

## МЕТОД ВІДНОШЕННЯ ЛІНІЙ – МОЖЛИВИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ НАДІЙНІШОГО ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ СПАЛАХІВ

*Наведено вже опубліковані й нові спостережні дані, які вказують на те, що в областях сонячних спалахів є суттєва відмінність субтелескопічної структури магнітного поля, яка відсутня за межами спалахів. Зокрема, магнітні поля по лініях FeI 6301.5 і FeI 6302.5 Å, виміряні у спалахах за межами тіней сонячних плям, мають інверсне співвідношення  $V_{\text{obs}}(6301.5) < V_{\text{obs}}(6302.5)$ , тоді як без спалахів спостерігається переважно  $V_{\text{obs}}(6301.5) > V_{\text{obs}}(6302.5)$ . Аргументовано висновок, що у спалахах це пов'язано з тим, що там на фотосферному рівні справджується просторово нероздільний контакт силових трубок із "кілогаусовими" полями і фонового поля, які мають протилежні магнітні полярності. Прямі спостережні вказівки на особливо сильні поля протилежної полярності знайдено у далеких крилах лінії FeI 6173.3 Å. Нові унікальні спостережні дані, які стосуються ділянки сейсмічного джерела у винятково потужному сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2/4B, свідчать про те, що вказане вище інверсне співвідношення напруженостей є найсуттєвішим саме в зоні цього джерела. Запропоновано нову ідею щодо надійнішого прогнозування сонячних спалахів, яка зводиться до того, що нову актуальну інформацію для прогнозування слід отримувати з моніторингу спостережних даних у лініях FeI 6301.5 і FeI 6302.5 Å.*

**Ключові слова:** Сонце, сонячна активність, сонячні спалахи, магнітні поля, метод відношення ліній, прогнозування сонячних спалахів.

**Вступ.** Метод відношення ліній, що запропонований Яном Стенфло 1973 р. [19], призначений для вимірювання локальних магнітних полів у просторово нероздільних структурах сонячної фотосфери. Його суть зведена до того, що фактичні напруженості магнітного поля  $V_{\text{true}}$  у таких структурах (дуже тонких силових трубках, названих fluxtubes) можна оцінити на основі порівняння вимірених напруженостей  $V_{\text{obs}}$  у двох спеціально підібраних магніточутливих лініях. Такі лінії повинні мати однакову температурну чутливість і однакову силу осцилятора, але суттєво різні фактори Ланде. Це означає, що такі лінії мають формуватись на однаковій висоті в атмосфері Сонця і змінюватись однаковим чином у випадку переходу до областей на Сонці з іншою температурою. Формально такі лінії можна розглядати як одну і ту саму магніточутливу лінію, що має два різні значення (моди) фактора Ланде  $g$ . У цьому разі, теоретично, вимірювання по лінії з меншим фактором Ланде мають краще відповідати режиму слабкого магнітного поля, коли сигнал магнітографа [1] строго пропорційний реальному зєсманівському розщепленню  $\Delta\lambda_n$ . Однак для тієї лінії, що має більший фактор Ланде, відхилення від указаної пропорційності має бути суттєвішим, якщо фактичні магнітні поля на Сонці настільки сильні, що зєсманівське розщеплення  $\Delta\lambda_n$  є близьким до спектральної ширини лінії  $\Delta\lambda_{1/2}$  або ж навіть більше за неї. Це відхилення від пропорційності називають "насиченням" сигналу магнітографа; воно спостерігається у сонячних плямах за напруженостей магнітного поля, що перевищують 1000 Гс. Фізична причина цього ефекту дуже проста: у сильних магнітних полях зєсманівські сигма-компоненти розщеплюються настільки сильно, що частково виходять за межі щільної фотометра магнітографа, який реєструє величину сигналу поляризації внаслідок ефекту Зєсмана. Якщо на Сонці існують дуже тонкі просторово нероздільні силові трубки з такими ж сильними полями, як у сонячних плямах, то тоді порівняння вимірених напруженостей  $V_{\text{obs}}$  у двох вказаних лініях має давати такий результат: лінія з більшим фактором Ланде повинна давати менше вимірне поле, ніж лінія з меншим фактором Ланде. Ця відмінність пояснюється більшою втратою сигналу магнітографа для лінії з більшим фактором Ланде. Ефект "насичення" має бути тим більшим, чим більшою є справжня напруженість  $V_{\text{true}}$  магнітного поля у просторово нероздільних (субтелескопічних) силових трубках. Якщо порівняти виміряні напруженості  $V_{\text{obs}}$  у лініях з різними факторами Ланде, на основі модельних розрахунків можна оцінити дійсні напруженості у субтелескопічних силових трубках. Аналогічна можливість наявна і тоді, коли величини  $V_{\text{obs}}$  знайдено не з магнітографічних вимірювань, а з спектрально-поляризаційних, які дають змогу оцінити дійсну напруженість магнітного поля за величиною каліброваної амплітуди параметра Стокса  $V$  або ж за зміщенням "центрів ваги" профілів  $I \pm V$  [13].

