

Список використаних джерел

1. Whipple F. L. The theory of micro-meteorites. Part I. In an isothermal atmosphere / F. L. Whipple // Proc. Nat. Acad. Sci. Amer., 1950. – Vol. 36, № 12. – P. 686–695.
2. Whipple F. L. The theory of micro-meteorites. Part II. In heterothermal atmospheres / F. L. Whipple // Proc. Nat. Acad. Sci. Amer., 1951. – Vol. 37, № 1. – P. 19–29.
3. Levin B. Ju. Physical theory of meteors and meteoric matter in the Solar System / B. Ju. Levin (in rus.: Левин Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе). – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 296 p.
4. Ceplecha Z. Earth-grazing daylight fireball of August 10, 1972 / Z. Ceplecha // Astron. Astrophys., 1994. – Vol. 283. – P. 287–288.
5. Borovicka J. Earth-grazing fireball of October 13, 1990 / J. Borovicka, Z. Ceplecha // Astron. Astrophys., 1992. – Vol. 257. – P. 323–328.
6. Meteor Network Team in Japan / S. Abe, J. Borovicka, P. Spurny, Koten P., Ceplecha Z., Tamagawa T. // Earth-grazing fireball on March 29, 2006. – European Planetary Sci. Congress 2006, Berlin, Germany, 18–22 September 2006. – P. 486.
7. SonotaCo. Meteor database site / SonotaCo. – URL: <http://sonotaco.jp/doc/SNM/index.html>.
8. An Earth-grazing fireball from the Daytime ζ -Perseid shower observed over Spain on 2012 June 10 / J. M. Madiedo, F. Espartero, A. J. Castro-Tirado, et al. // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2016. – Vol. 460. – P. 917.
9. Kozak P. M. Upward-moving low-light meteor – I. Observation results / P. M. Kozak, J. Watanabe // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2017. – Vol. 467, N 1. – P. 793–801.
10. Kozak P. "Falling Star": software for processing of double-station TV meteor observations / P. Kozak // Earth, Moon, and Planets, 2008. – Vol. 102, № 1–4. – P. 277–283.
11. Kozak P. N. Analysis of the methods and precision of determination of the equatorial coordinates in digital reducing of TV observations of meteors / P. N. Kozak (in rus.: Козак П. Н. Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров) // KFNT, 2002. – Vol. 18, № 5. – P. 471–480.
12. Kozak P. N. A vector method for the determination of trajectory parameters and heliocentric orbit elements of a meteor in TV observations / P. N. Kozak (in rus.: Козак П. Н. Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений) // KFNT, 2003. – Vol. 19, № 1. – P. 62–76.
13. Kozak P. M. Trajectory parameters and orbital elements of 98 September meteors from double station TV observations in 2001 and 2003 / P. M. Kozak, O. O. Rozhilo, Y. G. Taranukha // Int. Conf. "Asteroids, Comets, Meteors", May 16–20, 2012, Niigata, Japan. – 2012. – № 6451.
14. Kozak P. Kinematical parameters of the meteors from the results of the basic television observations during the period of the autumn solstice 2001 / P. Kozak, O. Rozhilo, Ju. Taranukha (in ukr.: Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г. Кінематичні параметри метеорів за результатами базисних телевізійних спостережень в період осіннього рівнодення 2001 року) // Bull. Kyiv National Taras Shevchenko University. Astronomy, 2012. – Vol. 49. – P. 19–24.
15. Kinematical characteristics of meteors from the basis TV observations during September 2003 / P. Kozak, O. Rozhilo, Ju. Taranukha, V. G. Kruchinenko (in ukr.: Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г., Кручиненко В. Г. Кінематичні характеристики вересневих метеорів за базисними телевізійними спостереженнями 2003 року) // Cosmic science and technology, 2011. – Vol. 17, № 4. – P. 51–62.

Надійшла до редколегії 15.02.17

P. Kozak, Ph. D.,
Astronomical Observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv, Kyiv

EARTH ATMOSPHERE GRAZING METEORS

An overview of described in literature earth atmosphere grazing meteors observed with optic methods is proposed. Results of observations of such a meteor detected in Kyiv on 23 September 2003 with super-isocon TV cameras are described. Kinematic parameters of the meteor trajectory in earth atmosphere and its heliocentric orbit elements are given. The comparative analysis of other meteor catalogues for presence in them and a number of such anomalous meteors is carried out.

Key words: earth atmosphere grazing meteors; meteor physics; video observations of meteors.

П. Козак, канд. физ.-мат. наук,
Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев

КАСАТЕЛЬНЫЕ К ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ МЕТЕОРЫ

Предложен обзор описанных в литературе метеоров касательных к земной атмосфере, которые наблюдались оптическими методами. Описаны результаты наблюдений такого метеора зарегистрированного в Киеве 23 сентября 2003 года при помощи телевизионных камер типа супер-изоконов. Приведены кинематические параметры траектории метеора в земной атмосфере и элементы его гелиоцентрической орбиты. Проведен сравнительный анализ других метеорных каталогов на предмет наличия в них и количества таких аномальных метеоров.

Ключевые слова: метеоры касательные к земной атмосфере; физика метеоров; видео наблюдения метеоров.

