

УДК 523.98 + 52-337

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2023.68.57-62>

Іван ЯКОВКИН, асп.

ORCID ID: 0000-0003-1563-8528

e-mail: yakovkinii@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Наталія ЛОЗИЦЬКА, канд. фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0002-7005-646X

e-mail: nloz@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Всеволод ЛОЗИЦЬКИЙ, д-р фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0002-6895-5271

e-mail: vsevolod.lozitsky@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПРИХОВАНІ ПРОЯВИ ЕФЕКТУ ПАШЕНА – БАКА В ЛІНІЯХ D1 і D2 У СПЕКТРІ СОНЯЧНОЇ ПЛЯМИ БЕЗ СПАЛАХІВ

Вступ. Нині домінує уявлення, що для вимірювання магнітних полів у активних процесах на Сонці варто враховувати ефект Пашена – Бака лише тоді, коли напруженість магнітного поля є дуже великою – значно більшою, ніж у сонячних плямах. Насправді це залежить від спектральної лінії, обраної для вимірювання магнітного розщеплення, точніше, від величини мультиплетного розщеплення у відповідному атомі. Важливо перевірити на основі безпосередніх вимірювань, чи виникають ефекти Пашена – Бака в лініях D1 і D2 NaI, за якими можна вимірювати магнітні поля у хромосфері.

Методи. Використано спектрально-поляризаційний метод, який ґрунтується на прямих вимірюваннях магнітних розщеплень на регістрограмах спектрів сонячної плями, отриманих в ортогональних кругових поляризаціях. Основна ідея дослідження полягала в тому, щоб виявити приховані прояви ефекту Пашена – Бака, які виникають у разі відносно невеликого магнітного розщеплення ліній – коли це розщеплення значно менше за спектральну півширину. Для цього виміряні розщеплення калібрували двоюко: у припущенні LS зв'язку і для випадку ефекту Пашена – Бака.

Результати. Наведено результати вимірювань магнітних розщеплень ліній D1, D2 і NiI 5892,9 Å у спектрі сонячної плями 24 липня 2023 р., в якій на момент спостережень не було сонячних спалахів. Спостережений матеріал отримано на ешеліному спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Знайдено, що в деяких місцях сонячної плями розщеплення вказаних ліній є практично однаковими, а в інших – достовірно відрізняються. Якщо припустити, що ці фактори відповідають LS зв'язку для всіх ліній, то маємо таку суперечність: фотосферна лінія NiI 5892,9 Å показує магнітне поле, проміжне за величиною між лініями D1 і D2. Фізично це нереально в однорідному магнітному полі; якщо ж магнітне поле послаблюється з висотою, то лінія нікелю має показувати сильніше поле, ніж обидві лінії натрію. Реалістичніші оцінки магнітного поля отримано за емпіричних факторів Ланде для ліній D1 і D2, що відповідають ефекту Пашена – Бака в цих лініях.

Висновки. Емпірично підтверджено, що ефект Пашена – Бака діє в лініях D1 і D2 при напруженостях у діапазоні 500–1400 Гс. Із спостережень виявлено ще одну особливість: лінія D2 з меншим фактором Ланде ($g_{\text{ефр}} = 1,22$) показує у деяких місцях плями сильніше виміряне магнітне поле, ніж лінія D1 з більшим фактором Ланде ($g_{\text{ефр}} = 1,36$). Це можливо тоді, коли локальні магнітні поля у дослідженій плямі значно сильніші, ніж у разі прямих вимірювань. Оцінювання таких полів можна здійснити на основі моделювання в межах багатокomпонентних моделей, що планується зробити в наступному дослідженні.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, сонячні плями, магнітні поля, вимірювання по лініях NaI та NiI, ефект Пашена – Бака.

Вступ

Сонячні плями – добре видимі прояви сонячної активності з повільною еволюцією і тривалим часом існування. Їхній діаметр у межах від кількох до 150 мегаметрів (Мм), що набагато більше, ніж межа просторового розділення сучасних сонячних телескопів (0,03–0,1 Мм). Саме тому вони є досить зручними об'єктами для спостережень і вимірювань у них магнітного поля. З'ясовано, що сонячні плями можуть мати різну магнітну поляриність і напруженість магнітного поля в межах, зазвичай, 2000–3000 Гс, і дуже зрідка 4000–8000 Гс (Solanki, 2003; Durán et al. 2020).

