

УДК 523.942

А. І. Присяжний¹, М. І. Стоділка¹, Н. Г. Щукіна²

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, м. Львів, 79005
andrij13p@gmail.com, sun@astro.franko.lviv.ua

²Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143
shchukin@mao.kiev.ua

Стійкий метод визначення напруженості магнітного поля у фотосфері Сонця

Запропоновано модифікацію класичного методу визначення напруженості магнітного поля за відстанню між положеннями піків синього і червоного крил V-профілю Стокса магніточутливої спектральної лінії. Для зменшення впливу шумів та більш коректного визначення відстані між положеннями піків спостережуваній профілю Стокса V було апроксимовано модифікованою вейвлет-функцією. Оптимальні значення коефіцієнтів апроксимаційної функції було визначено шляхом багатовимірної оптимізації. В рамках даного підходу напруженість магнітного поля можна знайти аналітично за відомими коефіцієнтами апроксимаційної функції. Для тестування методу було використано V-профілі Стокса спектральної лінії нейтрального заліза Fe I 1564.8 нм. Профілі було синтезовано з використанням тривимірної фотосферної моделі магнітоконвекції Ремпеля. Показано результат застосування запропонованого методу до спостережуваних V-профілів Стокса. Даний метод менш чутливий до шумів та форми спостережуваного сигналу, що дозволяє отримувати більш надійні значення напруженості магнітного поля із спостережень у порівнянні з класичним методом визначення напруженості поля за розщепленням профілю Стокса V.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, магнітні поля, діагностика, ефект Зесмана.

ВСТУП

Основним інструментом для діагностики магнітних полів на Сонці є інтерпретація спектрополяриметричних спостережень [42, 89, 108].

Поляризація випромінювання у спектральних лініях виникає і змінюється в результаті дії декількох механізмів. Найбільш важливими з них є ефект Зеемана [115] та ефект Ханле [26]. Не буде перебільшенням сказати, що більшу частину наших знань про магнітні поля в атмосфері Сонця отримано в результаті аналізу поляризації лінійчатого випромінювання, викликаного ефектом Зеемана. Кінцевою метою цього аналізу є визначення величини магнітного потоку, напруженості магнітного поля, а також його нахилу.

Безсумнівною перевагою стокс-діагностики, що базується на ефекті Зеемана, є велика кількість методів, розроблених з метою отримання інформації про сонячні магнітні поля (див. огляди Хоменко і Соланкі [29, 94]). Серед них слід згадати прямі (класичні) методи оцінювання напруженості магнітних полів, які не потребують розв'язання рівнянь перенесення поляризованого випромінювання [27, 31, 83, 87, 99, 105]; методи, що ґрунтуються на аналізі надтонкої структури атомів [50]; чисельне моделювання параметрів Стокса із залученням тривимірних МГД-моделей атмосфери Сонця з подальшим їхнім порівнянням з результатами спостережень [18, 35, 36, 90]; різноманітні інверсні методи [62, 78, 79, 92, 93]. Велика кількість методів пов'язана у першу чергу з достатньо простою фізикою ефекту Зеемана.

У вимірювань, що ґрунтуються на ефекті Зеемана, є і свої недоліки. По-перше, величина відновленого поля залежить від просторового розділення, оскільки поляризаційні сигнали від магнітних елементів протилежної полярності при просторовому усередненні анулюються [82]. По-друге, поляризаційний сигнал менший для спектральних ліній з більшою доплерівською шириною. Для більшості фотосферних ліній це означає, що надійно можуть бути виміряні лише ті поля, напруженість яких перевищує 200...300 Гс*. З цієї ж причини стає складно визначити вектор напруженості магнітного поля в сонячній короні.

На відміну від ефекту Зеемана поляризаційний сигнал (параметри Стокса Q та U), модульований ефектом Ханле, чутливий до наявності на субтелескопічних масштабах магнітних полів зі змішаними полярностями. При цьому ханле-діагностика дозволяє виявляти значно слабші магнітні поля, ніж у випадку зееман-діагностики, незалежно від ширини спектральної лінії. Для різних спектральних ліній, які використовуються при ханле-діагностиці, вимірювані значення напруженості поля лежать у межах від 1 мГс до декількох сотень Гс. При цьому через ефект насичення вимірювати сильніші магнітні поля стає неможливо. Інший недолік ханле-діагностики пов'язаний з необхідністю застосовувати квантову теорію поляризації, яка в силу своєї складності істотно ускладнює інтерпретацію спостережень. Незважаючи на це, ханле-діагностика в останні роки перетворилась на ефективний інструмент для дослідження сонячного магнетизму [51, 88, 108, 110, 111].

* 1 Гс = 10^{-4} Тл

Використання ефекту Ханле є особливо важливим для вимірювання слабких полів в гарячій хромосферній та корональній плазмі, де зєсман-діагностика виявляється неспроможною. Відзначимо, що на даний час цій проблемі приділяється особлива увага [109].

Інша проблема, яка залишається актуальною, — це подальший розвиток і вдосконалення прямих методів вимірювання сонячних магнітних полів, які не потребують розв'язання рівнянь перенесення поляризованого випромінювання. Зупинимося докладніше на цих методах.

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Серед простих методів вимірювання напруженості магнітного поля найбільш популярними є такі методи стокс-діагностики.

1. Метод «відношення двох ліній» [31, 42, 105]. У цьому методі використовується відношення амплітуд V -профілів Стокса двох спектральних ліній з різним зєсманівським розщепленням, але з близькими або однаковими іншими параметрами. Найчастіше в цьому методі використовують пару ліній видимого діапазону Fe I 524.71 і 525.02 нм, але також використовуються й лінії інфрачервоної ділянки спектру Fe I 1564.8 і 1565.2 нм. Використання пари ліній Fe I 1564.85 та 1565.29 нм, як було показано у роботі [99], дозволяє з великою точністю вимірювати напруженість магнітного поля у сонячних магнітних утвореннях. Лінії Fe I 524.71 і 525.02 нм мають майже однакові атомні параметри, крім факторів Ланде, відношення яких дорівнює 1.5. Тому отримуване магнітне відношення

$$MLR = \frac{a_V(525.02) g_{\text{ef}}(524.71)}{a_V(524.71) g_{\text{ef}}(525.02)},$$

де a_V — амплітуда V -профілю Стокса, g_{ef} — ефективний g -фактор Ланде) буде нечутливим до всіх атмосферних параметрів, крім напруженості магнітного поля, кута нахилу магнітного поля і поля швидкостей. Детальний опис цього методу можна знайти в роботі Яна Стенфлю [105], який його запропонував і детально розробив.

2. Метод «центрів ваги», який було детально описано в роботі [83]. З допомогою цього методу можна оцінити лише поздовжню складову вектора напруженості магнітного поля B_{\parallel} :

$$B_{\parallel} = \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot 4.67 \cdot 10^{-8} \cdot g_{\text{ef}}} \right) B \cos \theta,$$

де B — вектор напруженості магнітного поля, θ — кут між напрямом вектора напруженості магнітного поля і променем зору, λ_0 , нм — центральна довжина хвилі спектральної лінії, g_{ef} — центральні довжини хвиль позитивно і негативно поляризованих компонентів спектральної лінії, які визначаються згідно з формулою

$$\frac{(I_c - (I - V)) d}{(I_c + (I - V)) d},$$

де I_c — інтенсивність в континуумі, I — значення інтенсивності, яке відповідає довжині хвилі λ . Цей метод є досить надійним для центра диска Сонця. Він дає нижню межу істинної напруженості магнітного поля, оскільки визначає тільки поздовжню складову поля.

