

УДК 523.98

**О. С. Гопасюк**

Научно-исследовательский институт Крымская астрофизическая обсерватория  
98409 Крым, Научный

### **Крутильные колебания тени и полутени солнечных пятен**

*Изучены крутильные колебания семи одиночных пятен по наблюдениям продольного магнитного поля и поля лучевых скоростей в фотосферной линии Fe I 525.3 нм. Периоды колебаний в тени и полутени составили 2.2—7.1 и 3.3—7.7 сут соответственно. Пятна с большей гелиоширотой имеют больший период колебаний и меньшую осевую напряженность магнитного поля. Период и амплитуда колебаний полутени увеличиваются с увеличением периода и амплитуды колебаний тени пятна. Полученные результаты могут свидетельствовать о едином механизме крутильных колебаний тени и полутени одиночных пятен и связи этих колебаний с дифференциальным вращением Солнца.*

*КРУТИЛЬНІ КОЛИВАННЯ ТІНІ І ПІВТІНІ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ, Гопасюк О. С. — Вивчено крутильні коливання семи одиночних плям за спостереженнями поздовжнього магнітного поля та поля променевих швидкостей у фотосферній лінії Fe I 525.3 нм. Періоди коливань у тіні та півтіні склали 2.2—7.1 та 3.3—7.7 доби відповідно. Плями з більшою геліоширотою показують більший період коливань та меншу осьову напруженість магнітного поля. Період і амплітуда коливань півтіні збільшуються із збільшенням періоду і амплітуди коливань тіні плями. Отримані результати можуть свідчити про єдиний механізм крутильних коливань тіні і півтіні одиночних плям і зв'язок цих коливань із диференціальним обертанням Сонця.*

*TORSIONAL OSCILLATIONS OF UMBRA AND PENUMBRA OF SUNSPOTS, by Gopasyuk O. S. — The torsional oscillations of seven single sunspots were investigated on observations of longitudinal magnetic field and velocities field in the photospheric line Fe I 525.3 nm. The periods of umbra and penumbra oscillations were 2.2—7.1 and 3.3—7.7 days, respectively. The sunspots at a greater solar latitude show a longer period of oscillations and smaller axial strength of magnetic field. The period and*

*amplitude of the penumbra oscillations increase with the growth of period and amplitude of the sunspot umbra oscillations. The obtained results can be an evidence for the unitary mechanism of the torsional oscillations of umbra and penumbra of single sunspots and the connection of these oscillations with the differential rotation of the Sun.*

Проблема вращения пятен вокруг своего центра остается до сих пор актуальной. Связано это с тем, что данные о вращении пятен несут важную информацию, необходимую для понимания природы нестационарных процессов на Солнце. Изучение вращения пятен проводилось по фотогелиограммам [3, 5, 10, 11, 14, 17, 18, 23] и по данным наблюдений лучевых скоростей [2, 4, 5, 9, 12, 15, 19—22]. На основании наблюдений лучевых скоростей, фотогелиограмм и изображений активных областей в H $\alpha$  были обнаружены крутильные колебания пятен со средним периодом около 6 сут [5, 20]. Дальнейшие исследования [10] показали, что крутильные колебания не уникальное, а скорее характерное состояние пятен.

Определение вращения пятен по лучевым скоростям — задача чрезвычайно трудоемкая [4, 21, 22]. Решение этой задачи существенно упростилось с созданием метода восстановления вектора поля по его наблюдаемой лучевой составляющей [7]. Применение этого метода расширило возможности исследования вращения пятен [2, 19].

Крутильные колебания в плазме с магнитным полем обязаны силам натяжения силовых линий магнитного поля, стремящимся вернуть смещенную массу газа в исходное состояние. В результате возмущение распространяется вдоль магнитного поля со скоростью волны Альвена. Магнитное поле в тени и полутени пятна имеет различную ориентацию: в полутени магнитное поле преимущественно горизонтальное, в тени — в основном вертикальное. Данное обстоятельство требует, чтобы изучение крутильных колебаний в тени и полутени проводилось отдельно. Такие исследования были выполнены для тени шести [2] и полутени пяти [19] одиночных пятен.

Ниже мы продолжаем исследования [2, 19] крутильных колебаний одиночных пятен по наблюдениям продольного магнитного поля и полю лучевых скоростей в фотосферной линии.

