

УДК 523. 942
PACS number(s): 96-60 FS

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПОГЛИНАЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА В ПЛЯМАХ І ПОЗА НИМИ НА ФРАУНГЕФЕРОВІ ЛІНІЇ У СПЕКТРІ СОНЦЯ

М. Ковальчук, М. Стоділка, М. Гірняк, І. Лаба

*Астрономічна обсерваторія
Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул.Кирила і Мефодія,8, 79005 Львів, Україна
e-mail:hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

Досліджено вплив магнітного поля на фраунгоферові лінії у спектрах спокійних і активних областей на Сонці. Обчислено еквівалентні ширини магніточутливих ліній поглинання в незбуреній фотосфері та в сонячних плямах. Методика розрахунку ґрунтується на розв'язку рівнянь переносу поляризованого випромінювання у разі довільної орієнтації магнітного поля.

Отримано, що еквівалентні ширини ліній поглинання збільшуються з підвищенням напруження магнітного поля, але за великих його значень ($> 2\ 500$ Гс) зазнають насичення. Насичення для сильних ліній настає раніше, а магнітне посилення менше у відсотковому відношенні, ніж для ліній середньої інтенсивності. Це пояснюють тим, що магнітне посилення діє як ефект Доплера та впливає на форму коефіцієнта поглинання, головню, лише в центральній частині лінії, не збільшуючи еквівалентної ширини. Водночас збільшення загасання випромінювання, збільшення турбулентної швидкості, збільшення кута нахилу магнітного поля до спостерігача за межі 50° призводить до зменшення впливу магнітного посилення на еквівалентні ширини ліній поглинання.

Ключові слова: магніточутливі лінії поглинання, сонячні плями, рівняння перенесення поляризованого випромінювання.

Магнітні поля відіграють основну роль у багатьох явищах, що простежуються в атмосфері Сонця. Природа цих явищ не може бути виявлена без детального вивчення сонячних магнітних полів. Однак різні автори часто дають суперечливі відомості щодо властивості магнітних полів, про їх вплив на лінії поглинання у спектрі Сонця тощо. За наявності магнітного поля відбуваються зміни форми профілю фраунгоферової лінії та її еквівалентної ширини. Ці зміни спричиняються зміною коефіцієнта поглинання атомів, що беруть участь в утворенні лінії внаслідок розщеплення або принаймні розширення атомних рівнів магнітним полем.

У статті досліджено вплив магнітного поля на лінії поглинання у спектрах спокійних і активних областей на різних відстанях від центра диска Сонця.

Оскільки магнітні поля завжди орієнтовані довільно відносно спостерігача, то дуже важливо мати коефіцієнти поглинання атомів за довільної орієнтації магнітного поля. З цими промодельованими різними сукупностями коефіцієнтів поглинання ми проводили розрахунки результуючих профілів та еквівалентних ширин магніточутливих ліній поглинання в плямах і поза ними. Після узгодження теоретичних еквівалентних ширин зі спостережуваними визначали фізичні умови в неоднорідній атмосфері Сонця та вплив параметрів поглинаючого середовища на фраунгоферові лінії.

Ми використовували спостережувані дані стосовно еквівалентних ширин фраунгоферових ліній заліза, отриманих у спокійних областях фотосфери та у плямах в центрі сонячного диска, а також недалеко від його краю. Ці дані наведено у працях [1–3]. Фізичні характеристики простежуваних ліній заліза і величини та напрямки магнітних полів відносно спостерігача в плямах і поза ними містяться в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри і простережувані дані ліній заліза, що використовуються в розрахунках цієї роботи

№	λ , Å	EP , V	g	W , mÅ		
				Фотосфера		Плями
				$\mu=1$; $H=0$ гс; $\gamma=0^\circ$	$\mu=0,940$; $H=2\ 700$ гс; $\gamma=20^\circ$	$\mu=0,475$; $H=3\ 400$ гс; $\gamma=61^\circ$
1	4 891,5	2,85	1,30	321	360	372
2	4 903,3	2,88	1,33	135	166	171
3	4 957,3	2,85	1,41	280	310	316
4	5 044,2	2,85	1,50	73	84	92

Позначення, наведені в табл. 1, такі: 1) порядковий номер; 2) λ – довжина хвилі лінії; 3) EP – потенціал збудження нижнього рівня атома; 4) g – фактор Ланде; 5) W – простежувана еквівалентна ширина лінії в спокійній фотосфері у центрі сонячного диска; 6) і 7) простежувана еквівалентна ширина лінії в плямах з різними μ , H , γ , де μ – кут між напрямком променя зору і перпендикуляром до поверхні Сонця; H – напруженість магнітного поля; γ – кут між променем зору і напрямом магнітного поля.

