

УДК 523.98

## Движение плазмы в магнитном поле тени пятна в области температурный минимум – фотосфера

*О.С. Гопасюк, С.И. Гопасюк*

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 11 ноября 2002 г.

**Аннотация.** Проведен анализ наблюдаемых в тени пятна движений плазмы. Область температурного минимума (наблюдения в FeI 5270 Å) оказалась границей, выше которой (в хромосфере) вертикальная составляющая скорости над тенью пятна направлена вверх, а ниже ее (в фотосфере) – вниз. В результате в области температурного минимума над тенью пятна наблюдается кажущееся нарушение уравнения непрерывности движения материи. Выдвинуто предположение, что на уровне температурного минимума над тенью пятна происходит диффузия плазмы в магнитное поле тени пятна. Более горячая плазма, находящаяся вне магнитного поля тени пятна, попадая в область тени, адиабатически расширяется. Расширяющийся газ охлаждается и становится более тяжелым. Под действием силы тяжести он опускается вниз. Создаются движения плазмы, наблюдаемые в области температурный минимум – фотосфера. Определены параметры плазмы при ее стационарном адиабатически изэнтропическом движении. Вычисленные значения параметров подтверждают наблюдаемую картину движения плазмы в магнитном поле над тенью пятна в области температурный минимум – фотосфера.

PLASMA MOTION IN A SUNSPOT UMBRA MAGNETIC FIELD IN THE TEMPERATURE MINIMUM – PHOTOSPHERE REGION, *by O.S. Gopasyuk, S.I. Gopasyuk.* We analyzed observational plasma motions in a sunspot umbra magnetic field. The temperature minimum region (observation in FeI 5270 Å) is boundary above which (in the chromosphere), the vertical velocity is directed upwards and under its (in the photosphere) the vertical velocity is directed downwards. As a result in the temperature minimum region above a sunspot umbra there is seeming breach of the equation of continuity. We advanced the assumption that an effective diffusion of plasma in a magnetic field takes place in the temperature minimum region of a sunspot umbra. Hotter plasma that located outside a sunspot umbra magnetic field getting in a sunspot umbra magnetic field expands adiabatically. Expanding gas cools and becomes heavier. It falls downwards by gravity action. The observational plasma motions in the temperature minimum – photosphere region is formed. Plasma parameters were determined at its stationary adiabatically isentropical motion. The values of parameters that were calculated confirm observational plasma motion in a magnetic field above a sunspot umbra in the temperature minimum – photosphere region.

**Ключевые слова:** Солнце, пятна, магнитные поля, движения плазмы

---

## 1 Введение

Одной из характерных особенностей солнечных пятен являются потоковые движения плазмы. В полутени, где магнитное поле преимущественно горизонтальное, наиболее интенсивные движения плазмы – горизонтальные движения Эвершеда. На уровне фотосферы эти движения достигают 6 км/с и направлены от центра пятна. С переходом в верхние слои атмосферы скорость уменьшается и в хромосфере она имеет противоположный знак. Смена знака скорости приходится на область температурного минимума.

В тени пятна магнитное поле преимущественно вертикальное и характер движений отличается от движений в полутени. Наряду с горизонтальной составляющей в тени имеется вертикальная, которая в фотосфере направлена вниз. Она составляет 0.3 – 0.5 км/с (Абетти, 1929; Серважен, 1961; Гопасюк, Гопасюк, 1998), но иногда превышает 1 км/с (Гопасюк, 1966).

Установлены многие закономерности потоковых движений и их связи с магнитными полями в пятнах (Брэй, Лоухед, 1964; Обридо, 1985; Томас, Вейс, 1992). Тем не менее, связь между движениями плазмы и магнитным полем в тени пятна остается еще далеко не ясной.

На основании результатов наблюдений (Гопасюк, Гопасюк, 1998; Гопасюк, 1999; Гопасюк, 2000) мы провели исследование движений плазмы в магнитном поле тени пятна в области температурный минимум – фотосфера.

## 2 Анализ данных наблюдений

На рис. 1 приведена зависимость величины вертикальной скорости в фотосфере, области температурного минимума и хромосфере, измеренной по линиям FeI 5253 Å, FeI 5124 Å, FeI 5270 Å и  $H_\beta$ , от высоты образования линий. Данные о величине скоростей в FeI 5253 Å и FeI 5124 Å взяты из (Гопасюк, Гопасюк, 1998), в FeI 5270 Å – из (Гопасюк, 2000) и в  $H_\beta$  – из (Гопасюк, 1999). Высоты образования линий FeI 5253 Å, FeI 5124 Å, FeI 5270 Å определены на основании результатов измерений Маттига (1969), а для линии  $H_\beta$  – из данных Маттига (1962).

