Вісник Астрономічної школи | Astronomical School's Report

**ISSN 1607–2855**

**Том 7 • № 1 • 2011** С. 56 – 59

УДК 523.985

# Структура магнітних полів у слабких сонячних спалахах на фотосферному та хромосферному рівнях

**В.Г. Лозицький, О.С. Андрієць**

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

*Наведено результати спектрофотометричного дослідження чотирьох слабких сонячних спалахів: 25 липня 1991 року балу SB, 18 липня 2000 року рентгенівського балу C1.5, 9 червня 2001 року балу C4 та 28 липня 2004 р. балу C4. Аналізувались профілі Стокса $I \pm V$ в спектральних лініях Hα, $D_1$ NaI та інших металів (в основному FeI). Знайдено, що в наближенні однокомпонентного поля його величина в одному із спалахів є більшою у хромосфері, ніж в фотосфері. Особливості розщеплення бісекторів в профілях $I \pm V$ хромосферних ліній вказують на двояку картину: як квазіоднорідне поле в картинній площині, так і неоднорідне, мінімум двохкомпонентне. Для спалаху 25 липня 1991 року розраховано параметри двохкомпонентної моделі і показано, що в маломасштабній компоненті магнітне поле в 10–20 разів сильніше за фонове, а профілі ліній у 5 разів вужчі за спостережені.*

*СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ У СЛАБЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ НА ФОТОСФЕРНОМ И ХРОМОСФЕРНОМ УРОВНЯХ, Лозицкий В.Г., Андриец О.С. — Приведены результаты спектрофотометричного исследования четырех слабых солнечных вспышек: 25 июля 1991 года балла SB, 18 июля 2000 года рентгеновского балла C1.5, 9 июня 2001 года балла C4 и 28 июля 2004 р. балла C4. Анализировались профили Стокса $I \pm V$ в спектральных линиях Hα, $D_1$ Na и других металлов (в основном Fe). Найдено, что в приближении однокомпонентного поля его величина в одной из вспышек является большей в хромосфере, чем в фотосфере. Особенности расщепления бисекторов в профилях $I \pm V$ хромосферных линий указывают на двоякую картину: как квазиоднородное поле в картинной плоскости, так и неоднородное, минимум двухкомпонентное. Для вспышки 25 июля 1991 года рассчитаны параметры двухкомпонентной модели и показано, что в маломасштабной компоненте магнитное поле в 10–20 раз сильнее, чем фоновое, а профили линий в 5 раз уже наблюденных.*

*MAGNETIC FIELD STRUCRURE IN WEAK SOLAR FLARES ON PHOTOSPHERIC AND CHROMOSPHERIC LEVELS, by Lozitsky V.G., Andriets O.S. — The spectrophotometric measurement's results of four weak solar flares of 25 July 1991, 18 July 2000, 9 June 2001 and 28 July 2004 are presented. The importances of these flares were SB, C1.5, C4 and C4 respectively. The Stokes $I \pm V$ profiles of Hα, $D_1$ NaI and other metalic spectral lines (mainly FeI) were analyzed. It was found that magnetic field in just one flare was stronger on the chromospheric level than in the photosphere according to a uniform magnetic field approximation. The splitting's characteristics of $I \pm V$ Stokes profiles in chromospheric lines pointed out dual picture: quasihomogeneous field in a horizontal plane and inhomogeneous, at least were both two-component. The parameters of two-component magnetic field's model were calculated for flare of 25 July 1991. As a result, it was shown that magnetic field of small-scale component was 10–20 times stronger than magnetic field of background component and lines profiles were 5 times narrower than observed ones.*

**Ключевые слова:** структура солнечных магнитных полей; солнечные вспышки.

**Key words:** structure of solar magnetic fields; solar flares.

## 1. ВСТУП

Сонячні спалахи — спорадичні й потужні вибухоподібні процеси, що виникають в атмосфері Сонця і захоплюють всі її шари, від корони до фотосфери. Вони мають магнітну природу: накопичена в активній області магнітна енергія раптово "анігілює", перетворюючись в інші її форми (теплову, електромагнітного випромінювання, викидів плазми, прискорених часток та ударних хвиль). Таке перетворення енергій поки що не має вичерпного теоретичного пояснення і є однією з актуальних проблем сучасної геліофізики. Для вирішення цієї проблеми є важливими нові надійні й детальні спостережні дані про магнітні поля на всіх рівнях сонячної атмосфери.