У розвинених плямах із тінню й півтінню напруженість магнітного поля, в середньому, зростає зі збільшенням розміру плями. Саме в тінях сонячних плям можна безпосередньо виміряти важливу характеристику магнітного поля – модуль (абсолютну величину) вектора напруженості. Така можливість може бути реалізована завдяки тому, що за магнітних полів у 2–3 кГс і більше зеєманівське розщеплення $\Delta\lambda_n$ є повним у деяких вузьких ліній нейтрального заліза FeI з півшириною близько 0,1 Å і великими факторами Ланде ($g = 2,5\text{--}3$), тобто у цьому разі повністю спектрально розділяються зеєманівські π - і σ -компоненти. Регулярні вимірювання напруженостей у тіні сонячних плям ведуть візуальним методом за незмінною методикою уже близько 100 років. Останніми десятиліттями такі вимірювання регулярно проводились у п'яти обсерваторіях світу – Маунт-Вілсон (до 2022 р.), Кітт Пік (до 2017 р.), і донині в АО КНУ, КрАО й обсерваторії Уральського університету. Цінність таких даних полягає в неперервному комбінованому ряді вимірювань, надійності й досить високій точності. Регулярні магнітографічні вимірювання фотосфери Сонця розпочаті на орбітальній обсерваторії SOHO з 1995 р., з 2010 р. продовжені Solar Dynamic Observatory, але вони дають наближено лише поздовжню компоненту вектора напруженості, а не його абсолютну величину. Крім того, магнітографічні вимірювання не дозволяють точно визначити величину магнітного поля в ядрі сонячної плями. Щодо візуальних вимірювань, то в разі накопичення великих масивів однорідних даних та узагальнення даних із різних обсерваторій можна обчислити відповідні магнітні індекси сонячних плям (зокрема, B_{SP}) з точністю близько 10 Гс або 4×10^{-3} у відносних одиницях. Така точність, формально, можлива і за магнітографічних даних, але в цьому ви-

© Яковкін Іван, Лоцицька Наталія, Лоцицький Всеволод, 2023

падку втрачається фізичний зміст відповідної спостереженої характеристики. Адже тоді визначається деякий параметр, залежний від величини магнітного поля, нахилу його силових ліній до променя зору, фактора заповнення тощо. Водночас у процесі зведення в єдиний ряд вимірювань у різних обсерваторіях виникають певні методичні проблеми, які детально розглянуто в роботі (Lozitska et al., 2015).

Сонячні плями, як і інші прояви активності на Сонці, мають дуже тонку структуру магнітних полів і швидкостей. Найвиразніше цю структуру можна бачити в північній сонячній плямі. Найменші елементи цієї структури, імовірно, просторово не розділяються і саме в них можуть існувати особливо сильні магнітні поля. Їх можна виявити, детально аналізуючи тонкі фотометричні ефекти в зєєманівському розщепленні спектральних ліній.

Магнітні поля сонячних плям на рівні хромосфери вивчено значно гірше, ніж на рівні фотосфери. Серед тих ліній, які формуються у хромосфері, немає вузьких спектральних ліній, а також ліній, що мають великі фактори Ланде. Із цієї причини у хромосферних лініях за магнітних полів у декілька кілогаусів спостерігається лише неповне розщеплення, за яким можна виміряти не модуль напруженості магнітного поля B , а (в кращому випадку) лише його поздовжню компоненту B_{los} . Незважаючи на це, навіть такі вимірювання можуть бути цінними для хромосфери, у якій, як нині відомо, виділяється значна частина енергії сонячних спалахів.

Метою представленої роботи було отримання нових даних про магнітні поля у сонячній плямі на рівні хромосфери, з використанням вимірювань у лініях D1 і D2 NaI і порівнянням їх із вимірюваннями у фотосферній лінії NiI 5892.9 Å.

Методи

Використано спектрально-поляризаційний метод, який ґрунтується на прямих вимірюваннях магнітних розщеплень на реєстрограмах спектрів сонячної плями, отриманих в ортогональних кругових поляризаціях. Основна ідея дослідження полягала в тому, щоб виявити приховані прояви ефекту Пашена – Бака, які виникають при відносно невеликому магнітному розщепленні ліній – коли воно значно менше за спектральну півширину. Для цього виміряні розщеплення калібрували двома: у припущенні LS зв'язку і для випадку ефекту Пашена – Бака.

Вказані вище спектральні лінії вивчалися у великій сонячній плямі активної області NOAA 3379. Ця пляма у день спостережень, 24 липня 2023 р., мала діаметр 35 Мм і розміщувалась недалеко від центра диска Сонця – її геліоцентричний кут становив близько 18° . Спектр цієї плями сфотографовано В. Г. Лозицьким на ешельному спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Lozitsky, & Staude, 2008). У спостереженнях використано аналізатор кругової (циркулярної) поляризації. Початок експозиції у процесі фотографування спектра плями був о 7:29:40 UT, тривалість експозиції становила 30 с. Спектр сфотографовано на фотоплатівку ORWO WP3. За даними візуальних вимірювань магнітного поля в ядрі цієї плями, виконаними в той самий день у лінії FeI 5250,2 ($g = 3,0$), напруженість магнітного поля в цій плямі досягала 2660 Гс, а полярність поля була північною (N).

