

УДК 523.942

Долгопериодические вариации параметров фраунгоферовых линий в спектре Солнца

М.М. Ковальчук, М.Б. Гирняк

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко, ул. Кирилла и Мефодия, 8, г. Львов, 79005

Поступила в редакцию 22 июля 2003 г.

Аннотация. Проведено исследование зависимости вариаций параметров фраунгоферовых линий от фазы цикла солнечной активности. Получены статистические закономерности в изменениях долгопериодических значений центральных интенсивностей, полуширин, эквивалентных ширин и асимметрии линий на протяжении 11-летнего солнечного цикла. Показано, что эквивалентные ширины сильных линий с низкими потенциалами возбуждения достигают максимальных значений приблизительно за год до минимума солнечной активности. Слабые линии и линии ионов не имеют такого четкого временного профиля. Более того, эти линии дают сдвиг по фазе на 1 – 2 года в сторону опаздывания при достижении максимальных значений. Вариации показателя асимметрии фраунгоферовых линий повторяют временные изменения эквивалентных ширин. Наибольшую фиолетовую асимметрию имеют сильные линии. Фиолетовая асимметрия слабых линий и линий ионов вблизи минимума солнечного цикла преимущественно подвергается реверсу – переходит в красную асимметрию.

THE SEARCH OF THE CONFORMITY AT THE VARIATIONS OF THE PARAMETERS OF FRAUNHOFER LINES ON THE TIME-SCALE OF 11-YEARS SOLAR ACTIVITY CYCLE, *by M.M. Koval'chuk, M.B. Hirnyak.* Investigation of the dependence of the variations parameters of fraunhofer lines on the phase of solar activity cycle was carry out. Statistical conformities in the longterm variations of the values of the central intensities, half-widhts, equivalent widhts and asymmetry of the lines during the 11-years solar activity cycle were obtained. It was shown that the equivalent widhts of the strong lines with low excitation potential achieve maximal values approximately a year before minimum of the solar activity. The weak lines and lines of ions don't have such remarkable temporary profile. Moreover these lines have the displacement on phase on 1 – 2 years in the direction of delay with the achivement of maximal values. Variations of the asymmetry of the fraunhofer lines repeat the temporary variations of the equivalent widths. Strong lines have the largest violet asymmetry. The violet asymmetry of the weak lines and lines of ions near minimum of solar cycle is mainly exposed an revers, i.e. transists to the red asymmetry.

Ключевые слова: фраунгоферовые линии, эквивалентная ширина, цикл солнечной активности.

1 Введение

В настоящее время получен обширный ряд высокоточных наблюдений тонкой структуры фраунгоферовых линий Солнца. Несмотря на это, исследования пространственных и временных изменений параметров профилей линий, выявление корреляций и закономерностей в их поведении дают противоречивые результаты (Дервиз и др., 1961; Бабий, 1962; Митчел, 1969; Жукова, Митрофанова, 1973; Кохан, Крат, 1982а; Кохан, Крат, 1982b).

Наименее изученным остается вопрос о существовании закономерностей в изменениях параметров фраунгоферовых линий на шкале времени 11-летнего цикла солнечной активности. Большой научный и прикладной интерес к этой проблеме усиливают как непосредственные, так и посредственные наблюдаемые данные о возможности таких изменений.

Исследование вариаций интенсивностей фраунгоферовых линий были начаты во второй половине XX века на обсерватории Китт-Пик и были связаны с исследованием температурных флуктуаций фотосферы Солнца. Появился ряд важных работ, выполненных в 1970 – 1980 гг. и посвященных вариациям светимости Солнца (Ливингстон, 1984; Брунинг, Ля Бонте, 1984). Из работ по вариациям светимости фотосферы следует отметить работу Ливингстона (1978), который на протяжении нескольких лет проводил мониторинг интенсивности линии $\text{C I } \lambda 5383 \text{ \AA}$ в спектре Солнца как звезды, что образуется глубоко в фотосфере Солнца. В результате была выявлена четкая зависимость вариаций этой линии от цикла активности, что указывает на охлаждение фотосферы с ростом солнечной активности.