Вивченню магнітних полів у спалахах присвячено багато робіт, однак майже всі вони стосуються фотосферних шарів. Даних про хромосферні магнітні поля дуже мало (див., напр., [1, 2, 4–14]), а прямі дані про корональні магнітні поля взагалі відсутні. Немає ясності і в питанні достовірних змін магнітного поля у спалахах різної потужності: якщо такі зміни прослідковуються у потужних спалахах, то у спалахах середньої і особливо малої потужності вони часто не відрізняються від еволюційних.

У даній роботі співставлені результати спектрально-поляризаційних вимірювань магнітних полів саме у слабких спалахах. Раніше було знайдено [1, 5], що в слабкому й повільному спалаху 28 липня 2004 року магнітне поле по лінії FeI 6302.5 Å було в 1.6–1.8 рази сильніше, ніж поле по лінії Hα. Виявилось також, що при переході від фотосфери до хромосфери усереднений висотний градієнт був близький до нуля ($\partial B/\partial h \approx 0$) у спалаху, тоді як за межами спалаху — від'ємним ($\partial B/\partial h < 0$). Можливо, це свідчить про те, що в області спалаху діяв певний механізм локального підсилення магнітного поля. Такі випадки відмічались раніше у інших більш потужних спалахах [4, 8, 10–12].

**Таблиця 1.** Виміряні величини магнітного поля по лініях фотосфери та хромосфери у різних спалахах

| Дата і момент спалаху (UT) | Магнітне поле, Гс | | | |
|---|---|---|---|---|
| | FeI 6301.51 (FeI 5247.1) | FeI 6302.51 (FeI 5250.21) | D1Na 5895.923 | Hα 6562.82 |
| 25.07.1991 05:36:40 | (660±60) | (740±40) | 1590±80 | 1100±100 |
| 18.07.2000 05:11 | 250±60 | 130±40 | – | – |
| 09.06.2001 05:40:20 | 390±60 | 300±40 | 340±80 | – |
| 28.07.2004 05:46 | 1280±60 | 2200±40* | 920±80 | 1400±100 |

∗ — величина модуля магнітного поля

Мета даної роботи — аналіз нового матеріалу спостережень, що стосується слабкого спалаху 9 червня 2001 року, і співставлення його з раніше отриманими даними для трьох інших спалахів. Таке співставлення виконано для двох рівнів сонячної атмосфери — фотосфери й хромосфери.

## 2. МАТЕРІАЛ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА ПРОФІЛІ ЛІНІЙ

У даній роботі вивчаються магнітні поля у чотирьох слабких сонячних спалахах: 25 липня 1991 року, 18 липня 2000 року, 9 червня 2001 року та 28 липня 2004 року. Потужності цих спалахів є такими: SB, C1.5, C4 та C4 відповідно. Спалахи спостерігалися В.Г.Лозицьким на ешельному спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка [3]. Цей спектрограф може реєструвати сонячний спектр одночасно від 3800 до 6600 Å з експозицією у декілька секунд. Спектр спалахів сфотографовано на фотопластинки ORWO WP3 з використанням аналізатора кругової поляризації, що дозволяє аналізувати комбінацію стоксових профілів $I+V$ та $I-V$. Методика опрацювання таких спектрів описана в роботах [1, 4, 5]. Вона грунтується на фотометрії спектрограм на мікрофотометрі МФ-4 і подальшому опрацюванню даних фотометрії на комп'ютері з використанням пакетів спеціальних програм. Типова просторова роздільна здатність прямих спостережень $\approx 1-1.5$ Мм, спектральна (біля FeI 525.02) — 3 пм (30 мÅ).

Магнітні поля у спалахах вимірювались по 13 спектральних лініях: FeI 6302.51, FeI 6301.51, FeI 5250.65, FeI 5250.21, FeI 5247.1, CrI 5247.6 та Hα 6562.82, CrI 4339.45, VI 4341.013, Ti II 4341.369, Hγ 4340.47, D1Na 5895.923, D2Na 5889.953. Лінії підібрані так, щоб можна було вивчити зміни магнітного поля в діапазоні висот "фотосфера–хромосфера" та виявити ознаки присутності субтелескопічних магнітних полів. Магнітні поля вимірювались по ефекту Зеємана, який є домінуючим при тих магнітних полях ($\geqslant 10^3$ Гс), які можна очікувати у спалахах [4].

