

© Ю. П. Ладиков-Роев, А. А. Линник,  
Н. Н. Сальников, О. К. Черемных

Институт космических исследований НАНУ і НКАУ, Київ

## МАГНИТНО-ВИХРЕВАЯ МОДЕЛЬ ВЫБРОСОВ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ

Запропоновано модель викидів корональних мас (ВКМ) Сонця у формі магнітно-вихрової структури. Модель дозволила пояснити ефекти розширення ВКМ, їхню стійкість та можливість руху не по нормалі до поверхні Сонця, які не знаходили пояснення у рамках раніше запропонованих моделей. Розрахунки показали добре узгодження моделі із даними спостережень ВКМ.

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее мощные изменения в солнечной короне происходят во время выбросов корональной массы, в ходе которых солнечное вещество из областей солнечной короны уносится наружу в гелиосферу. Такие выбросы имеют энергию порядка  $10^{24}$  Дж и массу  $10^{12}$ — $10^{13}$  кг и вызывают мощные возмущения солнечного ветра, которые в ряде случаев приводят к сильным магнитным бурям на Земле. Физические механизмы выбросов корональной массы (ВКМ) к настоящему времени еще мало изучены. Здесь предложена модель, согласно которой ВКМ представляют собой магнитно-вихревые кольца с облаком присоединенной массы. Движение вихревых колец с вмороженным магнитным полем ранее изучалось в работах [2, 3] с целью объяснения феномена шаровых молний. Мы делаем попытку использовать математическую модель магнитно-вихревого кольца для объяснения свойств корональных выбросов массы. При этом в качестве параметров, определяющих свойства магнитно-вихревого кольца, были взяты наблюдаемые величины начальной скорости и начальных размеров ВКМ. В модели учтено изменение плотности вещества солнечного ветра с увеличением расстояния от Солнца. Численное моделирование показало, что найденная скорость мало отличается от наблюдаемой. Динамика размеров кольца, размеры которого быстро увеличиваются при его движении от Солнца, а потом приобретают стационарное значение, достаточно хорошо согласуется с наблюдениями. Рассчитанное время движения выброса от Солнца до орбиты Земли в рассмотренной математической модели соответствует реально наблюдаемому 6 сут.

Полученные результаты подтверждают возможность интерпретации ВКМ в виде магнитно-вихре-

вого кольца. Необходимо отметить, что предложенная модель является первым приближением в построении модели ВКМ. Она может быть улучшена за счет учета диссипации в вихревом движении и учета потерь внутренней энергии кольца на излучение.

### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВКМ

Выброс вещества из солнечной короны — одно из проявлений солнечной активности, которое еще не изучено до конца. Хотя теории предсказывали существование ВКМ достаточно давно, непосредственное наблюдение ВКМ впервые было произведено в начале 1970-х гг.

ВКМ обычно наблюдаются вместе с другими формами солнечной активности и, подобно им, частота их появления зависит от времени в пределах 11-летнего цикла. По наблюдательным данным ВКМ появляется 3.5 раза в день во время максимума и 0.1 раза в день во время минимума солнечной активности. Иногда ВКМ появляются одновременно с солнечными вспышками, но вспышка не является фактической причиной ВКМ. Возле Солнца скорость ВКМ может принимать значения от 50 до 2000 км/с. Из данных наблюдений известно, что есть два класса ВКМ. Большинство ВКМ составляет первый класс с начальными скоростями ниже 300 км/с, которые продолжают ускоряться до скорости нормального солнечного ветра. Второй класс ВКМ имеет широкий диапазон начальных скоростей, больших чем 300 км/с (больших, чем скорость солнечного ветра). Такие ВКМ должны иметь другую природу ускорения. Иногда направление ВКМ не совпадает с нормалью к поверхности Солнца в месте выброса, когда движение ВКМ происходит под острым углом к поверхности Солнца.

Космические снимки SOHO показывают, что ВКМ быстро расширяется и на протяжении нескольких часов становится намного больше Солнца. Так как расширение происходит одновременно во всех направлениях, то плотность и температура плазмы ВКМ уменьшаются с увеличением расстояния от Солнца быстрее, чем в солнечном ветре. Таким образом, на расстоянии 1 а. е. ВКМ характеризуются аномально низкими температурами по сравнению с характерными температурами солнечного ветра, а на расстоянии приблизительно 3 а. е. — также и низкой плотностью.

