

УДК 523.98

Крутильные колебания солнечных пятен и структура подфотосферного магнитного поля

О.С. Гопасюк

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

Поступила в редакцию 10 октября 2008 г.

Аннотация. Представлены основные результаты исследований крутильных колебаний солнечных пятен и структуры магнитного поля в глубоких слоях, полученные в Крымской астрофизической обсерватории.

SUNSPOT TORSIONAL OSCILLATIONS AND THE SUBPHOTOSPHERIC MAGNETIC FIELD STRUCTURE, *by O.S. Gopasyuk.*

Ключевые слова: солнечные пятна, крутильные колебания, магнитная силовая трубка, электрический ток

1 Введение

Вращение пятен вокруг своей оси исследовали многие авторы (Абетти, 1932; Малтби, 1964; Бхатнагар, 1967; Гопасюк, 1965, 1981, 1982; Браун и др., 2001; Найтингел и др., 2002; Браун и др., 2003). И связано это с важностью информации, которая следует из данных о вращении пятен для понимания нестационарных процессов на Солнце и активности в целом. Вращение пятен, измеренное по фотогелиограммам, составляет $30\text{--}60^\circ$ в день (Гопасюк, 1965; Гопасюк, Лямова, 1987; Браун и др., 2003). Появление и усиление вихревой структуры поперечного магнитного поля пятна хорошо соответствует вращению пятна, вычисленного по фотогелиограммам (Гопасюк, 1965) и тесно коррелирует с появлением вспышек (Гопасюк, 1965; Гопасюк, Лазарева, 1986; Браун и др., 2003).

Крутильные колебания пятен с периодом около 6 сут. были обнаружены на основании наблюдений лучевых скоростей в фотосфере, фотогелиограмм и изображений активных областей в $H\alpha$ (Гопасюк, 1981, 1982).

Крутильные колебания в плазме с магнитным полем обязаны силам натяжения силовых линий магнитного поля, стремящимся возвратить смещенную массу газа в исходное состояние. 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.

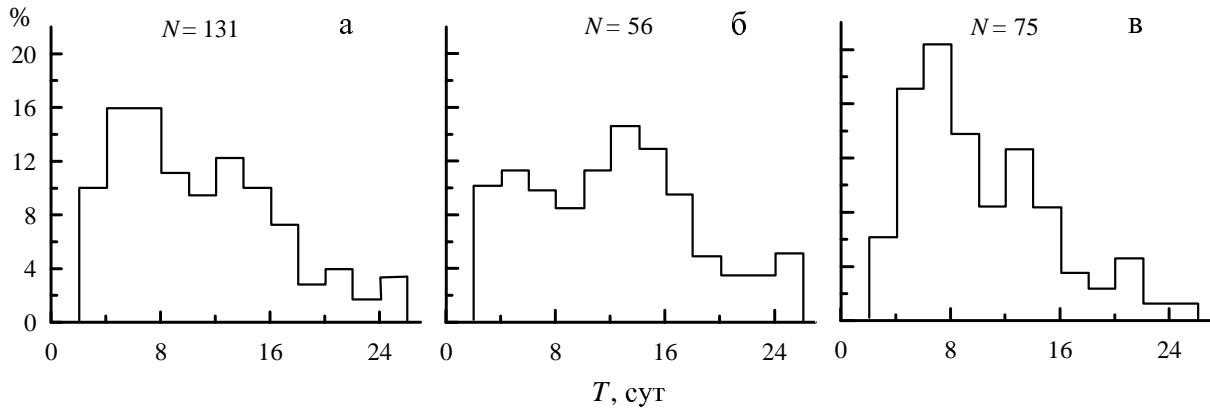


Рис. 1. Распределение по периодам (а) полного числа пятен, (б) одиночных пятен и (в) пятен в группах. N – число случаев

