

УДК 523.942
PACS 96-60 Tf

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ ФРАУНГОФЕРОВИХ ЛІНІЙ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФАЗИ ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Ковальчук М. ¹, Гірняк М. ¹, Стоділка М. ¹
Лаушник І. ²

¹ *Астрономічна обсерваторія Львівського національного
університету імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

² *Львівський філіал Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
ул. І. Блажкевич, 12а, г. Львів, 79055, Україна*

Проведено комплексний аналіз варіацій параметрів фраунгоферових ліній в залежності від фази циклу сонячної активності. Розрахунки базуються на однорідних високоточних спостереженнях профілів фраунгоферових ліній, отриманих протягом трьох 11-літніх сонячних циклів. Отримано статистичні закономірності у довгоперіодичних змінах параметрів профілів ліній з часом, що підтверджують висновок про реальність цих змін.

Ключові слова: фраунгоферові лінії, цикл сонячної активності

1 Вступ

Зміни фізичних умов в атмосфері Сонця можуть суттєво змінити параметри спостережуваних фраунгоферових ліній. Для розв'язку багатьох задач спектрального аналізу дуже важливо мати детальну інформацію про чутливість ліній до різних властивостей сонячної речовини. Суттєвий внесок в дослідження чутливості ліній до змін інтенсивності, що випромінюється в лінії, можуть дати кількісні оцінки параметрів лінії у різні дати спостережень протягом циклу сонячної активності [1–4].

2 Предмет дослідження і спостережуваний матеріал

З метою виявлення певних закономірностей у зміні параметрів фраунгоферових ліній в залежності від фізичних умов сонячної атмосфери ми провели аналіз центральних залишкових інтенсивностей, півширин, еквівалентних ширин та асиметрії ліній протягом кількох 11-літніх циклів сонячної активності.

Розрахунки базуються на однорідних високоточних спостереженнях профілів фраунгоферових ліній, отриманих в ГАО АН СРСР (Пулково) в 1953-1959 рр. і 1969-1979 рр. (19-21-й цикли сонячної активності) [5, 6]. Вибір ліній полягав в охопленні широкого діапазону висот їх формування, про що свідчать різні потенціали збудження цих ліній, їхня чутливість до флуктуацій температури, тиску, до рухів газових мас. Автори гарантують точність реєстрації профілів ліній - 0.1% частки від неперервного спектру. Очевидно, що цю точність потрібно вважати внутрішньою точністю вимірювань у кожному окремому випадку.

У таблицях 1 - 5 наведено атомні характеристики профілів ліній і їхні фізичні параметри за 1953-1959 рр. та 1969-1979рр.

3 Аналіз довгоперіодичних змін параметрів ліній

Проаналізуємо варіації параметрів профілів ліній поглинання із циклічними змінами активності Сонця.

Звертає на себе увагу синусоїдальна, з протилежними амплітудами, зміна еквівалентних ширин ліній протягом сонячних циклів. Причому вузли припадають на роки максимумів активності. В роки , близькі до мінімуму, відбувається реверс значень еквівалентної ширини.

Визначимо дисперсію D значень центральної інтенсивності r_0 , півширини $h_{1/2}$, еквівалентної ширини W ліній, розміщених в таблицях 1 - 5 за періоди, протягом яких вони спостерігалися, за формулою:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{сер} - x_i)^2}{n - 1},$$

де x_i - значення досліджуваного параметра ($r_0, h_{1/2}, W$) профілю лінії в окрему дату спостережень Сонця, $x_{сер}$ - середнє значення параметра ($\bar{r}_0, \bar{h}_{1/2}, \bar{W}$) за всі дати спостережень, n - кількість отриманих значень даного параметра за всі роки спостережень Сонця. Величини D розміщені в таблицях 6 і 7, відповідно, за 1953-1959рр. і 1969-1979 рр.

У таблиці 7 крім дисперсій по r_0 і W поданий середній за 11 років показник асиметрії $\bar{\alpha}$ (в одиницях швидкості $m \cdot c^{-1}$) ліній, повні профілі яких є у нашому розпорядженні, та його дисперсія $D(\alpha)$.

