

УДК 523.98

О крутильных колебаниях тени солнечных пятен

О.С. Гопасюк

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 31 января 2007 г.

Аннотация. Вращение тени пятен исследовано по наблюдениям продольного магнитного поля и поля скоростей в фотосферной линии Fe I $\lambda 5253$ Å. Используются данные наблюдений семи одиночных пятен. Восстановлены вертикальная, радиальная и азимутальная составляющие вектора магнитного поля и вектора скорости. Все три составляющие обоих векторов показали, что вращение пятен подобно крутильным колебаниям. Периоды колебаний тени пятна находятся в интервале 2.2–7.1 суток. Периоды увеличиваются с увеличением широты, на которой располагается пятно. При плотности плазмы 10^{-7} г см⁻³ плотность магнитной энергии колебаний превышает плотность их кинетической энергии до 1 000 раз. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе все другие составляющие вектора скорости и вектора магнитного поля. Полученные результаты позволяют заключить, что крутильные колебания являются вынужденными.

ON SUNSPOT UMBRA TORSIONAL OSCILLATIONS, *by O.S. Gopasyuk* Rotation of a sunspot umbra is investigated on the observations of the longitudinal magnetic and velocity fields in the photospheric line Fe I $\lambda 5253$ Å. Observational data of seven single sunspots were used. The vertical, the radial and the azimuthal components of the magnetic and the velocity fields were reconstructed. All three components of both vectors have shown, that the rotation of a sunspot umbra is similar to the torsional oscillations. The periods of oscillations are in an interval 2.2–7.1 days. The period increases with an increase of the sunspot latitude. The phase of the azimuthal component of velocity was ahead of the phase of all other components of velocity and magnetic field. The magnetic energy of oscillations exceeds their kinetic energy by a factor up to 1 000 (if the plasma density is 10^{-7} g sm⁻³). The results obtained allow us to conclude, that the torsional oscillations of sunspots are forced oscillations.

Ключевые слова: Солнце, одиночные пятна, магнитное поле, поле скоростей, крутильные колебания

1 Введение

Крутильные колебания пятен с периодом около 6 суток были обнаружены Гопасюком (1981, 1982) на основании наблюдений лучевых скоростей в фотосфере, фотогелиограмм и изображений активных областей в H_{α} . Исследования крутильных колебаний 131 пятна по фотогелиограммам (Гопасюк, Лямова, 1987) показали, что крутильные колебания не уникальное, а, скорее, характерное состояние пятен. Браун и др. (2003) по снимкам в белом свете с привлечением снимков в линии H_{α} , УФ-изображений (1 600 Å, 170 Å) и SOHO/MDI-магнитограмм определили периоды вращения пятен вокруг своей оси, которые составили 3–5 дней.

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 глубоких слоев. В годы максимума конвективные движения имеют более высокие скорости и большие размеры конвективных элементов (Гопасюк, Лямова, 1987).

Определение вращения пятен по лучевым скоростям – задача чрезвычайно трудоемкая (Кинман, 1952; Ламб, 1975; Гопасюк, 1977). Именно поэтому исследования вращения пятен по полю скоростей проведены только в отдельных случаях. Создание метода вычисления всех трех составляющих вектора по его лучевой составляющей (Гопасюк, Гопасюк, 1998) существенно упростило решение проблемы и расширило возможности исследования вращения пятен. Характер магнитного поля и движений плазмы в тени и полутени пятен различный. В полутени пятна магнитное поле преимущественно горизонтальное и горизонтальные движения плазмы наиболее интенсивны. В тени – магнитное поле вертикальное и горизонтальные движения слабее. Это обстоятельство обуславливает проведение исследований крутильных колебаний отдельно в тени и полутени. Исследования вращения полутени в одиночных пятнах, по данным наблюдений в них поля лучевых скоростей и продольного магнитного поля в фотосферной линии, были проведены Гопасюк (2004а,б) и Гопасюк, Гопасюк (2005). Определены основные характеристики колебаний полутени. Период колебаний полутени составил 3.4–7.7 дней.

В настоящей работе мы представили результаты исследования крутильных колебаний тени семи одиночных пятен.