На практиці виявляється, що результати інтерпретації методом відношення ліній неоднозначні, оскільки доводиться використовувати принаймні двокомпонентну модель магнітного поля, яка має багато вільних параметрів [16]. Зокрема, це такі параметри, як напруженість і полярність магнітного поля у силових трубках і фоновому полі, боковий профіль напруженості у силових трубках, орієнтація силових ліній відносно променя зору в межах вхідної апертури інструмента, фактор заповнення силових трубок, спектроскопічні параметри профілів ліній у зазначених структурах, а також відносні променеві швидкості. Однак залежність від фактора заповнення зникає, якщо припустити, що у проміжках між силовими трубками (тобто у "фоні") магнітне поле дорівнює нулю, але тоді ще залишається суттєва залежність від інших параметрів моделі. Саме таке припущення (про нульовий вклад фонового поля) використав Стенфло [19] для оцінювання дійсних напруженостей у силових трубках спокійних областей на Сонці. Були порівняні виміряні напруженості у двох спектральних лініях першого мультиплету заліза, FeI 5247.1 і 5250.2 Å, які мають дуже близькі висоти формування і температурні чутливості, але різні фактори Ланде, 2.0 і 3.0 відповідно. У припущенні, що боковий профіль напруженості є прямокутним, отримано напруженість  $B = 1100$  Гс, а за умови, що там гаусподібний профіль (приблизно такий, як у сонячних плямах) –  $B = 2300$  Гс. Пізніше Вієр [20] застосував подібний метод для інших спектральних ліній і лише прямокутний профіль напруженості. Таким чином отримано дійсні напруженості  $V_{\text{true}}$  в діапазоні 1500–2200 Гс, причому приблизно однакові для яскравих точок у спектральній лінії K Call,  $H_{\alpha}$  факелів і пор. У роботі [9] показано, що якщо для спостережень Вієра [20] використати непрямокутний профіль напруженості, то дійсні напруженості зростають у 1,5–5 раз, наближаючись до 10 кГс.

Пізніше в роботах [14, 15] враховано вклад фоновому поля  $B_{\text{фон}}$ , а також оцінено дійсні форми бокового профілю поля у силових трубках, з урахуванням даних про відношення каліброваних сигналів магнітографа у трьох різних ділянках профілів ліній FeI 5247.1 і 5250.2 Å. Справжні напруженості у силових трубках спокійних областей знайдено в межах 1500–2200 Гс при боковому профілі поля, подібному до спостереженого у сонячних порах. Також встановлено, що у припущенні чисто поздовжнього магнітного поля виникає така проста залежність:  $B_{\text{фон}} \approx 1000 f$ , де  $f$  – фактор заповнення. Зокрема, якщо  $f = 1$  (тобто силові трубки змикаються своїми стінками), то тоді  $B_{\text{фон}} \approx 1000$  Гс – це результат, який уявляється цілком логічним.

У цілому ж, інтерпретація вимірювань методом відношення ліній і нині перебуває практично у тому ж стані, в якому вона залишена у двох останніх роботах. Очевидно, у більшості дослідників домінує уявлення, що все більше за вхідною апертурою сонячні інструменти ось-ось дозволять безпосередньо розділити найдрібніші силові трубки і прямим методом визначити там напруженості й інші характеристики. Зокрема, найбільший на сьогодні 4-метровий сонячний телескоп має дифракційну межу на рівні 20–25 км, однак найдрібніші силові трубки, напевно, ще тонші, і мають діаметр у межах 10–70 км [18] чи 15–20 км [2]. Навіть, якщо фактичне просторове розділення стане рівним діаметру силових трубок, то все одно залишиться проблема внутрішньої структури цих трубок, зокрема форми бокового профілю поля – того параметра, про який йшлося вище. Для розв'язання цієї проблеми прямим методом необхідне ще вище просторове розділення.

Незважаючи на неоднозначність методу відношення ліній, він може дати в окремих випадках важливу інформацію про субтелескопічні структури і фонове поле – можливо, саме ту, якої не вистачає під час використання інших методів. Відомо, що прогнозування точного часу і місця виникнення сонячних спалахів на Сонці (особливо потужних) є нині нерозв'язаною проблемою. Роботами, виконаними у Кримській астрофізичній обсерваторії під керівництвом академіка А. Б. Северного, показано, що сонячні спалахи виникають переважно у складних групах сонячних плям, з високими горизонтальними градієнтами магнітного поля, при тісному контакті протилежних магнітних полярностей, а також у місцях раптової появи нового магнітного потоку [17]. Однак деякі сонячні спалахи виникають і у дуже простих групах сонячних плям.

Наприклад, сильний сонячний спалах 3 липня 2021 р. бала X1.5 виник у нумерованій активній області, яка мала лише одну невелику сонячну пляму (<https://spaceweather.com>). Ця пляма існувала менше доби. Аналогічний випадок був 29 листопада 2020 р., коли спалах бала M4.4 виник за лімба в активній області NOAA 2970; при виході цієї області з-за лімба в ній виявилась лише одна невелика сонячна пляма. Оскільки цей спалах виник за лімба, то його потужність могла бути значно вищою і відповідати, можливо, класу X. А найсильніший на сьогодні спалах 25-го циклу бала X2.2 відмічено 20 квітня 2022 р. у групі плям NOAA 2992, яка за три дні до спалаху, 17.04.2022 р., складалася також з однієї невеликої сонячної плями. У наступні три дні площа групи збільшилась, але ненабагато. Це своєрідні сюрпризи 25-го циклу – сильні спалахи поблизу одиночних плям. Указане свідчить про те, що під час прогнозування сонячних спалахів не враховують якусь важливу характеристику магнітного поля – можливо, саме про субтелескопічну структуру магнітного поля.

Метою представленої роботи є аналіз із цього погляду відповідних спостережних даних – як уже опублікованих, так і нових, ще не опублікованих.

**Опубліковані дані.** Перші важливі дані з указаної проблеми були отримані також у Кримській астрофізичній обсерваторії і опубліковані у тому ж 1973 р. [4]. Під час порівняння магнітографічних вимірювань магнітного поля по різних спектральних лініях виявилось, що результати залежать від магнітної чутливості ліній. На рис. 1 цей результат подано разом із деякими іншими даними, опублікованими в роботі [13].

