

УДК 523.9

О. С. Гопасюк

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»  
98409 Крым, п. Научный

### Крутильные колебания пятен на Солнце

Проведены исследования крутильных колебаний четырех одиночных пятен по наблюдениям продольного магнитного поля и лучевых скоростей в фотосферной линии Fe I  $\lambda$  525.3 нм. Восстановлены все три компоненты векторов магнитного поля и скорости по их лучевой составляющей. Период колебаний составил 3.4—7.7 сут. Фаза азимутальной составляющей скорости опережает фазы всех трех составляющих вектора магнитного поля. При плотности плазмы  $10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> в полутени пятна плотность магнитной энергии колебаний превышает плотность их кинетической энергии в 10—100 раз. Полученные результаты позволяют заключить, что эти колебания являются вынужденными.

*КРУТИЛЬНІ КОЛИВАННЯ ПЛЯМ НА СОНЦІ, Гопасюк О. С. — Проведено дослідження крутильних коливань чотирьох одиночних плям за спостереженнями поздовжнього магнітного поля і променевих швидкостей у фотосферній лінії Fe I  $\lambda$  525.3 нм. Відтворено усі три компоненти векторів магнітного поля і швидкості за їхньою променевою складовою. Період коливань склав 3.4—7.7 доби. Фаза азимутальної складової швидкості випереджає фази усіх трьох складових вектора магнітного поля. При густині плазми  $10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> у півтіні плями густина магнітної енергії коливань перевищує густину їхньої кінетичної енергії в 10—100 разів. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що ці коливання є вимушеними.*

*TORSIONAL OSCILLATIONS OF SUNSPOTS, Gopasyuk O. S. — The torsional oscillations of four single sunspots are investigated on the basis of the observations of the longitudinal magnetic fields and the velocity fields in the photospheric line Fe I  $\lambda$  525.3 nm. We reconstructed all three components of the magnetic field and velocity field from their line-of-sight components. The period of the oscillations is from 3.4 to 7.7 days. The phase of the azimuthal component of the velocity is ahead of the phases of all three components of the magnetic field. If the density of plasma in the penumbra  $10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup>, as the magnetic energy of oscillations exceeds their kinetic energy by a factor of 10 to 100. Our results indicate that those oscillations are not free oscillations.*

Крутильные колебания пятен с периодом около 6 сут были обнаружены на основании наблюдений лучевых скоростей в фотосфере, фотогелиограмм и

изображений активных областей в  $H_{\alpha}$  [7, 21]. Крутильные колебания в плазме с магнитным полем обязаны силам натяжения магнитного поля, стремящимся возратить смещенную массу газа в исходное положение. В результате возмущение распространяется вдоль магнитного поля со скоростью волны Альвена. Именно это обстоятельство позволяет на основании наблюдений крутильных колебаний в различных образованиях на Солнце изучать структуру магнитных полей и движений плазмы на глубинах, недоступных прямым методам. Возможность использования результатов по крутильным колебаниям пятен для исследования структуры их магнитного поля в подфотосферных слоях была показана в работе [8]. Там же были установлены закономерности структуры в подфотосферных слоях магнитных трубок, образующих пятна на поверхности Солнца. В дальнейшем [14] было показано, что крутильные колебания пятен не уникальное, а скорее характерное их состояние. Спектр колебаний одиночных пятен отличается от спектра колебаний пятен в группах. Амплитуда колебаний в среднем увеличивается с ростом периода. Амплитуда и период крутильных колебаний становятся больше к максимуму солнечной активности. В годы минимума солнечной активности образование пятен на поверхности Солнца связано с выходом магнитных петель из менее глубоких слоев. По мере приближения к максимуму активности Солнца вынос магнитных петель идет из все более и более глубинных слоев. В годы максимума конвективные движения имеют более высокие скорости и большие размеры конвективных элементов [14]. На основании изучения крутильных колебаний пятен в работе [15] было сделано заключение, что вращение Солнца с глубиной в пределах конвективной зоны замедляется и становится более однородным по широте. Циркулирующий электрический ток вдоль магнитной петли, испытывающей крутильные колебания, изменяется по величине и знаку [10]. Это существенно ускоряет процесс изменения со временем электрического тока и его магнитного поля в солнечной атмосфере.