Измерения интенсивностей избранных фраунгоферовых линий проводились в этот же период (1969 – 1979 гг.) и в Пулковской обсерватории (Кохан, Печинская, 1973; Крат и др., 1975; Крат и др., 1979; Крат и др., 1980; Кохан и др., 1980; Крат и др., 1982; Кохан, Крат, 1982а; Кохан, Крат, 1982b). Однако существенных закономерностей в результате анализа авторы этих работ не обнаружили (Крат и др., 1980; Кохан, Крат, 1982а).

Позже данные о том, что глубина, полуширина и эквивалентная ширина линий подвергаются сильным пространственным и временным вариациям были получены Демингом и др. (1987), Ангуера и др. (1987), а также Ливингстоном и Хольвегером (1982) по наблюдениям в 1976 – 1980 гг. Эквивалентные ширины линий монотонно уменьшались. Авторы сделали вывод, что причиной этого эффекта есть вариации свойств фотосферы. В частности, наиболее вероятная причина – уменьшение градиента температуры вследствие большого охлаждения внутренних слоев и нагрев верхних шаров с соответственным увеличением длины перемешивания в подфотосферной конвекции.

Важным средством для изучения великомасштабных движений газа, температурной структуры солнечной атмосферы, динамики солнечной и звездной конвекции и грануляции есть асимметрия солнечных линий. Сегодня проблеме асимметрии фраунгоферовых линий посвящено сотни работ. А в начале 60-х годов прошлого века этот список не превышал нескольких работ, в которых хотя и упоминалась асимметрия линий, но в основном она считалась инструментальным эффектом вследствие низкой технической возможности телескопов. Позже, уже в 70-х годах, после появления высокоточных записей солнечного спектра наметился прогресс в исследовании асимметрии линий.

Чаще всего для описания асимметрии используют классический метод – с помощью бисекторов. В этом случае асимметрия определяется как разница длин волн профиля линии, что отсчитывается от ее центра на одинаковом расстоянии интенсивности. В единицах скорости показатель асимметрии выражается формулой:

$$\alpha(I) = \left\{ \frac{\lambda_{\text{к}}(I) + \lambda_{\text{ф}}(I)}{2} - \lambda_0 \right\} \cdot \frac{c}{\lambda_0},$$

где $\lambda_{\text{к}}(I)$ и $\lambda_{\text{ф}}(I)$ – это длины волн, где интенсивность линии равна I в красном и фиолетовом крыльях линии, соответственно, λ_0 – длина волны центра линии, c – скорость света.

Изменение асимметрии со временем изучало немного исследователей – Кохан, Крат (1982а), Костик (1983), Хольвегер (1987). В первых двух работах констатируется сам факт реальных изменений асимметрии линий с циклом солнечной активности. К сожалению, закономерностей такого

изменения, в основном вследствие малого количества исследуемых линий (4 – 8 линий) установлено не было. В работе же Хольвегера (1987) было показано, что асимметрия линий коррелирует с хромосферной активностью и общим магнитным потоком.

Таким образом, в данное время вопрос о долгопериодических изменениях параметров профилей фраунгоферовых линий, в частности с фазами цикла солнечной активности, продолжает оставаться открытым, а само исследование актуальным.