УДК 523.985

В. Лозицкий, д-р физ.-мат. наук,
Н. Лозицька, канд. физ.-мат. наук,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

МАГНІТНІ ПОЛЯ В ПРОТОННОМУ СОНЯЧНОМУ СПАЛАХУ БАЛУ X17.2/4В ЗА ДАНИМИ ОДНОЧАСНИХ ВИМІРЮВАНЬ У КІЛЬКОХ СПЕКТРАЛЬНИХ ЛІНІЯХ

Порівнюються спектрально-поляризаційні вимірювання магнітного поля у сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р. балу X17.2/4В, виконані на ешеліному спектрографі АО КНУ в 6 лініях FeI а також лінії Ha. Отримані дані стосуються максимальної фази спалаху і ділянки фотосфери за межами плям, де ефективно (усереднене) магнітне поле по лінії FeI 6302.5 було близько 100 Гс і мало S полярність. Виміряне розщеплення емісійних піків в ядрах сильних ліній 15-го мультиплету FeI відповідає значно сильнішим полям – у межах 550–700 Гс, причому також S полярності. Виявлено помітне розщеплення емісійних піків (11–20 мА) також в лінії 5434.527 з ефективним фактором Ланде $g_{\text{eff}} = -0.014$. Величина вказаного розщеплення, а також його знак, вказує на існування особливо сильного магнітного поля напруженістю 25–50 кГс, яка мала протилежну полярність (N) і негативні променеві швидкості (підйом плазми) величиною 1.7–2.2 км/с. Магнітне поле по лінії Ha близько 300 Гс, полярність – N. Отримані дані вказують на суттєву неоднорідність магнітного поля в області спалаху, яка включає як протилежні магнітні полярності вздовж променя зору, так і значний діапазон ефективних магнітних полів.

Ключові слова: Сонце, сонячні магнітні поля, сонячні спалахи, протонний спалах балу X17.2/4В, ешеліні зсман-спектрограми, розщеплення емісійних піків, напруженості у фотосфері, зоні температурного мінімуму і хромосфері.

© Лозицкий В., Лозицька Н., 2017

Вступ. Відомо, що основна енергія сонячних спалахів виділяється у хромосфері і короні Сонця [19]. Саме тому спостережені дані про магнітні поля у цих шарах атмосфери є найбільш інформативними для розуміння фізичної суті процесів, які відбуваються безпосередньо в місцях інтенсивної емісії спалахів. Отримати такі дані непросто – адже сонячні спалахи (особливо потужні) виникають нечасто, несподівано, тривають відносно короткий час і далеко не завжди дають достатньо інтенсивну емісію в ядрах фраунгоферових ліній, щоб по ній можна було впевнено виміряти магнітне поле в зоні температурного мінімуму і хромосфері. Щодо ж рівня сонячної корони, то там, фактично, надійно виміряти магнітні поля можна лише в лімбових спалахах [5, 15], спектри яких зафіксувати ще менш імовірно, ніж спектри спалахів на диску.

Для вивчення магнітних полів у спалахах особливо цінними є ешельні спектри, які одночасно фіксують тисячі спектральних ліній, що мають різну висоту формування в атмосфері Сонця, температурну і магнітну чутливість. В принципі, для цієї мети є цінними також стокс-метричні вимірювання в обмеженій кількості спеціально підібраних ліній, наприклад, у тих дев'яти лініях FeI, MgI, NaI і TiI, які використовуються при спостереженнях на космічній обсерваторії Hinode [20]. Однак слід зауважити, що дані Hinode дозволяють вивчати спектральні ефекти у відносно вузькому околі вибраних магніточутливих ліній, оскільки там спектральним монохроматором є еталон Фабрі-Перо. Для спектральних ліній FeI 6301.5 і FeI 6302.5 це ділянка протяжністю близько 2.4 Å. Для подальшої розробки деяких проблем, наприклад проблеми екстремально сильних магнітних полів у спалахах (10^4 – 10^5 Гс [10, 11, 16]), необхідно мати дані про більш широкі спектральні інтервали, де можуть бути зафіксовані дуже великі зєсманівські розщеплення від вказаних вище особливо сильних магнітних полів. Наприклад, для лінії FeI 5250.2 з ефективним фактором Ланде $g_{\text{eff}} = 3.0$, при магнітному полі $B = 50$ кГс величина зєсманівського розщеплення $\Delta\lambda_n$ дорівнює 1.93 Å [11]. Це означає, що загальна протяжність реєстровного інтервалу має бути у цьому випадку близько $2\Delta\lambda_n$, тобто 4 Å. Однак при значному доплерівському зсуві вказана величина має бути відповідно збільшена. Наприклад, при променевих швидкостях 20 км/с, які згідно з [21] існують у тонкоструктурних елементах півніні плям, доплерівське зміщення в червоній області спектра ($\lambda = 6300$ Å) дорівнює 0.42 Å, і тоді загальна протяжність доступного для аналізу спектрального інтервалу має бути близько 4.5 Å. Однак саме такі і навіть набагато більші (до ≈ 100 Å) спектральні інтервали цілком доступні для аналізу при спостереженнях на ешельному спектрографі, основним диспергуючим елементом якого є дифракційна ґратка.