Вращение пятен приводит к закручиванию силовых линий поля пятна: чем дальше от центра пятна, тем сильнее закручиваются в спираль силовые линии [5, 7, 9]. Угол закрученности структуры поперечного поля на границе полутень — фотосфера соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам. Однако это ничего не говорит о величине азимутального поля. Величина азимутального поля должна быть вычислена, например, методом, предложенным в работе [11]. Скорость вращения пятен, вычисленная по фотогелиограммам, в 5–6 раз меньше азимутальной скорости, вычисленной по полю лучевых скоростей [7, 20]. Появление вспышек тесно коррелирует с вращением пятен [5, 13].

Краткий обзор этих результатов по вращению пятен вокруг своей оси и крутильным колебаниям пятен содержится в работах [9, 21]. Недавно были проведены исследования [19] вращения пятен вокруг своей оси и крутильных колебаний пятен по снимкам в белом свете с привлечением  $H_{\alpha}$ -снимков, УФ-изображений ( $\lambda\lambda$  160, 17 нм) и магнитограмм SOHO/MDI. Полученные результаты полностью соответствуют результатам [9, 21].

Ниже нами проведены исследования крутильных колебаний полутени одиночных пятен по наблюдениям лучевых составляющих магнитного поля и скорости в фотосферной линии.

#### ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Данные наблюдений одиночных пятен были получены в Крымской астрофизической обсерватории в 1978 г. на двойном магнитографе [17] и в 2000 г. на быстродействующем цифровом магнитографе [12] Башенного солнечного

телескопа.

В 1978 г. сканирование изображения Солнца относительно щели спектрографа осуществлялось с помощью фотогида [16] вдоль суточной параллели со скоростью 2.23"/с. Для исследования крутильных колебаний мы отобрали три одиночных пятна. Структура магнитного поля и поля скоростей этих пятен исследовалась в работах [1—4, 11].

В 2000 г. сканирование изображения Солнца относительно щели спектрографа осуществлялось с помощью фотогида вдоль суточной параллели со скоростью 20"/с. Были взяты записи продольного магнитного поля, поля скоростей и яркостей для одного одиночного пятна. Структура магнитного поля этого пятна исследовалась в работе [4] и было установлено, что ось магнитного поля этих пятен наклонена относительно вертикали на запад примерно на 10°.

Во все дни наблюдений входная щель спектрографа составляла 1"×2". Продольные магнитные поля, лучевые скорости и яркости в одиночных пятнах были измерены в линии Fe I λ 525.3 нм. 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 этой линии равен 3.28 эВ [23]. Она слабо чувствительна к температуре; в пятне несколько усиливается [23]. 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 в пределах ±3.5 пм от центра линии при регистрации яркости в ядре линии. Величина магнитного поля, при котором происходил сдвиг центра  $\sigma$ -компонентов на середину щелей фотометра, соответствовала значению поля 323.8 мТл.

Долгота  $L$  и широта  $\varphi$  для средних моментов времени каждой серии наблюдений приведены в табл. 1. За время наблюдений размеры пятен менялись мало. Эквивалентные радиусы в области полутени, в которой исследовались колебания, также приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные наблюдений

Дата	L	R <sub>I=0.7</sub>	R <sub>I=0.9</sub>	Дата	L	R <sub>I=0.7</sub>	R <sub>I=0.9</sub>
$\varphi = 16^\circ$				$\varphi = 37^\circ$			
13.09.78	-18°	16"	20"	13.09.78	-54	9	13
13.09.78	-17	15	19	13.09.78	-52	9	13
13.09.78	-16	16	20	13.09.78	-52	9	13
13.09.78	-14	15	19	15.09.78	-30	11	14
15.09.78	11	16	21	15.09.78	-28	10	15
15.09.78	12	15	20	15.09.78	-27	11	15
16.09.78	21	17	20	16.09.78	-17	11	15
16.09.78	23	15	21	16.09.78	-15	11	15
16.09.78	24	15	19	16.09.78	-14	10	14
18.09.78	45	12	18	18.09.78	8	11	15
$\varphi = 28^\circ$				20.09.78	33	11	14
15.09.78	-39	16	24	20.09.78	34	10	14
15.09.78	-39	16	24	20.09.78	35	9	14
15.09.78	-37	16	23	20.09.78	36	9	13
15.09.78	-36	16	24	$\varphi = -6^\circ$			
16.09.78	-27	17	24	18.08.00	-6	14	21
16.09.78	-26	18	25	19.08.00	7	13	20
16.09.78	-25	17	24	20.08.00	21	13	19
20.09.78	24	20	24	20.08.00	21	12	19
20.09.78	25	18	24	21.08.00	34	12	18
20.09.78	26	18	23	22.08.00	47	9	15
20.09.78	27	18	23				
22.09.78	50	16	21				
22.09.78	51	15	19				
22.09.78	53	14	18				

