

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.067>

УДК 523.9

**М. І. Пішкало**

Головна астрономічна обсерваторія НАН України,  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143  
pish@mao.kiev.ua

## Індекс фотометричної стиснутості сонячної корони у циклі сонячної активності

*Індекс фотометричної стиснутості як кількісну характеристику форми сонячної корони, спостереженої під час повного сонячного затемнення, було запропоновано Людендорфом у 1930-х рр. У роботі зібрано значення індексу стиснутості для 69 затемнень 1851... 2020 рр. і досліджено їхній зв'язок із параметрами циклу сонячної активності. Значення індексу стиснутості змінюється приблизно від 0.3...0.4 у мінімумі циклу активності до 0.0...0.1 — у максимумі. Індекс корелює із відносним числом сонячних плям і фазою сонячного циклу. Значення коефіцієнта кореляції між індексом стиснутості і добовим, місячним і місячним згладженим числом сонячних плям становить відповідно  $-0.577$  ( $p < 4 \cdot 10^{-7}$ ),  $-0.595$  ( $p < 8 \cdot 10^{-8}$ ) і  $-0.598$  ( $p < 7 \cdot 10^{-8}$ ), а між індексом стиснутості і фазою циклу  $\Phi$  для періоду росту і спаду сонячного циклу — відповідно  $-0.759$  ( $p < 5 \cdot 10^{-6}$ ) і  $0.660$  ( $p < 2 \cdot 10^{-6}$ ). Спостережена форма сонячної корони, зокрема і величина індексу стиснутості, визначається глобальним магнітним полем Сонця, переважно його дипольною складовою.*

**Ключові слова:** Сонце, сонячна корона, цикл сонячної активності

### ВСТУП

Форма, структура і яскравість сонячної корони, спостереженої під час повних сонячних затемнень, змінюється від затемнення до затемнення. Багаторічні спостереження показують, що у цих змінах є певні закономірності. Зокрема, поблизу мінімуму циклу сонячної активності корона витягнута вздовж екватора внаслідок наявності двох яскравих

променів-стрімерів, орієнтованих уздовж екватора, а поблизу максимуму вона майже кругла із великою кількістю переважно радіальних яскравих променів по всьому лімбу.

Раньєрд [19] першим відзначив, що форма корони змінюється з 11-річним циклом сонячних плям. Ганський [3] у 1897 р., проаналізувавши замальовки спостережень 20 повних сонячних затемнень 1842...1896 рр., повідомив про зв'язок форми і яскравості сонячної корони із річним числом сонячних плям. Майже одночасно Негамвала [12] із аналізу спостережень 21 затемнення, також знайшов, що форма корони змінюється із зміною числа сонячних плям.

Людендорф [7, 8] першим запропонував кількісний параметр для характеристики форми сонячної корони і методологію його порівняння у різних циклах активності. Цю величину називають індексом фотометричної стиснутості (чи просто індексом стиснутості) сонячної корони (також індексом, чи параметром Людендорфа, індексом еліптичності корони). Параметр фотометричної стиснутості корони  $d_e$ , запропонований Людендорфом у 1928 р. [7], визначається як деяка функція протяжності і яскравості корони у полярних і екваторіальних напрямках за формулою

$$\frac{d_e}{d_p} = 1,$$

де  $d_e$  — середнє із трьох значень діаметра ізофоти поблизу екватора (строго на екваторі і  $\pm 22.5^\circ$  відносно екватора),  $d_p$  — аналогічне значення для полярного напрямку. У наступній роботі 1934 р. [8] він дійшов висновку, що краще порівнювати не просто значення  $d_e$  при певних значеннях радіуса екваторіальної ізофоти  $r_e = d_e/2$ , а екстрапольовати спостережену лінійну залежність  $d_e(r_e)$  поблизу лімба на відстань двох сонячних радіусів. Це екстрапольоване значення  $d_e$  є індексом фотометричної стиснутості сонячної корони. Як зазначав ще Ван де Хюлст у роботі [21], індекс стиснутості — це величина, подібна до величини стиснутості справжньої корони (без пилового F-компонента) при  $r_e = 2R_\odot$ .

У подальшому індекс стиснутості визначався практично для кожного наступного затемнення і багато дослідників шукали його зв'язок із різними параметрами сонячної активності [6, 15, 16, 20, 21, 26]. Зокрема, у нашій роботі [15] проаналізовано зв'язок індексу стиснутості із відносним числом сонячних плям і фазою сонячного циклу для 60 затемнень. А у недавній нашій роботі [16] досліджено зв'язок індексу стиснутості для затемнень 1976...2020 рр. із параметрами магнітного поля Сонця.

У 2015 році було здійснено ревізію міжнародного відносного числа сонячних плям [3], що спричинило невеликі зміни параметрів циклів сонячної активності. Крім того, відбулося кілька нових повних сонячних затемнень та отримано нові значення індексу стиснутості. Тому у даній роботі ми проведемо нове дослідження зв'язку індексу стиснутості із параметрами сонячної активності.

