

ЧИ РЕАЛЬНІ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ФРАУНГОФЕРОВИХ ЛІНІЙ НА ШКАЛІ 11-ЛІТНЬОГО ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ?

М. Ковальчук¹, М. Гірняк¹, М. Стоділка¹, І. Лаушник²

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, м. Львів, 79005, Україна

²Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту,
вул. І. Блажкевич, 12а, м. Львів, 79055, Україна
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

(Отримано 12 грудня 2017 р.; в остаточному вигляді — 24 квітня 2018 р.)

Питання про довгоперіодичні зміни параметрів профілів фраунгоферових ліній з фазами циклу сонячної активності відкрите й суперечливе. Найпридатнішими для розв'язання такої задачі виявились однорідні високоточні спостереження профілів фраунгоферових ліній, отримані в ГАО АН РФ (Пулково) під час 19-го–21-го циклів сонячної активності.

У роботі розраховано статистичну значущість (невипадковість, суттєвість, реальність) відмінностей параметрів досліджуваних ліній у роки, близько мінімумів та максимумів циклічної активності Сонця.

Застосовано методику, що ґрунтується на t -розподілі, основна ідея якого полягає в порівнянні нульової та конкурентної гіпотез. Отримано, що з довірчою ймовірністю 95% можна стверджувати, що відмінності у значеннях параметрів профілів фраунгоферових ліній у роки мінімумів та максимумів 11-літніх сонячних циклів не є статистично значущими.

Ключові слова: фраунгоферові лінії, циклічність сонячної активності, математична статистика.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.22.2902>

PACS number(s): 95.75.Wx

I. ВСТУП

Дослідження реальності спостережуваної зміни параметрів фраунгоферових ліній залежно від фази циклу сонячної активності важливе для встановлення можливих закономірностей в еволюції сонячної та зоряних атмосфер. На сьогодні отримано обширний ряд високоточних спостережень тонкої структури фраунгоферових ліній Сонця, однак питання про довгоперіодичні зміни інтенсивностей фраунгоферових ліній ще відкрите й суперечливе.

Уперше результати спостережень варіацій параметрів ліній поглинання залежно від фази 11-літнього сонячного циклу були опубліковані в 60х–70х роках минулого століття [1–6]. Пізніше подібні, але незалежні дослідження продовжені у працях [7–13]. У всіх цих роботах отримано дані про параметри фраунгоферових ліній: про еквівалентні ширини, центральні інтенсивності, півширини, асиметрію ліній та їхні зміни з часом — і проведений аналіз на чутливість цих параметрів до ступеня активності Сонця. Результати вражаюче неоднозначні та суперечливі: в одних авторів зміни параметрів ліній корелюють із циклом активності, в інших перебувають в антикореляційній залежності, ще в інших залишаються постійними або амплітуда змін параметрів лише частково змінюється без вияву певних закономірностей.

Тому ми вважаємо, що й сьогодні проблема реальності довгоперіодичних змін параметрів профілів фраунгоферових ліній, зокрема з фазами циклу сонячної активності, актуальна.

II. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ

Метою цієї праці було з'ясувати статистичну значущість (невипадковість, суттєвість, реальність) відмінностей параметрів фраунгоферових ліній залежно від фази циклу сонячної активності.

III. СПОСТЕРЕЖУВАНИЙ МАТЕРІАЛ

Найбільш придатним матеріалом для розв'язку цієї задачі виявились однорідні високоточні спостереження профілів фраунгоферових ліній, отримані в ГАО АН РФ (Пулково) під час 1953–1959 рр. і 1969–1979 рр. (19–21-й цикли сонячної активності [1, 4, 5]). Було вибрано 69 неблендованих ліній з різними умовами формування в широкому діапазоні висот сонячної атмосфери — від глибокої фотосфери до нижньої хромосфери поблизу температурного мінімуму. Про це свідчать різні потенціали збудження цих ліній, різна центральна залишкова інтенсивність, їхня неоднакова чутливість до флуктуацій температури, тиску, до рухів газових мас. Автори гарантують точність реєстрації профілів ліній — 0.1% частки від неперервного спектра. Серед вибраних ліній є лінії молекулярного вуглецю C_2 та нейтрального калію KI, які утворюються поблизу температурного мінімуму, лінії нейтральних атомів заліза FeI, нікелю NiI, ванадію VI, титану TiI, кремнію SiI, натрію NaI(D_1) і NaI(D_2),

вуглецю СІ, лінії йонізованих атомів заліза FeII, хрому CrII, кремнію SiII, які формуються глибоко у фотосфері. Для всіх цих ліній протягом 19-го–21-го циклів сонячної активності отримані значення центральних залишкових інтенсивностей, півширини, еквівалентних ширин, асиметрії.