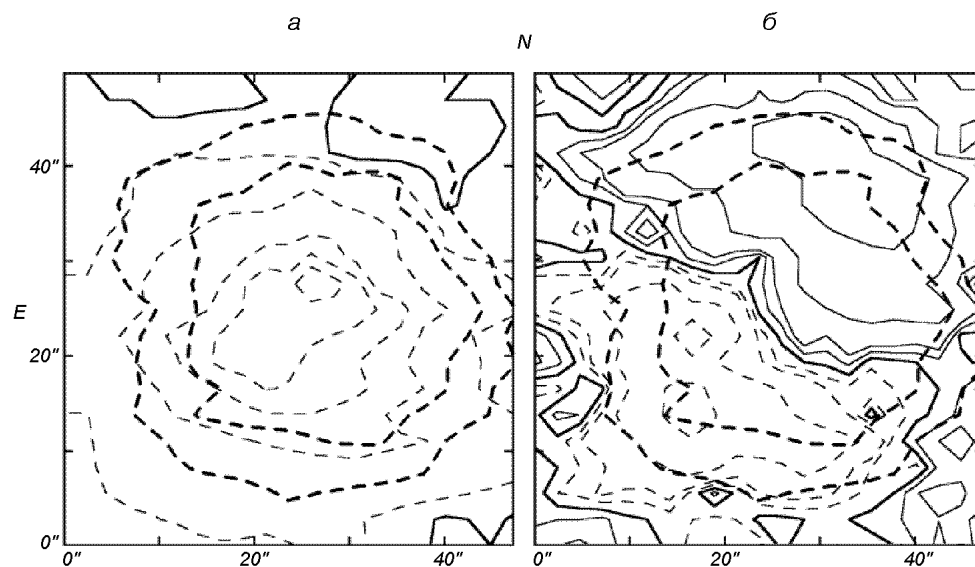


Рис. 1. Карты продольного магнитного поля и лучевой скорости, измеренные в линии Fe I  $\lambda$  525.3 нм в одиночном пятне 16.09.78 ( $L \approx 23^\circ$ ,  $\varphi \approx 16^\circ$ ); а — магнитное поле (штриховые линии — N-полярность, сплошные линии — S-полярность; изолинии проведены через 10, 50, 100, 150, 200 мТл), б — лучевые скорости (штриховые линии — к наблюдателю, сплошные линии — от наблюдателя; изолинии проведены через 100, 200, 500, 1000 м/с). Сплошные жирные линии разделяют области противоположных полярностей и встречных движений; жирными штриховыми линиями нанесены границы области полутени ( $0.7 \leq I \leq 0.9$ )

#### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 приведены фрагменты карт продольного магнитного поля и лучевых скоростей в пятне 16.09.78 ( $L \approx 23^\circ$ ,  $\varphi \approx 16^\circ$ ).

Распределение магнитного поля и поля скоростей в одиночных пятнах наиболее близко соответствует случаю осевой симметрии. Для изучения крутильных колебаний пятен использовались регистрации яркости  $I$ , выраженные в единицах средней яркости невозмущенного фона. По каждой карте яркости в пятне была выделена полутень пятна. В соответствии с результатами исследований [18] яркость полутени была взята  $0.7 \leq I \leq 0.9$ . По каждой записи яркости определялось среднее положение полутени пятна. Введена новая система координат, начало которой совмещено с центром пятна и положительной осью  $OX$ , направленной на центр солнечного диска. Ось  $OZ$  направлена вертикально вверх. Подробное описание метода, определяющего связь между системами координат, изложено в работе [11].