## СПОСТЕРЕЖНІ ТА ВХІДНІ ДАНІ

У табл. 1 наведено використані в роботі значення індексу стиснутості сонячної корони для 69 повних сонячних затемнень, що спостерігалися у 1851...2020 рр., а також добові, місячні, місячні згладжені відносні числа сонячних плям, взяті із сайту Королівської Обсерваторії Бельгії ([www.sidc.be/silso](http://www.sidc.be/silso)), і розраховані значення фази циклу сонячної активності на день затемнення. Тут ми на відміну від роботи [15] і відповідно до роботи [16] використали принцип «одне затемнення — одне значення індексу стиснутості» (значення, отримані іншими дослідниками, зібрані у відповідних таблицях у наших роботах [15, 16]). Там, де можливо, у подальших розрахунках ми використовуємо свої власні визначення величини індексу стиснутості.

Мінімальне значення індексу стиснутості (0.00) було отримано для корон, що спостерігалися під час затемнень 1893 і 1991 рр., а максимальне (0.41) — для корони 1976 р. Як правило, більші значення індексу стиснутості відповідають мінімуму сонячного циклу, а менші — максимуму.

Для порівняння індексу стиснутості у сонячних циклах різної потужності і тривалості зазвичай використовують поняття фази циклу (фази активності). Фаза  $P$  визначається за формулою

$$P = (T - T_{\min 1}) / (T_{\min 2} - T_{\min 1}),$$

де  $T$  — момент затемнення,  $T_{\min 1}$  і  $T_{\min 2}$  — час початку і кінця циклу. Фаза  $P$  визначається за формулами

$$(T - T_{\min 1}) / (T_{\max} - T_{\min 1}) \quad (T - T_{\min 1}) / T_{\text{rise}}$$

і

$$(T - T_{\min 2}) / (T_{\min 2} - T_{\max}) \quad (T - T_{\min 2}) / T_{\text{fall}}$$

відповідно для періоду росту ( $T_{\text{rise}}$ ) і спаду ( $T_{\text{fall}}$ ) активності у циклі (тут  $T_{\max}$  — час максимуму циклу). По суті величина  $P$  — це час затемнення у нормованому по тривалості сонячному циклі, а  $\Phi$  — час затемнення окремо для періоду (фази) росту і спаду активності у циклі.

Фази  $\Phi$  і  $P$  для затемнення 14 грудня 2020 р. у табл. 1 є попередніми. Фази  $P$  ми розраховали у припущенні, що тривалість 25-го циклу відповідає середній тривалості сонячного циклу (11.019 р., згідно із параметрами циклів сонячної активності за версією 2.0 [23]). Для розрахунку параметра  $\Phi$  попередньо нами було знайдено прогнозовану тривалість фази росту активності у 25-му циклі (4.254 р.) за допомогою отриманого тут же за даними для циклів 1...24 співвідношення  $T_{\text{rise}} = -2.351 - 0.600T_c^p$ , де  $T_c^p$  — повна тривалість попереднього циклу (коефіцієнт кореляції становить 0.650,  $p < 0.0008$ ).

**Таблиця 1.** Індекс стиснутості сонячної корони під час 69 повних сонячних затемнень 1851...2020 рр. і деякі характеристики сонячної активності на день затемнення ( $\Phi$  і  $P$  — фази сонячного циклу,  $DSN$ ,  $MSN$  і  $MSSN$  — добове, місячне і місячне згладжене відносне число сонячних плям,  $FI$  — індекс стиснутості)