Масса обычного ВКМ составляет  $10^{12}$ — $10^{13}$  кг, что составляет приблизительно 5 % от суточной потери массы Солнцем из-за истечения солнечного ветра. Энергия, связанная с ВКМ, составляет  $10^{23}$ — $10^{25}$  Дж (в среднем  $10^{24}$  Дж), в то время как энергия, ежедневно уносимая солнечным ветром, близка к  $2.3 \cdot 10^{25}$  Дж. Таким образом, потери массы и энергии Солнцем вследствие ВКМ глобально не существенны.

#### МОДЕЛИ ВКМ

В настоящее время есть несколько моделей ВКМ. В них обычно полагают, что ВКМ образуются в результате пересоединения магнитных силовых линий. Остановимся на двух наиболее известных моделях.

В первой из них предполагается, что ВКМ появляется из-за пересоединения силовых линий в магнитной аркаде [6—12]. Из-за продольной составляющей магнитного поля вдоль аркады магнитные силовые линии имеют спиральную структуру. Причины, по которым эта спираль движется от Солнца, могут быть различными, например, из-за развития неустойчивости или из-за ускорения солнечным ветром. Эта модель схематически изображена на рис. 1, а.

Во второй модели [6] предполагается, что пересоединение силовых линий происходит вблизи поверхности Солнца, как это изображено на рис. 1, б. В этом случае открытая магнитная петля, сокращаясь, уносит с собой облако плазмы, являющееся частью солнечной короны.

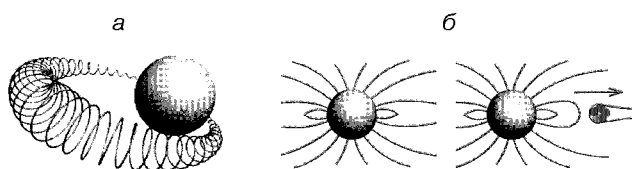


Рис. 1. Модель ВКМ в виде магнитной петли (а) и модель ВКМ из-за перезамыкания силовых линий вблизи Солнца (б)

Однако на ряд вопросов эти модели не отвечают. Так, не совсем ясным в рамках этих моделей является эффект расширения ВКМ. Выше отмечалось, что на расстояниях порядка десятков радиусов Солнца ВКМ характеризуются низкими температурой и плотностью, что исключает возможность объяснить расширение за счет внутреннего газодинамического давления, а механизм расширения магнитным полем маловероятен. Кроме того, в этих моделях не решена проблема равновесия и устойчивости данных конфигураций, а в первой из моделей неизвестна также топология на концах магнитной спирали.

Ранее отмечалось, что выброс может распространяться под острым углом к поверхности Солнца, что указывает на наличие нерадиального компонента собственной скорости выброса [8]. Этот факт трудно объяснить на основании вышеуказанных моделей.

Предлагаемая ниже модель позволяет ответить на указанные вопросы. Наша модель базируется на основном предположении, что ВКМ являются магнитно-вихревыми кольцами [2—4] (рис. 2, а). Устойчивость магнитно-вихревых колец ранее была подтверждена теоретически и экспериментально. Известно, что эти кольца в зависимости от внешних условий могут расширяться или сжиматься, при этом изменяя свою скорость. Последнее свойство этих колец позволяет объяснить расширение ВКМ до экспериментально наблюдаемых плотности и температуры, а также объяснить движение ВКМ не по нормали к Солнцу.

#### МОДЕЛЬ ВКМ В ВИДЕ МАГНИТНО-ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

Ниже приведена простейшая аналитическая модель, рассчитанная из соображений, что ВКМ представляют собой магнитно-вихревые кольца, окруженные облаком присоединенной плазмы. Типичное магнитно-вихревое кольцо схематически изображено на рис. 2, б.

