

УДК 523.98

О. С. Гопасюк

НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, п. Научный

Крутильные колебания тени солнечных пятен

Проведены исследования крутильных колебаний тени шести одиночных пятен по наблюдениям продольного магнитного поля и поля скоростей в фотосферной линии Fe I λ 525.3 нм. Восстановлены все три составляющие обоих векторов. Период колебаний тени составил 2.2—7.1 сут. Начальные фазы колебаний находятся в интервале 0—2 π . Азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, значительно больше, чем азимутальная скорость, измеренная на основании фотогелиограмм. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания всех других составляющих обоих векторов. Период колебаний увеличивается с увеличением широты пятна. Плотность магнитной энергии колебаний превышает плотность их кинетической энергии до 1000 раз (при плотности плазмы 10^{-4} кг/м³).

КРУТИЛЬНІ КОЛИВАННЯ ТІНІ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ, Гопасюк О. С. — Проведено дослідження крутильних коливань тіні шести одиночних плям за спостереженнями повздовжнього магнітного поля і поля швидкостей в фотосферній лінії Fe I λ 525.3 нм. Визначено усі три компоненти обох векторів. Період коливань тіні склав 2.2—7.1 діб. Початкові фази коливань знаходяться в інтервалі 0—2 π . Азимутальна швидкість, отримана із поля швидкостей, значно більша, ніж азимутальна швидкість, виміряна на основі фотогеліограм. Фаза азимутальної складової швидкості випереджає фази усіх складових обох векторів. Період коливань збільшується із збільшенням широти плями. Густина магнітної енергії коливань перевищує густину їхньої кінетичної енергії до 1000 разів (при густині плазми 10^{-4} кг/м³).

TORSIONAL OSCILLATIONS OF SUNSPOT UMBRA, by Gopasyuk O. S. — Torsional oscillations of six single sunspot umbrae are investigated from observations of the longitudinal magnetic field and velocity field in the photospheric line Fe I λ 525.3 nm. All three components of the magnetic field and velocity field are reconstructed from their line-of-sight components. The periods of the umbra oscillations correspond to 2.2—7.1 days. The initial phases of the oscillations are distributed over the interval from 0 to 2 π . The azimuthal velocity calculated from the velocity field is much more than the azimuthal velocity measured from photoheliograms. The azimuthal velocity oscillation phase is ahead of the phases of all other component oscillations of both vectors. The period of oscillations increases with latitude of a sunspot.

The magnetic energy of oscillations exceeds their kinetic energy by a factor up to 1000 (when the plasma density is 10^{-4} kg/m³).

В последние годы проблеме вращения пятен уделяется большое внимание. И связано это с важностью информации, которая следует из данных о вращении пятен для понимания нестационарных процессов на Солнце и активности в целом. Изучение вращения пятен проводилось и проводится как по данным наблюдений лучевых скоростей [2, 4, 5, 9, 14, 16, 18, 22, 24, 25], так и по фотогелиограммам [3, 5, 10, 11, 13, 17, 20, 21, 27]. Абетти [18], в частности, нашел, что составляющая скорости вращения газа в пятне (азимутальная составляющая) всегда есть, но она очень нерегулярна. Напротив, некоторые из исследователей приходили к выводу, что азимутальная составляющая не может превышать ошибок измерений [19, 24]. Тем не менее, более поздние исследования показали, что вращение газа регулярно наблюдалось в большом одиночном пятне, и его скорость зачастую превышала 1 км/с [4]. Вращение пятен, измеренное по фотогелиограммам, составляло 30—40° в день и более [3, 10]. Появление и усиление вихревой структуры поперечного магнитного поля пятна хорошо соответствует вращению пятна, вычисленного по фотогелиограммам [3] и тесно коррелирует с появлением вспышек [3, 9, 20]. Достоверность определения вращения пятен по фотогелиограммам была обоснована в [5], где показано было качественное соответствие между скоростями, измеренными по фотогелиограммам и по полю лучевых скоростей. Оказалось, что характер вращения пятен соответствует крутильным колебаниям со средним периодом 6 сут [5, 10]. Исследования по фотогелиограммам крутильных колебаний 131 пятна были выполнены в работе [10]. Это были пятна одиночные и простые по структуре в сложных группах. Согласно [10] крутильные колебания не уникальное, а скорее характерное состояние пятен.