Варто відмітити, що можливість вибору нових спектральних ліній для дослідження магнітних полів в активних процесах на Сонці забезпечується конструктивними особливостями ешельного спектрографа ГСТ АО КНУ. На ньому одночасно реєструють широкий діапазон спектра, від 3800 до 6600 Å, де можна спостерігати багато тисяч спектральних ліній (Куручка і др., 1980). Ще одна перевага таких спостережень полягає в тому, що спектри $I + V$ і $I - V$ отримують одночасно, на окремих суміжних смугах спектрограм. Це реалізується завдяки тому, що аналізатор кругової поляризації складається з фазової пластини $\lambda/4$ перед вхідною щілиною спектрографа і призми-розщеплювача (аналога призми Волластона) – позаду вхідної щілини. Тому спектри $I + V$ і $I - V$ стосуються того самого моменту часу і тих самих місць на Сонці.

Для того порядку дифракції, де розташовані лінії D1 і D2 ($m = 35$), спектральна роздільна здатність на інструменті (тобто FWHM) становить 50 мÅ, просторова роздільна здатність – близько 1,5–2 Мм. Спосіб реєстрації спектрів – фотографічний, на платівки WP3 ORWO великого розміру – 18×24 або 24×24 см. Відношення сигнал/шум для таких фотоемульсій становить приблизно 100 за умови нормальної експозиції. Завдяки великій площі можна одночасно реєструвати спектр практично всієї видимої області з досить високою дисперсією, 0,4–0,8 Å/мм. Якщо ж використовувати для цього типові ПЗЗ-матриці, то можна було б одночасно зареєструвати лише невелику частину (приблизно 1 %) того спектра, який фіксується на фотоплатівках.

Лінії дублету натрію NaI мають довжини хвиль 5895,923 Å (D1) і 5889,953 Å (D2). У них однакові потенціали збудження нижнього терму (0,00 eV) і близькі еквівалентні ширини у спектрі спокійного Сонця, які дорівнюють 564 і 752 мÅ, відповідно (Moore et al, 1966). Обидві лінії формуються у хромосфері, яка, як відомо, простягається на висоті від 500 до 2000 км над рівнем $\tau_c = 1$. Фактори Ланде цих ліній для випадку спин-орбітальної взаємодії (LS зв'язку в атомі) дорівнюють $4/3$ і $3/4$, відповідно.

Щодо фотосферної лінії NiI 5892,883 Å, то в неї потенціал збудження нижнього терму 1,99 електрон-вольт (eV), еквівалентна ширина 66 мÅ, а фактор Ланде для LS зв'язку дорівнює 1,00. Навколо всіх трьох указаних ліній у спектрі багато вузьких телуричних ліній молекулярної води H₂O, які зручно використовувати як спектральні репери, що мають однакову довжину хвилі у спектрах $I + V$ та $I - V$.

Вимірювання в лініях D1 і D2 привабливі також тим, що їх можна, у принципі, можна використовувати в методі "відношення ліній" (Stenflo, 1973; Wiehr, 1978; Рачковский, & Цап, 1985; Cerdana et al., 2003). для оцінювання локальних магнітних полів навіть у тому випадку, коли такі поля є просторово нероздільними (субтелескопічними). Суть цього методу зводиться до того, що фактичні напруженості магнітного поля B_{true} в таких структурах (дуже тонких силових трубках, названих fluxtubes) можна оцінити порівнянням виміряних напруженостей B_{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 повинні формуватись на однаковій висоті в атмосфері Сонця і змінюватись однаково за переходу до областей на Сонці з іншою температурою. Формально вказані лінії можна розглядати як ту саму магніточутливу лінію, яка має два різні значення (моди) фактора Ланде g . У такому разі, теоретично, вимірювання по лінії з меншим фактором Ланде мають краще відповідати режиму слабого магнітного поля, коли сигнал магнітографа (Vabcock, 1953) строго пропорційний дійсному зєєманівському розщепленню $\Delta\lambda_n$. Однак для тієї лінії, що має більший фактор Ланде, відхилення від вказаної пропорційності має бути суттєві-