2 Наблюдения

Данные наблюдений продольного магнитного поля и лучевых скоростей семи одиночных пятен в фотосферной линии Fe I $\lambda 5253 \text{ \AA}$ были получены в Крымской астрофизической обсерватории в сентябре 1978 г. на двойном магнитографе (Котов и др., 1982) и в августе 2000 г. на быстродействующем цифровом магнитографе (Гопасюк, Залесов, 1996) Башенного солнечного телескопа. Входная щель спектрографа во все дни наблюдений составляла $1'' \times 2''$. Сканирование изображения Солнца относительно щели спектрографа осуществлялось с помощью фотогида (Границкий и др., 1977) вдоль суточной параллели со скоростью $2.23''/\text{с}$ в 1978 г. и со скоростью $20''/\text{с}$ в 2000 г.

Линия Fe I $\lambda 5253 \text{ \AA}$ имеет простое магнитное расщепление с фактором Ланде $g = 1.5$. Ее эквивалентная ширина в центре солнечного диска составляет 75 \AA . Потенциал возбуждения нижнего уровня равен 3.28 эВ (Мур и др., 1966). Линия слабо чувствительна к температуре; в пятне несколько усиливается (Мур и др., 1966). При регистрации магнитного поля и доплеровских движений в Fe I $\lambda 5253 \text{ \AA}$ входные щели фотометра пропускали свет в интервале от 35 до 90 \AA от центра линии и в пределах $\pm 35 \text{ \AA}$ от центра линии при регистрации яркости в ее ядре. В этом случае величина магнитного поля, соответствовавшая сдвигу центра σ -компонент на середину щелей фотометра, была равной 3 238 Гс .

Данные о положении каждого пятна на Солнце во время наблюдений приведены в табл. 1. В табл. 1 указаны даты наблюдений, долгота и широта центра каждого пятна, а также радиусы области тени, в пределах которой исследовались колебания. За время наблюдений размеры пятен менялись мало.

3 Определение основных характеристик крутильных колебаний

3.1 Метод

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

Таблица 1. Характеристики исследуемых пятен

Дата	Долгота	Широта	R
13 – 18 Сент. 1978	E18 – W45	N16	15.2''
15 – 22 Сент. 1978	E39 – W53	N28	16.8''
13 – 20 Сент. 1978	E54 – W53	N37	10.1''
8 – 12 Авг. 2000	E06 – W47	N18	13.5''
18 – 22 Авг. 2000	E27 – W25	S06	12.2''
18 – 21 Авг. 2000	E20 – W20	N13	9.5''
22 – 25 Авг. 2000	E09 – W31	S10	13.0''

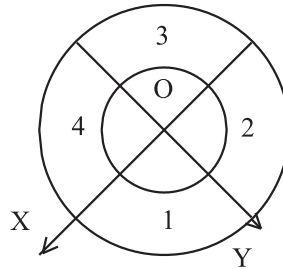


Рис. 1. Схематическое представление внешних границ тени и полутени пятна. Начало новой системы координат совмещено с центром пятна. Положительное направление оси ОХ соответствует направлению центр пятна – центр солнечного диска. Цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены номера квадрантов

определено ее среднее положение. На основании исследований Брэя и Лоухед (1964) яркость тени была взята $I \leq 0.7$. Введена новая система координат, начало которой совмещено с центром тени и положительной осью ОХ, направленной на центр солнечного диска (рис. 1). Ось ОZ направлена вертикально вверх. Новая система и система координат исходной карты связаны между собой соотношениями преобразования координат. Метод, определяющий связь между системами координат, подробно изложен Гопасюк и Гопасюк (1998).

Наличие осевой симметрии магнитного поля и поля скоростей позволяет восстановить все три составляющие обоих векторов: вертикальную H_z (V_z), радиальную – вдоль радиуса пятна H_r (V_r) и азимутальную H_f (V_f) по полю их лучевой составляющей. В цилиндрических координатах лучевая составляющая поля $H_{||}$ ($V_{||}$)

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

где Θ – гелиоцентрический угол, η – азимут вектора поперечного поля, отсчитываемый против часовой стрелки от оси ОХ (новой системы координат), проекция которой на картинную плоскость совпадает с радиус-вектором, проведенным из центра пятна в центр солнечного диска (Гопасюк, Гопасюк, 1998). На картах обычно ось ОХ 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 (Гопасюк, Гопасюк, 1998):

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

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

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

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 (Гопасюк, Гопасюк, 1998). $N(2,3)$; $N(3,4)$; $N(1,2)$ имеют аналогичный смысл.