Согласно рис. 1, в тени пятна на уровне фотосферы (FeI 5253 Å) вертикальная составляющая скорости в среднем равна 0.4 км/с и направлена вниз. Она уменьшается с переходом в более высокие слои фотосферы. Измерения в линии FeI 5124 Å, эквивалентная ширина которой на 35% больше, чем у FeI 5253 Å, дают скорость в 1.55 раза меньшую. По наблюдениям в центральной части линии FeI 5270 Å, которая образуется вблизи области температурного минимума, поле скоростей состоит из отдельных мелкомасштабных элементов с противоположными направлениями скоростей. Средняя по площади тени пятна вертикальная скорость равна примерно 0.1 км/с и не имеет преимущественного направления. На уровне хромосферы (наблюдения в  $H_\beta$ ) плазма над тенью пятна движется вверх со средней по площади тени скоростью 0.7 км/с. На всех высотах в тени пятна течение плазмы квазистационарное. Из рис. 1 видно, что движения плазмы на уровнях фотосферы и хромосферы не являются прямым продолжением друг друга. В области температурного минимума происходит кажущееся нарушение уравнения непрерывности движения материи.

Мелкомасштабная структура поля скоростей в области температурного минимума позволяет предположить, что здесь плазма втекает в область магнитного поля тени пятна из окружающего пространства. Втекание плазмы в магнитное поле возможно в случае, если давление плазмы внутри магнитного жгута меньше давления окружающей плазмы. Происходит эффективная диффузия плазмы в область магнитного поля. Более горячая плазма, находящаяся вне магнитного поля тени пятна, попадая в область разрежения, адиабатически расширяется и растекается вдоль поля. Как следствие этого образуются мелкомасштабные структуры со встречным направлением движения. Расширяющийся газ охлаждается и становится более тяжелым. Под действием силы тяжести он опускается вниз.

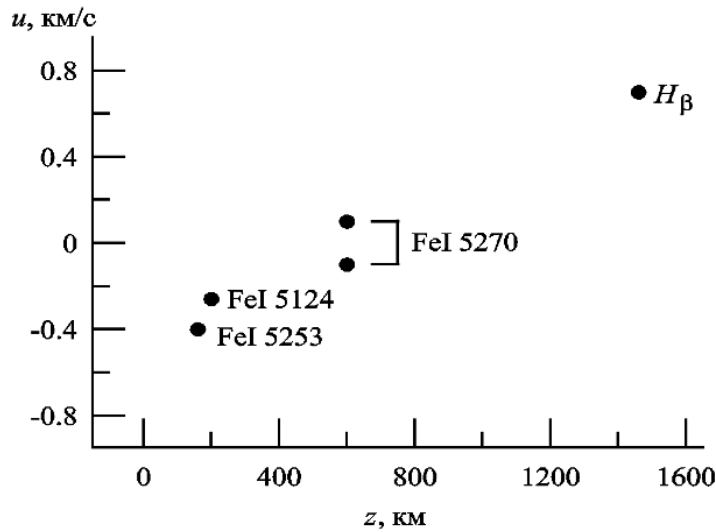


Рис. 1. Изменение с высотой средней величины вертикальной скорости над тенью пятна

### 3 Определение глубины залегания тени пятна

В дальнейших исследованиях важным является определение глубины залегания тени пятна. Для количественного анализа движений в тени пятна мы использовали модель тени пятна (Авретт, 1981) и модель невозмущенной атмосферы (Гингерич и др., 1971). Нуль-пункты геометрических высот моделей совмещались на основании условия равновесия магнитного поля тени пятна с окружающей плазмой. В тени пятна напряженность магнитного поля, измеренная по линии FeI 5253 Å, составляет в среднем 2500 Гс. Его магнитное давление  $H^2/8\pi = 2.5 \cdot 10^5 \text{дин/см}^2$ . Магнитное давление в тени пятна уравнивается давлением окружающей плазма. С учетом этого условия оказалось, что уровень температурного минимума в тени пятна располагается на 200 км выше уровня непрерывного спектра в модели невозмущенной атмосферы.

