

Солнечная активность и ее влияние на Землю. – Владивосток: Дальнаука, 2008. 154 с. (Тр. УАФО; т. 11, вып. 11)

В сборнике представлены статьи, посвященные различным проблемам физики Солнца: методике и результатам измерения солнечных магнитных полей, статистическом исследованию индексов солнечной активности и динамики солнечных вспышек, изучению межпланетного магнитного поля, а также слиянию солнечной и геомагнитной активности на работу морских навигационных приборов. Представлены также статьи по методике измерений радиопотока Солнца и истории солнечной радиоастрономии с Уссурийской обсерватории.

Сборник статей предназначен для научных работников и студентов, специализирующихся в области физики Солнца и солнечно-земных связей.

Solar activity and its influence on the Earth. – Vladivostok : Dalnauka, 2008. 154 p. (Transactions of Ussuriysk astrophysical observatory; vol. 11, issue 11).

This articles included in this issue concern different problems of solar physics: the methods and interpretation of the solar magnetic field measurements, statistical study of the solar activity indices, solar flare dynamics, investigation of the interplanetary magnetic field, and influence of the solar and geomagnetic activity on the marine navigation equipment. The articles also are presented concerning the solar radio flux measurements and history of solar radio astronomy in Ussuriysk Observatory.

The collection of the articles is addressed to scientists and students who specialize in fields of solar and solar-terrestrial physics.

Редакционная коллегия: А.В. Баранов, Г.И. Корниенко,
Д.В. Ерофеев (отв. редактор)

Рецензенты: А.В. Мордвинов, А.Г. Суханов

Утверждено к печати Ученым советом
Уссурийской астрофизической обсерватории

© УАФО ДВО РАН, 2008

© Дальнаука, 2008

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЛИНИЙ СО СЛОЖНЫМ РАСЩЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Ввиду того, что среди фотосферных магнитоактивных линий простую структуру расщепления и значительный фактор Ланде имеет их небольшое количество, очень часто в измерениях используются линии со сложной структурой расщепления [4, 10, 13, 14]. При этом используются эффективные факторы Ланде $g_{\text{эфф}}$ – величины, средневзвешенные по интенсивности I_i факторов Ланде g_i поляризованных по кругу компонент расщепления:

$$g_{\text{эфф}} = \sum I_i \cdot g_i.$$

Методика заимствована из оптической спектроскопии, где подобный расчет делается для линий излучения. В условиях солнечной атмосферы, для линий поглощения возможность ее применения изучена крайне слабо. В то же время, большой разброс значений магнитного поля, получаемых по линиям со сложной структурой расщепления [2,11] дает основания для анализа существующих методик измерений по этим линиям.

Мы рассчитали теоретические профили спектральных линий в диапазоне длин волн $\lambda\lambda$ 524,2–525,4 нм. Он широко используется наблюдателями, поскольку содержит в себе четыре линии с триплетной структурой расщепления. Но, кроме того, в этом диапазоне есть пять линий нейтрального железа, имеющих сложную структуру расщепления, которые могут быть задействованы в измерениях [5]. Список линий, которые могут быть использованы в наблюдениях, дан в таблице 1.

В таблице последовательно даны: номер линии, название элемента, длина волны линии λ , номер мультиплета N_m , эквивалентная ширина линии в фотосфере W , потенциал возбуждения нижнего уровня перехода ϵ_i , логарифм сил осцилляторов $Lg(fg)_i$. Далее при

ведены последовательно: формула расщепления линии, фактор Ланде $g_{\text{эфф}}$, эффективная высота образования линий для модели фотосферы HOLMU, рассчитанная нами по методике [3] для линий 1 и 5: для центральных интенсивностей h_c и для случая полных линий (их эквивалентных ширин) – h_w . Для остальных линий высоты образования взяты из той же работы [3].

