

ВЫВОДЫ

Показано, что динамика наблюдаемого ВКМ разумно согласуется с динамикой движения магнитно-вихревого кольца. Продемонстрировано, что модель магнитно-вихревого кольца позволяет объяснить эффекты расширения ВКМ, его устойчивость и возможность движения не по нормали к поверхности Солнца.

В дальнейшем авторы надеются учесть более тонкие эффекты динамики ВКМ (диссипация, количество присоединенной массы) и исследовать механизмы образования магнитно-вихревого кольца.

1. Застенкер Г. Н., Зеленый Л. М. Солнечные магнитные облака атакуют Землю // Земля и Вселенная.—1999.— № 5.—С. 46.
2. Ладиков-Роев Ю. П. Магнитно-вихревые кольца // Изв. АН СССР. Сер. техн. наук, механики и машиностроения.—1960.—№ 4.—С. 7—13.
3. Ладиков-Роев Ю. П. Некоторые задачи динамики магнитно-вихревых конфигураций // Прикладная математика и механика.—1960.—24, вып. 5.—С. 897—905.
4. Ладиков-Роев Ю. П., Сальников Н. Н. К вопросу о сложном поведении динамических систем. Динамика движения системы вихрей в идеальной жидкости // Проблемы управления и информатики.—2002.—№ 3.—С. 47—60.
5. Ламб. Гидродинамика. — М.-Л., 1947.
6. Прист Э. и др. Космическая магнитная гидродинамика: Пер. с англ. / Под ред. Э. Приста и А. Худа. — М.: Мир, 1995.
7. Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

8. Gopalswamy N., Thompson B. J. Early life of coronal mass ejections // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.—2000.—62, N 16.—P. 1457—1469.
9. Gopalswamy N. Coronal mass ejections: Initiation and detection // Advances in Space Research.—2003.—31, N 4.—P. 869—881.
10. Gostling J. T. Coronal Mass Ejections // Geophys. Monograph.—1997.—99.—P. 4201—4219.
11. Lin J., Soon W. Evolution of morphological features of CMEs deduced from catastrophe model of solar eruptions // New Astronomy.—2004.—9, N 8.—P. 611—628.
12. Linker J. A. et al. Flux cancellation and coronal mass ejections // Physics of Plasmas.—2003.—10, N 5.—P. 1971—1978.
13. Pick M., Maia D., Marque Ch. Solar radio observations and development of coronal mass ejections // Advances in Space Research.—2003.—32, N 4.—P. 467—472.
14. Russell C. T., Mulligan T. On the magnetosheath thicknesses of interplanetary coronal mass ejections // Planetary and Space Sci.—2002.—50, N 5/6.—P. 527—534.

MAGNETO-VORTICAL MODEL OF CORONAL MASS EJECTION

Yu. P. Ladikov-Roev, A. A. Linnik, N. N. Salnikov, O.K.Cherepnykh

The model of coronal mass ejections (CME) from the Sun as magneto-vortical structure is proposed. The model allowed one to explain effects of expansion of CME, their stability and movement not along the normal to the Sun's surface; these phenomena were not explained in the framework of the models proposed before. Calculations carried out with the use of the model are in good agreement with observed CME movement data.

УДК 523.9

© О. С. Гопасюк, С. И. Гопасюк

Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»

О КОЛЕБАНИЯХ ПОЛУТЕНИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Досліджено коливання півтіні чотирьох одиночних плям за спостереженнями променеви складових магнітного поля і швидкості у фотосферній лінії Fe I λ 525.3 нм. За променевою складовою були відтворені всі три складові векторів. Період коливань склав 3.4—7.7 сут. Для кожної плями коливання азимутальної складової швидкості випереджували по фазі коливання всіх інших складових векторів магнітного поля і швидкості. При густині плазми у півтіні 0.1 г/м^3 , що відповідає густині незбуреної фотосфери, густина кінетичної енергії коливань менша, ніж густина магнітної енергії на 1-2 порядки.