Сформулюємо деякі наукові проблеми, які виникли у зв'язку з вивченням магнітних полів у спалахах по емісійних спектрах хромосфери й корони. Передусім, це проблема верхньої межі напруженостей магнітного поля у спалахах. На сьогодні немає повної ясності в питанні, якою конкретно є ця верхня межа. Прямі вимірювання зєсманівського розщеплення по профілях $I \pm V$ ліній з факторами Ланде g_{eff} в інтервалі 1.0–1.7 показали, що в області інтенсивної емісії в лініях металів (а це область діапазону від верхньої фотосфери до нижньої хромосфери) напруженість магнітного поля доходить до 3–4 кГс [14]. Однак, якби дійсні напруженості магнітного поля у спалахах не перевищували 3–4 кГс, емісійні піки у лініях типу FeI 5434.5 з винятково низькою магнітною чутливістю ($g_{\text{eff}} = -0.014$) спостерігались би нерозщепленими при тому рівні "шуму" (1–2 %), який є типовим при фотографічних спостереженнях. Насправді ж, в таких лініях іноді спостерігається чітке розщеплення, яке досягає 40 мÅ і по величині відповідає магнітним полям майже 100 кГс [11, 16]. На можливе існування ще більш сильних полів у сонячних спалахах вказує те, що бісектори профілів $I \pm V$ лінії FeI 5434.5 іноді достовірно розщеплюються на досить великій відстані від центра цієї лінії (100–200 мÅ), тоді як у неспалахових областях таке розщеплення бісекторів відсутнє.

Ще однією цікавою проблемою є проблема висотного розподілу магнітного поля в області спалаху. У незбуреній атмосфері напруженість магнітного поля має монотонно спадати з висотою внаслідок спадання газового тиску. Якщо силова трубка магнітного поля є однорідною і нескрученою, то верхня межа напруженості B_{max} в трубці знаходиться з простої умови рівності магнітного тиску $B^2/8\pi$ всередині трубки і газового тиску $P = nkT$ зовні трубки. Для незбуреної атмосфери $P \sim 10^4$ дин/см² [4] у верхній фотосфері – там, де формуються емісійні піки ліній FeI у спалахах [14]. Однак при такому тиску має бути $B_{\text{max}} \approx 500$ Гс. Насправді ж, як зазначалося вище, згідно з вимірюваннями тут іноді буває $B_{\text{max}} = 3$ –4 кГс. Це означає, що в області спалаху виникають якісь особливі топологічні особливості магнітного поля і термодинамічні умови, які дозволяють утримувати тут значно сильніші магнітні поля. Було показано [6, 7, 14], що висотний розподіл магнітного поля у спалахах може бути немонотонним, з висотним піком в області верхньої атмосфери і в зоні температурного мінімуму. В інших спалахах такої немонотонності не відмічено [1–3]. Можливою причиною розбіжності цих результатів є те, що характер висотного розподілу магнітного поля в області спалаху залежить від фази цього спалаху. Наприклад, автори роботи [6] знайшли немонотонний розподіл магнітного поля в максимумі спалаху, який поступово через 10 хв змінився звичайним монотонним розподілом. Очевидно, для більшої ясності тут необхідні нові спостережені дані.

Метою цієї роботи є прямі вимірювання магнітного поля в області особливо потужного сонячного спалаху балу X17.2/4В по лініях фотосфери і хромосфери. Зважаючи на потужність цього спалаху і названі вище переваги ешельних спектрально-поляризаційних спостережень, можна сподіватися, що відповідні дані можуть прояснити деякі з тих питань, які окреслені вище.

Матеріал спостережень отриманий на ешельному спектрографі горизонтального сонячного телескопа АО КНУ [9]. Досліджений спалах виник 28 жовтня 2003 р. в активній області NOAA 0486 і мав бал X17.2/4В. Названа активна область була відносно недалеко від центра диска, косинус μ її геліоцентричного кута був 0.91. Максимум оптичної емісії спалаху зафіксований в інтервалі часу $11^{\text{h}}00^{\text{m}} - 11^{\text{h}}10^{\text{m}}$ UT [8]. На ГСТ АО КНУ спектри спалаху фотографувалися в період з $10^{\text{h}}07^{\text{m}}$ по $11^{\text{h}}22^{\text{m}}$ UT; всього було отримано 18 зєсман-спектрограм. У цій роботі вивчається в основному спектрограма за $11^{\text{h}}06^{\text{m}}$ UT, яка відповідає максимальній фазі спалаху.

Згідно з даними вимірювань космічних детекторів GOES, цей спалах по величині максимального рентгенівського потоку на $\lambda = 1$ –8 Å займає в рейтингу третю позицію за весь час з 1975 р., тобто більш ніж за чотири останні десятиліття (<http://www.spaceweather.com/solarflares/topflares.html>). Слід також зауважити, що саме активна область NOAA 0486 дала найпотужніший (за вказаний період) спалах балу X28+, який виник на західному лімбі Сонця через тиждень, 4 листопада 2003 р. Менш ніж через добу (через ≈ 18 год) після спалаху 28 жовтня 2003 р. на Землі виник-

ла 9-бальна магнітна буря. Різке зростання потоку високоенергійних протонів з енергіями понад 100 MeV розпочалося ще під час спалаху, причому впродовж наступної доби потік протонів перевищив рівень 10^2 часток $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ для протонів з енергіями $\geq 100 \text{ Мев}$, 10^3 часток $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ для протонів з енергіями $\geq 50 \text{ Мев}$, і 10^4 часток $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ для протонів з енергіями $\geq 10 \text{ Мев}$. Слід нагадати, що для спокійного Сонця типовий потік протонів близько 10^{-1} часток $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ для всіх трьох енергетичних діапазонів, тобто потік протонів після цього спалаху зріс на 3–5 порядків.