Таблица 1

N	Эл-т	λ , нм	N_m	W , мÅ	ϵ_i , эВ	Lg(fg)	Структура	Фактор Ланде	H_c , км	H_w , км
1	Fe I	524,250	843	80	3,63	-1,00	$^1I_6 - ^1H_5$	1,0	337	243
2	Fe I	524,378	1089	60	4,26	-1,25	$^5F_3 - ^5F_4$	1,5*	268	195
3	Fe I	5247,06	1	59	0,09	-4,95	$^5D_2 - ^7D_3$	2,0*	415	328
4	Cr I	524,757	18	76	0,96	-1,61	$^5D_0 - ^7P_1$	2,5	417	308
5	Fe I	524,911	1166	30	4,47	-1,53	$^3G_3 - ^3F_3$	0,917*	177	145
6	Fe I	525,022	1	62	0,12	-4,94	$^5D_0 - ^7D_1$	3,0	409	324
7	Fe I	525,065	66	104	2,20	-2,19	$^5P_2 - ^5P_3$	1,667*	493	330
8	Fe I	525,303	113	16	2,28	-3,86	$^3P_2 - ^5P_1$	1,0*	190	176
9	Fe I	525,347	553	75	3,28	-1,59	$^5D_1 - ^5D_1$	1,5	372	262

Примечание. Знаком «*» отмечены факторы Ланде линий со сложным расщеплением.

Структура расщепления линий приведена на рис.1, где в относительных единицах показаны интенсивности компонент расщепления (ось ординат) и положение компонент расщепления по длине волны (ось абсцисс). На рисунке видно, что линии 2, 3 и 7 имеют структуру расщепления первого типа по классификации [6], линия 8 – второй тип расщепления, линия 5 – третий.

Нами выполнен расчет профилей Стокса этих линий для случаев, когда учитывалась вся сложная структура расщепления и случаев, когда линия предполагалась триплетом с эффективным фактором Ланде g , рассчитанным для этой линии по обычной методике. Найдены соответствующие площади параметров круговой поляризации, их отношение $S=S_{\text{сложной линии}}/S_{\text{триплета}}$ для каждой линии, расстояние максимумов круговой поляризации от центра линий для обоих случаев и их отношение $L=L_{\text{сложной линии}}/L_{\text{триплета}}$. Данные приведены в табл.2, где приняты следующие обозначения: S_ϕ и L_ϕ – соответствующие параметры для линий в факельной точке, рассчитанных для модели Келлера [11]. S_π и L_π – аналогич-

ные отношения для линий в пятне рассчитанные для модели Книра [12]. В случае модели Келлера расчеты проводились для трех значений напряженности магнитного поля H : 1300, 1700 и 2100 Э и для значений угла наклона силовых линий магнитного поля к лучу зрения γ в пределах от 0° до 60° с шагом 15° . Для модели пятна Книра расчет проведен при значениях H , равных 2100, 2450 и 2800 Э и того же набора γ .

Оказалось, что для каждой отдельной линии зависимость S_ϕ от γ практически отсут-ствует. Для наиболее «правильной» линии Fe I λ 5247.06 Å при изменении γ от 0° до 60° величина S_ϕ для всех указанных H показывает уменьшение на величину меньше 1%. Величина L_ϕ показывает изменения в пределах 3%, причем какая-то явная закономерность в изменениях отсутствует. В пятне для данной линии изменения S_ϕ несколько больше – наблюдается ее небольшое уменьшение с ростом γ : при $H=2100$ Э на 3%. При $H=2450$ Э уменьшение достигает 5%, а при $H=2800$ Э – 7%. В то же время величина L_ϕ изменяется меньше – примерно на 2%, причем какой-либо закономерности в изменениях нет.

Наиболее заметные отклонения S_ϕ и L_ϕ от единицы отмечены для линии Fe I λ 524,911 нм. При изменении γ от 0° до 60° величина $S_\phi \approx 0,73$ и для $H=1300$ Э показывает рост на величину около 8%, при $H=1700$ Э рост составляет 10% а при $H=2100$ Э – 9%. В то же время величина $L_\phi \approx 1,08$ для $H=1300$ Э показывает увеличение на 2%, $L_\phi \approx 1,11$ для $H=1700$ Э – уменьшение на 4%, а $L_\phi \approx 1,16$ для $H=2100$ Э – на 5%. В пятне при изменении γ от 0° до 60° величина $S_\phi \approx 0,94$ для $H=2100$ Э показывает уменьшение на величину около 2%, при $H=2450$ Э имеем $S_\phi \approx 0,83$, а уменьшение составляет 2%. При $H=2800$ Э величина $S_\phi \approx 0,93$ а уменьшение – около 3%. Величина $L_\phi \approx 1,17$ для $H=2100$ Э показывает увеличение на 3%, для $H=2450$ Э имеем $L_\phi \approx 1,22$ и уменьшение на 1%, а для $H=2800$ Э величина $L_\phi \approx 1,19$ и показывает увеличение на $\approx 2\%$.

