

УДК 523.94  
PACS number(s): 96-60 FS

## АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ РЕЗОНАНСНОЇ ЛІНІЇ КІ $\lambda$ 7699Å НА ДИСКУ СОНЦЯ

**М. Ковальчук, М. Гірняк, М. Стоділка**

*Львівський національний університет ім. І.Франка  
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна  
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

Із урахуванням відхилень від локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) в умовах неоднорідної атмосфери Сонця розглядають утворення нейтральної лінії калію  $\lambda$  7699Å та її поведінку в разі переходу від центра до краю сонячного диску, чим охоплено великий діапазон оптичних глибин сонячної атмосфери. Дослідження ґрунтується на числовому розв'язку рівняння перенесення випромінювання в рамках багатопотокової моделі сонячної атмосфери. Отримані теоретичні профілі лінії КІ  $\lambda$  7699Å узгоджуються зі спостережуваними на диску Сонця. З'ясовано, що за механізм утворення досліджуваної лінії поглинання відповідає спільна дія справжнього поглинання та когерентного і некогерентного розсіяння; досліджено чутливість цієї лінії до температурного розподілу в різних структурних утвореннях у спокійних та активних областях сонячної атмосфери; показано, що врахування ефектів відхилень від ЛТР поліпшує узгодження зі спостереженнями, особливо на краю диску; уточнено хімічний вміст калію на Сонці.

*Ключові слова:* рівняння перенесення нерівноважного випромінювання; профілі ліній поглинання; модель сонячної атмосфери; спокійні та активні утворення.

Аналіз профілів фраунгоферових ліній, як відомо, є важливим методом перевірки теорії утворення ліній поглинання у спектрі Сонця. Тому досягнення узгодженості теоретичних і спостережуваних профілів ліній дає змогу з'ясувати механізми утворення ліній поглинання, врахувати відхилення від локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР), вибрати оптимальну модель сонячної атмосфери, визначити вміст хімічних елементів на Сонці, обчислити оптичні глибини утворення ліній тощо.

З цього погляду особливий інтерес становить вивчення ліній нейтрального калію, оскільки вони мають підвищену чутливість до температури в сонячній атмосфері. Зокрема, при діагностиці високих шарів атмосфери Сонця, де фізичні умови досліджені ще недостатньо, особливо цінну інформацію можна отримати вивчаючи поведінку резонансної лінії калію  $\lambda$  7699Å під час переходу від центра сонячного диску до його краю, чим охоплюється великий діапазон оптичних глибин.

Цю лінію також часто використовують для вимірювання сонячних глобальних осциляцій, оскільки область її утворення розміщена поблизу температурного мінімуму, де вплив грануляції вже малий, а амплітуда осциляцій зростає [1, 2]. Серед інших вибраних фраунгоферових ліній ця лінія калію слугувала для вивчення довгоперіодичних змін ліній протягом 11-літнього циклу сонячної активності [3]. У працях [4, 5] були отримані кількісні оцінки впливу відхилень від ЛТР на населеності рівнів атома калію. У ході спостережень цієї лінії на диску Сонця [6] було обчислено її асиметрію і червоне зміщення в спектрі центра сонячного диску, яке збігається з гравітаційним доплерівським зміщенням. Спостереження профілів лінії КІ  $\lambda 7699\text{\AA}$  від центра до краю сонячного диску в спокійних і активних областях (факельних майданчиках і плямах) описані в роботі [7]; там було з'ясовано, що асиметрія лінії, яка виявляється в плямах, є обернена до тієї, що простежена у спокійних областях.

Теоретична інтерпретація спостережуваного спектра сонячного диску пов'язана з проблемою переходу від глибоких нижніх до верхніх шарів сонячної фотосфери. Отже, потрібно пояснити спостережувану зміну профілів, еквівалентних ширин, півширин, центральних залишкових інтенсивностей ліній під час переходу від центра до краю сонячного диску, тобто визначити механізми формування ліній, що зумовлюють такі зміни.

Метою роботи було інтерпретувати спектральні спостереження резонансної лінії нейтрального калію  $\lambda 7699\text{\AA}$  у спокійних і активних областях неоднорідної структури атмосфери Сонця. Дослідження ґрунтується на числовому розв'язку рівняння перенесення нерівноважного випромінювання у цій лінії і на аналізі поведінки цієї лінії на диску Сонця.