шим, якщо справжні магнітні поля на Сонці настільки сильні, що зееманівське розщеплення $\Delta\lambda_n$ є близьким до спектральної ширини лінії $\Delta\lambda_{1/2}$ або ж навіть більше за неї. Це відхилення від пропорційності називається "насиченням" сигналу магнітографа і спостерігається у сонячних плямах за напруженості магнітного поля, що більша за 1000 Гс. Фізична причина цього ефекту дуже проста: у сильних магнітних полях зееманівські сигма-компоненти розщеплюються настільки сильно, що частково виходять за межі щілин фотометра магнітографа, який реєструє величину сигналу поляризації внаслідок ефекту Зеемана. Якщо на Сонці існують дуже тонкі просторово нероздільні силові трубки з тими самими сильними полями, як у сонячних плямах, то тоді порівняння вимірних напруженостей B_{obs} у двох вказаних лініях має давати такий результат: лінія з більшим фактором Ланде повинна давати менше виміряне 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 реальна напруженість B_{true} магнітного поля у просторово нероздільних (субтелескопічних) силових трубках. Порівнявши виміряні напруженості B_{obs} у лініях з різними факторами Ланде, на основі модельних розрахунків можна оцінити фактичні напруженості у субтелескопічних силових трубках. Аналогічна можливість існує і тоді, коли величини B_{obs} знайдені не з магнітографічних вимірювань, а із спектрально-поляризаційних, які дають змогу оцінити справжню напруженість магнітного поля за величиною каліброваної амплітуди параметра Стокса V або ж за зміщенням "центрів ваги" профілів $I \pm V$.

Важливо зазначити, що до цього часу метод "відношення ліній" використовувався для оцінювання локальних магнітних полів лише у фотосфері. Для хромосфери цей метод не застосовували через те, що хромосферні лінії є досить широкими – значно ширшими за фотосферні лінії. Наприклад, спектральна ширина ліній D1 і D2 у спектрі фотосфери приблизно 400 мÅ (http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php), тоді як ширина ліній типу FeI 5250,2 – близько 100 мÅ. Щоб указаний вище ефект спектрального "насичення" діяв для випадку цих ліній, зееманівське розщеплення $\Delta\lambda_n$ для D1 і D2 має бути не менше 200 мÅ, тоді як для ліній типу 5250,2 – не менше 50 мÅ. Враховуючи цю обставину, а також фактори Ланде цих ліній, можна очікувати, що по лініях D1 і D2 не повинно бути ефекту "насичення" за магнітних полів напруженістю 2–3 кГс, типових для сонячних плям. Навпаки, цей ефект має спостерігатися за таких полів у лініях типу FeI 5250,2. Саме це неодноразово відмічено спостереженнями (Stenflo, 1973, 2011; Wiehr, 1978; Cerdana, Almeida, & Kneer, 2003). Ситуація щодо D1 і D2 може бути іншою, якщо локальні магнітні поля у хромосфері значно сильніші, наприклад, близько 10 кГс.

Для отримання кількісних характеристик інтенсивностей у спектрі, досліджена спектрограма була просканована сканером Erson Perfection V 550, який дозволяє отримати двовимірні скани зображень, записаних на прозорі плівки або фотоплатівки. Щоб перевести почорніння на інтенсивності, необхідно враховувати як характеристичну криву фотоматеріалу, так і криву самого сканера. Обидві криві є нелінійними і потребують попереднього визначення спеціальними методами. Для цього використовували ступінчастий послаблювач (атенюатор), для якого точно відомі коефіцієнти пропускання. Для перерахунку фотометричних почорнінь на інтенсивності розсіяне світло в спектрографі враховували за допомогою віднімання інтенсивностей, що відповідають проміжкам між зображеннями різних порядків спектра ешельного спектрографа. Процес первинного опрацювання спостережених даних описано в роботі (Yakovkin, & Lozitsky, 2022).

Результати

Для вимірювання зееманівських розщеплень використовували лише "чисті" ділянки профілів ліній, де немає впливу сусідніх ліній (бленд). Наприклад, для лінії D1 це ділянки на рівні інтенсивності близько 0,2 (рис. 1); приблизно на тому самому рівні вимірювали розщеплення і в лінії D2. Щодо лінії NiI 5892,883 Å, то відповідний рівень був у межах 0,35–0,4.

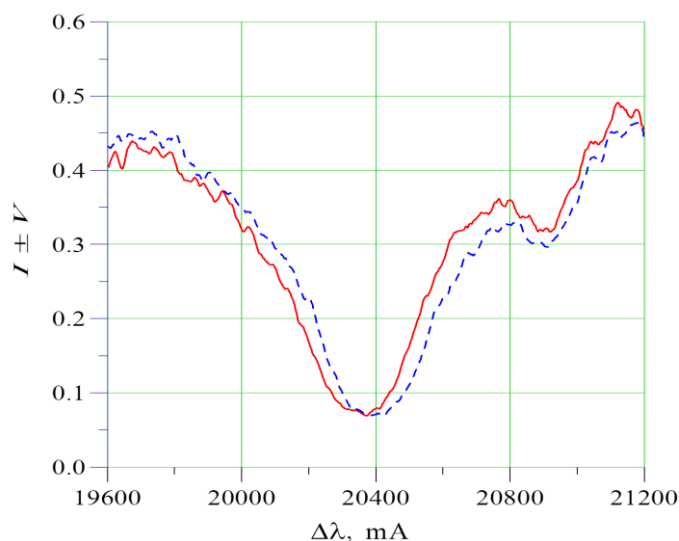


Рис. 1. Профілі $I \pm V$ лінії D1 у фотометричному розрізі № 12, який відповідає $L = 12$ Мм на рис. 2–4. На цьому рисунку нуль-пункт на осі абсцис відповідає лінії D3 HeI, $\lambda = 5875.6$ Å

