

УДК 523.947

### **Н. И. Пишкало**

Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,  
ул. Обсерваторная 3, г. Киев-53, 04053  
pish@observ.univ.kiev.ua

### **Об индексе геометрического сжатия солнечной короны**

*Собраны значения индекса геометрического сжатия  $H$  (по Никольскому) солнечной короны для 77 полных солнечных затмений 1860—2010 гг. Исследована зависимость индекса  $H$  от числа Вольфа и от фазы солнечной активности. Получено, что значения индекса  $H$  заключены в пределах 0.90—2.50 и антикоррелируют с солнечной активностью: максимальные значения наблюдаются в минимуме солнечной активности, а минимальные — в максимуме. Также исследована взаимосвязь индекса  $H$  с индексом фотометрического сжатия солнечной короны  $a+b$  по Людendorffу и с протяженностью полярных лучевых систем вдоль лимба.*

*ПРО ІНДЕКС ГЕОМЕТРИЧНОЇ СТИСНУТОСТІ СОНЯЧНОЇ КОРОНИ, Пішкало М. І. — Зібрані значення індексу геометричної стиснутості  $H$  (за Нікольським) сонячної корони для 77 повних сонячних затемнень 1860—2010 рр. Досліджено залежність індексу  $H$  від числа Вольфа і від фази сонячної активності. Отримано, що значення індексу  $H$  лежать у межах 0.90—2.50 і антикорелюють із сонячною активністю: максимальні значення спостерігаються у мінімумі сонячної активності, а мінімальні — у максимумі. Досліджено також взаємозв'язок індексу  $H$  з індексом фотометричної стиснутості корони  $a+b$  за Людendorffом і з протяжністю полярних променевих систем уздовж лімба.*

*ON GEOMETRICAL FLATTENING INDEX OF THE SOLAR CORONA, by Pishkalo M. I. — We compiled 77 values of the geometrical flattening index  $H$  (according to Nikolsky) of the solar corona for total solar eclipses from 1860 to 2010. It is found that the index  $H$  takes values from 0.9 to 2.5 and anti-correlates with solar activity: maximal values are observed in a cycle minimum and minimal values are seen in a cycle maximum. In addition, we investigated a correlation between the  $H$  index and photometrical flattening index  $a+b$  according to Ludendorff and extension of polar ray systems.*

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, структура и форма солнечной короны изменяются с солнечным циклом. В минимуме активности в структуре короны выделяются два луча-стримера в экваториальных широтах, ориентированные вдоль радиуса, и системы полярных лучей («плюмов») в полярных широтах. В максимуме активности многочисленные яркие лучи расположены по всему лимбу, плюмы часто не наблюдаются, а шлемовидные лучи-стримеры располагаются в полярных широтах. Корона выглядит «округлой» в максимуме активности и прижатой к экватору в минимуме активности.

Впервые на изменение формы, структуры и яркости солнечной короны с циклом активности было указано Ганским в 1897 г. в работе [6] на основании изучения зарисовок и снимков короны во время 20 затмений 1842—1896 гг. Отметим, что детальное описание формы и структуры солнечной короны, наблюдаемой во время полных солнечных затмений 1870—1961 гг., можно найти, например, в монографиях Бугославской [1] и С. К. Всехсвятского и др. [4]. Каталог структурных форм короны в работе [4], составленный Несмяновичем и содержащий структурные рисунки короны во время 38 затмений, и сегодня является наиболее представительным. В более поздней работе [7] приведены структурные рисунки короны во время 19 затмений 1936—1984 гг.

Людендорф в работах [8, 9] предложил для количественной характеристики формы солнечной короны, наблюдаемой во время полных солнечных затмений, использовать индекс фотометрического сжатия короны, который определяется по протяженности изофот короны в полярных и экваториальных широтах. Индекс фотометрического сжатия короны изменяется примерно от 0.4 в максимуме активности до 0.0 в минимуме активности [10]. Для его нахождения необходима детальная фотометрия изображений короны и построение изофот внутренней короны. Этот индекс широко используется до настоящего времени.