Табл. 1: Атомні і фізичні параметри вибраних ліній за 1953-1959 р.р. Тут λ - довжина хвилі, χ_{rs} - потенціал збудження нижнього рівня, r_0 -центральна залишкова інтенсивність, W - еквівалентна ширина лінії

N	Еле-мент	λ , Å	χ_{rs} , eV	1953 р.		1955 р.		1956 р.		1957 р.		1958 р.		1959 р.	
				r_0	W , mÅ	r_0	W , mÅ	r_0	W , mÅ	r_0	W , mÅ	r_0	W , mÅ	r_0	W , mÅ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	FeI	4383.54	1.48	.176	1389	.107	1872	.100	1619	.137	1602	.143	1619	.175	1640
2	VI	4395.25	.27	.496	274	.434	307	.365	365	.353	.334	.467	341	.485	319
3	FeI	4404.75	1.56	.254	784	.127	732	.151	796	.156	824	.198	751	.199	736
4	VI	4406.65	0.30	.672	89	.675	106	.607	109	.561	135	.709	95	.716	91
5	FeI	4407.71	2.18	.527	136	.472	133	.436	164	.396	164	.542	162	.551	127
6	FeI	4408.43	2.20	.451	222	.440	227	.383	255	.336	274	.496	219	.497	214
7	FeI	4415.14	3.88	.302	478	.224	478	.199	496	.211	549	.279	478	.305	413
8	TiI	4416.54	1.87	.677	90	.701	82	.614	97	.597	105	.727	78	.729	65
9	TiII	4417.72	1.16	.633	68	.628	104	.577	111	.529	129	.669	94	.659	94
10	TiII	4418.34	1.24	.705	74	.703	75	.636	87	.645	76	.705	96	.755	66
11	FeI	4422.58	2.84	.571	113	.575	147	.481	161	.483	131	.584	190	.614	118
12	CaI	4425.45	1.88	.550	171	.521	163	.453	185	.409	210	.559	173	.538	205
13	TiI	4427.11	1.07	.466	205	.457	203	.408	211	.372	255	.509	188	.520	159
14	FeI	4430.62	2.22	.560	307	.546	299	.478	348	.446	212	.573	282		
15	FeI	4433.23	3.65	.646	91	.622	113	.561	115	.522	138	.662	93	.631	92
16	TiI	4434.01	1.87	.709	109	.673	106	.623	119	.613	103	.692	125	.715	72
17	CaI	4434.97	1.89	.465	237	.384	220	.335	257	.315	300	.425	256	.439	201
18	CaI	4435.69	1.89	.568	123	.547	131	.481	143	.453	143	.578	153	.593	113
19	WI	4436.90	2.59	.728	61	.708	82	.664	86	.598	101	.719	95	.739	95
20	FeI	4442.35	2.20	.510	153	.464	172	.390	203	.396	182	.478	202	.512	158
21	TiII	4443.81	1.08	.596	102	.555	120	.467	147	.406	155	.573	133	.576	136
22	FeI	4447.73	2.22	.542	115	.514	142	.428	169	.444	157	.528	169	.550	129
23	FeI	4454.39	3.97	.415	384	.353	478	.302	487	.312	451	.378	451	.405	405
24	NiI	4459.04	3.31	.464	180	.407	224	.332	258	.313	270	.415	256	.440	237
25	MnI	4464.68	2.92	.590	178	.571	191	.512	197	.441	254	.584	233	.621	172
26	FeI	4466.56	2.57	.547	137	.528	165	.469	151	.434	216	.536	206	.565	128
27	TiII	4468.50	1.13	.572	135	.577	141	.483	146	.453	173	.588	123	.598	105
28	FeI	4469.38	3.65	.574	212	.547	219	.495	215	.489	235	.578	207	.601	170
29	MnI	4472.81	2.95	.666	131	.592	165	.567	143	.557	131	.638	157	.661	106
30	FeI	4476.02	2.84	.505	165	.468	199	.393	182	.362	196	.472	189	.513	150
31	FeI	4482.18	0.11	.454	160	.421	179	.347	186	.319	197	.448	181	.465	152

Табл. 2: Атомні і фізичні параметри вибраних ліній за 1969-1971рр. Тут λ -довжина хвилі, χ_{rs} -потенціал збудження нижнього рівня, r_0 - центральна залишкова інтенсивність, $h_{1/2}$ - півширина, W - еквівалентна ширина лінії.