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.

3.2 Период, амплитуда, начальная фаза крутильных колебаний

Для каждой записи продольного магнитного поля и лучевой скорости по выражениям (2)–(4) были вычислены все три составляющие обоих векторов. При вычислениях был учтен наклон магнитной оси исследуемых пятен к западу на 10° (Гопасюк, 2003). Если в течение дня проводилось несколько серий наблюдений, то брались средние значения составляющих за день. Данные вычислений для каждого пятна каждой составляющей обоих векторов 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 , T , α – амплитуда, период и начальная фаза колебаний. Примеры аппроксимации синусоидой временных зависимостей для тени пятна, находящегося на широте N16, показаны на рис. 2.

Для каждой составляющей на основании выражения (5) были вычислены период, амплитуда и начальная фаза колебаний. Результаты вычислений представлены в табл. 2. Период колебаний всех составляющих обоих векторов для каждого пятна один и тот же. Периоды колебаний в тени исследуемых пятен лежат в интервале 2.2–7.1 суток. Начальные фазы колебаний находятся в интервале $0-2\pi$. Разность фаз между колебаниями азимутальной составляющей и всеми другими составляющими обоих векторов для одного и того же пятна, как правило, разная и 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 периода колебаний от широты положения пятна. Периоды колебаний увеличиваются с ростом широты пятна.

Правильность этих выводов может быть подтверждена наблюдениями, проводящимися с большей частотой, например, одно наблюдение в час. К сожалению, на сегодняшний день таких данных мы не имеем.

Чтобы подтвердить правильность выбора синусоиды, в качестве аппроксимирующей кривой, мы представили наши данные в виде рис. 3. Каждая составляющая имеет собственные амплитуду и начальную фазу. Чтобы использовать все данные, амплитуды каждой из составляющих были приведены к единице и определены фазы каждой точки. Интервал $0-2\pi$ разделен на 10 зон, в каждой из которых было вычислено среднее значение фазы. Таким образом, все данные вычислений для магнитного поля и поля скорости $f(H, V)$ были представлены в зависимости от фазы (рис. 3). Изменение средних нормированных значений $f(H, V)$ магнитного поля и поля скорости аппроксимируется синусоидой. Рис. 3 показывает, что аппроксимация синусоидой наших данных является корректной, амплитуда превышает стандартную ошибку в 6–8 раз.

