

ISSN 0552—5829

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
АСТРОНОМИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
И  
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

**СОЛНЕЧНЫЕ ДАННЫЕ**  
**1985 г.**

**БЮЛЛЕТЕНЬ**  
**№ 3**

**МАРТ**

**(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)**



**ЛЕНИНГРАД**  
**«НАУКА»**  
**ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**  
1985



6. Карпинский В.Н. Фотометрический профиль гранулы и горизонтальные производные яркостной температуры в грануляции. - Солн. данные, 1981, № 1, с.88-91.

Главная астрономическая  
обсерватория АН СССР

Поступила в редакцию  
23 ноября 1985 г.

Исследование крутильных колебаний солнечных пятен

А.А.Певцов, И.С.Саттаров

A Study of Helical Oscillations in Sunspots

A.A.Pevtsov and I.S.Sattarov

Abstract

On the basis of observations and published data on 17 sunspots helical oscillations of different types have been detected: close to harmonic, and increasing and decreasing with time (Figure 1a). The mean period of oscillations is  $T=7.1 \pm .0$  days, mean amplitude  $A = 40 \pm 23^\circ$ , mean rate of rotation  $c=17 \pm 15^\circ/\text{day}$ . The depth of the penetration of the sunspot under the photosphere has been evaluated as 7500 km and the mass of oscillating substance as  $M=2 \cdot 10^{23}$  g using a simple mathematical model. The kinetic energy of rotation of the sunspots attains  $1 \times 10^{31}$  erg.

Наблюдаемое вращение солнечных пятен можно разделить на два типа движений: 1) вращение пятна как геометрического целого, 2) вращение газа в самом пятне, вызванное движением вещества вдоль спиральных волокон полутени. Тогда тангенциальная составляющая скорости движения вещества в эффекте Эвершеда, по существу, является суммой двух названных типов вращения. Таким образом, для изучения движения второго типа недостаточно одних спектральных наблюдений, необходимо знать вращение пятна как целого. Последнее, в свою очередь, можно исследовать путем анализа последовательных фотографий пятна. Такое вращение изучали Р.С.Гневашева [1], С.И.Гопасик [2-4] и другие [5-8].

Вращение солнечного пятна как целого бывает нестационарным: пятна совершают крутильные колебания [3-4]. Исследование таких колебаний позволяет оценить глубину пятна [9] и структуру его подфотосферного магнитного поля [10]. Полученные оценки глубины пятна сильно различаются в зависимости от выбранного метода расчета. А.А.Соловьев [9] используя уравнение динамики колебаний пятен в биполярной группе и известное из теории магнитной гидродинамики соотношение для вращающегося момента оценил глубину в 3200 км. Оценка глубины, сделанная С.И.Гопасиком исходя из описания крутильной волны как альвеновской, распространяющейся из-под фотосферы, дала глубину в 100 тыс.км.

Целью данного исследования было выбрано изучение характеристик крутильных колебаний солнечных пятен.