При наличии осевой симметрии мы можем представить лучевую составляющую поля  $H_{||}$  ( $V_{||}$ ) в цилиндрических координатах через вертикальную  $H_z$  ( $V_z$ ), радиальную — вдоль радиуса пятна  $H_r$  ( $V_r$ ) и азимутальную  $H_\tau$  ( $V_\tau$ ) составляющие:

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

где  $\eta$  — 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 [11]. На картах обычно ось  $OX$  направлена вдоль суточной параллели с востока на запад.

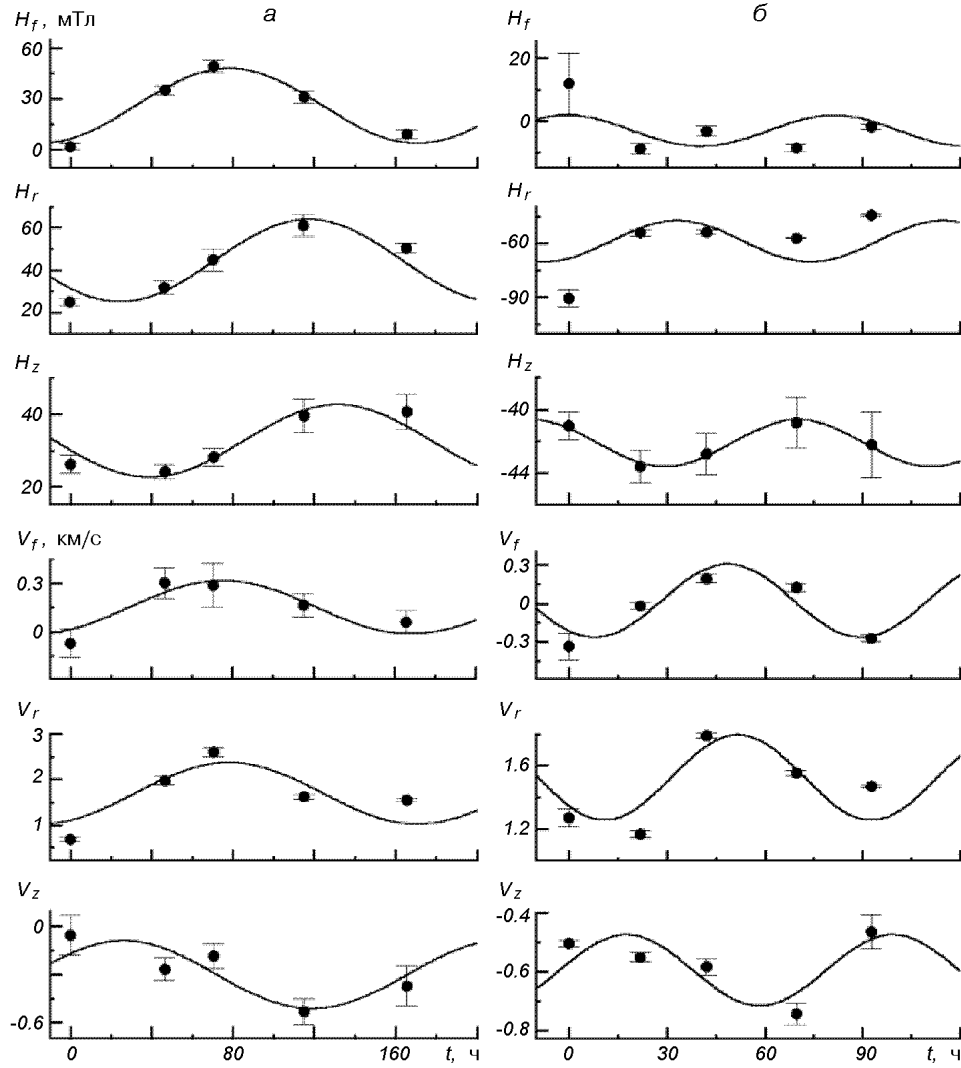


Рис. 2. Зависимости от времени  $t$  составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости; линии — МНК-аппроксимации синусоидой:  $a$  — для пятна на  $\varphi \approx 37^\circ$ ,  $b$  — для пятна на  $\varphi \approx -6^\circ$