Дата затемнення	$\Phi$	$P$	$DSN$	$MSN$	$MSSN$	$FI$	Літературне джерело
28 липня 1851	-0.560	0.647	55	68.6	121.9	0.22	[24]
16 квітня 1893	0.804	0.261	145	146.8	137.7	0.00	[8]
9 серпня 1896	-0.680	0.541	22	45.4	69.4	0.24	[8]
22 січня 1898	-0.498	0.663	80	50.4	43.3	0.18	[8]
28 травня 1900	-0.205	0.862	42	25.3	17.5	0.30	[8]
18 травня 1901	-0.084	0.944	0	17.0	4.7	0.25	[8]
30 серпня 1905	0.887	0.315	58	98.1	100.7	0.01	[8]
3 січня 1908	-0.746	0.519	80	65.4	84.3	0.08	[8]
21 серпня 1914	0.269	0.109	28	12.9	21.6	0.19	[8]
8 червня 1918	-0.865	0.486	123	99.0	139.2	0.23	[8]
29 травня 1919	-0.703	0.582	40	146.9	112.3	0.11	[20]
21 вересня 1922	-0.150	0.911	13	7.8	15.7	0.26	[8]
10 вересня 1923	0.015	0.007	38	22.1	9.5	0.22	[8]
24 січня 1925	0.309	0.143	13	9.1	43.2	0.13	[8]
14 січня 1926	0.517	0.239	92	119.7	104.2	0.07	[8]
29 червня 1927	0.829	0.384	190	98.5	117.5	0.04	[8]
9 травня 1929	-0.804	0.568	128	97.0	99.2	0.12	[8]
28 квітня 1930	-0.625	0.664	65	63.7	78.6	0.27	[8]
31 серпня 1932	-0.192	0.897	13	11.3	19.4	0.20	[8]
14 лютого 1934	0.116	0.040	28	12.9	10.5	0.23	[21]
19 червня 1936	0.770	0.265	168	116.7	128.5	0.04	[15]
8 червня 1937	-0.979	0.358	107	217.1	193.0	0.09	[6]
21 вересня 1941	-0.351	0.769	130	109.8	79.4	0.30	[15]
4 лютого 1943	-0.151	0.901	27	48.1	33.2	0.23	[21]
9 липня 1945	0.430	0.137	48	71.0	57.1	0.32	[15]
25 лютого 1952	-0.309	0.790	0	32.4	59.8	0.27	[15]
30 червня 1954	0.053	0.020	0	0.4	6.3	0.35	[15]
20 червня 1955	0.301	0.112	92	45.2	50.0	0.24	[25]
12 жовтня 1958	-0.913	0.428	191	256.9	258.1	0.13	[15]
2 жовтня 1959	-0.765	0.520	108	157.7	199.7	0.16	[15]
15 лютого 1961	-0.557	0.651	37	65.4	105.9	0.20	[15]
5 лютого 1962	-0.409	0.744	61	71.7	59.4	0.26	[15]
20 липня 1963	-0.189	0.882	17	28.7	39.7	0.26	[15]
30 травня 1965	0.152	0.054	0	34.5	21.2	0.23	[15]
12 листопада 1966	0.508	0.180	113	81.0	99.4	0.30	[15]
22 вересня 1968	0.964	0.344	140	166.0	151.5	0.14	[15]
7 березня 1970	-0.822	0.472	157	145.7	150.3	0.08	[15]
10 липня 1972	-0.502	0.677	91	108.3	96.6	0.27	[15]
30 червня 1973	-0.370	0.763	47	56.1	55.6	0.27	[15]
20 червня 1974	-0.237	0.848	29	51.5	49.3	0.15	[15]
23 жовтня 1976	0.161	0.058	40	29.7	19.7	0.41	[15]

Закінчення табл. 1

Дата затемнення	$\Phi$	$P$	$DSN$	$MSN$	$MSSN$	$FI$	Літературне джерело
12 жовтня 1977	0.420	0.150	47	62.1	64.8	0.31	[15]
26 лютого 1979	0.786	0.281	153	194.7	185.4	0.15	[26]
16 лютого 1980	-0.975	0.373	231	219.4	230.2	0.09	[15]
31 липня 1981	-0.760	0.512	217	205.3	198.5	0.21	[15]
11 червня 1983	-0.484	0.689	105	131.5	95.9	0.26	[5]
22 листопада 1984	-0.269	0.827	42	26.5	31.6	0.35	[6]
22 липня 1990	-0.899	0.388	183	191.1	190.1	0.12	[4]
11 липня 1991	-0.755	0.486	235	240.2	203.5	0.00	[22]
3 листопада 1994	-0.264	0.820	56	29.5	38.7	0.27	[9]
24 жовтня 1995	-0.120	0.918	36	30.6	15.9	0.27	[10]
9 березня 1997	0.107	0.045	25	12.1	18.3	0.27	[11]
26 лютого 1998	0.292	0.124	56	50.2	65.4	0.22	[11]
11 серпня 1999	0.569	0.242	79	142.3	142.9	0.04	[15]
21 червня 2001	0.923	0.393	218	202.9	167.4	0.07	[15]
4 грудня 2002	-0.852	0.511	134	135.3	131.4	0.09	[15]
23 листопада 2003	-0.715	0.590	134	82.9	86.9	0.23	[20]
8 квітня 2005	-0.471	0.701	43	38.7	49.3	0.23	[20]
29 березня 2006	-0.385	0.779	31	17.3	27.4	0.17	[18]
1 серпня 2008	-0.053	0.970	0	0.3	3.8	0.21	[17]
22 липня 2009	0.112	0.054	0	5.5	5.5	0.24	[15]
11 липня 2010	0.294	0.142	36	25.2	25.2	0.24	[15]
13 листопада 2012	0.733	0.355	121	87.6	87.7	0.014	[16]
3 листопада 2013	0.916	0.444	123	113.9	106.9	0.042	[16]
20 березня 2015	-0.837	0.569	20	54.5	82.1	0.22	[16]
9 березня 2016	-0.665	0.657	91	54.1	50.4	0.12	[16]
21 серпня 2017	-0.409	0.789	63	32.6	19.6	0.26	[16]
2 липня 2019	-0.081	0.958	0	0.9	3.5	0.266	[16]
14 грудня 2020	0.234	0.090	13	23.1	15.3	0.273	[16]

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Насамперед ми побудували залежності індексу стиснутості  $FI$  від добового, місячного і місячного згладженого відносного числа сонячних плям. Ці залежності показано на рис. 1.