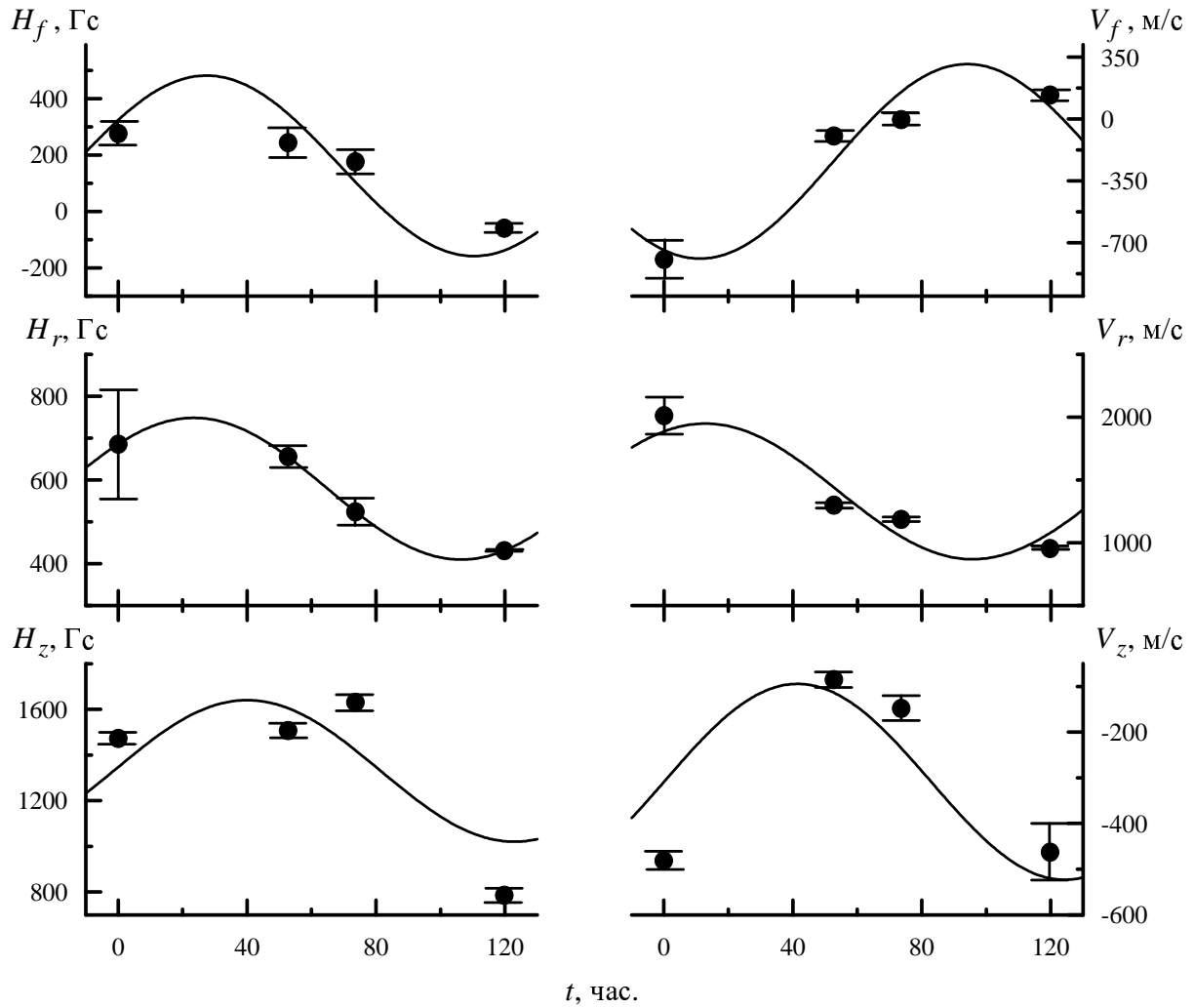


Рис. 2. Зависимости от времени t составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости в тени пятна (широта пятна N 16, период колебаний 6.9 суток). Показана величина вероятной ошибки. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проведены синусоиды

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

Широта	Период, сут.	H_f		H_r		H_z		V_f		V_r		V_z	
		$A, \text{Гс}$	$\alpha, \text{ч}$	$A, \text{Гс}$	$\alpha, \text{ч}$	$A, \text{Гс}$	$\alpha, \text{ч}$	$A, \text{м/с}$	$\alpha, \text{ч}$	$A, \text{м/с}$	$\alpha, \text{ч}$	$A, \text{м/с}$	$\alpha, \text{ч}$
N16	6.9	320.2	13.2	169.3	18.5	310.1	2.6	550.0	113.5	540.0	29.0	214.5	0.0
N28	5.2	1045.3	110.0	1035.1	99.0	875.9	96.8	550.4	112.2	1423.6	110.0	540.1	110.0
N37	7.1	330.3	153.9	302.4	99.9	320.2	91.8	137.4	156.6	406.0	143.1	93.1	70.2
N18	5.6	377.9	4.3	171.1	109.2	188.2	124.2	450.2	132.7	437.0	115.6	49.8	126.3
S10	5.2	317.5	0.0	74.6	20.0	105.6	53.0	377.0	85.0	315.0	83.0	26.0	0.0
S06	2.2	165.1	8.4	119.6	17.6	161.8	9.2	187.0	52.1	178.0	10.1	120.0	20.2
N13	3.3	604.5	1.2	396.5	55.0	225.7	13.7	1439.3	77.5	390.5	65.0	100.1	0.0