Вимірювання розщеплень у міліангстремах (рис. 2) показало, що в одних місцях плями (напр., при $L = 4$ –6, 12–14 Мм) ці розщеплення добре збігаються, в інших місцях – достовірно відрізняються ($L = 8$ –10 Мм). Це свідчить про суттєву

неоднорідність магнітного поля у плямі, адже за однорідного поля ці розщеплення мали б відрізнятися скрізь на однакову величину, тобто їхнє відношення мало б дорівнювати відношенню факторів Ланде цих ліній.

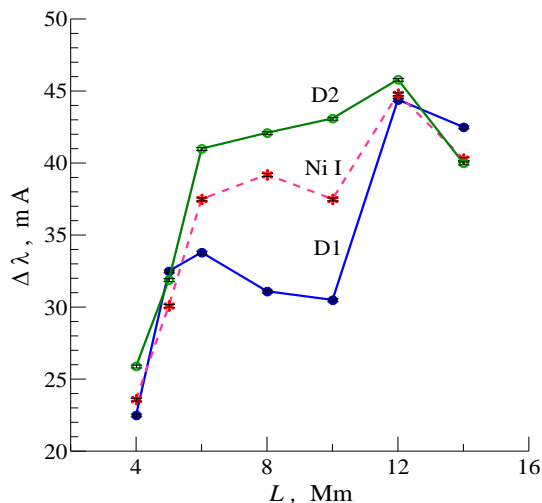


Рис. 2. Зіставлення вимірних розщеплень $\Delta\lambda$, мА, досліджених ліній для різних місць сонячної плями. На горизонтальній осі відкладено віддалі на Сонці в мегаметрах, Мм

Якщо припустити, що вимірне розщеплення ліній $\Delta\lambda$ дорівнює їхньому подвоєному зєсманівському розщепленню $\Delta\lambda_n$, то за теоретичних факторів Ланде, що відповідають LS зв'язку, маємо картину, зображену на рис. 3. Ця картина здається нереалістичною тому, що фотосферна лінія NiI показує магнітне поле, проміжне між лініями D1 і D2. Якби поле було однорідним, то всі лінії показували б однакове магнітне поле для цього місця в сонячній плямі. Навіть якщо магнітне поле у плямі є неоднорідним, у формі багатьох дискретних силових трубок, то в тіні плями ці трубки, імовірно, настільки тісно притиснуті одна до одної, що фактор заповнення є близьким до одиниці (Solanki, 2003). У спектрально-поляризаційних спостереженнях, подібних до наших, це давало б ефект квазіоднорідного магнітного поля. Однак, якщо таке поле спадало б із висотою, то тоді обидві хромосферні лінії, D1 і D2, давали б меншу виміряну напруженість, ніж лінія нікелю. Як видно з рис. 3, такого немає, а це може означати, що деякі фактори Ланде цих ліній є неправильними.

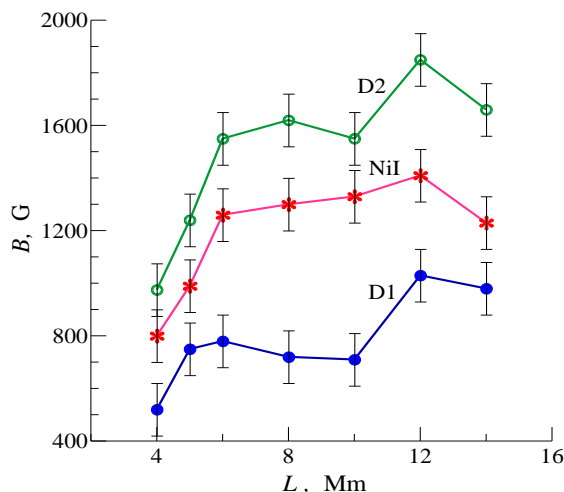


Рис. 3. Порівняння вимірних напруженостей магнітного поля для різних місць сонячної плями у припущенні, що фактори Ланде всіх ліній відповідають теоретичним для LS зв'язку