Використавши спостережуваний матеріал із праць

[1, 4, 5], ми сформуваємо таблиці 1–3. У них для кожної групи ліній окремих хімічних елементів наведені лише деякі параметри цих ліній, а саме: центральна залишкова інтенсивність r_{λ_0} та еквівалентна ширина W_{λ} в періоди поблизу мінімумів (1953 р., 1975 р.) — масив $M(X)$ та максимумів (1957 р., 1978 р.) — масив $M(Y)$ сонячної активності.

№	$\lambda, \text{Å}$	χ_{rs}, eV	рік min сон. акт. 1953 р.		рік max сон. акт. 1957 р.	
			r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{ Å}$	r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{ Å}$
1	2	3	4	5	6	7
1	4383.54	1.48	0.176	1389	0.137	1602
2	4404.75	1.55	0.254	784	0.156	824
3	4407.71	1.56	0.527	136	0.396	164
4	4408.43	2.20	0.451	222	0.336	274
5	4415.14	3.88	0.302	478	0.211	549
6	4422.58	2.84	0.571	113	0.484	131
7	4433.23	3.65	0.646	91	0.522	138
8	4442.53	2.20	0.510	153	0.396	182
9	4447.73	2.22	0.542	115	0.444	157
10	4454.39	3.97	0.415	384	0.312	451
11	4466.56	2.57	0.547	137	.434	216
12	4469.38	3.56	.574	212	0.489	235
13	4476.02	2.84	.505	165	0.362	196
14	4482.18	0.11	0.454	160	0.319	197
			рік min сон. акт. 1975 р.		рік max сон. акт. 1978 р.	
15	5576.1	3.43	0.244	130	0.239	132
16	6089.6	5.02	0.666	34	0.663	34
17	6238.4	3.89	0.645	47	0.643	47
18	6677.9	2.69	0.280	137	0.280	140
19	5132.7	2.81	0.745	25	0.746	26
20	5295.3	4.41	0.688	28	0.685	28

Таблиця 1. Спостережувані параметри ліній заліза FeI і FeII в роки, близькі до мінімумів (1953 р., 1975 р.) — масив $M(X)$ — (стовпчики 4 і 5) та максимумів (1957 р., 1978 р.) — масив $M(Y)$ (стовпчики 6 і 7) сонячної активності. Обсяг вибірки: $M(X) = M(Y) = 20$.

№	$\lambda, \text{Å}$	χ_{rs}, eV	рік min сон. акт. 1953 р.		рік max сон. акт. 1957 р.	
			r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{ Å}$	r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{ Å}$
1	2	3	4	5	6	7
1	4416.54	1.87	0.677	90	0.597	105
2	4417.72	1.16	0.633	68	0.529	129
3	4418.34	1.24	0.705	74	0.645	76
4	4427.11	1.07	0.466	205	0.372	255
5	4434.01	1.87	0.709	109	0.613	103
6	4443.81	1.08	0.596	102	0.406	155
7	4468.50	1.13	0.572	135	0.453	173
			рік min сон. акт. 1975 р.		рік max сон. акт. 1978 р.	
8	6091.2	2.27	0.861	17	.86	15

Таблиця 2. Спостережувані параметри ліній титану TiI і TiII в роки, близькі до мінімумів (1953 р., 1975 р.) — масив $M(X)$ — (стовпчики 4 і 5) та максимумів (1957 р., 1978 р.) — масив $M(Y)$ — (стовпчики 6 і 7) сонячної активності. Обсяг вибірки: $M(X) = M(Y) = 8$.