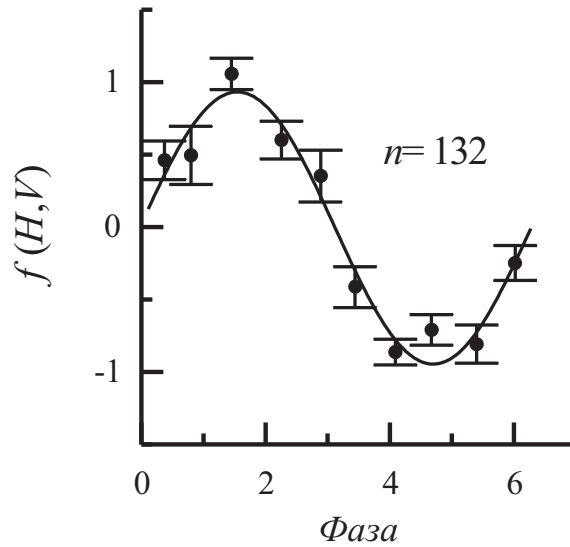


Рис. 3. Изменение средних нормированных величин амплитуд $f(H, V)$ магнитного поля и поля скорости в зависимости от фазы. Синусоида проведена методом наименьших квадратов

3.3 Угол поворота пятна в сутки

Так же как и в более ранних работах (Гопасюк, 1981, 1982; Гопасюк, 2004а,б), остается проблема несоответствия скорости вращения пятна, вычисленной по лучевым скоростям, со скоростью вращения пятна, полученной из фотогелиограмм. Если принять, что вращение тени пятна, определяемое по фотогелиограммам, твердотельное, то азимутальная скорость вращения пятна, полученная из фотогелиограмм

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

где R – радиус внешней границы тени (табл. 1) и Am – средняя амплитуда вращения пятна. Численно приравнявая азимутальную скорость V_p к азимутальной скорости V_f , вычисленной по данным лучевой скорости, получаем, что средняя угловая скорость вращения тени пятна

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

Результаты вычислений средней угловой скорости вращения тени пятна (Am/T) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Величина угла поворота тени пятен

Широта	T , сут.	Am/T , °/сут.
N16	6.9	247
N28	5.8	224
N37	7.1	91
N18	5.6	228
N13	3.3	1034
S06	2.2	105
S10	5.2	184

По результатам исследований Гопасюк, Лямовой (1987), Браун и др. (2003) максимальный угол поворота пятна не превышает 60 градусов в сутки. Из расчетов (табл. 3) видно, что азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, значительно больше, чем азимутальная скорость, измеренная на основании фотогелиограмм. Для полутени пятна эта проблема тоже имеет место (Гопасюк, 2004а,б). В то же время закручивание силовых линий магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам (Гопасюк, 1987). Физические причины различия в величинах 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.

3.4 Магнитная и кинетическая энергия колебаний

На основании данных об амплитудах колебаний составляющих векторов магнитного поля и поля скорости (табл. 2) определены отношения плотности кинетической энергии E_k к плотности магнитной энергии E_m колебаний для соответствующих составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Вычисления проведены при плотности плазмы 10^{-7} г/см³, соответствующей плотности невозмущенной фотосферы. Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Таблица 4. Отношение плотностей энергий колебаний

Широта	T , сут.	$E_k(f)/E_m(f)$	$E_k(r)/E_m(r)$	$E_k(z)/E_m(z)$
N16	6.9	0.037	0.128	0.006
N28	5.2	0.003	0.024	0.005
N37	7.1	0.002	0.023	0.001
N18	5.6	0.018	0.082	0.001
S06	2.2	0.016	0.028	0.007
S10	5.2	0.018	0.222	0.001
N13	3.3	0.071	0.012	0.002

Как видно из данных табл. 4, плотность кинетической энергии колебаний составляющих скорости меньше плотности магнитной энергии колебаний. В некоторых случаях это различие достигает почти 3 порядков. Имеется некоторая тенденция уменьшения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

4 Заключение

Изучение семи одиночных пятен по наблюдениям продольного магнитного поля и лучевых скоростей в фотосферной линии Fe I $\lambda 5253$ Å показало, что периоды колебаний их тени составили 2.2–7.1 суток. Для одного и того же пятна период был одинаковым для всех составляющих скорости и магнитного поля. Амплитуды и начальные фазы колебаний тени для каждой из составляющих – разные. Период колебаний увеличивается с ростом широты, на которой располагается пятно (табл. 2). Это может означать, что крутильные колебания пятен связаны с вращением Солнца.