N	Елемент	$\lambda, \text{ \AA}$	$\chi_{rs}, \text{ ev}$	1969 р.			1970 р.			1971 р.		
				r_0	$h_{1/2}, \text{ m \AA}$	$W, \text{ m \AA}$	r_0	$h_{1/2}, \text{ m \AA}$	$W, \text{ m \AA}$	r_0	$h_{1/2}, \text{ m \AA}$	$W, \text{ m \AA}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	CaI	4226.7		.0222			.0226			.0240		
2	SrI	4607.3	.00	.4411		45.79			46.90	.4416		46.50
3	FeI	4607.6	3.26	.2267						.2295		
4	C ₂	5092.3	R 35	.8518			.8558			.8522		
5	C ₂	5092.5	R 32	.9150			.9106			.9106		
6	C ₂	5132.3	R 19	.9166	75.6	6.82	.9151	81.2	7.42	.9135	79.9	7.13
7	C ₂	5132.5	R 19	.9479	77.1	4.13	.9444	78.6	4.61	.9432	78.3	4.63
8	FeII	5132.7	2.81	.746	89.8	25.05	.742	90.5	25.76	.740	90.6	25.90
9	C ₂	5141.2	P 42	.8708	94.3	18.79	.8736	96.5	18.39	.8728	96.2	18.46
10	C ₂	5141.3	P 42	.9270			.9293			.9286		
11	FeI	5250.2	0.12	.297	81.8	64.72						
12	FeI	5295.3	4.41	.6905	80.9	28.56	.6854	81.5	29.57	.6839	82.3	30.64
13	CrII	5305.9	3.83	.7420	90.6	26.17	.7416	90.0	26.44	.7425	89.1	26.19
14	FeI	5307.4	1.61	.2467	102.2	93.86	.2527	103.1	93.31	.2521	100.3	92.26
15	Cl	5380.3	7.68	.869	155.0	22.0						
16	NiI	5435.9	1.99	.4717	86.1	50.94	.4824	85.5	50.18	.4763	84.5	50.66
17	FeI	5576.1	3.43	.2447	138.8	133.10	.2447	135.6	131.15	.2416	135.4	132.54
18	NiI	5847.0	1.68	.7840	81.0	19.87	.7883	85.4	20.59	.7865	85.5	20.61
19	NaI (D ₂)	5889.9	.00	.0433			.0446			.0450		
20	NaI (D ₁)	5895.9	.00	.0504			.0517			.0519		
21	FeI	6082.7	2.22	.689	91.	31.84						
22	FeII	6084.1	3.20	.825	104.	20.17						
23	SiI	6087.8	5.87	.904	164.5	21.1	.904	155.6	18.37	.902	154.2	18.82
24	FeI	6089.6	5.02	.6687	91.2	35.4	.6663	90.7	35.33	.6653	89.7	34.96
25	VI	6090.2	1.08	.688	90.6	33.53	.692	94.3	32.9	.687	95.5	34.76
26	TiI	6091.2	2.27	.854	92.1	17.20	.856	91.6	16.99	.853	91.2	18.68
27	NiI	6128.9	1.68	.7532	85.3	23.30	.7560	82.6	22.79	.7482	85.4	25.2
28	NiI	6130.1	4.26	.7930	90.7	21.18	.7970	91.1	20.97	.7936	92.6	21.10
29	FeI	6173.3	2.22	.397	103.3	68.77						
30	FeI	6213.4	2.22	.360	115.	83.24						
31	FeII	6238.4	3.89	.6388	107.7	45.98	.6393	110.2	46.76	.6469	107.9	46.07
32	FeI	6270.2	2.86	.542	101	52.70						
33	FeI	6302.5	3.69	.394	124	86.47						
34	SiII	6347.1	8.12	.6996			.6945			.7084		
35	FeI	6380.7	4.19	.554	101	51.31						
36	FeI	6677.9	2.69	.2846	157.4	136.80	.2870	159.1	137.59	.2851	157.1	137.11
37	NiI	6767.8	1.83	.3865	117.6	79.49	.3898	117.1	79.70	.3804	116.6	81.18
38	KI	7698.9	.00				.197	170.3	159.16	.186	169.2	161.42

Табл. 3: Атомні і фізичні параметри вибраних ліній за 1972-1974рр. Тут λ -довжина хвилі, χ_{rs} -потенціал збудження нижнього рівня, r_0 - центральна залишкова інтенсивність, $h_{1/2}$ - півширина, W - еквівалентна ширина лінії

