ГРАНИЦА ТЕНИ ПЯТНА И ВЕРТИКАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НА ЭТОЙ ГРАНИЦЕ

Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

BOUNDARY OF SUNSPOT UMBRA AND VERTICAL MAGNETIC FIELD ON THIS BOUNDARY

Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A.

Central (Pulkovo) astronomical observatory of RAS, St. Petersburg, Russia

12 “regular” stable single sunspots were investigated in two aspects: the outer boundaries of the sunspots umbra were determined by an independent mathematical method and the vertical component of the magnetic field at these boundaries was found. We analyzed data from the SDO / HMI.SHARP.CEA station using the segments of the continuum (hmi.sharp_cea_720s.continuum) and magnetic field (hmi.sharp_cea_720s.Br). To critically consider the issue of a threshold of 50% of the surrounding background ($I_c = 0.5 I_q$), when constructing the contour of the outer boundary of the spot umbra, we used the mathematical methods of highlighting the object against the surrounding background according to Otsu. It is shown that in a wide range (from 2 kG to 3 kG) of sunspot fields, the field average along the contour $\langle B_{ver} \rangle$ changes weakly (1.5–1.7 kG), while the vertical component of the magnetic field itself, in a particular spot, changes significantly along the defined contour (dispersion is high enough), which reflects the fibrous structure of the penumbral field. It was found that the border of the spot umbra is systematically higher than 50% of the level of the surrounding background (accepted ad hoc), and should be determined for each specific case. This results in lower $\langle B_{ver} \rangle$ values than the currently discussed value of about ~ 1867 G. For our set of sunspots $\langle B_{ver} \rangle = 1576 \pm 82$ G.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-97-100

1. Введение

В последнее время появилось несколько работ [1–3], в которых обсуждаются различные режимы магнитоконвекции в тени и полутени пятна. Центральным вопросом в них было проведение границы “тень-полутень” (U-PU) и определение величины вертикального магнитного поля на ней. Так, в [1] получено, что вертикальный магнитный компонент поля B_{ver} мало меняется по границам U-PU, и среднее значение этого поля на границе U-PU составляет 1867 Гс (H_{inode} / SP). Более того, эта величина, согласно [1], не зависит ни от размера (площади) пятна, ни от цикла солнечной активности, т.е., по сути, является некоторой универсальной физической константой для всех пятен. Мы намерены проверить этот далеко идущий вывод при помощи независимого математического метода.

2. Данные и их анализ

Теперь доступны новые данные прибора Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) станции Solar Dynamics Observatory (SDO), называемые как Space-weather HMI Active Region Patches (SHARPs) (jsoc.stanford.edu, [4]) с 12-минутной каденцией. SHARP данные доступны в двух координатных системах (jsoc.stanford.edu, [5]; [6]): CCD (31 сегмент) и CEA (11 сегментов, где для всех величин выполнен «ремепинг» (remap) в гелиографическую равновеликую цилиндрическую систему координат (heliographic Cylindrical Equal-Area; [7])). В работе, мы используем координатную систему CEA и 2 сегмента данных: континуум (I_c) и магнитное поле (B_r). Используемое в данных SHARP преобразование Ламберта «выправляет» проекционные эффекты, приводя объект (Patch) к центральному меридиану, но мы все же, во избежание возможных искажений, выбирали пятна в момент прохождения ими центрального меридиана.

Итак, для определения значений вертикальной составляющей магнитного поля (B_{ver}) на границе U-PU, сначала надо определить координаты контура этой границы. Затем этот контур переносится на карту магнитного поля, с него считываются данные изменения поля, рассчитываются среднее значение ($\langle B_{ver} \rangle$) и находится стандартное отклонение (SD) (см. табл. 1).

В настоящее время для построения контура границы U-PU на карте интенсивности рекомендуется выбирать уровень на границе в 50% от интенсивности окружающей поверхности спокойного Солнца. Однако используя метод минимизации расстояния между контурами I_c и B_{ver} ([8]; Fig. 4) авторы получили оптимальное значение в 53%, ($I_c = 0,53 I_{qs}$) и соответствующее значение $B_{ver} = 1639G$, что почти на 250G ниже заявленного ранее значения в 1867G (см. [3]). Отклонение в 3% при построении I_c -контура, на первый взгляд незначительное, приводит к сильным изменениям значений B_{ver} , в силу больших градиентов поля вблизи границы U-PU. Для независимого определения уровня этой границы, мы использовали один из математических методов выделения объекта на окружающем фоне – метод Отцу [9]. При разбиении пиксельного поля на классы задача кластеризации, т.е. выбор объекта как такового, в общем, сводится к максимизации межклассовой дисперсии. Получив набор объектов, выбираем из них нужные нам для исследования: пятна, поры и т.д.

3. Результаты

Исследованы 12 «правильных» одиночных солнечных пятен в диапазоне значений магнитного поля от 2 до 3 кГс. На рис. 1 в качестве примера для пятна 1256/11388 показан I_c -контур Otsu и 50% порог (слева), а также перенесенный на магнитограмму I_c -контур (справа). Выяснилось, что внешняя граница тени пятна систематически выше 50% уровня от окружающего фона и превышение этого порога в каждом конкретном случае различно.

На рис. 2 представлено характерное изменение B_{ver} вдоль контура на магнитограмме. Среднее поле = 1628 Гс, но его величина совсем не постоянна, она имеет разброс значений до 300 Гс ($SD = 108$).

Рис. 1. Ис-контур Otsu и 50% порог (слева), а также Ис-контур, перенесенный на магнитограмму (справа).

