

УДК 523.985 + 52–337

## Спектральні прояви маломасштабної неоднорідності магнітного поля у сонячному спалаху 25 жовтня 2003 р.

О.Б. Осыка, В.Г. Лозицкий

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Вивчено сонячний спалах 25 жовтня 2003 р. балу M1.8/2N, який виник в активній області NOAA 10484. Для діагностики магнітних полів в області спалаху використовувались спектральні лінії FeI 630.15 та 630.25 нм. Виявилось, що в місці спалаху виміряне усереднене поздовжнє магнітне поле  $B_{\parallel}$  по лінії FeI 630.25 нм достовірно більше, ніж по лінії FeI 630.15 нм, тоді як поза спалахом ці поля практично співпадали. Оскільки обидві лінії формуються на близьких висотах в атмосфері Сонця і мають однакову температурну чутливість, але різні фактори Ланде, відмінність виміряних полів свідчить про субтелескопічну поверхневу неоднорідність магнітного поля, а також про те, що в маломасштабних структурних елементах дійсна величина магнітного поля перевищувала 100 мТл. Детальне вивчення бісекторів профілів  $I \pm V$  показало, що їх форма не відповідає випадку однорідного поля. Відмічається мінімум розщеплення бісекторів  $\Delta\lambda_B$  в області приведених віддалей від центру  $\Delta\lambda_n = 17\text{--}21$  нм, що може вказувати на існування маломасштабних магнітних полів протилежної полярності з індукцією  $B = 490 \pm 50$  мТл. Ймовірно, що поява в активній області таких досить сильних полів і призвела до бурливого енерговиділення в формі сонячного спалаху.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 25 ОКТЯБРЯ 2003 г., Осыка О.Б., Лозицкий В.Г. — Изучена солнечная вспышка 25 октября 2003 г. бала M1.8/2N, которая возникла в активной области NOAA 10484. Для диагностики магнитных полей в области вспышки использованы спектральные линии FeI 630.15 и 630.25 нм. Оказалось, что в месте вспышки измеренное усредненное продольное поле  $B_{\parallel}$  по линии FeI 630.25 нм достоверно больше, чем по линии FeI 630.15 нм, тогда как вне вспышки эти поля практически совпадали. Поскольку обе линии формируются на близких высотах в атмосфере Солнца и имеют одинаковую температурную чувствительность, но различные факторы Ланде, отличные измеренных полей свидетельствуют о субтелескопической поверхностной неоднородности магнитного поля а также о том, что в мелкомасштабных структурных элементах действительная величина магнитного поля превосходила 100 мТл. Детальное изучение бисекторов профилей  $I \pm V$  показало, что их форма не соответствует случаю однородного поля. Отмечается минимум расщепления бисекторов  $\Delta\lambda_B$  в области приведенных расстояний от центра  $\Delta\lambda_n = 17\text{--}21$  нм, что может указывать на существование мелкомасштабных магнитных полей противоположной полярности с индукцией  $B = 490 \pm 50$  мТл. Вероятно, появление в активной области таких довольно сильных полей и привело к бурному энерговиделению в форме солнечной вспышки.

SPECTRAL MANIFESTATIONS OF THE SMALL-SCALE MAGNETIC FIELD INHOMOGENEITY IN SOLAR FLARE ON 25 OCTOBER 2003, by Osyka O.B., Lozitsky V.G. — We present the results of investigation of the M1.8/2N solar flare on 25 October 2003 which has been arised in active region NOAA 10484. Two spectral lines of FeI, 630.15 and 630.25 nm, were investigated to diagnose the small-scale magnetic field structures. It was found that measured averaged longitudinal magnetic field  $B_{\parallel}$  in FeI 630.25 line exceeds similar field in FeI 630.15 for flare region whereas for non-flare places these fields were practically the same. So long as these lines have practically the same hights of formation and temperature sensitivities but different Lande factors, this effect is a evidence to the spatially unresolved magnetic field structure with true magnetic strengths more than 100 mT. Detailed study of the Stokes  $I \pm V$  profiles bisectors shown that their shape do not corresponds the case of a homogeneous field. The minimum of bisector splitting  $B$  was found for reduced distances from line center  $\Delta\lambda_n = 17\text{--}21$  pm, that indicates the existence the small-scale magnetic field of opposite polarity with strength of  $B = 490 \pm 50$  mT. Likely, occuring of such much strong fields in this active region causes the violent energy process in form of solar flare.

## 1. ВСТУП

Сонячні спалахи є винятково потужними і нестационарними процесами в широкому діапазоні висот сонячної атмосфери, від фотосфери до корони. На сьогодні не викликає сумніву, що спалахи тісно пов'язані з магнітними полями, причому швидке пересполучення магнітних полів грає ключову роль у цих процесах. У дійсності ж детальні фізичні характеристики локальних магнітних полів як в області спалахів, так і поза ними практично досі невідомі. Зокрема Е.Паркер [11] вказував, що “ми не розуміємо, чому магнітне поле існує в тонких волокнах в концентрованій формі, спливаючи в такому стані на поверхню”. Ці слова найбільш авторитетного геліофізика сучасності, як і публікації інших фахівців у багатьох міжнародних журналах, свідчать про актуальність подальших досліджень тонкоструктурних магнітних полів на Сонці, особливо у спалахах.