N	Елемент	$\lambda, \text{Å}$	χ, eV	1972 р.			1973 р.			1974 р.		
				r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$	r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$	r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	CaI	4226.7										
2	SrI	4607.3	.00			46.80			46.73			
3	FeI	4607.6	3.26									
4	C ₂	5092.3	R 35									
5	C ₂	5092.5	R 32									
6	C ₂	5132.3	R 19	.920	68.2	6.04	.914	79.9	7.28			
7	C ₂	5132.5	R 19	.947	73.2	4.12	.943	81.2	4.79			
8	FeII	5132.7	2.81	.741	89.2	25.95	.744	90.4	25.78			
9	C ₂	5141.2	P 42	.876	92.0	15.12	.871	92.3	18.85			
10	C ₂	5141.3	P 42	.938			.928					
11	FeI	5250.2	0.12									
12	FeI	5295.3	4.41	.686	80.1	28.92	.685	79.9	29.16			
13	CrII	5305.9	3.83	.743	91.2	26.55	.741	87.7	25.88			
14	FeI	5307.4	1.61	.250	100.8	93.01	.245	102.9	94.13			
15	Cl	5380.3	7.68									
16	NiI	5435.9	1.99	.495	86.1	49.14	.482	85.9	51.33			
17	FeI	5576.1	3.43	.244	136.7	131.53	.243	137.0	132.52			
18	NiI	5847.0	1.68	.787	85.8	20.38	.785	87.6	21.54			
19	NaI(D ₂)	5889.90	0.00									
20	NaI (D ₂)	5895.9	0.00									
21	FeI	6082.7	2.22									
22	FeII	6084.1	3.20									
23	SiI	6087.8	5.87	.902	163.3	18.83	.904	157.8	18.59			
24	FeI	6089.6	5.02	.661	90.9	35.32	.662	89.9	34.990			
25	VI	6090.2	1.08	.684	91.1	33.86	.686	91.7	34.12			
26	TiI	6091.2	2.27	.854	90.4	17.79	.854	89.5	17.84			
27	NiI	6128.9	1.68	.753	83.4	23.58	.752	84.2	24.51			
28	NiI	6130.1	4.26	.795	90.9	21.75	.798	93.1	21.65			
29	FeI	6173.3	2.22									
30	FeI	6213.4	2.22									
31	FeII	6238.4	3.89	.643	109.0	46.13	.644	109,8	46.36			
32	FeI	6270.2	2.86									
33	FeI	6302.5	3.69									
34	SiII	6347.1	8.12									
35	FeI	6380.7	4.19									
36	FeI	6677.9	2.69	.286	156.8	137.79	.286	160,8	138.9			
37	NiI	6767.8	1.83	.378	114.8	79.68	.391	116.2	79.10			
38	KI	7698.9	.00	.187	166.5	157.11	.203	171.2	157.44			

Табл. 4: Атомні і фізичні параметри вибраних ліній за 1975-1977 рр. Тут λ -довжина хвилі, χ_{rs} - потенціал збудження нижнього рівня, r_0 - центральна залишкова інтенсивність, $h_{1/2}$ - півширина, W - еквівалентна ширина лінії

N	Елемент	$\lambda, \text{Å}$	χ, eV	1975 р.			1976 р.			1977 р.		
				r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$	r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$	r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	CaI	4226.7										
2	SrI	4607.3	.00			46.30			47.83			46.89
3	FeI	4607.6	3.26									
4	C ₂	5092.3	R 35									
5	C ₂	5092.5	R 32									
6	C ₂	5132.3	R 19	.917	79.6	6.98	.921	76.7	6.42	.910	77.7	7.48
7	C ₂	5132.5	R 19	.948	83.2	4.52	.952	79.9	3.97	.9432	83.3	4.84
8	FeII	5132.7	2.81	.745	87.3	25.24	.752	88.3	24.58	.746	91.0	25.63
9	C ₂	5141.2	P 42	.874	95.7	18.58	.874	91.3	18.02	.877	95.8	17.01
10	C ₂	5141.3	P 42	930			.930			.934		
11	FeI	5250.2	0.12									
12	FeI	5295.3	4.41	.688	78.8	28.4	.692	79.9	27.26	.688	81.1	28.82
13	CrII	5305.9	3.83	.743	87.8	25.73	.749	91.3	26.05	.743	89.1	26.16
14	FeI	5307.4	1.61	.244	100.6	93.21	.251	102.5	93.92	.246	102.8	94.15
15	Cl	5380.3	7.68									
16	NiI	5435.9	1.99	.480	85.2	50.68	.473	84.5	50.87	.475	87.1	51.90
17	FeI	5576.1	3.43	.244	136.0	130.07	.241	134.2	127.94	.243	134.4	131.32
18	NiI	5847.0	1.68	.790	84.5	20.18	.788	86.9	20.95	.790	83.9	19.62
19	NiI (D_2)	5889.9	0.00									
20	NaI (D_1)	5895.9	0.00									
21	FeI	6082.7	2.22									
22	FeII	6084.1	3.20									
23	SiI	6087.8	5.87	.906	166.0	18.31	.904	164.0	19.34	.908	156.8	18.44
24	FeI	6089.6	5.02	.666	90.1	33.91	.662	92.0	35.58	.667	89.1	33.78
25	VI	6090.2	1.08	.692	88.8	31.51	.691	92.0	33.21	.691	88.7	30.55
26	TiI	6091.2	2.27	.861	89.5	16.58	.856	89.5	18.07	8.67	82.0	14.25
27	NiI	6128.9	1.68	.753	81.8	22.83	.753	84.2	23.73	.750	85.8	24.50
28	NiI	6130.1	4.26	798	92.7	20.85	.796	97.8	21.64	.796	95.9	22.01
29	FeI	6173.3	2.22									
30	FeI	6213.4	2.22									
31	FeII	6238.4	3.89	.645	113.1	46.78	.644	110.3	45.64	.641	107.7	46.30
32	FeI	6270.2	2.86									
33	FeI	6302.5	3.69									
34	SiII	6347.1	8.12									
35	FeI	6380.7	4.19									
36	FeI	6677.9	2.69	.280	157.9	136.58	.282	155.7	136.188	.284	155.7	132.07
37	NiI	6767.8	1.83	.382	117.6	80.30	.385	120.1	81.58	.380	115.2	78.68
38	KI	7698.9	.00	.184	171.2	164.17	.190	167.1	157.21	.178	170.0	161.42

