

ПРЯМІ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ТІНІ Й ПІВТІНІ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ ПО 146 СПЕКТРАЛЬНИХ ЛІНІЯХ

На основі аналізу ешельних зєсман-спектрограм, отриманих на ГСТ АО КНУ, у двох сонячних плямах виявлено на глибинах $h = 40\text{--}60$ км вузький шар з різко неоднорідним магнітним полем. Тут магнітні поля, виміряні по різних спектральних лініях, дуже сильно відрізняються (в межах $600\text{--}2400$ Гс). Залежність вимірних значень від фактора Ланде вказує на те, що основною причиною цієї розбіжності є поверхнева неоднорідність магнітного поля. Результати можна пояснити двокомпонентною моделлю магнітного поля, причому в області півтіні плям, де спектральні прояви двокомпонентності є більш суттєвими, величина магнітного поля у сильній компоненті в межах $1500\text{--}4000$ Гс при факторі заповнення $5\text{--}20\%$.

A narrow layer with essentially inhomogeneous magnetic field was found on height $40\text{--}60$ km in two sunspots using the Zeeman spectrograms obtained on horizontal solar telescope of Astronomical observatory of Kyiv Taras Shevchenko University. Magnetic fields here, measured by different spectral lines, are very different (in range $600\text{--}2400$ G). Dependence of results from Lande factor indicates that main cause of this disparity is surface-inhomogeneous magnetic field. The measurements can be explained in a frame of two-component model. In area of sunspot penumbra, where spectral manifestations of two-component structure are more substantial, the magnetic field strength in strong component is in range $1500\text{--}4000$ G, and filling factor – $5\text{--}20\%$.

Вступ. Сонячні плями є добре відомими проявами сонячної активності на фотосферному рівні. Незважаючи на те, що вони вивчаються спектральними методами більше 100 років, є низка проблем, актуальних і для сучасних досліджень. Одна з них – поверхнева і висотна неоднорідність магнітного поля. Тінь і півтінь плями мають тонкоструктурні елементи з характерним розміром ≤ 100 км, фізичні умови в яких практично невідомі [10]. Висотний градієнт магнітного поля у плямах найчастіше від'ємний, але іноді буває і додатним, навіть у плямах без спалахів [4]. Непрямим свідченням того, що різні сонячні плями мають суттєво відмінні термодинамічними умови, є дуже неоднозначна ("розсіяна") калібровочна залежність магнітографа, отримана ще А.Б.Сєверним [8].

Висотну неоднорідність магнітного поля у плямах можна вивчати двояко:

а) використовувати при вимірюваннях багато спектральних ліній з різними висотами формування (прямий метод);

б) використовувати небагато ліній (одну або кілька), але застосовувати для інтерпретації спостережень інверсні методи [9], які дозволяють будувати напівемпіричні моделі висотного розподілу магнітного поля і термодинамічних умов.

Інверсні методи є більш сучасними і тонкими і дозволяють отримати просторове розділення по висоті на рівні ≈ 10 км, тоді як прямі методи більш грубі – вони інтегрують фізичні параметри атмосфери в межах ефективної функції вкладу кожної лінії, а це $50\text{--}100$ км для помірних по силі ліній і дещо менше – для слабких ліній.

Досвід використання інверсних методів показує [6], що тут також є свої проблеми. Можна, наприклад, добре узгодити теоретичні і спостережені профілі в одній спектральній лінії, але коли використовувати багато ліній, (особливо і нейтральних елементів, і іонів), дані по деяких лініях погано узгоджуються. Доводиться тоді використовувати багатокомпонентні моделі, однак це часто призводить до неоднозначних результатів, оскільки зростає кількість вільних параметрів. У цьому відношенні, прямі вимірювання магнітного поля по багатьох спектральних лініях є більш простими і однозначними; саме такі вимірювання аналізуються нижче.