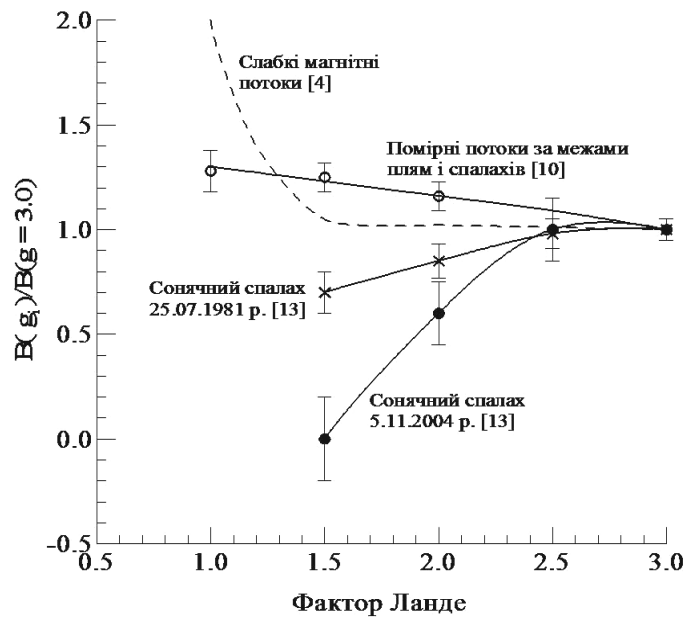
З рис. 1 видно, що для слабких магнітних полів ( $B_{\parallel} < 100\text{--}200$  Гс) виміряні напруженості приблизно однакові у певному діапазоні значень фактора Ланде (1,5–3,0), але потім різко зростають при зменшенні магнітної чутливості ліній. Зауважимо, що цей результат не суперечить вимірюванням Стенфлю [19] по лініях FeI 5247.1 і 5250.2 Å, оскільки наведено на рисунку штрихова крива дає дуже усереднений хід спостереженої залежності для випадку слабких магнітних полів. Щодо помірних за силою магнітних полів ( $B_{\parallel} \approx 500$  Гс), то тут відмічають повільне і монотонне зростання виміряного поля при зменшенні фактора Ланде. Обидва випадки є цілком очікуваними для двокomпонентної структури магнітного поля, що містить субтелескопічні силові трубки з "кілогаусовими" полями і слабше "фонове" магнітне поле тієї ж магнітної полярності [9].

Дуже цікавими щодо вказаного є дані про сонячні спалахи, для яких зафіксовано протилежний ефект: зменшення відносної напруженості  $B(g)/B(g=3.0)$  у разі зменшення фактора Ланде. У роботі [13] зазначено, що це також можливо за наявності "кілогаусових" магнітних полів і слабшого фоновому поля, але у таких двох випадках. По-перше, це може бути тоді, коли в силових трубках магнітна полярність протилежна полярності фоновому поля. По-друге, таке може бачити й у випадку, коли полярності є скрізь однаковими, але у силових трубках спостерігаються емісійні прояви ефекту Зеємана. Щоб зробити вибір між цими двома випадками, слід порівняти дані вимірювань по спектральних лініях із низькою температурною чутливістю, в яких не спостерігаються емісійні прояви ефекту Зеємана [8]. Такими лініями можна вважати дві лінії 816-го мультитплету заліза, FeI 6301.5 і 6302.5 Å, в яких фактори Ланде рівні 1.67 і 2.49, відповідно, а потенціали збудження нижнього терму становлять 3.65 і 3.69 еВ, тобто є відносно високими.

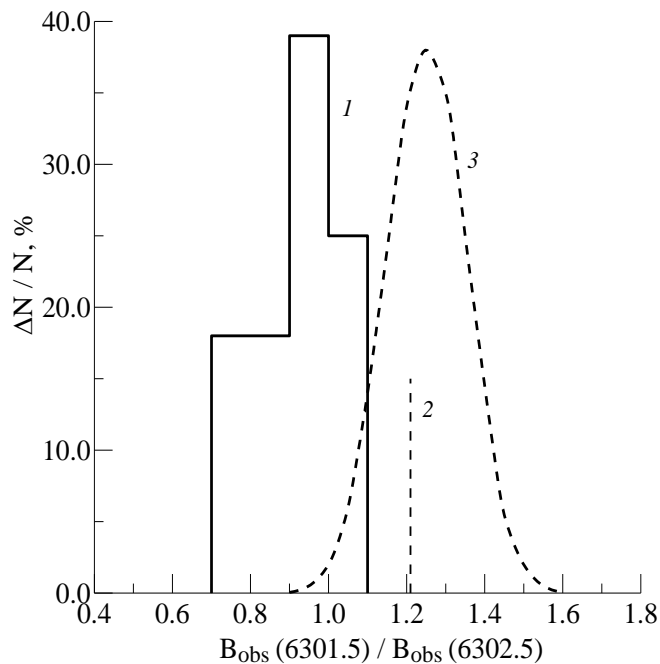
Ці лінії, подібно до ліній FeI 5247.1 і 5250.2 Å, також зручні для діагностики маломасштабних магнітних полів методом відношення ліній, хоча слід відмітити, що у них висоти формування відрізняються більше, ніж у FeI 5247.1 і 5250.2 Å. Теоретично, при однорідному магнітному полі повинна виконуватись рівність  $B_{\text{obs}}(6302.5) \approx B_{\text{obs}}(6301.5)$ . Аналогічний результат можна очікувати і при неоднорідному (у картинній площині) магнітному полі, величина якого, однак, не перевищує 1000 Гс. Якщо ж виявляється будь-яка достовірна відмінність у полях по вказаній парі ліній, то це може бути ознакою присутності сильних ( $> 1000$  Гс) субтелескопічних магнітних полів.