Ми використовували простежувані дані з високим спектральним розділенням, отримані на обсерваторії Кітт-Пік стосовно еквівалентних ширин, півширин, центральних залишкових інтенсивностей лінії КІ  $\lambda 7699\text{\AA}$ , записані у спокійних областях фотосфери та у факельних майданчиках у різних точках сонячного диску; ці дані подано у роботі Бонета та ін. [7]. Спостережувані профілі цієї лінії у центрі ( $\cos \theta = 1$ ) та поблизу лімба ( $\cos \theta = 0,28$ ) опубліковані у Льежському атласі сонячного спектра [8] та у роботі Щукіної [4], відповідно.

У табл. 1 подано середні значення фізичних параметрів спостережуваної лінії від центра до краю сонячного диску (стовпець 1) в спокійних областях та у факелах – центральні залишкові інтенсивності (стовпці 2, 3), еквівалентні ширини (стовпці 4, 5) та півширини лінії (стовпці 6, 7).

Як бачимо з табл. 1, центральні залишкові інтенсивності лінії переважно зростають у напрямі до краю сонячного диска, причому в факельних майданчиках вони є значно вищі порівняно зі спокійними областями. Це ж саме стосується і росту еквівалентних ширин ліній у цьому ж напрямі, що зумовлене суттєвим збільшенням півширини лінії від центра до краю диска.

На основі розв'язку рівняння перенесення нерівноважного випромінювання в неоднорідній атмосфері Сонця були обчислені теоретичні профілі і еквівалентні ширини лінії поглинання нейтрального калію в спектрі Сонця. Точний розрахунок потребує знання різних параметрів, одні з яких стосуються структури сонячної атмосфери, інші пов'язані з атомними характеристиками цієї лінії, решта описують взаємодію відповідного роду частинок із полем випромінювання та середовищем.

Таблиця 1

Фізичні параметри спостережуваної лінії КІ  $\lambda$  7699Å при переході від центра до краю сонячного диска

cos $\theta$	$r_{\lambda}$ , %		$W$ , mÅ		$h_{1/2}$ , mÅ	
	Спок.фот.	Факел	Спок.фот.	Факел	Спок.фот.	Факел
1	2	3	4	5	6	7
1,00	0,179	0,249	159	156	158	179
0,93	–	0,243	–	160	–	182
0,90	0,186	–	161	–	168	–
0,85	0,179	0,244	164	176	169	200
0,80	0,184	–	165	–	171	–
0,70	0,186	0,234	166	166	173	190
0,60	0,182	–	169	–	180	–
0,57	–	0,249	–	185	–	220
0,50	0,183	–	175	–	182	–
0,40	0,180	0,229	176	208	182	238
0,30	0,183	0,252	179	217	192	258
0,20	0,185	–	186	–	208	–
0,10	0,186	–	195	–	218	–

Розрахунки профілів та еквівалентних ширин лінії КІ  $\lambda$  7699Å ми проводили в тих точках сонячного диска, де були отримані спостережувані дані, а саме:  $\mu = \cos \theta = 1,00$ ; 0,93; 0,90; 0,85; 0,80; 0,70; 0,60; 0,57; 0,50; 0,40; 0,30; 0,20 і 0,10. Узгодження теоретичних розрахунків із спостереженнями дає змогу перевірити правильність застосовуваних теоретичних підходів і припущень.

а) Модель атмосфери Сонця. Розрахунки проводили з використанням відомої багатопотокової моделі сонячної атмосфери VAL [9] – в рамках середнього потоку С і гарячого потоку Е.

б) Інші вихідні дані: фундаментальна система сил осциляторів, потенціали збудження та іонізації використовувались з каталогу VALD [10]; вміст елемента калію на Сонці взято із роботи [11], де його значення дорівнює 5,08 dex в логарифмічній шкалі, де ( $\lg N_H = 12$ ).

в) Обчислення коефіцієнтів поглинання.

1) Коефіцієнт поглинання у неперервному спектрі обчислювали з урахуванням багатьох фізичних процесів, за яких поглинаючі частинки здійснюють зв'язано-вільні і вільно-вільні переходи. Основний внесок у неперервне поглинання в атмосфері Сонця належить водню, переважно його нейтральні атоми та від'ємні іони, крім того, в глибоких шарах сонячної атмосфери неперервне поглинання спричиняється металами, електронним і релеєвським розсіянням.