У лінійному наближенні залежності індексу стиснутості від відносного числа сонячних плям можна описати виразами

$$FI = 0.259 - 0.00086 DSN,$$

$$FI = 0.261 - 0.00086 MSN,$$

$$FI = 0.266 - 0.00090 MSSN.$$

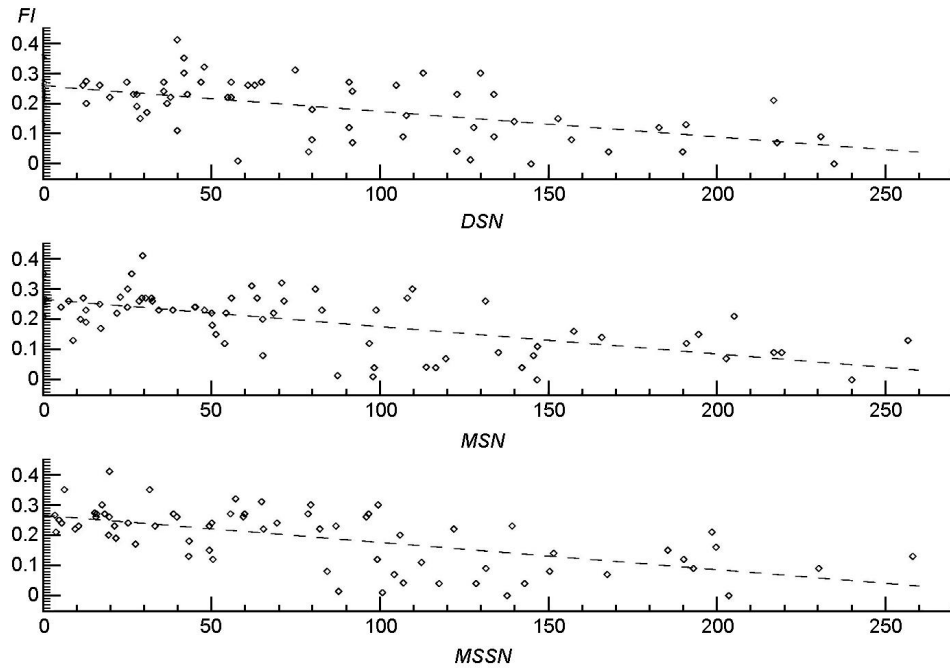


Рис. 1. Залежності індексу  $FI$  стиснутості сонячної корони від добового, місячного і місячного згладженого відносного числа сонячних плям ( $DSN$ ,  $MSN$  і  $MSSN$  відповідно) та їхні лінійні апроксимації (штрихові прямі)

Відповідні значення коефіцієнта кореляції становлять:  $-0.577$  ( $p < 4 \cdot 10^{-7}$ ) між величинами  $FI$  і  $DSN$ ,  $-0.595$  ( $p < 8 \cdot 10^{-8}$ ) між  $FI$  і  $MSN$  та  $-0.598$  ( $p < 7 \cdot 10^{-8}$ ) між  $FI$  і  $MSSN$ .

На рис. 2 показано залежності індексу стиснутості від фаз активності  $\Phi$  і  $P$ . Штрихові лінії описують ці залежності у квадратичному наближенні, а суцільні лінії — у наближенні періодичними синусоїдальними функціями. Для фази  $\Phi$  ці залежності описуються формулами

$$FI = 0.262 - 0.040 \Phi + 0.228 \Phi^2,$$

$$FI = 0.147 + 0.126 \cos(2.231 \Phi),$$

а для фази  $P$  — формулами

$$FI = 0.281 - 0.677P + 0.753P^2,$$

$$FI = 0.192 + 0.075 \cos(2P).$$

На рис. 3 і 4 окремо показано залежності індексу стиснутості сонячної корони від параметра  $\Phi$  для фази росту і спаду сонячного циклу. Тут вказано також роки повних сонячних затемнень. На фазі росту активності у сонячному циклі спостережені значення індексу стиснутості можна апроксимувати лінійною (суцільна пряма) і квадратичною (пунктир) залежностями відповідно:

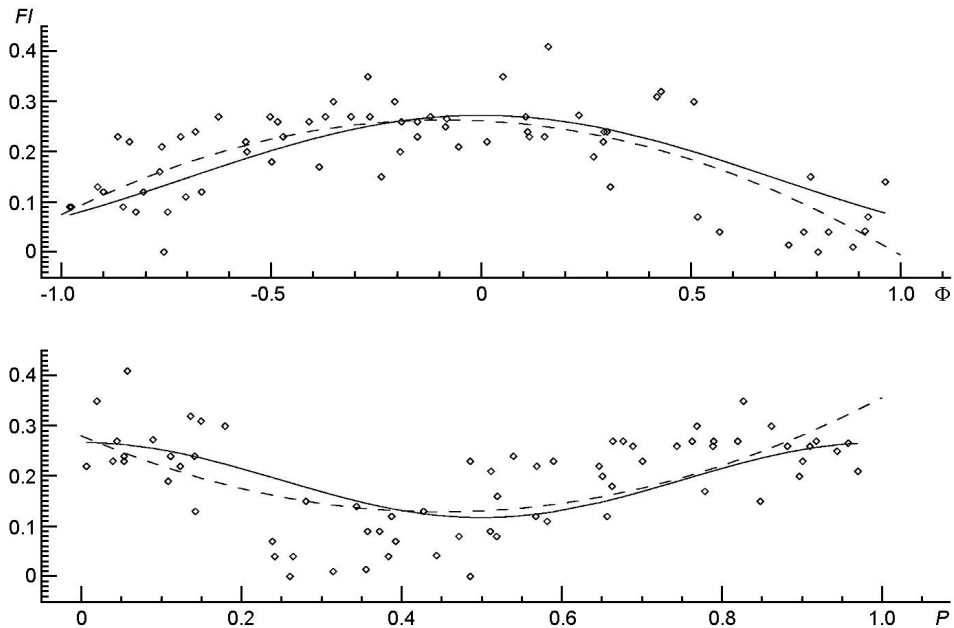


Рис. 2. Залежності індексу  $FI$  стиснутості сонячної корони від фаз циклу  $\Phi$  і  $P$ . Суцільна лінія — апроксимація періодичною функцією, штрихова лінія — крива 2-го порядку

