**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦЫ «ТЕНЬ-ПОЛУТЕНЬ».
НАПРЯЖЕННОСТЬ И НАКЛОНЕНИЕ
ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕЙ**

Ефремов В.И.¹, Соловьев А.А.¹, Парфиненко Л.Д.¹, Смирнова В.В.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

**METHODS FOR DETERMINING THE UMBRAL BOUNDARY.
VERTICAL MAGNETIC FIELD AND INCLINATION
AT THE UMBRAL BOUNDARY**

Efremov V.I.¹, Solov'ev A.A.¹, Parfinenko L.D.¹, Smirnova V.V.²

¹Central (Pulkovo) astronomical observatory of RAS, St.-Petersburg, Russia

²Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia

35 stable single sunspots of regular round shape are considered. The main attention is paid to three aspects: determining the position of the outer boundary of the sunspot umbra (UPB), identifying the nature of the change in the vertical component of the magnetic field "Bver" and the inclination "γ" of the total vector of the magnetic field. We used new instrument data (SDO/hmi) called Space-weather HMI Active Region Patches (SHARPs). To determine the boundary, 4 methods were considered, 3 of which were previously used for this purpose, and 1 method was proposed (Otsu Method) [5]. It is shown that there is no single Bver value that can be taken as the UPB (umbra-penumbra boundary) in all spots of different field strengths that we analyzed. The previously found threshold value (according to Hinode / SP data, [1]) of 1867 G with an almost constant Bver on the contour is not confirmed either by the results of this work or by the works of other authors [7]. We have obtained the values of <Bver> ~ 1.6 kG at the UPB border with a fairly large dispersion of the data. It is shown that the choice of the method for determining the UPB turns out to be essential in determining the dependence of the vertical component of the field Bver on its extreme value. It is noted that the value of the field inclination "γ" at the UPB boundary has an almost constant value (SD ~ 1.5–2.5 deg). An assumption was made, which should be verified in the future, that it is this constant at which a change in the magnetoconvection regime occurs in each specific spot.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-119-122

Введение

В последнее время появилось несколько новых работ [1, 2, 7], в которых обсуждаются различные режимы магнитоконвекции в тени и полутени пятна. Центральным вопросом является проведение границы тени-полутени и величины вертикального магнитного поля на ней. Так, Jurcák [1] исследовал свойства магнитного поля на границах тени и отметил, что вертикальный магнитный компонент поля Bver мало меняется по границам UPB. Среднее значение поля на границе составила 1867 Гс (Hinode/SP). Более того, эта величина не зависит ни от размера пятна, ни от цикла сол-

нечной активности. Мы при помощи независимого математического метода попытались проверить эти утверждения.

Данные и анализ

Теперь доступны новые данные прибора SDO/hmi называемые как Space-weather HMI Active Region Patches (SHARPs) [3] с 12-минутной каденцией. SHARP данные доступны в двух координатных системах [6]: CCD и CEA, в последней для всех величин выполнен «ремепинг» (remap) в гелиографическую равновеликую цилиндрическую систему координат (heliographicCylindricalEqual-Area) [4]. Особенность системы CEA состоит в том, что используемое здесь преобразование Ламберта приводит рассматриваемый объект (Patch) к центральному меридиану (CM), т.е. «убирает» проекционный эффект.

В настоящее время для построения контура границы UPB 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} [7], Fig4), было получено оптимальное значение в 53%, ($I_c = 0,53I_{qs}$) и соответствующее значение $B_{ver} = 1639$ G, что почти на 250 G ниже заявленного ранее значения в 1867G [1]. Для независимого определения уровня этой границы, мы воспользовались 4 методами.

Методы

Кратко рассмотрим 4 метода, 3 из которых в той или иной мере ранее использовались для этой цели, и предложим 1 метод (Automated Methods for Finding Thresholds, Метод Оцу), который по нашему мнению, является наиболее эффективным в данной задаче.

1. «AdHoc»

Ранее был предложен выбор уровня на границе UPB в 50% от интенсивности окружающей поверхности спокойного Солнца [1], т.е. $I_{ctr} = kI_{qs}$, где $k = 0,5$. Иногда, этот порог снижается до 40% от QS, но мы **не нашли сколь-нибудь ясного обоснования выбора данной величины** и потому, назвали этот метод «*adhoc*».