Табл. 5: Атомні і фізичні параметри вибраних ліній за 1978-1979 рр. Тут λ -довжина хвилі, χ_{rs} - потенціал збудження нижнього рівня, r_0 - центральна залишкова інтенсивність, $h_{1/2}$ - півширина, W - еквівалентна ширина лінії

N	Елемент	$\lambda, \text{Å}$	χ, eV	1978 р.			1979 р.		
				r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$	r_0	$h_{1/2}, \text{m Å}$	$W, \text{m Å}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	CaI	4226.7							
2	SrI	4607.3	.00			46.28			
3	FeI	4607.6	3.26						
4	C ₂	5092.3	R 35						
5	C ₂	5092.5	R 32						
6	C ₂	5132.3	R 19	.915	81.9	7.28			
7	C ₂	5132.5	R 19	.946	84.5	4.74			
8	FeII	5132.7	2.81	.746	92.5	26.11			
9	C ₂	5141.2	P 42	.874	93.7	17.97			
10	C ₂	5141.3	P 42	.931					
11	FeI	5250.2	0.12						
12	FeI	5295.3	4.41	.685	78.9	28.27			
13	CrII	5305.9	3.83	.740	88.3	26.21			
14	FeI	5307.4	1.61	.245	101.6	93.22			
15	Cl	5380.3	7.68						
16	NiI	5435.9	1.99	.460	83.1	51.50			
17	FeI	5576.1	3.43	.239	136.3	131.98			
18	NiI	5847.0	1.68	.787	.84.2	20.49			
19	NiI (D_2)	5895.9	0.00						
20	NaI (D_1)	5895.9							
21	FeI	6082.7	2.22						
22	FeII	6084.1	3.20						
23	SiI	6087.8	5.87	.904	162.5	19.54	.904	167.5	20.07
24	FeI	6089.6	5.02	.663	91.4	35.18			
25	VI	6090.2	1.08	.692	90.3	32.04	.694	90.0	31.42
26	TiI	6091.2	2.27	.861	84.0	14.70	.861	83.4	14.77
27	NiI	6128.9	1.68	.752	82.4	23.80			
28	NiI	6130.1	4.26	.796	91.8	21.21			
29	FeI	6173.3	2.22						
30	FeI	6213.4	2.22						
31	FeII	6238.4	3.89	.643	107.7	45.64			
32	FeI	6270.2	2.86						
33	FeI	6302.5	3.69						
34	SiII	6347.1	8.12						
35	FeI	6380.7	4.19						
36	FeI	6677.9	2.69	.280	158.8	139.77			
37	NiI	6767.8	1.83	.379	116.8	81.15			
38	KI	7698.9	.00	.175	164.7	154.44			

Табл. 6: Дисперсії параметрів досліджуваних ліній за 1953-1959 рр.