Наличие осевой симметрии у магнитного поля и поля скоростей позволяет восстановить все три составляющие обоих векторов по полю их лучевой составляющей [6, 11, 22]. Новая система координат разделила площадь пятна на четыре квадранта. После усреднения выражения (1) по площади квадрантов находим [11]

$$\bar{H}_z = \frac{1}{\cos\Theta} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_{||n}, \quad (2)$$

$$\bar{H}_r = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sin\Theta} \cdot \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^{N(1,4)} H_{||n} - \sum_{n=1}^{N(2,3)} H_{||n} \right), \quad (3)$$

$$\bar{H}_t = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sin\Theta} \cdot \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^{N(3,4)} H_{||n} - \sum_{n=1}^{N(1,2)} H_{||n} \right), \quad (4)$$

где  $N$  — полное число ячеек на сетке всей площади выделенной зоны,  $N(1,4)$  — число ячеек на сетке площади выделенной зоны в пределах

первого и четвертого квадрантов (после поворота системы координат). Отсчет квадрантов ведется против часовой стрелки, начиная от оси, соединяющей центр пятна с центром солнечного диска [11]; N(2,3), N(3,4), N(1,2) имеют аналогичный смысл. Такие же выражения можно записать и для составляющих вектора скорости.

В данной работе мы представляем результаты исследований в полутени пятен ( $0.7 \leq I \leq 0.9$ ).

По выражениям (2)—(4) для каждой записи продольного магнитного поля и лучевой скорости были вычислены все три составляющие векторов магнитного поля и скорости по их продольной составляющей. При вычислениях был учтен наклон магнитной оси пятна к западу на  $10^\circ$  [4].

Если в течение дня проводилось несколько серий наблюдений, то брались средние значения составляющих за день. Данные вычислений для каждого пятна каждой из составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости были представлены в зависимости от времени  $t$ . За начало отсчета было принято время первого наблюдения. Для каждой временной зависимости методом наименьших квадратов была подобрана синусоида

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

где  $A$  — амплитуда,  $T$  — период и  $\alpha$  — начальная фаза колебания.

На рис. 2 показаны примеры аппроксимации временных зависимостей синусоидой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой составляющей каждого пятна на основании выражения (5) были вычислены амплитуда, период и начальная фаза колебаний. Результаты вычислений  $A$ ,  $T$  и  $\alpha$  приведены в табл. 2. Они показывают, что период колебаний в полутени исследуемых четырех пятен приходится на 3.4—7.7 сут. Для всех составляющих векторов скорости и магнитного поля каждого пятна период  $T$  принят одинаковым. Амплитуды и начальные фазы каждой из составляющих, получились разными. Обращает на себя внимание то, что амплитуда азимутальной скорости, вычисленной по лучевой скорости, значительно больше амплитуды азимутальной скорости, измеренной по фотогелиограммам. Это согласуется с ранее полученными результатами [7, 20]. В то же время закрученность силовых линий магнитного поля на

Таблица 2. Характеристики крутильных колебаний составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости

Параметр	$\varphi = 16^\circ$ ;	$\varphi = 28^\circ$ ;	$\varphi = 37^\circ$ ;	$\varphi = -6^\circ$ ;
	$T = 165.9$ ч = 6.9 сут	$T = 157.1$ ч = 6.5 сут	$T = 185.4$ ч = 7.7 сут	$T = 81.7$ ч = 3.4 сут
$H_{\Gamma}$ A, мТл	21.8	37.2	23.3	4.8
$\alpha$ , ч	7.9	130.0	153.4	20.8
$H_{\Gamma}$ A, мТл	22.0	18.8	19.3	11.3
$\alpha$ , ч	105.6	60.0	112.1	13.0
$H_z$ A, мТл	6.8	28.0	9.9	1.5
$\alpha$ , ч	110.9	132.5	100.3	31.2
$V_{\Gamma}$ A/T, °/сут	58	123	71	99
A, м/с	176.2	429.3	150.8	285.5
$\alpha$ , ч	116.2	140.0	156.4	53.3
$V_{\Gamma}$ A, м/с	1300.0	430.6	700.4	269.8
$\alpha$ , ч	42.2	137.5	153.4	50.7
$V_z$ A, м/с	82.3	403.7	215.5	120.4
$\alpha$ , ч	110.9	135.0	20.7	2.6