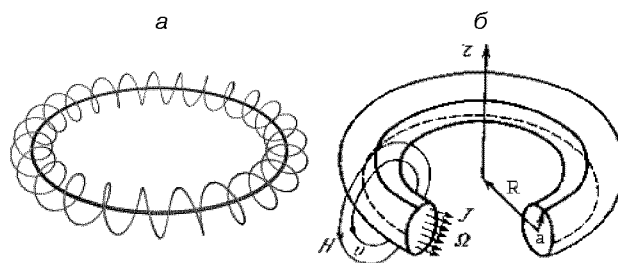


Рис. 2. Топология ВКМ (а) и электродинамическая ВКМ в модели магнитно-вихревого кольца (б)

Следуя подходам, изложенным в работах [2—5], мы получаем следующие уравнения движения ВКМ:

$$\begin{cases} \dot{Z} = \frac{1}{2\pi\rho_1 R \Gamma} \left( \frac{\partial K}{\partial R} - \frac{\partial M}{\partial R} \right) + v_{\text{wind}}, \\ \dot{R} = \frac{-1}{2\pi\rho_1 R \Gamma} \left( \frac{\partial K}{\partial Z} - \frac{\partial M}{\partial Z} \right) + \frac{V(\rho_0 - \rho_1)}{2\pi\rho_1 R \Gamma} \frac{\partial \varphi}{\partial Z}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $K = \rho_1 \Gamma^2 R / 2 \cdot (\ln(8R/a) - 7/4)$  — кинетическая энергия вихревого движения,  $M = I^2 L / 2c^2 = \Phi^2 / 2L$  — энергия магнитного поля внутри кольца,  $L = R\varepsilon$  — индуктивность кольца,  $\varepsilon = \ln(8R/a) - 7/4$ ,  $R$ ,  $a$  — большой и малый радиус кольца,  $\rho_1$ ,  $\rho_0$  — плотности вне и внутри кольца,  $\varphi$  — гравитационный потенциал,  $\Gamma$  — завихренность,  $\Phi$ ,  $I$ ,  $c$  — магнитный поток, ток и величина скорости света в вакууме соответственно.

Для дальнейшего анализа уравнения (1) удобно свести к безразмерному виду. Обозначим через  $r$ ,  $z$  безразмерные радиус кольца и расстояние до Солнца. В качестве характерного пространственного масштаба возьмем радиус Солнца —  $R_0 = 8.96 \cdot 10^8$  м, а в качестве характерной скорости —  $v_+ = 1000$  км/с. Введя в качестве характерной плотности плотность нижней области солнечной короны  $\rho = 1.67 \cdot 10^{-13}$  кг/м<sup>3</sup>, мы можем представить плотность в следующем виде:  $\rho_1 = \rho\beta$  и  $\rho_0 = \rho\alpha$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  — безразмерные плотности плазмы внутри и снаружи кольца. С целью упрощения модели будем считать, что плотность плазмы внутри кольца однородна. Если пренебречь диффузией плазмы из кольца, то  $V\rho_0 = \text{const}$ , поэтому для определения плотности необходимо знать лишь геометрические параметры кольца. Также будем считать, что форма кольца, т. е. отношение  $R/a$ , является величиной постоянной. Тогда

$$V(R) = V(R_0)(R/R_0)^3 = V(R_0)(r/r_0)^3.$$

В этом случае параметр  $\varepsilon$  также окажется неизменным.

С учетом изложенного уравнения (1) принимают вид

$$\begin{cases} \dot{z} = \frac{\Gamma}{4\pi v_+ R_0} \frac{1}{r} \left( 1 - \frac{\Phi^2}{\rho \Gamma^2 R_0^2} \frac{1}{\beta(r\varepsilon)^2} \right) \frac{\partial(r\varepsilon)}{\partial r} + \frac{v_{\text{wind}}}{v_+}, \\ \dot{r} = \frac{-\Gamma}{4\pi v_+ R_0} \frac{\partial(\ln\beta)}{\partial z} - \frac{V_0 G M_\odot}{2\pi \Gamma v_+ R_0^3} \left( \frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \left( \frac{r}{r_0} \right)^3 \frac{1}{r z^2}. \end{cases} \quad (2)$$