Названий спалах вже попередньо вивчався в інших роботах [3, 10], але для інших моментів часу і, в основному, по інших спектральних лініях. У роботах [3, 10] цей спалах вивчався на момент $11^{\text{h}}13^{\text{m}}$ UT, тобто вже після максимальної його фази.

Вибрані спектральні лінії та особливості їх профілів. Для аналізу були вибрані сім спектральних ліній (табл. 1). У цій таблиці розшифровка хімічного елементу, довжина хвилі λ (Å), еквівалентна ширина W (mÅ) і потенціал збудження EP (eV) наведені згідно з монографією [17]. Ефективні фактори Ланде g_{eff} ліній FeI відповідають лабораторним величинам згідно з [22].

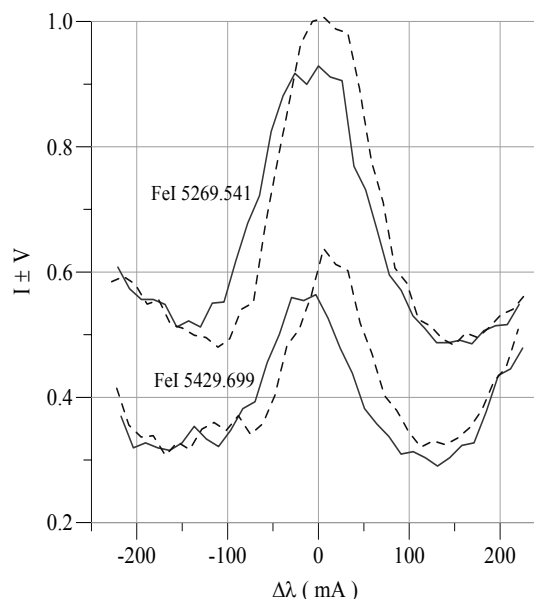
Таблиця 1

Деякі параметри вибраних спектральних ліній

№ п/п	Елемент і номер мультиплету	Довжина хвилі λ (Å)	Еквівалентна ширина W (mÅ)	Потенціал збудження EP (eV)	Ефективний фактор Ланде g_{eff}
1	FeI – 15	5269.541	478	0.86	1.208
2	FeI – 15	5429.699	285	0.96	1.374
3	FeI – 15	5434.527	184	1.01	–0.014
4	FeI – 15	5446.924	238	0.99	1.249
5	FeI – 816	6301.515	127	3.65	1.669
6	FeI – 816	6302.507	83	3.69	2.487
7	HI – 1 (H α)	6562.808	4020	10.20	1.05

Аналізувалось найяскравіше в H α місце спалаху (фотометричний розріз № –15), де центральна інтенсивність в цій лінії перевищувала інтенсивність найближчого спектрального континууму у 2 рази. У цьому місці всі вказані в таблиці лінії FeI, за винятком ліній № 5 і 6, мали добре видимі емісійні піки в їх ядрах (рис. 1). По розщепленню цих піків знаходилося магнітне поле в області інтенсивної емісії спалаху, яке для ліній FeI в основному стосується верхньої фотосфери і зони температурного мінімуму. Щодо ліній № 5 і 6, то вони мали у спалаху суто фраунгоферові профілі, без будь-яких ознак дискретної емісії в їх ядрах. Вимірювання по цих лініях дозволяли визначити величину магнітного поля в середній фотосфері. Нарешті, особливості розщеплення профілів лінії H α давали можливість визначити магнітне поле у хромосфері.

Величина магнітного поля визначалась по зміщенню "центрів ваги" профілів $I + V$ відносно $I - V$. Це дає змогу знайти ефективне магнітне поле B_{eff} , яке, по суті є усередненим магнітним полем по всій площі аналізованої ділянки на Сонці. Площа цієї ділянки визначається в основному дрижанням зображення при спостереженнях на телескопі і в даному випадку дорівнює $\approx 3 \text{ Мм}^2$. При відносно невеликих магнітних розщепленнях, коли видима величина зєсманівського розщеплення $(\Delta\lambda_{\text{H}})_{\text{obs}}$ значно менша за півширину лінії $\Delta\lambda_{1/2}$, таким чином знаходиться усереднена величина поздовжньої компоненти магнітного поля, тобто $\langle B_{\parallel} \rangle$. Таким чином, у даній роботі акцентується увага на найбільш сильних і очевидних ефектах у профілях ліній – на відміну від, наприклад, роботи [12], де аналізувались тонкі особливості розщеплення бісекторів профілів $I \pm V$.

Рис. 1. Розщеплені емісійні піки в профілях $I \pm V$ ліній FeI 5269.541 та FeI 5429.699 у спалаху.

Для кращого порівняння цих профілів, дійсний профіль для лінії FeI 5429.699 штучно зміщений вниз по осі ординат на 0.2

Результати та їх обговорення. Досліджене місце спалаху стосувалося ділянки фотосфери за межами сонячних плям і пор. У цьому місці виміряне магнітне поле було 110 Гс по лінії FeI 6302.5 і 85 Гс по лінії FeI 6301.5, полярність – S. Враховуючи величину похибок вимірювань по цих лініях (30–50 Гс), можна вважати, що обидві лінії вказують на магнітне поле з абсолютною величиною близько 100 Гс. Таким чином, в середній фотосфері реєструвалось відносно слабе ефективне магнітне поле B_{eff} , типове для рівня фотосфери за межами плям і спалахів.