N	Елем.	λ , Å	χ_{rs} eB	$D(r_0)$	$D(W)$
1	2	3	4	5	6
1	FeI	4383.54	1.48	$8.251 \cdot 10^{-4}$	2.350
2	VI	4395.25	0.27	$9.764 \cdot 10^{-4}$	0.976
3	FeI	4404.75	1.56	$2.076 \cdot 10^{-3}$	1.349
4	VI	4406.65	0.30	$3.690 \cdot 10^{-3}$	0.293
5	FeI	4407.71	2.18	$3.966 \cdot 10^{-3}$	0.303
6	FeI	4408.43	2.20	$4.069 \cdot 10^{-3}$	0.570
7	FeI	4415.14	3.88	$2.26 \cdot 10^{-3}$	1.899
8	TiI	4416.54	1.87	$3.22 \cdot 10^{-3}$	0.203
9	TiII	4417.72	1.16	$2.84 \cdot 10^{-3}$	0.415
10	TiII	4418.34	1.24	$1.228 \cdot 10^{-3}$	0.114
11	FeI	4422.58	2.84	$3.81 \cdot 10^{-3}$	0.843
12	CaI	4425.45	1.88	$3.641 \cdot 10^{-3}$	0.369
13	TiI	4427.11	1.07	$2.870 \cdot 10^{-3}$	0.986
14	FeI	4430.62	2.22	$2.332 \cdot 10^{-3}$	2.175
15	FeI	4433.23	3.65	$2.938 \cdot 10^{-3}$	0.348
16	TiI	4434.01	1.87	$1.743 \cdot 10^{-3}$	0.341
17	CaI	4434.97	1.89	$3.569 \cdot 10^{-3}$	1.183
18	CaI	4435.69	1.89	$3.306 \cdot 10^{-3}$	0.219
19	WI	4436.90	2.59	$2.822 \cdot 10^{-3}$	0.205
20	FeI	4442.35	2.20	$2.905 \cdot 10^{-3}$	0.455
21	TiII	4443.81	1.08	$5.657 \cdot 10^{-3}$	0.363
22	FeI	4447.73	2.22	$2.712 \cdot 10^{-3}$	0.488
23	FeI	4454.39	3.97	$2.217 \cdot 10^{-3}$	1.622
24	NiI	4459.04	3.31	$3.604 \cdot 10^{-3}$	1.061
25	MnI	4464.68	2.92	$4.300 \cdot 10^{-3}$	1.052
26	FeI	4466.56	2.16	$2.558 \cdot 10^{-3}$	1.321
27	TiII	4468.50	1.13	$3.744 \cdot 10^{-3}$	0.523
28	FeI	4469.38	3.65	$2.136 \cdot 10^{-3}$	0.469
29	MnI	4472.81	2.95	$2.286 \cdot 10^{-3}$	0.446
30	FeI	4476.02	2.84	$3.754 \cdot 10^{-3}$	0.365
31	FeI	4482.18	0.11	$3.754 \cdot 10^{-3}$	0.281

Табл. 7: Дисперсії параметрів досліджуваних ліній за 1969-1979 рр.

N	Елем.	λ , Å	χ eB	$D(r_0)$	$D(h_{1/2})$	$D(W)$	$\bar{\alpha}$, м/с	$D(\alpha)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	CaI	4226.74		$8.95 \cdot 10^{-6}$				
2	SrI	4607.34	0.00	$1.25 \cdot 10^{-6}$		0.32		
3	FeI	4607.6	3.26	$3.92 \cdot 10^{-6}$				
4	C ₂	5092.3	R 35	$4.86 \cdot 10^{-6}$				
5	C ₂	5092.5	R 32	$1.46 \cdot 10^{-6}$				
6	C ₂	5132.3	R 19	$5.68 \cdot 10^{-6}$	0.78	0.234	-135	0.127
7	C ₂	5152.5	R 19	$9.12 \cdot 10^{-6}$				
8	FeII	5132.7	2.81	$1.38 \cdot 10^{-4}$	1.13	0.879	+49	0.239
9	C ₂	5141.2	P 42	$4.11 \cdot 10^{-6}$				
10	C ₂	5141.3	P 42	$1.16 \cdot 10^{-5}$				
11	FeI	5250.2	0.12					
12	FeI	5295.3	4.41	$6.91 \cdot 10^{-6}$	1.12	0.91	+40	0.062
13	CrII	5305.9	3.83	$5.50 \cdot 10^{-6}$	0.14	0.063	+40	0.018
14	FeI	5307.4	1.61	$1.02 \cdot 10^{-5}$	0.9	0.385	-175	0.155
15	Cl	5380.3	7.68					
16	NiI	5435.9	1.99	$9.05 \cdot 10^{-5}$	0.38	0.081	-72	0.011
17	FeI	5576.1	3.43	$4.14 \cdot 10^{-6}$	1.9	2.95	-128	1.210
18	NiI	5847.0	1.68	$1.12 \cdot 10^{-4}$	0.98	0.324	-69	0.173
19	NaI (D_2)	5889.9	0.00	$7.9 \cdot 10^{-6}$				
20	NaI (D_1)	5895.9	0.00	$3.00 \cdot 10^{-5}$				
21	FeI	6082.7	2.22					
22	FeII	6084.1	3.20					
23	SiI	6087.8	5.87	$3.06 \cdot 10^{-6}$	1.09	0.798	+46	0.268
24	FeI	6089.6	5.02	$7.02 \cdot 10^{-6}$	0.8	0.423	+50	0.203
25	VI	6090.2	1.08	$7.81 \cdot 10^{-6}$	2.8	1.83	-108	0.981
26	TiI	6091.2	2.27	$1.85 \cdot 10^{-5}$	1.3	2.89	-101	1.322
27	NiI	6128.9	1.68	$4.77 \cdot 10^{-6}$	0.82	0.651	-142	0.419
28	NiI	6130.1	4.26	$3.06 \cdot 10^{-6}$	1.70	0.159	-40	0.073
29	FeI	6173.3	2.22	$7.01 \cdot 10^{-6}$				
30	FeI	6213.4	2.22					
31	FeII	6238.4	3.89	$7.01 \cdot 10^{-6}$	1.32	0.131	-35	0.070
32	FeI	6270.2	2.86					
33	FeI	6302.5	3.69					
34	SiII	6347.1	8.12	$4.94 \cdot 10^{-5}$				
35	FeI	6380.7	4.19					
36	FeI	6677.9	2.69	$1.55 \cdot 10^{-4}$	3.6	5.25	-232	2.346
37	NiI	6767.8	1.83	$2.24 \cdot 10^{-5}$	1.98	2.18	-118	1.541
38	KI	7698.9	0.00	$8.54 \cdot 10^{-5}$	4.51	6.81	-268	3.643