На рис. 2 зображено попередню статистику [12] відношення  $B_{\text{obs}}(6301.5)/B_{\text{obs}}(6302.5)$  по трьох сонячних спалахах, які спостерігалися з аналізатором колової поляризації на ГСТ АО КНУ у такі дати: 25.07.1981, 29.03.2001 і 29.07.2002; їхні бали були 2N, X1.7/1B і M4.7/2N, відповідно. Видно, що розподіл відношення  $B_{\text{obs}}(6301.5)/B_{\text{obs}}(6302.5)$  для спалахів у цілому зсунуто в область менших значень ( $< 1$ ), ніж аналогічний розподіл для неспалахових облас-

тей. Звідси доходимо висновку, що у місцях сонячних спалахів не тільки існували маломасштабні силові трубки з "кілогаусовими" полями, але й також, що магнітна полярність таких трубок була протилежною до полярності навколишнього фонового поля.



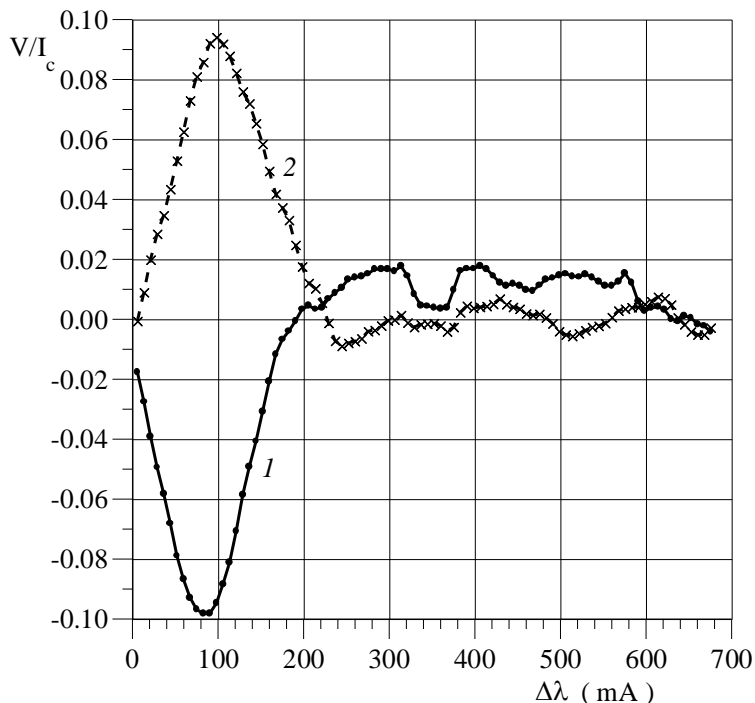
**Рис. 1.** Порівняння відносних напруженостей магнітного поля  $B(g)/B(g=3.0)$  для слабких поздовжніх полів ( $B_{\parallel} < 100\text{--}200$  Гс) за межами спалахів [4], для помірних за величиною полів ( $B_{\parallel} \approx 500$  Гс) також за межами сонячних спалахів [10], а також для двох сонячних спалахів балів 2N (25.07.1981) та M4.1/1B (5.11.2004) [13]



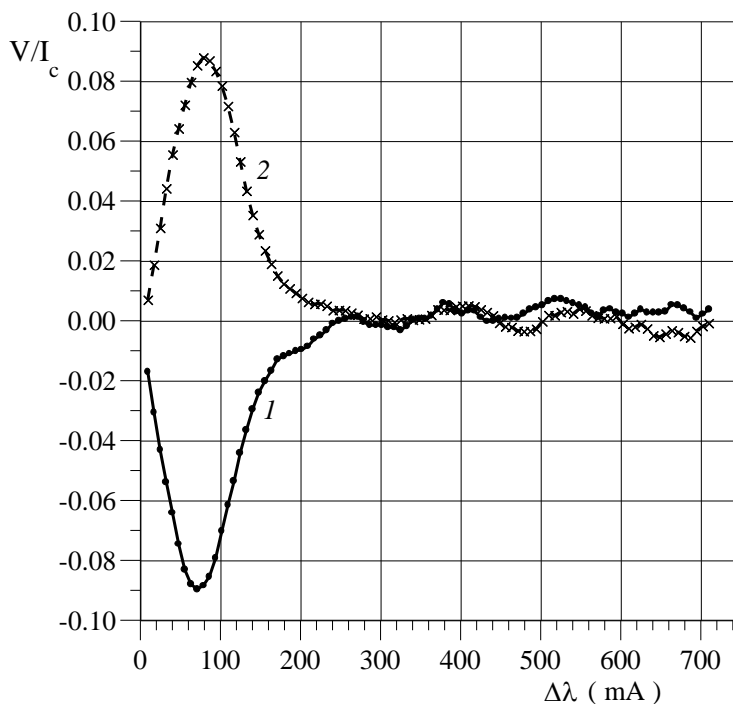
**Рис. 2.** Статистика відношення  $V_{obs}(6301.5)/V_{obs}(6302.5)$  згідно з [12] для досліджених сонячних спалахів (гістограма 1,  $N = 12$ ) порівняно з даними для області фотосфери за межами плям і спалахів 2 (вимірювання авторів статті [12]), а також для міжсіткових мережних магнітних полів 3 [3]. Видно, що для спалахів маємо відношення  $V_{obs}(6301.5)/V_{obs}(6302.5)$  у межах 0.7–1.1, тоді як для інших місць на Сонці – у цілому вищі значення

У роботі [12] знайдено пряму вказівку на те, що наведена на рис. 2 відмінність розподілів справді пов'язана з магнітними полями протилежної полярності, притому значно сильнішими, ніж 1000 Гс. Це встановлено на основі детального вивчення далеких крил лінії FeI 6173.3 Å ( $g = 2.5$ ), яка має "чисті" неблендовані крила в межах  $\pm 700$  мА. Виявилось, що якщо порівняти "синє" і "червоне" крила цієї лінії у параметрі Стокса V, то для випадку, коли  $V_{obs}(6301.5)/V_{obs}(6302.5) < 1$ , маємо протилежну за знаком циркулярну поляризацію у широкому інтервалі віддалей

від центра, до 600 мА (рис. 3). З рисунка видно, що локальні максимуми цієї поляризації в основному повторюються (за абсолютною величиною) в обох крилах лінії, як і має бути при ефекті Зеемана. Подібний ефект значно слабший або взагалі відсутній, якщо  $B_{obs}(6301.5)/B_{obs}(6302.5) \approx 1$  (рис. 4). Із цих даних випливає не тільки протилежний знак магнітної полярності у різних компонентах магнітного поля, але й те, що локальні напруженості в місцях сонячних спалахів можуть досягати дуже високих значень, до 5.6–12 кГс [12].