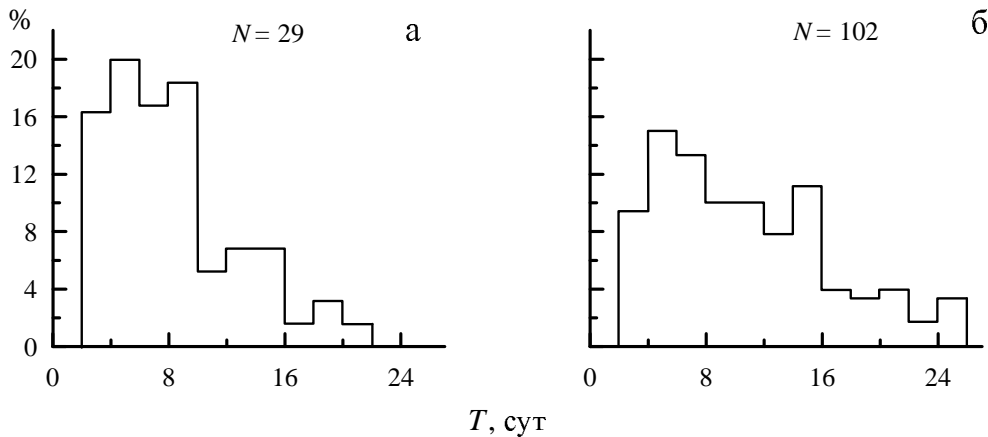


Рис. 2. Распределение пятен (одиночные + пятна в группах) по периодам (а) для минимума и (б) для максимума солнечной активности

2 Крутильные колебания солнечных пятен

Изучение вращения пятен, проведенное по фотогелиограммам на большом наблюдательном материале, показало, что для всех исследуемых пятен присущи крутильные колебания (Гопасюк, Лямова, 1987). Как видно из общего распределения пятен по периодам (рис. 1а), период колебаний T пятен меняется от 2 до 26 сут. На распределении выделяется два максимума. Основной максимум приходится на период около 6 сут. и второй, менее четко выраженный, – на 13 сут. Наличие двух максимумов в распределении полного числа пятен по периодам позволило заподозрить, что имеется несколько классов пятен, различающихся характеристиками колебаний. Были выделены одиночные пятна и пятна в группах, имеющие простую форму тени и полутени. В распределении одиночных пятен по периодам (рис. 1б) имеется два четко выраженных максимума. Основной максимум приходится на период около 14 сут., более слабый – на период около 5 сут. Распределение для пятен в группах (рис. 1в) имеет основной максимум в области периодов 7 сут. Из этого следует, что колебания одиночных пятен и пятен в группах обладают разными особенностями.

Другая особенность крутильных колебаний пятен связана с циклом солнечной активности. На рис. 2 показаны распределения пятен по периодам в годы минимума и максимума солнечной актив-

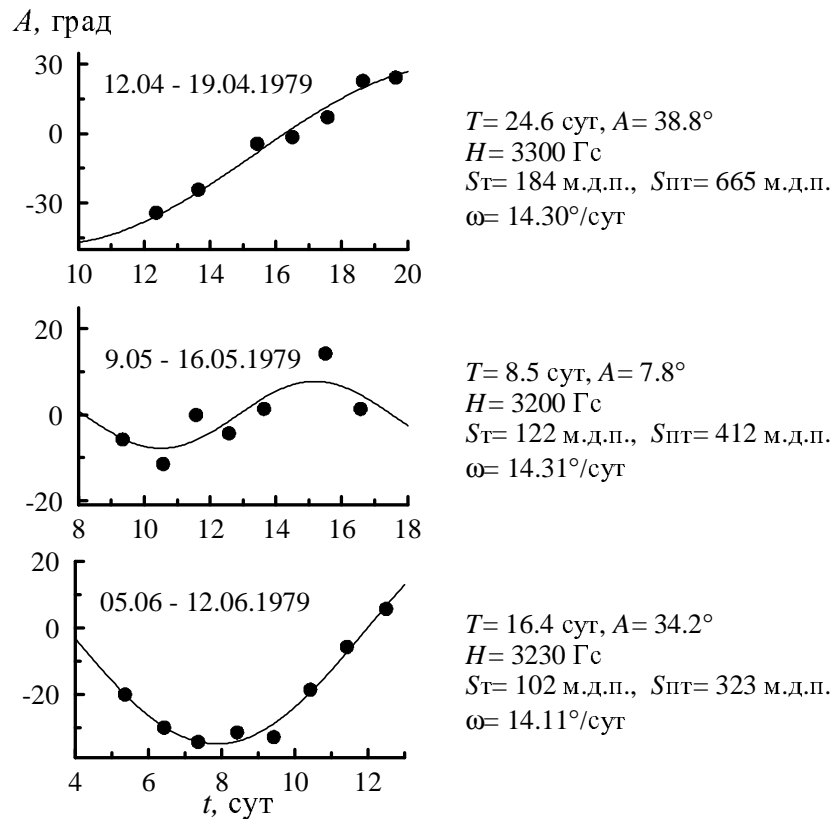


Рис. 3. Изменение амплитуды A и периода T колебаний пятна за время прохождения его по диску Солнца в течение трех оборотов