Одна з основних проблем при інтерпретації спостережень сонячних магнітних полів — їх надзвичайна тонкоструктурність. Найдрібніші магнітні елементи мають лінійний розмір не більше 100 км (імовірно,  $\leq 50$  км [6]), тоді як типове просторове розділення при прямих наземних спостереженнях  $\geq 700$  км. Навіть на найбільш сучасних інструментах, де просторове розділення досягає 100 км, прямі спостереження не дають змогу розділити найдрібніші структурні елементи, і тому там використовують спеціальні методи для діагностики субтелескопічної неоднорідності магнітного поля. Ці методи застосовуються при певних спрощуючих припущеннях, а тому кінцеві результати є не цілком однозначними.

Додаткові труднощі виникають при дослідженні таких швидких та екстремально бурхливих процесів, як сонячні спалахи. В них надійно виміряти магнітне поле навіть звичайними методами (в наближенні однорідного поля) досить складно внаслідок суттєвих немагнітних змін спектральних ліній. Позаяк спалахи мають значну геометричну протяжність як по площі, так і по висоті, то тут, здавалось би, були б корисними дані синоптично-панорамного типу (типу карт магнітного поля), які отримуються з допомогою сонячних магнітографів. Однак магнітографічні вимірювання не є прямими навіть в наближенні однорідного поля — з магнітографічних спостережень визначається безпосередньо не магнітне поле, а нормоване значення кругової (іноді також — лінійної) поляризації в сфері спектральної лінії. Співвідношення між цією поляризацією і дійсною величиною магнітного поля залежить не тільки від магнітних, але й термодинамічних властивостей атмосфери, а вони суттєво змінюються в процесі спалаху. У підсумку можна отримати значні похибки не тільки у величині, але й полярності магнітного поля у спалаху [5]. Тому тут більш надійними є такі вимірювання, при яких профілі магніточутливих ліній отримуються повністю, з їх зеемановським розщепленням і розподілом поляризації, що дозволяє визначити величину магнітного поля більш прямим шляхом. Саме такими є спектрально-поляризаційні дані. Вони дозволяють досліджувати сонячні спалахи з оптимальним співвідношенням спектрального, часового та просторового розділення.

Метою цієї роботи є вивчення структурних особливостей магнітних полів в одному із спалахів поточного 23-го циклу сонячної активності, який виник під час дуже потужного її сплеску у жовтні–листопаді 2003 р. Саме в цей період відмічені численні прояви сонячно-земного впливу в навколоземному просторі та атмосфері Землі.

## 2. МАТЕР'АЛ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Спалах 25 жовтня 2003 р. балу M1.8/2N мав координати  $03^{\circ}\text{N}$  і  $20^{\circ}\text{W}$ . Він виник у досить-таки великій і компактній груп плям NOAA 10484 (з площею 1500 м.ч.п.), яка була джерелом кількох потужних спалахів впродовж своєї еволюції. Окрім цієї активної області, в ті ж дні (з 23 жовтня по 4 листопада 2003 р.) по диску проходила також дуже велика область NOAA 0486, яка мала найбільшу площу (2600 м.ч.п.) за весь поточний цикл (№ 23) сонячної активності. Спалахи в основному в цих двох активних областях і спричинили цілу низку аномальних ефектів в навколоземному просторі.

Так, в ті дні Міжнародна федерація авіації та астронавтики FAA вперше за всю історію свого існування розіслала попередження про радіаційну небезпеку при польотах на літаках вище 25 000 футів (тобто вище 7.5 км). 30 жовтня вийшла з ладу система автоматичного управління на атомній

Таблиця 1. Досліджені магніточутливі лінії

№ п/п	$\lambda$ , нм	Елемент, № мультиплету	Еквівалентна ширина в пм	Потенціал збудження, еВ	Ефективний фактор Ланде	Висота фор- мування, км
1	630.1515	FeI-816	12.7	3.65	1.669	284
2	630.2507	FeI-816	8.3	3.69	2.487	264

станції в Мальме (Швеція). У ці ж дні зафіксована ціла серія неполадок на різноманітних космічних супутниках та обсерваторіях — як тих, що обертались поблизу Землі, так і тих, що продовжували автономний політ далеко від Землі. Згідно публікації [14], були зареєстровані збої в роботі апаратури принаймні на 31 супутнику чи космічній обсерваторії, зокрема, NOAA 17 AMSU-A1, ACE, SOHO, Wind, Solar Wind, GOES, Chandra, Kodama, RHESSI, CHIPS та інших.

Ешельні спектри спалаху 25 жовтня 2003 р. були сфотографовані Лозицьким В.Г. на горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського університету імені Тараса Шевченка [3]. Всього були отримані (з 10:36 до 10:46 UT) чотири зееман-спектрограми цього спалаху, однак у даній роботі вивчається спектр лише за 10:36 UT, що приблизно відповідає моменту максимуму спалаху.

У всіх випадках при фотографуванні спектрів перед вхідною щілиною встановлювалась пластинка  $\lambda/4$ , а за вхідною щілиною — призма-розщеплювач з ісландського шпату, що давало змогу реєструвати  $I \pm V$  профілі Стокса. Спектри були отримані на фотопластинках ORWO WP3 при експозиціях від 5 до 30 сек.