№	$\lambda, \text{Å}$	χ_{rs}, eV	рік min сон. акт. 1953 р.		рік max сон. акт. 1957 р.	
			r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{Å}$	r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{Å}$
1	2	3	4	5	6	7
1	4459.04	3.31	0.464	180	.313	270
			рік min сон. акт. 1975 р.		рік max сон. акт. 1978 р.	
2	5435.9	1.99	0.480	51	0.460	52
3	5847.0	1.68	0.790	20	0.787	21
4	6128.9	1.68	0.753	23	0.753	24
5	6130.1	4.26	0.798	21	0.796	21
6	6767.8	1.83	0.383	80	0.379	81

Таблиця 3. Спостережувані параметри ліній нікелю NiI в роки, близькі до мінімумів (1953 р., 1975 р.) — масив $M(X)$ — (стовпчики 4 і 5) та максимумів (1957 р., 1978 р.) — масив $M(Y)$ — (стовпчики 6 і 7) сонячної активності. Обсяг вибірки: $M(X) = M(Y) = 6$.

Таблиця 4 містить дані всіх інших спостережуваних ліній за ці ж роки (1953 р., 1975 р. — масив $M(X)$, 1957 р., 1978 р. — масив $M(Y)$). У цих таблицях подані довжини хвиль досліджуваних ліній λ в ангстремах та їхні потенціали збудження нижнього рівня χ_{rs} в електрон-вольтах.

№	Елемент	$\lambda, \text{Å}$	χ_{rs}, eV	рік min сон. акт. 1953 р.		рік max сон. акт. 1957 р.	
				r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{Å}$	r_{λ_0}	$W_{\lambda}, m \text{Å}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	VI	4395.25	0.27	.496	274	0.353	334
2	VI	4406.65	0.30	.672	89	0.561	135
3	CaI	4425.45	1.88	0.550	171	0.483	131
4	CaI	4434.97	1.89	0.465	237	0.315	300
5	CaI	4435.69	1.89	0.568	123	0.453	143
6	VI	4436.90	2.59	0.728	61	0.598	101
7	MnI	4464.68	2.92	0.590	178	0.441	254
8	MnI	4472.81	2.95	0.666	131	0.557	131
				рік min сон. акт. 1975 р.		рік max сон. акт. 1978 р.	
9	CrII	5305.9	3.83	0.743	26	0.740	26
10	SiI	6087.8	5.87	0.906	18	0.904	20
11	VI	6090.2	1.08	0.692	31	0.692	32
12	KI	7698.9	0.00	0.184	171	0.175	154

Таблиця 4. Спостережувані параметри решти вибраних фраунгоферових ліній в роки близькі до мінімумів (1953 р., 1975 р.) масив $M(X)$ — (стовпчик 5 і 6) та максимумів (1957 р., 1978 р.) масив $M(Y)$ — (стовпчик 7 і 8) сонячної активності.

IV. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

Розрахунки проводились двома етапами. Спочатку за допомогою дисперсійного аналізу ми розрахували межі значень дисперсії параметрів цих ліній з часом, тобто від мінімумів до максимумів 11-літніх циклів, а також на гілках зростання і спаду сонячної активності. Найчутливішими параметрами до часових змін виявились еквівалентна ширина та центральна залишкова інтенсивність ліній поглинання.

Далі для відповіді на основне питання цієї роботи щодо визначення статистичної значущості варіацій параметрів досліджуваних ліній на шкалі 11-літнього

циклу сонячної активності ми застосували методику, що ґрунтується на t -розподілі, основна ідея якого полягає в порівнянні нульової та конкурентної гіпотез.

За нульової гіпотези H_0 масив значень $M(X)$ дорівнює масиву значень $M(Y)$: $M(X) = M(Y)$. За конкурентної гіпотези H_1 : $M(X) \neq M(Y)$.

Вибрані лінії окремих хімічних елементів, наведені в таблицях 1–3, а також решта інших ліній (таблиця 4) становлять дві групи. Одна група (масив $M(X)$) належить до років, близьких до мінімумів сонячної активності (1953 р., 1975 р.), друга група (масив $M(Y)$) — до років, близьких до максимумів активності (1957 р., 1978 р.).