Никольским в 1956 г. [2] был предложен другой количественный индекс — индекс геометрического сжатия солнечной короны  $H$ , рассчитываемый на основании геометрических характеристик структур в короне. Выражение для  $H$  имеет вид

$$H = \frac{N + S}{2} \frac{1}{n} \left( \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

где  $N$  и  $S$  — протяженность вдоль лимба северной и южной полярных лучевых систем (плюмов),  $n$  — количество опальных лучей (стримеров),  $\theta$  — гелиографические широты оснований этих лучей,  $\alpha$  — угол наклона лучей к экватору. Отметим, что каждая из составляющих индекса геометрического сжатия ( $N$ ,  $S$ , или  $\theta$ )

может рассматриваться как отдельная количественная характеристика короны. В работе [2] были определены значения индекса геометрического сжатия короны для 23 затмений. Позже Несмянович [4] определил значения данного индекса для 38 затмений и многие из этих значений не совпали со значениями, полученными Г. М. Никольским для одних и тех же затмений. Хецуриани в работе [5] рассчитал значения индекса  $H$  для четырех затмений 1968—1973 гг.

В данной работе нами собраны значения индекса геометрического сжатия солнечной короны, наблюдаемой во время полных солнечных затмений 1860—2010 гг., и исследована зависимость данного индекса от уровня солнечной активности.

### ИНДЕКС ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СЖАТИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ И СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

Нами собраны значения индекса геометрического сжатия солнечной короны для 77 полных солнечных затмений 1860—2010 гг. Из значений индекса  $H$  мы выбрали более позднее по времени значение, полученное Несмяновичем. Используя изображения и структурные рисунки короны, найденные в разных источниках, мы рассчитали значения индекса  $H$  для 31 затмения. В таблице приведены значения  $H$ , протяженности ( $\alpha = \alpha_N + \alpha_S$ , в градусах) вдоль лимба полярных лучевых систем («плюмов») и индекса  $a + b$  фотометрического сжатия короны по Людендорфу. Значения  $a + b$  взяты из работы [10], по одному для каждого затмения, наиболее «правильные» с нашей точки зрения; для затмения 3 ноября 1994 г. значение индекса  $a + b$  уточнено в данном исследовании.

Из таблицы следует, что наблюдаемые значения индекса  $H$  заключены в пределах 0.90—2.50. Даже для короны 30 июня 1954 г., которая была близка к идеально-минимальной короне, значение  $H$  составляет 2.03 согласно измерениям Несмяновича [4] и 2.42 — согласно Г. М. Никольскому [2], тогда как теоретически для идеально-минимальной или «сверхминимальной» короны  $H = 3$ . Следует отметить, что определение значений индекса  $H$ , как и индекса  $a + b$  [10], носит в большой мере субъективный характер, поскольку зависит от количества выбранных для измерения лучей, их характеристик, качества изображения короны.

На рис. 1 показана зависимость индекса геометрического сжатия солнечной короны от ежедневного ( $W_d$ ) и месячного ( $W_m$ ) числа Вольфа, взятых на сайте <http://sidc.oma.be>. Как видим, в среднем значение индекса  $H$  является максимальным в минимуме активности, далее с увеличением числа Вольфа оно уменьшается согласно соотношениям

$$\begin{aligned} H &= 1.773 - 0.005W_d, \\ H &= 1.839 - 0.006W_m. \end{aligned}$$

**Значения индекса  $H$  геометрического сжатия солнечной короны, протяженности  $L$  полярных лучевых систем и индекса  $a + b$  фотометрического сжатия короны для полных солнечных затмений 1860—2010 гг.**

