

ОСОБЕННОСТИ МЕДЛЕННОЙ ДИССИПАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Живанович И., Соловьев А.А.

ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

FEATURES OF SLOW DISSIPATIONS OF SUNSPOTS

Zhivanovich I., Solov'ev A.A.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

According to the model of sunspot dissipation through a thin boundary layer between the magnetic flux tube of the spot and the environment, the rate of reduction of the area of sunspot umbra should slow down as the spot size decreases to some critical level. This theoretically predicted effect is confirmed in this work on the SOHO/MDI data, which has a high spatial and temporal resolution with the comparison of ground based observations. The theoretical curves correspond well to the observed profiles of area changes of sunspot umbra with the time.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-169-172

Для понимания процессов солнечной активности важно знать законы формирования и распада солнечных пятен, как основных проявлений этой активности. В данной работе описана модель диссипации солнечных пятен через тонкий граничный слой. По космическим данным подтвержден эффект замедления диссипации пятна по мере уменьшения его размеров.

Впервые вопрос о влиянии омических потерь на диссипацию солнечных пятен поставил Каулинг [1, 2]. Он рассматривал диффузию магнитного поля в неподвижной среде и получил, что характерное время диссипации солнечного пятна, составляет около 300 лет. На этом основании он заключил, что роль омических потерь в распаде пятен не существенна.

В работе [3] описывается плавное расплывание в неподвижной среде магнитного потока, который первоначально сосредоточен с бесконечно большой плотностью на оси симметрии. В этом процессе рост площади, занимаемой магнитным потоком, сопровождается соответствующим убыванием напряженности магнитного поля в центре.

Однако реальная картина явления, наблюдаемая при распаде солнечных пятен, резко отличается от описанной выше: в процессе диссипации солнечного пятна выполняются следующие условия: (i) солнечное пятно сохраняет четкие очертания, границы между тенью и полутенью пятна, а также между полутенью и фотосферой не размываются. При этом геометрический размер пятна постоянно уменьшается со временем; (ii) температура и, соответственно, яркость тени пятна меняется слабо; (iii) напряженность магнитного поля в центре пятна не меняется, либо меняется слабо, в

соответствии с эволюционной зависимостью напряженности поля от радиуса пятна. Согласно этой зависимости напряженность магнитного поля в малых пятнах систематически меньше, чем в крупных.

Такие особенности диффузионного процесса в пятне указывают на то, что магнитный поток в пятне уменьшается не за счет роста (расплывания) площади пятна и соответствующего ослабления напряженности поля в нем, а исключительно за счет ухода магнитного потока из области тени через тонкий граничный слой между магнитной силовой трубкой пятна и окружающей средой. В работах [4–6] был получен как основной закон наблюдаемого медленного распада пятен (линейная фаза диссипации), так и эффект замедления скорости сокращения площади тени в малых пятнах.

Для крупных пятен, у которых магнитный поток, прошедший через граничный слой, не успевает рассеиваться в окружающем пространстве за счет турбулентной диффузии, возникает линейная зависимость толщины граничного слоя от размера пятна. Суть данного эффекта в том, что при расширении пятна граничный слой автоматически подстраивает скорость ухода магнитного потока из пятна под скорость диффузионного рассеяния поля во внешней среде. Тогда скорость убывания площади пятна не зависит от его размера, и площадь линейно уменьшается со временем:

$$\frac{s_u(t)}{s_u} = 1 - \frac{t}{\tau_1}. \quad (1)$$

В формуле (1)

$$\tau_1 = 4\pi\sigma\varepsilon a^2(o)c^{-2}, \quad (2)$$

σ – проводимость плазмы в граничном слое, ε – малый параметр порядка 0.01, $a(o)$ – радиус тени пятна в некоторый начальный момент.