ности. Распределения построены для полного числа пятен, включающее одиночные пятна и пятна в группах. В годы минимума солнечной активности (рис. 2а) подавляющая доля пятен имеет периоды колебаний 2–10 сут. (без выраженного максимума). Распределение для пятен в максимуме активности (рис. 2б), если не принимать во внимание два незначительных максимума на 6 и 13 сут., тоже имеет широкий плоский максимум. Здесь основная доля пятен сосредоточена в интервале 2–16 сут. Сравнение этих двух распределений показывает, что в годы максимума солнечной активности велика доля пятен с большими (10–16 сут.) периодами колебаний. Это число пятен сравнимо с числом пятен, имеющих периоды 2–10 сут. Тогда как в годы минимума доля пятен с периодами 10–16 сут. незначительна. Таким образом, к максимуму солнечной активности растет в среднем период колебаний независимо от класса пятен. Это позволило сделать вывод, что в годы минимума солнечной активности образование пятен в фотосфере связано с выходом магнитных трубок из менее глубоких слоев. По мере приближения к максимуму активности Солнца вынос магнитных трубок идет из все более и более глубоких слоев (Гопасюк, Лямова, 1987).

Изучение долгоживущих (3–4 месяца) пятен, проведенное Гопасюком, Лямовой и Ханейчуком (1988), показало, что период крутильных колебаний не остается постоянным во времени. Его изменение связано с изменением средней напряженности магнитного поля H , площади тени S_T и полутени $S_{ПТ}$ пятна и средней сидерической скорости ω перемещения его по диску Солнца. На рис. 3 в качестве примера для одного из исследуемых пятен показаны изменения характеристик колебаний пятна за время прохождения его по диску Солнца в течение нескольких оборотов.

Исследование крутильных колебаний по лучевым скоростям – задача чрезвычайно трудоемкая. Создание метода восстановления всех составляющих вектора поля по полю его лучевой составляю-

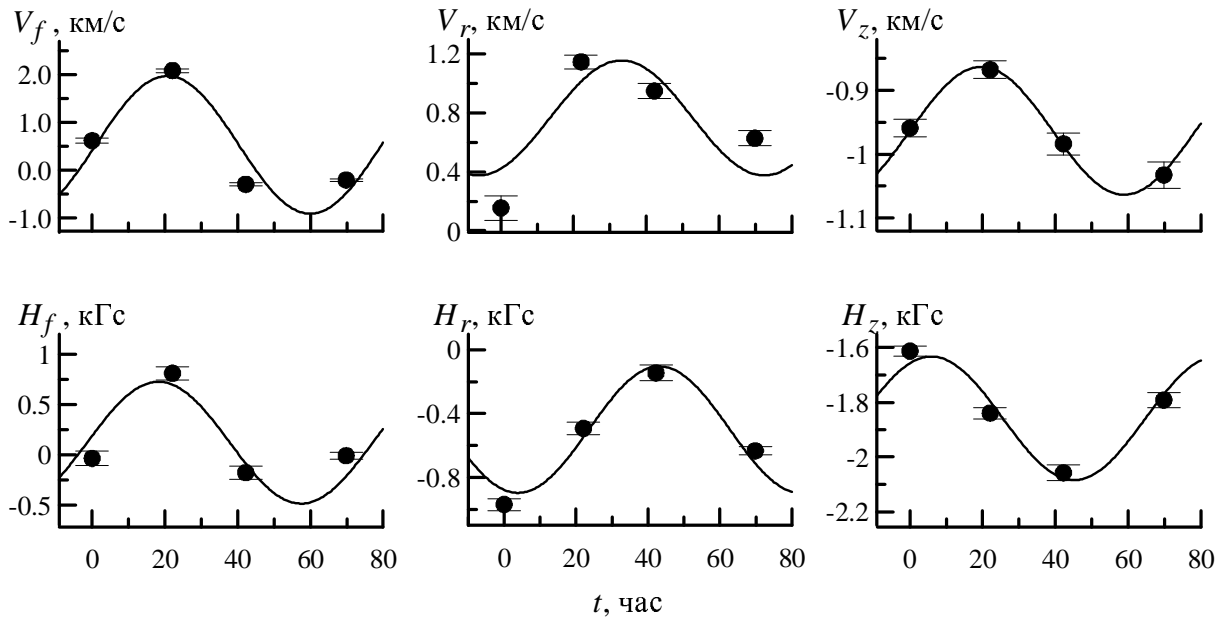


Рис. 4. Зависимости от времени t составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля в тени пятна, проходившего по диску Солнца 18.08–22.08.2000 г. (гелиоширота N 13). Показана величина вероятной ошибки. Через данные наблюдений методом наименьших квадратов проведены синусоиды. Период колебаний $T = 3.3$ сут. За $t = 0$ принято время первого наблюдения

щей (Гопасюк, Гопасюк, 1998) существенно упростило решение проблемы и расширило возможности изучения вращения пятен.