Вивчалась ділянка фотосфери біля маленької сонячної плями  $N$  полярності з магнітним полем біля 0.2 Тл. Для аналізу маломасштабних магнітних полів розглядались дві спектральні лінії FeI 630.15 і 630.25 нм (табл. 1). Ці лінії мають практично однакову висоту формування і температурну чутливість, але різні фактори Ланде — 1.67 і 2.49, відповідно [1, 2]. Таким чином, дані лінії є цілком придатними для вивчення маломасштабних магнітних полів за методом “відношення ліній” [4, 12].

Вказані спектральні лінії фотометрувались на мікрофотометрі МФ-4. Отримані фотометричні дані записувались у файли і вводились в ПЕОМ IBM 486, де опрацьовувались за спеціальними програмами. Ці програми дозволяють швидко переводити почорніння у інтенсивності, знаходити незміщене положення спектрів  $I + V$  відносно спектрів  $I - V$ , обчислювати розподіл стоксових профілів  $I$  та  $V$ , знаходити градієнт інтенсивності  $\frac{\partial I}{\partial \lambda}$ , який для слабких однорідних полів апроксимує розподіл стоксового параметра  $V$ . Авторами цих машинних програм є М.Ю.Гордовський та В.В.Лозицький.

### 3. УСЕРЕДНЕНЕ ПОЗДОВЖНЬ МАГНІТНЕ ПОЛЕ $B_{\parallel}$

При дослідженні спалаху було виконано по 11 фотометричних розрізів для кожної з поляризацій  $I + V$  та  $I - V$ . Кожен розріз відповідав по ширині близько 1.5 сек дуги, тобто 1100 км. Отже, було вивчено ділянку, яка простягалась на Сонці на  $1100 \times 11 = 12\,100$  км. Яскравий вузлик спалаху займав на спектрограмі три фотометричні розрізи № 16, 18 та 20, тобто близько 3300 км на Сонці.

У всіх досліджених розрізах взаємне зміщення ліній FeI 630.15 та 630.25 нм у спектрах протилежних кругових поляризацій було значно менше, ніж півширина цих ліній. У такому разі, згідно теорії формування ліній в магнітному полі [13], по зміщенню “центрів ваги”  $I \pm V$  профілів вимірюється деяка ефективна індукція  $B_{\text{eff}}$ , яка при однорідному магнітному полі близька до поздовжньої компоненти магнітного поля  $B_{\parallel}$ :

$$B_{\parallel} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda V d\lambda}{4.67 \cdot 10^{-13} g \lambda^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I d\lambda}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі,  $I$  та  $V$  — відповідні параметри Стокса. Знайдене таким чином магнітне поле практично співпадає з тим полем, яке вимірюється по розщепленню бісекторів  $I \pm V$  профілів.

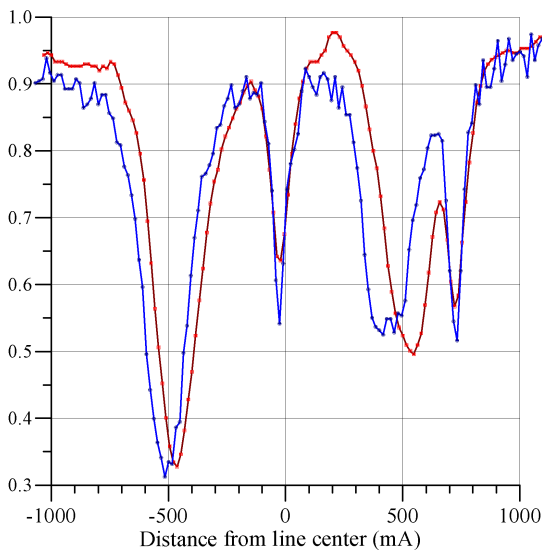
Для вимірювання  $B_{\text{eff}}$  отримані в результаті фотометрії профілі ліній слід було взаємно “при-

в'язати" по довжинах хвиль  $\lambda$  так, щоб відповідні однакові значення  $\lambda$  у них співпадали в одних і тих же точках графіків по шкалі абсцис. Це здійснювалось за допомогою телуричних ліній  $O_2$ , які знаходяться в спектрі поряд з лініями FeI 630.15 та 630.25 нм. Для цього спектри  $I+V$  та  $I-V$  взаємно зміщувались так, щоб "центри ваги" телуричних ліній співпадали між собою. Точність такої "прив'язки" не гірша  $\pm 0.1$  нм ( $\pm 1$  мÅ), і саме вона в основному визначає точність вимірювання магнітних полів по обох лініях.