3. Найпростіший третій метод [34, 43, 67] дозволяє визначати поздовжню складову B_{rb} вектора напруженості магнітного поля за відстанню між синім та червоним піками профілю Стокса V магніто-чутливої спектральної лінії. Для визначення напруженості B_{rb} [Гс] використовуються вираз

$$B_{rb} = \frac{r_{rb}}{2k_0^2 g_{\text{ef}}},$$

де $k_0 = e/(4 m_e c^2) = 4.67 \cdot 10^{-13}$, r_{rb} — відстань між положеннями піків крил V -профілю Стокса [Å], λ_0 — центральна довжина хвилі спектральної лінії [Å], а g_{ef} — ефективний фактор Ланде [20]. Ця формула не працює для слабких полів (< 200 Гс).

Даний метод має серйозний недолік: крім лінії Fe I 1564.8 нм, фактично всі інші (особливо лінії видимого діапазону) не можуть бути використані через відносно велику доплерівську ширину лінії $\Delta\lambda_D$ у порівнянні із зееманівським розщепленням $\Delta\lambda_B$.

Метод визначення напруженості магнітного поля за відстанню між піками V -профілю Стокса є чутливим до впливу шумів, що особливо проявляється у випадках слабких сигналів. Мета даної роботи — модифікувати цей метод таким чином, щоб звести до мінімуму вплив шумів при спектрополяриметричній діагностиці фотосферних магнітних полів за допомогою інфрачервоної лінії Fe I 1564.8 нм.

ДІАГНОСТИКА АТМОСФЕРИ СОНЦЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛІНІЇ Fe I 1564.8 нм

Важливою перевагою ліній інфрачервоної ділянки спектру, у порівнянні із лініями видимого діапазону, є їхня значна магнітна чутливість. Зееманівське розщеплення $\Delta\lambda_B$ магніточутливої спектральної лінії є пропорційним до g_{ef} , тоді як доплерівська ширина лінії $\Delta\lambda_D$ є пропорційною до λ . Це призводить до того, що лінія Fe I 1564.8 нм ($g_{\text{ef}} = 3$) є втричі чутливішою до магнітного поля, ніж лінії видимого діапазону, які традиційно використовуються для вимірювання напруженості поля (такі як Fe I 525.02 нм ($g_{\text{ef}} = 3$) і Fe I 630.25 нм ($g_{\text{ef}} = 2.5$) [17]). Дослідження чутливості спектральних ліній до напруженості магнітного поля та інших фізичних параметрів було детально розглянуто в роботі [15]. Лінії інфрачервоної ділянки спектру дають

Параметри лінії Fe I 1564.8 нм [9, 45, 96, 99]

| Перехід | g_{ef} | EPL , eВ | $\lg gf$ |
|--------------------------------------|-----------------|------------|----------|
| $e^7D_1 \rightarrow 3d^64s5p^7D_1^0$ | 3 | 5.426 | -0.675 |

змогу отримати достовірну інформацію про фізичні умови в шарах нижньої фотосфери [31, 53].

Серед цих ліній особливо цікавою є лінія нейтрального заліза Fe I 1564.8 нм, оскільки її g -фактор Ланде дорівнює 3, і вона формується відносно глибоко в сонячній фотосфері [20]. Основні параметри спектральної лінії Fe I 1564.8 нм наведено у табл. 1. Тут EPL — потенціал збудження нижнього рівня, $\lg gf$ — логарифмічне значення зваженої сили осцилятора (добутку статистичної ваги нижнього рівня g і сили осцилятора лінії f).

Починаючи із піонерських спостережень Харвея і Холла [28], виконаних за допомогою телескопа McM-P обсерваторії Kitt Peak (штат Аризона, США), спостереження в лінії Fe I 1564.85 нм проводились за допомогою багатьох інструментів [63].

Дані спостережень в лінії Fe I 1564.85 нм використовувались як для дослідження магнітних полів спокійного Сонця [21, 22, 33, 34, 41, 52], так і для визначення напруженості магнітного поля в сонячних плямах [49, 55, 57, 70], порах [60] та інших магнітних утвореннях [39, 40, 68, 69, 103, 106, 113, 114].

У фізиці сонячних плям дані спостережень в лінії Fe I 1564.85 нм використовувались, зокрема, для дослідження зв'язку між напруженістю магнітного поля та температурою [37, 47, 48, 54, 56, 64, 65, 95, 102], визначення градієнта напруженості магнітного поля в області сонячної плями [58], дослідження зв'язку між напруженістю магнітного поля в сонячній плямі та інтенсивністю в континуумі лінії Fe I 1564.85 нм [38, 64], визначення напруженості магнітного поля [76] та осциляцій швидкості [6] в тіні сонячної плями, дослідження «магнітних навісів» сонячних плям [2, 97, 100], вивчення ефекту Евершеда [4, 12, 14, 98], дослідження магнітоакустичних хвиль у сонячних плямах [31].

Дані спостережень в лінії Fe I 1564.85 нм використовувались для вивчення тонкої структури [11, 12, 14], топології магнітного поля [1, 3, 8, 23] та температурної структури півтіні сонячної плями [10]. Властивості асиметрії профілів Стокса спектральної лінії Fe I 1564.85 нм, отриманих в півтіні сонячної плями, досліджувались у роботах [1, 13, 61, 80, 84—86].

Лінія Fe I 1564.8 нм також використовувалась для визначення напруженості магнітного поля у міжсіткових [5, 30, 31, 34, 43, 44, 81, 104] та сіткових областях і флокулярних полях [7, 46, 59, 67, 71, 77, 107], дослідження сифонних потоків [19, 77, 101], вимірювання напруженості магнітних полів зір [24, 25], стокс-інверсії із використанням штучних нейронних мереж [16].

**МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ
МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗА РОЗЩЕПЛЕННЯМ ПРОФІЛЮ СТОКСА V**

Суть модифікації даного методу, яку ми пропонуємо в нашій роботі, полягає у побудові апроксимаційної кривої для кожного профілю Стокса V . В рамках даного підходу величину rb можна знайти аналітично за коефіцієнтами апроксимаційної функції. Перевага такого підходу полягає в тому, що при розрахунку відстані між піками враховується весь профіль, що дозволяє зменшити вплив шумів та асиметрії профілю на точність визначення напруженості.

Було використано апроксимаційні криві, які описувались трьома функціями, побудованими на основі вейвлет-функції $f(x) = x \exp(-x^2/2)$ [66], а саме:

$$f_1(x) = Aa(a-b) \exp\left(-\frac{a^2(x-b)^2}{2}\right),$$

$$f_2(x) = A(a-b)(1-a^3(x-b)^3) \exp\left(-\frac{a^2(x-b)^2}{2}\right),$$

$$f_3(x) = \begin{matrix} A_1 a_1(x-z_c) \exp\left(-\frac{a_1^2(x-z_c)^2}{2}\right) \\ A_2 a_2(x-z_c) \exp\left(-\frac{a_2^2(x-z_c)^2}{2}\right) \end{matrix} z_c,$$

Функція f_1 є функцією $f(x)$ із введеними додатковими коефіцієнтами: загальною амплітудою A , коефіцієнтом масштабування a та коефіцієнтом зсуву b . У функції f_2 , крім лінійної складової, додатково введено кубічну складову, що дозволяє краще описати область точки перетину нуля. Параметр z_c відповідає за співвідношення між амплітудами лінійної та кубічної складових. Функція f_3 описує апроксимаційну криву з різними амплітудами піків, що дає змогу краще описати V -профілі Стокса із значною асиметрією, але для її використання потрібно попередньо знайти значення параметра z_c — довжини хвилі, що відповідає точці перетину нуля.

Відстань між положеннями піків апроксимаційних кривих можна обчислити аналітично за оптимальними значеннями коефіцієнтів апроксимаційних функцій:

$$\begin{matrix} (1) & \frac{2}{a}, \\ (2) & \frac{2}{a} \sqrt{\frac{3-4\sqrt{12}+20-9}{2(1-\dots)}} \\ (3) & \frac{1}{a_1} \frac{1}{a_2}. \end{matrix}$$

Оптимальні значення коефіцієнтів апроксимаційних функцій було визначено шляхом розв'язання задачі багатовимірної оптимізації. Використання апроксимаційних функцій f_2 та f_3 дає незначний вигреш у точності визначення напруженості магнітного поля, але пов'язане із значним збільшенням тривалості розрахунків, оскільки в цьому випадку оптимізація проводиться за більшою кількістю параметрів.