У всіх досліджених спалахах профілі фотосферних ліній FeI, CrI, VI та Ti II були фраунгоферовими, без емісійних піків в їх ядрах. Стосовно ж хромосферних ліній Hα та NaI, то в них спостерігались або емісійні піки, або вказівки на помітну й розщеплену емісію в ядрах (рис. 1 та 2). Так, з рис. 1 видно, що лінія Hα має чітко виражені емісійні піки, притому бісектори профілів $I+V$ та $I-V$ плавно розходяться від крил до ядра лінії. Ця особливість розщеплення бісекторів, названа раніше V-ефектом [7], вказує на неоднорідність магнітного поля: при однорідному полі бісектори були б паралельними. У лінії $D_1$ емісійні піки не видно безпосередньо: там емісія значно слабша і емісійні піки лише намічаються. Все-таки, і в цій лінії є очевидною непаралельність бісекторів, з їх досить характерним "схрещеним" виглядом. Подібна форма бісекторів можлива при сумуванні фраунгоферових і емісійних профілів при значній відмінності їх магнітних розщеплень (у 3–5 разів).

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати вимірювань магнітного поля у всіх чотирьох спалахах наведені в табл. 1. Всі дані по лініях FeI отримані методом "центрів ваги", тоді як по лініях NaI та Hα — з вимірювань розщеплення бісекторів. Це пов'язано з тим, що у ліній FeI спостерігались прості фраунгоферові профілі, по розщепленню яких було нескладно виміряти величину магнітного поля. Лінії ж NaI та H мали у спалахах складні емісійно-абсорбційні профілі, з різною величиною розщеплення у крилах та ядрах. Оскільки ядра цих ліній формуються в хромосфері, то по розщепленню бісекторів в ядрах ліній можна було знайти величину хромосферного поля.

Похибки вимірювань оцінювались по розкиду положень телуричних ліній на регістрограмах. Здебільшого цей розкид не перевищував ±1.5 мÅ, що для ліній з найбільшими факторами Ланде (FeI 5250.2 та 6302.5, $g=3.0$ та 2.5, відповідно) дає похибки на рівні ±40 Гс, тоді як для ліній NaI та Hα — $\pm(80-100)$ Гс. З врахуванням цього, з табл. 1 видно, що дані вимірювань по лініях FeI в усіх спалахах, за винятком спалаху 28.07.2004, в цілому добре узгоджуються між собою. Однак у спалаху 28.07.2004 виміряна величина магнітного поля по лінії FeI 6302.5 відповідає модулю магнітного поля $|\mathbf{B}|$ (у цій лінії спостерігалось повне спектральне розділення зеєманівських $\pi$- та $\sigma$-компонент), тоді як в інших спалахах і лініях — його поздовжній компоненті $B_{\|}$, притому з точністю до фактора заповнення. Тому, оскільки для спалаху 28.07.2004 вимірювання по лініях FeI 6301.5 та 6302.5 відповідають різним по фізичному смислу характеристикам, не виключено, що дійсна величина модуля магнітного поля по цих лініях була приблизно однаковою.

Для більш широких хромосферних ліній NaI та Hα вимірювання давали лише величину $B_{\|}$ (також з точністю до фактора заповнення). Порівнюючи цю величину для фотосферних і хромосферних ліній, бачимо, що тільки у спалаху 25.07.1991 хромосферні поля достовірно сильніші за фотосферні. Тобто, на даному матеріалі не можна сказати, що в слабких спалахах завжди виникає переважання магнітного поля на верхньому рівні над магнітним полем на нижньому (тобто $\partial B/\partial h > 0$), знайдене раніше у більш потужних спалахах [4, 8, 10–12].

Щоб врахувати фактор заповнення (тобто можливу двохкомпонентність магнітного поля), було розраховано теоретичні профілі в припущенні, що магнітне поле є скрізь поздовжнім, а профілі ліній апроксимуються гауссіанами. Тоді нормовані на одиничну інтенсивність профілі $I+V$ та $I-V$, коротко записані нижче як $I^{\pm}$, можна розрахувати за формулою

$$I^{\pm} = (1-A)\exp\left\{-(v \pm v_H)^2\right\} + A\exp\left\{-\frac{(v \pm Rv_H)^2}{k^2}\right\} \qquad (1)$$