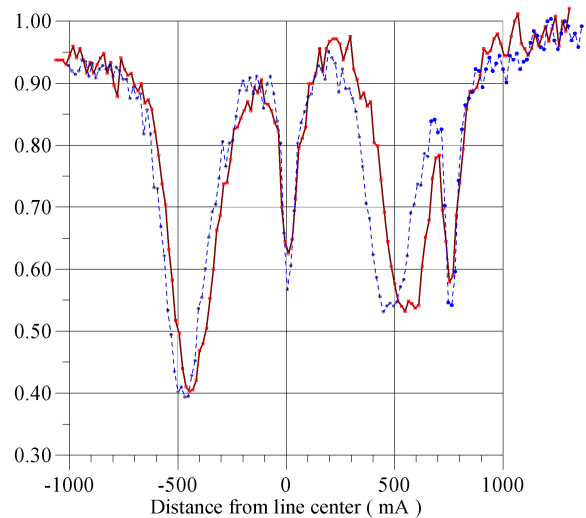
У всіх досліджених парах профілів  $I+V$  та  $I-V$  спостерігалась незначна емісія в їхніх ядрах (рис. 1–2). Зокрема, не було виявлено емісійних піків у ядрах — відомо, що вони з'являються у більш сильних лініях металів, ядра яких формуються у верхній фотосфері, або ж у зоні температурного мінімуму. В цілому ж, у спектрі дослідженого спалаху тільки лінії бальмерівської серії, а також NaI, MgI, FeII мали чітку картину емісійного обертання в їхніх ядрах. У максимальній фазі спалаху було помітно також емісію в лінії  $D_3$  HeI.

На рис. 3 показані результати вимірювань магнітного поля. Видно, що найбільш суттєво відрізняються магнітні поля по цих лініях в центрі сонячного спалаху (фотометричний розріз № 18).

Ще раз нагадаємо, що обидві сонячні лінії FeI 630.15 та 630.25 нм формуються практично на одній і тій же висоті у сонячній атмосфері [1], і тому виявлену відмінність не можна пояснити висотним градієнтом магнітного поля. Тому тут доводиться розглядати альтернативне припущення — про суттєву поверхневу неоднорідність, тобто про можливе існування субтелескопічних (просторово нероздільних) магнітних елементів з сильними полями. Для з'ясування характеру такої неоднорідності важливо встановити, якою є величина відношення  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25)$ . Недавно авторами роботи [10] для спокійних областей (поза спалахами) отримано  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25) = 1.25 \pm 0.14$ , тобто  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25) > 1$ . Однак в роботі [7] для сонячного спалаху 29 березня 2001 р. балу X1.7/1B знайдено практично протилежне співвідношення:  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25) = 0.8 - 1.1$ . У нашому ж випадку, у спалаху 25 жовтня 2003 р. виміряно  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25) = 0.65 - 0.70$  в місцях найяскравішої спалахової емісії, і  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25) \approx 1$  за її межами.



**Рис. 1.** Стоксові профілі  $I \pm V$  досліджених сонячних ліній FeI 630.15 та 630.25 нм разом з телуричними лініями-сусідами  $O_2$  з довжинами хвиль 630.2000 та 630.2764 нм у фотометричному розрізі № 4, що відповідає неспалаховій ділянці на Сонці



**Рис. 2.** Те ж, що і на рис. 1, але для фотометричного розрізу № 18, що відповідає центру емісійного вузлика спалаху

Таким чином, отримані нами дані підтверджують результати [7] і вказують на те, що у сонячних спалахах виникають деякі відмінні (щодо неспалахових областей) особливості тонкої структури магнітного поля.

#### 4. ПРОФІЛЬ ПАРАМЕТРА СТОКСА $V$

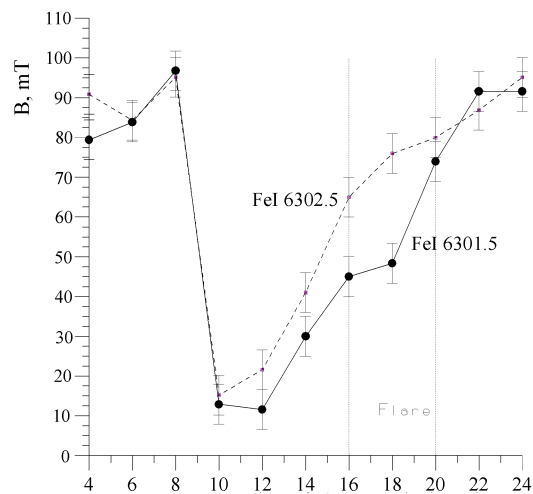
Теоретично при слабкому та помірному (до 100 мТл) однорідному магнітному полі профіль параметра Стокса  $V$  повинен повторювати по формі градієнт інтенсивності  $\frac{\partial I}{\partial \lambda}$  в стоксовому профілі  $I$  [9, 13]. Якщо тут в дійсності виявляється певна відмінність, то це може вказувати на певну неоднорідність магнітного поля, а також проливати світло на характер (тип) цієї неоднорідності.

Спостережені дані для вивченої області (рис. 4 та 5) показують, що фактично ні в спалаху, ні поза ним ми не бачимо повної відповідності профіля Стокса  $V$  градієнту  $\frac{\partial I}{\partial \lambda}$  параметра  $I$ , тобто ніде немає випадку, цілком відповідного однорідному полю. Тільки частково це обумовлено неоднаковими факторами Ланде ліній (вони відрізняються у 1.5 раза), а в основному — досить складними локальними особливостями профілів  $V$ , які подекуди (напр., у фотометричних розрізах № 10–12) відрізняються від теоретично очікуваних навіть якісно. Зокрема, у цих розрізах зникає типова для  $\frac{\partial I}{\partial \lambda}$  різнознакова “хвиля”, а натомість виникають коливання розподілу одного знаку, які мають дрібніший масштаб по осі абсцис і створюють враження присутності двох таких “хвиль”, що мають різну полярність, тобто знак їх відхилень вздовж осі ординат. Останнє може свідчити про присутність у спалаху маломасштабних полів протилежної полярності, “вкраплених” у більш слабе фонове поле.