Совмещение геометрических нуль-пунктов обеих моделей позволило определить положение температурного минимума в тени пятна, а также положение границ разности высот  $\Delta h = 200 \text{ км}$  в окрестности температурного минимума относительно невозмущенной атмосферы. В интервале высот  $\Delta h$  среднее значение температуры в невозмущенной фотосфере  $T_e = 5000 \text{ К}$ . На этом же интервале высот  $\Delta h$  среднее значение температуры в области температурного минимума над тенью пятна  $T_m = 3600 \text{ К}$ . Плазма с температурой  $T_e = 5000 \text{ К}$ , окружающая тень пятна в интервале высот  $\Delta h = 200 \text{ км}$ , диффундирует в магнитное поле тени пятна.

### 4 Давление и плотность плазмы в магнитном поле тени пятна

Для того, чтобы диффузия плазмы в магнитное поле тени пятна была эффективной, ее давление в магнитном поле должно быть ниже давления окружающей плазмы. Плазма, попавшая в область пониженного давления, расширяется. Допускаем, что этот процесс происходит адиабатически при постоянной энтропии. При расширении газ охлаждается. Примем, что газ охлаждается до температуры  $T_m$ . Понижение температуры приводит к понижению давления плазмы в магнитном поле тени пятна в соответствии с адиабатой Пуассона:

$$\frac{p_m}{p_e} = \left( \frac{T_m}{T_e} \right)^{k/(k-1)}, \tag{1}$$

где  $p$  и  $T$  – давление и температура плазмы. Индекс  $m$  относится к параметрам плазмы в магнитном поле тени пятна на уровне температурного минимума, индекс  $e$  – к параметрам плазмы вне магнитного поля тени пятна на том же уровне атмосферы,  $k = 5/3$  – показатель адиабаты.

Из (1) находим, что  $p_m/p_e = 0.44$ .

Для определения отношения плотностей плазмы в магнитном поле тени пятна в области температурного минимума и вне его на той же высоте воспользуемся уравнением состояния идеального газа:

$$\frac{p}{\rho} = RT, \quad (2)$$

где  $R$  – газовая постоянная.

На основании (2) с учетом  $p_m/p_e = 0.44$  получаем, что  $\rho_m/\rho_e = 0.61$ .

## 5 Диффузия плазмы в магнитное поле тени в области температурного минимума

Под действием силы тяжести более тяжелый холодный газ опускается вниз. При эффективной диффузии плазмы устанавливается непрерывное квазистационарное движение плазмы вниз. Считаем, что движение плазмы происходит при постоянной энтропии.

Магнитное поле тени пятна состоит из отдельных магнитных силовых трубок с расходящимися вверх силовыми линиями. Принимаем, что они имеют круглую форму и одинаковые по площади сечения.

Полагаем также, что втекание плазмы в область магнитного поля тени пятна в области температурного минимума происходит в интервале  $\Delta h$ . Поток плазмы через боковую поверхность силовой трубки на интервале  $\Delta h$

$$F_d = 2\pi r_m \Delta h \rho_e u_d,$$

где  $\rho_e$  – плотность плазмы вне магнитной силовой трубки,  $u_d$  – скорость диффузии плазмы в силовую трубку магнитного поля и  $r_m$  – радиус сечения магнитной трубки на уровне температурного минимума.

Основная часть потока  $F_d$  трансформируется в  $F_m$  – вертикальный поток опускания газа в магнитном поле тени пятна:

$$F_m = \pi r_m^2 \rho_m u_m,$$

где  $\rho_m$  и  $u_m$  – плотность и скорость опускания газа в магнитной трубке в области температурного минимума.

Приравнявая потоки  $F_d$  и  $F_m$ , получаем выражение для скорости диффузии газа в магнитное поле:

$$u_d = \frac{1}{2} \frac{r_m}{\Delta h} \frac{\rho_m}{\rho_e} u_m. \quad (3)$$

Считаем, что  $r_m = 100$  км. Скорость плазмы в области температурного минимума  $u_m = 0.10$  км/с (рис. 1). Подставляя  $\rho_m/\rho_e = 0.61$  и все численные данные в выражение (3) находим, что скорость диффузии плазмы в магнитное поле силовой трубки составляет 0.15 км/с.

Пока мы не можем назвать вида неустойчивости плазмы, который приводит к столь эффективной диффузии плазмы в магнитное поле.