Для малых пятен эффект пропорциональности толщины граничного слоя радиусу тени пятна отсутствует, для них толщина граничного слоя определяется только физическими процессами на его границе и не зависит от размера пятна:

$$\delta = \delta_0 = const \approx \varepsilon a(0). \quad (3)$$

В таком случае получается:

$$\frac{s_u(t)}{s_u(t^*)} = \left(1 - \frac{t - t^*}{\tau_2}\right)^2, \quad t > t^*. \quad (4)$$

Момент времени t^* вводится как момент перехода от линейной стадии диссипации к нелинейной.

$$\tau_2 = 8\pi\sigma\delta_0 a^2(t^*)c^{-2}. \quad (5)$$

В данной работе получены наблюдательные данные, подтверждающие эффект замедления диссипации солнечного пятна со временем. В качестве источника использовались данные обсерватории Дебрецена, полученные путем обработки материалов космического аппарата SOHO [7]. Лучшее пространственное разрешение в сравнении с наземными наблюдениями, а

также высокое временное разрешение позволяет получить более точное подтверждение модели медленной диссипации солнечных пятен.

Для работы с наблюдательными данными следует провести их тщательный отбор согласно следующим критериям:

- в соответствии с теоретической моделью солнечное пятно должно иметь достаточно правильную, круглую форму;
- в ходе эволюции пятно не должно испытывать эволюционных деформаций (дробления) и значительных изменений формы;
- пятно, в котором исследуется стадия медленной диссипации, должно находиться не слишком далеко от края видимого солнечного диска, чтобы можно было уверенно отследить изменение его площади на поздних стадиях эволюции.

Согласно второму критерию важно сохранение эволюционной "стабильности" пятна поскольку, зачастую пятна в ходе эволюции "дробятся" на несколько пятен меньшего размера, образуя группу пятен. Исследования в группе пятен затруднены в связи с тем, что в группе пятна могут взаимодействовать друг с другом, вызывая возмущения в эволюции и диссипации пятна.

По вышеописанным критериям подбор солнечных пятен, соответствующих таким требованиям, оказывается довольно сложной задачей. Часто случается, что заключительный этап диссипации приходится на моменты, когда пятно или вообще скрывается за лимбом, либо сильно приближается к нему и тогда эффект уменьшения площади невозможно отследить из-за проекционных эффектов. В результате тщательного отбора по вышеописанным критериям из более, чем 40 солнечных пятен нам удалось найти лишь 4 пятна с отчетливым проявлением эффекта замедления диссипации. Пятна в активных областях NOAA 9253, 9254, 9527 и 10295 представлены на рисунках ниже (рисунки 1–4). На рисунках точками отмечены наблюдаемое распределение площадей перечисленных солнечных пятен, линиями приведены фазы линейной и нелинейной диссипации солнечного пятна для каждого конкретного случая.

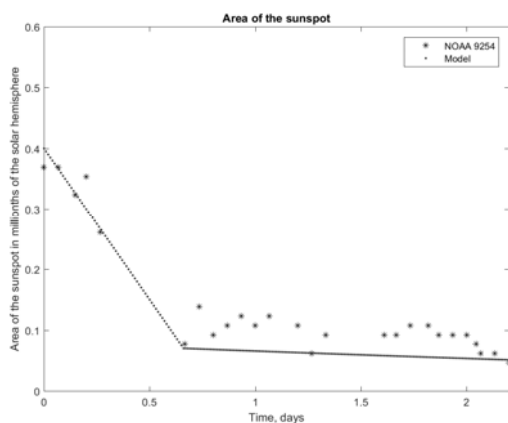


Рис. 1.

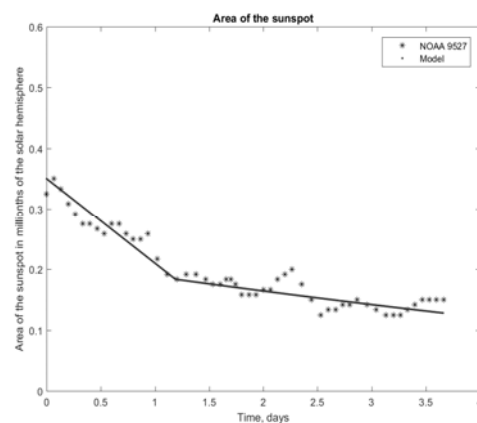


Рис. 2.