| №                    | Азимут реперной линии по дням |     |     |     |     |     |     |      |     | Т,<br>сутки | А°   | R",  | С,<br>о/сут-<br>ки | № группы по обследо-<br>ванию "Солнечные<br>данные" | Источники |
|----------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-------------|------|------|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------|
|                      |                               |     |     |     |     |     |     |      |     |             |      |      |                    |                                                     |           |
|                      | 1                             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    | 9   |             |      |      |                    |                                                     |           |
| 1                    | 0°                            | 32° | 60° | 68° | 68° |     |     |      |     | (6)         | (16) |      | 17                 | 1961 № 251                                          | 2         |
| 2                    | 0                             | -2  | -7  |     |     |     |     |      |     |             |      |      | 4                  | 1962 № 100                                          | 2         |
| 3                    | 0                             | -2  | -7  | 11  |     |     |     |      |     | 6*          | (11) | 19.9 | 8                  | 1974 № 140 (2)                                      | 3         |
| 4                    | 0                             | -17 | -19 | -11 | -6  |     |     |      |     | 6*          | (11) | 20.3 | 8                  | 1974 № 140 (1)                                      | 3         |
| 5                    | 122                           | 135 | 142 | 102 | 90  | 72° |     |      |     | 10          | 35   | 23.2 | 18                 | 1980 № 268 (1)                                      | 5         |
| 6                    | 85                            | 84  | 44  | 20  | 17  | 16  | 21° |      |     | 13          | 34   | 18.7 | 12                 | 1980 № 268 (2)                                      | 5         |
| 7                    | 150                           | 139 | 135 | 149 | 166 | 170 | 199 | 214° |     | 12          | 42   | 36.9 | 13                 | 1980 № 269                                          | 5         |
| 8                    | 155                           | 92  | 45  | 96  | 158 | 154 | 162 | 168  |     | 3           |      | 18.0 | 34                 | 1981 № 154                                          | 6         |
| 9                    | 12                            | -   | 74  | 88  | 142 | 80  | 10  | -    | 0°  | 8           | 80   | 20.0 | 34                 | 1969 № 357                                          | 7         |
| 10                   | 0                             | 19  | 33  | 68  |     |     |     |      |     |             |      |      | 23                 | 1977 № 98                                           | 8         |
| 11                   | 195                           | 194 | 202 | 213 | 215 | 215 |     |      |     |             |      | 19.5 | 4                  | 1980 № 332                                          |           |
| 12                   | 220                           | 250 | 102 | 113 |     |     |     |      |     | 6           | 75   | 13.0 | 63                 | 1983 № 120                                          |           |
| 13                   | 295                           | 301 | 307 | 302 | 289 | 306 | 314 | 311  |     | 4           | 10   | 18.7 | 8                  | 1981 № 513                                          |           |
| 14                   | 2                             | 2   | 16  | 18  | 21  | 5   |     |      |     | 5           | 14   | 14.0 | 6                  | 1980 № 381                                          |           |
| 15                   | 132                           | 124 | 134 | 159 | 203 | 215 |     |      |     | 8           | 47   | 26.5 | 20                 | 1982 № 312                                          |           |
| 16                   | 46                            | 67  | 72  | 89  | 93  | 84  | 83  | 90   | 78  | 3           |      | 23.0 | 10                 | 1980 № 199                                          |           |
| 17                   | 331                           | 329 | 331 | 353 | 366 | 370 | 365 | 359  | 350 | 8           | 22   | 20.7 | 8                  | 1980 № 201                                          |           |
| Среднее<br>Дисперсия |                               |     |     |     |     |     |     |      |     |             | 40   | 21.0 | 17                 |                                                     |           |
|                      |                               |     |     |     |     |     |     |      |     |             | 23   |      | 15                 |                                                     |           |



Материалом для работы послужила серия снимков пятна, полученная А.А. Певцовым на горизонтальном солнечном телескопе (ГСТ) в Пулкове (пленка "Микрат-200", светофильтр ОС-12, время экспозиции 0.002 сек, масштаб изображения  $3'' \cdot \text{мм}^{-1}$ ), фотогелиограммы Астрономического института АН Уз. ССР, полученные И.С. Саттаровым (масштаб изображения  $24'' \cdot \text{мм}^{-1}$ ), и данные других авторов [2-8]. Всего было обработано 17 серий наблюдений по следующей методике.

На снимке выбиралось несколько реперных точек (от 2 до 5), характерных для структуры тени и полутени изучаемого пятна и их координаты измерялись на микроскопе УИМ-23. Затем измерения исправлялись за эффекты проекции и определялся угол (азимут) между суточной параллелью и прямой линией, проходящей через две реперные точки (названной нами реперной линией). В качестве реперов выбирались точки, которые прослеживались на следующих снимках, сохраняли свою конфигурацию и взаимные расстояния. В дальнейшем изучалось изменение азимута реперной линии. Если реперных линий на снимке было несколько, вычислялась средняя величина углового поворота пятна.

Анализ результатов обработки (см. таблицу) показал наличие вращения у большинства наблюдавшихся пятен. У многих из них направление вращения менялось со временем. Движения такого типа С.И. Гопаскик [3,4] рассматривает как крутильные колебания. На рис. 1а дан пример графиков изменения азимута (А) реперной линии со временем (номер графика соответствует номеру в таблице). Известно [11], что зависимости такого вида описывают колебательные процессы. Из 17 рассмотренных пятен три пятна совершали гармонические колебания (№ 9, 12, 14), три пятна колебались с затуханием (№ 8, 16, 17), одно с нарастанием (№ 13), у одного пятна колебания практически отсутствовали (№ 11). Колебания остальных пятен удалось классифицировать лишь приблизительно, поскольку промежуток времени, охваченный наблюдениями, был, по-видимому, существенно меньше их периода колебаний. Возможно, каждое пятно в своем развитии проходит через все названные типы колебаний: сначала покоится, затем колеблется с нарастающей амплитудой, некоторое время гармонически и, наконец, с затуханием.