Расположение уровня температурного минимума в тени пятна ближе к уровню непрерывного спектра невозмущенной атмосферы, также как и увеличение протяженности области  $\Delta h$ , приводят к уменьшению величины скорости диффузии плазмы в магнитное поле  $u_d$ .

Совокупность магнитных силовых трубок и течение плазмы в них дает общую структуру наблюдаемого течения плазмы в магнитном поле тени пятна на уровне температурного минимума.

## 6 Изменение плотности и температуры плазмы, движущейся в магнитном поле

В каждой силовой трубке происходит движение плазмы вниз, от уровня температурного минимума к фотосфере, вдоль магнитного поля со сходящимися силовыми линиями. При стационарном течении количество газа, проходящего в единицу времени через поперечное сечение трубки, остается постоянной величиной вдоль всей трубки (в нашем случае от области температурного минимума до уровня фотосферы), т.е. сохраняется уравнение непрерывности материи:

$$S_m \rho_m u_m = S_p \rho_p u_p, \quad (4)$$

где  $S = \pi r^2$  – сечение магнитной силовой трубки, индекс  $p$  – относится к параметрам на уровне фотосферы. Сечение магнитной силовой трубки из-за расхождения силовых линий поля меняется с высотой. Примем, что угол раствора силовых линий в магнитной трубке в пределах не очень большой разности высот не меняется. Тогда

$$\frac{S_m}{S_p} = \left(1 + \frac{\Delta z}{r_m} \operatorname{tg} \gamma\right)^{-2}, \quad (5)$$

где  $\Delta z = -(z_p - z_m) = -440$  км – разность высот, между высотами образования линий FeI 5253 Å и FeI 5270 Å над тенью пятна (рис. 1).  $\gamma$  – угол раствора силовых линий в магнитной трубке. Примем, что он равен среднему по тени пятна углу раствора силовых линий и составляет 30° (Гопасюк, 2000).

На основании (4) и (5) находим выражение для определения изменения плотности плазмы при ее стационарном течении вдоль силовой магнитной трубки:

$$\frac{\rho_m}{\rho_p} = \frac{u_p}{u_m} \left(1 + \frac{\Delta z}{r_m} \operatorname{tg} \gamma\right)^2. \quad (6)$$

Таким образом,  $\rho_m/\rho_p \approx 2.22$ . В то же время общая масса газа, втекающего в единицу времени в тень пятна на уровне фотосферы, такая же, как и на уровне температурного минимума.

Изменение температуры движущейся плазмы вдоль магнитной трубки определим на основании уравнения Бернулли:

$$\frac{u_m^2}{2} + w_m = \frac{u_p^2}{2} + w_p, \quad (7)$$

где  $w$  – тепловая функция единицы массы газа. С учетом (2) и т.к.  $w = \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho}$  (Ландау, Лифшиц, 1954) находим:

$$\Delta T = T_m - T_p = \frac{k-1}{2kR} (u_p^2 - u_m^2). \quad (8)$$

Воспользовавшись данными рис. 1, имеем  $\Delta T = 3.6$  К. Итак, при стационарном движении плазмы в магнитной силовой трубке от области температурного минимума до фотосферы температура плазмы понижается менее чем на 4 К.

## 7 Заключение

Область температурного минимума над тенью пятна является границей, ниже которой (в фотосфере) вертикальная составляющая скорости направлена вниз, а выше ее (в хромосфере) вертикальная составляющая скорости направлена вверх (Гопасюк, 2000). Вертикальные скорости увеличиваются с удалением от температурного минимума. Поле скоростей в области температурного минимума мелкомасштабное и состоит из отдельных элементов с противоположным направлением движений. В результате в области температурного минимума над тенью пятна наблюдается кажущееся нарушение уравнения непрерывности материи.

Для разрешения наблюдаемого противоречия нами выдвинуто предположение, что на уровне температурного минимума над тенью пятна происходит диффузия плазмы в магнитное поле тени.

Втекание плазмы в магнитное поле поперек его силовых линий возможно, если давление плазмы внутри магнитного жгута меньше давления окружающей плазмы. Более горячая плазма, находящаяся вне магнитного поля, попадая в область разрежения, адиабатически расширяется вдоль поля. В результате создаются мелкомасштабные структуры поля скоростей со встречным направлением движения. Именно такая структура поля скоростей наблюдается над тенью пятна по линии FeI 5270 Å (область температурного минимума). Расширяющийся газ охлаждается и становится более тяжелым. Под действием силы тяжести он опускается вниз.