Представлені нижче результати є наслідком розвитку досліджень, започаткованих раніше в роботах [1,2]. Зокрема, в роботі [1] викладено методичні основи вимірювань і подано результати лише для однієї сонячної плями, але по кількох спектральних лініях. В роботі [2] вивчається також одна сонячна пляма, але по 24 спектральних лініях. У даній роботі вивчається магнітне поле у двох сонячних плямах по 146 спектральних магніточутливих лініях.

Матеріал спостережень та результати прямих вимірювань. Були вивчені магнітні поля у двох великих сонячних плямах, які спостерігались на Сонці 25 березня 1991 р. та 22 липня 2004 р. У вказані дати це були найбільші плями на сонячному диску, їх діаметр (з північню) був близько $60''$. Ешельні спектри плям отримані одним із авторів (В. Л.) на ГСТ АО КНУ [5]. З аналізатором кругової поляризації, що дозволяє аналізувати профілі Стокса $I \pm V$. Спектри сфотографовано на фотопластинки ORWO WP3.

Всього було проаналізовано вимірювання у 146 спектральних лініях, що мають довжини хвиль від 5462.50 до 6430.85 Å. Лінії підбиралися так, щоб у них не було інтенсивних ліній-сусідів (бленд), а також не надміру мала еквівалентна ширина W . У досліджену вибірку попали лінії з еквівалентними ширинами в межах $W = 18\text{--}183$ mÅ, потенціалами збудження нижнього терма $\chi = 0.27\text{--}8.09$ eV, та факторами Ланде $g = 0.50\text{--}2.50$. Виявилось, що у вибірці ліній FeI було 80 (54.7%), NiI – 17 (11.6%) SiI – 11 (7.5%), TiI – 6 (4.1%), MnI – 5 (3.4%). Було також по 4 лінії CaI, CrI, ScII та FeII, по 3 лінії VI та NaI і по одній лінії CoI, CrII, CuI, BaII та SiII.

Напруженість магнітного поля визначалась на 12 ділянках сонячної поверхні, що відповідають різним смужкам мозаїки В. Й.Скоморовського. Відстань між серединами цих ділянок – $6''$, що відповідає 4.3 Мм на Сонці. Типові похибки вимірювань ± 100 Гс для ліній з ефективним фактором Ланде $g = 1.5$; ці похибки оцінювались по інструментальним зміщенням телуричних ліній [1].

Як і в роботі [2], не було виявлено статистично достовірного зв'язку вимірних значень магнітного поля від потенціала збудження нижнього терма χ , однак було знайдено залежність від висоти формування лінії (Рис. 1). Тут є очевидними такі особливості: а) від'ємний висотний градієнт магнітного поля, на рівні $dB/dh = -2.2$ Гс/км, та б) дуже велике розсіяння значень вимірюваного поля в діапазоні висот $40\text{--}60$ км. Щодо висотного градієнта в інших місцях плям, то він був знайдений у межах $0\text{--}4$ Гс/км, що узгоджується з даними інших авторів.

Однак є досить цікавим інший ефект (який виявлено вперше) – великий розкид вимірних напруженостей в глибоких шарах плям, на висотах $40\text{--}60$ км (згідно [3]). Тут розбіжність даних по різних лініях наближається до 2000 Гс, що в $5\text{--}10$ разів більше за типові похибки вимірювань.

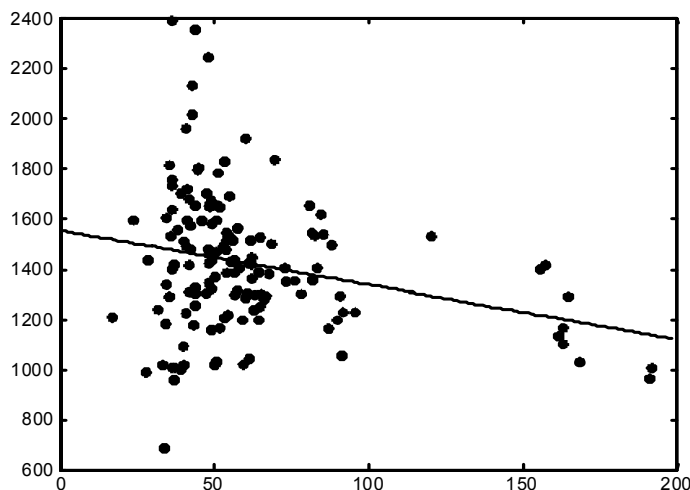


Рис. 1. Результати вимірювань магнітного поля у плямі 25 березня 1991 р.: по осі абсцис – висота формування лінії (в км) згідно [3], по осі ординат – напруженість магнітного поля (в Гс)