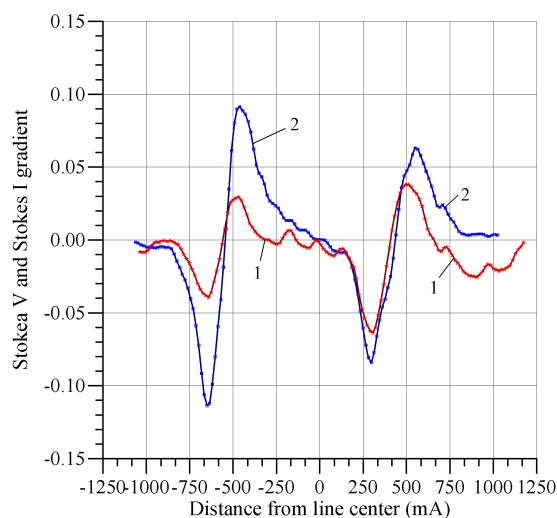
Для кількісної характеристики спектральних ефектів в профілях параметра  $V$  розглянемо відношення

$$R_V = 1.5 \frac{V_{\max}(630.15)}{V_{\max}(630.25)}. \quad (2)$$

Тут  $V_{\max}$  — амплітуда параметра Стокса  $V$  для цих двох ліній у досліджених фотометричних розрізах. Множник 1.5 взято для врахування відмінності у факторах Ланде ліній. Поскілки лінія FeI 630.15 має у 1.5 раза менший фактор Ланде, ніж лінія FeI 630.25, для вирівнювання амплітуд



**Рис. 3.** Співставлення виміряних магнітних полів по лініях FeI 6301.5 та FeI 6302.5 для різних ділянок на Сонці



**Рис. 4.** Параметр Стокса  $V$  (1) та градієнт  $I$  параметра Стокса (2) для фотометричного розрізу № 14. Відповідне місце на Сонці знаходилось за межами емісійного вузлика спалаху, але недалеко від нього.

параметра Стокса  $V$ , які при невеликих зєсманівських розщепленнях мають бути пропорційні

$$V \propto \frac{\partial I}{\partial \lambda} g \lambda^2 B, \quad (3)$$

величина  $V_{\max}(630.15)$  була домножена на 1.5.

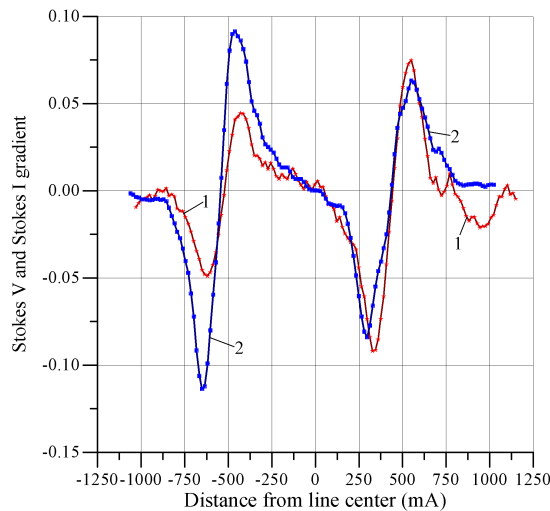
Виявилось, що відношення  $R_V$  згідно (2) дорівнює 0.84 для центру емісійного вузлика спалаху (фотометричний розріз №18), але 0.99 за його межами (розріз №14). Очевидно, це є свідченням часткової “втрати” кругової поляризації в лінії FeI 630.15 у порівнянні з FeI 630.25 в місці спалаху. З іншого боку, слід відзначити, що обидва ці місця — і спалах (р. №18), і сусіднє місце (р. №14) — не перебували в однорідному магнітному полі. Це впливає з того, що коли у формулу (2) замість величин  $V_{\max}$  підставити амплітуди градієнта інтенсивності  $\frac{\partial I}{\partial \lambda}$ , ми отримуємо не 0.84–0.99, а 2.15. Тобто, у дійсності амплітуда параметра Стокса  $V$  була ослаблена у спалаху у  $2.15/0.84 \approx 2.6$  раза.

Таким чином, дані про амплітуду параметра Стокса  $V$  свідчать про те, що у спалаху був значний дефіцит рівня кругової поляризації в лінії FeI 630.15 у порівнянні з лінією FeI 630.25. Враховуючи, що обидві лінії формуються практично в одній і тій же товщі атмосфери, можна припустити багатокomпонентну (в картинній площині) структуру магнітного поля, яка внаслідок дисперсії магнітного поля “розмиває” профілі  $V$  і створює нетипове співвідношення  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25)$ .

