нм. Обе они имеют значительные факторы Ланде (2 и 11/6 соответственно) и компактные группы π - и σ -компонентов. Кроме этих линий еще пять имеют указания на инверсии V-профиля. Заметных особенностей в центре не имеет линия с триплетным расщеплением и малым фактором Ланде $g = 0,5$ (FeI λ 627,0 нм). Нет явных признаков инверсий V-профиля у линий FeI $\lambda\lambda$ 621,3 и 633,7 нм. Они имеют большой эффективный фактор Ланде ($g = 2$), но их структура расщепления – ((2), 3,5)/2 – такова, что их π -компоненты находятся далеко от центра линий и заметный эффект показывать не могут. Из остальных линий небольшой эффект (<1%) имеют линии FeI $\lambda\lambda$ 628,0, 632,3 и 626,5 нм.

Экспериментальный материал в основном подтверждает приведенные выше расчеты, но следует отметить, что указания на инверсию профилей круговой поляризации показывают наблюдения в линии FeI λ 633,7 нм. Природа этого не совсем понятна, но, возможно, связана с наличием в пятне элементов тонкой структуры.

Целью данной работы являлось рассмотрение проявления аномальной дисперсии в солнечных пятнах вблизи центров ряда

магнитоактивных линий с различной структурой зеемановского расщепления.

Аномальное поведение магнитоактивных линий в спектрах солнечных пятен известно довольно давно. В 1959 году на подобный эффект первым указал академик А.Б.Северный [9]. В 60-е годы теоретическое объяснение проявлений аномальной дисперсии вблизи центров в относительно сильных линиях с большим фактором Ланде было дано Д.Н.Рачковским [8]. В семидесятые годы аномальное поведение параметров Стокса вблизи центров магнитоактивных линий довольно интенсивно изучалось [1–2, 6–7, 10–11]. Из последних работ в этом направлении отметим работу В.Г.Лозицкого и Д.Г.Коломиец [8]. В работах преимущественно анализировались профили интенсивности I_1 и профили круговой поляризации I_V линии FeI 630,25 нм.

При этом возникла некоторая неопределенность в истолковании объекта исследований. В спектрах солнечных пятен было отмечено явление, которое получило название смещение π -компонента и другие особенности. Их сущность заключается в том, что при наблюдениях спектров пятен с поляризационной оптикой в линиях с большим расщеплением наблюдаются, как правило, два экстремума интенсивности. Один по своему положению по длине волны примерно соответствует (расположен несколько дальше от центра линии по длине волны) положению σ -компонента, второй, близкий по положению к π -компоненту – несколько смещен от центра линии в сторону, противоположную положению σ -компонента. Ни тот, ни другой экстремум с реальными положениями π - и σ -компонентов не совпадают, причем различия в первом случае больше. Появление смещенного экстремума вблизи σ -компонента обусловлено взаимным наложением компонент расщепления линии, хорошо проявляется при анализе формы I_V -профиля данной линии и проявляется до тех величин расщепления, при которых взаимодействие компонент отсутствует. Для случая слабого магнитного поля этот эффект рассмотрен нами в [3].

У центра спектральной линии отмечаются особенности, связанные как с проявлениями аномальной дисперсии, так и со смещением центрального компонента ($I_V + I_1$)-профиля в спектре круговой

поляризации (не π -компонента!). В данной работе рассматривается другой эффект – инверсия γ_V -профиля вблизи центра линии. Последнее поясняет рис.1., где приведены профили линий, рассчитанные для типичных значений напряженности магнитного поля H и углов наклона силовых линий магнитного поля к лучу зрения γ . На рис 1.а приводится γ_V -профиль линии FeI 630.25 нм с характерными изменениями γ_V -профиля у центра линии, вызванными воздействием аномальной дисперсии. H полагалась равной 2600 Э, $\gamma=60^\circ$. На рис.1.б приведен $(\gamma_V + r_1)$ -профиль той же линии при тех же H и γ . Вертикальными чертами на рисунке отмечены (слева направо): положение экстремального значения γ_V -профиля, истинное положение σ -компонента, истинное положение центра линии (и центра π -компонента), а также положение экстремума $(\gamma_V + r_1)$ -профиля. Анализируя рисунок, можно видеть, что рассчитанные смещения компонентов расщепления линии FeI 630.25 нм относительно истинных положений π - и σ -компонентов имеют характерную величину 16 мÅ. Отметим, что для рассчитываемой линии подбором значений H , γ , $Lg(gf)_1$ и g_1 можно получить рассчитанные смещения $(\gamma_V + r_1)$ -профиля примерно до 40 мÅ.