Однак величина B_{eff} у більш високих шарах, у верхній фотосфері і в зоні температурного мінімуму (на висоті приблизно 500 км над рівнем $\tau_5 = 1$) знайдена у кілька разів більшою. Розщеплення емісійних піків в лінії FeI 5269.541 відповідає магнітному полю 545 Гс, в лінії FeI 5429.699 – 665 Гс, а в лінії FeI 5446.924 – 680 Гс. У всіх трьох випадках магнітна полярність S, типові похибки вимірювань $\pm (70\text{--}100)$ Гс. Таким чином, отримані дані свідчать про те, що в дослідженому спалаху при переході від середньої фотосфери до зони температурного мінімуму величина B_{eff} достовірно зростала по абсолютній величині приблизно у 5–7 разів.

Виявилось також, що розщеплення дуже сильних емісійних піків в лінії H α відповідає магнітному полю $B_{\text{eff}} = 300 \pm 200$ Гс, його полярність N, тобто протилежна по відношенню до ліній FeI. У даному випадку, враховуючи величину похибок вимірювань, можна з впевненістю говорити лише про те, що при переході від зони температурного мінімуму до хромосфери величина B_{eff} помітно зменшувалась. Про те, чи при цьому також змінювалась на протилежну магнітна полярність, у даному випадку з впевненістю говорити не можна – це слід з'ясувати на основі додаткового детального аналізу. В цілому ж, висновок зі співставлення всіх наведених даних може бути такий: величина ефективного магнітного поля B_{eff} змінювалась у спалаху не монотонно з висотою – спершу зростала з висотою, а потім зменшувалась – подібно до того, як це було знайдено раніше у інших спалахах [6, 7, 14]. Стосовно променевих швидкостей, то вони во вказаних лініях FeI і по лінії H α були близькі до нуля (± 0.3 км / с).

У лінії FeI 5434.527 в момент 11^h06^m UT виявлено досить слабе, але достовірне розщеплення емісійних піків поблизу її ядра (рис. 2). Тут наведено співставлення фотометричних профілів для трьох сусідніх місць на Сонці, які віддалені один від одного в картинній площині на 1 Мм. Видно, що якщо оптимально сумістити фраунгоферові ділянки профілів $I \pm V$, то тоді в емісійних піках виникає невелике відносне зміщення, близько 11 мÅ. Щоб краще показати цей ефект, на рис. 2 вертикальними прямими відрізками вказані положення "центрів ваги" емісійних піків поблизу ядра лінії. Видно, що:

(а) вказане відносне зміщення емісійних піків має систематичний характер у цих трьох фотометричних розрізах, тобто на ділянці протяжністю 3 Мм на Сонці;

(б) у всіх трьох фотометричних розрізах напрям зміщення емісійних піків при переході від профілів $I + V$ до профілів $I - V$ є однаковим (піки, проведені штриховими лініями, у всіх трьох місцях зміщені в цілому вправо відносно піків, вказаних суцільними лініями);

(в) емісійні піки мають негативний ("фіолетовий") доплерівський зсув величиною близько 40 мÅ відносно крил фраунгоферових профілів.

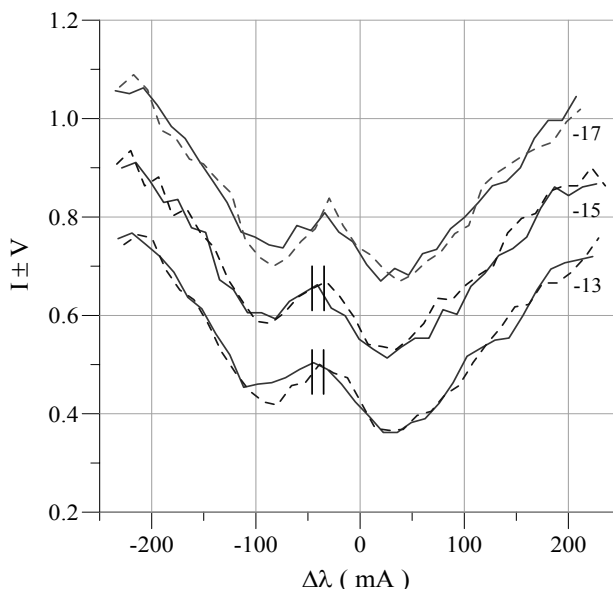


Рис. 2. Спостережені профілі $I \pm V$ лінії FeI 5434.527 у дослідженому спалаху для трьох сусідніх місць на Сонці (фотометричні розрізи № –13, –15 і –17), положення яких в горизонтальній площині змінюється з кроком 1 Мм.

Для кращого порівняння цих даних, профілі для розрізу № –15 є оригінальними, тоді як профілі для розрізів № –13 і –17 штучно зміщені по осі ординат відповідно на –0.2 і +0.2

Якщо це розщеплення емісійних піків в лінії FeI 5434.527 трактувати як прояви Зееман-ефекту, то тоді величини 11 мÅ (як $2\Delta\lambda_H$) відповідає дуже сильне магнітне поле – напруженістю в 28.5 ± 5 кГс. Його полярність має бути N, тобто протилежна до полярності по інших лініях FeI, але така ж, як по лінії H α . "Фіолетовому" зсуву у 40 мÅ відповідають негативні швидкості (підйом плазми вгору) величиною 2.2 км/с.