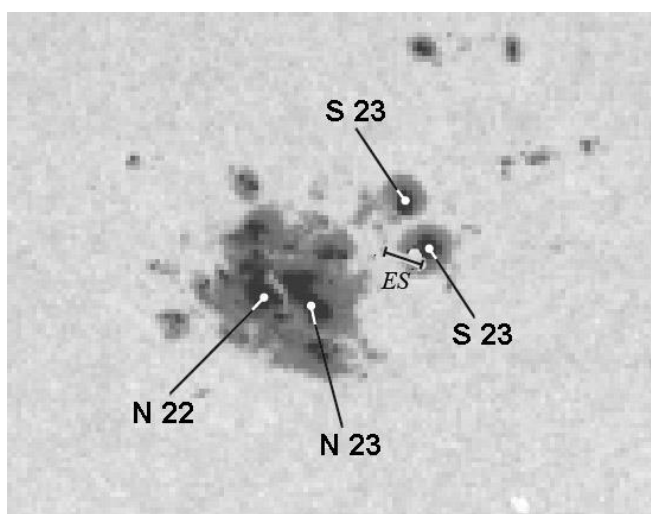
**Рис. 3.** Порівняння розподілу параметра Стокса  $V$  для обох крил лінії Fe I 6173.3 Å в момент 10:41:30 спалаху 29 липня 2002 р., коли спостерігалось  $B_{obs}(6301.5)/B_{obs}(6302.5) = 0.73$ . Профіль 1 відповідає "фіолетовому" крилу лінії, 2 – "червоному" [12]



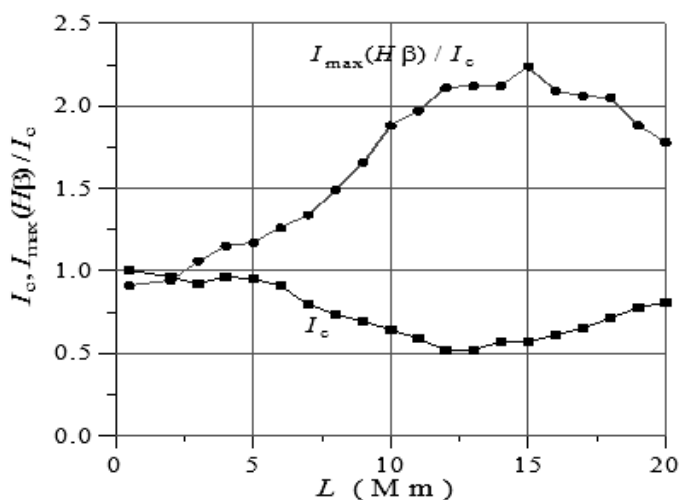
**Рис. 4.** Те саме, що і на рис. 3, але для спалаху 25.07.1981, 12:58 UT і співвідношенні виміряних полів  $B_{obs}(6301.5)/B_{obs}(6301.5) = 0.97$  [12]

**Нові дані.** Додатково досліджено винятково потужний сонячний спалах 28 жовтня 2003 р. бала X17.2 / 4В, який виник у суперактивній області NOAA 0486. За критерієм пікової потужності рентгенівського випромінювання, яке реєструється детекторами GOES з 1976 р., цей спалах є одним з найпотужніших – він займає у списку таких спалахів третю позицію. Цей спалах спостерігався Н. Й. Лозицькою і В. Г. Лозицьким на ешельному спектрографі ГСТ АО КНУ [7]. Попередні результати вказаного дослідження опубліковано в роботі [11]; у цій же роботі наведено деякі результати дослідження цього спалаху іншими авторами. Цікавою особливістю такого спалаху є те, що в ньому існували три сейсмічні джерела [5, 21].

Для фотографування спектрів цього спалаху в ортогональних циркулярних поляризаціях вибирали найяскравіші його місця. Одне з таких місць фотографування спектрів, унаслідок щасливого збігу обставин, виявилось дотичним до сейсмічного джерела S2/S3 згідно з даними робіт [5, 21]. Це показано на рис. 5, на якому інтервалом *ES* відмічено положення вхідної щілини спектрографа АО КНУ, а світлим кружечком – розташування сейсмічного джерела. На рис. 6 показано розподіл інтенсивності  $I_c$  у спектральному континуумі вздовж напрямку вхідної щілини спектрографа, а також розподіл у тому ж напрямку максимальної інтенсивності в ядрі лінії  $H\beta$ , віднесеної до інтенсивності найближчого спектрального континууму. Сейсмічному джерелу тут відповідають значення абсциси в інтервалі  $L = 12\text{--}20$  Мм; видно, що у цьому місці інтенсивність у континуумі знижена не більш ніж у 2 рази, що є типовим для північної сонячної плями. Щодо інтенсивності емісії в  $H\beta$ , то відповідне значення  $I_{\max}(H\beta)/I_c = 1.8\text{--}2.2$  вказує на дуже потужний сонячний спалах, яких на сьогодні зареєстровано лише кілька (див. посилання в роботі [11]).