Вращение одиночных пятен по данным наблюдений продольного магнитного поля и лучевых скоростей в фотосферной линии FeI 5253 Å исследовалось отдельно для тени (Гопасюк, 2005) и полутени (Гопасюк 2004а; Гопасюк, Гопасюк, 2005б). Для каждого пятна были восстановлены вертикальная H_z (V_z), радиальная H_r (V_r) и азимутальная H_f (V_f) составляющие вектора магнитного поля и вектора скорости. Каждая из составляющих показала во времени изменения, подобные крутильным колебаниям. На рис. 4 приведен пример временных изменений составляющих векторов магнитного поля и скорости в тени пятна (из работы Гопасюк (2005)). Период колебаний T всех составляющих обоих векторов каждого пятна один и тот же. Периоды колебаний в тени лежат в интервале 2.2–7.1 сут., а полутени – 3.3–7.7 сут. Во всех случаях колебания азимутальной составляющей скорости опережают по фазе колебания всех других составляющих вектора скорости и вектора магнитного поля. Это может означать, что крутильные колебания пятен являются вынужденными. Периоды колебаний увеличиваются с периодом дифференциального вращения Солнца (рис. 5), что свидетельствует о связи крутильных колебаний с дифференциальным вращением Солнца (Гопасюк, 2005).

3 Структура магнитного поля в глубоких слоях

Гопасюк и Гопасюк (2005а) разработали метод исследования структуры магнитного поля в подфотосферных слоях, основанный на наблюдательных данных о крутильных колебаниях пятен.

Крутильные колебания в плазме с магнитным полем возможны благодаря упругим силам в замороженном магнитном поле, стремящимся вернуть смещенную массу газа в исходное положение. В процессе колебаний происходит закручивание одного конца магнитной петли, образующей на поверхности Солнца пятно, по отношению к другому. В результате появляется азимутальное поле,

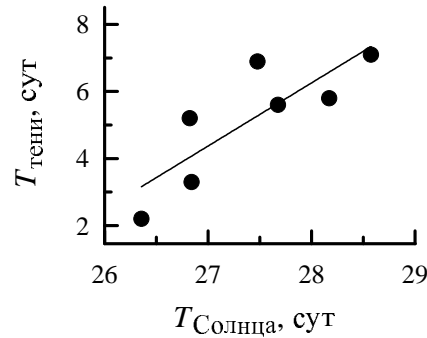


Рис. 5. Зависимость периода крутильных колебаний тени пятна от периода дифференциального вращения Солнца, определенного по этим пятнам

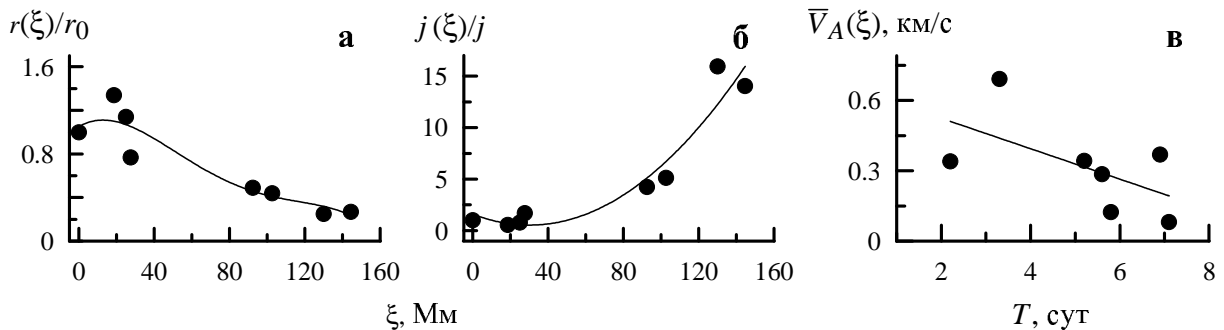


Рис. 6. Зависимости: (а), (б) – радиуса r сечения магнитной трубки и плотности тока j в ней от параметра ξ , связанного с длиной трубки (r_0 – радиус тени пятна); (в) – скорости \bar{V}_A волны Альвена, усредненной по длине магнитной трубки, в зависимости от периода T ее крутильных колебаний

которое в свою очередь генерирует в магнитной трубке переменный электрический ток. Время характерных изменений тока определяется периодом крутильных колебаний T . В обычных условиях время изменения тока и его магнитного поля определяется электропроводностью плазмы и размером данной неоднородности поля. И для размеров, соответствующих пятну, это время значительно больше. В случае крутильных колебаний, так же как и при подъеме магнитных петель, происходят быстрые изменения электрических токов. Но по сравнению с подъемом петель, сопровождающихся только изменением величины тока, крутильные колебания магнитных трубок порождают электрический ток переменный и по направлению.