З огляду на те, що результати, отримані при використанні кожної з трьох апроксимаційних функцій f_1, f_2, f_3 , є близькими, ми обмежимося тут використанням лише однієї функції f_1 .

Врахування доплерівської ширини лінії. Оскільки вимірювана відстань між піками ν_{rb} є сумою величин зеєманівського розщеплення ν_B та доплерівської ширини лінії ν_D , то в результаті розрахунків ми отримуємо не істинне значення напруженості B , а наближене значення B_{rb} :

$$B_{rb} = B + B_D,$$

$$B_D = \frac{\nu_D}{2k_0^2 g_{\text{эф}}},$$

$$\nu_D = \frac{h\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2k_B T}{M}}.$$

Тут B — коректувальний доданок для виправлення систематичної похибки, пов'язаної із неврахуванням доплерівського розширення лінії при розрахунку напруженості магнітного поля; ν_0 — довжина хвилі, що відповідає центру лінії; c — швидкість світла; k_B — стала Больцмана; T — ефективна температура шарів фотосфери, у яких утворюється спектральна лінія; M — маса атома.

ТЕСТУВАННЯ МЕТОДУ

Метод можна протестувати, маючи, з одного боку, неоднорідну модель атмосфери з відомим просторовим розподілом напруженості магнітного поля на різних висотах, а з іншого — обчислені за цією ж моделлю профілі Стокса, за допомогою яких можна розрахувати напруженість магнітного поля. З цією метою ми використали тривимірну фотосферну модель магнітоконвекції для одного моменту часу, взяту із часової серії стаціонарних моделей з нульовим магнітним потоком, розрахованих Ремпелем [73] за допомогою магнітогідродинамічного коду MURaM [74, 112].

У зовнішніх поверхневих шарах цієї моделі густина вертикального магнітного потоку дорівнює $\langle |B_z| \rangle = 80$ Гс. Розмір моделі становить $6.144 \times 6.144 \times 3.072$ Мм. Щоб зменшити об'єм обчислень, ми зменшили її початкове просторове розділення з $8 \times 8 \times 8$ км до $80 \times 80 \times 8$ км.

Профілі Стокса I, Q, U, V розраховувались шляхом розв'язання рівнянь переносу поляризованого випромінювання [42, 72] у верхньому шарі моделі з висотою порядку 0.8 Мм.

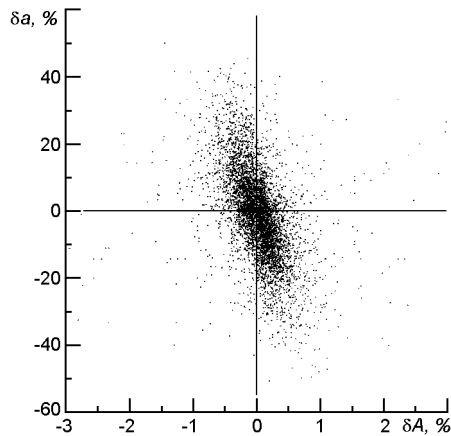


Рис. 1. Діаграма розсіювання параметрів асиметрії синтезованих V-профілів Стокса лінії Fe I 1564.8 нм (a — параметр асиметрії за амплітудами, A — параметр асиметрії за площами)

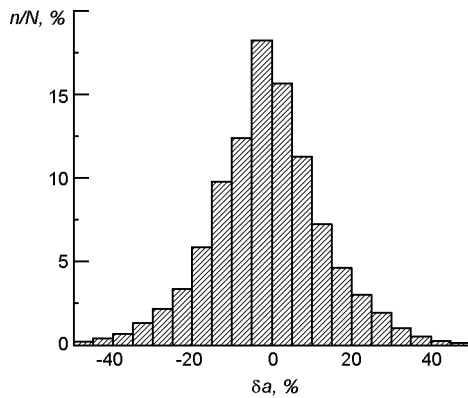


Рис. 2. Розподіл кількості n профілів по значеннях параметра асиметрії a (асиметрія за амплітудами); N — загальна кількість профілів

При розрахунку напруженості магнітного поля не враховувались V-профілі із «незвичною» формою [91]. Для виключення таких профілів із розрахунків було проаналізовано асиметрію V-профілів лінії Fe I 1564.8 нм. Для аналізу асиметрії V-профілів Стокса ми використали стандартні параметри $a = (a_b \ a_r)/(a_b \ a_r)$ і $A = (A_b \ A_r)/(A_b \ A_r)$, які визначають асиметрію за амплітудами та асиметрію за площами. Тут a_b, a_r — амплітуди синього і червоного крил V-профілю Стокса, A_b, A_r — їхні площі [91]. Як видно із діаграми розсіювання на рис. 1, параметр асиметрії за амплітудами a змінюється у значно ширшому інтервалі значень, ніж параметр асиметрії за площами A , тому за критерій відбору V-профілів Стокса використовувався саме цей параметр. На рис. 2 наведено гістограму розподілу кількості профілів по значеннях параметра a .

Критеріям 1, 2, 3 відповідають такі інтервали значень параметра a : $[-0.151, 0.131]$, $[-0.292, 0.272]$, $[-0.433, 0.413]$. Використовуючи ці критерії, V-профілі Стокса було умовно поділено на три класи за величиною асиметрії: клас I — профілі, для яких абсолютне значення параметра a лежить в інтервалі $[-1, +1]$; клас II — в інтервалі $[+1, +2]$; клас III — в інтервалі $[+2, +3]$. Тут -0.01 — медіана.

Отриманий просторовий розподіл напруженості магнітного поля порівнювався із модельним розподілом для кожного рівня висоти

МГД-моделі. Було виявлено, що розподіл напруженості, обчислений за відстанню між піками V -профілю Стокса лінії Fe I 1564.85 нм, найкраще узгоджується з модельним розподілом, що відповідає рівню висоти 11 км.

Для МГД-моделей (особливо з механізмом локального динамо) напруженість магнітного поля суттєво змінюється з висотою як за величиною, так і за напрямком. У таких випадках відомі підходи практично не працюють, а тому зазвичай визначається деяка ефективна напруженість, яка слабо змінюється з висотою, або ж є постійною. Такий підхід логічно застосовувати для інфрачервоної лінії Fe I 1564.8 нм, оскільки ця лінія утворюється у тонкому шарі атмосфери Сонця. Тому надалі ми проводили розрахунки профілів Стокса для кожного стовпця моделі, вважаючи напруженість магнітного поля постійною для всіх висот. Величину напруженості вибирали такою, що відповідає висоті 11 км. Розрахунки було проведено як для незашумлених профілів, так і для профілів із накладеним адитивним рівномірним розподілом шуму. Амплітуда шуму задавалась співвідношенням $I_N = kI_C$, де k — коефіцієнт, який визначає рівень шуму; I_C — інтенсивність в континуумі. Коефіцієнт k задавався у межах від 0 (незашумлені профілі) до 0.01, щоб перекрити діапазон можливих шумів при реальних спостереженнях.

Для визначення коректувального доданка B ми використали усереднене (за всіма точками даного рівня висоти МГД-моделі) значення температури, що відповідає висоті 11 км. Поправка B склала 108 Гс.