Затмение	$H$	$\Pi$ , град	$a + b$	Затмение	$H$	$\Pi$ , град	$a + b$
18.07.1860	1.00 [2]	55*		25.02.1952	1.49 [4]	99 [7]	0.29
29.08.1867	2.50 [2]	165*		30.06.1954	2.03 [4]	135 [7]	0.39
18.08.1868	1.78*	107*		20.06.1955	1.84 [4]	118 [4]	0.24
07.08.1869	1.33 [2]	95*		12.10.1958	1.24*	49*	0.07
22.12.1870	0.99 [4]	24 [4]		02.10.1959	1.35*	76 [7]	0.14
12.12.1871	1.11 [4]	44 [4]		15.02.1961	1.50 [4]	43 [7]	0.17
06.04.1875	1.44 [4]	90 [4]		05.02.1962	1.50*	60*	0.28
29.07.1878	1.95 [4]	146 [4]		20.07.1963	1.65*	108*	0.29
11.01.1880	1.65 [2]	103*		30.05.1965	1.95*	112 [7]	0.24
06.05.1883	1.04 [4]	16 [4]		12.11.1966	1.14*	45 [7]	0.33
29.08.1886	1.48 [4]	84 [4]		22.09.1968	1.10 [5]	22 [7]	0.06
18.08.1887	1.61 [4]	64 [4]		07.03.1970	0.90 [5]	24 [7]	0.00
01.01.1889	1.81 [4]	136 [4]		10.07.1972	1.15 [5]	41 [7]	0.23
21.12.1889	1.94 [4]	132 [4]		30.06.1973	1.48 [5]	114 [7]	0.25
16.04.1893	1.27 [4]	60 [4]	0.00	20.06.1974	1.60*	124*	0.16
08.08.1896	1.50 [4]	72 [4]	0.24	23.10.1976	1.94*	111 [7]	0.36
21.01.1898	1.56 [4]	100 [4]	0.18	13.10.1977	1.87*	78*	0.24
28.05.1900	1.73 [4]	116 [4]	0.30	26.02.1979	1.07*	36 [7]	0.15
17.05.1901	1.78 [4]	118 [4]	0.25	16.02.1980	1.06*	25 [7]	0.03
30.08.1905	1.13 [4]	50 [4]	0.01	31.07.1981	1.29*	78 [7]	0.20
30.01.1908	1.26 [4]	60 [4]	0.08	11.06.1983	1.26*	44 [7]	0.26
08.05.1910	1.66 [4]	108 [4]		22.09.1984	1.51*	83 [7]	0.35
28.04.1911	1.87 [4]	144 [4]	0.04	18.03.1988	1.47*	82*	
21.08.1914	1.76 [4]	96 [4]	0.19	22.07.1990	0.98*	0*	0.12
08.02.1918	1.36 [4]	80 [4]	0.23	11.07.1991	0.97*	18*	0.00
29.05.1919	1.45 [4]	94 [4]		03.11.1994	2.07*	127*	0.24*
20.09.1922	1.68 [4]	112 [4]	0.26	24.10.1995	2.35*	175*	0.27
10.09.1923	1.92 [4]	132 [4]	0.22	09.03.1997	1.95*	113*	0.27
25.01.1925	1.70 [4]	100 [4]	0.13	26.02.1998	1.81*	105*	0.22
14.01.1926	1.06 [4]	0 [4]	0.07	11.08.1999	1.07*	14*	0.04
29.06.1927	1.07 [4]	20 [4]	0.04	02.06.2001	1.13*	34*	0.07
09.05.1929	1.37 [4]	70 [4]	0.12	04.12.2002	1.16*	60*	0.09
28.04.1930	1.62 [4]	110 [4]	0.27	23.11.2003	1.45*	61*	
31.08.1932	1.79 [4]	130 [4]	0.20	08.04.2005	1.58*	86*	
14.02.1934	1.93 [4]	132 [4]	0.23	29.03.2006	1.59*	92*	0.17
19.06.1936	1.18 [4]	38 [7]	0.06	01.08.2008	1.75*	110*	0.21
08.06.1937	1.06 [4]	8 [7]	0.09	22.07.2009	1.88*	94*	0.24
21.09.1941	1.49 [4]	88 [4]	0.30	11.07.2010	1.52*	62*	0.24
09.07.1945	1.75 [4]	114 [4]	0.32				

\* — значение получено в данной работе

Зависимость индекса геометрического сжатия от фазы солнечной активности показана на рис. 2. Фазы солнечной активности  $\Phi$  и  $P$  рассчитывалась как

$$\frac{T_{\text{зат}} - T_{\text{мин}}}{|T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}|}$$

Рис. 1. Линейные зависимости индекса  $H$  геометрического сжатия солнечной короны от среднесуточного ( $W_d$ ) и среднемесячного ( $W_m$ ) чисел Вольфа