2 Постановка задачи и полученные результаты

В данной работе проведено исследование изменения параметров профилей фраунгоферовых линий на шкале времени 11-летнего цикла солнечной активности. Наиболее пригодными для решения

Таблица 1. Атомные характеристики линий и их усредненные за 11 лет параметры

N	Эл	$\lambda, \text{Å}$	χ, eV	$\bar{I}_0, \%$	$\bar{h}, \text{m Å}$	$\bar{W}, \text{m Å}$	$\lg \tau$	$\bar{a}, \text{m} \cdot \text{c}^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	SrI	4607.3	0.00	28.7	61.3	38.4	-1.87	-342
2	FeI	4607.6	3.26	17.8	69.4	76.8	-1.78	-320
3	C_2	5092.3	R35	84.1	95.5	15.2	-0.99	-140
4	C_2	5092.5	R32	90.6	84.4	8.3	-0.95	-124
5	C_2	5132.3	R19	89.9	77.6	7.5	-0.94	-135
6	C_2	5132.5	R19	93.5	78.1	5.2	0.81	-120
7	FeII	5132.7	2.81	74.3	89.8	18.2	-0.83	+49
8	C_2	5141.2	P42	85.6	89.6	14.4	-0.98	-130
9	C_2	5141.3	P42	90.8	76.8	7.1	-0.94	-110
10	FeI	5250.2	0.12	29.8	81.4	64.7	-2.85	-165
11	FeI	5295.3	4.41	63.7	79.4	29.6	-0.96	+40
12	CrII	5305.9	3.83	70.9	80.3	25.3	-0.84	+40
13	FeI	5307	1.61	25.1	101.8	86.5	-3.01	-175
14	Cl	5380.3	7.68	84.4	150.3	25.1	-0.33	+36
15	NiI	5435.9	1.99	47.5	85.3	50.2	-1.85	-72
16	FeI	5576.1	3.43	24.2	134.2	131.3	-2.27	-128
17	NiI	5847.0	1.68	78.0	85.6	20.2	-1.34	-69
18	NaI (D_2)	5889.9	0.00	3.8	598.4	730.5	-3.84	-390
19	NaI (D_1)	5895.9	0.00	4.1	352.8	534.4	-3.91	-360
20	FeI	6082.7	2.22	69.2	92.1	32.1	-1.38	-90
21	FeII	6084.1	3.20	83.1	103.8	20.8	-0.91	+36
22	SiI	6087.8	5.87	90.4	158.6	19.1	-1.20	+46
23	FeI	6089.6	5.05	68.5	89.2	35.1	-1.41	+50
24	VI	6090.2	1.08	69.0	91.2	33.2	-1.50	-108
25	TiI	6091.2	2.27	85.6	89.7	17.8	-1.13	-101
26	NiI	6128.9	1.68	75.3	83.9	22.9	-1.44	-142
27	NiI	6130.1	4.26	79.6	93.2	21.1	-0.93	-40
28	FeI	6173.3	2.22	38.7	102.3	69.8	-2.22	-128
29	FeI	6213.4	2.22	34.3	107.7	84.1	-2.85	-164
30	FeII	6238.4	3.89	63.5	108.6	42.3	-1.14	-35
31	FeI	6270.2	2.86	53.6	99.8	53.6	-1.85	-70
32	FeI	6302.5	3.69	38.2	116.2	86.8	-2.80	+49
33	SiII	6347.1	8.12	69.8	102.3	54.4	-0.60	+45
34	FeI	6380.7	4.19	54.3	101.6	53.3	-1.53	-89
35	FeI	6677.9	2.69	25.7	139.2	134.6	-3.92	-232
36	NiI	6767.8	1.83	38.2	116.2	80.1	-2.95	-118
37	KI	7698.9	0.00	20.8	164.1	154.3	-3.88	-268