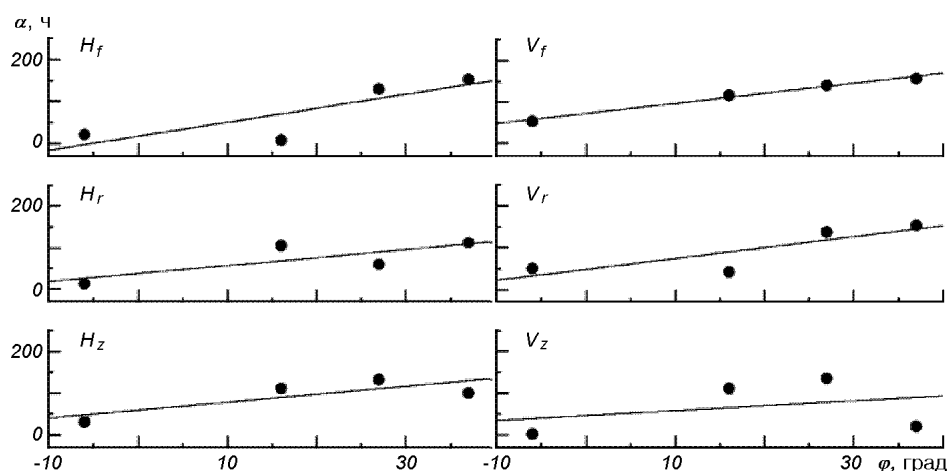


Рис. 3. Изменение начальной фазы  $\alpha$  колебаний составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости пятна в зависимости от широты  $\varphi$  пятна

внешней границе полутени пятна соответствует величине поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам [9]. Начальные фазы колебаний находятся в интервале  $0-2\pi$ . Разность фаз между колебаниями азимутальной составляющей и всеми другими составляющими вектора скорости и вектора магнитного поля одного и того же пятна разные. Разность фаз для исследуемых пятен также различается. Она находится в интервале  $0-\pi$ , кроме четырех значений, которые превышают это значение (табл. 2). Особенно следует подчеркнуть, что разность фаз не равна нулю между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Это может говорить о том, что, по-видимому, крутильные колебания пятен являются вынужденными колебаниями, которые затухают со временем для различных пятен по-своему. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания составляющих как вектора скорости, так и вектора магнитного поля. По данным табл. 2 были построены зависимости начальных фаз колебаний составляющих от широты положения пятна (рис. 3). Они показали, что начальные фазы колебаний всех составляющих (и вектора магнитного поля, и вектора скорости) увеличиваются с увеличением широты пятна.

На основании данных табл. 2 были вычислены 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 в полутени  $\rho = 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>, соответствующей плотности невозмущенной фотосферы. Результаты вычислений даны в табл. 3. Во всех случаях плотность кинетической энергии колебаний составляющих скорости меньше плотности магнитной энергии колебаний. В подавляющем большинстве случаев это различие достигает 1-2 порядков. Имеется некоторая тенденция уменьшения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение четырех одиночных пятен показало, что период колебаний их полутени составляет 3.4—7.7 сут. Период принят одинаковым для всех составляющих скорости и магнитного поля для одного и того же пятна.

Амплитуды и начальные фазы колебаний для каждой из составляющих получились разными.

Имеются и другие проблемы. Азимутальная скорость вращения пятна, полученная из фотогелиограмм, определяется выражением

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

где  $R$  — радиус внешней границы полутени (табл. 1),  $A$  — средняя амплитуда поворота пятна. Если эту азимутальную скорость  $V_p$  численно приравнять азимутальной скорости  $V_f$ , вычисленной по данным лучевой скорости, мы можем определить среднюю угловую скорость вращения пятна:

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

Результаты вычислений  $A/T$  приведены в табл. 2. Максимальный угол поворота пятна не превышает 60 град/сут [14]. Видно, что азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, больше, чем азимутальная скорость, измеренная на основании фотогелиограмм. Это подтверждается результатами [7, 21]. В тоже время закручивание силовых линий магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам [9]. Физические причины различия значений скоростей пока остаются неясными. Возможно, эти эффекты связаны с тонкой структурой и неоднородностью магнитного поля и плазмы в полутени пятен.

