

## МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ЛИМБОВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

## Magnetic Fields in Limb Solar Flares

**Abstract.** Two limb solar flares, of 14 July 2005 and 19 July 2012, of importance X1.2 and M7.7, are analyzed. Magnetic field strength in the flares are studied by means of Stokes  $I \pm V$  profiles of  $H\alpha$  and D3 HeI lines. There is direct evidence to the magnetic field inhomogeneity in flares, in particular, non-parallelism of bisectors in the  $I + V$  and  $I - V$  profiles. In some flare places, the local maxima of bisector splitting were found in both lines. If these bisector splittings are interpreted as the Zeeman effect manifestation, the magnetic field strengths reach 2200 G in  $H\alpha$  and 1300 G in D3. According to the calculations, the observed peculiarities of line profiles may indicate the existence of optically thick emissive small-scale elements with strong magnetic fields and lowered temperature.

**Введение.** Прямых измерений магнитных полей в лимбовых солнечных вспышках очень мало, имеются лишь единичные наблюдения (см., напр., [1]). Магнитографический метод для таких измерений неприменим, а спектрально-поляризационные наблюдения относятся, в основном, ко вспышкам на диске. Привлекательность наблюдений лимбовых вспышек в том, что из них можно прямым путём найти геометрические высоты соответствующих структурных образований. В то же время, при наблюдениях вспышек на диске высота формирования линии определяется менее надёжно, расчётным путём – она зависит от модели возмущённой атмосферы, а последняя определяется всегда приближённо, в рамках определённых допущений. Кроме того, в лимбовых вспышках наблюдается более простой для интерпретации чисто эмиссионный спектр, тогда как для вспышек на диске этот спектр гораздо более сложный, с эмиссионно-абсорбционными профилями линий. В таких профилях выделить слабые по интенсивности спектральные вклады собственно вспышки много сложнее, чем в чисто эмиссионных профилях.

Цель настоящей работы – измерения магнитных полей в двух мощных лимбовых вспышках, 14 июля 2005 г. и 19 июля 2012 г., по спектральным магниточувствительным линиям  $H\alpha$  и D3 HeI. Эти линии интересны тем, что имеют сильно различающиеся температурные чувствительности (линия гелия светится при более высокой температуре, чем линия водорода), тогда как магнитная чувствительность у них почти одинакова ( $g = 1.05$  и  $1.06$ , соответственно).

**Наблюдения** проводились на горизонтальном солнечном телескопе (ГСТ) Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко [2]. Телескоп снабжён эшелльным спектрографом, фотогидом и спектрогелиоскопом.

Вспышка 14 июля 2005 г. возникла в активной области NOAA 10786, имела координаты  $11^\circ\text{N}$ ,  $90^\circ\text{W}$  и балл X1.2 (<http://www.swpc.noaa.gov/>). Она началась в 10:16 UT и достигла максимума в 10:55 UT. Спектр вспышки снимался на фотопластинки ORWO WP3 с экспозициями в 1 мин. Моменты начала экспозиций были следующими: 11:51,

12:02, 12:07 и 12:10 UT. Ниже анализируется спектр, полученный в 12:07 UT. Ширина входной щели соответствовала высотам над лимбом от 0 до  $\approx 20$  Мм.

Вспышка 19 июля 2012 г. имела балл M7.7 и была связана с заходящей активной областью NOAA 1520, которая имела большое пятно ( $\approx 50$  Мм) с магнитным полем около 2500 Гс. По данным GOES ([http://www.swpc.noaa.gov/rt\\_plots/xray\\_1m.html](http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/xray_1m.html)), максимум рентгеновского излучения вспышки был около 06:00 UT. Вспышка была медленной: фаза роста излучения в рентгене длилась 1 час 40 мин, а спада – более 4 часов. На эшелъном спектрографе ГСТ АО КНУ получено 16 зееман-спектрограмм этой вспышки; соответствующие экспозиции сделаны в интервале времени 06:32:00 – 07:59:55 UT. Были проанализированы спектры, полученные в 06:45:50, 06:57:20 и 06:58:25 UT, когда вершина поднимающейся вспышечной арки имела высоту в пределах от 40 до 45 Мм.

Все спектры получены с анализатором круговой поляризации (призмой-расщепителем из исландского шпата и четвертьволновой пластинкой), что позволило анализировать стоксовы профили  $I \pm V$ .