Щоб з'ясувати причину цієї розбіжності, вимірювання в діапазоні висот 40–60 км були розглянуті окремо. Також і в цьому діапазоні не виявлено достовірної залежності від потенціала збудження нижнього терма ліній, що вказує на незначний вплив термодинамічних ефектів. Однак була виявлена залежність вимірювань від фактора Ланде (Рис. 2). Ця залежність вказує на існування у плямах просторово нероздільних (субтелескопічних) магнітних структур з магнітним полем, сильнішим за виміряне прямим методом [7]. Присутність таких структур є більш помітною в північній сонячній плямі. На це вказує збільшення по абсолютній величині відношення dB/dg саме в північній плямі, де $B = 500\text{--}800$ Гс (Рис. 3). Це дозволяє оцінити величину відповідного магнітного поля на основі моделювання зєєманівського розщеплення у лініях з різними факторами Ланде.

Модельні розрахунки. Залежність, подібну поданій на Рис. 2, можна отримати лише при двохкомпонентній структурі магнітного поля. При однокомпонентному полі фактор Ланде враховується автоматично і ніякої залежності від нього взагалі не повинно бути. Однак при двохкомпонентній структурі поля різко зростає число вільних параметрів і тому доводиться вводити певні спрощуючі припущення. Були використані такі основні припущення: а) магнітне поле є поздовжнім, зєєманівська π -компонента відсутня; б) профілі ліній можна апроксимувати гауссіанами; в) ширини спектральних ліній є однаковими у слабкій і сильній компонентах поля і г) термодинамічні ефекти відсутні (на це вказує відсутність залежності від λ).

Розрахунками показали, що фактична величина локальних магнітних полів має однаковий порядок ($\sim 10^3$ Гс) як у тині, так і в північній плямі. Істотно змінюється при цьому тільки фактор заповнення. У північній плямі фактор заповнення площі сильною компонентою в межах $5\div 20\%$. Величина магнітного поля у сильній компоненті від 1500 до 4000 Гс, тоді як у фоновій компоненті – від 0 до 240 Гс.

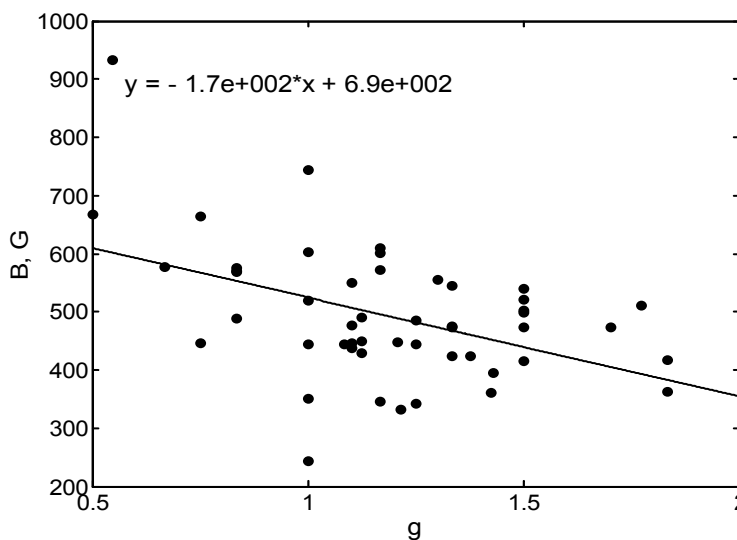


Рис. 2. Залежність виміряних магнітних полів (подані по осі ординат) від фактора Ланде g ліній (вісь абсцис) лише для ліній, що формуються в діапазоні висот 40–60 км.