На рис. 3 наведено залежність коефіцієнта кореляції r між напруженістю магнітного поля B_{MHD} , взятою із МГД-моделі, та напруженістю B_{calc} магнітного поля, розрахованою двома методами — класичним та модифікованим — за відстанню між піками синтезованого V -профілю Стокса, від коефіцієнта $k = I_N / I_C$, який визначає рівень шуму. Як можна бачити, значення напруженості, отримані за допомогою модифікованого методу, краще корелюють зі значеннями напруженості, взятими із МГД-моделі, ніж значення, отримані за допомо-

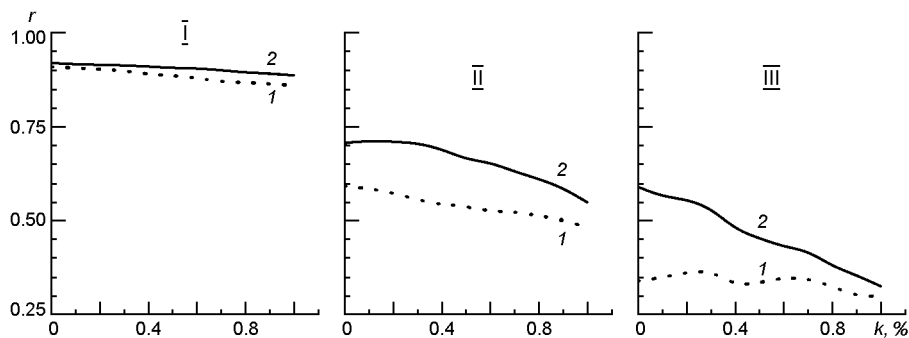


Рис. 3. Залежність від рівня шуму $k = I_N / I_C$ коефіцієнта кореляції r між модельними значеннями напруженості магнітного поля (B_{MHD}) та значеннями поля B_{calc} , отриманими за відстанню між піками синтезованого V -профілю (пунктир 1 — класичним методом, суцільна крива 2 — модифікованим методом) для профілів класів I, II і III

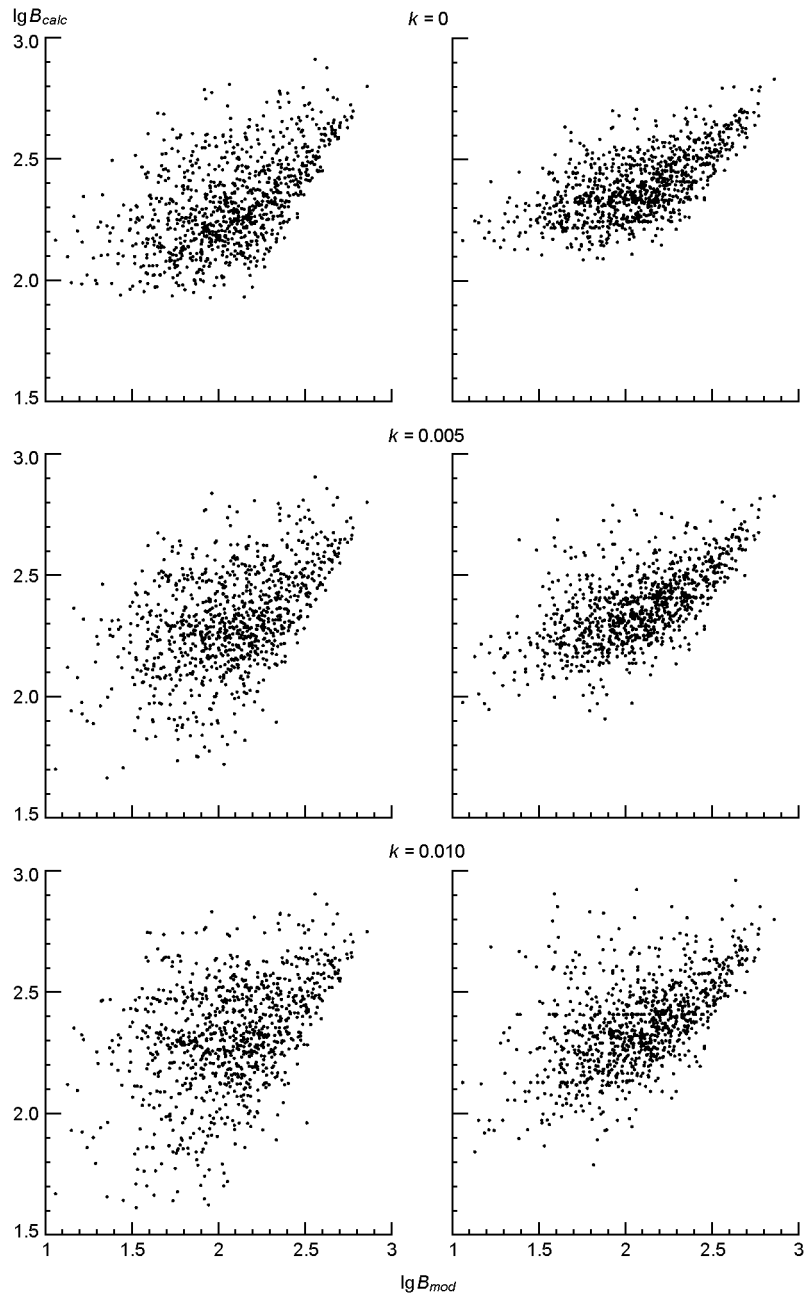


Рис. 4. Залежність напруженості магнітного поля, розрахованої за відстанню між піками V -профілю (B_{rb}), від напруженості B_{MHD} , взятої з МГД-моделі (для висоти 11 км) при рівнях шуму $k=0, 0.5\%$ та 1% . Зліва — значення, отримані за допомогою прямого вимірювання відстані між піками, справа — значення, отримані із застосуванням апроксимаційної функції f_1

гою класичного методу вимірювання напруженості за відстанню між піками V -профілю Стокса.

На рис. 4 наведено діаграми розсіювання, які відображають залежність напруженості магнітного поля, розрахованої за відстанню між піками V -профілю, від напруженості магнітного поля, взятої з

МГД-моделі при відсутності шумів і при різних рівнях шуму. У випадку прямого вимірювання величини r_b положення піків було уточнено за допомогою апроксимації параболою області їхніх вершин.

Як бачимо, як при відсутності, так і при наявності шумів розсіяння точок суттєво менше для нашого підходу, за рахунок чого кореляція між відтвореними та заданими значеннями напруженості магнітного поля більша (див. рис. 3). Крім цього, розсіяння (і відповідно похибка) зростає в області слабких магнітних полів, оскільки ефект Зеємана в цій області практично не працює. А тому діагностику таких полів проводять із використанням ефекту Ханле [88, 108].

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Запропонований підхід було використано для визначення напруженості магнітного поля за даними спостережень. Для цього ми використали дані спостережень Сонця в лінії Fe I 1564.8 нм, люб'язно надані нам Р. І. Костиком. Ці дані було отримано за допомогою німецького вакуумного баштового телескопа (VTT) обсерваторії Тейде (о. Тенеріфе, Канарські острови). Спостережувана факельна область знаходи-