такой задачи оказались однородные высокоточные наблюдения профилей избранных фраунгоферовых линий, полученные в ГАО АН СССР (Пулково) во время 20-го и 21-го циклов солнечной активности (1969 – 1979 гг.) (Кохан, Печинская, 1973; Крат и др., 1975; Крат и др., 1979; Крат и др., 1980; Кохан и др., 1980; Крат и др., 1982; Кохан, Крат, 1982а; Кохан, Крат, 1982b). Наблюдения проводились по программе В.А. Крата специально подобранных для такой задачи линий с различными условиями формирования. Избранные линии характеризуют различные слои солнечной атмосферы, они чувствительны к флуктуациям температуры, давления, к движениям газовых масс. По возможности были включены неблендированные линии молекулярного углерода C_2 и нейтрального калия KI , что образуются в верхней фотосфере вблизи температурного минимума; линии нейтральных атомов железа FeI , никеля NiI , ванадия VI , титана TiI , кремния SiI , стронция SrI , натрия $NaI(D_1)$ и $NaID_2$, углерода CI ; линии ионизированных атомов железа $FeII$, хрома $CrII$ и кремния $SiII$, что формируются глубоко в фотосфере. Следует отметить, что чем точнее записи спектра, тем труднее выбрать неблендированные линии. Авторы гарантируют точность регистрации профилей линий – 0.1% доли от непрерывного спектра. Однако мы не склонны приводимую точность измерений считать полностью надежной. Обычно в таких работах при сравнении с другими такими же измерениями она оказывалась завышенной. Очевидно, что эту точность в лучшем случае нужно считать внутренней точностью измерений в каждом отдельном случае. Для повышения точности полученных результатов мы выбрали области спектра в которых по несколько неблендированных линий различной интенсивности с различными потенциалами возбуждения записывались одновременно на протяжении 11 лет. В таблице 1 приведены атомные характеристики профилей линий (длина волны λ , потенциал возбуждения нижнего уровня χ_{rs}) и их общие, усредненные за 11 лет, параметры (r_{λ_0} – центральная остаточная интенсивность, h – полуширина, W – эквивалентная ширина, α – показатель асимметрии в единицах скорости).

Перейдем к анализу изменений параметров профилей линий со временем, то есть от максимума N 20 цикла солнечной активности (1969 г.) до его минимума (1975 – 1976 гг.), а потом на ветке роста вплоть до максимума следующего N 21 цикла солнечной активности в 1979 – 1980 гг.

Получены такие границы значений дисперсии параметров исследуемых линий на протяжении 11-летнего цикла солнечной активности, а именно наблюдаемых (но исправленных) значений центральной интенсивности r_{λ_0} , полуширины h , эквивалентной ширины W и асимметрии α линий:

$$1.5 \cdot 10^{-6} < D(r_{\lambda_0}) < 4.9 \cdot 10^{-5} \quad 0.1 < D(W) < 6.8,$$

$$0.1 < D(h) < 5.4 \quad 0.5 < D(\alpha) < 4.5.$$

Таким образом, наиболее чувствительным параметром до временных изменений оказалась эквивалентная ширина, а наименее чувствительным – асимметрия линий. Среднеквадратические ошибки величин r_{λ_0} , h , W и α такие: $\tau_{r_{\lambda_0}} = \pm 0.001$; $\tau_h = \pm 0.1 \text{ m\AA}$; $\tau_W = \pm 0.5 \text{ m\AA}$; $\tau_\alpha = \pm 0.1 \text{ m\AA}$. Для иллюстрации реальных изменений асимметрии фраунгоферовых линий на протяжении солнечного цикла мы приводим рис. 1. Мы избрали данные показателя асимметрии на протяжении 11 лет для четырех линий различных химических элементов, что имеют различную интенсивность, большой разброс потенциала возбуждения нижнего уровня. Для сопоставления изменений асимметрии этих линий на протяжении 11 лет на этом рисунке схематически нанесен ход циклической кривой солнечной активности.

3 Выводы

Анализ статистического материала всего ряда наблюдений показал, что в большинстве случаев:

1. Долгопериодические вариации значений центральных остаточных интенсивностей r_{λ_0} , полуширин h , эквивалентных шириин W и асимметрии α фраунгоферовых линий с циклом солнечной активности есть реальными; их значения превышают среднеквадратическую ошибку измерений.