З експериментальних робіт (Banasek et al., 2003; Hori et al., 1982), в яких досліджувалось розщеплення ліній D1 і D2 в дуже сильних магнітних полях (до 600 кГс), коли в цих лініях виникає ефект Пашена – Бака, впливає такий висновок. За дії цього ефекту дійсні фактори Ланде цих ліній вже є іншими, а саме: 1,36 для лінії D1 і 1,22 для лінії D2. Якщо прокалібрувати вимірні розщеплення (рис. 2) із саме такими факторами Ланде, то маємо картину, зображену на рис. 4. Видно, що фотосферна лінія нікелю показує скрізь сильніше магнітне поле, ніж обидві лінії натрію. Це цілком очікуваний результат, який відображає від'ємний висотний градієнт у плямі. Враховуючи, що відмінність напруженостей по лініях нікелю і натрію, згідно з рис. 4, перебуває в межах 300–600 Гс, а висоти формування цих ліній відрізняються приблизно на 1000 км, отримуємо висотний градієнт на рівні $-(0,3 \div 0,6)$ Гс/км, що є типовим значенням для тих сонячних плям, у яких не було спалахів (Solanki, 2003; Priest, 2014).

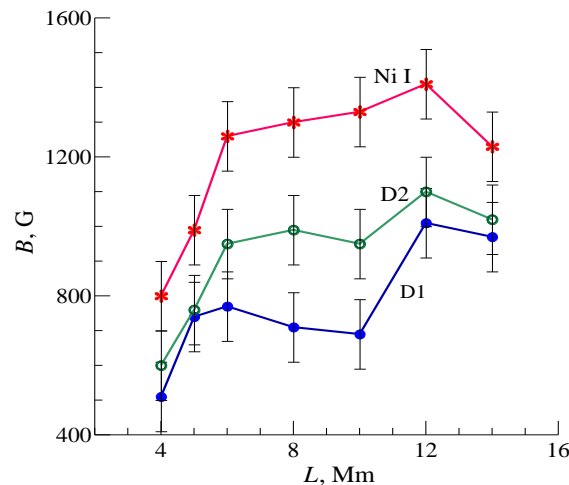


Рис. 4. Зіставлення вимірних напруженостей магнітного поля для різних місць сонячної плями у припущенні, що фактори Ланде ліній D1 і D2 відповідають емпіричним, визначеним за дії ефекту Пашена – Бака

Однак з рис. 4 видно ще один цікавий ефект: лінія D2 у деяких місцях плями ($L = 8\text{--}10$ Мм) показує сильніше магнітне поле, ніж лінія D1. Враховуючи, що згідно з лабораторними вимірюваннями фактор Ланде у лінії D2 є меншим (1,22), ніж у лінії D1 (1,36), то це може відображати, як пояснено вище, ефект магнітного "насичення" внаслідок наявності у плямі особливо сильних субтелескопічних магнітних полів. У цьому разі, до вимірювань у вказаних хромосферних лініях можна застосувати метод "відношення ліній", щоб оцінити локальні магнітні поля подібно до того, як це зроблено у роботах (Stenflo, 1973, 2011; Wiehr, 1978; Cerdena et al., 2003), але по фотосферних лініях. Відповідне дослідження, яке вимагає моделювання профілів ліній, може бути зроблено в окремій роботі.

Дискусія і висновки

Емпірично підтверджено, що ефект Пашена – Бака діє в лініях D1 і D2 за напружень у діапазоні 500–1400 Гс. У дослідженні магнітного поля в сонячній плямі 24 липня 2023 р. по лініях D1, D2 і Ni I 5892,9 виявлено таку ознаку неоднорідності магнітного поля: фотосферна лінія Ni I показує на 300–600 Гс вищі напруженості магнітного поля, ніж хромосферні лінії D1 і D2. Це вказує на від'ємний висотний градієнт магнітного поля на рівні приблизно $-(0,3\div 0,6)$ Гс/км, оскільки висоти формування цих ліній відрізняються приблизно на 1000 км. Такий градієнт є типовим для сонячних плям без сонячних спалахів.

Виявлено також таку ознаку неоднорідності магнітного поля у горизонтальному напрямку: лінія D2, яка має менший фактор Ланде ($g_{\text{emp}} = 1,22$), показує сильніше магнітне поле, ніж лінія D1 із більшим фактором Ланде ($g_{\text{emp}} = 1,36$). Це можливо тоді, коли локальні магнітні поля в дослідженій плямі були значно сильнішими, ніж показують прямі вимірювання. Оцінювання локальних магнітних полів може бути здійснено на основі моделювання методом "відношення ліній".

Внесок авторів: Іван Яковкін – програмне забезпечення, методологія; Наталія Лозицька – формальний аналіз, валідація даних, написання (перегляд і редагування); Всеволод Лозицький – концептуалізація, написання (оригінальна чернетка).

Подяки, джерела фінансування. Представлене дослідження профінансовано Міністерством освіти і науки в Україні, тема № 22БФ023-03.