## **НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ПЯТЕН**

Данные наблюдений продольного магнитного поля, лучевых скоростей и яркостей семи одиночных пятен в фотосферной линии Fe I

525.3 нм были получены на Башенном солнечном телескопе Крымской астрофизической обсерватории. В 1978 г. наблюдения проводились с помощью двойного магнитографа [13], а в 2000 г. — на быстродействующем цифровом магнитографе [8]. Описание условий наблюдений приведено в работах [2, 19].

Исследуемые пятна наблюдались на фазах роста 21-го и 23-го солнечных циклов. Гелиографические координаты (долгота и широта)

Таблица 1. Данные наблюдений

Дата	Долгота	Широта	$R_u$ ( $I=0.7$ )	$R_p$ ( $I=0.9$ )
13—18 сентября 1978 г.	E18—W45	N16	15.2	19.7
15—22 сентября 1978 г.	E39—W53	N28	16.8	22.9
13—20 сентября 1978 г.	E54—W36	N37	10.1	14.1
8—12 августа 2000 г.	E06—W47	N18	13.5	18.0
18—22 августа 2000 г.	E27—W25	S06	12.2	18.7
18—21 августа 2000 г.	E20—W20	N13	9.5	14.5
22—25 августа 2000 г.	E09—W31	S10	14.3	20.8

каждого пятна, радиусы  $R_u$  тени и  $R_p$  полутени, в пределах которых были исследованы колебания, представлены в табл. 1.

Определение границ и средних положений тени и полутени пятен по картам яркости  $I$ , выраженным в единицах средней яркости невозмущенного фона. На основании исследований [16] границы тени соответствовали яркости  $I = 0.7$ , полутени —  $0.7 < I = 0.9$ . Была введена новая система координат, начало которой совмещено с центром пятна и положительной осью  $OX$ , направленной на центр солнечного диска. Ось  $OZ$  направлена вертикально вверх. Новая система и система координат исходной карты связаны между собой соотношениями преобразования координат. Новая система координат разделила площадь пятна на четыре квадранта. Наличие осевой симметрии магнитного поля и поля скоростей позволяет восстановить все три составляющие обоих векторов: вертикальную ( $H_z, V_z$ ), радиальную ( $H_r, V_r$ ) и азимутальную ( $H_f, V_f$ ) по полю их лучевой составляющей [7]. Здесь приведем лишь окончательные выражения для определения каждой из составляющих векторов:

$$\bar{H}_z = \frac{1}{\cos} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_{\parallel n}, \quad (1)$$

$$\bar{H}_r = \frac{1}{2 \sin} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_1, N_4} H_{\parallel n} - \sum_{n=1}^{N_2, N_3} H_{\parallel n}, \quad (2)$$

$$\bar{H}_f = \frac{1}{2 \sin} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_3, N_4} H_{\parallel n} - \sum_{n=1}^{N_1, N_2} H_{\parallel n}, \quad (3)$$

где  $N$  — полное число данных в четырех квадрантах тени (полутени),  $N_i$  — число данных в  $i$ -м ( $i=1...4$ ) квадранте (после поворота системы координат). Отсчет квадрантов ведется против часовой стрелки, начиная от оси, соединяющей центр пятна с центром солнечного диска [7],  $\theta$  — гелиоцентрический угол.

Выражения, определяющие все три составляющие вектора магнитного поля и вектора скорости, одни и те же. Таким образом, оба вектора определены на основании лучевых составляющих по одному методу, что очень важно для исследований крутильных колебаний.

Для каждой записи продольного магнитного поля и лучевой скорости на основании выражений (1)—(3) были вычислены все три составляющие обоих векторов отдельно для тени и полутени пятна. При вычислениях был учтен наклон магнитной оси этих пятен к западу на  $10^\circ$  [1]. Если в течение суток проводилось несколько серий наблюдений, то брались средние значения составляющих за сутки. Данные вычислений для каждого пятна (тени и полутени отдельно) каждой составляющей обоих векторов были представлены в зависимости от времени  $t$ . За начало отсчета принято время первого наблюдения. Каждая временная зависимость описывается синусоидой, подобранной методом наименьших квадратов

$$y = A \sin \left( \frac{2\pi}{P} t + \phi \right), \quad (4)$$

где  $A$  — амплитуда,  $P$  — период,  $\phi$  — начальная фаза колебания. Примеры аппроксимации временных зависимостей синусоидой для тени и полутени пятна, находившегося на широте N13, показаны на рис. 1.