2. Величины вариаций параметров фраунгоферовых линий зависят от атомных и физических характеристик этих линий – от потенциала возбуждения нижнего уровня, степени ионизации, силы

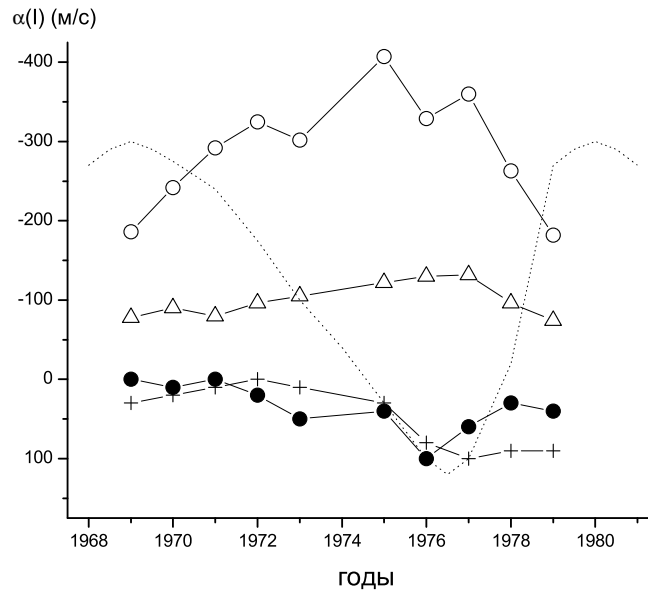


Рис. 1. Вариации асимметрии фраунгоферовых линий на протяжении цикла солнечной активности, где: \circ – FeI $\lambda 6677.9$, $\chi_{rs} = 2.69$ eV, $\bar{r}_{\lambda_0} = 0.257$, $\bar{W} = 135$ m \AA , $\bar{\alpha} = -232$ м · с⁻¹; Δ – FeI $\lambda 6380.7$, $\chi_{rs} = 4.19$ eV, $\bar{r}_{\lambda_0} = 0.543$, $\bar{W} = 53$ m \AA , $\bar{\alpha} = -89$ м · с⁻¹; + – FeI $\lambda 6089.6$, $\chi_{rs} = 5.02$ eV, $\bar{r}_{\lambda_0} = 0.685$, $\bar{W} = 35$ m \AA , $\bar{\alpha} = +50$ м · с⁻¹; \bullet – CrII $\lambda 5305.9$, $\chi_{rs} = 3.83$ eV, $\bar{r}_{\lambda_0} = 0.709$, $\bar{W} = 25$ m \AA , $\bar{\alpha} = +40$ м · с⁻¹; · – Схематический ход циклической кривой солнечной активности

линии, ее эквивалентной ширины, что указывает на то, что основными факторами, что определяют профиль самой линии есть область и механизм ее образования.

3. Изменения эквивалентной ширины W и центральной остаточной интенсивности r_{λ_0} преимущественно происходят в антифазе между собой. Изменения полуширины h иногда обуславливают резкие изменения W по сравнению с небольшими изменениями r_{λ_0} .

4. Наиболее чувствительным к временным изменениям параметром оказалась эквивалентная ширина, а наименее чувствительным – асимметрия линий.

5. Параметры сильных линий нейтральных атомов с низкими потенциалами возбуждения χ_{rs} достигают больших амплитуд временных вариаций, в то время как слабые линии с высокими χ_{rs} и линии ионов показывают малые изменения.

6. Эквивалентные ширины W сильных линий с низкими χ_{rs} достаточно плавно достигают максимальных значений приблизительно за год (1975 г.) до минимума солнечной активности. Для слабых линий с высоким χ_{rs} наблюдается некоторое опаздывание (в 1977 – 1978 гг.) при достижении максимальных значений W . После минимума солнечной активности на ветке роста следующего 21-го цикла происходит резкое уменьшение значений W для всех фраунгоферовых линий. Минимальных значений W линии приобретают при приближении к новому максимуму солнечной активности.