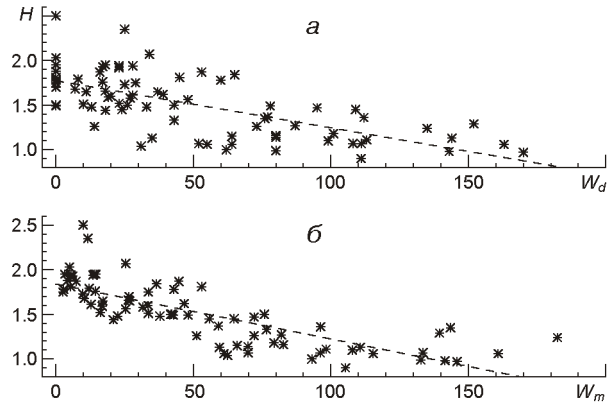
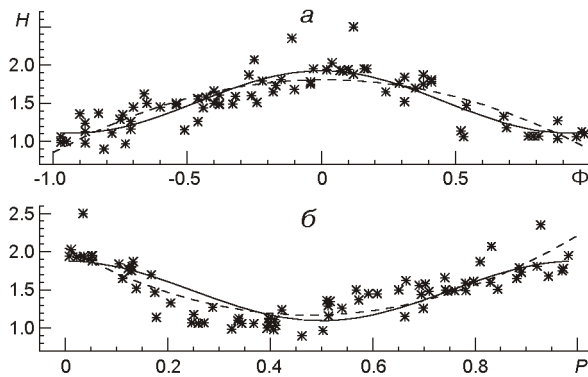


Рис. 2. Зависимость индекса  $H$  геометрического сжатия солнечной короны от фазы солнечной активности  $\Phi$  (а) и  $P$  (б). Штриховая линия — квадратичная аппроксимация точек, сплошная линия — аппроксимация гармонической функцией



и

$$P = \frac{T_{\text{зат}}}{T_{\text{мин2}}} \frac{T_{\text{мин1}}}{T_{\text{мин1}}},$$

где  $T_{\text{зат}}$  — время полного солнечного затмения,  $T_{\text{макс}}$  и  $T_{\text{мин}}$  — время максимума и минимума активности, соседние с  $T_{\text{зат}}$ ,  $T_{\text{мин1}}$  и  $T_{\text{мин2}}$  — минимумы в начале и в конце цикла. Минимумы и максимумы солнечной активности были рассчитаны как экстремумы дважды сглаженных скользящим усреднением по 13 точкам месячных чисел Вольфа. Для максимума 24-го цикла солнечной активности было использовано прогнозируемое  $T_{\text{макс}} = 1914.1$  согласно данным работы [3]. Штриховая линия представляет квадратичную аппроксимацию точек, сплошная — аппроксимацию гармонической функцией. Для фазы  $\Phi$  они описываются уравнениями

$$H = 1.809 - 0.021 \Phi + 0.935 \Phi^2,$$

$$H = 1.518 - 0.407 \cos(3.406 \Phi),$$

для фазы  $P$  — уравнениями

$$H = 2.048 - 3.664P + 3.828P^2,$$

$$H = 1.489 - 0.391 \cos(2P).$$

Зависимость  $H(\Phi)$  не имеет сдвига по фазе, она примерно симметрична относительно прямой  $\Phi = 0$ . На ветви роста цикла активности

уменьшение  $H$  происходит «быстрее», нежели его рост на ветви спада цикла. Отметим, что такое поведение в цикле активности характерно для большинства явлений на Солнце (и их характеристик).

Зависимости индекса  $H$  геометрического сжатия солнечной короны от чисел Вольфа и от фазы солнечной активности похожи на аналогичные зависимости для индекса фотометрического сжатия короны  $a + b$ , приведенные в работе [10].

### СВЯЗЬ ИНДЕКСА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СЖАТИЯ С ИНДЕКСОМ ЛЮДЕНДОРФА

Для исследования взаимосвязи индекса  $H$  геометрического сжатия и индекса  $a + b$  фотометрического сжатия солнечной короны были отобраны те затмения, для которых известны оба эти индекса. Таких затмений 57. На рис. 3, *а* показана зависимость  $H$  от  $a + b$ . Видно, что с увеличением одного индекса увеличивается и другой; коэффициент корреляции составляет 0.69. Аппроксимация линейной зависимостью представлена штриховой линией

$$H = 1.077 + 2.216(a + b).$$

На рис. 3, *б* представлена зависимость индекса  $H$  от суммарной протяженности  $\Pi$  полярных лучевых систем вдоль лимба. Данные ве-