Для 12 спектральных линий железа, одной линии ванадия и одной – хрома (данные о них приведены в табл.1), расположенных в диапазоне $\lambda\lambda$ 621,3–633,7 нм, выполнены решения уравнений переноса излучения с учетом аномальной дисперсии. Использована модель солнечного пятна Книра. Расчет велся для значения напряженности магнитного поля 2400 и 2800 Э, углы наклона силовых линий полагались равными 60° и 75° .

Проведенные расчеты показали, что профили круговой поляризации имеют инверсию вблизи центра линии FeI λ 630.2 нм (амплитуда инверсии $A=1.5\%$). Из остальных линий наиболее заметную инверсию V- профиля имеют линии FeI λ 623.2 нм ($A=0.6\%$) и CrI λ 633.0 нм ($A=1.9\%$). Обе они имеют значительные факторы Ланде (2 и 11/6 соответственно) и компактные группы π - и σ -компонентов. Видно, что у линии хрома глубина инверсии сравнима (а при заданных для расчета параметрах даже больше) с глубиной инверсии γ_V -профиля линии FeI λ 630.2 нм, хотя размер областей

инверсии у последней больше. Данные, характеризующие инверсии различных спектральных линий, приведены в табл.2.

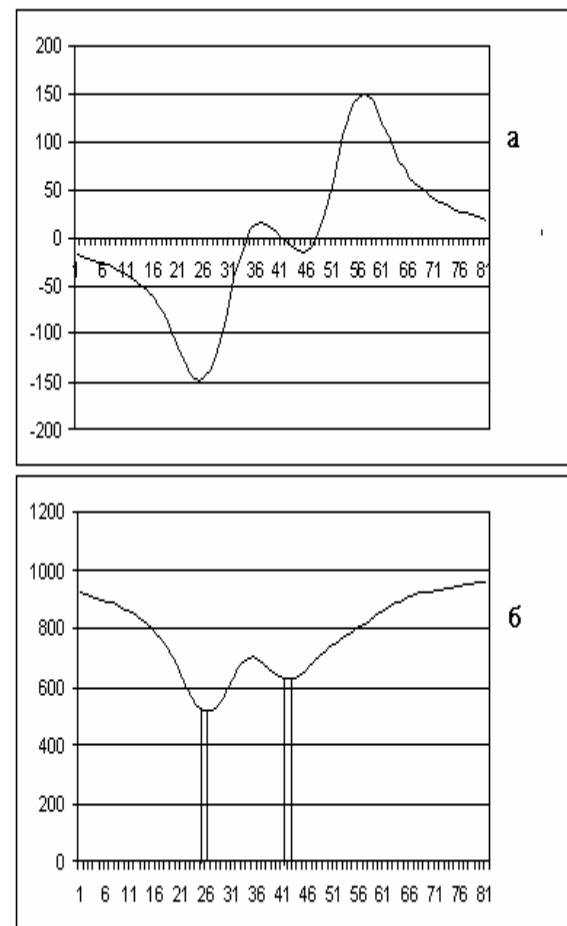


Рис. 1. По вертикальной оси значений даны в тысячных долях интенсивности непрерывного спектра, по горизонтальной – значения выражены в пикселах (1 пиксел = 16 мÅ). Положение центра линии соответствует пикселу за номером 41

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
V1	621.38	0.30	-1.84	-110	-192	1.495
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	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	-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

Примечание. В табл.1 приведены последовательно: элемент, длина волны линии λ_i , потен-циал возбуждения ее нижнего уровня E_i , логарифм сил осцилляторов $Lg(gf)_i$, глубина образования линии в тени пятна h_i и в фото-сфере h_{ip} . В последней колонке даны эффективные факторы Ланде g_i .