Ми порівнювали середні значення \bar{X} і \bar{Y} 1-ї і 2-ї груп ліній. Обсяги вибірок n і m двох груп були однакові. За контрольну використовували величину:

$$T = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{\sqrt{(n-1)S_x^2 + (m-1)S_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot m \cdot (n+m-2)}{n+m}},$$

де S_x^2 , S_y^2 — відповідні дисперсії:

$$S_x^2 = \frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n-1}; S_y^2 = \frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{m-1},$$

тут X — значення досліджуваного біжучого параметра (r_{λ_0} або W_{λ}) профілю ліній у роки мінімумів, Y — те ж — у роки максимумів сонячної активності.

Окремо для всіх груп хімічних елементів (таблиці 1–4) ми перевіряли нульову гіпотезу $H_0: M(X) = M(Y)$ за конкурентної гіпотези $H_1: M(X) \neq M(Y)$. За умовою конкурентна гіпотеза має вигляд $M(X) \neq$

$M(Y)$. За допомогою таблиць 1–4 t -розподілу на рівні значимості $\alpha = 0.05$ і при $f = n + m - 2$ степенях свободи знаходимо $t_{\text{крит.}}$.

V. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Грунтуючись на поданих у таблицях 1–3 значеннях еквівалентних ширин W_{λ} та центральних залишкових інтенсивностей r_{λ_0} в роки мінімумів та максимумів активності Сонця, ми обчислили для окремих хімічних елементів, зокрема заліза, титану, нікелю, значення контрольних величин T . Включивши таблицю 4, обчислили контрольну величину T для W_{λ} та r_{λ_0} для всіх вибраних досліджуваних фраунгоферових ліній.

Нижче наведено наші результати обчислень статистичної значущості відмінностей параметрів профілів фраунгоферових ліній (W_{λ} і r_{λ_0}) в роки, близькі до мінімумів і максимумів 11-літніх циклів сонячної активності.

Для ліній заліза (таблиця 1):

$$n = 20; m = 20; f = 38; \quad t_{\text{крит.}} = 1.6860 \quad (\text{при } \alpha = 0.05).$$

Обчислене $T = 0.442$ (для W_{λ}) і $T = 0.396$ (для r_{λ_0}).
Отже, $T(W_{\lambda}) = 0.442 < 1.6860$ і $T(r_{\lambda_0}) = 0.396 < 1.6860$.

Для ліній титану (таблиця 2)

$$n = 8; m = 8; f = 14; \quad t_{\text{крит.}} = 1.7613 \quad (\text{при } \alpha = 0.05).$$

Обчислене $T(W_{\lambda}) = 0.754$ (для W_{λ}) і $T = 0.665$ (для r_{λ_0}).
Отже, $T(W_{\lambda}) = 0.754 < 1.7613$ і $T(r_{\lambda_0}) = 0.665 < 1.7613$.

Для ліній нікелю (таблиця 3):

$$n = 6; m = 6; f = 10; \quad t_{\text{крит.}} = 1.8125 \quad (\text{при } \alpha = 0.05).$$

Обчислене $T = 0.3014$ (для W_{λ}) і $T = 0.2285$ (для r_{λ_0}).
Отже, $T(W_{\lambda}) = 0.3014 < 1.8125$ і $T(r_{\lambda_0}) = 0.2285 < 1.8125$.

Для всіх вибраних ліній (таблиці 1–4):

$$n = 46; m = 46; f = 90; \quad t_{\text{крит.}} = 1.6620 \quad (\text{при } \alpha = 0.05).$$

Обчислене $T = 0.5763$ (для W_{λ}) і $T = 0.4824$ (для r_{λ_0}).
Отже, $T(W_{\lambda}) = 0.5763 < 1.6620$ і $T(r_{\lambda_0}) = 0.4824 < 1.6620$.

VI. ВИСНОВКИ

Отже, з довірчою ймовірністю 95% можна стверджувати, що відмінності у значеннях параметрів профілів фраунгоферових ліній у роки мінімумів та максимумів сонячної активності не є статистично значущими.

Зауважмо, що спостережуваний матеріал дає, на перший погляд, позірні варіації еквівалентних ширин та центральних залишкових інтенсивностей досліджуваних ліній поглинання з фазами сонячного циклу. Однак застосування методу математичної статистики до розв'язання цього питання показало несуттєвість таких змін. На шляху до остаточного ви-

рішення цієї проблеми стоїть явна нестача довгоперіодичних спостережень більшої кількості ліній сонячного спектра. Дослідження в цьому напрямку можна

продовжити за наявності довгоперіодичних варіацій профілів фраунгоферових ліній як у центрі, так і на краю диска Сонця.