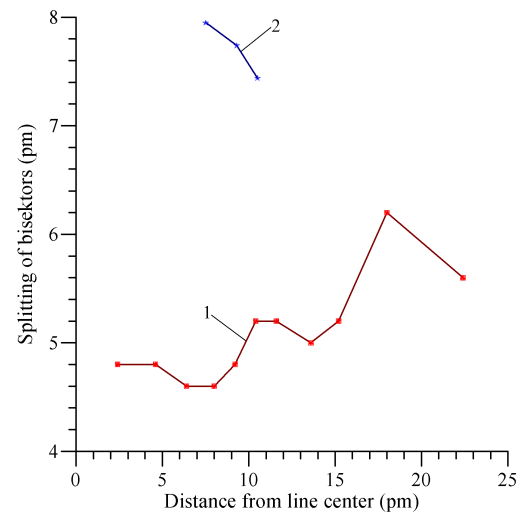
## 5. РОЗЩЕПЛЕННЯ БІСЕКТОР’В ПРОФІЛ’В $I \pm V$

Нагадаємо, що бісектором є серединна лінія у профілі, проведена на певній ординаті так, щоб поділити ширину лінії пополам. Розрахунки показують [6], що при слабкому і помірному (до 100 мТл) однорідному магнітному полі бісектори проходять у профілях  $I + V$  та  $I - V$  так, що взаємне зміщення цих бісекторів повинно бути, по-перше, практично однаковим на різних віддальх від центру, і по-друге, величина розщеплення бісекторів  $\Delta\lambda_B$  має бути пропорційна фактору Ланде ліній. Будь-яке достовірне відхилення від цих двох простих особливостей може означати або суттєву неоднорідність магнітного поля, або ж те, що дійсна індукція магнітного поля перевищує 100 мТл.

У нашому випадку виявилось, що обидві вивчені лінії мають змінну величину розщеплення бісекторів. У лінії FeI 630.25 розщеплення бісекторів  $\Delta\lambda_B$  здебільшого зменшується при переході в крила лінії, тоді як у лінії FeI 630.15 — в основному зростає (рис. 6), хоча в окремих випадках



**Рис. 5.** Параметр Стокса  $V$  (1) та градієнт  $I$  параметра Стокса (2) для фотометричного розрізу №18 (центр спалаху).



**Рис. 6.** Розщеплення бісекторів профілів  $I \pm V$  ліній FeI 630.15 (штрихована лінія) та FeI 630.25 (суцільна лінія) у фотометричному розрізі №6 (тобто далеко за межами спалаху).



намічаються деякі екстремуми відповідних розподілів.

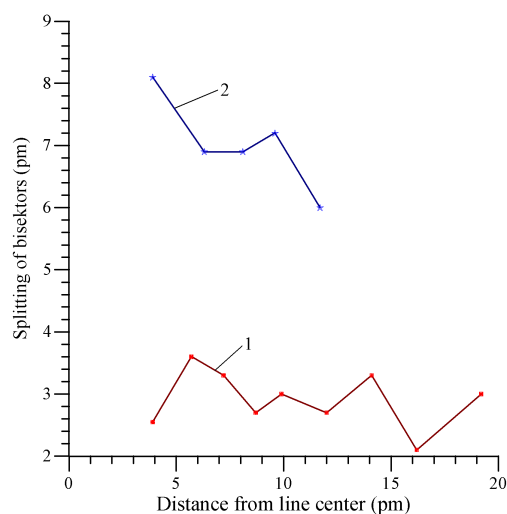
У місці спалаху (розріз № 18 — див. рис. 7) розщеплення бісекторів в основному зменшується по обох лінях при переході в їх крила. Такі особливості розщеплення бісекторів відрізняються від того, що було раніше виявлено для неспалахових областей.

Зокрема в роботі [5] для фотосфери активної області за межами спалаху було знайдено, що розщеплення ліній з великими факторами Ланде (типу FeI 630.25) зростає при переході від ядра лінії у її крила, тоді як для ліній з помірними факторами (як лінія FeI 630.15) це розщеплення майже не змінюється, а для ліній з низькими факторами Ланде ( $g \approx 1$ ) — збільшується від ядра лінії до її крил. Автором [5] показано, що такі особливості розщеплення вказують на субтелескопічні магнітні поля з високою індукцією (300–400 мТл), які мають ту ж полярність, що і “фонове” поле.

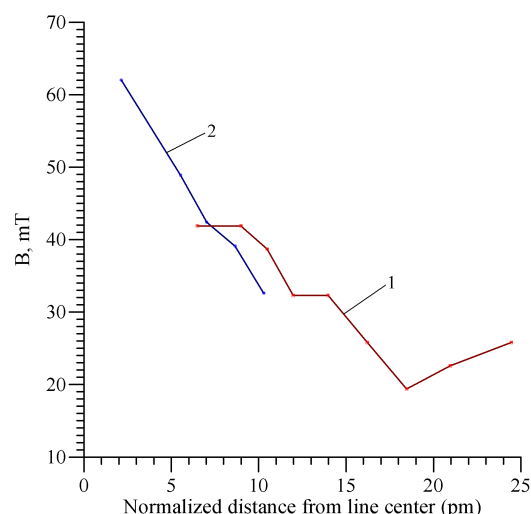
У випадку вивченого спалаху відповідні особливості є в цілому іншими, більш складними, а це вимагає пошуку інших варіантів пояснень отриманих результатів.