Список використаних джерел

- Курочка, Е. В., Курочка, Л. Н., Лозицкий, В. Г., Лозицкая, Н. И., Остапенко, В. А., Попун, П. Н., & Россада, В. М. (1980). Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета. *Вестник Киевского университета. Серия. "Астрономия"*, 22, 48–56.
- Рачковский, Д. Н., Цап, Т. Т. (1985). Исследование магнитных полей методом отношения измеренных напряженностей в линиях вне активных областей. *Известия Крымской астрофизической обсерватории*, 71, 79–87.
- Babcock, H. W. (1953). The solar magnetograph. *The Astrophysical Journal*, 118, 387–396.
- Banasek, J. T., Engelbrecht, J. T., Piko, S. A., Shelkovenko, T. A., & Hammer, D. A. (2003). Measuring 10–20 T magnetic fields in single wire explosions using Zeeman splitting. *Review of Scientific Instruments*, 74, 103506. <https://doi.org/10.1063/1.4965836>.
- Cerdena, D., Almeida, J. S., & Kneer, F. (2003). Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution. *Astronomy and Astrophysics*, 407, 741–757.
- Durán, C. J. S., Lagg, A., Solanki, S. K., & van Noort, M. (2020). Detection of the strongest magnetic field in a sunspot light bridge. *The Astrophysical Journal*, 895(2), 129–146. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab83f1>.
- Hori, H., Miki, M., & Date, M. (1982). Paschen-Back effect in D-lines sodium under a high magnetic field. *Journal of the Physical Society of Japan*, 51(5), 1566–1570.
- Lozitska N. I., Lozitsky V. G., Andreyeva O. A., Akhtemov Z. S., Malashchuk V. M., Perebeynos V. A., Stepanyan N. N., & Shtertser N. I. (2015). Methodical problems of magnetic field measurements in umbra of sunspots. *Advances in Space Research*, 55(3), 897–907.
- Lozitsky V. G., & Staude J. (2008). Observational evidences for a multi-component magnetic field structure in solar flares. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 29, 387.
- Moore, Ch. E., Minnaert, M. G. J., & Houtgast, J. (1966). The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. *National Bureau of Standards, Washington: US Government Printing Office (USGPO)*. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1966sst..book.....M>.
- Priest, E. R. (2014). *Magnetohydrodynamics of the Sun*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020732>.
- Solanki, S. K. (2003). Sunspots: An overview. *Astronomy and Astrophysics Review*, 11, 153–286.
- Stenflo, J. O. (2011). Collapsed, uncanceled, and hidden magnetic flux on the quiet Sun. *Astronomy and Astrophysics*, 529, id. A42, 20 p.
- Stenflo, J. O. (1973). Magnetic-field structure of the photospheric network. *Solar Physics*, 321, 41–63.
- Wiehr, E. (1978). A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions. *Astronomy and Astrophysics*, 69(2), 279–284.
- Yakovkin I. I., & Lozitsky V. G. (2022). Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H α line. *Advances in Space Research*, 69, 4408–4418. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.012>.

References

- Babcock, H. W. (1953). The solar magnetograph. *The Astrophysical Journal*, 118, 387–396.
- Banasek, J. T., Engelbrecht, J. T., Piko, S. A., Shelkovenko, T. A., & Hammer D. A. (2003). Measuring 10–20 T magnetic fields in single wire explosions using Zeeman splitting. *Review of Scientific Instruments*, 74, 103506. <https://doi.org/10.1063/1.1496583>.
- Cerdena, D., Almeida, J. S., & Kneer, F. (2003). Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution. *Astronomy and Astrophysics*, 407, 741–757.
- Durán, C. J. S., Lagg A., Solanki, S. K., & van Noort, M. (2020). Detection of the strongest magnetic field in a sunspot light bridge. *The Astrophysical Journal*, 895(2), 129–146. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab83f1>.
- Hori, H., Miki, M., & Date, M. (1982). Paschen-Back effect in D-lines sodium under a high magnetic field. *Journal of the Physical Society of Japan*, 51(5), 1566–1570.
- Kurochka, Y. V., Kurochka, L. N., Lozitsky, V. G., Lozitska, N. I., Ostapenko V. A., Polupan P. N., & Rossada V. M. (1980). Horizontal solar telescope of Astro-nomical Observatory of Kyiv University. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomija*, 22, 48–56 [in Ukrainian].
- Lozitska N. I., Lozitsky V. G., Andriyeva O. A., Akhtemov Z. S., Malashchuk V. M., Perebeynos V. A., Stepanyan N. N., & Shtertser N. I. (2015). Methodical problems of magnetic field measurements in umbra of sunspots. *Advances in Space Research*, 55(3), 897–907.
- Lozitsky V. G., & Staude J. (2008). Observational evidences for a multi-component magnetic field structure in solar flares. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 29, 387.
- Moore, Ch. E., Minnaert, M. G. J., & Houtgast, J. (1966). The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. *National Bureau of Standards, Washington: US Government Printing Office (USGPO)*. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1966sst..book.....M>.
- Priest, E. R. (2014). *Magnetohydrodynamics of the Sun*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020732>.
- Rachkovsky, D. N., & Tsap, T. T. (1985). Study of magnetic fields using a method of measured strength ratio in lines outside active regions. *Izvestiya of Krim. Astrofiz. Observatory*, 71, 79–87 [in Russian].
- Solanki, S. K. (2003). Sunspots: An overview. *Astronomy and Astrophysics Review*, 11, 153–286.
- Stenflo, J. O. (2011). Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun. *Astronomy and Astrophysics*, 529, id. A42, 20 p.
- Stenflo, J. O. (1973). Magnetic-field structure of the photospheric network. *Solar Physics*, 321, 41–63.
- Wiehr, E. (1978). A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions. *Astronomy and Astrophysics*, 69(2), 279–284.
- Yakovkin I. I., & Lozitsky V. G. (2022). Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H α line. *Advances in Space Research*, 69, 4408–4418. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.012>.