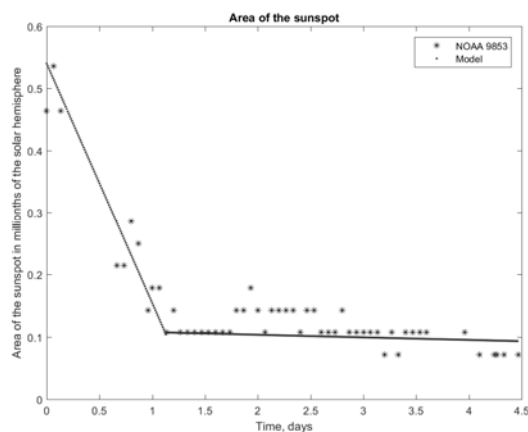


Рис. 3.

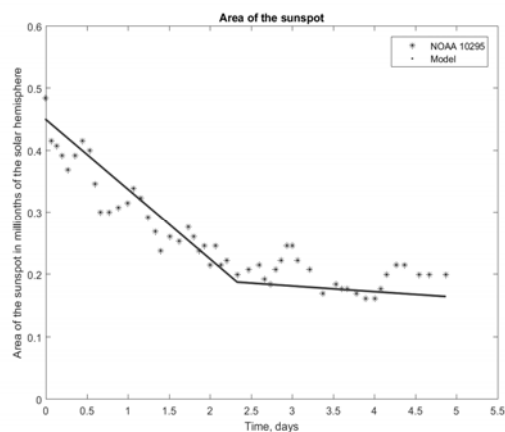


Рис. 4.

Полученные параметры модели диссипации для этих пятен:

- пятно в активной области NOAA 9254 (рис. 1) – $\tau_1 = 0.8$ дня, $\tau_2 = 40$ дней, $t^* = 0.67$ дня;
- пятно в активной области NOAA 9527 (рис. 2) – $\tau_1 = 2.5$ дня, $\tau_2 = 15$ дней, $t^* = 1.2$ дня;
- пятно в активной области NOAA 9853 (рис. 3) – $\tau_1 = 1.4$ дня, $\tau_2 = 50$ дней, $t^* = 1.1$ дня;
- пятно в активной области NOAA 10295 (рис. 4) – $\tau_1 = 4$ дня, $\tau_2 = 40$ дней, $t^* = 2.3$ дня.

Заметно наличие длинных «хвостов» нелинейной части диссипации пятна, что является следствием нескольких факторов. Во-первых, данные космических аппаратов имеют высокое временное разрешение. Во-вторых, на космическом аппарате используется дискретный приемник излучения (CCD матрица), и как следствие дискретности, получается что изменение площади пятна происходит не плавно, как на фотопластинках, а небольшими скачками, кратными количеству пикселей. Таким образом, формируются очень длинные и «плоские» хвосты нелинейной части диссипации солнечного пятна, что делает неотличимыми на глаз параболы из формулы (4) от линейных зависимостей (1).

Работа поддержана РФФИ (18-02-00168) и РНФ(15-12-20001).

Литература

1. Cowling T.G. // Monthly Notices of RAS, 1946, V. 106, p. 218.
2. Cowling T.G. / The Sun. The Solar system – 1953, V. 1.
3. Meyer F., Schmidt H. U., Wilson P.R., Weiss N.O. // Monthly Notices of RAS, 1974, V. 169, p. 35.
4. Solov'ev A.A. // Soviet Astronomy, 1991, V. 35, № 3, p. 306-309.
5. Solov'ev A.A. // Bull. Solnechnye Dannye, 1976, № 7, p. 73-78.
6. Gokhale M.H. and Zwaan C. // Solar Physics, 1972, V. 26, p. 52.
7. Gyóri L., Baranyi T., Ludmány A. / Symposium S273, 2011, V. 6, p. 403-407.