$$FI = 0.311 - 0.289 \Phi,$$

$$FI = 0.304 - 0.242 P + 0.047 P^2.$$

На фазі спаду активності ці залежності описуються рівняннями

$$FI = 0.295 - 0.181 \Phi,$$

$$FI = 0.246 - 0.095 P + 0.270 P^2.$$

Абсолютне значення градієнта зміни  $FI$  на фазі росту сонячного циклу є майже на 60 % вищим, ніж на фазі спаду. Це пояснюється тим, що реальна тривалість фази росту сонячного циклу є меншою від тривалості фази спаду циклу. До того ж на фазу росту сонячного циклу припадає 27 із 69 затемнень, задіяних у даному дослідженні, а на фазу спаду — 42.

Значення коефіцієнта кореляції між  $FI$  і  $\Phi$  становить  $-0.759$  ( $p < 5 \cdot 10^{-6}$ ) на фазі росту циклу і  $0.660$  ( $p < 2 \cdot 10^{-6}$ ) на фазі спаду. Тобто, кореляція між  $FI$  і моментом часу у циклі активності, коли відбулося затемнення, є вищою, ніж кореляція між  $FI$  і числом сонячних плям.

Індекс стиснутості має найвищі значення  $0.3 \dots 0.4$  поблизу мінімуму сонячної активності і найменші, близькі до нуля, — поблизу максимуму. Хоча кореляція між  $FI$  і числом сонячних плям є досить сильною (до  $-0.598$  для місячного згладженого числа плям), кількість сонячних плям не є визначальною у формі сонячної корони і величині

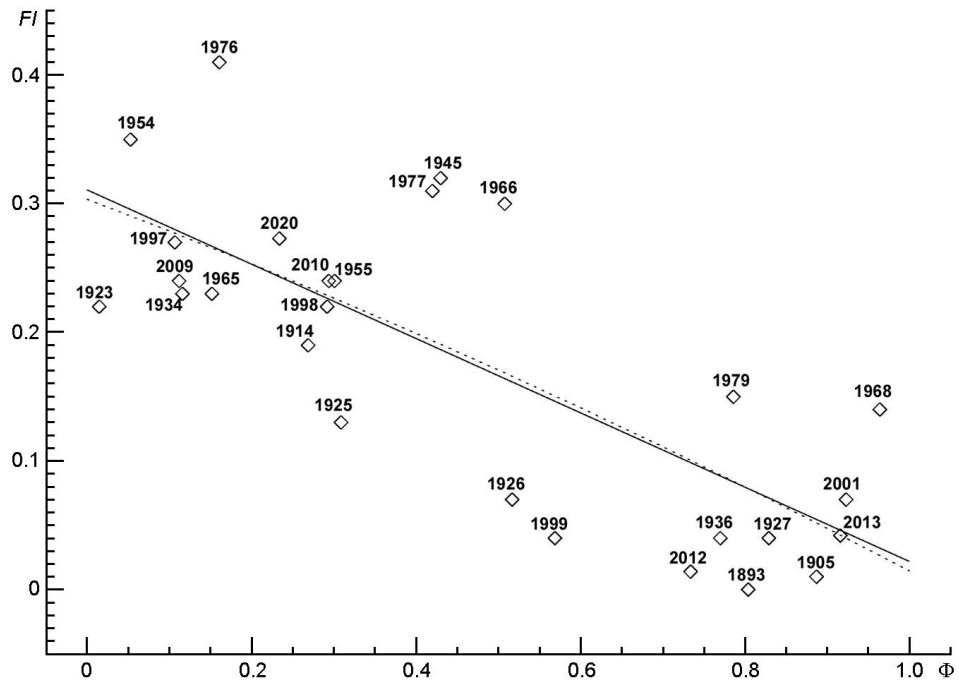


Рис. 3. Індекс стиснутості  $FI$  на фазі росту сонячного циклу ( $0 \leq \Phi \leq 1$ )