**Наблюдённые профили  $I+V$  и  $I-V$  линий**, взаимно «привязанные» по длинам волн по теллурическим линиям, имеют следующие особенности. Как правило, наибольшее расщепление  $I+V$  и  $I-V$  профилей наблюдается вблизи центра эмиссии, тогда как в средних и далёких крыльях это расщепление значительно меньше. Наиболее наглядно это прослеживается по бисекторам профилей (тонкие срединные линии на рис. 1 и 2). Ранее этот эффект (условно названный « $V$ -эффектом», поскольку придаёт форме бисекторов вид латинской буквы  $V$ ) наблюдался в активных протуберанцах [3]. Как и в активных протуберанцах, места наибольшего наблюдённого расщепления линий  $H\alpha$  и D3 HeI найдены весьма локальными, в областях размером 2–4 Мм в картинной плоскости. Вне этих мест расщепление профилей становится сравнимым с шумовыми эффектами на спектрограммах, которые оцениваются величиной  $\pm 100$  Гс. Для примера на рис. 1 показаны наблюдённые профили линий во вспышке 14.07.2005 г. для высоты 19 Мм, где расщепление линий было максимальным. Хорошо видно, что в обеих линиях расщепление бисекторов возрастает в вершинах эмиссий, где оно достигает 23–46 мÅ. Если это расщепление трактовать как Зееман-эффект, то получаем магнитное поле напряжённостью до 2200 Гс по линии  $H\alpha$  и до 1300 Гс по линии D3.

Еще один весьма характерный эффект – противоположная наблюдённая полярность магнитного поля по линиям водорода и гелия. Из рис. 1 видно, что бисектор профиля  $I - V$  (штриховая линия) в линии  $H\alpha$  смещён влево, в область меньших длин волн по отношению к бисектору для  $I + V$  профиля (сплошная линия). Однако в линии гелия направление соответствующего смещения является обратным. Аналогичный эффект отмечен авторами [3] для активных протуберанцев, и сделан вывод об антикорреляции измеренных полей по этим линиям.

Возможная причина этого эффекта, с учётом различной температурной чувствительности линий водорода и гелия (а, следовательно, и вероятной принадлежности соответствующих данных к пространственно различным областям вспышки) – слоистая знакопеременная мелкомасштабная структура эмиссионных элементов вспышки [3].

Из рис. 1 видна ещё одна примечательная особенность: бисекторы для линий  $H\alpha$  и D3 соответствуют не только различной полярности магнитного поля, но и различному по знаку градиенту лучевых скоростей. Действительно, бисекторы в линии D3 имеют выпуклость изгиба влево, напоминая букву «С», тогда как в линии  $H\alpha$  – в противоположную сторону. Поскольку асимметрия профилей линий обусловлена различными

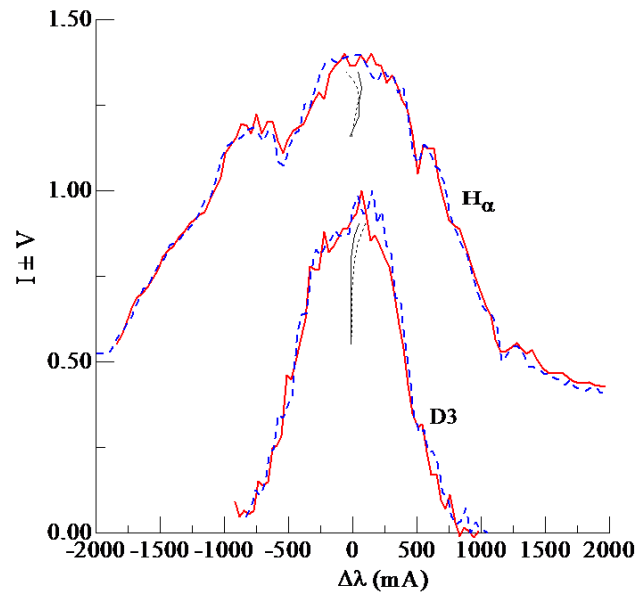


Рис. 1: Наблюдённые профили линий  $H\alpha$  и D3 HeI вспышке 14 июля 2005 г., соответствующие высоте 19 Мм.

лучевыми скоростями на различной вдоль луча зрения оптической толще, очевидно, подобный результат мог возникнуть при различном характере изменения скоростей в объёмах свечения линий водорода и гелия.

Во вспышке 19.07.2012 г. бисекторы профилей  $I \pm V$  линии  $H\alpha$  имеют наибольшее расщепление только в пределах наиболее яркого места вспышечной арки, занимающего  $\approx 5$  Мм в картинной плоскости. Оказалось, что здесь максимальное расщепление бисекторов, выраженное в величинах напряжённостей, достигает 800 Гс на высоте 40 Мм. Однако в этой вспышке, в отличие от вспышки 14.07.2005 г., максимальное расщепление бисекторов достигалось не в вершине эмиссионного «холма» линии  $H\alpha$ , а несколько ниже – на расстоянии примерно 350 мÅ от её вершины (рис. 2).