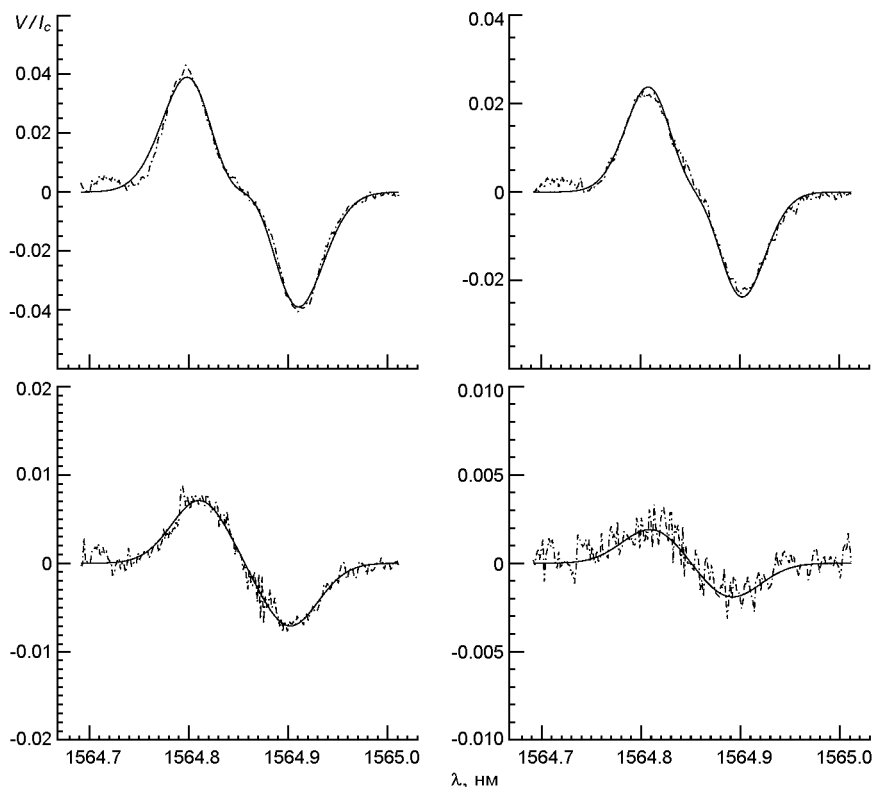


Рис. 5. Приклади профілів Стокса V , отриманих при спостереженнях на телескопі VTT [39] (пунктирні криві) та відповідні апроксимаційні криві (суцільні криві). Проводились спостереження факельної області, розташованої поблизу центра диска Сонця

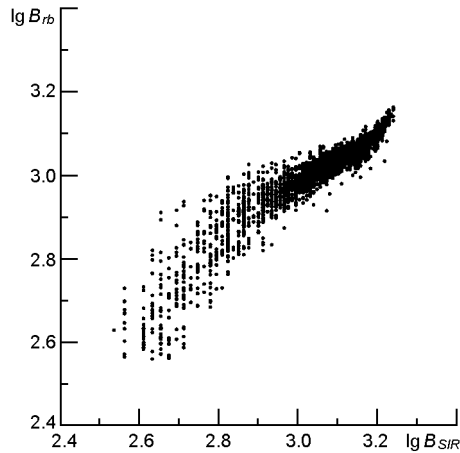


Рис. 6. Залежність напруженості магнітного поля, розрахованої за відстанню між піками V -профілю (B_{vb}) [Гс], від напруженості B_{SIR} [Гс] магнітного поля, розрахованої за допомогою програмного пакету SIR

лась поблизу центра диска Сонця. Просторова роздільна здатність приладу становила 0.5 . Детальний опис цих спостережень та процесу обробки даних можна знайти у роботі [39].

На рис. 5 показано деякі із спостережуваних V -профілів Стокса із різними відношеннями амплітуди шуму до амплітуди сигналу та відповідні апроксимаційні криві.

Напруженість магнітного поля, розрахована за відстанню між піками V -профілю, порівнювалась із напруженістю магнітного поля, розрахованою за допомогою програмного пакету SIR [78].

На рис. 6 показано залежність напруженості магнітного поля, розрахованої за відстанню між піками V -профілю, від напруженості магнітного поля, розрахованої за допомогою програмного пакету SIR.

Було виявлено добре узгодження між значеннями напруженості магнітного поля, отриманими за допомогою цих двох підходів (коефіцієнт кореляції перевищує 0.9).

ВИСНОВКИ

Запропоновано модифікацію класичного методу визначення поздовжньої складової вектора напруженості магнітного поля за відстанню між спектральними положеннями піків V -профілю Стокса, яка полягає у побудові відповідної апроксимаційної кривої для всього V -профілю. В рамках даного підходу величину B_{vb} можна знайти аналітично за коефіцієнтами апроксимаційної функції. При розрахунках було використано апроксимаційні функції, побудовані на основі вейвлет-функції.

Метод було протестовано на синтезованих та спостережуваних V -профілях Стокса. Було показано, що модифікований метод демонструє кращу стійкість до шумів та асиметрії V -профілів Стокса, у порівнянні із класичним методом, та дозволяє більш коректно визначати напруженість магнітного поля за даними спостережень.

Отримані результати добре узгоджуються із результатами розрахунків, проведених за допомогою програмного пакету SIR.

1. Beck C. An uncombed inversion of multiwavelength observations reproducing the net circular polarization in a sunspot's penumbra. *Astron. and Astrophys.* 2011. 525. P. 1—17.
2. Bellot Rubio L. R. The fine structure of the penumbra: from observations to realistic physical models. *ASP Conf. Ser.* 2003. 307. P. 301—323. (Proceedings of the Conference held 30 September — 4 October, 2002 at Tenerife, Canary Islands, Spain. Edited by Javier Trujillo-Bueno and Jorge Sanchez Almeida.)
3. Bellot Rubio L. R., Balthasar H., Collados M. Two magnetic components in sunspot penumbrae. *Astron. and Astrophys.* 2004. 427. P. 319—334.
4. Bellot Rubio L. R., Balthasar H., Collados M., Schlichenmaier R. Field-aligned Evershed flows in the photosphere of a sunspot penumbra. *Astron. and Astrophys.* 2003. 403. P. L47—L50.
5. Bellot Rubio L. R., Collados M. Understanding internetwork magnetic fields as determined from visible and infrared spectral lines. *Astron. and Astrophys.* 2003. 406. P. 357—362.
6. Bellot Rubio L. R., Collados M., Ruiz Cobo B., Rodríguez Hidalgo I. Oscillations in the photosphere of a sunspot umbra from the inversion of infrared Stokes profiles. *Astrophys. J.* 2000. 534. P. 989—996.
7. Bellot Rubio L. R., Rodríguez Hidalgo I., Collados M., et al. Observation of convective collapse and upward-moving shocks in the quiet Sun. *Astrophys. J.* 2001. 560. P. 1010—1019.
8. Borrero J. M., Asensio Ramos A., Collados M., et al. Deep probing of the photospheric sunspot penumbra: no evidence of field-free gaps. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596. P. 1—14.
9. Borrero J. M., Bellot Rubio L. R., Barklem P. S., Del Toro Iniesta J. C. Accurate atomic parameters for near-infrared spectral lines. *Astron. and Astrophys.* 2003. 404. P. 749—762.
10. Borrero J. M., Franz M., Schlichenmaier R., et al. Penumbra thermal structure below the visible surface. *Astron. and Astrophys.* 2017. 601. L8. P. 1—4.
11. Borrero J. M., Lagg A., Solanki S. K., et al. Modeling the fine structure of a sunspot penumbra through the inversion of Stokes profiles. *ASP Conf. Ser.* 2003. 286. P. 235—242. (Current Theoretical Models and Future High Resolution Solar Observations: Preparing for ATST, held 11-15 March 2002 at NSO, Sunspot, New Mexico, USA. Edited by Alexei A. Pevtsov and Han Uitenbroek. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).
12. Borrero J. M., Lagg A., Solanki S. K., Collados M. On the fine structure of sunspot penumbrae. II. The nature of the Evershed flow. *Astron. and Astrophys.* 2005. 436. P. 333—345.
13. Borrero J. M., Solanki S. K. Convective motions and net circular polarization in sunspot penumbrae. *Astrophys. J.* 2010. 709. P. 349—357.
14. Borrero J. M., Solanki S. K., Bellot Rubio L. R., et al. On the fine structure of sunspot penumbrae. I. A quantitative comparison of two semiempirical models with implications for the Evershed effect. *Astron. and Astrophys.* 2004. 422. P. 1093—1104.
15. Cabrera Solana D., Bellot Rubio L. R., Del Toro Iniesta J. C. Sensitivity of spectral lines to temperature, velocity, and magnetic field. *Astron. and Astrophys.* 2005. 439. P. 687—699.
16. Carroll T. A., Staude J. The inversion of Stokes profiles with artificial neural networks. *Astron. and Astrophys.* 2001. 378. P. 316—326.
17. Collados M. Infrared polarimetry. *ASP Conf. Ser.* 2001. 236. P. 255—271. (Advanced Solar Polarimetry — Theory, Observation, and Instrumentation — 20th NSO/Sac Summer Workshop. Edited by M. Sigwarth. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).