Так же как и в более ранних работах (Гопасюк, 1981, 1982; Гопасюк, 2004а,б), остается нерешенной проблема несоответствия скорости вращения пятна, вычисленной по лучевым скоростям, со скоростью вращения пятна, полученной из фотогелиограмм. Гопасюк (1981) показал, что скорость вращения пятен, вычисленная по фотогелиограммам, в 5–6 раз меньше азимутальной скорости, вычисленной по полю лучевых скоростей. Из наших расчетов (табл. 3) видно, что азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, значительно больше, чем азимутальная скорость, измеренная на основании фотогелиограмм. В то же время закручивание силовых линий магнитного

поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотоголиограммам (Гопасюк, 1987). Физические причины различия в величинах скоростей пока остаются неясными. Возможно, эти эффекты связаны с тонкой структурой и неоднородностью магнитного поля и плазмы в тени пятен. Безусловно, эти проблемы требуют дальнейших исследований.

Для одноименных составляющих векторов скорости и магнитного поля были вычислены отношения плотностей кинетической и магнитной энергий колебаний (табл. 4). Расчеты были проведены при плотности плазмы в тени 10^{-7} г/см³. Во всех случаях плотность кинетической энергии меньше плотности магнитной энергии. В подавляющем большинстве случаев это различие достигает почти 3-х порядков. Имеется некоторая тенденция уменьшения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

Полученные результаты позволяют заключить, что крутильные колебания пятен являются вынужденными.

Литература

- Брей, Лоухед (Bray R.J., Loughhead R.E.) // Sunspots. London. Chapman and Hall Ltd. 1964.
- Браун и др. (Brown D.S., Nightingale R.W., Alexander D., Schrijver C.J., Metcalf T.R., Shine R.A., Title A.M., Wolfson C.J.) // Solar Phys. 2003. V. 216. P. 79.
- Гопасюк О.С. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2003. Т. 19. №. 2. С. 126.
- Гопасюк О.С. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2004а. Т. 20. №. 5. С. 387.
- Гопасюк (Gorasyuk O.S.) // Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. Proc. IAU Symp. N. 223. / Eds Stepanov A.V., Benevolenskaya E.E., Kosovichev A.G. Cambridge University Press. 2004. P. 249.
- Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. Т. 57. С. 107.
- Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1981. Т. 64. С. 108.
- Гопасюк (Gorasyuk S.I.) // Sun and Planetary System. / Eds Fricke W., Teleki G. Dordrecht: D. Reidel Publ. Company. 1982. P. 125.
- Гопасюк С.И. // Структура и динамика магнитного поля в активных областях на Солнце. Итоги науки и техники. Астрономия. Т. 34. Солнечные вспышки. М.: ВИНТИ. 1987. С. 6.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1998. Т. 14. №. 5. С. 389.
- Гопасюк, Гопасюк (Gorasyuk S.I., Gorasyuk O.S.) // Solar Phys. 2005. V. 231. N. 1–2. P. 11.
- Гопасюк С.И., Залесов И.П. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1996. Т. 12. №. 5. С. 48.
- Гопасюк С.И., Лямова Г.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1987. Т. 77. С. 17.
- Границкий Л.В., Границкая Л.А., Дидковский Л.В., Никулин Н.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. Т. 56. С. 181.
- Кинман (Kinman T.D.) // Mon. Not. R. Astr. Soc. 1952. V. 112. №. 4. P. 425.
- Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С. 3.
- Ламб (Lamb S.A.) // Mon. Not. R. Astr. Soc. 1975. V. 172. №. 1. P. 205.
- Мур и др. (Moore Ch.E., Minnaert M.G.J., Houtgast J.) // The solar spectrum from 2935 Å to 8770 Å. Washington. 1966.