Ввиду малости указанных изменений мы рассмотрели всю совокупность величин указанных параметров используемых линий и определили их вариационный размах для случая всех использо-

ванных значений N и γ . Результаты расчетов сведены в табл.2. Анализируя данные таблицы можно сделать следующие выводы.

Таблица 2

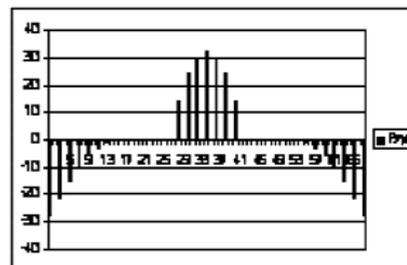
Линия, λ нм	524,378	524,706	524,911	525,065	525,303
S_{ϕ}	0,99–1,00	0,99–1,01	0,73–0,74	1,08–1,10	0,78–0,84
L_{ϕ}	0,99–1,03	1,03–1,05	1,11–1,16	1,00–1,07	0,98–1,02
S_{Π}	0,97–0,98	0,99–1,01	0,90–0,94	1,06–1,09	0,99–1,09
L_{Π}	0,99–1,04	1,00–1,03	1,17–1,22	0,99–1,07	1,07–1,17

Примечание: в таблице даны интервалы изменений величин для всех использованных в расчетах значений N и γ .

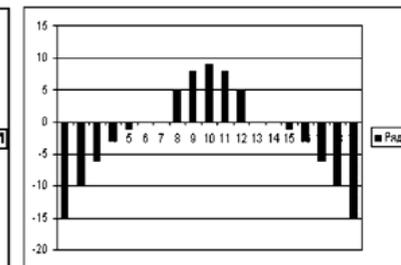
Выявлено разное поведение величины S разных линий. Линия Fe 1 λ 524,706 нм как для модели пятна (Кнеер), так и для модели факельной точки (Келлер) при типичных для этих образований параметрах магнитного поля дает значения $S = 0,99–1,01$, т.е. она с высокой точностью ведет себя как триплет с $g = 2$. Вполне удовлетворительными являются величины $S = 1,06–1,10$ и для линии Fe 1 λ 525,065 нм, имеющей $g = 1,67$. Линия Fe 1 λ 524,378 нм, имеющая $g = 1,5$, показывает значения $S = 0,97–1,00$, т.е. различия также являются несущественными. Отметим, что эти 3 линии имеют расщепление второго типа (внешние компоненты расщепления интенсивнее внутренних). Мы видим, что с уменьшением потенциала возбуждения линий величина S несколько растет. Можно предполагать, что на форму профилей Стокса в случае линии Fe 1 λ 524,378 нм сказывается большой ($\epsilon_i = 4,26$ эВ) потенциал возбуждения нижнего уровня линии, что приводит к большим значениям постоянной затухания. Результатом этого является усиление крыльев компонент расщепления.

Линия Fe 1 λ 525,303 нм, имеющая $g=1$ и структуру расщепления первого типа, показывает значения $S = 0,73–0,84$ в факельной точке и $S = 0,97–1,09$ в пятне, т.е. имеют место заметные различия.