18. Danilovic S., Schüssler M., Solanki S. K. Probing quiet Sun magnetism using MURaM simulations and Hinode/SP results: support for a local dynamo. *Astron. and Astrophys.* 2010. 513. A1. P. 1—8.
19. Degenhardt D., Solanki S. K., Montesinos B., Thomas J. H. Evidence for siphon flows with shocks in solar magnetic flux tubes. *Astron. and Astrophys.* 1993. 279. P. L29—L32.
20. Deming D., Hewagama T., Jennings D. E., Wiedemann G. Polarimetry in the infrared. Solar Polarimetry, *Proceedings of the 11th Sacramento Peak Summer Workshop*. Edited by L. J. November. Sunspot, NM: National Solar Observatory. 1991. P. 341—355.
21. Domínguez Cerdeña I., Sánchez Almeida J., Kneer F. Quiet-Sun magnetic fields: Simultaneous inversion of visible and IR spectro-polarimetric observations. *ASP Conf. Ser.* 2006. 358. P. 88—91. (Proceedings of the conference held 19-23 September, 2005, in Boulder, Colorado, USA. Edited by R. Casini and B. W. Lites).
22. Domínguez Cerdeña I., Sánchez Almeida J., Kneer F. Quiet Sun magnetic fields from simultaneous inversions of visible and infrared spectropolarimetric observations. *Astrophys. J.* 2006. 646. P. 1421—1435.
23. Franz M., Collados M., Bethge C., et al. Magnetic fields of opposite polarity in sunspot penumbrae. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596, A4. P. 1—13.
24. Golub L., Giampapa M. S., Worden S. P. The magnetic field on the RS Canum Venaticorum star Lambda Andromedae. *Astrophys. J.* 1983. 268. P. L121—L125.
25. Gondoin Ph., Giampapa M. S., Bookbinder J. A. Stellar magnetic field measurements utilizing infrared spectral lines. *Astrophys. J.* 1985. 297. P. 710—718.
26. Hanle W. Über magnetische Beeinflussung der Polarisation der Resonanzfluoreszenz. *Zeitschrift für Physik.* 1924. 30. P. 93—105.
27. Harvey J. W. Observations of small-scale photospheric magnetic fields. *Highlights of Astronomy.* 1977. 4. P. 223—239.
28. Harvey J. W., Hall D. Magnetic field observations with Fe I 15648 Å. *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1975. 7. P. 459.
29. Khomenko E. Diagnostics of quiet-Sun magnetism. *ASP Conf. Ser.* 2006. 354. P. 63—76. (Proceedings of the Conference Held 18-22 July, 2005, at the National Solar Observatory, Sacramento Peak, Sunspot, New Mexico, USA. Edited by J. Leibacher, R. F. Stein, and H. Uitenbroek. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).
30. Khomenko E. V., Collados M. On the determination of magnetic field strength and flux in inter-network. *ASP Conf. Ser.* 2006. 358. P. 42—47. (Proceedings of the conference held 19-23 September, 2005, in Boulder, Colorado, USA. Eds R. Casini, B. W. Lites).
31. Khomenko E. V., Collados M. On the Stokes V amplitude ratio as an indicator of the field strength in the solar internetwork. *Astrophys. J.* 2007. 659. P. 1726—1735.
32. Khomenko E. V., Collados M., Bellot Rubio L. R. Magnetoacoustic waves in sunspots. *Astrophys. J.* 2003. 588. P. 606—619.
33. Khomenko E. V., Collados M., Bellot Rubio L. R., et al. Formation and destruction of a weak magnetic feature in the solar photosphere. Magnetic Fields and Solar Processes. *The 9th European Meeting on Solar Physics*, held 12—18 September, 1999, in Florence, Italy. Edited by A. Wilson. European Space Agency. P. 307.
34. Khomenko E. V., Collados M., Solanki S. K., et al. Quiet-Sun inter-network magnetic fields observed in the infrared. *Astron. and Astrophys.* 2003. 408. P. 1115—1135.
35. Khomenko E. V., Shelyag S., Solanki S. K., et al. Stokes diagnostics of magneto-convection. Profile shapes and asymmetries. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, IAU Symposium. Cambridge University Press. 2004. 223. P. 635—636.
36. Khomenko E. V., Shelyag S., Solanki S. K., Vögler A. Stokes diagnostics of simulations of magnetoconvection of mixed-polarity quiet-Sun regions. *Astron. and Astrophys.* 2005. 442. P. 1059—1078.
37. Kopp G., Rabin D. A relation between magnetic field strength and temperature in sunspots. *Solar Phys.* 1992. 141. P. 253—265.

38. Kopp M. G., Rabin D. Magnetic field strength and continuum intensity measurements of sunspots at 1.56 microns. *ASP Conf. Ser.* 1992. 26. P. 246—248. (Cool stars, stellar systems, and the Sun, Proceedings of the 7th Cambridge Workshop).
39. Kostik R., Khomenko E. V. Properties of convective motions in facular regions. *Astron. and Astrophys.* 2012. 545. A22. P. 1—9.
40. Kostik R., Khomenko E. V. Properties of oscillatory motions in a facular region. *Astron. and Astrophys.* 2013. 559. A107. P. 1—10.
41. Lagg A., Solanki S. K., Doerr H.-P., et al. Probing deep photospheric layers of the quiet Sun with high magnetic sensitivity. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596. A6. P. 1—13.
42. Landi Degl'Innocenti E., Landolfi M. Polarization in spectral lines. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2004. 890 p.
43. Lin H. On the distribution of the solar magnetic fields. *Astrophys. J.* 1995. 446. P. 421.
44. Lin H., Rimmele T. The granular magnetic fields of the quiet Sun. *Astrophys. J.* 1999. 514. P. 448—455.
45. Litzen U., Verges J. The Fe I spectrum in the region 1 - 4 μ m. *Physica Scripta*, 1976. 13. P. 240—244.
46. Livingston W. Sampling V-Stokes on the solar disk with Fe I 15648 \AA and H Paschen γ . Solar Polarimetry, *Proceedings of the 11th Sacramento Peak Summer Workshop*. Edited by L. J. November. Sunspot, NM: National Solar Observatory. 1991. P. 356—360.
47. Livingston W. Sunspot umbrae: Observed correlation between magnetic field and temperature. *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1991. 23. P. 1030.
48. Livingston W. Sunspots observed to physically weaken in 2000-2001. *Solar Phys.* 2002. 207. P. 41—45.
49. Livingston W., Watson F. A new solar signal: Average maximum sunspot magnetic fields independent of activity cycle. *Geophys. Res. Lett.* 2015. 42. P. 9185—9189.
50. Lopez Ariste A., Tomczyk S., Casini R. Hyperfine structure as a diagnostic of solar magnetic fields. *Astrophys. J.* 2002. 580. P. 519—527.
51. Manso Sainz R., Landi Degl'Innocenti E., Trujillo Bueno J. Concerning the existence of a “turbulent” magnetic field in the quiet Sun. *Astrophys. J.* 2004. 614. P. L89—L91.
52. Martínez González M. J., Pastor Yabar A., Lagg A., et al. Inference of magnetic fields in the very quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596. A5. P. 1—11.
53. Mathew S. K., Lagg A., Solanki S. K., et al. Three dimensional structure of a regular sunspot from the inversion of IR Stokes profiles. *Astron. and Astrophys.* 2003. 410. P. 695—710.
54. Mathew S. K., Solanki S. K., Lagg A., et al. Thermal-magnetic relation of a sunspot as inferred from the inversion of 1.5 μ m spectral data. SOLMAG 2002. *Proceedings of the Magnetic Coupling of the Solar Atmosphere Euroconference and IAU Colloquium 188*. 11—15 June 2002. P. 501—503.
55. Mathew S. K., Solanki S. K., Lagg A., et al. Structure of a simple sunspot from the inversion of IR spectral data. *Astron. Nachr.* 2003. 324. P. 388—389.
56. Mathew S. K., Solanki S. K., Lagg A., et al. Thermal-magnetic relation in a sunspot and a map of its Wilson depression. *Astron. and Astrophys.* 2004. 422. P. 693—701.
57. McPherson M. R., Lin H., Kuhn J. R. Infrared array measurements of sunspot magnetic fields. *Solar Phys.* 1992. 139. P. 255—266.
58. Moran T., Deming D., Jennings D. E., McCabe G. Solar magnetic field studies using the 12 micron emission lines. III. Simultaneous measurements at 12 and 1.6 microns. *Astrophys. J.* 2000. 533. P. 1035—1042.
59. Muglach K., Solanki S. K. Infrared lines as probes of solar magnetic features. I - A many-line analysis of a network region. *Astron. and Astrophys.* 1992. 263. P. 301—311.
60. Muglach K., Solanki S. K., Livingston W. C. Preliminary properties of pores derived from 1.56 micron lines. Solar Surface Magnetism. NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C: Mathematical and Physical Sciences, *Proc. NATO Adv. Res. Workshop*. 1994. P. 127.