Введем безразмерные коэффициенты:

$$A = \Gamma / 4\pi v_+ R_0, \quad B = \Phi^2 / \rho \Gamma^2 R_0^2, \\ C = V_0 G M_\odot / 2\pi \Gamma v_+ R_0^3.$$

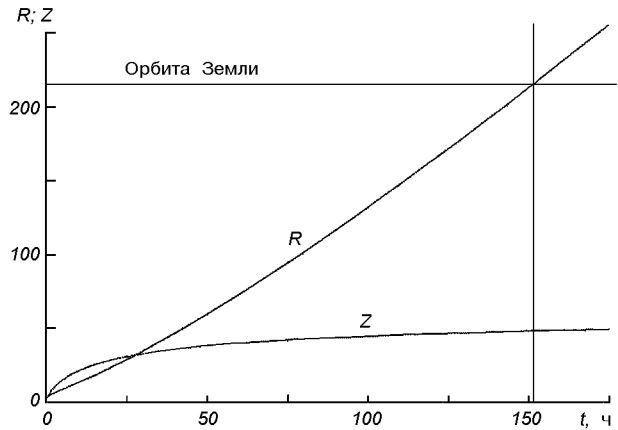


Рис. 3. Зависимость радиуса кольца и его расстояния до Солнца во времени

Тогда уравнения (2) можно записать в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \dot{z} = A \frac{\varepsilon}{r} \left( 1 - B \frac{1}{\beta(r\varepsilon)^2} \right) + \frac{v_{\text{wind}}}{v_+}, \\ \dot{r} = -A\varepsilon \frac{\partial(\ln\beta)}{\partial z} - C \left( \frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \left( \frac{r}{r_0} \right)^3 \frac{1}{r z^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Исходя из выбранных начальных значений плотности, размеров и энергии выброса, возьмем безразмерные параметры модели в виде  $A = 0.49$ ,  $B = 1.95 \cdot 10^{-4}$ ,  $C = 1.13 \cdot 10^{-8}$ ,  $\alpha_0 = 4$ .

Численное решение системы (3) дает зависимости радиуса кольца и его расстояния от Солнца во времени, которые будут использованы для сравнения с экспериментальными данными (рис. 3).

#### СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦА С ДАННЫМИ ВКМ

На рис. 4 представлено сравнение наблюдаемых скоростей ВКМ с расчетными из уравнений (3). Сплошные черные линии — экспериментальные данные SOHO [10]; кружки — теоретический расчет для начального радиуса ВКМ, равного 1/6 радиуса Солнца; квадратики — для начального радиуса, равного 1/60 радиуса Солнца. Влиянием собственного магнитного поля кольца пренебрегалось вследствие его слабого влияния на расчетные величины. Видно, что скорости, рассчитанные из уравнений (3), имеют большие величины на малых расстояниях от Солнца и быстро уменьшаются до значений, соответствующих скорости солнечного ветра.

Известно, что если вихрь движется в среде, то он

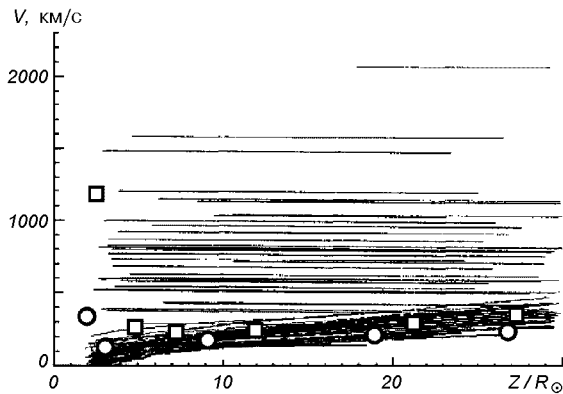


Рис. 4. Сравнение наблюдаемых и расчетных скоростей ВКМ

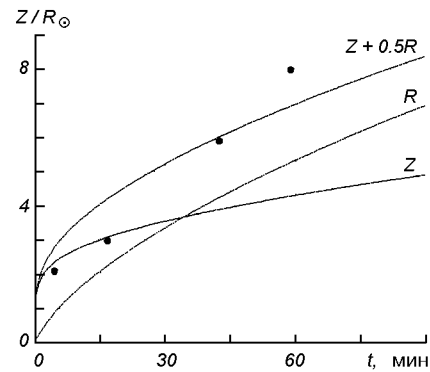


Рис. 6. Сравнение удаления от Солнца переднего края наблюдаемых и рассчитанных ВКМ вблизи Солнца