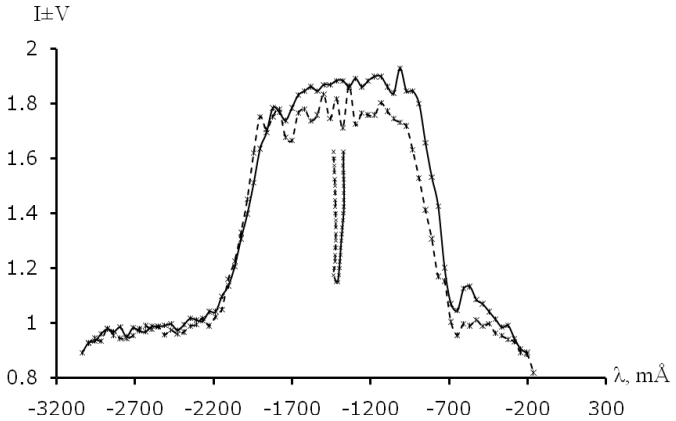


**Рис. 1.** Профілі $I \pm V$ лінії Hα у місці максимальної емісії у спалаху 25 липня 1991 року. Видно непаралельність бісекторів, що вказує на неоднорідність хромосферного магнітного поля.

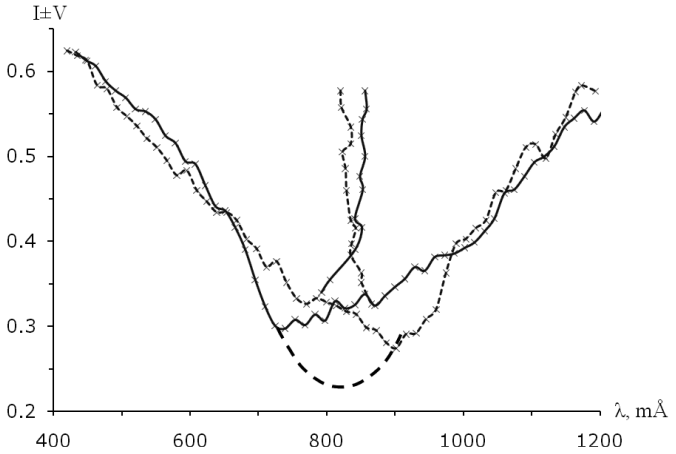


**Рис. 2.** Профілі $I \pm V$ лінії $D_1$ у спалаху 25 липня 1991 року. Довгими штрихами наведено апроксимацію фраунгоферового профіля в ядрі лінії.

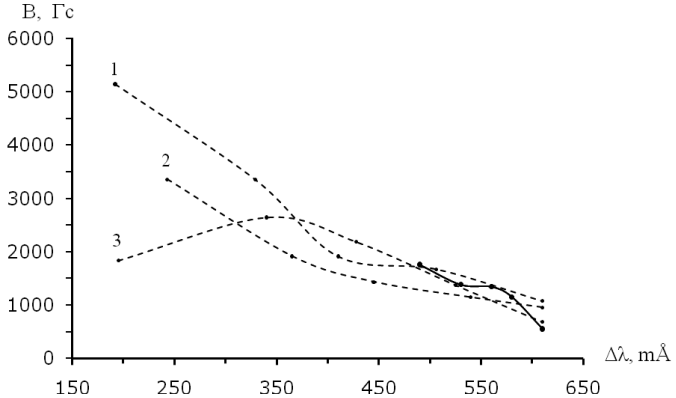


**Рис. 3.** Залежність величини магнітного поля $B$ від віддалі $\Delta\lambda$ від центру лінії Hα 656.282 для спостережуваного (суцільна крива) та теоретично підібраних профілів (штриховані криві). Параметри теоретичних кривих 1–3 подані в тексті.

де $v$ — відстань від центра лінії в одиницях доплерівської ширини; $v_H$ — зеєманівське розщеплення в фоновій компоненті, також віднесене до доплерівської ширини лінії в "фоні"; $A$ — фактор заповнення площі вхідної щілини маломасштабними магнітними елементами; $k$ — ширина лінії в маломасштабній компоненті по відношенню до ширини лінії в "фоні"; $R$ — відношення індукцій магнітного поля в маломасштабній і фоновій компонентах.

Модель розраховувались для хромосферної лінії H$\alpha$ у спалаху 25 липня 1991 року (рис. 1). Теоретичні профілі було підібрано так, щоб вони були максимально подібні до спостережених профілів лінії. Відповідно до розрахованих теоретично моделей профілів цієї лінії та експериментальних профілів було побудовано графіки залежності величини магнітного поля від відстані від центра лінії як для теоретично підібраного профілю даної лінії, так і для експериментального (рис. 3). Теоретичні профілі мали наступні параметри в процесі наближення теоретичних профілів до спостережуваних: (1) $v_H = 0.03$, $A = 0.7$, $k = 0.2$, $R = 10$, (2) $v_H = 0.03$, $A = 0.7$, $k = 0.2$, $R = 15$, (3) $v_H = 0.03$, $A = 0.7$, $k = 0.2$, $R = 20$. Як видно з графіка на рис. 3, всі три теоретичні профілі перетинають спостережуваний у деяких точках, повторюючи хід експериментальної кривої.