Виявилось, що аналогічні особливості профілів лінії FeI 5434.527 були також в інші моменти часу, зокрема в 11^h13^m UT та 11^h14^m UT (рис. 3). Причому у деяких місцях спалаху розщеплення емісійних піків в ядрі цієї лінії було тоді навіть більшим, ніж о 11^h06^m UT. Зокрема, в моменти 11^h13^m UT та 11^h14^m UT розщеплення цих піків досягало

19–20 мА. Вважаючи цю величину рівною $2\Delta\lambda_n$, отримуємо напруженість магнітного поля $B = 49\text{--}52$ кГс. З урахуванням ймовірних похибок вимірювань, цей результат можна записати так: $B = 50 \pm 5$ кГс. В ці два останні моменти також існував "фіолетовий" зсув емісійних піків, його величина була 30 мА, що відповідає променевій швидкості – 1.66 км/с (також підйом плазми). Слід також зауважити, що на рис. 3 наведено близький до максимального ефект вздовж напрямку вхідної щілини спектрографа; в інших місцях спалаху розщеплення емісійних піків в лінії Fe I 5434.527 було меншим.

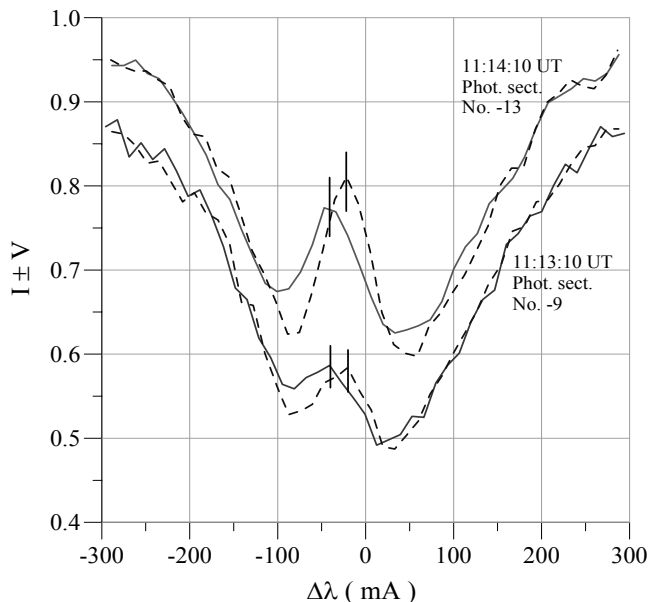


Рис. 3. Те саме, що й на рис. 2, але для моменту 11:13:10 UT (фотометричний розріз № –9) і 11:14:10 UT (фотометричний розріз № –13).

Для кращого порівняння цих даних, профілі для першого моменту є оригінальними, тоді як для другого моменту вони штучно зміщені по осі ординат на +0.1 (вказане вертикальними штрихами розщеплення емісійних піків відповідає магнітному полю близько 50 кГс)

Отримані результати стосовно лінії Fe I 5434.527 в цілому добре узгоджуються з аналогічними даними по інших спалахах. Як вже відзначалось вище, подібні вказівки на магнітні поля рівня $10^4\text{--}10^5$ Гс були виявлені раніше і в інших спалахах [10, 11, 12]. Щодо магнітної полярності цих особливо сильних полів, то були відзначені випадки як однакової, так і протилежної полярності відносно більш слабких полів (див. напр., рис. 8 у роботі [16]).

Значний інтерес представляє також "фіолетове" зміщення емісійних піків величиною близько 2 км/с. Воно вказує на те, що плазма, зосереджена в об'ємах з особливо сильним магнітним полем рівня 10^4 Гс, піднімалася вгору, а не опускалася, як це типово, наприклад, для границь супергрануляційних комірок у спокійних областях. Аналогічний ефект – підйом плазми з швидкостями від 1.7 до 3.1 км/с – виявлений в місцях присутності магнітних полів напруженістю близько 8 кГс у тіні великих сонячних плям [9, 13].

Такий підйом плазми дещо прояснює питання, звідки взагалі взялися такі екстремально сильні магнітні поля у спалаху. Дійсно, дуже мало ймовірно, щоб вони якось утворились на тій самій висоті, де й спостерігались. Адже, як було сказано у вступі, у верхній фотосфері газовий тиск може утримувати магнітне поле напруженістю максимум 500 Гс. Але газовий тиск у підфотосферних шарах швидко наростає з глибиною, і у певному діапазоні глибин він має бути достатнім для концентрації полів рівня $10^4\text{--}10^5$ Гс. Це наводить на думку, що на поверхню Сонця піднімаються вже достатньо сформовані магнітні структури [12]. Аналогічну гіпотезу щодо неспалахових ділянок активних областей висловлював раніше Піддінгтон [18]. Він припускав, що на певній глибині Сонця формуються своєрідні магнітні "дерева" з багатьох сотень і тисяч скручених магнітних волоконць, напруженість магнітного поля у кожному з яких близько 4 кГс. Підйом цих магнітних "дерев" на поверхню і дає спостережені активні області. Як бачимо, представлені вище дані узгоджуються з цією гіпотезою, за винятком того, що дійсні напруженості у скручених магнітних волоконцях можуть бути насправді на порядок вищі, ніж припускав Піддінгтон [18].