Відмінність фізичних умов у незбуреній сонячній атмосфері та в активних областях (типу плям, протуберанців, спалахів тощо) відображена у зміні інтенсивності простережуваного спектра Сонця. Тому вивчення фізичних характеристик і процесів, які відбуваються в атмосфері Сонця, ґрунтується на аналізі спостережуваного спектра, що описують рівнянням перенесення випромінювання. Точний розрахунок теоретичних профілів чи еквівалентних ширин ліній поглинання у спектрі Сонця потребує знання різних параметрів, одні з яких належать до структури сонячної атмосфери, інші пов'язані з атомами чи іонами, що утворюють цю лінію, ще інші описують взаємодію частинок з полем випромінювання та середовищем.

Дослідження ґрунтується на методі узгодження теоретичних еквівалентних ширин ліній поглинання зі спостережуваними даними. Під час розрахунку теоретичних еквівалентних ширин розв'язували рівняння переносу випромінювання з врахуванням відхилень від локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) в сонячній атмосфері. Були розв'язані два незалежні один від одного рівняння перенесення випромінювання для поляризованого світла внаслідок дії магнітного поля [4]. Ці рівняння перенесення формально відрізняються від звичайних рівнянь для неполяризованого світла числовим коефіцієнтом $1/2$ перед функцією Планка. Обчислюючи профілі чи еквівалентну ширину лінії, ми обрали метод числового інтегрування.

За обчислень еквівалентних ширин ліній незбуреної фотосфери використовувалась найбільш вживану неоднорідну модель сонячної атмосфери – модель Вернацца, Авретта, Лезера -VAL-C [5]. Еквівалентні ширини ліній поглинання в спектрах плям розраховувались в рамках двокомпонентної моделі плям [6].

Вихідні дані: фундаментальна система сил осциляторів, потенціали іонізації та збудження, вміст елементів, фактори Ланде для досліджуваних ліній використовували з каталогу VALD [7].

Коефіцієнт поглинання у неперервному спектрі обчислювали з урахуванням багатьох фізичних процесів, за яких поглинаючі частинки здійснюють зв'язано-вільні і вільно-вільні переходи. Основний вклад у неперервне поглинання в атмосфері Сонця належить водню, головню його нейтральні атоми і від'ємні іони. Крім того, в глибоких шарах сонячної атмосфери неперервне поглинання спричиняється металами, електронним і релєєвським розсіюваннями.

Коефіцієнт поглинання в лінії за довільної орієнтації магнітного поля (в розрахунку на один атом) складається з двох коефіцієнтів, що відповідають двом ортогональним станам поляризації світла і описують поглинання крайніх компонентів розщеплення при поздовжньому ефекті і поглинання незміщеного компонента в поперечному ефекті Зеємана [4]. Ми обчислили атомний коефіцієнт поглинання для низки величин напруження магнітного поля H і його кута нахилу в напрямі до спостерігача γ .

Дуже важливо точно знати параметри загасання під час зіткнень. Під час дослідження механізмів розширення фотосферних ліній і постійних взаємодій в ефектах Штарка і ван дер Ваальса такі відомості обов'язкові, оскільки у фотосфері домінує загасання внаслідок зіткнень. У разі визначення сталої загасання, яка належить як один з параметрів у функцію Фойгта, брали до уваги лише загасання з атомами нейтрального водню γ_6 , оскільки воно є набагато більшим, порівняно із загасанням внаслідок випромінювання і загасанням за умови зіткнення з електронами. Для профілів усіх ліній заліза, як відомо [8], дійсні поправкові множники до сталої загасання становлять $1,5 \gamma_6$. Ми обчислили еквівалентні ширини ліній різної сили – сильних ($W > 200 \text{ mÅ}$) та помірних ($200 > W > 50 \text{ mÅ}$) із такою сукупністю сталих загасання: $1,2 \gamma_6$; $1,5 \gamma_6$ і $2,0 \gamma_6$.

Розподіл мікрошвидкостей взято відповідно до моделей атмосфери і плям на Сонці [5, 6]. Крім того, за при сталої величини напруження магнітного поля ми додатково дослідили залежності еквівалентної ширини ліній від амплітуди мікротурбулентної швидкості (у межах $0,7\text{--}1,5 \text{ км/с}$). Для ліній, що утворюються в центрі диска, $V_{\text{макро}} = 1,85 \text{ км/с}$. Під час наближення до краю диска

глибина утворення лінії дещо зростає, $V_{\text{макро}}$ трохи зменшується до значення $V_{\text{макро}}=1,70$ км/с [8].