Припустимо, на вхідну щілину спектрографа попадають і слабкі фонові поля, і маломасштабні елементи з сильним полем. Слабкі фонові поля дають незмінну величину розщеплення бісекторів при переході від ядра лінії в її крила. Сильні ( $> 100$  мТл) магнітні поля дають спектральні вклади (тобто відповідні зееманівські  $\sigma$ -компоненти), які розташовуються на тим більшій віддалі від центра лінії, чим більшим є добуток  $g\lambda^2 B$ , позаяк  $\Delta\lambda_H = 4.67 \cdot 10^{-8} g\lambda^2 B$ . В роботах [4–6] вказувалось, що саме сильні субтелескопічні магнітні поля можуть дати локальні екстремуми на залежності “вимірне магнітне розщеплення — віддаль від центру лінії”. Тоді віддаль цих локальних екстремумів від центру і є фактично зееманівським розщепленням в просторово нероздільній (субтелескопічній) компоненті.

Якщо вважати, що для ліній з близькими глибинами формування (як FeI 630.15 та FeI 630.25) виконується умова  $B = \text{const}$ , то тоді має бути  $\Delta\lambda_H/g\lambda^2 = \text{const}$ . Значить, перебираючи різні віддаль від центра лінії  $\Delta\lambda$  і виявивши, що по різних лінях маємо узгоджену залежність розщеплення бісекторів  $\Delta\lambda_B$  від величини  $\Delta\lambda/g\lambda^2$ , а також деякий екстремум на відповідній залежності, можна очікувати, що положення цього екстремума повинно відповідати “прихованому” положенню у спектрі зееманівських компонент сильного поля. Вимірявши віддаль від центра цього екстремума, ми можемо виміряти і величину субтелескопічного магнітного поля.



**Рис. 7.** Розщеплення бісекторів профілів  $I \pm V$  ліній FeI 630.15 (1) та FeI 630.25 (2) у фотометричному розрізі № 18 (центр спалаху)



**Рис. 8.** Співставлення розщеплення бісекторів профілів  $I \pm V$  ліній FeI 630.15 (1) та FeI 630.25 (2) у фотометричному розрізі № 14 на залежності від введеної віддалі  $82.7\Delta\lambda/g\lambda^2$

Виявилось, що в деяких випадках, а саме у фотометричних розрізах №8–14, дані по лініях як FeI 630.15 та FeI 630.25 дійсно добре узгоджуються на залежності  $\Delta\lambda_B = f(\Delta\lambda/g\lambda^2)$ . Один з прикладів такої залежності подано на рис. 8. Щоб привести всі спостережені дані до лінії FeI 525.02 ( $g = 3.0$ ,  $g\lambda^2 = 82.7 \cdot 10^6$ ), по осі абсцис подані величини приведені віддалі від центру  $82.7\Delta\lambda/g\lambda^2$ .

Цікаво відмітити, що хоча у двох фотометричних розрізах (№10,12) лінія FeI 630.15 показує навіть протилежну магнітну полярність (S) по відношенню до лінії FeI 630.25, все-таки загальний хід відповідних залежностей  $\Delta\lambda_B = f(\Delta\lambda/g\lambda^2)$  в цілому узгоджується по обох лініях (рис.9). Це свідчить про зееманівську природу виявлених відмінностей, а не, наприклад, про висотні зміни поля. Останнє можна було б припустити, враховуючи те, що тут співставлялись дані для різних ділянок профілів (а вони, як відомо, формуються на різних висотах: ядро фраунгоферової лінії формується завжди дещо вище, ніж її крила).

Розгляд рис. 8 та 9 наводить на думку, що в діапазоні нормованих віддалей від центру, що дорівнює 17–21 пм, існує деякий спільний для всіх залежностей мінімум. Якщо цей мінімум має дійсно магнітну природу, він повинен відповідати дуже сильним магнітним полям протилежної полярності, що мають величину  $B = 490 \pm 50$  мТл.

Імовірно, що поява в активній області таких досить сильних полів (які у 2 рази перевищують відомі з традиційних вимірювань магнітні поля у плямах) і призвела до бурхливого енерговиділення в формі сонячного спалаху. Дійсно, у більшості теорій сонячних спалахів [8] важливу роль відводиться різним типам неоднорідності магнітного поля, особливо тим, в яких має місце тісний контакт протилежних полярностей магнітного поля, або ж значний поворот (зсув або “шир”) силових ліній. Саме тоді може реалізуватись так звана тірінг-нестійкість (нестійкість розривного типу), яка дає значне енерговиділення вибухового типу, подібне до спостереженого у спалахах.

Ці теоретичні висновки узгоджуються із спостереженнями, зокрема вперше отриманими у КрАО [9], згідно з якими, потужні спалахи найчастіше виникають у дельта-конфігураціях (складних плямах, в межах однієї півтіні яких розміщені кілька тіней з протилежною магнітною полярністю), а також в місцях з високим горизонтальним градієнтом магнітного поля.

У порівнянні з цими відомими з літератури даними, результати даної роботи дозволяють зробити таке уточнення: *тісний контакт протилежних полярностей продовжується і в субтелескопічних масштабах (принаймні у деяких спалахах)*, притому при більш високих значеннях магнітної індукції і більш коротких віддальях між протилежними магнітними полюсами. Тоді і горизонтальні градієнти магнітного поля мають бути відповідно більшими.