Крутильные колебания пятен с периодом около 6 сут были обнаружены в 1981 г. [3] на основании наблюдений лучевых скоростей в фотосфере, фотогелиограмм и изображений активных областей в H_{α} . В дальнейшем [8] было показано, что крутильные колебания пятен не уникальное, а скорее, характерное явление их состояния. Спектр колебаний одиночных пятен отличается от спектра колебаний пятен в группах. Амплитуда колебаний уве-

личивается с ростом периода. Период и амплитуда становятся больше к максимуму солнечной активности [8]. Данные о крутильных колебаниях были использованы для определения структуры магнитного поля и движений плазмы в подфотосферных слоях [4].

Угол закрученности структуры поперечного поля на границе полутень — фотосфера соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелио-

раммам. Скорость вращения пятен, вычисленная по фотогелиограммам, в 5—6 раз меньше азимутальной скорости, вычисленной по полю лучевых скоростей [3]. Появление вспышек тесно коррелирует с вращением пятен [2, 7].

Подобные результаты по вращению пятен были получены в [10] по снимкам в белом свете с привлечением H_{α} -снимков, УФ-изображений ($\lambda\lambda$ 160.0 нм, 17.0 нм) и SOHO/MDI магнитограмм.

Ниже изложены результаты исследований крутильных колебаний полутени четырех одиночных пятен по наблюдениям лучевых составляющих магнитного поля и скорости в фотосферной линии.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Наблюдения трех одиночных пятен были получены в 1978 г. на двойном магнитографе [9] и одного пятна в 2000 г. на быстродействующем цифровом магнитографе [6] БСТ НИИ КраО. Во все дни наблюдений входная щель спектрографа составляла $1'' \times 2''$. Продольные магнитные поля, лучевые скорости и яркости были измерены в линии Fe I λ 525.3 нм, фактор Ланде которой равен 1.5. 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 σ -компонентов на середину щелей фотометра, соответствовала напряженности 323.8 мТл. Дата наблюдений, широта φ каждого пятна, радиусы области полутени, в которой исследовались колебания, приведены в таблице.

По каждой карте яркости в пятне была выделена полутень пятна с яркостью $0.7 \leq I \leq 0.9$. Наличие осевой симметрии у магнитного поля и поля скоростей одиночных пятен позволило восстановить все три составляющие (вертикальную, радиальную — вдоль радиуса пятна и азимутальную) обоих векторов по полю их лучевой составляющей [5]. 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. Данные вычислений для каждого пятна каждой из составляющих были представлены в зависимости от времени t , для них методом наименьших квадратов была подобрана синусоида

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

где A — амплитуда, T — период и α — начальная фаза колебания.

Основные характеристики пятен и их колебаний

Параметр	13—18 сентября 1978	15—22 сентября 1978	13—20 сентября 1978	18—22 августа 2000
φ , град	16	28	37	-6
Радиус ($I=0.7$), сд	15.2	16.8	10.1	12.2
Радиус ($I=0.9$), сд	19.7	22.9	14.1	18.7
T , сут	6.9	6.5	7.7	3.4
H_f A, мТл	21.8	37.2	23.3	4.8
α , ч	7.9	130.0	153.4	20.8
H_r A, мТл	22.0	18.8	19.3	11.3
α , ч	105.6	60.0	112.1	13.0
H_z A, мТл	6.8	28.0	9.9	1.5
α , ч	110.9	132.5	100.3	31.2
V_f A/T, град/сут	58	123	71	99
A, м/с	176.2	429.3	150.8	285.5
α , ч	116.2	140.0	156.4	53.3
V_r A, м/с	1300.0	430.6	700.4	269.8
α , ч	42.2	137.5	153.4	50.7
V_z A, м/с	82.3	403.7	215.5	120.4
α , ч	110.9	135.0	20.7	2.6
$E_k(f)/E_m(f)$	0.00821	0.01674	0.00526	0.44457
$E_k(r)/E_m(r)$	0.43878	0.06592	0.16550	0.07164
$E_k(z)/E_m(z)$	0.01841	0.02612	0.05954	0.80962