2) Коефіцієнт поглинання в лінії описували фойгтівським профілем, який є згортою дисперсійного й гаусового профілів. При визначенні постійної загасання, що входить як один з параметрів у функцію Фойгта враховували лише постійну загасання, зумовлену взаємодією з атомами нейтрального водню  $\gamma_6$ , оскільки вона є набагато більшою порівняно із постійними загасаннями внаслідок випромінювання і зіткнень з

електронами. Ми обчислювали профілі і еквівалентні ширини лінії КІ  $\lambda 7699\text{\AA}$  з поправковим множником до сталої загасання  $1,5 \gamma_6$ .

г) Мікро- і макротурбулентна швидкості. Розподіл поля мікрошвидкостей взято відповідно до моделі VAL [9]. Зміну макротурбулентної швидкості від центра до краю диска брали з роботи [4]  $v_{\text{макро}} = 1,8 - 2,0$  км/с для центра диска і 2,5 км/с – для краю.

д) Розв'язок рівняння перенесення випромінювання. У нашій статті ми звернулися до класичного трактування проблеми нерівноважного переносу випромінювання у лінії: механізмом утворення лінії є комбінація справжнього поглинання та когерентного і некогерентного розсіяння [12]. Вхідна формула для інтенсивності випромінювання, що виходить з атмосфери Сонця під кутом  $\theta$  до нормалі, така:

$$I_{\lambda}(0, \mu) = \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\tau_{\lambda}) e^{-\tau_{\lambda}/\mu} \frac{d\tau_{\lambda}}{\mu}, \quad (1)$$

де  $\mu = \cos \theta$ ;  $\tau_{\lambda}$  – повна оптична глибина (лінія плюс континуум), тобто  $\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda}^l + \tau_{\lambda}^c$ , де  $\tau_{\lambda}^l$  і  $\tau_{\lambda}^c$  виражені через стандартну оптичну глибину на довжині хвилі  $\lambda = 5000\text{\AA}$ :

$$\tau_{\lambda}^c = \int_0^{\tau_{5000}} \frac{k_{\lambda}}{k_{5000}} d\tau_{5000}; \quad \tau_{\lambda}^l = \int_0^{\tau_{5000}} \frac{\alpha_{\lambda}}{k_{5000}} d\tau_{5000},$$

де  $k_{\lambda}$  і  $\alpha_{\lambda}$  – коефіцієнти поглинання в континуумі та в лінії.

У цьому загальному випадку функцію джерела  $S_{\lambda}(\tau_{\lambda})$  можна подати як лінійну комбінацію функції Планка  $B_{\lambda}$  і середньої інтенсивності  $J_{\lambda}$ , взятих із вагами, що відповідають коефіцієнтам неперервного поглинання  $k_{\lambda}$  і поглинання в лінії  $\alpha_{\lambda}$  за відсутності розсіяння, істинному коефіцієнту поглинання всередині лінії  $k_{\lambda}^0$  і коефіцієнту розсіяння всередині лінії  $\alpha_{\lambda}^0$ :

$$S_{\lambda}(\tau_{\lambda}) = \frac{k_{\lambda} + k_{\lambda}^0}{k_{\lambda} + k_{\lambda}^0 + \alpha_{\lambda}^0} B_{\lambda}(\tau_{\lambda}) + \frac{\alpha_{\lambda}^0}{k_{\lambda} + k_{\lambda}^0 + \alpha_{\lambda}^0} J_{\lambda}(\tau_{\lambda}), \quad (2)$$

причому  $k_{\lambda}^0 = \epsilon_{\lambda} \alpha_{\lambda}$  і  $\alpha_{\lambda}^0 = (1 - \epsilon_{\lambda}) \alpha_{\lambda}$ .

Величина  $\epsilon_{\lambda}$  засвідчує, яка частина селективно поглинутої енергії перетворює на теплову, а яка буде перевипромінена у вигляді розсіяння.