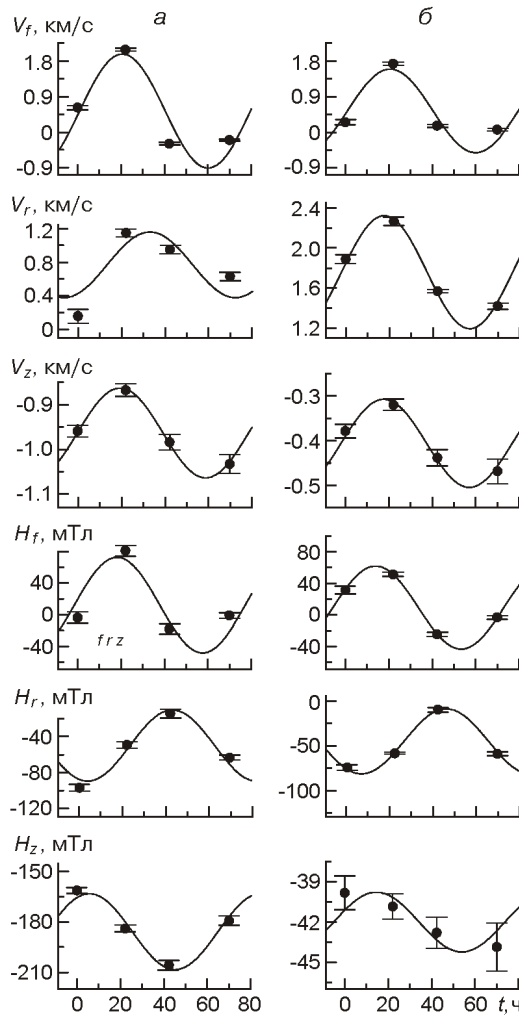


Рис. 1. Временные зависимости составляющих векторов магнитного поля и скорости в тени (а) и полутени (б) пятна, находившегося на широте N 13

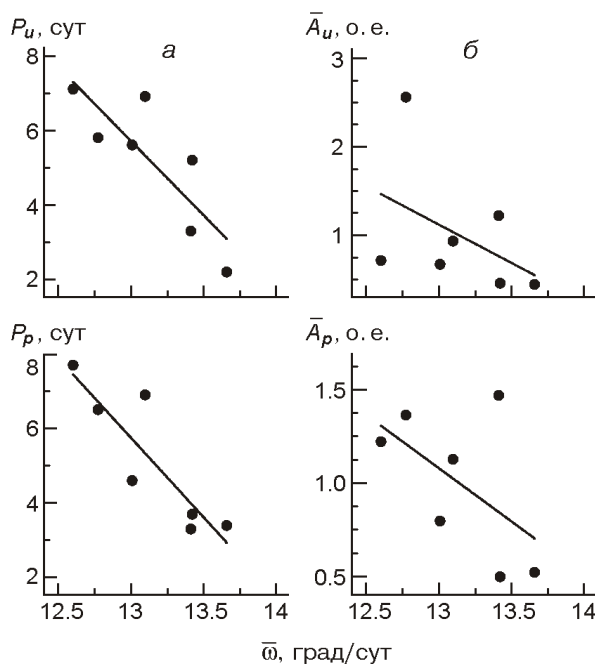
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Результаты исследований крутильных колебаний семи одиночных пятен собраны в табл. 2. Для каждого пятна (тени и полутени) на основании выражения (4) были определены период, амплитуда и начальная фаза колебаний (табл. 2). Вычислены средние по площади тени и полутени пятна вертикальные составляющие  $H_l$  магнитного поля, определена средняя (за дни наблюдений пятна) сидерическая скорость  $\bar{\omega}$  вращения Солнца. Скорость  $\bar{\omega}$  определялась по данным измерений координат центра тени пятна с последующей аппроксимацией изменений долготы от дня ко дню линейной зависимостью методом наименьших квадратов. Средняя сидерическая скорость  $\bar{\omega}$  перемещения пятна по диску Солнца приведена в табл. 2.