61. Müller D. A. N., Schlichenmaier R., Steiner O., Stix M. Spectral signature of magnetic flux tubes in sunspot penumbrae. *Astron. and Astrophys.* 2002. 393. P. 305—319.
62. Orozco Suárez D., Bellot Rubio L. R., Vögler A., Del Toro Iniesta J. C. Applicability of Milne-Eddington inversions to high spatial resolution observations of the quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 2010. 518. A2. P. 1—11.
63. Penn M. J. Infrared solar physics. *Liv. Rev. Solar Phys.* 2014. 11, article id. 2. P. 1—66.
64. Penn M. J., Ceja J. A., Bell E., et al. Infrared spectroscopy from San Fernando observatory: He I 1083 nm, O I 1316 nm, and Fe I 1565 nm. *Solar Phys.* 2002. 205. P. 53—61.
65. Penn M. J., Walton S., Chapman G., et al. Temperature dependence of molecular line strengths and Fe I 1565 nm Zeeman splitting in a sunspot. *Solar Phys.* 2003. 213. P. 55—67.
66. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes in C: The art of scientific computing, second edition. Cambridge University Press. 1988. 925 p.
67. Rabin D. Spatially extended measurements of magnetic field strength in solar plages. *Astrophys. J.* 1992. 391. P. 832—844.
68. Rabin D. A true-field magnetogram in a solar plage region. *Astrophys. J.* 1992. 390. P. L103—L106.
69. Rabin D. Fine-scale magnetic fields in the solar photosphere. *ASP Conf. Ser.* 1992. 26. P. 201—210. (Cool stars, stellar systems, and the sun, Proceedings of the 7th Cambridge Workshop).
70. Rabin D. M., Graves J. E. Measuring sunspot magnetic fields with the infrared line Fe I 15649. *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1989. 21. P. 854.
71. Rabin D., Jaksha D., Plymate C., et al. Plage magnetic field strengths from near-infrared spectra. Solar Polarimetry, *Proc. 11th Sacramento Peak Summer Workshop*. Edited by L. J. November. Sunspot, NM: National Solar Observatory. 1991. P. 361—370.
72. Rees D. E., Durrant C. J., Murphy G. A. Stokes profile analysis and vector magnetic fields. II - Formal numerical solutions of the Stokes transfer equations. *Astrophys. J.* 1989. 339. P. 1093—1106.
73. Rempel M. Numerical simulations of quiet Sun magnetism: On the contribution from a small-scale dynamo. *Astrophys. J.* 2014. 789. Id. 132. P. 1—22.
74. Rempel M., Schüssler M., Knölker M. Radiative magnetohydrodynamic simulation of sunspot structure. *Astrophys. J.* 2009. 691. P. 640—649.
75. Rüedi I., Solanki S. K., Livingston W. Infrared lines as probes of solar magnetic features. XI. Structure of a sunspot umbra with a light bridge. *Astron. and Astrophys.* 1995. 302. P. 543—550.
76. Rüedi I., Solanki S. K., Livingston W., Stenflo J. O. Infrared lines as probes of solar magnetic features. III - Strong and weak magnetic fields in plages. *Solar Phys.* 1992. 263. P. 323—338.
77. Rüedi I., Solanki S. K., Rabin D. Infrared lines as probes of solar magnetic features. IV - Discovery of a siphon flow. *Astron. and Astrophys.* 1992. 261. P. L21—L24.
78. Ruiz Cobo B., Del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles. *Astrophys. J.* 1992. 398. P. 375—385.
79. Sánchez Almeida J. Physical properties of the solar magnetic photosphere under the MISMA hypothesis. I. Description of the inversion procedure. *Astrophys. J.* 1997. 491. P. 993—1008.
80. Sánchez Almeida J. Physical properties of the solar magnetic photosphere under the MISMA hypothesis. III. Sunspot at Disk Center. *Astrophys. J.* 2005. 622. P. 1292—1313.
81. Sánchez Almeida J., Domínguez Cerdeña I., Kneer F. Simultaneous visible and infrared spectropolarimetry of a solar internetwork region. *Astrophys. J.* 2003. 597. P. L177—L180.
82. Sánchez Almeida J., Martínez González M. J. The magnetic fields of the quiet Sun. *ASP Conf. Ser.* 2011. 437. P. 451—469. (Solar Polarization 6. Proceedings of a con-