Разность фаз между колебаниями азимутальной составляющей и всеми другими составляющими одного и того же пятна различна, отличается она и для разных пятен. Она находится в основном в интервале  $0-\pi$ , кроме четырех случаев, которые превышают это значение (табл. 2). Разность фаз не равна нулю между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Это может означать, что крутильные колебания пятна являются вынужденными колебаниями; возможно наличие магнитозвуковых колебаний. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания составляющих как вектора скорости, так и вектора магнитного поля. Начальные фазы колебаний всех составляющих (и вектора магнитного поля, и вектора скорости) увеличиваются с увеличением широты пятна (рис. 3). Для достоверного установления начальных фаз колебаний различных составляющих, конечно, требуются более частые данные наблюдений.

По данным табл. 2 при плотности плазмы в полутени  $10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> были вычислены отношения плотности кинетической энергии к плотности магнитной энергии колебаний для соответствующих составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля (табл. 3). Во всех случаях плотность кинетической энергии меньше плотности магнитной энергии. В подавляющем большинстве случаев это различие достигает 1-2 порядков. Имеется некоторая тенденция уменьшения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

Таблица 3. Отношение кинетической энергии колебаний  $E_k$  к магнитной энергии  $E_m$

$\varphi$	$E_k(f)/E_m(f)$	$E_k(r)/E_m(r)$	$E_k(z)/E_m(z)$
16°	0.00821	0.43878	0.01841
28	0.01674	0.06592	0.02612
37	0.00526	0.16550	0.05954
-6	0.44457	0.07164	0.80962



Автор благодарна С. И. Гопасюку за постоянное внимание к работе.

1. *Гопасюк О. С.* Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. II. Наблюдения в линии  $H_{\beta}$  // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 5.—С. 413—420.
2. *Гопасюк О. С.* Движения плазмы над тенью солнечного пятна вблизи уровня фотосфера — хромосфера. Структура магнитного поля // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 3.—С. 230—240.
3. *Гопасюк О. С.* Изменение с высотой магнитного поля в тени пятен // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 6.—С. 496—502.
4. *Гопасюк О. С.* Структура магнитного поля одиночного пятна // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 2.—С. 126—137.
5. *Гопасюк С. И.* Временные изменения структуры поперечного магнитного поля в группах пятен и оптические явления // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1965.—33.—С. 100—110.
6. *Гопасюк С. И.* Фотосферные движения газа в одиночном пятне // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1977.—57.—С. 107—121.
7. *Гопасюк С. И.* Некоторые особенности вращения пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1981.—64.—С. 108—118.
8. *Гопасюк С. И.* Крутильные колебания и диагностика структуры подфотосферного магнитного поля // Астрон. журн.—1984.—61, вып. 1.—С. 157—162.
9. *Гопасюк С. И.* Структура и динамика магнитного поля в активных областях на Солнце // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Солнечные вспышки. — М., 1987.—34.—С. 6—77.
10. *Гопасюк С. И.* О крутильных колебаниях магнитных трубок // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1992.—85.—С. 32—35.
11. *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.
12. *Гопасюк С. И., Залесов И. П.* Цифровой вектор-магнитограф. I. Канал продольного поля. // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 5.—С. 48—54.
13. *Гопасюк С. И., Лазарева Л. Ф.* Поле скоростей и вспышечная активность в группе пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1986.—74.—С. 84—92.
14. *Гопасюк С. И., Лямова Г. В.* Крутильные колебания солнечных пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1987.—77.—С. 17—24.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *Bray R. J., Loughhead R. E.* Sunspots. — London: Chapman and Hall Ltd, 1964.—303 p.
19. *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.
20. *Gopasyuk S. I.* Motions in sunspots like torsional oscillations // Sun and planetary system / Eds W. Fricke, G. Teleki. — Dordrecht: D. Reidel, 1982.—P. 125—126.
21. *Gopasyuk S. I.* Velocity field and some aspects of solar activity // Proc. of 10th European regional astronomy meeting of the IAU, Praha, Czechoslovakia / Eds L. Hejna, M. Sobotka. — Praha, 1987.—V. 1. The Sun,—P. 137—145.
22. *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.
23. *Moore Ch. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum from 2935 Å to 8770 Å. — Washington, 1966.—349 p.

Поступила в редакцию 09.06.04