З цих таблиць випливає, що найчутливішим параметром до часових змін впродовж кількох циклів сонячної активності виявилась еквівалентна ширина лінії W : $0.063 < D(W) < 6.81$.

Наступними параметрами ліній, чутливими до змін фізичних умов в атмосфері Сонця є півширина та показник асиметрії ліній: $0.20 < D(h_{1/2}) < 4.51$; $0.018 < D(\alpha) < 3.64$. Часові зміни центральної залишкової інтенсивності r_{λ_0} знають найменшої дисперсії, хоча вони все-таки перевищують середньоквадратичну похибку: $1.25 \cdot 10^{-6} < D(r_0) < 1.55 \cdot 10^{-4}$.

Для більшої наочності розглянемо дисперсії кількох пар ліній, кожна з яких має потенціали збудження, центральні залишкові інтенсивності, еквівалентні ширини, які або різко відрізняються, або близькі між собою, а також пари з нейтральними та іонізованими лініями:

CrII $\lambda 5305.9 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 3.83\text{eV}$; $\bar{r}_0 = 0.70$; $\bar{W} = 25.3 \text{ m\AA}$; $D(r_0) = 0.50 \cdot 10^{-6}$; $D(W) = 0.063$

i
FeI $\lambda 5307.4 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 1.61\text{eV}$; $\bar{r}_0 = 0.25$; $\bar{W} = 86.5 \text{ m\AA}$; $D(r_0) = 1.02 \cdot 10^{-5}$; $D(W) = 0.385$

FeI $\lambda 6089.6 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 5.02\text{eV}$; $\bar{r}_0 = 0.68$; $\bar{W} = 89.2 \text{ m\AA}$; $D(r_0) = 7.1 \cdot 10^{-6}$; $D(W) = 0.423$

i
VI $\lambda 6090.2 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 1.08\text{eV}$; $\bar{r}_0 = 0.69$; $\bar{W} = 91.2 \text{ m\AA}$; $D(r_0) = 7.8 \cdot 10^{-6}$; $D(W) = 1.83$

NiII $\lambda 6128.9 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 1.68\text{eV}$; $\bar{r}_0 = 0.75$; $\bar{W} = 22.9 \text{ m\AA}$; $D(r_0) = 4.77 \cdot 10^{-6}$; $D(W) = 0.661$

i
NiII $\lambda 6130.1 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 4.26\text{eV}$; $\bar{r}_0 = 0.79$; $\bar{W} = 21.1 \text{ m\AA}$; $D(r_0) = 3.06 \cdot 10^{-6}$; $D(W) = 0.159$

FeII $\lambda 5132.7 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 2.81\text{eV}$; $\bar{r}_0 = 0.74$; $\bar{W} = 18.2 \text{ m\AA}$; $D(r_0) = 1.38 \cdot 10^{-4}$; $D(W) = 0.879$

i
FeI $\lambda 6677.9 \text{ \AA}$; $\chi_{rs} = 2.69\text{eV}$; $\bar{r}_{\lambda_0} = 0.26$; $\bar{W} = 139.2 \text{ m\AA}$; $D(r_{\lambda_0}) = 1.55 \cdot 10^{-4}$; $D(W) = 5.25$

Як видно, значення варіацій параметрів досліджуваних ліній залежить від їх атомних і фізичних характеристик - потенціалів збудження нижнього рівня, ступеня іонізації, сили лінії, термо- і магніточутливості самих ліній, фізичних умов у тих шарах сонячної атмосфери, де ці лінії формуються.