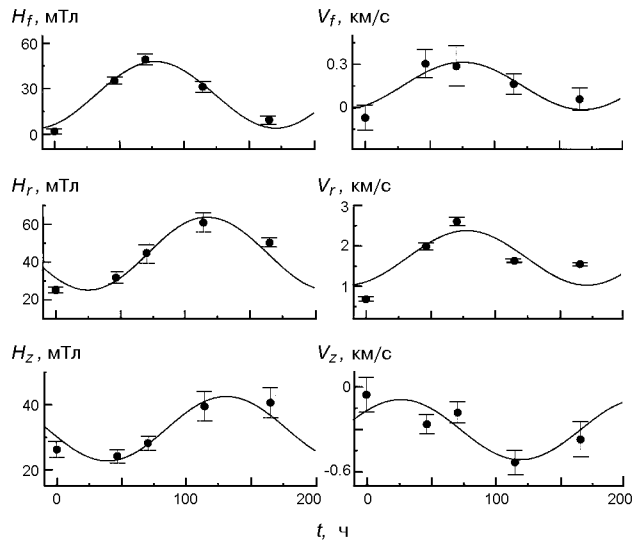


Рис. 1. Изменение со временем составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости для пятна с $\varphi \approx 37^\circ$. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проведены синусоиды

На рис. 1 показаны примеры аппроксимации временных зависимостей синусоидой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой составляющей каждого пятна были вычислены амплитуда, период и начальная фаза

колебаний. Результаты вычислений A , T и α приведены в таблице. 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 одинаков, амплитуды и начальные фазы их разные.

Азимутальная скорость вращения пятна, вычисленная по фотогелиограммам (твердотельное вращение):

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

где R — радиус внешней границы полутени (таблица) и A — средняя амплитуда поворота пятна. Приравняв эту скорость V_p азимутальной скорости V_f , вычисленной по данным лучевой скорости, находим среднюю угловую скорость вращения пятна:

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

Результаты вычислений A/T (град/сут) приведены в таблице. Согласно измерениям [8] максимальная скорость вращения пятна меньше 60 град/сут. Из данных вычислений видно, что азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, больше, чем азимутальная скорость, измеренная на основании фотогелиограмм, что согласуется с данными [3]. В то же время закручивание силовых линий поперечного магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам [2]. Возможно, это наблюдаемое несоответствие связано с тонкой структурой и неоднородностью магнитного поля и плазмы в полутени пятен.

Разность фаз не равна нулю между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания остальных составляющих как вектора скорости, так и вектора магнитного поля. Это может означать, что крутильные колебания пятна являются вынужденными колебаниями. Начальные фазы колебаний всех составляющих (и вектора магнитного поля, и вектора скорости) увеличиваются с ростом широты пятна (рис. 2).

По данным таблицы 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 $\rho = 0.1 \text{ г/м}^3$, соответствующей плотности невозмущенной фотосферы. Во всех случаях плотность кинетической энергии колебаний составляющих скорости оказалась мень-

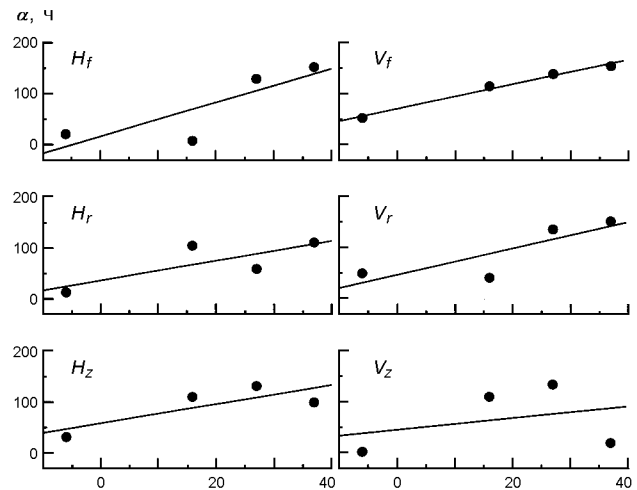


Рис. 2. Изменение начальной фазы α колебаний составляющих вектора магнитного поля и вектора скорости в зависимости от широты φ пятна

ше 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

Итак, выделим наиболее важные положения.

Период колебаний полутени по наблюдениям четырех пятен составил 3.4—7.7 сут.