Исследования крутильных колебаний семи одиночных пятен показали, что период колебаний в тени пятна составлял 2.2—7.1 сут, в полутени — 3.3—7.7 сут. Периоды колебаний тени и полутени уменьшаются с увеличением угловой скорости вращения Солнца, вычисленной по этим пятнам (рис. 2, а). Амплитуда колебаний каждой составляющей обоих векторов (отдельно для тени и полутени пятна) была приведена к своей средней по семи пятнам составляющей и вычислена средняя амплитуда из шести составляющих для каждого пятна. Значения вычисленных амплитуд в зависимости от угловой скорости вращения Солнца приведены на рис. 2, б. Разброс данных значительный, однако видно, что амплитуда колебаний уменьшается в среднем с увеличением угловой скорости вращения Солнца.

Между средней осевой напряженностью  $H_l$  магнитного поля пятна и периодом  $P$  крутильных колебаний имеется связь: чем меньше напряженность осевого магнитного поля в пятне, тем больше период

Рис. 2. Изменение периодов крутильных колебаний тени ( $P_u$ ) и полутени ( $P_p$ ) пятен (а), а также изменение средних безразмерных амплитуд крутильных колебаний тени ( $\bar{A}_u$ ) и полутени ( $\bar{A}_p$ ) пятен (б) в зависимости от угловой скорости  $\bar{\omega}$  вращения Солнца, определенной по этим же пятнам



**Таблица 2. Данные наблюдений пятен и характеристики крутильных колебаний составляющих векторов магнитного поля и скорости**

	S06		S10		N13		N16		N18		N28		N37	
	тень	полутень	тень	полутень	тень	полутень	тень	полутень	тень	полутень	тень	полутень	тень	полутень
Широта	13.66		13.42		13.41		13.10		13.01		12.77		12.60	
$-$ , °сут	13.66		13.42		13.41		13.10		13.01		12.77		12.60	
$H_b$ , мТл	189.2	42.1	181.0	38.3	182.6	43.4	134.9	38.0	150.9	32.2	148.0	37.4	123.8	31.7
$P$ , сут	2.2	3.4	5.2	3.7	3.3	3.3	6.9	6.9	5.6	4.6	5.2	6.5	7.1	7.7
$H_f$ $A$ , мТл	16.5	4.8	31.8	8.9	60.5	52.5	32.0	21.8	37.8	20.8	104.53	37.2	33.0	23.3
, ч	8.4	20.8	0.0	0	1.2	6.2	13.2	7.9	4.3	8.9	110.0	130.0	153.9	153.4
$H_r$ $A$ , мТл	12.0	11.3	7.5	4.2	39.7	36.2	16.9	22.0	17.1	5.0	103.51	18.8	30.2	19.3
, ч	17.6	13.0	20.0	49.7	55.0	52.5	18.5	105.6	109.2	108.0	99.0	60.0	99.9	112.1
$H_z$ $A$ , мТл	16.2	1.5	10.6	3.5	22.6	2.2	31.0	6.8	18.8	3.1	87.6	28.0	32.0	9.9
, ч	9.2	31.2	53.0	28.4	13.7	5.0	2.6	110.9	124.2	79.7	96.8	132.5	91.8	100.3
$V_f$ $A_0/P$ , %/сут	105	104	180	126	1034	497	247	61	248	240	224	128	93	73
$A$ , м/с	187.0	285.5	377.0	383.5	1439.3	1054.8	550.0	176.2	490.1	632.9	550.4	429.3	137.4	150.8
, ч	52.1	53.3	85.0	52.5	77.5	77.5	113.5	116.2	132.7	109.7	112.2	140.0	156.6	156.4
$V_r$ $A$ , м/с	178.0	269.8	315.0	52.5	390.5	566.7	540.0	300.0	437.0	710.6	1423.6	430.6	406.0	700.4
, ч	10.1	50.7	83.0	51.1	65.0	1.2	29.0	142.2	115.6	100.9	110.0	137.5	143.1	153.4
$V_z$ $A$ , м/с	120.0	120.4	26.0	101.5	100.1	98.2	214.5	82.3	49.8	73.0	540.1	403.7	93.1	215.5
, ч	20.2	2.6	0.0	17.0	0.0	2.5	0.0	110.9	126.3	47.8	110.0	135.0	70.2	20.7

крутильных колебаний. В тоже время пятна с меньшей средней осевой напряженностью показывают меньшую скорость вращения Солнца, измеренную по этим же пятнам (табл. 2).