4 Висновки

Комплексний аналіз статистичного матеріалу дав змогу виявити такі закономірності:

1) амплітуди параметрів ліній іонів та слабких ліній з високими потенціалами збудження зазнають невеликих змін порівняно із змінами параметрів сильних ліній з низькими χ_{rs} ;

2) максимальних значень переважно досягають еквівалентні ширини W ліній приблизно за рік до мінімуму сонячної активності (1954р. і 1975р.). Для слабких ліній - досягнення максимальних значень відбувається з деяким запізненням (1955р.; 1977р.). Після мінімуму сонячної активності на гілці росту наступного 21-го циклу простежується зменшення значень W для всіх фраунгоферових ліній. Мінімальних значень W лінії набувають у роки наближення до нового максимуму сонячної активності;

3) часові зміни півширини $h_{1/2}$ та показника асиметрії ліній α повторюють варіації еквівалентної ширини. Сильні лінії з низькими χ_{rs} мають найбільшу фіолетову асиметрію перед мінімумом активності Сонця. Слабкі ж лінії та лінії іонів зазнають запізнення за фазою із зсувом на один-два роки при досягненні своїх максимальних значень. Крім того, відслідковується, що фіолетова асиметрія ліній часто зазнає реверсу - переходить у червону асиметрію поблизу мінімуму сонячного циклу;

4) в антифазі до часових змін еквівалентних ширин W переважно перебувають зміни центральної залишкової інтенсивності r_0 , хоча останні не виявляють такого чіткого часового профілю.

Отже, аналіз довгоперіодичних змін параметрів профілів майже 70-ти фраунгоферових ліній з часом, тобто від мінімуму 19-го циклу сонячної активності у 1953 р. до максимуму 21-го циклу у 1979-1980 рр. підтвердив висновок про реальність цих змін.

Список використаної літератури

1. *Anguera M.* / M. Anguera, P. Palle, C. Regulo et al. // Cambridge University Press. – 1987. – 24 p.
2. *Livingston W.* / W. Livingston, H. Holweger // *Astrophys. J.* **252**. – 1982. – № 1. – P. 375.
3. *Костык Р.И.* / Препринт АН УССР, ИТФ-83-63Р. (Київ, 1983).
4. *Holweger H.* The Role of Fine-Scale Magnetic Fields on the Structure of the Solar Atmosphere / H. Holweger // Cambridge University Press, 1987.
5. *Дервиз Т.Е.* / Т. Дервиз, Н. Купрєвич, Л. Митрофанова // *Астрон. журн.* – 1961. – Т. 38. – Вып. 3. – С. 448.
6. *Кохан Е.К.* / Е. Кохан, В. Крат // *Изв. ГАО.* – 1982. – Т. 200. – С. 3.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2016
прийнята до друку 17.06.2016

**THE INVESTIGATION OF PARAMETERS VARIATIONS OF
FRAUNHOFER LINES DEPENDING ON THE PHASE OF
SOLAR ACTIVITY CYCLE****Koval'chuk M. ¹, Hirnyak M. ¹, Stodilka M. ¹, Laushnyk I. ²**

¹ *Astronomical observatory Ivan Franko National University of Lviv
Kyrylo and Mefodiy St., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

² *Lviv branch of Dnipropetrovsk national
University of railway transport
12-a, Blazhkevich Str., Lviv, 79055, Ukraine*

We made complex analysis of variations of Fraunhofer lines parameters that depending on the phase of the solar cycle. Calculations are based on homogeneous high-precision observations of Fraunhofer lines profiles obtained for three 11-year solar cycles. We received statistical regularities for long-period variations of the parameters of the line profiles with time which confirm the conclusion about the reality of these changes.

Key words: fraunhofer lines, cycle of solar activity

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ
ФРАУНГФЕРОВЫХ ЛИНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФАЗЫ****Ковальчук М. ¹, Гирняк М. ¹, Стодилка М. ¹ Лаушник И. ²**

¹ *Астрономическая обсерватория Львовского национального
университета имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия 8, 79005 Львов, Украина*

² *Львовский филиал Днепропетровского национального
университета железнодорожного транспорта
ул. И. Блажкевич, 12а, г. Львов, 79055, Украина*

Проведен комплексный анализ вариаций параметров фраунгоферовых линий в зависимости от фазы цикла солнечной активности. Расчеты базируются на однородных высокоточных наблюдениях фраунгоферовых линий, полученных на протяжении трех 11-летних солнечных циклов. Получены статистические закономерности в долгопериодических изменениях параметров профилей линий со временем, что подтверждают вывод о реальности этих изменений.

Ключевые слова: фраунгоферовы линии, цикл солнечной активности