Таблица 2

Линия, λ , нм	H=2400 Э, $\gamma=60^\circ$		H=2600 Э, $\gamma=75^\circ$		H=2800 Э, $\gamma=60^\circ$		H=2800Э, $\gamma=75^\circ$	
	A,%	L,mA	A,%	L,mA	A,%	L,mA	A,%	L,mA
623.2	0.6	22	0.5	28	0.8	24	0.6	21
626.5	0.3	11	0.3	18	0.4	13	0.3	30
628.0	0.4	10	0.3	15	0.5	15	0.4	20
630.2	1.5	34	1.0	39	1.7	39	1.0	43
632.3	0.2	10	0.2	15	0.4	12	0.3	18
633.0	1.9	10	1.1	30	2.2	23	1.3	31

Примечание. Величина A – максимальная величина инверсий γ_V -профиля, L – размер области инверсий в мÅ.

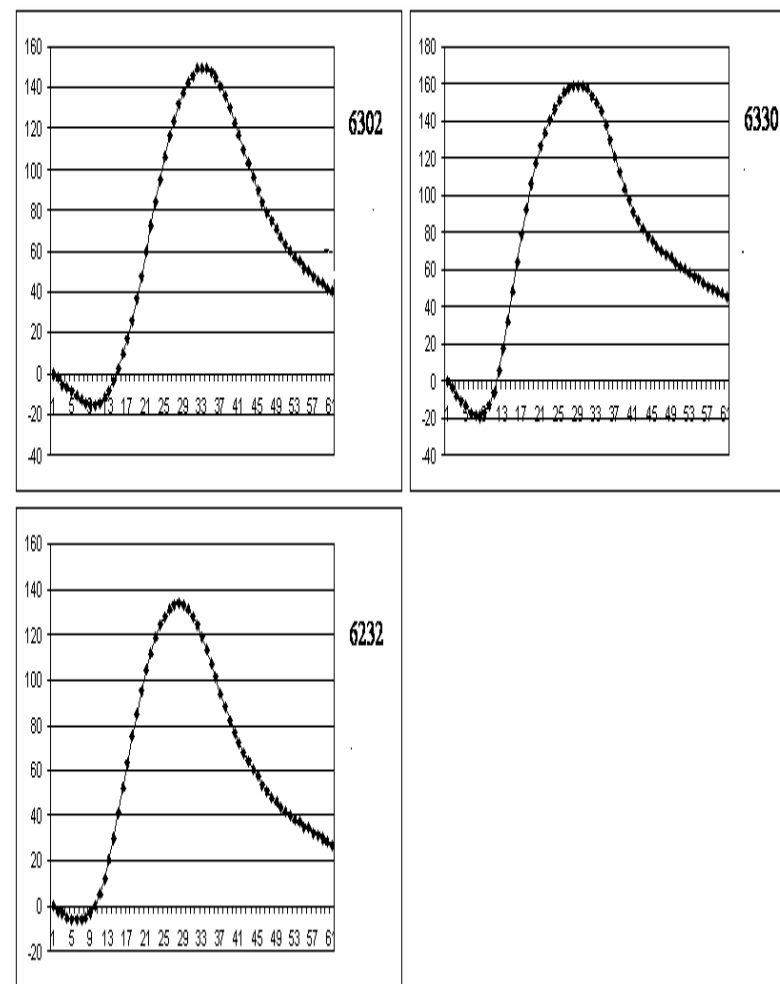
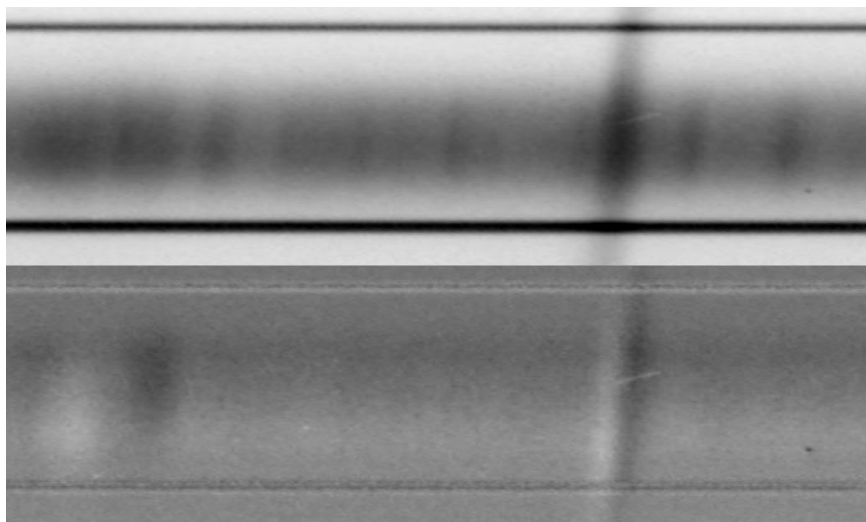