Начальные фазы колебаний тени и полутени находятся в интервале  $0—2$ . Разность фаз между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля не равна нулю. Во всех случаях колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания всех других составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля.

Если принять, что вращение пятна твердотельное, то среднюю угловую скорость вращения тени (полутени) можно определить следующим образом:

$$\frac{A_0}{P} = \frac{360}{2} \frac{V_f}{R},$$

где  $R$  — радиус внешней границы тени (полутени) (табл. 1),  $A_0$  — средняя амплитуда поворота пятна в градусах,  $V_f$  — азимутальная скорость, вычисленная по данным поля лучевых скоростей.

Наши расчеты  $A_0/P$  (табл. 2) показали, что во всех случаях азимутальная скорость вращения тени пятна превышает азимутальную скорость вращения полутени.

Для тени и полутени значения азимутальной скорости, вычисленной по полю лучевых скоростей, не соответствуют значениям скорости вращения пятна, полученной из фотогелиограмм. Как показали исследования [10, 18], максимальный угол поворота пятна не превышает  $60$  /сут. Из табл. 2 видно, что азимутальная скорость  $A_0/P$ , вычисленная из поля скоростей, значительно больше азимутальной скорости, измеренной на основании фотогелиограмм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристики крутильных колебаний пятен (период и амплитуда) зависят от фазы солнечного цикла [10]. Исследуемые одиночные пятна находились на фазе роста 21-го и 23-го солнечных циклов. Это позволило объединить полученные по каждому пятну результаты в один ряд.

Изучение семи одиночных пятен показало, что периоды крутильных колебаний в местах сильного вертикального поля (в тени) лежат в интервале  $2.2—7.1$  сут, в местах сильного поперечного поля (в полутени) — в интервале  $3.3—7.7$  сут. Для всех составляющих векторов скорости и магнитного поля в тени (полутени) пятна период колебаний был одинаковым, амплитуды и начальные фазы — разные. Периоды и амплитуды колебаний тени и полутени уменьшаются с увеличением угловой скорости вращения Солнца, определенной по этим пятнам. Азимутальная скорость вращения тени пятна превышает азимутальную скорость полутени.



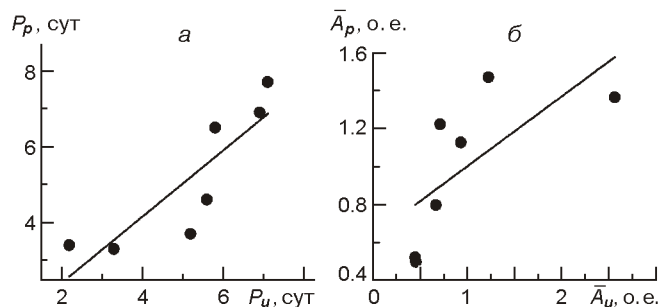


Рис. 3. Зависимость периода  $P_p$  крутильных колебаний полутени от периода  $P_u$  крутильных колебаний тени (а) и зависимость средних безразмерных амплитуд крутильных колебаний  $\bar{A}_p$  полутени от средних безразмерных амплитуд крутильных колебаний  $\bar{A}_u$  тени

Между колебаниями тени и полутени имеется зависимость: чем больше период и амплитуда колебания тени пятна, тем больше период и амплитуда колебаний полутени (рис. 3). Пятна с меньшей осевой напряженностью показывают больший период крутильных колебаний и меньшую угловую скорость вращения Солнца (табл. 2). Все это может свидетельствовать о едином механизме колебаний тени и полутени, а также о связи крутильных колебаний пятен с дифференциальным вращением Солнца.

Так же, как и в работах [2, 5, 19, 20], для тени и полутени остается не решенным вопрос несоответствия между скоростью вращения пятна, вычисленной по лучевым скоростям, и скоростью вращения пятна, полученной из фотогелиограмм. В работе [5] было показано, что скорость вращения пятен, вычисленная по фотогелиограммам, в 5-6 раз меньше азимутальной скорости, определенной по полю лучевых скоростей. В то же время закручивание силовых линий магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам [6]. Физические причины различия в величинах скоростей пока остаются неясными. Возможно, эти эффекты связаны с тонкой структурой и неоднородностью магнитного поля, а также плазмы в полутени и тени пятна. Безусловно, эти проблемы требуют дальнейших исследований.