**Рис. 5.** Вигляд активної області NOAA 0486 у спектральному континуумі згідно з даними SOHO. Положення сейсмічного джерела S2/S3 [5, 21] у північній плямі показано світлим кружечком, інтервалом *ES* – положення вхідної щілини спектрографа ГСТ АО КНУ. Також наведено результати вимірювань магнітного поля у плямах (у сотнях гаусів) і їхні магнітні полярності, виконані в лінії FeI 5250.2



**Рис. 6.** Розподіл уздовж напрямку вхідної щілини спектрографа таких параметрів:  
 $I_c$  – інтенсивності у спектральному континуумі поблизу лінії  $H\beta$ ;  
 $I_{\max}(H\beta)/I_c$  – максимальної інтенсивності в ядрі лінії  $H\beta$ , віднесеної до інтенсивності найближчого спектрального континууму (сейсмічне джерело S2/S3 відповідає  $L \approx 10\text{--}20$  Мм, де спостерігалась найяскравіша емісія спалаху)

Зауважимо, що сейсмічні джерела є найменш вивченим явищем, що супроводжує виділення енергії сонячних спалахів. Вони спостерігаються на доплерограмах фотосфери Сонця у вигляді збурень, які концентрично поширюються від якогось джерела. Такі хвилі спостерігалися у приблизно 50 % сонячних спалахів, причому деякі такі спалахи мали кілька сейсмічних джерел. Фізично – це акустичні хвилі, які рухаються не по поверхні, а в надрах Сонця (звідси й назва – сейсмічні). Вони відбиваються через температурний градієнт і досягають поверхні з більшою швидкістю. Швидкість сейсмічних хвиль, видимих на поверхні, зростає з віддаленням від джерела енергії. Деякі параметри: типовий час життя становить 1–3 хв, імпульс –  $10^{24}$  г·см/с. Локалізація джерела – фотосфера, на висотах 30–100 км. Можливі джерела енергії – магнітні поля, пучки електронів і протонів [5, 6]. Враховуючи ці обставини, дуже важливо і цікаво вивчити магнітні поля в області сейсмічного джерела саме за фотосферними лініями.

Як видно з рис. 7, найбільша відмінність магнітних полів по лініях Fe I 6301.5 і 6302.5 Å виявлена саме у сейсмічному джерелі спалаху, тоді як за його межами магнітні поля по цих лініях добре співпадають між собою. Ці дані в цілому узгоджуються з наведеними вище на рис. 2, але вони унікальні у тому відношенні, що стосується розташування сейсмічного джерела. Як відомо авторам статті, у науковій літературі немає аналогів цьому результату. Крім того, згідно рис. 7 відношення  $B_{\text{eff}}(6302.5) / B_{\text{eff}}(6301.5) \approx 2$  для  $L = 16\text{--}17$  Мм, що на рис. 2 відповідає деякому екстремальному значенню, яке виходить за межі розподілу для сонячних спалахів менших балів. Таким чином, отримані дані підтверджують, що в області сейсмічного джерела існувало деяке аномальне збурення магнітного поля, очевидно, з тісним контактом магнітних полів протилежних полярностей. По суті, це могло створювати фізичні умови для магнітного пересполучення силових ліній вже на фотосферному рівні, хоча, на думку Косовічева [5], ймовірна причина виникнення самого явища сейсмічного джерела – удар по фотосфері пучків протонів з більш високих шарів атмосфери, де і відбувається в дійсності магнітне пересполучення під час спалахів.

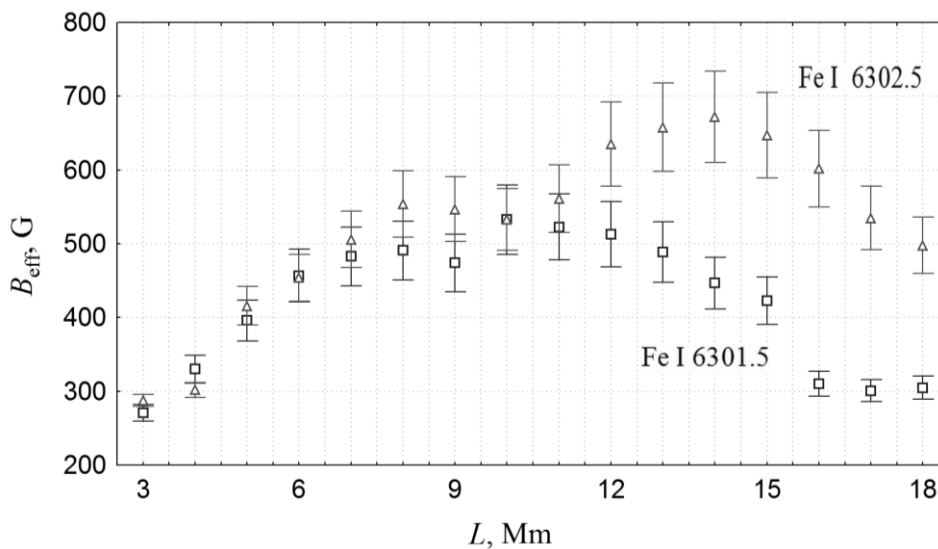


Рис. 7. Розподіл уздовж напрямку вхідної щілини спектрографа ефективного магнітного поля  $B_{\text{eff}}$ , виміряного в лініях Fe I 6301.5 і Fe I 6302.5 Å. Можна бачити, що суттєва відмінність магнітних полів по цих лініях спостерігалась для  $L = 12\text{--}20$ , де саме і було сейсмічне джерело у спалаху

Отже, як показано вище, одночасні вимірювання магнітних полів у лініях Fe I 6301.5 та Fe I 6302.5 Å можуть дати цінну інформацію про субтелескопічну структуру магнітного поля в області сонячних спалахів. З погляду прогнозування спалахів, важливо встановити, де і коли виникає на Сонці ситуація за межами тіней сонячних плям, коли виміряне магнітне поле по лінії Fe I 6302.5 є більшим, ніж по лінії Fe I 6301.5 Å. Про це можна дізнатися не тільки на основі спектрально-поляризаційних вимірювань, аналогічних описаним вище, але і за допомогою, наприклад, орбітального магнітографа обсерваторії Hinode, який вимірює магнітні поля у 10 різних спектральних лініях, включаючи лінії Fe I 6301.5 та Fe I 6302.5 Å. Для цього, очевидно, необхідно проводити регулярний моніторинг активних областей у двох указаних спектральних лініях. Можна сподіватися, що саме такі вимірювання дозволять отримати ту діагностично важливу інформацію, яка необхідна для надійнішого прогнозування часу і місця виникнення сонячних спалахів.