Определение вращения пятен по лучевым скоростям — задача чрезвычайно трудоемкая [4, 24, 25]. Именно поэтому исследования вращения их по полю скоростей проведены только в отдельных случаях. Однако создание метода вычисления [7] всех трех составляющих вектора по его лучевой составляющей существенно упростило решение проблемы и расширило возможности исследования вращения пятен. В работах [2, 22] проведено исследование вращения полутени в четырех одиночных пятнах по данным наблюдений в них поля лучевых скоростей и продольного магнитного поля в фотосферной линии.

Крутильные колебания в плазме с магнитным полем обязаны силам натяжения силовых линий магнитного поля, стремящимся возратить смещенную массу газа в исходное состояние. В результате возмущение распространяется вдоль магнитного поля со скоростью волны Альвена. Магнитное поле в полутени пятна преимущественно горизонтальное, тогда как в тени — оно в основном вертикальное. Различие в ориентации магнитного поля требует исследования крутильных колебаний полутени и тени пятен отдельно.

Здесь мы исследуем крутильных колебаний тени шести одиночных пятен по данным наблюдений продольных составляющих магнитного поля и поля скорости.

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ

Основой для исследования послужили данные наблюдений продольного магнитного поля и лучевых скоростей шести одиночных пятен в фотосферной линии Fe I λ 525.3 нм. Наблюдения были проведены в Крымской астрофизической обсерватории на двойном магнитографе [15] в 1978 г. и на

быстродействующем цифровом магнитографе [8] башенного солнечного телескопа в 2000 г. Во все дни наблюдений входная щель спектрографа составляла $1'' \times 2''$. Сканирование изображения Солнца относительно щели спектрографа осуществлялось с помощью фотогида [12] вдоль суточной параллели со скоростью $2.23''/с$ (1978 г.) и $20''/с$ (2000 г.). Линия Fe I λ 525.3 нм имеет простое магнитное расщепление с фактором Ланде $g = 1.5$. Ее эквивалентная ширина в центре солнечного диска составляет 7.5 пм. Потенциал возбуждения нижнего уровня равен 3.28 эВ [26]. Она слабо чувствительна к температуре; в пятне несколько усиливается [26]. При регистрации магнитного поля и доплеровских движений в Fe I λ 525.3 нм входные щели фотометра пропускали свет в интервале от 3.5 до 9.0 пм от центра линии и 7 пм в центре линии при регистрации яркости в ее ядре. В этом случае величина магнитного поля, соответствовавшая сдвигу центра σ -компонентов на середину щелей фотометра, была равной 323.8 мТл. Долгота и широта для каждого пятна приведены в табл. 1. За время наблюдений размеры пятен изменялись мало. Радиусы области тени, в пределах которой исследовались колебания, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные наблюдений

Дата	Долгота	Широта	Радиус ($\alpha = 0.7$)
13—18 сентября 1978 г.	E18—W45	N16	15.2''
15—22 сентября 1978 г.	E39—W53	N28	16.8
13—20 сентября 1978 г.	E54—W36	N37	10.1
08—12 августа 2000 г.	E06—W47	N18	13.5
18—22 августа 2000 г.	E27—W25	S06	12.2
18—21 августа 2000 г.	E20—W20	N13	9.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАНИЙ

Для изучения крутильных колебаний пятен были использованы карты яркости I , выраженные в единицах средней яркости невозмущенного фона. По каждой карте была выделена тень пятна и определено ее среднее положение. На основании исследований [19] яркость тени была взята равной $I \leq 0.7$. Введена новая система координат, начало которой совмещено с центром тени 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. Подробное описание метода, определяющего связь между системами координат, изложено в работе [7]. Наличие осевой симметрии магнитного поля и поля скоростей позволяет восстановить все три составляющие обоих векторов: вертикальную H_z и V_z , радиальную — вдоль радиуса пятна H_r и V_r , азимутальную H_t и V_t по полю их лучевой составляющей. В цилиндрических координатах лучевая составляющая поля $H_{||}(V_{||})$ равна

$$H_{||} = H_z \cdot \cos\Theta + H_r \cdot \cos\eta \cdot \sin\Theta - H_t \cdot \sin\eta \cdot \sin\Theta, \quad (1)$$