Рис. 2. Характерное изменение компоненты магнитного поля B_{ver} на Ис-контуре.

Общая сводка результатов исследования представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Порог Otsu, среднее вертикальное поле на Ис-контуре и его отклонение.

N	SHARP/NOAA	Data	Time CM (UT)	Otsu Contour Flux	Back ground <Flux>	R, %	<IB-verI> Contour, G	SD, G	$IB_r^{max}I, G$
1	1256/11388	2012/01/02	06:24	29700	56850	0.52	1628	102	2625
2	1256/11389	2012/01/03	08:00	30100	57850	0.52	1520	65	2483
3	1278/11391	2012/01/08	20:00	31035	59440	0.52	1480	58	2654
4	1321/11401	2012/01/20	17:00	26340	54880	0.48	1582	80	2941
5	1321/11402	2012/01/21	06:00	30530	57800	0.53	1575	115	2570
6	1350/11413	2012/02/01	15:00	27670	57500	0.48	1680	68	2645
7	1399/11420	2012/02/18	18:00	29755	58400	0.51	1520	77	2490
8	1422/11423	2012/02/29	07:00	29728	57100	0.52	1555	85	2579
9	1603/11466	2012/04/24	17:45	29825	58420	0.51	1420	68	2023
10	1644/11477	2012/05/14	18:00	29680	57534	0.52	1629	108	2720
11	1653/11479	2012/05/17	00:00	30068	58225	0.52	1690	86	2650
12	1677/11486	2012/05/24	00:00	29276	57725	0.51	1635	72	1962

В колонках таблицы по порядку: номер регистрации патча по SHARP и NOAA, дата и время прохождения объекта (пятна) через центральный меридиан (CM), значение интенсивности на Ис-контуре, рассчитанное по методу Otsu [8], усредненная по 4-м регионам интенсивность фона около пятна, отношение потоков (R), значение среднего магнитного поля на контуре и его стандартное отклонение (SD). Как видно из таблицы, средняя по Ис-контуре величина поля $\langle B_{ver} \rangle$ меняется слабо (1,5–1,7 кГс), в то время

как сама вертикальная составляющая магнитного поля, в конкретном пятне, меняется значительно вдоль определяемого контура (величина дисперсии довольно высока). Эти вариации магнитного поля на границе U-PU, очевидно, напрямую отражают хорошо известную тонкую волокнистую структуру магнитного поля в полутени солнечного пятна. Граница тени пятна, за исключением некоторых пятен, систематически выше 50% уровня от окружающего фона и должна быть определена для каждого конкретного случая. Найденное нами среднее значение $R = 0,52$ близко к значению, определенному в [9]. Это приводит к более низким значениям, чем полученная в работах [1–3] величина $\langle B_{ver} \rangle = 1867G$.

4. Выводы

Используя математический метод Otsu [8], показано, что в большом диапазоне полей пятен (от 2 кГс до 3 кГс) средняя по контуру величина поля $\langle B_{ver} \rangle$ меняется слабо (1,5–1,7 кГс), в то время как сама эта вертикальная составляющая магнитного поля, заметно меняется вдоль определяемого Ic-контура (SD достаточно высока) из-за наличия тонкой волокнистой структуры магнитного поля полутени пятна. Граница U-PU оказывается систематически выше 50% уровня от окружающего фона и должна быть найдена для каждого конкретного случая. Это дает более низкие значения $\langle B_{ver} \rangle$, чем приведенная в [1–3] величина $\sim 1867G$. Для нашей выборки пятен получается $\langle B_{ver} \rangle = 1576 \pm 82G$.

Следует особо подчеркнуть, что мы рассматривали только достаточно правильные, хорошо развитые солнечные пятна, находящиеся на стадии устойчивого существования, с магнитными полями, которые, согласно модели мелкого (неглубокого) солнечного пятна [10], обеспечивают наибольший запас устойчивости магнитной системы как единого целого. Поэтому распространять полученные выводы на все солнечные пятна вообще и рассматривать значение $\langle B_{ver} \rangle$ на границе «тень-полутень» как некую солнечную физическую константу, нет никаких оснований.

Литература

1. Jurčák, J. // A&A, 2011, 531, A118.
2. Jurčák, J., Bello González, N., Schlichenmaier, R., Rezaei, R. // A&A, 2017, 597, A60.
3. Jurčák, J., Rezaei, R., González, N., Bello Schlichenmaier, R., Vomlel, J. // A&A, 2018, 611, L4.
4. Bobra, M.G., Sun, X., et al. (8 авторов) // arXiv:1404.1879v1 [astro-ph.SR], 7 Apr 2014.
5. Schou, J., Scherrer, P.H., Bush, R.I., et al. (всего 21 автор) // Solar Phys., 2012, 275, 229.
6. Scherrer, P.H., Schou, J., Bush, R.I. (всего 14 авторов) // Solar Phys., 2012, 275, 207.
7. Calabretta, Mark R & Greisen, Eric W. arXiv:astro-ph/0207413v1 19 Jul 2002.
8. Otsu, N.A. IEEE Transactions on Systems // Man and Cybernetics. 1979.V.9. P. 62–66.
9. Schmassmann, M., Schlichenmaier, R. & González, N.B. arXiv:1810.09358v2 [astro-ph.SR] 12 Nov 2018.
10. Solov'ev A.A. & Kirichek E.A. // Astrophysics and Space Science, 2014, Vol. 352, No.1, 23–42.