-
- [1] Т. Е. Дервиз, Н. Купревич, Л. А. Митрофанова, *Астрон. журн.* **38**, Вып. 3, 448 (1961).
 [2] Л. Н. Жукова, Л. А. Митрофанова, *Солн. данные* **252**, №6, 65 (1973).
 [3] W. E. Mitchell, Jr., *Astrophys. J.* **38**, №2, 709 (1969).
 [4] В. А. Крат, Е. К. Кохан, Н. Н. Печинская, *Изв. ГАО*, № 193, 3 (1975).
 [5] Н. Н. Печинская, *Солн. данные* **252**, №12, 54 (1977).
 [6] W. Livingston, R. Milkey, C. Slaughter, *Astrophys. J.* **211**, 281 (1977).
 [7] Р. И. Костык, препринт ИТФ-83-63Р (1983).
 [8] W. Livingston, H. Holweger, *Astrophys. J.* **252**, 375 (1982).
 [9] Н. Н. Степанян, З. А. Щербакова, *Изв. Крым. АО*, **58**, 3 (1978).
 [10] D. H. Bruning, B. J. Labonte, in: *Small-Scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres, Proceedings of the Conference held in Sunspot, NM, 25–29 July, 1983*, edited by S. L. Keil (National Solar Observatory, 1984), p. 338.
 [11] L. Bertello, A. A. Pevtsov, M. S. Giampapa, A. R. Marble, in *18th Cambridge Workshop on cool stars, stellar systems, and the Sun, Proceedings of the conference held at Lowell observatory, 8–14 June, 2014*, edited by G. van Bell, H. C. Harris (2014), p. 693.
 [12] S. Danilovic *et al.*, *Astron. Astrophys.* **587**, A33 (2016).
 [13] I. Kowalska-Leszczynska, M. Bzowski, J. M. Sokół, M. A. Kubiak, *Astrophys. J.* **852**, 115 (2018).
 [14] Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов, *Таблицы математической статистики* (Наука, Москва, 1983).

ARE CHANGES IN THE PARAMETERS OF FRAUNHOFER LINES ON THE 11-YEAR SOLAR CYCLE TIME SCALE REAL?

M. Koval'chuk¹, M. Hirnyak¹, M. Stodilka¹, I. Laushnyk²

¹*The Ivan Franko National University of Lviv, Astronomical Observatory, 8, Kyrylo and Mephodij St., Lviv, UA-79005, Ukraine*

²*Lviv branch of Dnipropetrovsk national University of railway transport, 12-a, Blazhkevich Str., Lviv, UA-79055, Ukraine*
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

The study of the reality of the observed changes in the parameters of Fraunhofer lines, depending on the phase of the solar activity cycle, is important for establishing possible patterns in the evolution of the solar and stellar atmospheres. An extensive series of high-precision observations of the fine structure of the Fraunhofer lines of the Sun have been carried out. However, the question about long-period changes of Fraunhofer lines intensity remains open and contradictory. The purpose of this work was to clarify the statistical significance of the variations in Fraunhofer lines parameters depending on the phase of the solar activity cycle.

The most suitable material for solving this problem was the homogeneous high-precision observation of the profiles of Fraunhofer lines obtained at the Main Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences (Pulkovo) during the 19th–21th cycles of the solar activity. About 70 uncovered lines were selected with different conditions of formation in a wide range of heights of the solar atmosphere — from the deep photosphere to the lower chromosphere near the temperature minimum. The equivalent widths and central residual intensities were most sensitive to the time changes of absorption lines.

To answer the questions about the statistical significance of the variations in the parameters of the studied lines on the 11-year solar cycle time scale, we applied a method based on *t*-distribution, whose main idea is to compare the zero hypothesis and a competing hypothesis. It is shown that we may confirm with 95% confidence that the differences in the values of the Fraunhofer line parameters in the years of minima and maxima of a 11-year Solar cycle are not statistically significant.