где η — азимут вектора поперечного поля, отсчитываемый против часовой стрелки от оси OX (новой системы координат), проекция которой на картинную плоскость совпадает с радиусом-вектором, проведенным из центра пятна в центр солнечного диска [7]. На картах обычно ось OX

направлена вдоль суточной параллели с востока на запад. Новая система координат разделила площадь тени пятна на четыре квадранта. После усреднения выражения (1) по площади квадрантов находим [7]:

$$\overline{H_z} = \frac{1}{\cos\Theta} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_{\parallel n}, \quad (2)$$

$$\overline{H_r} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sin\Theta} \cdot \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^{N(1.4)} H_{\parallel n} - \sum_{n=1}^{N(2.3)} H_{\parallel n} \right), \quad (3)$$

$$\overline{H_t} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sin\Theta} \cdot \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^{N(3.4)} H_{\parallel n} - \sum_{n=1}^{N(1.2)} H_{\parallel n} \right), \quad (4)$$

где N — полное число ячеек на сетке всей площади выделенной зоны, Θ — гелиоцентрический угол, $N(1.4)$ — число ячеек на сетке площади выделенной зоны в пределах первого и четвертого квадрантов (после поворота системы координат), $N(2.3)$, $N(3.4)$, $N(1.2)$ имеют аналогичный смысл. Отсчет квадрантов ведется против часовой стрелки, начиная от оси, соединяющей центр пятна с центром солнечного диска [7].

Для составляющих вектора скорости можно записать такие же выражения. Таким образом, вектор магнитного поля и вектор скорости определены на основании лучевых составляющих по одному методу, что очень важно для исследований крутильных колебаний.

По выражениям (2)—(4) для каждой записи продольного магнитного поля и лучевой скорости были вычислены все три составляющие обоих векторов. При вычислениях был учтен наклон магнитной оси этих пятен к западу на 10° [1]. Если в течение дня проводилось несколько серий наблюдений, то брались средние значения составляющих за день. Из полученных значений каждой составляющей обоих векторов для каждого пятна были составлены временные зависимости. За начало отсчета было принято время первого наблюдения. Для каждой временной зависимости методом наименьших квадратов была подобрана синусоида

$$y = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \alpha\right), \quad (5)$$

где A — амплитуда, T — период, α — начальная фаза колебания. Примеры аппроксимации временных зависимостей синусоидой показаны на рис. 1.

Для каждой составляющей на основании выражения (5) были вычислены период, амплитуда и начальная фаза колебаний. Результаты вычислений представлены в табл. 2. Периоды колебаний всех составляющих обоих векторов каждого пятна оказались одинаковыми. Периоды в тени всех пятен лежат в интервале 2.2—7.1 сут. Начальные фазы колебаний находятся в интервале $0—2\pi$. Разность фаз между колебаниями азимутальной составляющей и всеми другими составляющими обоих векторов одного и того же пятна, как правило, разные. Эта разность лежит в интервале $0—2\pi$. Разность фаз между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля обычно не равна нулю. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания всех других составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Данные табл. 2 показывают, что имеется зависимость начальных фаз колебаний составляющих от широты положения пятна. Начальные фазы колебаний всех составляющих (вектора магнитного поля и вектора скорости) увеличиваются в сторону больших широт.