В роботах співробітників КрАО [9] встановлено, що потужні спалахи найчастіше виникають при горизонтальному градієнті магнітного поля більше 0.1 Гс/км або 0.01 мТл/км. У випадку ж дослідженого спалаху орієнтовна величина горизонтального градієнту є такою:  $490 \text{ мТл}/1000 \text{ км} \approx 0.5 \text{ мТл/км}$ , тобто принаймні на порядок вищою, ніж оцінювалось раніше на основі спостережень безпосередньо видимих сонячних плям.

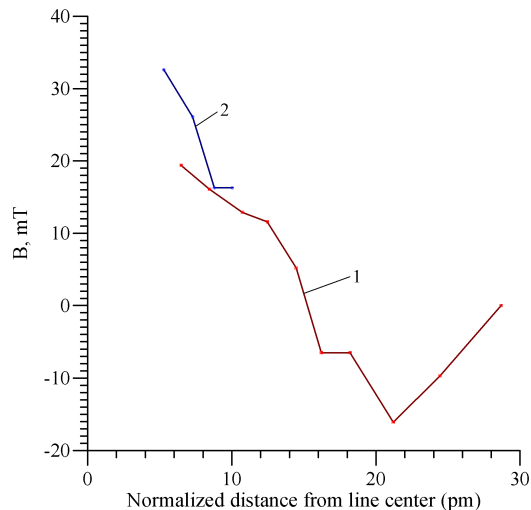


Рис. 9. Те ж, що і на рис. 8, але для фотометричного розрізу №12



## 6. ВИСНОВКИ

В результаті спектрофотометричного дослідження унікального спектрального матеріалу — зеєман-спектрограми сонячного спалаху 25 жовтня 2003 р. балу M1.8/2N — виявлені свідчення суттєвої неоднорідності магнітного поля в субтелескопічних масштабах. Певною мірою такої неоднорідності є величина відношення  $B_{\text{eff}}(630.15)/B_{\text{eff}}(630.25)$ , а також особливості профілів Стокса  $I$  та  $V$ . Порівнянням області спалаху та сусідніх неспалахових ділянок показано, що саме в області сонячного спалаху неоднорідність магнітного поля є найбільш суттєвою. Хоча у дослідженому місці на Сонці величина магнітного поля в найближчій плямі не перевищувала 200 мТл згідно з прямими спостереженнями, а полярність поля була північною, у вірогідних просторово нероздільних магнітних ділянках поле досягало величини  $B = 490 \pm 50$  мТл при південній його полярності. В такому випадку горизонтальний градієнт магнітного поля сягав значень 0.5 мТл/км, що в десятки разів більше, ніж для тих сонячних плям протилежної полярності, де виникають потужні спалахи. Ці значно більш високі градієнти магнітного поля можуть вказувати на те, що у спалахах можлива і більш ефективна (ніж вважається на сьогодні) дія відповідних механізмів “анігіляції” магнітного поля, що варто врахувати при майбутніх теоретичних роботах по вдосконаленню фізичних моделей сонячних спалахів.

1. Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наукова думка, 1989. — 200 с.
2. Земанек Е.Н., Стефанов А.П. Расщепление некоторых спектральных линий FeI в магнитном поле // Вестник Киевского ун-та. Серия Астрономия. — 1976. — Вып. 18. — С. 20–36.
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. Серия Астрономия. — 1980. — Вып. 22. — С. 48–56.
4. Лозицкий В.Г., Лозицкая Н.И., Власенко В.И. Сравнение результатов измерений солнечных магнитных полей, полученных разными методами // Вестник Киевского университета. Серия Астрономия. — 1985. — Вып. 27. — С. 59–66.
5. Лозицкий В.Г. Мелкомасштабная структура солнечных магнитных полей // Кинематика и физика небес. тел. — 1986. — 2, № 1. — С. 28–35.
6. Лозицкий В.Г. Сильні магнітні поля в маломасштабних структурах та спалахах на Сонці: Автореферат дис. ... д-ра ф.-м. наук: 01.03.03. — Київ, 2003. — 28 с.
7. Лозицкий В.Г., Лозицкий В.В. Диагностика мелкомасштабных магнитных полей в солнечной вспышке 29 марта 2001 г. // Известия КРАО. — 2002. — 98. — С. 202.
8. Прист Э. Солнечная магнитогидродинамика. — М.: Мир, 1985. — 592 с.
9. Северный А.Б. Некоторые проблемы физики Солнца. — М.: Наука, 1988. — 224 с.
10. Cerdana D., Almeida J.S., Kneer F. Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution // Astron. Astrophys. — 2003. — 407. — P. 741–757.
11. Parker E.N. Solar activity and classical physics // Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics. — 2001. — 1, № 2. — P. 99–124.
12. Stenflo J.O. Magnetic-field structure of the photospheric network // Solar Physics. — 1973. — 32, № 1. — P. 41–63.
13. Unno W. Line formation of a normal Zeeman triplet // Publs. Astron. Soc. Japan. — 1956. — 8. — P. 108–125.
14. Webb D.F., Allen J.H. Spacecraft and ground anomalies related to the October–November 2003 solar activity // Space Weather. — 2004. — 1, № 3. — P. 6–8.

Надійшла до редакції 15.11.2004