З метою оцінення впливу відхилень від ЛТР на інтенсивності випромінювання в лініях, на їхні функції джерела, зрештою, на самі профілі та еквівалентні ширини ліній поглинання, значення цих величин, знайдені для різних положень μ на диску Сонця, порівнювали з відповідними значеннями, розрахованими в наближенні ЛТР.

За магнітне посилення лінії вважають логарифм відношення величини еквівалентної ширини лінії $W_{\text{магн}}$, розщепленої в магнітному полі, до величини еквівалентної ширини цієї ж лінії W за відсутності магнітного поля [9]. Ми виконали розрахунки еквівалентних ширин ліній за відсутності магнітного поля для області незбуреної фотосфери з урахуванням магнітного поля плям ($H=2\ 700$ і $H=3\ 400$ гс). Розрахунки проводили для кутів нахилу магнітного поля до спостерігача, які дорівнюють $\gamma = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ і 90° .

З обчисленими сукупностями коефіцієнтів поглинання в лінії для ряду величин напруження магнітного поля і його кута нахилу в напрямі до спостерігача (див. п. 4.4) обчислюють результуючі профілі та їхні еквівалентні ширини для різних положень центр-край на диску Сонця. Врешті, теоретичні еквівалентні ширини ліній поглинання зіставляють зі спостережуваними даними щоб перевірити правильність застосовуваних теоретичних підходів і припущень.

Розрахунки не-ЛТР теоретичних еквівалентних ширин профілів ліній поглинання і зіставлення їх зі спостережуваними даними у спокійних областях сонячного диска та у плямах наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Зіставлення теоретичних еквівалентних ширин ліній зі спостережуваними даними

№	$\lambda, \text{Å}$	Фотосфера		Плями			
		$\mu=1;$ $H=0;$ $\gamma=0;$		$\mu=0,940;$ $H=2700\text{гс};$ $\gamma=20^\circ$		$\mu=0,475;$ $H=3400\text{гс};$ $\gamma=61^\circ$	
		$W_{\text{спост.}}$	$W_{\text{теор.}}$	$W_{\text{спост.}}$	$W_{\text{теор.}}$	$W_{\text{спост.}}$	$W_{\text{теор.}}$
1	4 891,5	321	317	360	350	372	367
2	4 903,3	135	132	166	149	171	164
3	4 957,3	280	272	310	290	316	305
4	5 044,2	73	70	84	73	92	88

Позначення ті ж, що і в табл.1.

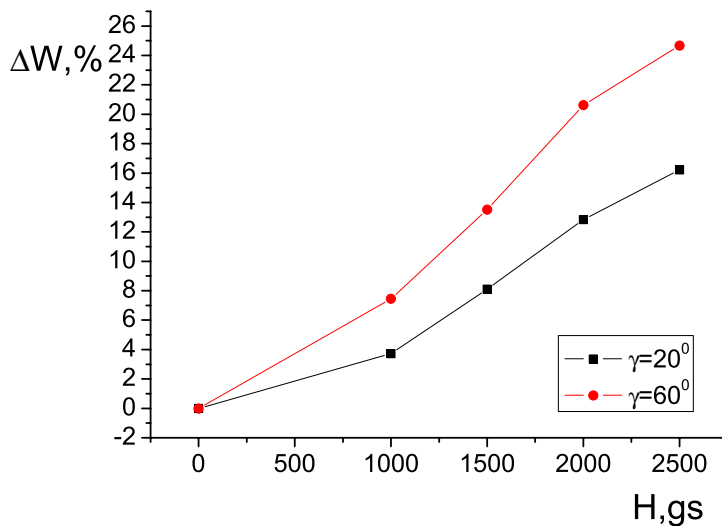


Рис. 1. Зміна еквівалентної ширини лінії FeI λ 5 044,2 Å залежно від величини магнітного поля для кутів $\gamma = 20^\circ$ і $\gamma = 60^\circ$

На рис. 1 зображено криві збільшення еквівалентної ширини лінії FeI λ 5 044,2 Å залежно від величини напруження магнітного поля для $\mu = 0,9$ і для $\gamma = 20^\circ$, $\gamma = 60^\circ$. Як бачимо, еквівалентна ширина зростає сильніше зі збільшенням поля при великому куті γ і досягає зміни на 22% при $H = 2\,500$ гс і при $\gamma = 60^\circ$.