**Висновки.** На основі розгляду спостережних даних аргументовано висновок про те, що прогнозування сонячних спалахів можна покращити завдяки врахуванню нового параметра, який знаходять із порівняння виміряних магнітних полів у лініях Fe I 6301.5 і Fe I 6302.5 Å. Відповідний критерій є дуже простим: у місцях сонячних спалахів за межами тіней сонячних плям має спостерігатись таке інверсне співвідношення виміряних напруженостей:  $B_{\text{obs}}(6301.5) < B_{\text{obs}}(6302.5)$ , тоді як за межами спалахів спостерігається переважно  $B_{\text{obs}}(6301.5) > B_{\text{obs}}(6302.5)$ . Очевидно, у спалахах це пов'язано з тим, що там на фотосферному рівні відбувається просторово нероздільний контакт силових трубок із "кілогаусовими" полями і фонового поля, які мають протилежні магнітні полярності. Прямі спостережні вказівки на особливо сильні поля протилежної полярності у спалахах знайдено у далеких крилах лінії Fe I 6173.3 Å. Нові унікальні спостережні дані, які стосуються області сейсмічного джерела у винятково потужному сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2/4В, свідчать про те, що вказане вище інверсне співвідношення напруженостей є найсуттєвішим саме в області цього джерела. Запропоновано нову ідею щодо надійнішого прогно-

зування сонячних спалахів, яка зводиться до того, що нову актуальну інформацію для прогнозування слід отримувати з моніторингу спостережних даних у лініях FeI 6301.5 і FeI 6302.5 Å.

### Подяка

Автори вдячні невідомому рецензенту за слушні зауваження, які були враховані під час доопрацювання статті. Це дослідження профінансовано Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 22БФ023-03.

### Список використаних джерел

1. Babcock H. W. The solar magnetograph // *Astrophys. J.* – 1953. – Vol. 118. – P. 387–396.
2. Botygina O., Gordovskyy M., Lozitsky V. Investigation of spatially unresolved magnetic field outside sunspots using Hinode/SOT observations // *Proc. of the Intern. Astronomical Union.* – 2017. – Vol. 325. – P. 59–62.
3. Cerdena D., Almeida J. S., Kneer F. Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 407. – P. 741–757.
4. Gopasyuk S. I., Kotov V. A., Severny A. B., Tsap T. T. The comparison of the magnetographic magnetic field measured in different spectral lines // *Solar Phys.* – 1973. – Vol. 31., No. 2. – P. 307–316.
5. Kosovichev A., 2015, Sunquakes: Helioseismic response to solar flares, in: V. Tong & R. Garcia (Eds.), *Extraterrestrial Seismology* (pp. 306–322), Cambridge: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107300668.025
6. Kosovichev A. G. The cause of sunquakes: electrons or protons? // *Bulletin of the American Astronomical Society.* – 2007. – Vol. 39. – p. 215.
7. Курочка Е. В., Курочка Л. Н., Лоцицкий В. Г., Лоцицкая 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.
8. Лоцицкая Н. И., Лоцицкий В. Г. Существуют ли "магнитные транзиенты" в солнечных вспышках? // *Письма в Астрон. ж-л.* – 1982. – Т. 8., № 8. – С. 500–505.
9. Лоцицкий В. Г. О калибровке магнитографических измерений с учетом пространственно неразрешимых неоднородностей // *Physica Solariter., Potsdam.* – 1980. – No. 14. – P. 88–94.
10. Лоцицкий 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.
11. Lozitsky V. G., Baranovsky E. A., Lozitska N. I., Tarashchuk V. P. Profiles of spectral lines, magnetic fields and thermodynamical conditions in X17.2/4B solar flare of October 28, 2003 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2018. – Vol. 477., Iss. 2. – P. 2796–2803.
12. Лоцицкий В. Г., Лоцицкий В. В. Спектрально-поляризационні вимірювання магнітних полів у сонячних спалахах методом відношення ліній // *Вісник Київський ун-т ім. Т. Шевченка. Астрономія.* 2005. – Vol. 41 – 42. – P. 7–12.
13. Lozitsky V. G., Staude J. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // *J. Astrophys. Astron.* – 2008. – Vol. 29. – P. 387–404.
14. Лоцицкий В. Г., Цап Т. Т. Эмпирическая модель мелкомасштабного магнитного элемента спокойной области Солнца // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1989. – Т. 5, № 1. – С. 50–58).
15. Рачковский Д. Н., Цап Т. Т. Изучение магнитных полей методом отношения измеренных напряженностей в линиях вне активных областей // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.* – 1985. – Т. 71. – С. 79–87).
16. Rachkovsky D. N., Tsap T. T., Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods. *J. Astrophys. Astron.* – 2005. – Vol. 26. – P. 435–445.
17. Северный А. Б. Некоторые проблемы физики Солнца. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
18. Stenflo J. O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun // *Astronomy & Astrophysics.* – 2011. – Vol. 529., id.A42, 20 pp.
19. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network // *Solar Physics.* – 1973. – Vol. 32., No 1. – P. 41–63.
20. Wiehr E. A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions // *Astron. and Astrophys.* – 1978. – Vol. 69., No 2. – P. 279–284.
21. Zharkova V. V., Zharkov S. I. On the origin of three seismic sources in the proton-rich flare of 2003 October 28 // *The Astrophys. Journ.* – 2007. – Vol. 664., Issue 1, P. 573–585.