Для всех 17 пятен были определены средние скорости ( $\dot{C}$ ) вращения, для 14 из них - периоды (Т) и амплитуды (А) колебаний (неуверенные значения взяты в скобки, звездочкой отмечены периоды колебаний, полученные С.И. Гопаскиком [3]). Средний период колебаний составляет  $7.1 \pm 3.0$  суток, амплитуда  $40 \pm 23^\circ$ , средняя скорость вращения  $17 \pm 15^\circ/\text{сут}$ .

Крутильные колебания в биполярных группах пятен наблюдали С.И. Гопаскик [3] и Анталова [5]. В первом случае составляющие группу пятна вращались синфазно (рис. 1в построен по данным С.И. Гопаскика [3]), во втором - в противофазе (рис. 1б) с близкими периодами (10 и 13 суток соответственно).

Крутильные колебания пятен приближенно можно описать уравнением

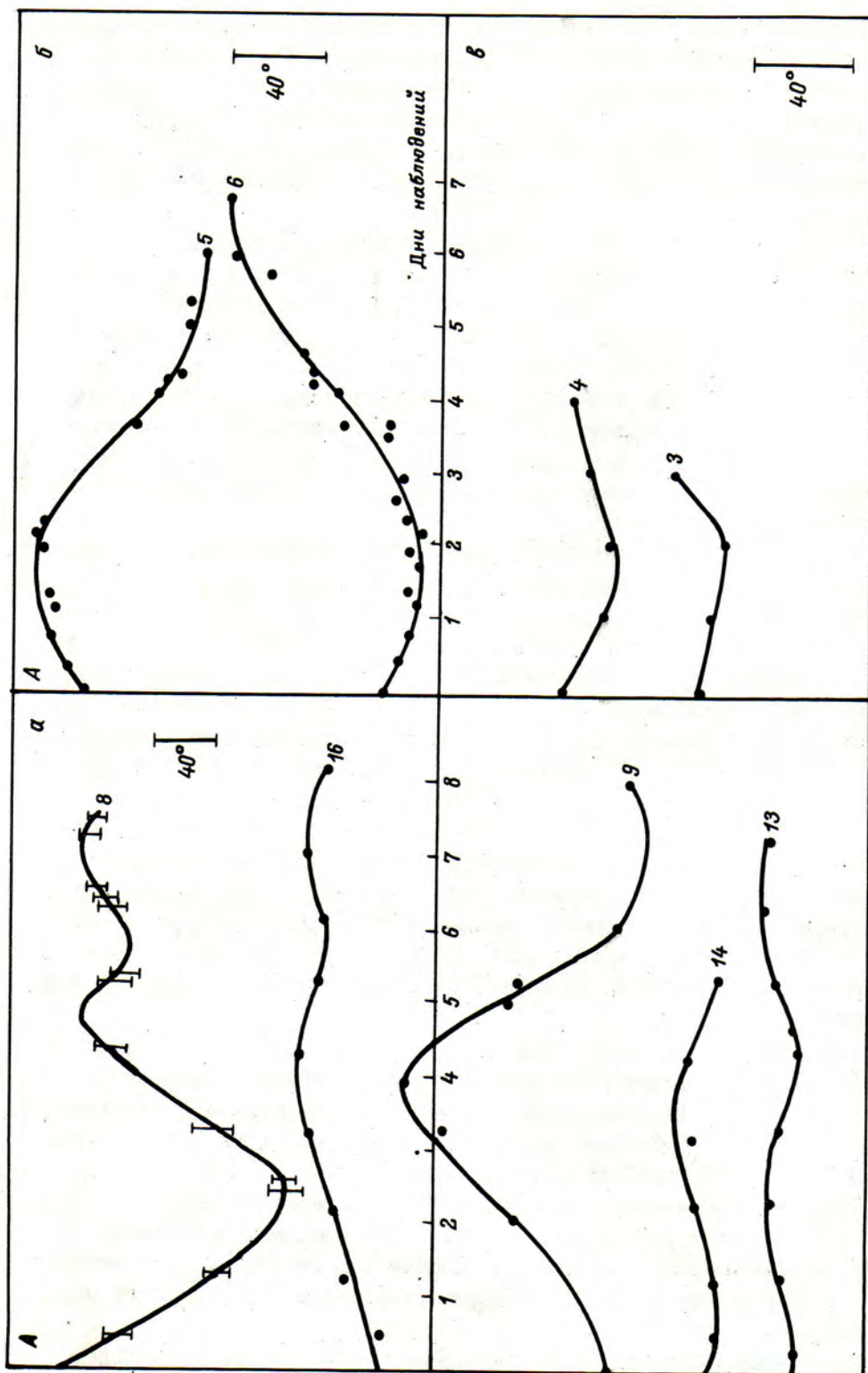


Рис. I



$$T = \sqrt{(4\pi^2 + d^2) \frac{I}{K}},$$

где  $T$  - период колебаний,  $d$  - логарифмический декремент затухания,  $I$  - момент инерции колебательной системы,  $K$  - крутильная жесткость. Для гармонических колебаний имеем

$$T = 2\pi(I/K)^{1/2}. \quad (I)$$

Пользуясь этим уравнением, оценим массу и глубину той части пятна, которая принимает участие в колебаниях. Будем считать пятно цилиндром радиуса  $R$ , высоты  $h_0$ , который совершает колебания за счет упругости магнитного поля. Момент инерции такого цилиндра равен

$$I = \frac{MR^2}{2} = \frac{\pi R^4}{2} \int_0^{h_0} \rho(h) dh,$$

где  $M$  - масса цилиндра (пятна),  $\rho$  - плотность вещества. С учетом этого и уравнения (I) запишем