Треба зауважити, що величина магнітного поля, розрахована для теоретичних профілів лінії H$\alpha$, перевищує величину поля спостережуваного профілю біля центру лінії, що є вказівкою на можливе існування потужних маломасштабних полів в області слабкого спалаху. До того ж, теоретичні профілі виявились звуженими у 5 разів у порівнянні з експериментальною кривою, що теж є вказівкою на присутність сильних магнітних полів в даній області спалаху [4].

## 4. ВИСНОВКИ

З аналізу вимірювань магнітного поля у чотирьох вказаних вище слабких спалахах випливає, що в наближенні однокомпонентного поля його величина тільки в одному із спалахів є більшою у хромосфері, ніж у фотосфері. Особливості розщеплення бісекторів в профілях $I \pm V$ хромосферних ліній вказують на двояку картину: як квазіоднорідне поле в картинній площині, так і неоднорідне, мінімум двохкомпонентне. Для спалаху 25 липня 1991 року розраховано параметри двохкомпонентної моделі і показано, що в маломасштабній компоненті магнітне поле в 10–20 разів сильніше за фонове, а профілі ліній у 5 разів вужчі за спостережені. В цілому, таким чином, структура магнітного поля у слабких спалахах виявляється не настільки відмінною від незбурених областей на Сонці, як це знайдено для спалахів більшої потужності [4, 8, 10–12].


1. *Андрієць О.С., Лозицький В.С.* Просторова неоднорідність і еволюція магнітного поля в області слабкого сонячного спалаху // Журнал фізичних досліджень. — 2009. — **13**, № 3. — С. 3904–1-3904-5.
2. *Барановский Э.А., Лозицкий В.Г., Таращук В.П.* Моделирование фотосферы и хромосферы двух мощных вспышек на Солнце (28 октября 2003 г. и 1 сентября 1990 г.) // Кинематика и физика небесных тел. — 2009 — **25**, № 5, — С. 373–384.
3. *Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лозицкий В.Г., Лозицкая Н.И., Остапенко В.А., Полупан П.Н., Романчук П.Р., Россада В.М.* Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестник Киев. ун-та. Астрономия. — 1980. — Вып. 22. — С. 48–56.
4. *Лозицкий В.Г.* Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце. Дис. ... д-ра ф.-м. наук: 01.03.03. — Киев, 2003. — 299 с.
5. *Лозицкий В.Г., Андриец Е.С.* Сопоставление измерений магнитного поля в слабой солнечной вспышке по линиям FeI 6302.5 и H$\alpha$ // Труды Уссурийской астрофиз. Обсерватории. — 2008 — Вып. 11. — С.112.
6. *Лозицкий В.Г., Курочка Л.Н., Лозицкая Н.И.* Знакопеременность высотного градиента магнитного поля в солнечной вспышке // Астрономический журнал. — 1986. — **63**, № 4. — С. 814–816.
7. *Лозицкий В.Г., Стаценко М.М.* Исследование магнитного поля в лимбовой солнечной вспышке // Известия Крым. Астрофиз. обсерватории. — 2008. — **104**, № 2. — С. 28–28.
8. *Осика О.Б.* Магнітні поля у спалахах середньої потужності за даними спектрально-поляризаційних спостережень. Дис. ... кандидата ф.-м. наук: 01.03.03. — Київ, 2010. — 134 с.
9. *Abramenko V.I., Baranovsky E.A.* Flare-related changes in the profiles of six photospheric spectral lines // Solar Physics. — 2004 — **220**, № 1. — P. 81–91.
10. *Lozitsky V.G., Lozitska N.I.* Line profiles and magnetic fields in the exclusively powerful solar flare of October, 2003: preliminary results // Kinematics and Physics of Celest. Bodies, Suppl. — 2005. — № 5. — P. 148–150.
11. *Lozitsky V.G., Staude J.* Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // Journal of Astrophysics and Astronomy. — 2008 — **29**, issue 3-4. — P. 387–404.
12. *Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Leiko U.M.* Observations of magnetic field evolution in a solar flare // Solar Physics. — 2000 — **191**. — P. 171–183.
13. *Wang H., Goode P.R., Denker C., etc.* Comparison of the 1998 April 29 M6.8 and 1998 November 5 M8.4 flares // The Astrophysical Journal. — 2000. — **536**. — P. 971–981.


Надійшла до редакції 28.07.2010