Характеристики магнитных трубок в подфотосферных слоях и параметры крутильных колебаний в них были определены на основании данных о крутильных колебаниях, полученных непосредственно из наблюдений: периоде T и амплитудах колебаний азимутальных составляющих скорости V_f и магнитного поля H_f , и величине осевого магнитного поля H_l (Гопасюк, Гопасюк, 2005а).

Радиус сечения магнитной трубки у поверхности Солнца остается на протяжении до 30–40 тыс. км примерно таким же по величине, как и размер тени пятна. С переходом к большим глубинам диаметр сечения магнитной трубки довольно быстро убывает (рис. 6а).

Данные об изменении плотности тока в магнитных петлях с глубиной (рис. 6б) отражают в основном ход изменения площади сечения магнитной трубки с глубиной. При вычислении плотности тока величина амплитуды полного тока считалась постоянной на всем протяжении магнитной трубки и равной величине ее в тени пятен.

Средняя по длине магнитной трубки альвеновская скорость в десятки и даже сотню раз меньше

этой же скорости в тени пятен. Имеется тенденция ее уменьшения с увеличением периода крутильных колебаний тени пятна (рис. 6в).

4 Заключение

Исследования крутильных колебаний пятен, проведенные в Крымской астрофизической обсерватории на большом наблюдательном материале по фотогелиограммам, фотосферному продольному магнитному полю и лучевым скоростям, показали, что крутильные колебания пятен – это не уникальное, а, скорее, характерное их состояние. Спектр периодов колебаний довольно широкий: от 2 до 26 сут. Спектр колебаний одиночных пятен отличается от спектра колебаний пятен в группах.

К максимуму солнечной активности в среднем увеличивается период крутильных колебаний пятен независимо от их принадлежности к классу группы.

Период колебаний долгоживущих пятен не остается постоянным во времени. Изменение периода связано с изменением характеристик пятен.

Крутильные колебания пятен являются вынужденными и связаны с дифференциальным вращением Солнца.

Использование наблюдательных данных о крутильных колебаниях пятен открывает большие возможности для исследования магнитных структур и движений плазмы в них на глубинах, недоступных прямым наблюдениям.

Литература

- Абетти (Abetti G.) // *Osserv. Mem. Oss. Astrofis. Arcetri*. 1932. V. 50. P. 47.
- Браун и др. (Brown D.S., Parnell C.E., Deluca E.E., Golub L., McMullen R.A.) // *Solar Phys.* 2001. V. 201. P. 305.
- Браун и др. (Brown B.N., 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. № 1–2. P. 79.
- Бхатнагар (Bhatnagar A.) // *Kodaikanal Observ. Bull.* 1967. A180.
- Гопасюк О.С. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2004а. Т. 20. № 5. С. 387.
- Гопасюк (Gopasyuk O.S.) // *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*. IAU Symp. №. 223./ Eds Stepanov A.V., Venevolenskaya E.E., Kosovichev A.G. Cambridge University Press. 2004б. P. 249.
- Гопасюк О.С. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2005. Т. 21. № 3. С. 209.
- Гопасюк С.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1965. Т. 33. С. 100.
- Гопасюк С.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1981. Т. 64. С. 108.
- Гопасюк (Gopasyuk S.I.) // *Sun and Planetary System*/ Eds Fricke W., Teleki G. Dordrecht: D. Reidel Publ. Company. 1982. P. 125.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1998. Т. 14. № 5. С. 389.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2005а. Т. 21. № 4. С. 257.
- Гопасюк, Гопасюк (Gopasyuk S.I., Gopasyuk O.S.) // *Solar Phys.* 2005б. V. 231. № 1–2. P. 11.
- Гопасюк С.И., Лазарева Л.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1986. Т. 74. С. 84.
- Гопасюк С.И., Лямова Г.В. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1987. Т. 77. С. 17.
- Гопасюк С.И., Лямова Г.В., Ханейчук В.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1989. Т. 79. С. 34.
- Малтби (Maltby P.) // *Astrophys. Norw.* 1964. V. 8. P. 205.
- Найтингел и др. (Nightingale R.W., Shine R.A., Brown D.S., Wolfson C.J., Schrijver C.J., Metcalf T.R., Title A.M.) // *Yohkoh 10th Anniversary Meeting*. Hawaii. September 17–20. 2001. Proceed. 2002.