$$M = \left(\frac{T}{\pi R}\right)^2 \frac{K}{2}; \quad \int_0^{h_0} \rho(h) dh = \left(\frac{T}{\pi R^2}\right)^2 \frac{K}{2\pi}.$$

Для оценки величины  $K$  воспользуемся упрощенной моделью магнитного поля пятна.

Пусть силовые линии магнитного поля выходят из оснований цилиндра и закреплены на расстоянии  $l$  в окружающей фотосфере. (рис.2, АВ - направление силовых линий,  $l$  - характерный размер биполярной группы  $l \approx 10'' = 1.2 \cdot 10^{10}$  см). Для поворота цилиндра на угол  $\varphi$  необходимо приложить закручивающий момент  $K_M$ . Если  $F(r)$  - момент силы для одной силовой линии, а  $N(r)$  - число силовых линий с моментом  $F(r)$ , то

$$K_M = \int_S F(r) N(r) dS = \int_0^{R/2\pi} \int_0^R F(r) N(r) dr d\varphi = 2\pi \int_0^R f(r) r^2 dr,$$

где  $f(r)$  - тангенциальная составляющая силы натяжения магнитного поля.

Поскольку  $f(r) = \frac{H_z^2(r)}{4\pi} \sin \alpha$  ( $H_z$  - вертикальная составляющая поля), а

$$\sin \alpha \approx \frac{\varphi r}{l} \quad (\text{см. рис.2}), \text{ то}$$

$$K_M = \frac{\varphi}{2l} \int_0^R H_z^2(r) r^3 dr.$$

Для распределения магнитного поля

$$H_z(r) = H_0 \exp(-2.1 r^2/R^2),$$

взятого из справочника Аллена [12], получим

$$K_M = \frac{\varphi}{76l} H_0^2 R^4,$$

$H_0$  - напряженность магнитного поля в центре пятна. Крутильная жесткость равна закручивающему моменту, необходимому для поворота тела на 1 радиан, следовательно,

$$K_M = \frac{1}{762} H_0^2 R^4.$$

Окончательно получаем

$$M = \left( \frac{TH_0 R}{\pi} \right)^2 \frac{1}{1522} ; \quad \int_0^{h_0} \rho(h) dh = \left( \frac{TH_0}{\pi} \right)^2 \frac{1}{1522 \pi l}. \quad (2)$$