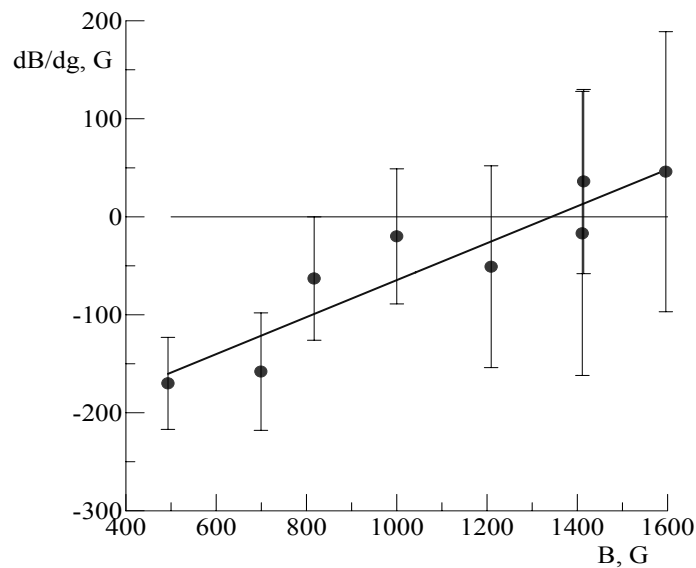


Рис. 3. Емпіричний зв'язок нахилів dB/dg апроксимуючих прямих на залежностях, подібних до поданої на рис. 2, і виміряного магнітного поля B .

Висновки. Основним підсумком даного дослідження є виявлення у плямах на великих глибинах ($h=40-60$ км) шару з різко неоднорідним магнітним полем. Тут магнітні поля, виміряні по різних спектральних лініях, дуже сильно відрізняються (в межах $600 \div 2400$ Гс). Залежність вимірних значень від фактора Ланде вказує на те, що основною причиною цієї розбіжності є поверхнева неоднорідність магнітного поля. Результати можна пояснити двохкомпонентною моделлю магнітного поля, причому в області північні плям, де спектральні прояви двохкомпонентності є більш суттєвими, величина магнітного поля у сильній компоненті в межах $1500-4000$ Гс при факторі заповнення $5 \div 20\%$.

1. Венгліньський Є., Лозицький В., Сліпченко О. Вимірювання сонячних магнітних полів методом комп'ютерного сканування зєман-спектрограм // Вісник Київського національного університету ім. Т.Шевченка. Астрономія. – 2006. – Вип. 43. – С. 4–7. 2. Венгліньський Є.Р., Лозицький В.Г., Сліпченко О.С. Висотні зміни вертикального градієнта магнітного поля у сонячній плямі // Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2007. – Вип. 44. – С. 5–8. 3. Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов // Киев: Наук. думка, 1989. – 200с. 4. Гусейнов М.Дж. О величине вертикального градиента напряженности магнитного поля в тени пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. 1978. – Т. 58. – С.31–34. 5. Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лозицкий В.Г. и др. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестник Киев. ун-та. Астрономия. – 1980. – Вип. 22. – С.48–56. 6. Курочка Е.В., Лозицкий В.Г. Модель тени солнечного пятна на основе спектроскопических наблюдений в областях 6300 Å и 5250 Å // Труды Уссурийской астрофизической обсерватории. – 2009. – Т. 12. – С. 122–135. 7. Лозицкий В.Г. Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце. Дисс. доктора ф.-м. наук: 01.03.03 – Киев, 2003. – 299с. 8. Северный А.Б. Некоторые инструментальные вопросы измерения магнитных полей Солнца и звезд // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. – 1977. – Т. 56. – С. 142–148. 9. Landi Degl'Innocenti E., Landi Degl'Innocenti M. Response function for magnetic lines // Astr. Astroph. – 1977. – V. 56. – P.11–115. 10. Solanki S.K. Sunspots: An overview // The Astron. Astroph. Rev. – 2003. – V. 11. – P.153 – 286. – ISSN 0935–4956.

Надійшла до редколегії 09.11.11