Колебания азимутальной составляющей скорости в тени и в полутени опережают по фазе колебания всех других составляющих обоих векторов. Это может означать, что крутильные колебания пятна являются вынужденными. Однако для достоверного определения начальных фаз колебаний различных составляющих требуются более частые данные наблюдений.

Полученные результаты являются с одной стороны чрезвычайно веским доводом в пользу того, что крутильные колебания пятен реальны. С другой стороны, они могут свидетельствовать о едином механизме крутильных колебаний тени и полутени одиночных пятен и связи этих колебаний с дифференциальным вращением Солнца.



1. *Гопасюк О. С.* Структура магнитного поля одиночного пятна // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 2.—С. 126—137.
2. *Гопасюк О. С.* Крутильные колебания тени солнечных пятен // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—**21**, № 3.—С. 209—216.
3. *Гопасюк С. И.* Временные изменения структуры поперечного магнитного поля в группах пятен и оптические явления // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1965.—**33**.—С. 100—110.
4. *Гопасюк С. И.* Фотосферные движения газа в одиночном пятне // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1977.—**57**.—С. 107—121.
5. *Гопасюк С. И.* Некоторые особенности вращения пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1981.—**64**.—С. 108—118.
6. *Гопасюк С. И.* Структура и динамика магнитного поля в активных областях на Солнце // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.—1987.—**34**.—С. 6—77.
7. *Гопасюк С. И., Гопасюк О. С.* Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. I. Наблюдения по фотосферным линиям // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—**14**, № 5.—С. 389—400.
8. *Гопасюк С. И., Залесов И. П.* Цифровой вектор-магнитограф. I. Канал продольного поля // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—**12**, № 5.—С. 48—54.
9. *Гопасюк С. И., Лазарева Л. Ф.* Поле скоростей и вспышечная активность в группе пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1986.—**74**.—С. 84—92.
10. *Гопасюк С. И., Лямова Г. В.* Крутильные колебания солнечных пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1987.—**77**.—С. 17—24.
11. *Гопасюк С. И., Лямова Г. В., Ханейчук В. И.* Крутильные колебания пятен и вращение подфотосферных слоев Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1988.—**79**.—С. 34—41.
12. *Котов В. А.* Вращение вещества в солнечном пятне // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1976.—**54**.—С. 184—200.
13. *Котов В. А., Северный А. Б., Цан Т. Т.* Исследование глобальных колебаний Солнца: I. Метод и инструмент // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—**65**.—С. 3—34.
14. *Наговицына Е. Ю., Наговицын Ю. А.* Некоторые особенности собственных движений солнечных пятен // Солнечные данные.—1986.—№ 6.—С. 69—74.
15. *Abetti G.* The Sun. — London: Faber and Faber, 1963.—358 p.
16. *Bray R. J., Loughhead R. E.* Sunspots. — London: Chapman and Hall Ltd., 1964.—303 p.
17. *Brown D. S., Parnell C. E., Deluca E. E., et al.* The magnetic structure of a coronal X-ray bright point // Solar Phys.—2001.—**201**, N 2.—P. 305—321.
18. *Brown B. N., Nightingale R. W., Alexander D., et al.* Observations of rotating sunspots from TRACE // Solar Phys.—2003.—**216**, N 1-2.—P. 79—108.
19. *Gopasyuk S. I., Gopasyuk O. S.* Sunspot rotations derived from magnetic and velocity fields observations // Solar Phys.—2005.—**231**, N 1-2.—P. 11—21.
20. *Gopasyuk S. I.* Motions in sunspots like torsional oscillations // Sun and Planetary System / Eds W. Fricke, G. Teleki. — Dordrecht: Reidel, 1982.— P. 125—126.
21. *Kinman T. D.* Motions in the Sun at the photospheric level. II. The Evershed effect in sunspot Mt. Wilson N 9987 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1952.—**112**, N 4.—P. 425—444.
22. *Lamb S. A.* An investigation of material motions in a spot // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1975.—**172**, N 1.—P. 205—220.
23. *Waldmeier M.* Anomale Teilung eines Sonnenflecks // Zs. Astrophys.—1963.—**57**, N 3.—S. 207—211.