Рис. 2. Профили линий с рассчитанной наибольшей инверсией γ_V -профиля. Обозначения те же что и на рис.1

Кроме этих линий еще пять имеют указания на инверсии γ_V -профиля. Это линии FeI λ 626.5 нм (A= 0.3%), FeI λ 628.0 нм (A= 0.4%), FeI λ 623.2 нм (A= 0.3%). Количественные значения глубин инверсий приведены для значений H = 2600 Э, γ полагалось равным

60°. При $N = 2600 - 2800 \text{ \AA}$ и $\gamma = 75^\circ$ очень слабая ($A = 0.1\%$) инверсия отмечается у линии FeI $\lambda 621.9 \text{ нм}$, не имеющей центрального π -компонента расщепления.

Расчеты показали, что сколько-нибудь заметных особенностей в центре не имеет линия FeI $\lambda 627.0 \text{ нм}$ с триплетным расщеплением и малым фактором Ланде $g = 0.5$. Нет явных признаков инверсий γ_V -профиля у линий FeI $\lambda\lambda 621.3$ и 633.7 нм . Они имеют большой эффективный фактор Ланде ($g = 2$), но структура расщепления – $((2), (3,5))/2$ – такова, что их π -компоненты находятся далеко от центра линий и сколько-либо заметный эффект показывать не могут. Но на их расчетных профилях на значительном расстоянии от центра линии есть депрессии (не инверсии!) γ_V -профиля, которые, по-видимому, обусловлены действием аномальной дисперсии.

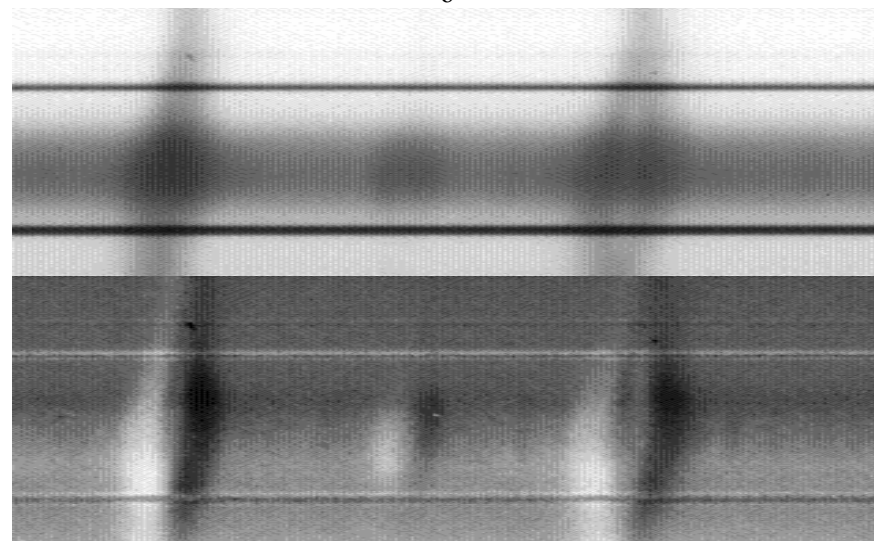


а

Рис. 3,а.. Триплет FeI $\lambda 627.0 \text{ нм}$ с фактором Ланде $g=0.5$. Разрез поперек пятна. Сверху профиль интенсивности, снизу профиль круговой поляризации.