У випадку когерентного розсіяння інтенсивність, усереднена за всіма напрямками, визначається інтегральним рівнянням:

$$J_{\lambda}(\tau_{\lambda}) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\tau_{\lambda}') E_i(|\tau_{\lambda} - \tau_{\lambda}'|) d\tau_{\lambda}' \quad (3)$$

З метою врахування некогерентності розсіяння інтенсивність  $J_{\lambda}(\tau_{\lambda})$  усереднюється ще і за профілем коефіцієнта поглинання [13]:

$$\langle J_{\lambda}(\tau_{\lambda}) \rangle = \frac{\int_{-\lambda}^{\lambda} J_{\lambda}(\tau_{\lambda}) k_{\lambda}(\tau_{\lambda}) d\lambda}{\int_{-\lambda}^{\lambda} k_{\lambda}(\tau_{\lambda}) d\lambda}. \quad (4)$$

Рівняння (3) ми розв'язували методом ітерацій. За нульове наближення приймали функцію Планка. Це дає змогу обчислити середню інтенсивність  $J_\lambda(\tau_\lambda)$ , або з врахуванням некогерентного розсіяння –  $\langle J_\lambda(\tau_\lambda) \rangle$ . Підставляючи (3) або (4) у вираз (2), отримуємо перше наближення функції джерела  $S_\lambda(\tau_\lambda)$  і тощо. За такого комплексного підходу до проблеми утворення ліній розв'язок рівняння перенесення (1) отримували після трьох-чотирьох послідовних наближень. Залежність поведінки функції джерела в лінії  $S_\lambda$  і функції Планка  $B$  в неперервному спектрі та їх відношення  $S_\lambda/B$  від оптичної глибини в атмосфері Сонця зображені на рис. 1.

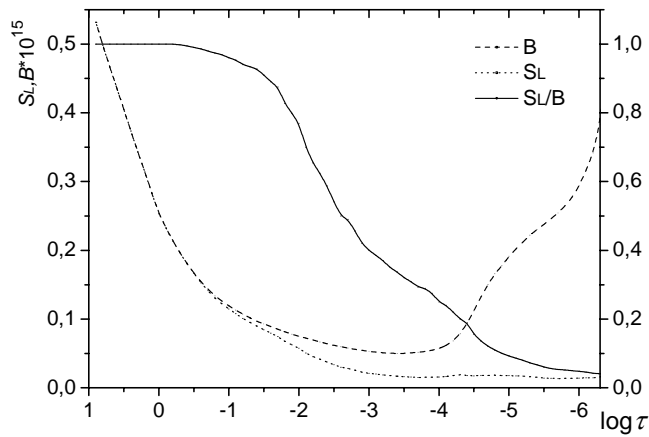


Рис. 1. Залежність  $S_\lambda$ ,  $B$  та  $S_\lambda/B$  від оптичної глибини в сонячній атмосфері для КІ  $\lambda 7699\text{\AA}$

е) Оцінка величини  $\epsilon_\lambda$ . Величина  $\epsilon_\lambda$  пов'язана з процесами, унаслідок яких атом залишає збуджений стан. Цими процесами можуть бути розсіяння та істинне поглинання. У граничних випадках, тобто коли допускається дія тільки одного з двох механізмів утворення ліній,  $\epsilon_\lambda$  набуває таких значень:  $\epsilon_\lambda = 1$  при істинному поглинанні та  $\epsilon_\lambda = 0$  при розсіянні. Для оцінки  $\epsilon_\lambda$  при спільній дії обох механізмів утворення ліній, потрібно визначити переходи із збудженого рівня атома, що супроводжуються або розсіянням, або істинним поглинанням. Зупинимось на моделі дворівневого атома з континуумом. Ця модель задовільно описує фізичні процеси, що супроводжують утворення ліній [14].

Процесу розсіяння відповідають радіативні переходи, за яких енергія кванта повертається у поле випромінювання з довжиною хвилі цієї лінії. Це переходи з вищерозміщеного збудженого рівня  $k$  на нижній рівень  $i$  (для резонансних ліній нижній рівень  $i$  збігається з основним). За одиницю часу в одиниці об'єму відбувається  $n_k A_{ki}$  спонтанних і  $n_k B_{ki} \bar{J}_{ki}$  вимушених переходів, що зумовлюють розсіяння.

Процесу істинного поглинання відповідають такі типи переходів:

- 1) переходи внаслідок співударів II роду; їх число в одиниці об'єму в одиничному інтервалі часу дорівнює  $n_k n_e C_{ki}$ ;

2) переходи внаслідок іонізації електронним ударом і переходи під дією фотоіонізації і в розрахунку на одиничний об'єм і одиничний інтервал часу; їх число дорівнює, відповідно,  $n_k n_e C_{kf}$  і  $n_k B_{kf} \bar{J}_{kf}$ .