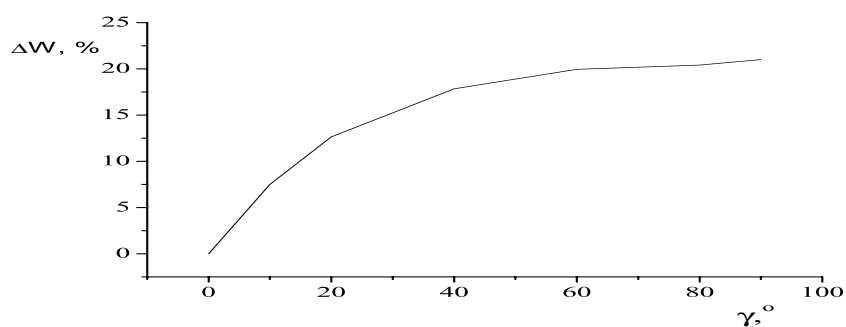


Рис. 2. Зміна еквівалентної ширини лінії FeI λ 5 044,2 Å залежно від кута γ

На рис. 2 показано як змінюється теоретична еквівалентна ширина лінії FeI λ 5 044,2 Å зі зміною γ від 0 до 90° за напруженості магнітного поля у

2 500 Гс. Як видно з рис. 2 теоретична еквівалентна ширина цієї лінії з підвищенням γ неперервно збільшується, причому при зміні γ від 0 до 90° теоретична еквівалентна ширина збільшилась на 25%.

Врешті-решт, ми визначили величину магнітного посилення лінії, щоб з'ясувати вплив параметрів поглинаючого середовища – кількості поглинаючих атомів, інакше кажучи – сили лінії, величини турбулентної швидкості і сталої загасання на еквівалентні ширини фраунгоферових ліній.

Для цього ми обчислили еквівалентні ширини ліній різної сили – сильних ($W > 200 \text{ m}\text{\AA}$) та помірних ($200 > W > 50 \text{ m}\text{\AA}$) з такою сукупністю сталої загасання: $1,2\gamma_6$; $1,5\gamma_6$ і $2,0\gamma_6$. За сталої величини напруження магнітного поля ми дослідили залежність еквівалентної ширини ліній від амплітуди мікротурбулентної швидкості в центрі сонячного диска (в межах 0,7–1,5 км/с).

У таблиці 3 наведено розрахунки еквівалентних ширин ліній для сталої загасання, яка дорівнює $1,5\gamma_6$; для турбулентної швидкості $V_{\text{мікро}} = 1 \text{ км/с}$ та $V_{\text{макро}} = 1,7 \text{ км/с}$ за кутів нахилу магнітного поля до спостерігача, які дорівнюють 0° , 20° і 60° та за величин напруження магнітного поля в 0 Гс; 2 700 Гс та 3 400 Гс.

Позначення ті самі, що і в табл. 1. В колонці 8 наведено величину магнітного посилення ліній $\lg(W_{\text{маг}}/W)$, де $W_{\text{маг}}$ – еквівалентна ширина лінії за наявності магнітного поля, W – без урахування магнітного поля.

Таблиця 3

Залежність еквівалентних ширин ліній від параметрів поглинаючого середовища та магнітне посилення ліній

№	$\lambda, \text{\AA}$	$W_{\text{теорет.}}, \text{m}\text{\AA}$					$\lg W_{\text{магн.}}/W$
		$\mu = 1.0$; $H = 0 \text{ Гс}$; $\gamma = 0^\circ$	$\mu = 0.940$; $H = 2\,700 \text{ Гс}$; $V_{\text{мікро}} = 1 \text{ км/с}$		$\mu = 0.475$; $H = 3\,400 \text{ Гс}$; $V_{\text{мікро}} = 1 \text{ км/с}$; $V_{\text{макро}} = 1,7 \text{ км/с}$		
			$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 60^\circ$	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 60^\circ$	
1	4 891,5	317	350	355	358	367	0,063
2	4 903,3	132	149	159	160	164	0,094
3	4 957,3	272	290	298	300	305	0,050
4	5 044,2	70	73	79	77	88	0,099

Як видно з таблиці, для сильних ліній магнітне посилення менше, ніж для помірних ліній. Це пояснюють тим, що для сильних ліній еквівалентна ширина визначається головню протяжними крилами. Отже, вигляд коефіцієнта поглинання в центрі лінії не суттєво впливатиме на еквівалентну ширину. Магнітне посилення діє як і ефект Доплера, тобто впливає на форму коефіцієнта поглинання, головню, лише в центральній частині лінії.