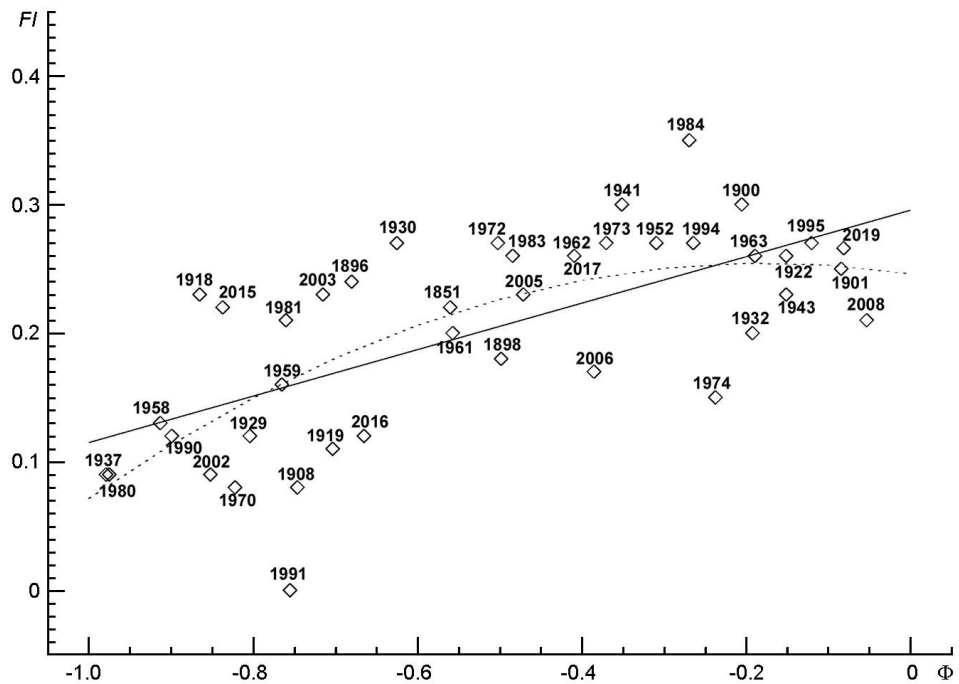


Рис. 4. Індекс стиснутості  $FI$  на фазі спаду сонячного циклу ( $-1 \leq \Phi \leq 0$ )



індексу стиснутості. Саме еволюція магнітного поля Сонця, його зміни протягом циклу активності і визначають як спостережену форму корони, так і число сонячних плям. Як було показано у роботі [16], осьова дипольна складова магнітного поля Сонця, полоїдальне поле, визначає спостережену форму корони протягом більшої частини циклу сонячної активності, а кореляція значень індексу стиснутості сонячної корони із такими параметрами магнітного поля Сонця, як спостережені значення полярного магнітного поля і значення нахилу геоліосферного струмового шару (положення магнітної нейтральної лінії на «поверхні джерела»), є значно сильнішою, ніж кореляція між  $FI$  і числом сонячних плям.

У роботах [13, 20] залежність  $FI$  від  $P$  екстрапольовано кривою 5-го порядку. Ми у даному дослідженні обмежилися кривою 2-го порядку і синусоїдальною кривою і вважаємо, що краще описувати цю залежність періодичною синусоїдальною функцією, коли величини  $FI$  на початку і в кінці циклу є однаковими.

Часто величини індексу стиснутості корони, визначені різними авторами для одного і того ж затемнення, суттєво відрізняються. Наприклад, для затемнення 29 березня 2006 р. розкид значень становить від 0.098 до 0.26 (див. табл. 1 у роботі [16]). Очевидно, це пояснюється головним чином відмінностями екстраполяції початкової лінійної залежності  $(r_e)_{(re)}$  на відстань двох сонячних радіусів, іноді — можливими похибками орієнтації зображення чи суттєвими відмінностями характеристик фотоприймального обладнання, використаного для отримання зображень. Іноді, якщо точки спостережень були рознесені на велику відстань уздовж смуги затемнення, цьому також можуть сприяти певні швидкі зміни форми і структури корони, викликані, наприклад, появою і розвитком коронального викиду маси.

У недавній роботі [1] за результатами дослідження зображень корони під час повного сонячного затемнення 2017 р. в рамках проєкту SATE, коли уздовж усієї смуги затемнення по території США було розміщено 68 однакових телескопів, не було знайдено змін величини індексу стиснутості корони протягом затемнення.

Як відомо, спостережена величина полярного магнітного поля поблизу мінімуму циклу сонячної активності зменшилася майже удвічі від циклів 21 і 22 до циклу 24 (див., наприклад, роботу [14] і <http://wso.stanford.edu/Polar.html>). Майже удвічі зменшилося і відповідне місячне згладжене відносне число сонячних плям у максимумі циклу. У роботі [16] знайдено, що індекс стиснутості, визначений для затемнень поблизу мінімуму активності, має тенденцію бути вищим у тих затемненнях, де полярні поля у мінімумі є вищими (див., наприклад, значення  $FI$  для затемнень 1976, 1977 і 2009 рр. на рис. 3 і для затемнень 1984, 2008 і 2019 рр. на рис. 4). Це, ймовірно, зумовлено тим, що сильніші полярні магнітні поля призводять до більшої еліптичності (чи сплюснутості до екватора) корони і, як наслідок, до вищих значень індексу еліптичності  $FI$ .