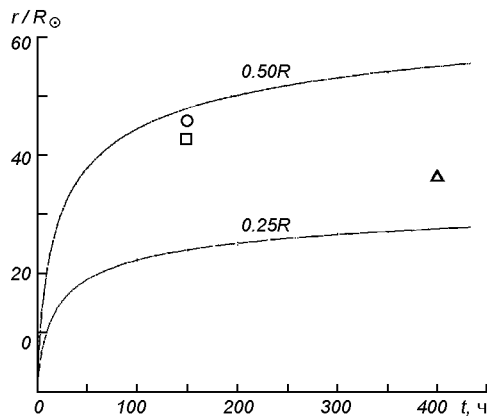


Рис. 5. Сравнение размеров наблюдаемых и рассчитанных ВКМ на больших расстояниях от Солнца

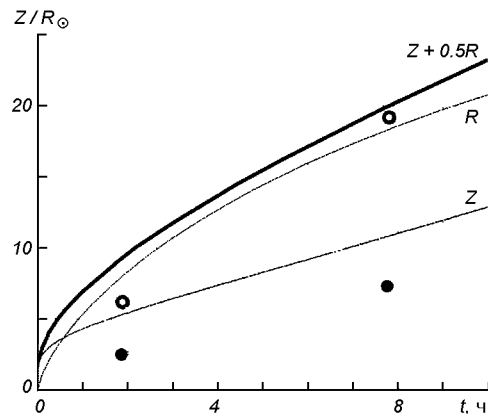


Рис. 7. Сравнение размеров наблюдаемых и рассчитанных ВКМ на расстоянии нескольких радиусов Солнца

увлекает за собой облако присоединенной массы, которое имеет форму, близкую к эллипсоидальной. Нами были оценены размеры облака, возникающего вокруг магнитно-вихревого кольца. Оказалось, что они сравнимы с размерами реальных выбросов. При оценках предполагалось, что ось эллипсоида, направленная по оси движения, в 1–4 раза меньше радиуса кольца.

На рис. 5 показано сравнение рассчитанных и наблюдаемых размеров ВКМ. Экспериментальные данные получены с помощью спутников WIND, «Интербол-1» [1] (кружок) и «Ulysses» [10] (треугольник). Линии на рис. 5 — предполагаемый продольный размер ВКМ при различных отношениях продольной оси эллипсоида и радиуса кольца. Модель ВКМ в виде петли [14] представлена на рисунке квадратиком. Таким образом, видно, что облако присоединенной массы является эллипсоидом с соотношением осей от 1:1,4 до 1:1,2.

На рис. 6 показано сравнения рассчитанного

удаления кольца и наблюдаемого удаления ВКМ от Солнца во времени. Верхняя линия  $Z(t) + R(t)/2$  — рассчитанное удаление переднего края облака присоединенной массы; точки — данные радиогелиографа Nancay [13], который фиксировал передний край ВКМ. Предполагалось, что малая (продольная) полуось эллипсоида присоединенной плазмы равна радиусу кольца.

На рис. 7 приведено подобное сравнение для больших временных интервалов (верхняя линия  $Z(t) + R(t)/2$  — рассчитанное удаление, верхние светлые точки — удаление ВКМ от Солнца), а также сравнение рассчитанного радиуса кольца (нижняя линия  $Z(t)$ ) и радиуса ВКМ (нижние темные точки). ВКМ наблюдался коронографом SOHO ([http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2000\\_02\\_26/c3.gif](http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2000_02_26/c3.gif)).

Таким образом, представление ВКМ в виде магнитно-вихревого кольца не противоречит наблюдениям.

## 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.Cherebnykh

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 півніні чотирьох одиночних плям за спостереженнями променеви складових магнітного поля і швидкості у фотосферній лінії Fe I  $\lambda$  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 півніні  $0.1 \text{ г/м}^3$ , 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  $H_{\alpha}$ . 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-