Отримано редакцією журналу / Received: 11.09.23

Прорецензовано / Revised: 19.09.23

Схвалено до друку / Accepted: 06.10.23

Ivan YAKOVKIN, PhD Student
 ORCID ID: 0000-0003-1563-8528
 e-mail: yakovkinii@knu.ua
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Natalia LOZITSKA, PhD (Phys. & Math.)
 ORCID ID: 0000-0002-7005-646X
 e-mail: nloz@knu.ua
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Vsevolod LOZITSKY, DSc (Phys. & Math.)
 ORCID ID: 0000-0002-6895-5271
 e-mail: vsevolod.lozitsky@knu.ua
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

HIDDEN MANIFESTATIONS OF THE PASCHEN-BACK EFFECT IN D1 AND D2 LINES IN THE SPECTRUM OF A SUNSPOT WITHOUT FLARES

Background. Currently, the dominant view is that for measuring magnetic fields in active processes on the Sun, the Paschen-Bak effect should be taken into account only when the intensity of the magnetic field is very high - much higher than in sunspots. In fact, it depends on the spectral line by which the magnetic splitting is measured, more precisely, on the value of the multiplet splitting in the corresponding atom. It is important to check, based on direct measurements, whether the Paschen-Bak effects occur in the D1 and D2 NaI lines, using which it is possible to measure the magnetic fields in the chromosphere.

Methods. The spectral-polarization method was used, which is based on direct measurements of magnetic splittings on registragrams of sunspot spectra obtained in orthogonal circular polarizations. The main idea of the study was to reveal the hidden manifestations of the Paschen-Bak effect, which occur with a relatively small magnetic splitting of the lines - when this splitting is much smaller than the spectral half-width. For this purpose, the measured splittings were calibrated in two ways: in the assumption of LS coupling and for the case of the Paschen-Bak effect.

Results. The results of measurements of the magnetic splittings of the D1, D2 and NiI 5892,9 Å lines in the spectrum of the sunspot on 07/24/2023, in which there were no solar flares at the time of observation, are presented. The observational material was obtained on the Echelle spectrograph of the horizontal solar telescope of the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko Kyiv National University. It was found that in some places of the solar field, the measured splittings of the indicated lines are practically the same, and in others they are significantly different. If we assume that these factors correspond to LS coupling for all lines, then we have the following contradiction: the photospheric line NiI 5892,9 Å shows a magnetic field intermediate in magnitude between lines D1 and D2. Physically, this is unreal in a uniform magnetic field; if the magnetic field weakens with height, then the nickel line should show a stronger field than both sodium lines. More realistic estimates of the magnetic field are obtained using empirical Lande factors for lines D1 and D2, which correspond to the Paschen-Bak effect in these lines.

Conclusions. It has been empirically confirmed that the Paschen-Bak effect operates in lines D1 and D2 in the field range of 500–1400 G. The observations revealed another feature: the D2 line with a smaller Lande factor ($g_{\text{emp}} = 1,22$) shows a stronger measured magnetic field in some places of the spot than the D1 line with a larger Lande factor ($g_{\text{emp}} = 1,36$). This is possible when the local magnetic fields in the studied sunspot are much stronger than according to direct measurements. Evaluation of such fields can be carried out on the basis of modeling within the framework of multi-component models, which is planned to be done in the next study.

Keywords: Sun, solar activity, sunspots, magnetic fields, measurements by the NaI and NiI lines, Paschen-Bak effect.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.