Аналогичный эффект, но на расстоянии 90 мÅ от центра эмиссии, отмечен и в линии D3 для момента 06:57:20 UT. Таким образом, в этой вспышке имелись указания на локальные экстремумы (максимумы) расщепления бисекторов. Подобные экстремумы отмечены в линии FeI 5233 во вспышках на диске [4, 5]. Там они тракуются как проявление субтелескопической структуры магнитного поля, при которой в спектре суммируются вклады от поляризованных зеемановских  $\sigma$ -компонент с сильно различающимися магнитными расщеплениями. Если такую интерпретацию принять для исследуемых вспышек, приходится допустить существование огромных по величине магнитных полей, до 16 кГс. По-видимому, существование таких полей на корональных высотах маловероятно.

Согласно расчётам, аналогичные особенности расщепления бисекторов возникают и в ином случае – когда в пределах входной щели инструмента суммируются спектральные вклады от многих оптически толстых эмиссионных элементов, имеющих умеренно сильное (субкилогауссовое) поле. Каждый оптически толстый эмиссионный элемент должен давать негауссовый профиль спектральной линии – с более плоской вершиной и более крутыми крыльями. Параметр Стокса  $V$  будет в этом случае иметь острые

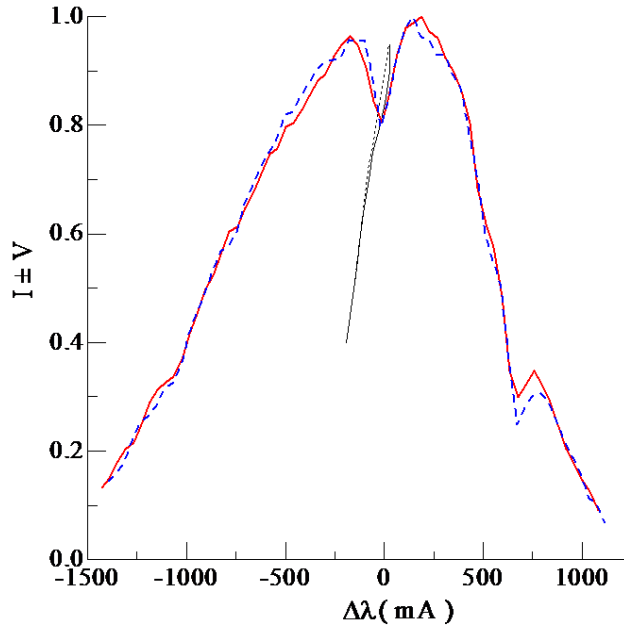


Рис. 2: Наблюдённые профили линий  $H\alpha$  во вспышке 19 июля 2012 г., для момента времени 06:45:50 UT и высоты 40 Мм.

пики не в местах локализации  $\sigma$ -компонент, а в местах максимальной крутизны  $dI/d\lambda$  стоксового профиля  $I$ . Наложение таких острых и разнесённых по длинам волн пиков параметра Стокса  $V$  на основную картину эмиссии должно привести к максимуму расщепления бисекторов в профилях  $I \pm V$  именно там, где локализируются максимумы параметра  $dI/d\lambda$ .

**Количественные расчёты** были сделаны для линии  $H\alpha$  во вспышке 19.07.2012 г. (рис. 3). На этом рисунке зависимость 1 – наблюдательные данные, усреднённые по участку в 5 Мм вблизи высоты 40 Мм во вспышке, 2 – модельные расчёты.

Зависимость 2 рассчитана для двухкомпонентной модели, содержащей гауссовы профили «фона» и негауссовы профили оптически толстых ( $\tau \gg 1$ ) эмиссионных элементов. Аргументы в пользу того, что пространственно неразрешимые эмиссионные элементы вспышек должны быть действительно оптически толстыми, приведены в работе Курочки и Остапенко [6]. В таком случае профиль линии рассчитывается по формуле

$$I(\nu', \tau_0, \eta) = A \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left[ 1 - e^{-\tau_0 \alpha(\nu' - y)} \right] \cdot e^{-(y/\eta)^2} dy. \quad (1)$$

Здесь  $\nu' = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{DЭ}}$ , где  $\Delta\lambda_{DЭ}$  – доплеровская ширина линий излучения отдельных эмиссионных элементов объекта,  $\tau_0$  – оптическая толщина одного элемента в центре эмиссионной линии,  $\eta = \frac{\Delta\lambda_{D\text{max}}}{\Delta\lambda_{DЭ}} = \frac{\xi_{\text{max}}}{\xi_{Э}}$ ,  $\Delta\lambda_{D\text{max}}$  – доплеровская ширина, зависящая от скоростей макроскопических движений эмиссионных элементов  $\xi_{\text{max}}$ ,  $\alpha(\nu')$  – контур коэффициента поглощения,  $A$  – нормировочный множитель.