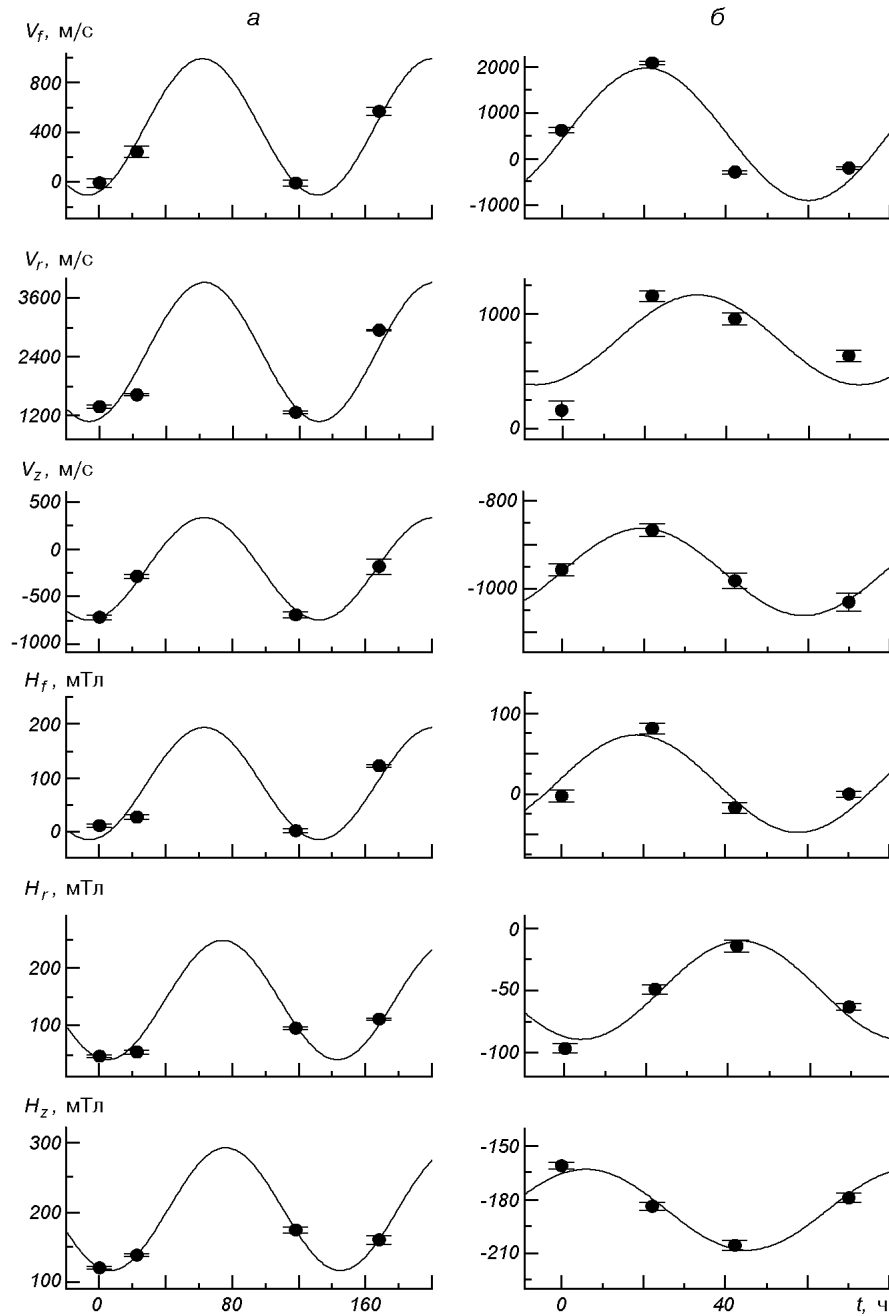


Рис. 1. Значения составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости в тени пятна и их аппроксимации синусоидами: а — для пятна N28, б — для пятна N13

Были построены зависимости периода колебаний тени пятна от широты положения пятна (рис. 2), показавшие увеличение периода колебаний с увеличением широты, на которой находится пятно.