7. Аналогично изменяются с солнечным циклом (но в антифазе с W) центральные остаточные интенсивности r_{λ_0} .

8. Вариации показателя асимметрии α фраунгоферовых линий повторяют временные изменения W . Самую большую фиолетовую асимметрию имеют сильные линии с низкими χ_{rs} . Максимального значения фиолетовая асимметрия этих линий достигает перед минимумом солнечной активности. Слабые же линии не обнаруживают такого четкого временного профиля показателя асимметрии. Более того, эти слабые линии дают сдвиг по фазе (на 1 – 2 года) в сторону опаздывания при

достижении максимальных (хотя сравнительно небольших) значений асимметрии.

9. Фиолетовая асимметрия слабых линий или линий, образующихся глубоко в фотосфере и линий ионов вблизи минимума солнечного цикла преимущественно подвержена реверсу – переходит в красную асимметрию.

Такие временные вариации параметров фраунгоферовых линий мы склонны объяснять как областью и условиями формирования линий в солнечной атмосфере, так и циклическим изменением классической структуры грануляции. На пути окончательного решения этой проблемы стоит явный недостаток долгопериодических наблюдений солнечного спектра. Исследования в этом направлении могут продолжаться, если будет поставлена целенаправленная наблюдательная программа определения долгопериодических вариаций профилей фраунгоферовых линий Солнца.

Литература

- Ангуера и др. (Anguera M., Palle P.L., Regulo C., Roca Cortes T., Isaak G.R., McLeod C.P., van der Raay H.B.) // Cambridge University Press. 1987. P. 24.
- Бабий Б.Т. // Солнечные данные. 1962. N 12. С. 57.
- Брунинг, Ля Бонте (Bruning D.H., La Bonte B.I.) // Sunspots; Sacramento Peak Observatory. 1984. P. 338.
- Деминг и др. (Deming D., Espenak F., Jennings D.E., Brault J.W., Wagner J.) // Astrophys. J. 1987. V. 316. N. 2. P. 771.
- Дервиз Т.Е., Купревич Н.Ф., Митрофанова Л.А. // Астрон. журнал. 1961. Т. 38. Вып. 3. С. 448.
- Жукова Л.Н., Митрофанова Л.А. // Солнечные данные. 1973. N. 6. С. 65.
- Костик Р.И. // Киев. 1983. 26 с. (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-83-63Р).
- Кохан Е.К., Крат В.А. // Известия ГАО. 1982. N. 200. С. 3.
- Кохан Е.К., Крат В.А. // Солнечные данные. 1982. N. 11. С. 81.
- Кохан Е.К., Крат В.А., Нуралиев Б.Т. // Известия ГАО. 1980. N. 198. С. 29.
- Кохан Е.К., Печинская Н.И. // Известия ГАО. 1973. N. 191. С. 20.
- Крат В.А., Кохан Е.К., Каңдаурова К.А. // Известия ГАО. 1982. N. 199. С. 71.
- Крат В.А., Кохан Е.К., Нуралиев Б.Т. // Известия ГАО. 1980. N. 197. С. 126.
- Крат В.А., Кохан Е.К., Печинская Н.И. // Известия ГАО. 1975. N. 193. С. 3.
- Крат В.А., Кохан Е.К., Печинская Н.И. // Известия ГАО. 1979. N. 196. С. 17.
- Ливингстон (Livingston W.) // Nature. 1978. 272. P. 340.
- Ливингстон (Livingston W.) // Sunspots; Sacramento Peak Observatory. 1984. P. 330.
- Ливингстон, Хольверер (Livingston W., Holweger H.) // Astrophys. J. 1982. V. 252. N. 1. P. 375.
- Митчел (Mitchell W.E.) // Astrophys. J. 1969. V. 155. N. 2. P. 709.
- Хольверер (Holweger H.) // Cambridge University Press. 1987. P. 1.