Для вычисления параметров плазмы использованы модели тени пятна (Авретт, 1981) и невозмущенной атмосферы (Гингерич и др., 1971). Совмещение геометрических нуль-пунктов обеих моделей дало возможность определить температуру плазмы над тенью пятна в окрестности температурного минимума и температуру на той же геометрической высоте в невозмущенной атмосфере. Величины вертикальных скоростей взяты из наблюдений (рис. 1). Вычисления параметров, представленных в табл. 1, проведены при адиабатически изэнтропическом процессе. Принято, что в каждой магнитной силовой трубке, из которых состоит тень пятна, устанавливается квазистационарное течение плазмы.

**Таблица 1.** Параметры плазмы в магнитном поле тени пятна

| $T_m/T_e$ | $p_m/p_e$ | $\rho_m/\rho_e$ | $u_m/u_d$ | $\rho_m/\rho_p$ | $\Delta T$ , К |
|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|----------------|
| 0.72      | 0.44      | 0.61            | 0.67      | 2.22            | 3.6            |

Давление плазмы в магнитном поле в области температурного минимума составило немногим менее половины газового давления вне поля. Меньше и плотность плазмы в области магнитного поля. Скорость диффузии оказалась больше скорости опускания газа в области температурного минимума. Расширение области диффузии плазмы или сдвиг ее в более глубокие слои атмосферы приводят к уменьшению скорости диффузии плазмы и относительного давления плазмы  $p_m/p_e$ , что скажется на величине относительной плотности  $\rho_m/\rho_e$ . Пока не представляется возможным указать вид неустойчивости плазмы, который может приводить к столь эффективной диффузии плазмы в магнитное поле. Несомненно, тонкая структура магнитного поля (Стенфло, 1973; Лоцицкий, 1986) должна способствовать повышению диффузии плазмы в магнитные структуры. При движении плазмы вниз от области температурного минимума до фотосферы из-за увеличения скорости с глубиной плотность плазмы уменьшается более чем в 2 раза. В то же время, температура движущейся плазмы понижается менее чем на 4 К. Это связано с тем, что движение плазмы происходит со скоростью малой по сравнению с локальной скоростью звука в плазме.

Вычисленные значения параметров плазмы (табл. 1) соответствуют наблюдаемой картине движений в магнитном поле над тенью пятна в области температурный минимум – фотосфера.

## Литература

- Абетти (Abetti G.) // Handbuch der Astrophysik. 1929. V. 4. P. 57.  
 Авретт (Avrett E.H.) // The Physics of Sunspots / Eds. Cram L.E., Thomas J.H. Sacramento Peak Obs. 1981. P. 235.  
 Брэй, Лоухед (Bray R.J., Loughhead R.E.) Sunspots. London. Chapman and Hall Ltd. 1964.  
 Гингерич и др. (Gingerich O., Noyes R.W., Kalkofen W., Cuny Y.) // Solar Phys. 1971. V. 18. N. 3. P. 347

- Гопасюк О.С. // Кинемат. и физика небесн. тел. 1999. Т. 15. N. 5. С. 413.
- Гопасюк О.С. // Кинемат. и физика небесн. тел. 2000. Т. 16. N. 3. С. 230.
- Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1966. Т. 35. С. 139.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С. // Кинемат. и физика небесн. тел. 1998. Т. 14. N. 5. С. 389.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ. 1954.
- Лозицкий В.Г. // Кинемат. и физика небесн. тел. 1986. Т. 2. N. 1. С. 28.
- Маттиг (Mattig W.) // Z. Astrophys. 1962. V. 56. N. 3. P. 161.
- Маттиг (Mattig W.) // Solar Phys. 1969. V. 8. N. 2. P. 291.
- Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука. 1985.
- Серважен (Servajean R.) // Ann. d'Astrophys. 1961. V. 24. N. 1. P. 1.
- Стенфло (Stenflo J.O.) // Solar Phys. 1973. V. 32. N. 1. P. 41.
- Томас, Вейс (Thomas J.H., Weiss N.N.) // Sunspots: Theory and Observations / Eds. Thomas J.H., Weiss N.N. Dordrecht: Kluwer. 1992. P. 3.