В табл. 2 приведены полученные нами отношения плотности кинетической энергии E_k к плотности магнитной энергии E_m колебаний для соответствующих составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Вычисления были проведены при плотности плазмы 10^{-4} кг/м³, соответствующей плотности невозмущенной фотосферы, и значениях амплитуд, приве-

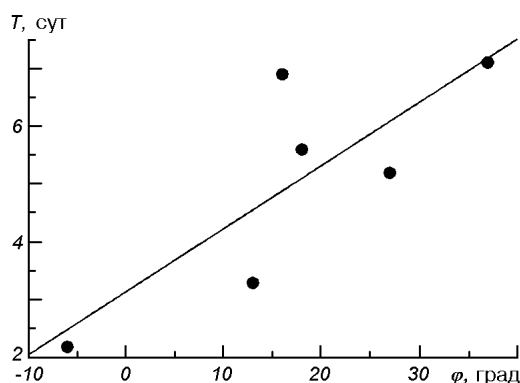


Рис. 2. Изменение периода колебаний тени пятна в зависимости от широты положения пятна

Таблица 2. Основные характеристики крутильных колебаний составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости

Параметр		$\varphi = \text{N16},$ T = 6.9 сут	$\varphi = \text{N28},$ T = 5.2 сут	$\varphi = \text{N37},$ T = 7.1 сут	$\varphi = \text{N18},$ T = 5.6 сут	$\varphi = \text{S06},$ T = 2.2 сут	$\varphi = \text{N13},$ T = 3.3 сут
H_{f}	A, мТл	32.0	104.5	33.0	37.8	16.5	60.5
	α , ч	13.2	110.0	153.9	4.3	8.4	1.2
H_{r}	A, мТл	16.9	103.5	30.2	17.1	12.0	39.7
	α , ч	18.5	99.0	99.9	109.2	17.6	55.0
H_{z}	A, мТл	31.0	87.6	32.0	18.8	16.2	22.6
	α , ч	2.6	96.8	91.8	124.2	9.2	13.7
V_{f}	A/T, град/сут	247	224	91	228	105	1034
	A, м/с	550.0	550.4	137.4	450.2	187.0	1439.3
V_{r}	α , ч	113.5	112.2	156.6	132.7	52.1	77.5
	A, м/с	540.0	1423.6	406.0	437.0	178.0	390.5
V_{z}	α , ч	29.0	110.0	143.1	115.6	10.1	65.0
	A, м/с	214.5	540.1	93.1	49.8	120.0	100.1
$E_{\text{k}}(f)/E_{\text{m}}(f)$	α , ч	0.0	110.0	70.2	126.3	20.2	0.0
	$E_{\text{k}}(f)/E_{\text{m}}(f)$	0.037	0.003	0.002	0.018	0.016	0.071
	$E_{\text{k}}(r)/E_{\text{m}}(r)$	0.128	0.024	0.023	0.082	0.028	0.012
$E_{\text{k}}(z)/E_{\text{m}}(z)$		0.006	0.005	0.001	0.001	0.007	0.002

денных в табл. 2. Во всех случаях плотность кинетической энергии колебаний составляющих скорости оказалась меньше, чем плотность магнитной энергии колебаний. В некоторых случаях это различие достигает почти трех порядков. Имеется некоторая тенденция уменьшения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение шести одиночных пятен показало, что периоды колебаний их тени составили 2.2—7.1 сут. Для одного и того же пятна период был одинаковым для всех составляющих скорости и магнитного поля. В некоторых пятнах период колебаний тени пятна оказался несколько меньше периода колебаний полутени этих же пятен [2, 22]. Амплитуды и начальные фазы колебаний тени, как и полутени, для каждой из составляющих получились разными. Здесь, как и в более ранних работах [2, 5, 23],

остается проблема несоответствия скорости вращения пятна, вычисленной по лучевым скоростям, со 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, вычисленной по полю лучевых скоростей. Если принять, что вращение тени пятна, определяемое по фотогелиограммам, твердотельное, то азимутальная скорость вращения пятна, полученная из фотогелиограмм, равна

$$V_p = 2\pi \frac{A R}{360 T},$$

где R — радиус внешней границы тени (табл. 1), A — средняя амплитуда вращения пятна. Если эту азимутальную скорость V_p приравнять азимутальной скорости V_f , вычисленной по данным лучевой скорости, то средняя угловая скорость вращения тени пятна будет равна

$$\frac{A}{T} = \frac{360}{2\pi} \frac{V_f}{R}.$$

Рассчитанные значения A/T приведены в табл. 2. Максимальный угол поворота пятна по результатам исследований [10, 20] не превышает 60 град/сут. Видно (табл. 2), что азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, значительно больше, чем азимутальная скорость, измеренная на основании фотогелиограмм. Для полутени пятна эта проблема также имеет место [2]. В то же время закручивание силовых линий магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам [6]. Физические причины различия скоростей пока остаются неясными. Возможно, эти эффекты связаны с тонкой структурой и неоднородностью магнитного поля и плазмы в полутени и тени пятен. Безусловно, эти проблемы требуют дальнейших исследований.