- ference held in Maui, Hawaii, USA on May 30 to June 4, 2010. Eds J. R. Kuhn et al. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).
83. Semel M. Contribution à l'étude des champs magnétiques dans les régions actives solaires. *Annales d'Astrophysique*. 1967. 30. P. 513—551.
 84. Schlichenmaier R., Collados M. Spectropolarimetry in a sunspot penumbra. Spatial dependence of Stokes asymmetries in Fe I 1564.8 nm. *Astron. and Astrophys.* 2002. 381. P. 668—682.
 85. Schlichenmaier R., Müller D. A. N., Steiner O., Stix M. Net circular polarization of sunspot penumbrae. Symmetry breaking through anomalous dispersion. *Astron. and Astrophys.* 2002. 381. P. L77—L80.
 86. Schlichenmaier R., Soltau D., Lühe O. V. D., Collados M. Penumbral Stokes-V asymmetries of Fe I 1564.8 nm. Advanced Solar Polarimetry — Theory, Observation, and Instrumentation — 20th NSO/Sac Summer Workshop, *ASP Conf. Proc.* 2001. 236. P. 579.
 87. Shchukina N. G., Sukhorukov A. V., Trujillo Bueno J. A Si I atomic model for NLTE spectropolarimetric diagnostics of the 10827 Å line. *Astron. and Astrophys.* 2017. 603. A98. P. 1—16.
 88. Shchukina N. G., Trujillo Bueno J. Determining the magnetization of the quiet Sun photosphere from the Hanle effect and surface dynamo simulations. *Astrophys. J. Lett.* 2011. 731. P. L21—L25.
 89. Shchukina N. G., Trujillo Bueno J. Spectropolarimetric diagnostics of unresolved magnetic fields in the quiet solar photosphere. Solar and Astrophysical Dynamos and Magnetic Activity, *Proc. Inter. Astron. Union, IAU Symp.* 2013. 294. P. 107—118.
 90. Shelyag S., Schüssler M., Solanki S.K., Vögler A. Stokes diagnostics of simulated solar magneto-convection. *Astron. and Astrophys.* 2007. 469. P. 731—747.
 91. Sigwarth M. Properties and origin of asymmetric and unusual Stokes V profiles observed in solar magnetic fields. *Astrophys. J.* 2001. 563. P. 1031—1044.
 92. Socas-Navarro H. Strategies for spectral profile inversion using artificial neural networks. *Astrophys. J.* 2005. 621. P. 545—553.
 93. Socas-Navarro H., Trujillo Bueno J., Ruiz Cobo B. Non-LTE inversion of Stokes profiles induced by the Zeeman effect. *Astrophys. J.* 2000. 530. P. 977—993.
 94. Solanki S. K. Smallscale solar magnetic fields - an overview. *Space Sci. Revs.* 1993. 63. P. 1—188.
 95. Solanki S. K. Sunspots: An overview. *Astron. Astrophys. Rev.* 2003. 11. P. 153—286.
 96. Solanki S. K., Biemont E., Muerset U. Interesting lines in the infrared solar spectrum between 1.49 and 1.8 microns. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1990. 83. P. 307—315.
 97. Solanki S. K., Finsterle W., Rüedi I. The influence of sunspot canopies on magnetic inclination measurements in solar plages. *Solar Phys.* 1996. 164. P. 253—264.
 98. Solanki S. K., Montavon C., Livingston W. Evershed effect in sunspots and their canopies. The magnetic and velocity fields of solar active regions. Astronomical Society of the Pacific Conference Series; *Proc. Inter. Astron. Union (IAU) Colloquium no.* 141. 1993. 46. P. 52.
 99. Solanki S. K., Rüedi I., Livingston W. Infrared lines as probes of solar magnetic features. II - Diagnostic capabilities of Fe I 15648.5 Å and 15652.9 Å. *Astron. and Astrophys.* 1992. 263. P. 312—322.
 100. Solanki S. K., Rüedi I., Livingston W. Infrared lines as probes of solar magnetic features. V - The magnetic structure of a simple sunspot and its canopy. *Astron. and Astrophys.* 1992. 263. P. 339—350.
 101. Solanki S. K., Rüedi I., Rabin D. Siphon flow across the magnetic neutral-line of an active region. The magnetic and velocity fields of solar active regions. Astronomical Society of the Pacific Conference Series; *Proc. Inter. Astron. Union (IAU) Colloquium no.* 141. 1993. 46. P. 534.
 102. Solanki S. K., Walther U., Livingston W. Infrared lines as probes of solar magnetic features. VI. The thermal-magnetic relation and Wilson depression of a simple sunspot. *Astron. and Astrophys.* 1993. 277. P. 639.

103. Solanki S. K., Zayer I., Stenflo J. O. The internal magnetic field structure of solar magnetic elements. Proceedings of the 10th Sacramento Peak Summer Workshop, Sunspot, New Mexico, August 22—26, 1988. Edited by Oskar von der Lühe. Sunspot, MN: National Solar Observatory. 1989. P. 409.
104. Solanki S. K., Zufferey D., Lin H., et al. Infrared lines as probes of solar magnetic features. XII. Magnetic flux tubes: evidence of convective collapse? *Astron. and Astrophys.* 1996. 310. P. L33—L36.
105. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network. *Solar Phys.* 1973. 32. P. 41—63.
106. Stenflo J. O., Solanki S. K., Harvey J. W. Diagnostics of solar magnetic fluxtubes with the infrared line Fe I 15648.54 Å. *Astron. and Astrophys.* 1987. 173. P. 167—179.
107. Sun W.-H., Giampapa M. S., Worden S. P. Magnetic field measurements on the sun and implications for stellar magnetic field observations. *Astrophys. J.* 1987. 312. P. 930—942.
108. Trujillo Bueno J., Asensio Ramos A., Shchukina N. G. The Hanle effect in atomic and molecular lines: A new look at the Sun's hidden magnetism. *ASP Conf. Ser.* 2006. 358. P. 269. (Solar Polarization 4, Proceedings of the conference held 19-23 September, 2005, in Boulder, Colorado, USA. Edited by R. Casini and B. W. Lites).
109. Trujillo Bueno J., Landi Degl'Innocenti E., Belluzzi L. The physics and diagnostic potential of ultraviolet spectropolarimetry. *Space Sci. Revs.* 2017. 210. P. 182—226.
110. Trujillo Bueno J., Shchukina N. G. The scattering polarization of the Sr I lambda 4607 line at the diffraction limit resolution of a 1 m telescope. *Astrophys. J.* 2007. 664. P. L135—L138.
111. Trujillo Bueno J., Shchukina N. G., Asensio Ramos A. A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun. *Nature.* 2004. 430. P. 326—329.
112. Vögler A., Shelyag S., Schüssler M., et al. Simulations of magneto-convection in the solar photosphere. Equations, methods, and results of the MURaM code. *Astron. and Astrophys.* 2005. 429. P. 335—351.
113. Zayer I., Solanki S. K., Stenflo J. O. The internal magnetic field distribution and the diameters of solar magnetic elements. *Astron. and Astrophys.* 1989. 211. P. 463—475.
114. Zayer I., Solanki S. K., Stenflo J. O., Keller C. U. Dependence of the properties of solar magnetic flux tubes on filling factor. II - Results of an inversion approach. *Astron. and Astrophys.* 1990. 239. P. 356—366.
115. Zeeman P. On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance. *Astrophys. J.* 1897. 5. P. 332—347.

Стаття надійшла до редакції 30.08.2017

А. И. Присяжный¹, М. И. Стодилка¹, Н. Г. Щукина²

¹Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко, Львов, Украина

²Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

УСТОЙЧИВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА

Предложена модификация классического метода определения напряженности магнитного поля по расстоянию между положениями пиков синего и красного крыльев V -профиля Стокса магниточувствительной спектральной линии. Для уменьшения влияния шумов и более корректного определения расстояния между положениями пиков наблюдаемый профиль Стокса V был аппроксимирован моди-

фицированной вейвлет-функцией. Оптимальные значения коэффициентов аппроксимационной функции были определены путем многомерной оптимизации. В рамках данного подхода напряженность магнитного поля может быть найдена аналитически по известным коэффициентам аппроксимационной функции. Для тестирования метода были использованы V -профили Стокса спектральной линии нейтрального железа Fe I 1564.8 нм. Профили были синтезированы с использованием трехмерной фотосферной модели магнитоконвекции Ремпеля. Показан результат применения предложенного метода к наблюдаемым V -профилям Стокса. Данный метод менее чувствителен к шумам и форме наблюдаемого сигнала, что позволяет получать более надежные значения напряженности магнитного поля из наблюдений по сравнению с классическим методом определения напряженности поля по расщеплению профиля Стокса V .

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, магнитные поля, диагностика, эффект Зеемана.

A. I. Prysiaznyi¹, M. I. Stodilka¹, N. G. Shchukina²

¹Astronomy Observatory of the Ivan Franko National University, Lviv, Ukraine

²Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ROBUST METHOD FOR DETERMINATION OF MAGNETIC FIELD STRENGTH IN SOLAR PHOTOSPHERE

We modify the classical method for determining the magnetic field strength from the distance between the peaks of blue and red wings of the Stokes V profile of magnetically sensitive spectral line. To reduce the influence of noise and to measure more accurately the distance between these peaks the observed Stokes V profile was approximated by a modified wavelet-function. The parameters of the best fitted approximation function were determined by multidimensional optimization. Following such an approach, the magnetic field strength can be found analytically using these parameters. We investigate the modified method by means of calculations of the Fe I 1564.8 nm Stokes V and I profiles in a three-dimensional snapshot model atmosphere. We used a magneto-convection simulations with small-scale dynamo action performed by Rempel. We find that the method proposed is less sensitive to noise and shape of the observed V -signal of the line. This makes it possible to conclude that our approach of determining of the magnetic field strength from the observed splitting of the Fe I 1564.8 nm Stokes V profile is more reliable in comparison with the classical one.

Keywords: Sun, photosphere, magnetic fields, diagnostic, Zeeman effect.