б



в

Рис. 3. Наблюдаемые профили Стокса линий: б – триплет FeI $\lambda 630.2 \text{ нм}$ с фактором Ланде $g=2.5$ (справа), в – линия FeI $\lambda 633.68 \text{ нм}$ без центрального компонента (справа). Слева линия FeI $\lambda 633.53$. У профиля круговой поляризации линии FeI $\lambda 633.68 \text{ нм}$ заметны особенности в центре

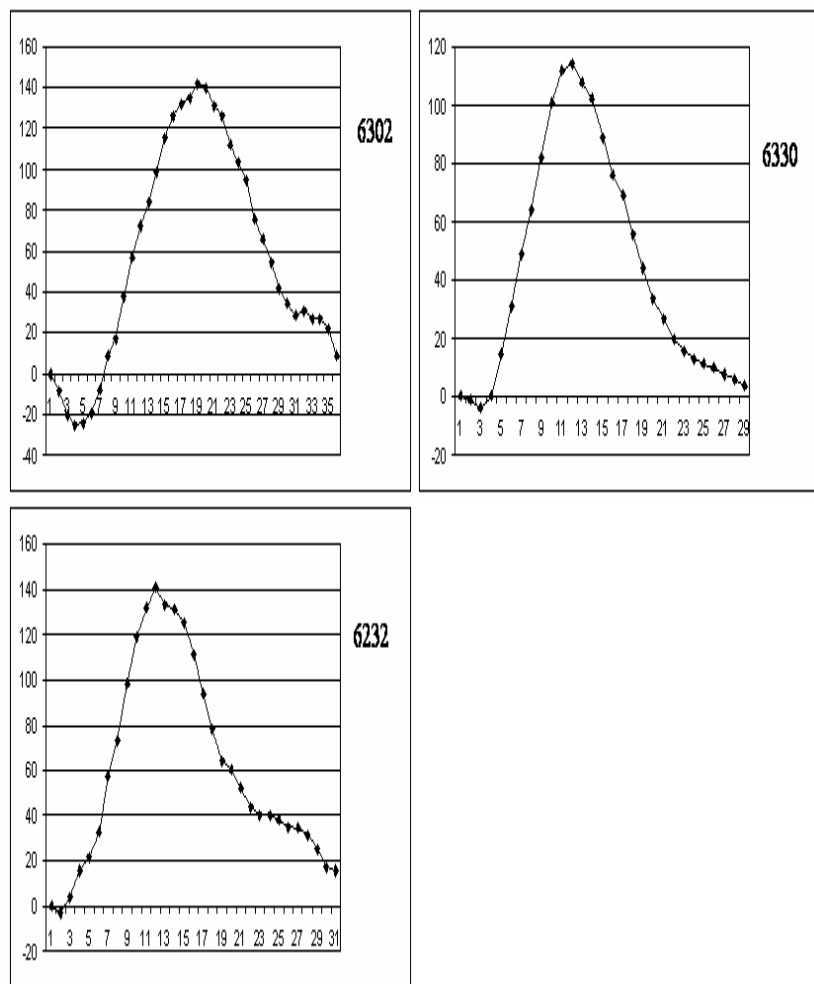


Рис. 4. Экспериментальные профили круговой поляризации линий, имеющих максимальные значения инверсии. По вертикальной оси значений даны в тысячных долях интенсивности непрерывного спектра, по горизонтальной – значения выражены в пикселах

Таким образом, инверсии профилей Стокса круговой поляризации могут наблюдаться во многих спектральных линиях, имеющих более или менее значительные факторы Ланде, компакт-

ные группы компонентов расщепления и эквивалентные ширины в пятне порядка 50 mÅ и более.

Экспериментальный материал, изложенный в работе [4] в основном подтверждает приведенные выше расчеты. Наиболее заметные проявления инверсии γ_V -профиля в указанном спектральном диапазоне имеют (в соответствии с теоретическими расчетами) линии FeI λ 630.2 нм ($A = 2.0\%$), CrI λ 633.0 нм ($A = 1.0\%$) и FeI λ 623.2 нм ($A = 0.6\%$). В скобках приведены максимальные измеренные значения A . Отметим, что измерения относятся к внутренней полутени пятна.

С учетом конечного спектрального разрешения спектрографа и фотоматериалов, это находится в соответствии с теоретически рассчитанными величинами. Методически, если за центр линии принимать не половину расстояния между одинаковыми значениями γ_V -профиля, а точку лежащую на середине расстояния между пиками γ_V -профиля, для линий CrI λ 633.0 нм и FeI λ 623.2 нм, можно получить величины инверсий, близкие к рассчитанным.