Разность фаз между колебаниями азимутальной составляющей и всеми другими составляющими для одного и того же пятна различна, отличается она и для разных пятен. Эта разность находится в основном в интервале $0-2\pi$ (табл. 2). Разность фаз, как правило, не равна нулю между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Это может означать, что крутильные колебания пятна являются вынужденными. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания всех других составляющих обоих векторов. Начальные фазы колебаний всех составляющих (и вектора магнитного поля, и вектора скорости) увеличиваются с увеличением широты пятна. Подобное поведение демонстрируют начальные фазы колебаний всех составляющих в полутени пятна [2]. Увеличивается с увеличением широты пятна и период колебаний тени (рис. 2). Однако для достоверного определения начальных фаз колебаний различных составляющих требуются более частые данные наблюдений.

При плотности плазмы в тени 10^{-4} кг/м³ были вычислены отношения плотности кинетической энергии к плотности магнитной энергии колебаний для одинаковых составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля (табл. 2). Во всех случаях плотность кинетической энергии меньше плотности магнитной энергии. В подавляющем большинстве случаев это различие достигает почти трех порядков. Имеется некоторая тенденция уменьшения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

Приношу глубокую благодарность доктору физико-математических наук С. И. Гопасюку за постоянное внимание к работе.

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 пятен на Солнце // Кинематика и физика небес. тел.—2004.—20, № 5.—С. 387—395.
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. — М.: ВИНТИ, 1987.—С. 6—77.—(Итоги науки и техники. Сер. Астрономия; Т. 34. Солнечные вспышки).
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. *Границкий Л. В., Границкая Л. А., Дидковский Л. В., Никулин Н. С.* Система сбора и обработки информации на башенном солнечном телескопе Крымской астрофизической обсерватории // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1977.—56.—С.181—188.
13. *Калман Б.* Эволюция групп солнечных пятен и их магнитные поля: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Л.: Пулково, 1979.—191 с.—Машинопись.
14. *Котов В. А.* Вращение вещества в солнечном пятне // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1976.—54.—С. 184—200.
15. *Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т.* Исследование глобальных колебаний Солнца: I. Метод и инструмент // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—65.—С. 3—34.
16. *Куклин Г. В., Степанов В. Е.* Движение газа и магнитного поля в солнечном пятне. I // Солнеч. данные.—1963.—№ 1.—С. 55—67.
17. *Наговицына Е. Ю., Наговицын Ю. А.* Некоторые особенности собственных движений солнечных пятен // Солнеч. данные.—1986.—№ 6.—С. 69—74.
18. *Abetti G.* The Sun. — London: Faber and Faber, 1963.—358 p.
19. *Bray R. J., Loughhead R. E.* Sunspots. — London: Chapman and Hall Ltd., 1964.—303 p.
20. *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.
21. *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.
22. *Gopasyuk O. S.* Torsional oscillations of sunspots on magnetic and velocity fields observations // IAU Symp. 223, Book of abstracts, St. Peterburg, Pulkovo, Russia.—2004.—P. 80.
23. *Gopasyuk S. I.* Motions in sunspots like torsional oscillations // Sun and Planetary System / Eds W. Fricke, G. Teleki. — Dordrecht: Reidel, 1982.—P. 125—126.
24. *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.
25. *Lamb S. A.* An investigation of material motions in a spot // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1975.—172, N 1.—P. 205—220.
26. *Moore Ch. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. — Washington, 1966.—349 p.
27. *Waldmeier M.* Anomale Teilung eines Sonnenflecks // Zs. Astrophys.—1963.—57, N 3.—S. 207—211.

Поступила в редакцию 07.02.05