Висновки. Із порівняння спектрально-поляризаційних вимірювань магнітного поля у протонному сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р. балу X17.2/4B, виконаних в лініях Fe I а також лінії H α , можна зробити такі висновки: (а) ефективне магнітне поле B_{eff} змінювалась з висотою немономотно – від ≈ 100 Гс в середній фотосфері до максимального значення 550–700 Гс у верхній фотосфері і зоні температурного мінімуму і до ≈ 300 Гс в хромосфері, (б) у цьому ж місці в картинній площині ймовірно існували субтелескопічні структури з особливо сильним полем (ОСП) у 25–50 кГс, що видно по слабкому розщепленню емісійних піків (11–20 мА) в лінії Fe I 5434.527 з дуже низьким фактором Ланде, $g_{\text{eff}} = -0.014$, (в) магнітна полярність ОСП була N, тобто протилежна до полярності S по інших фотосферних лініях з більшими факторами Ланде ($g_{\text{eff}} = 1.2\text{--}2.5$), (г) в ділянках ОСП спостерігався підйом плазми з швидкостями близько 2 км/с; такого підйому в областях зі слабшими полями не було. Отримані результати є непрямим свідченням того, що структури ОСП сформувались у підфотосферних шарах, що якісно узгоджується з гіпотезою Піддінгтона [18]. Можна припустити, що наявність в площі аналізованої ділянки (≈ 3 Мм²) помірних і особливо сильних магнітних полів протилежної полярності могла обумовити спалахове енерговиділення внаслідок магнітного пересполучення силових ліній.

Список використаних джерел

1. *Abramenko V. I.* Flare-related changes in the profiles of six photospheric spectral lines / V. I. Abramenko, E. A. Baranovsky // *Solar Phys.*, 2004. – Vol. 220, Iss. 1. – P. 81–91.
2. *Photosphere model of 2N/2M solar flare: July 18, 2000* / E. S. Andriets, N. N. Kondrashova, E. V. Kurochka, V. G. Lozitsky // *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*, 2012. – Vol. 108, Iss. 1. – P. 1–3.
3. *Baranovsky E. A.* Modelling of photosphere and chromosphere of two powerful flares / E. A. Baranovsky, V. G. Lozitsky, V. P. Tarashchuk (28 Oct. 2003 and 1 Sept. 1990) (in rus.: Моделирование фотосферы и хромосферы двух мощных вспышек (28 окт. 2003 г. и 1 сент. 1990 г.)) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2009. – Vol. 25, No. 5. – P. 373–384.
4. *Holweger H.* The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision of Ba II lines by hydrogen / H. Holweger, E. H. Müller // *Solar Phys.*, 1974. – Vol. 39, N 1. – P. 19–30.
5. *Magnetic Fields in a Limb Flare on July 19, 2012* / E. A. Kirichek, A. A. Solov'ev, N. I. Lozitskaya, V. G. Lozitskii // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013. – Vol. 53, N 7. – P. 831–834.
6. *Kurochka E. N.* Temporary changes of physical conditions in photospheric layers of solar flare / E. N. Kurochka, V. G. Lozitsky, O. B. Osyka (in rus.: Временные изменения физических условий в фотосферных слоях солнечной вспышки) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2008. Vol. 24, N 4. – P. 308–320.
7. *Kurochka E. V.* Magnetic fields and thermodynamical conditions in the M6.4/3N solar flare on July 19, 2000 / E. V. Kurochka, V. G. Lozitsky // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Suppl.*, 2005, № 5. – P. 143–145.
8. *Laba I. S.* Proton flare 4B/X17.2 on the Sun of 28 October 2003. Results of photometry / I. S. Laba (in ukr.: Протонний спалах 4B/X17.2 на Сонці 28 жовтня 2003 р. Результати фотометрії) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2007. – Vol. 23, N 1. – P. 51–60.
9. *Lozitsky V. G.* Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra / V. G. Lozitsky // *Advances in Space Research.* – 2016. – Vol. 57. – P. 398–407.
10. *Lozitsky V. G.* Magnetic fields and Fe I line profiles in the major solar flare on October 28, 2003 / V. G. Lozitsky // *Astronomy Letter.* – 2009. – Vol. 35, N 2. – P. 136–142.
11. *Lozitsky V. G.* Observational evidences to the 10^5 G magnetic fields in active regions on the Sun / V. G. Lozitsky (in ukr.: Спостережені свідчення магнітних полів напруженістю 10^5 Гс в активних областях Сонця) // *J. of Phys. Studies*, 2009. – Vol. 13, N 2. – P. 2903-1-2903-8.
12. *Lozitsky V. G.* Small-scale magnetic field diagnostics in solar flares using bisectors of $I \pm V$ profiles / V. G. Lozitsky // *Advances in Space Research*, 2015. – Vol. 55, Iss. 3. – P. 958–967.
13. *Lozitsky V. G.* Spectral manifestations of extremely strong magnetic fields in the sunspot umbra / V. G. Lozitsky // *Advances in Space Research*, 2017. – Vol. 59. – P. 1416–1424.
14. *Observations of magnetic field evolution in a solar flare* / V. G. Lozitsky, E. A. Baranovsky, N. I. Lozitska, U. M. Leiko // *Solar Phys.* – 2000. – Vol. 191, N 1. – P. 171–183.
15. *Lozitsky V. G.* Magnetic fields in limb solar flares / V. G. Lozitsky, N. I. Lozitska, O. A. Botygina (in rus.: Магнитные поля в лимбовых солнечных вспышках) // *Astron. Tsirkular*, 2013. – № 1594. – P. 1–6.
16. *Lozitsky V. G.* Observational evidences for extremely strong magnetic fields in solar flares / V. G. Lozitsky // *Intern. Journ. of Astron. And Astrophys.* – 2011. – V. 1, No. P. 147–154.
17. *Moore Ch. E.* The spectrum 2935 Å to 8770 Å. Second revision of Rowland's Table of solar spectrum wave lengths / Ch. E. Moore, M. G. J. Minnaert, J. Houtgast // *National Bureau of Standards Monograph* 61, Iss. Dec. 1966, Printed with financ. assist. from UNESCO, under the auspices of IAU. – 349 p.
18. *Piddington J. H.* The flux-rope-fibre theory of solar magnetic fields / J. H. Piddington // *Astrophysics and Space Sci.*, 1978. – Vol. 55, N 2. – P. 401–425.
19. *Priest E. R.* The magnetic nature of solar flares / E. R. Priest, T. G. Forbes // *The Astronomy and Astrophysics Rev.*, 2002. – Iss. 4. – P. 313–377.
20. *The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview* / S. Tsuneta, K. Ichimoto, Y. Totsukawa et al. // *Solar Phys.*, 2008. – Vol. 249, № 2. – P. 167–196.
21. *Peripheral Downflows in Sunspot Penumbrae* / M. Van Noort, A. Lagg, S. K. Tiwari, S. K. Solanki // *Astron. Astrophys.*, 2013. – Vol. 557, id.A24. – 14 p.
22. *Zemanek E. N.* Splitting of some spectral lines of Fe I in magnetic field / E. N. Zemanek, A. P. Stefanov // *Vestnik Kiev Univ., Seria Astronomii*, 1976. – Vol. 18. – P. 20–36.