2. «Otsu method»

Применительно к данной задаче он адаптирован следующим образом: разбив область поля на классы, вычисляем внутриклассовую дисперсию для каждой пары классов при любом пороге. Оптимальный порог – тот, который максимизирует различие между классами, он и есть граница объекта в пределах поля. Определение значения контура I_{ctr} , таким образом, происходит независимо математическим способом. Заметим, что в данном случае, коэффициент « k » не является универсальной константой для солнечных пятен и меняется от пятна к пятну.

3. «Gradient method»

Метод основан на определении «скачка» фотометрической плотности в разрезе, выполненном по пятну. Привлекательность метода состоит в простоте определения значения скачка и в том, что разрезы могут проходить произвольным образом. Метод дает значения I_{ctr} близкие к вышеперечисленным двум методам, но регулярно большие, чем метод «ad hoc».

4. «Tangent method»

Рис. 1. Фрагмент контуров на карте hmi.sharp_720s.2121.20121018.cont.fits (слева), и их положение в разрезе пятна (справа).

Метод «касательных» довольно широко используется при исследовании морфологических особенностей пятен, в частности определения границы UPB. Метод дает завышенные оценки значения интенсивности для контура, поэтому значение контура, выбранное таким образом можно использовать в качестве определения дальней границы UPB [8]. Общее положение контуров, представлены на рис. 1.

Первые три метода дают почти одинаковые значения границы UPB в континууме, однако отклонение в 3% при построении I_{ctr} -контура, на первый взгляд незначительное, приводит к сильным изменениям значений B_{ver} , в силу больших градиентов поля вблизи границы UPB.

Результаты и выводы

Исследованы 35 «правильных» одиночных солнечных пятен в диапазоне значений магнитного поля от 2 до 3 кГс. Показано, что при обходе по контуру, наклонение полного вектора магнитного поля « γ » остается практически постоянной величиной порядка 140 град (для северной полярности пятна 40 град, соответственно), имея $SD \sim 1.5\text{--}2.5$ град. На рис. 2 представлены средние по контуру значения компонента B_{ver} по 35 пятнам. Контур построен 2 методами: «ad hoc» и «Otsu», соответственно. Видно, что контур, выбранный методом Оцу, дает в пределах исследуемого интервала значений магнитного поля, слабую линейную зависимость B_{ver} от магнитного поля пятна B_{extr} , в то время как метод «ad hoc» дает константу, что и было получено ранее в работе [1].

Таким образом, используя математический метод [5], мы показали, что внешняя граница тени пятна систематически выше 50% уровня от окружающего фона и превышение этого порога в каждом конкретном пятне различно.

Показано, что средняя по контуру величина поля $\langle B_{ver} \rangle$ меняется слабо (1,5–1,7 кГс), в то время как сама вертикальная составляющая маг-

нитного поля, в конкретном пятне, меняется значительно вдоль определяемого контура.

Рис. 2. Характер зависимостей B_{ver} на контуре от экстремального значения поля в пятне для методов «adhoc» и «Otsu», соответственно.

Найденные значение «к» для уравнения $I_{ctr} = kI_{qs}$ за исключением некоторых пятен, систематически выше 50% уровня от окружающего фона и должны быть определены для каждого конкретного случая. Разброс значений коэффициента «к» для разных методов существен и находится в пределах 0,46 до 0,67.

В то же время, упущенная ранее из рассмотрения такая величина как наклонение поля на контуре, « γ » остается практически постоянной величиной с очень малым изменением, имея $SD \sim 1.5\text{--}2.5$ град. По-видимому, именно она является той универсальной константой, при которой происходит смена режима магнитоконвекции в каждом конкретном пятне.

Литература

1. Jurčák, J. // A&A, 2011, 531, A118
2. Jurčák, J., Bello González, N., Schlichenmaier, et.al. // A&A, 2017, 597, A60
3. Bobra, M.G., Sun, X., et.al. // arXiv:1404.1879v1 [astro-ph.SR], 7 Apr 2014
4. Calabretta, Mark R. and Greisen, E.W. // arXiv:astro-ph/0207413v1 19 Jul 2002
5. Otsu, N.A. // IEEE Transactions on Systems, 1979. Vol. 9. №1. P. 62–66.
6. Scherrer, P.H., Schou, J., et.al. // Solar Phys. 2012. 275. 207.
7. Schmassmann, M., et.al. // arXiv:1810.09358v2 [astro-ph.SR], 12 Nov 2018
8. Zhivanovich I., Solov'ev A.A., Smirnova V.V., et al. // Astrophysics and Space Science. 2016. Vol. 361. article id. 102. 6 pp.