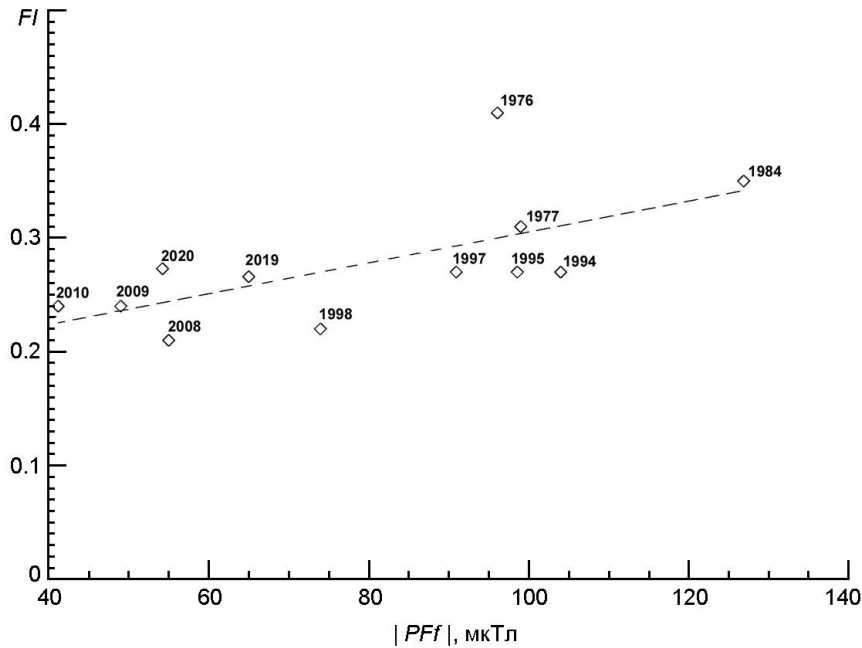


Рис. 5. Значення індексу стиснутості  $FI$  для затемнень, які відбулися поблизу моменту мінімуму ( $T_{\min} \pm 2$  роки) 21...25 циклів активності, і відповідні величини згладженого усередненого полярного магнітного поля Сонця ( $PFf$ )

Вказана тенденція також ілюструється рис. 5, де наведено значення індексу стиснутості для затемнень, які відбулися поблизу мінімумів ( $\pm 2$  роки) 21...25-го циклів активності, і відповідні значення згладженого середнього полярного магнітного поля Сонця, взяті із сайту [www.wso.stanford.edu](http://www.wso.stanford.edu) Сонячної обсерваторії Вілкокса і інтерпольовані на день затемнення. Враховуючи цю тенденцію, можна на основі відомих значень  $FI$  зробити певні висновки про зміну величини полярного магнітного поля Сонця до ери регулярних магнітографічних досліджень.

## ВИСНОВКИ

Виконаний у даній роботі аналіз зв'язку значень індексу фотометричної стиснутості сонячної корони  $FI$  для 69 повних сонячних затемнень 1851...2020 рр. із ревізованими (версія 2.0) параметрами сонячної активності підтверджує відомі закономірності і дозволяє зробити такі висновки.

1. Величина  $FI$  змінюється приблизно від 0.3...0.4 у мінімумі циклу сонячної активності до 0.0...0.1 — у максимумі.

2. Величина  $FI$  помірно корелює із відносним числом сонячних плям. Значення коефіцієнта кореляції між  $FI$  і добовим, місячним і місячним згладженим числом сонячних плям становлять відповідно  $-0.577$  ( $p < 4 \cdot 10^{-7}$ ),  $-0.595$  ( $p < 8 \cdot 10^{-8}$ ) і  $-0.598$  ( $p < 7 \cdot 10^{-8}$ ).

3. Спостерігається дещо вища кореляція між  $FI$  і фазою циклу  $\Phi$ : значення коефіцієнта кореляції становлять  $-0.759$  ( $p < 5 \cdot 10^{-6}$ ) для періоду росту і  $0.660$  ( $p < 2 \cdot 10^{-6}$ ) для періоду спаду активності.

4. Глобальне магнітне поле Сонця (переважно дипольна його складова) визначає спостережену форму сонячної корони, а отже, і значення індексу стиснутості.

## ПОДЯКИ

Автор щиро вдячний І. Е. Васильевій за цінні зауваження до рукопису роботи. Відносні числа сонячних плям взято із сайту Бельгійської Королівської обсерваторії. Згладжені значення полярного магнітного поля Сонця взято із сайту Сонячної обсерваторії Вілкокса.