Надійшла до редколегії 17.03.17

В. Лоцицкий, д-р физ.-мат. наук,
Н. Лоцицкая, канд. физ.-мат. наук,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ПРОТОННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ БАЛЛА X17.2/4B ПО ДАННЫМ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В НЕСКОЛЬКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Сравниваются спектрально-поляризационные измерения магнитного поля в солнечной вспышке 28 октября 2003 г. балла X17.2/4B, полученные на зешельном спектрографе АО КНУ в 6 линиях Fe I, а также линии H α . Представленные данные относятся к максимальной фазе вспышки и участку фотосферы за пределами пятен, где эффективное (усредненное) магнитное поле по линии Fe I 6302.5 было около 100 Гс и имело S-полярность. Измеренное расщепление эмиссионных пиков в ядрах сильных линий 15-го мультиплета Fe I соответствует значительно более сильным полям – в пределах 550–700 Гс, притом также S-полярности. Обнаружено заметное расщепление эмиссионных пиков (11–20 мА) также в линии Fe I 5434.527 с эффективным фактором Ланде $g_{\text{eff}} = -0.014$. Величина указанного расщепления и его знак указывает на существование особо сильного поля напряженностью 25–50 кГс, которое имело противоположную полярность (N) и отрицательные лучевые скорости (подъем плазмы) величиной 1.7–2.2 км/с. Магнитное поле в линии H α около 300 Гс, полярность – N. Полученные данные указывают на существенную неоднородность магнитного поля в области вспышки, которая включает как противоположные полярности вдоль луча зрения, так и значительный диапазон эффективных магнитных полей.

Ключевые слова: Солнце, солнечные магнитные поля, солнечные вспышки, протонная вспышка балла X17.2/4B, зешельные зееман-спектрограммы, расщепление эмиссионных пиков, напряженности в фотосфере, зоне температурного минимума и хромосфере.

V. Lozitsky, Dr. Sci., N. Lozitska, Ph. D.,
Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

MAGNETIC FIELDS IN PROTON SOLAR FLARE OF X17.2/4B CLASS ACCORDING TO DATA OF SIMULTANEOUS MEASUREMENTS IN A FEW SPECTRAL LINES

Spectral-polarized magnetic field measurements in solar flare of 28 October 2003 of X17.2/4B class are compared in six Fe I lines and in H α line. Observations were carried out on Echelle spectrograph of horizontal solar telescope of Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Presented data relate to peak phase of flare and a place of photosphere outside sunspots where effective (average) magnetic field in Fe I 6302.5 line was about 100 G and had S polarity. Measured splitting of emissive peaks in cores of strong Fe I lines of 15th multiplet correspond to stronger fields, in range 550–700 G and S polarity too. Noticeable splitting of emissive peaks (11–20 mÅ) were found also in Fe I 5434.527 line with effective Lande factor $g_{\text{eff}} = -0.014$. Value of this splitting and its sign indicate the existence of extremely strong fields of 25–50 kG of opposite (N) polarity which had negative Doppler velocities (lifting of plasma) on level of 1.7–2.2 km/sec. Magnetic field according to H α line was 300 G and N polarity. Presented results indicate the essential inhomogeneity of magnetic field in flare volume which include the opposite polarities along the line of sight and wide range of effective magnetic fields.

Key words: Sun, solar magnetic fields, solar flares, proton flare of X17.2/4B class, Echelle Zeeman spectrograms, splitting of emissive peaks, magnetic field strengths in photosphere, temperature minimum zone and chromosphere.