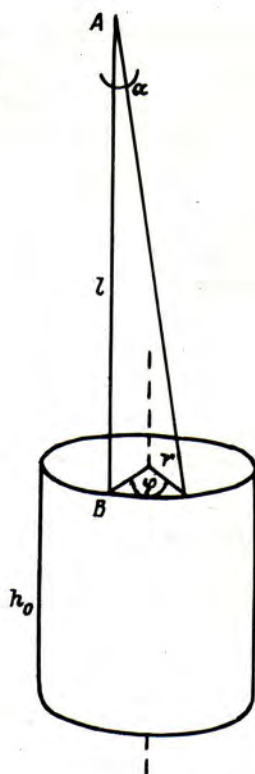


Рис. 2

Воспользовавшись распределением плотности  $\rho$  из известной модели атмосферы Солнца (например, Аллен [12]) и формулами (2), оценим глубину и массу солнечного пятна. Тогда для  $H_0 = 2000$  Гс и  $T = 7.1$  суток глубина пятна от уровня  $\tau_{5000} = 1$  составит 7500 км. Масса вещества, принимающего участие во вращении, равна (для  $R = 21''$ )  $M = 2 \cdot 10^{23}$  г. Таким образом, глубина пятна по крайней мере в 4 раза меньше его диаметра. Кинетическая энергия вращения пятна составляет  $1 \cdot 10^{34}$  эрг, что сравнимо с энергией солнечной вспышки. Отметим, что ошибка этих оценок, возникающая из-за замены  $2 \sin \varphi/2$  на  $\varphi$  в соотношении для  $\sin \alpha$  не превышает 5% для  $\varphi = 40 \pm 23^\circ$ .

Предлагаемый нами метод оценки глубины пятна применим (в отличие от предыдущих работ [9, 10]) не только к гармоническим, но и к затухающим (нарастающим) колебаниям, если вместо (1) использовать выражение



для периода колебаний с декрементом затухания. Заметим далее, что формула (2) с точностью до коэффициента совпадает с аналогичным соотношением, выведенным Соловьевым из других соображений [9]. Нами использовались другие, чем в его работе модель атмосферы Солнца и распределение магнитного поля в пятне. Сравнение результатов данной работы с [9] показывает, что использование различных модельных представлений не должно приводить к большим различиям в оценке глубины проникновения пятна под фотосферу.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Э.В.Кандрашову за общее руководство работой, Г.Б. Гельфрейху и А.А.Соловьеву за полезное обсуждение.

#### Литература

1. Гневнышева Р.С. Вихревые движения в солнечной фотосфере - АЖ, 1941, т.18, вып.1, с.26-30.
2. Гопасяк С.И. Временные изменения структуры поперечного магнитного поля в группах пятен и оптические явления. - Изв. КРАО, 1965, т.33, с.100-110.
3. Гопасяк С.И. Некоторые особенности вращения пятен. - Изв. КРАО, 1981, т.64, с.108-118.
4. Gopasyuk S.I. Motions in Sunspots Like Torsional Oscillations.- In: Sun And Planetary System, Dordrecht: D.Reidel Publ., 1982, p.125-126.
5. Antalová A. The Motions of the Umbrae in Hale Active Regions I6862 and I6863. - ВАС, 1983, vol. 34, N 2, p.96-99.
6. Kučerá A. Irregular Rotation of the Main Sunspot in Active Region Hale I7570 of 5-13 April 1981. - ВАС, 1982, vol.33, N 6, p.345-349.
7. Miller R.A. Unusual Rotation of a Sunspot 30 September to 8 October 1969. - Solar Phys., 1971, vol.16, N 2, p.373-378.
8. Korobova Z.B. Rotation of a Sunspot in the Active Region McMath I4943.- World Data Cent. A.Solar-Terr. Phys Rept., 1982, N 83, part 3, p.13-14.
9. Соловьев А.А. Крутильные колебания пятен. - Солн. данные, 1984, № 1, с.73-78.
10. Гопасяк С.И. Крутильные колебания и диагностика структуры подфотосферного магнитного поля. - АЖ, 1984, т.61, вып.1, с.157-162.
11. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. - М.: Физматгиз, 1959. - 915 с.
12. Аллен К.У. Астрофизические величины. - М.: Мир, 1977. - 446 с.

Главная астрономическая  
обсерватория АН СССР,

Поступила в редакцию  
22 июня 1984 г.