Отримано, що магнітне посилення лінії зменшується зі збільшенням сталої загасання, а вплив турбулентної швидкості на величину магнітного посилення

протилежне до впливу напруження магнітного поля – тобто за однієї і тієї самої величини H магнітне посилення зменшуватиметься з підвищенням $V_{\text{мікро}}$.

Висновки:

1. Еквівалентні ширини ліній поглинання, які утворюються за наявності магнітного поля, з підвищенням напруження магнітного поля.
2. Збільшення еквівалентної ширини лінії поглинання з підвищенням напруження магнітного поля більше для ліній помірної інтенсивності, ніж для сильних ліній.
3. Зі зміною магнітного поля від 0 до 2 500 гс, еквівалентні ширини ліній помірної інтенсивності збільшуються на 20–25%; для сильних ліній це збільшення досягає всього 10–15%.
4. Збільшення еквівалентної ширини лінії поглинання залежить як від величини напруження магнітного поля, так і від його напрямку γ щодо променя зору, а саме: еквівалентна ширина збільшується з підвищенням γ , причому приблизно до $\gamma = 50^\circ$ це збільшення є досить великим, а далі еквівалентна ширина практично не змінюється, тобто настає насичення.
5. Магнітне посилення для сильних ліній менше, ніж для помірних ліній.
6. Магнітне посилення ліній зменшується зі збільшенням сталої загасання.
7. Вплив мікротурбулентної швидкості на величину магнітного посилення є протилежним до впливу напруження магнітного поля H .

-
1. *Олийник П.А.* К вопросу о теоретическом расчете эквивалентных ширин линий в солнечных пятнах // Солн. данные. 1965. № 11. С. 54–56.
 2. *Solanki S.K.* The origin and the diagnostic capabilities of the Stokes –V asymmetry observed in solar faculae and the network // *Astron. Astrophys.* 1989. Vol. 224. P. 225–241.
 3. *Wiehr E. and Degenhardt D.* Magnetic field strengths in umbral dots // *Astron. Astrophys.* 1993. Vol. 278. P. 584 –588.
 4. *Степанов В.Е.* Коэффициент поглощения атомов в обратном эффекте Зеемана при произвольном направлении магнитного поля // *Изв. КрАО.* 1958. Т. 18. С. 136–150.
 5. *Vernazza J., Avrett E., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* 1981. Vol. 45. N 4. P. 635–725.
 6. *Obridko V.N. and Staude J.* A two component working model for the atmosphere of a large sunspot umbra // *Astron. Astrophys.* 1988. Vol. 189. P. 232–242.
 7. *Piskunov N.E., Kupka F., Ryabchikova T.A., Weiss W.W., Jeffery C.S.* VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* 1995. Vol. 112, N 3. P. 525–535.
 8. *Гуртовенко Э.А., Костык Р.И.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. К.: Наукова думка, 1989.
 9. *Боярчук А.А., Ефимов Ю.С., Степанов В.Е.* Магнитное усиление линий поглощения // *Изв. КрАО.* 1960. Т. 24. С. 52–77.

**INFLUENCE OF PARAMETERS OF ABSORBING MEDIUM IN SPOTS AND
OUTSIDE SPOTS ON FRAUNHOFER LINES IN SOLAR SPECTRUM****M. Koval'chuk, M. Stodilka, M. Hirnyak, I. Laba**

*Astronomical observatory
of the Ivan Franko Lviv National University,
Kyrylo i Mephodii str., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

Influence of magnetic field of fraunhofer lines in spectra of quiet and active ranges of the Sun is investigated. Equivalent widths of magnetosensitive absorption lines in unexciting photosphere and in sunspots are calculated.

Method of calculation was based upon solution of equations of transfer of polarized radiation under arbitrary orientation of magnetic field.

It was found that equivalent widths of absorption lines are increased with growth of magnetic field intensity but with greater values of this field (> 2500 Hs) are tasted the satiation. The satiation for strong lines is approached earlier and magnetic strengthening is lesser in percentage than for lines of middle intensities. It is explained by the fact that magnetic strengthening acts as Doppler effect and influences on the form of absorption coefficient mainly in the central part of line, i.e. does not influence substantially on increasing on equivalent width. Then, the increasing of extinction of radiation, increasing of turbulent velocity and of declination angle of magnetic field to the observer beyond 50° leads to decreasing of influence of magnetic strengthening on equivalent widths of absorption lines.

Key words: magnetosensitive absorption lines, solar spots, equation of transfer of polarized radiation.

Стаття надійшла до редколегії 01.12.2005
Прийнята до друку 26.02.2007