Однако следует отметить, что указания на инверсию профилей Стокса круговой поляризации показывают наблюдения в линии FeI λ 633.68 нм, имеющей у центра величину $A \sim 0.2\%$ (см. рис.3.). Природа этого не совсем понятна, но, возможно связана с наличием в пятне элементов тонкой структуры, как это предположено в [6]. На возможность этого, исходя из анализа экспериментальных профилей Стокса линии FeI λ 630.2 нм, указано в недавней работе [5]. Вопрос требует внимательного дальнейшего анализа с использованием линий со структурой расщепления, аналогичной структуре расщепления линии FeI λ 633.68 нм.

Авторы благодарны Н.Н.Барановой за помощь в расчетах и в подготовке рукописи работы. Работа выполнена при поддержке Программы N 16 Президиума РАН и грантов ДВО РАН 09-I-П7-01, 09-II-СО_02-002 и 09-III-A-02-49.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.В. О расщеплении π -компонента магнитоактивных линий в спектрах солнечных пятен // Солнечные данные. 1974. № 6. С. 66–71.

2. Баранов А.В. О природе расщепления π -компонента магнитоактивных линий в спектрах солнечных пятен // Солнечные данные. 1974. № 7. С. 100–105.
3. 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).
4. 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).
5. Лоцицкий В.Г., Коломиец Д.Г. Особенности расщепления зеемановской π -компоненты линии FeI λ 630.25 нм в спектрах солнечных пятен и вспышек // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 79–96 (Тр. УАФО; т. 9, вып. 9).
6. Могилевский Э.И., Демкина Л.Б., Иошина Б.А., Обридко В.Н. // Structure and Development of Solar Active Region. IAU Sump. No. 35. Budapest. 1967. Dordrecht/Ed. By K.O.Kiepenheuer. P.215.
7. Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М: Наука. 1985. С. 256.
8. Рачковский Д.Н. Эффекты магнитного вращения в спектральной линии // Известия Крым. астрофиз. обсерватории. 1962. Т.28. С.259–270.
9. Северный А.Б. // Астрон. Ж. 1959. т. 36. с. 126.
10. Beckers J.M., Schröter E.H. // Solar Phys. 1969. v.7. P.22. (v.10. P.384.)
11. Kunzel H., Staude J. The anomalous splitting of the π -component of a Zeeman triplet in sunspot umbrae and suggestions for its interpretation // Astron. Nachrichten. 1975. V.296. N 4. P.171–176.

УДК 523.98

А.В. Баранов, С.Г. Можаровский

АНАЛИЗ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТА ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОСФЕРЫ, ПОСТРОЕННОЙ ПО СВЯЗИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШИРИНЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Есть модель элемента тонкой структуры факела, которая описывает связь магнитного поля H и эквивалентной ширины спектральных линий. Здесь для решения этой задачи использован расчет спектральных линий с учётом аномальной дисперсии.

Для 28 спектральных линий выполнен анализ k_1 -площади r_v -профилей, нормированных на площадь r_v -профиля линии Fe I λ 525.35 нм; k_1 сравнивались с теоретическими для $H = 624 \text{ Э}$, $\gamma = 45^\circ$. Рассмотрены параметры связи величин: S_1 – отношения рассчитанных и наблюдаемых k_1 и коэффициенты их корреляции S_2 . При использовании теории Унно среднее значение $S_1 = 1.001$, а величина $S_2 = 0.988$. При учете аномальной дисперсии $S_1 = 0.902$, а $S_2 = 0.975$. Есть заметное различие S_1 при близких коэффициентах корреляции. Вероятно, это следствие инверсий r_v -профиля, наблюдаемых у центров магнитоактивных линий. Учет этого предполагает коррекцию модели в сторону уменьшения температуры.

Известно, что профили Стокса многих фраунгоферовых линий сильно зависят от физических условий в солнечной атмосфере. Так, из наблюдений следуют факты усиления и ослабления линий в спектре солнечного пятна (см., например, [14]), ослабления линий во флоккулах (сводку ссылок см. в [15]), изменения профилей линий во время вспышек [1,2]. В [2] получено, что характер изменения профилей магнитоактивных линий во время вспышек в значительной мере определяется изменениями температуры, плотности и поля скоростей в фотосфере. Изменение температурного распределения с высотой во вспышке (согласно построенным полуэмпирическим моделям) отмечено в [12].