Разность фаз не равна нулю между колебаниями одноименных составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания составляющих как вектора скорости, так и вектора магнитного поля. Азимутальная скорость, вычисленная из поля скоростей, больше азимутальной скорости, измеренной на основании фотогелиограмм. В то же время закручивание силовых линий поперечного магнитного поля на внешней границе полутени соответствует углу поворота пятна, вычисленного по фотогелиограммам. Начальные фазы колебаний всех составляющих (и вектора магнитного поля, и вектора скорости) увеличиваются с ростом широты пятна (рис. 2).

При плотности плазмы $\rho = 0.1 \text{ г/м}^3$, соответствующей плотности невозмущенной фотосферы, для одноименных составляющих плотность кинетической энергии меньше плотности магнитной энергии. В большинстве случаев это различие достигает 1-2 порядков. Имеется некоторая тенденция умень-

шения отношения этих энергий с увеличением широты, на которой находится пятно.

1. Гопасюк О. С. Структура магнитного поля одиночного пятна // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 2.—С. 126—137.
2. Гопасюк С. И. Временные изменения структуры поперечного магнитного поля в группах пятен и оптические явления // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1965.—33.—С. 100—110.
3. Гопасюк С. И. Некоторые особенности вращения пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1981.—64.—С. 108—118.
4. Гопасюк С. И. Крутильные колебания и диагностика структуры подфотосферного магнитного поля // Астрон. журн.—1984.—61, вып. 1.—С. 157—162.
5. 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.
6. Гопасюк С. И., Залесов И. П. Цифровой вектор-магнитограф. I. Канал продольного поля. // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 5.—С. 48—54.
7. Гопасюк С. И., Лазарева Л. Ф. Поле скоростей и вспышечная активность в группе пятен // Изв. Крым. астрофиз.

обсерватории.—1986.—74.—С. 84—92.

8. Гопасюк С. И., Лямова Г. В. Крутильные колебания солнечных пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории—1987.—77.—С. 17—24.
9. 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.
10. 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.

ON SUNSPOT PENUMBRA OSCILLATIONS

O. S. Gopasyuk, S. I. Gopasyuk

Oscillations of the penumbrae of four sunspots are investigated from the observations of longitudinal components of the magnetic field and velocity in the photospheric line FeI 525.3 nm. The period of oscillations of sunspot penumbrae lies in the range from 3.4 to 7.7 days. The phase of the azimuthal component of the velocity was ahead of the phases of all other components. If the density of plasma in a penumbra is $10 \text{ sup } \{-4\} \text{ kg/m}^3$ (the same as in the photosphere), the magnetic energy of oscillations exceeds the kinetic energy of the same components by a factor of 10 to 100.

УДК 523.9-327:519.246.8:517.443

© Я. И. Зельк¹, Н. Н. Степанян², О. А. Андреева²

¹Институт космічних досліджень НАН України і НКА України, Київ

²Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія»

ВРАЩЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА В ЛИНИИ He I λ 1083 нм

Методи спектрального аналізу часових рядів застосовано до досліджень обертання корональних дір, флоккул і активних областей з групами сонячних плям за спостереженнями в лінії He I λ 1083 нм. Отримано середні характеристики обертання цих утворень за три сонячних цикли. Для 21-го циклу визначено зміни обертання з широтою і часом.

Наблюдаемые на Солнце активные и спокойные образования несомненно связаны между собой. Но в то же время каждый тип образований имеет свои характерные особенности, позволяющие судить об их природе, глубине их источников.

Регулярное получение изображений Солнца в линии He I λ 1083 нм представляет исключительную возможность иметь одновременно информацию о яркости и положении на диске сразу нескольких видов солнечных образований.

Одной из важных характеристик солнечных образований является их дифференциальное вращение и его изменение со временем. К настоящему времени выполнено множество работ по определе-

нию вращения Солнца различными методами. Ранние измерения проводились по трассерам, затем по измерению лучевых скоростей. В последние годы основным стал метод спектрального анализа периодов вращения на основе преобразования Фурье временных рядов наблюдений различного вида. Большинство таких работ касается наблюдений солнечных магнитных полей [2, 4, 5].

Цель данной работы — изучение дифференциального вращения корональных дыр (КД), флоккулов (ФЛ) и мощных активных областей (АО) с группами солнечных пятен по наблюдениям в линии He I λ 1083 нм.

Исходным материалом послужили наблюдения