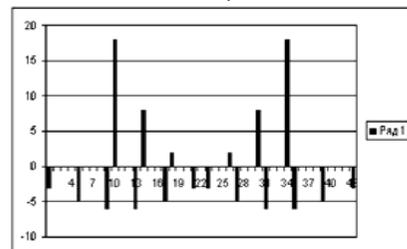
Линия Fe 1 λ 524,378 нм



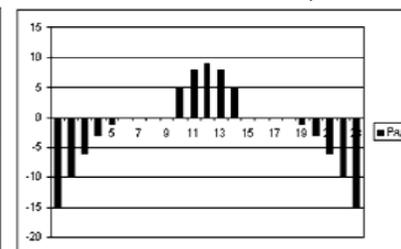
Линия Fe 1 λ 524,706 нм



Линия Fe 1 λ 524,911 нм



Линия Fe 1 λ 525,065 нм



Линия Fe 1 λ 525,30 нм

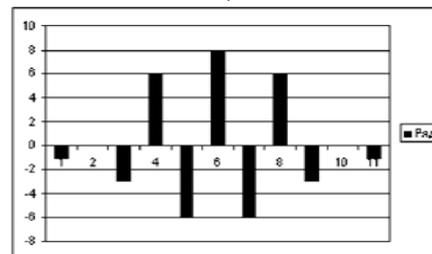


Рис.1. По оси абсцисс приведены расстояния между компонентами расщепления, пропорциональные их действительному расщеплению в магнитном поле, по оси ординат – интенсивности компонент расщепления линий в условных единицах

И, наконец, линия Fe 1 λ 524,911 нм, имеющая $g = 0,917$ и структура расщепления третьего типа, показывает значения $S = 0,73-0,74$ в факельной точке и $S = 0,90-0,94$ в пятне, т. е. по сравнению с другими линиями различия максимальны. Эта же линия имеет $\epsilon_i = 4,47$ эВ. Поэтому, одним из предположений о причинах столь существенных различий линии со сложной структурой расщепления, также может быть предположение о том, что ее профили Стокса в заметной степени подвержены влиянию постоянной затухания, существенно влияющей на форму функции Фойгта при больших значениях потенциала возбуждения нижнего уровня линий.

Рассмотрим поведение величины L . Линия Fe 1 λ 524,706 нм показывает значения L в пределах 1,00–1,05. У линии Fe 1 λ 525,065 нм значения L находятся в пределах 1,00–1,07. Линия Fe 1 λ 524,378 нм имеет $L=0,99-1,04$. Мы видим, что для линий второго типа расщепления различия L в случаях сложного и триплетного расщеплений невелики. Линия, имеющая первый тип расщепления – Fe 1 λ 525,303 нм – дает L в пределах 0,98–1,17, т. е. различия могут быть существенными. Наибольшие различия показывает линия третьего типа расщепления Fe 1 λ 524,911 нм: $L = 1,07-1,22$.

Таким образом, понятно, что измерения магнитных полей по линиям со сложным расщеплением может сопровождаться значительными систематическими ошибками, по крайней мере, для линий первого и третьего типов расщеплений. Причин, обуславливающих найденные различия, вероятно, несколько. Одну мы уже указали: это воздействие на функции Фойгта компонент постоянной затухания. Вторая – это воздействие на профили Стокса коэффициента поглощения в линии. В работе [1] нами было показано, что для линий со сложной структурой расщепления и большой эквивалентной шириной, компоненты с существенно различающейся интенсивностью становятся по величине вклада в итоговый эффективный фактор Ланде практически равноправными и для обычной сложной линии неопределенность в определении величины магнитного поля может достигать 20 %. Третий возможный вариант найденных несоответствий – магнитное усиление линий [9]. Мы проанализировали эту возможность.

«Магнитное усиление» рассмотренных линий, а именно, изменение эквивалентной ширины линии со сложным расщеплением по сравнению с триплетом, при всех остальных равных параметрах линии и поля, приведено в табл. 3.

Таблица 3

Линия λ , нм	524,378	524,706	524,911	525,065	525,303
$W_{c\phi}/W_{T\phi}$	0,99–1,00	1,01–1,02	1,29–1,36	1,01–1,03	1,00–1,02
$W_{c\pi}/W_{T\pi}$	0,99–1,04	0,96–1,04	0,90–0,94	1,01–1,05	0,97–1,10

На примере линии Fe 1 λ 524,911 нм можно видеть, что эффект магнитного усиления может заметно влиять на параметры Стокса.

Выполненные расчеты показывают, что, при использовании для измерений поля линий со сложным расщеплением во многих случаях нельзя пользоваться эффективным фактором Ланде, а необходим теоретический расчет профилей Стокса используемых линий. Кроме того, возникает вопрос о проверке степени влияния на форму профилей Стокса линий со сложным расщеплением их атомных параметров.

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. 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. 20–33. (Тр. УАФО; т.9, вып.9).

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. Обридо 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.