Оказалось, что если принять значения:  $\tau_0 = 10^3$ ,  $\eta = 1.2$ ,  $\Delta\lambda_{DЭ} = 194 \text{ м\AA}$ ,  $B_{Э} = 700 \text{ Гс}$ ,  $B_{\text{фон}} = 100 \text{ Гс}$ , то имеем теоретическую зависимость (2), практически совпадаю-

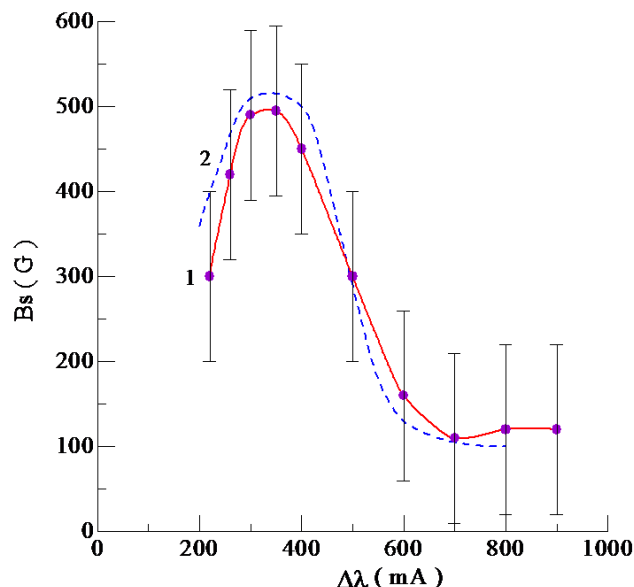


Рис. 3: Сопоставление наблюдаемого расщепления (1) бисекторов  $B_s$  на разных расстояниях  $\Delta\lambda$  от центра линии  $H\alpha$  во вспышке 19.07.2012 г. с теоретическим (2) для двухкомпонентной модели с оптически толстыми эмиссионными элементами (см. текст).

щую с наблюдаемой (1). Таким образом, полученные данные объяснимы и без привлечения гипотезы о «чрезмерно сильных» магнитных полях в исследованных вспышках.

Заметим, что величина  $\Delta\lambda_{D\delta} = 194 \text{ m\AA}$  соответствует для водорода  $T \approx 5000 \text{ K}$ , если предположить нулевые микротурбулентные скорости. Это значит, что мелкомасштабные эмиссионные элементы имеют не только усиленные магнитные поля, но и пониженную температуру. Ранее к аналогичным выводам приходили авторы работ [7, 8], анализируя аномально узкие (10–30  $\text{m\AA}$ ) эмиссии линии  $\text{FeI } 5434.5$  ( $g \approx -0.01$ ) во вспышках на диске.

**Основной вывод** настоящей работы состоит в том, что наблюдаемые в лимбовых вспышках профили  $I \pm V$  линий  $H\alpha$  и  $D3 \text{ HeI}$  имеют те же особенности, что и в активных протуберанцах [3]. Диапазон измеренных напряжённостей (до 2200 Гс) также примерно тот же, что в активных протуберанцах. Наблюдённые особенности  $I \pm V$  профилей (а именно, локальные экстремумы расщепления бисекторов) подтверждают сделанный ранее вывод [6] о том, что вспышки состоят из мелкомасштабных эмиссионных элементов с большой оптической толщиной, имеющих повышенную плотность плазмы.

### Литература

1. Лозицкий В.Г., Стаценко М.М. Изв. КрАО, 2008, **104**, № 2, 28.
2. Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лозицкий В.Г. и др, Вестник Киев. ун-та, Астрономия, 1980, Вып. 22, 48.
3. Лозицкий В.Г., Ботыгина О.А. Письма в Астрон. журн., 2012, **38**, № 6, 431.
4. Лозицкий В.Г. Письма в Астрон. журн., 2009, **35**, № 2, 154.
5. Lozitsky V.G., Staude J. Journ. of Astrophys. & Astron., 2008, **29**, Nos. 3&4, 387.
6. Курочка Л.Н., Остапенко В.А. Солн. данные, 1975, № 7, 96.

7. Лозицький В.Г., Лозицька Н.Й., Гордовський М.Ю. Вісник. Київський ун-т ім. Т.Шевченка. Астрономія, 1999, Вип. 35, 17.

8. Lozitsky V.G., Gordovsky M.Yu., Lozitska N.I., Golbraikh E. Kinematics and Phys. of Celest. Bodies, Suppl., 2000, № 3, 449.

Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко  
ул.Обсерваторная, 3, Киев, 04053, Украина

В.Г. Лозицкий  
V.G. Lozitsky  
*lozitsky@observ.univ.kiev.ua*

Н.И. Лозицкая  
N.I. Lozitska  
*nloz@observ.univ.kiev.ua*

О.А. Ботыгина  
O.A. Botygina  
*botygina@ukr.net*

Поступила 1 февраля 2013 года