### References

1. Babcock H. W. The solar magnetograph // *Astrophys. J.* – 1953. – Vol. 118. – P. 387–396.
2. Botygina O., Gordovskyy M., Lozitsky V. Investigation of spatially unresolved magnetic field outside sunspots using Hinode/SOT observations // *Proc. of the Intern. Astronomical Union.* – 2017. – Vol. 325. – P. 59–62.
3. Cerdena D., Almeida J. S., Kneer F. Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 407. – P. 741–757.
4. Gopasyuk S. I., Kotov V. A., Severny A. B., Tsap T. T. The comparison of the magnetographic magnetic field measured in different spectral lines // *Solar Phys.* – 1973. – Vol. 31., No. 2. – P. 307–316.
5. Kosovichev A., 2015, Sunquakes: Helioseismic response to solar flares, in: V. Tong & R. Garcia (Eds.), *Extraterrestrial Seismology* (pp. 306–322), Cambridge: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107300668.025
6. Kosovichev A. G. The cause of sunquakes: electrons or protons? // *Bulletin of the American Astronomical Society.* – 2007. – Vol. 39. – p. 215.
7. Kurochka V. V., Kurochka L. N., Lozitsky V. G., Lozitska N. I. et al. Horizontal solar telescope of Astronomical Observatory of Kyiv University // *Vestnik Kiev. Univ. Astronomija.* – 1980. – Vol. 22. – P. 48–56.
8. Lozitska N. I., Lozitsky V. G. Do 'magnetic transients' exist in solar flares? // *Pis'ma v Astron. Journ.* – 1982. – Vol. 8., No.8. P. 500–505.
9. Lozitsky V. G. On calibration of magnetographic measurements taking into account the spatially unresolved inhomogeneities // *Physica Solariter., Potsdam.* – 1980. – No. 14. – P. 88–94.
10. Lozitsky V. G. Strong magnetic fields in small-scale structures and flares on the Sun // *Dr Sci Dissertation: 01.03.03.* Kiev. 2003. – 299 p.
11. Lozitsky V. G., Baranovsky E. A., Lozitska N. I., Tarashchuk V. P. Profiles of spectral lines, magnetic fields and thermodynamical conditions in X17.2/4B solar flare of October 28, 2003 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2018. – Vol. 477., Iss. 2. – P. 2796–2803.
12. Lozitsky V. G., Lozitsky V. V. Spectral-polarized measurements of magnetic fields in solar flares using 'line ratio' method // *Visnyk of Kyiv Univ. of T. Shevchenko. Astronomija.* – 2005. – Vol. 41-42. – P. 7–12.
13. Lozitsky V. G., Staude J. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // *J. Astrophys. Astron.* – 2008. – Vol. 29. – P. 387–404.
14. Lozitsky V. G., Tsap T. T. Empirical model of small-scale magnetic element of a quiet region of the Sun // *Kinematika I Fizika Nebesnykh Tel.* – 1989. – Vol. 5., No. 1. – P. 50–58.
15. Rachkovsky D. N., Tsap T. T. Study of magnetic fields using a method of measured strength ratio in lines outside active regions // *Izvestiya of Krim. Astrofiz. Observatory.* – 1985. – Vol. 71. – P. 79–87.
16. Rachkovsky D. N., Tsap T. T., Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods. *J. Astrophys. Astron.* – 2005. – Vol. 26. – P. 435–445.
17. Severny A. B. Some problem of solar physics. – Moscow: Nauka, 1988. – 224 p.
18. Stenflo J. O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun // *Astronomy & Astrophysics.* – 2011. – Vol. 529., id.A42, 20 pp.
19. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network // *Solar Physics.* – 1973. – Vol. 32., No 1. – P. 41–63.
20. Wiehr E. A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions // *Astron. and Astrophys.* – 1978. – Vol. 69., No 2. – P. 279–284.
21. Zharkova V. V., Zharkov S. I. On the origin of three seismic sources in the proton-rich flare of 2003 October 28 // *The Astrophys. Journ.* – 2007. – Vol. 664., Issue 1, P. 573–585.

Надійшла до редколегії 19.11.22

N. Lozitska, PhD,  
V. Lozitsky, Dr Hab.  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### THE LINE RATIO METHOD AS A POSSIBLE TOOL FOR MORE RELIABLE FORECASTING SOLAR FLASHES

*Already published and new observational data are given, which indicate that in the regions of solar flares there is a significant difference in the sub-telescopic structure of the magnetic field, which is absent in non-flare regions. In particular, the magnetic fields by the FeI 6301.5 and FeI 6302.5 Å lines measured in flares outside sunspot umbra have an inverse ratio of  $B_{\text{obs}}(6301.5) < B_{\text{obs}}(6302.5)$ , while without flares it is mostly  $B_{\text{obs}}(6301.5) > B_{\text{obs}}(6302.5)$ . The conclusion is argued that in flares this is due to the fact that at the photospheric level there is a spatially unresolved contact of flux tubes with "kilogauss" fields and the weaker background field, which have opposite magnetic polarities. Direct observational indications of particularly strong fields of opposite polarity are found in the far wings of the FeI 6173.3 Å line. New unique observational data relating to the region of the seismic source in the exceptionally powerful solar flare of October 28, 2003 of X17.2/4B class indicate that the above inverse line ratio is most significant precisely in the region of this source. A new idea for more reliable forecasting of solar flares is proposed, which boils down to the fact that new relevant information for forecasting should be obtained from monitoring observational data in the FeI 6301.5 and FeI 6302.5 Å lines.*

*Keywords: Sun, solar activity, solar flares, magnetic fields, line ratio method, forecast of solar flares.*