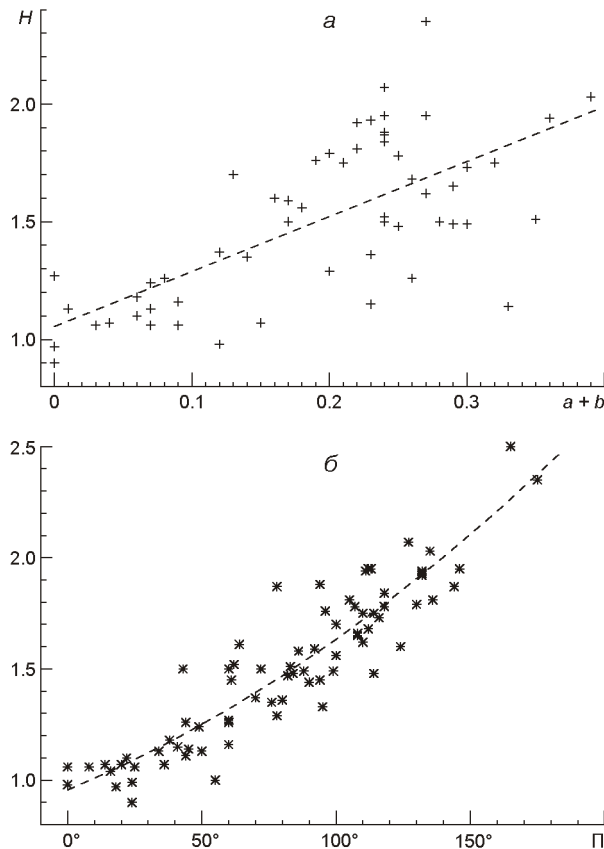


Рис. 3. Зависимости индекса  $H$  геометрического сжатия солнечной короны от индекса  $a + b$  фотометрического сжатия (*а*) и от протяженности  $\Pi$  полярных лучевых систем (*б*). Штриховые линии — линейная и квадратичная аппроксимация точек

личины хорошо коррелируют между собой (коэффициент корреляции составляет 0.91); квадратичная аппроксимация может быть представлена уравнением  $H = 0.956 - 0.005 \Phi + 1.771 \Phi^2$ . Впрочем, этот результат является ожидаемым, поскольку  $H$  входит в выражение для  $H$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индекс геометрического сжатия солнечной короны, введенный Г. М. Никольским в 1956 г., является одним из количественных индексов для характеристики формы и структуры короны. Нами собраны значения  $H$  для 77 затмений 1860—2010 гг., причем для 31 затмения значения индекса  $H$  получено впервые. Наблюдаемые значения  $H$  заключены в пределах 0.90—2.50; меньшие значения соответствуют максимуму солнечной активности и наоборот, большие — минимуму активности. Зависимость  $H(\Phi)$  примерно симметрична относительно прямой  $\Phi = 0$ . На ветви роста цикла активности уменьшение  $H$  происходит «быстрее», нежели его рост на ветви спада цикла. Индекс геометрического сжатия  $H$  коррелирует с индексом фотометрического сжатия солнечной короны по Людendorffу  $a + b$  ( $r = 0.69$ ) и с протяженностью полярных лучевых систем вдоль лимба ( $r = 0.91$ ).

1. Бугославская Е. Я. Структура солнечной короны // Тр. Гос. астроном. ин-та им. П. К. Штернберга.—1950.—**19**.—С. 3—188.
2. Никольский Г. М. О форме солнечной короны // Астрон. журн.—1956.—**33**, № 1.—С. 84—86.
3. Пишкало Н. И. Прогноз максимума 24-го цикла солнечной активности // Космічна наука і технологія.—2010.—**16**, № 3.—С. 32—38.
4. Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве / Под ред. проф. С. К. Всехсвятского. — Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1965.—С. 73—117.
5. Хецуриани Ц. С. Солнечная корона 30 июня 1973 г. // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1975.—**46**.—С. 177—184.
6. Hansky A. Die totale Sonnenfinsterniss am 8. August 1896 // Bull. Acad. Imper. Sci. St.-Petersbourg.—1897.—**6**, № 3.—P. 251—270.
7. Loucif M. L., Koutchmy S. Solar cycle variations of coronal structures // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1989.—**77**.—P. 45—66.
8. Ludendorff H. Über die Abhängigkeit der Form der Sonnenkorona von der Sonnenfleckenhäufigkeit // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse.—1928.—**16**.—P. 185—214.
9. Ludendorff H. Weitere Untersuchungen über die Änderungen der Form der Sonnenkorona // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse.—1934.—**16**.—P. 200—220.
10. Pishkalo M. I. Flattening index of the solar corona and the solar cycle // Solar Phys.—2011.—**270**.—P. 347—362.—DOI: 10.1007/s11207-011-9749-y

Поступила в редакцию 07.07.11