## REFERENCES

1. Birriel J., Teitloff J. (2022) Solar coronal flattening during the total solar eclipse of August 2017 from CATE data. *JAAVSO*. 50. 1—3.
2. Clette F., Svalgaard L., Vaquero J. M., Cliver E. W. (2014) Revisiting the sunspot number. A 400-year perspective on the solar cycle. *Space Sci. Rev.* 186(1-4). 35—103.
3. Hansky A. (1897) Die totale Sonnenfinsterniss am 8. August 1896. Über die Corona und den Zusammenhang zwischen ihrer Gestaltung und anderen Erscheinungsformen der Sonnentätigkeit. *Bull. Acad. Imper. Sci. St.-Petersbourg*. 6(3). 251—270.
4. Koutchmy S., Altrock R. C., Darvann T. A., Dzubenko N. I., Henry T. W., Kim I., Koutchmy O., Martinez P., Nitschelm C., Rubo G. A., Vial J. (1992) Coronal photometry and analysis of the eclipse corona of July 22, 1990. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 96. 169—182.
5. Koutchmy S., Nitschelm Ch. (1984) Photometric analysis of the June 11, 1983 solar corona. *Astron. and Astrophys.* 138. 161—163.
6. Loucif M. L., Koutchmy S. (1989) Solar cycle variations of coronal structures. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 77. 45—66.
7. Ludendorff H. (1928) Über die Abhängigkeit der form der Sonnenkorona von der Sonnenfleckenhäufigkeit *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse.* 16. 185—214.
8. Ludendorff H. (1934) Weitere Untersuchungen über die Änderungen der Form der Sonnenkorona *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse.* 16. 200—220.
9. Marková E., Belik M. (1995) Structure of the white-light corona on the November 3rd, 1994 eclipse. *Revista de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia.* 69. 37—40.
10. Marková E., Belik M., Sýkora T., Šolc M., Šolc J., Šmelcer L. (1996) Structure of the white-light corona on October 24, 1995 eclipse. *Romanian. Astron. J. Suppl.* 6. 17—20.
11. Marková E., Bělík M., Rušín V., Kotrč P. (1999) Structure and shape of the white-light corona during March 9, 1997 and February 26, 1998 eclipses. *Contribs Astron. Observ. Skalnaté Pleso.* 28. 210—215.
12. Neagamvala K. D. (1902) *Publs Maharaja Takhtasingji Obs., Poona.* 1. 73.
13. Pasachoff J. M., Rušín V. (2022) White-light coronal imaging at the 21 August 2017 total solar eclipse. *Solar Phys.* 297. 28.
14. Petrie G. J. D. (2015) Solar magnetism in the polar regions. *Living Rev. Solar Phys.* 12. 5.

15. Pishkalo M. I. (2011) Flattening index of the solar corona and the solar cycle. *Solar Phys.* 270. 347—362.
16. Pishkalo M. I. (2022) Flattening index of the solar corona and the Sun's magnetic field. *Solar Phys.* 297. 40.
17. Pishkalo M. I., Baransky A. R. (2009) Solar corona during the total solar eclipse on August 1, 2008. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 25(6). 315—318.
18. Pishkalo M. I., Sadovenko E. V. (2008) Structure and shape of the solar corona during the total solar eclipse on March 29, 2006. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 24(1). 44—50.
19. Ranyard A. C. (1879) Photographs and drawings of the corona. *Mem. Royal Astron. Soc.* 41. 483—768.
20. Rušin V. (2017) The flattening index of the eclipse white-light corona and magnetic fields. *Solar Phys.* 292. 24.
21. Van de Hulst H. C. (1953) The chromosphere and the corona. In: *The Sun*, G. P. Kuiper (ed.), Chicago, the University of Chicago Press, Sec. 18.1.
22. Vanyarkha E. S., Vanyarkha N. Ya., Gulyaev R. A. (1993) A new approach to analyzing the photometric properties of the solar corona. *Astron. Rep.* 37. 639—642.
23. Vasilieva I. E., Pishkalo M. I. (2021) History of sunspot research and forecast of the maximum of solar cycle 25. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 37(4). 200—211.
24. Waldmeier M. (1951) Die Sonnenkorona vom 28. Juli 1851. *Z. Astrophys.* 30. 1—7.
25. Waldmeier M., Arber H., Bachmann H. (1957) Die totale Sonnenfinsternis und die Korona vom 20. Juni 1955. *Z. Astrophys.* 42. 156—206.
26. Waldmeier M., Weber S. E. (1979) The solar eclipse of February 26, 1979. *Astron. Mitt. Eidg. Sternwarte Zürich.* 374. 1—12.

*M. I. Pishkalo*

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

#### PHOTOMETRIC FLATTENING INDEX OF THE SOLAR CORONA IN THE SOLAR CYCLE

The photometric flattening index as a quantitative characteristic of the shape of the solar corona observed during a total solar eclipse was proposed by Ludendorff in the 1930s. The work collected the values of the flattening index for 69 total solar eclipses in 1851...2020 and investigated their relationship with the parameters of the solar activity cycle. The value of the flattening index varies from approximately 0.3...0.4 at the cycle minimum to 0.0...0.1 at the cycle maximum. The flattening index correlates with the relative sunspot numbers and the phase of the solar cycle. The correlation coefficients between the flattening index and the daily, monthly and monthly smoothed sunspot number are  $-0.577$  ( $p < 4 \cdot 10^{-7}$ ),  $-0.595$  ( $p < 8 \cdot 10^{-8}$ ) and  $-0.598$  ( $p < 7 \cdot 10^{-8}$ ), respectively. The correlation coefficients between the flattening index and the phase of the solar cycle for the rising and declining phases of the cycle are  $-0.759$  ( $p < 5 \cdot 10^{-6}$ ) and  $0.660$  ( $p < 2 \cdot 10^{-6}$ ), respectively. The observed shape of the solar corona, in particular the value of the flattening index, is determined by the global magnetic field of the Sun, mainly by its dipole component.

**Keywords:** Sun, solar corona, solar cycle.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2022

Після доопрацювання 12.12.2022

Прийнята до друку 17.02.2023