Отже, доля числа переходів, що відповідає процесам істинного поглинання від повного числа переходів, тобто  $\varepsilon_\lambda$ , подаємо співвідношенням:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{n_k n_e C_{ki} + n_k n_e C_{kf} + n_k B_{kf} \bar{J}_{kf}}{n_k A_{ki} + n_k B_{ki} \bar{J}_{ki} + n_k n_e C_{ki} + n_k n_e C_{kf} + n_k B_{kf} \bar{J}_{kf}}.$$

Тут  $A_{ki}$  і  $B_{ki}$  – ейнштейнівські коефіцієнти спонтанного і вимушеного випромінювання;  $C_{ki}$  і  $C_{kf}$  – коефіцієнти, що пов'язані з ефективними перерізами збудження та іонізації,  $B_{kf} \bar{J}_{kf}$  – величина, що визначає число фотоіонізацій, вона залежить від середньої інтенсивності випромінювання  $\bar{J}_{kf}$ . З метою отримання порядкової оцінки числа різних переходів використовуємо для цих величин такі вирази [15]:

$$A_{ki} = \frac{g_i}{g_k} \cdot \frac{8\pi}{m_e c^3} \frac{e^2 v_{ik}^2}{\omega_{ik}} \cdot f_{ik};$$

$$B_{ki} = \frac{c^2}{2h\nu_{ik}^3} A_{ki};$$

$$C_{ki} = \frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \frac{e^2 c^3 m_e A_{ki}}{h\nu_{ik}^3 (2\pi m_e kT_e)^{1/2}} \cdot P\left(\frac{h\nu_{ik}}{kT_e}\right);$$

$$B_{kf} \bar{J}_{kf} = \frac{2^9 \pi^5 e^{10} m_e Z^4}{3\sqrt{3} c^3 h^6 i^5} \cdot J^*\left(\frac{h\nu_{kf}}{kT_e}\right).$$

Усі позначення фізичних і атомних параметрів загальноприйнятих функцій  $P(X)$  і  $J^*(X)$  обчислюють за формулами:

$$P(X) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \left[ 1 - X e^X \int_X^\infty e^{-x} \frac{dx}{x} \right]$$

*i*

$$J^*(X) = \int_X^\infty \frac{dx}{x(e^x - 1)}.$$

Обчислення  $\varepsilon_\lambda$  для деяких оптичних глибин середнього  $C$  (а) і гарячого  $E$  (б) потоків моделі сонячної атмосфери VAL [9] наведені в табл. 2.

Значення  $\varepsilon_\lambda$  є в межах від 1 – в області глибокої фотосфери до 0 – в області нижньої хромосфери.

Таблиця 2

Значення величини  $\varepsilon_\lambda$  для деяких оптичних глибин у середньому  $C$  (а) і гарячому  $E$  (б) потоках моделі сонячної атмосфери VAL

а

№ точки в потоці моделі VAL	Потік С					
	$h$ , км	$\tau_{5000}$	$\lg \tau_{5000}$	$T_e$ , °K	$n_e$	$\varepsilon_\lambda$
1	2	3	4	5	6	7
42	515	3,014-04*	-3,521	4170	2,495+11	0,007
43	450	1,017-03	-2,990	4228	4,516+11	0,035
44	350	5,626-03	-2,250	4465	1,110+12	0,0941
45	250	2,670-02	-1,573	4700	2,674+12	0,203
46	150	1,117-01	-0,952	5180	6,476+12	0,320
47	100	2,201-01	-0,657	5455	1,066+13	0,543
48	50	4,395-01	-0,357	5840	2,122+13	0,860
49	0	9,953-01	-0,002	6420	6,433+13	0,900
50	-25	1,603+00	+0,523	6910	1,547+14	0,912
51	-50	3,338+00	+0,523	7610	4,645+14	0,927
52	-75	7,665+00	+0,884	8320	1,204+15	0,958

\*3,014-04=3,014·10<sup>-4</sup>.

б

№ точки в потоці моделі VAL	Потік E					
	$h$ , км	$\tau_{5000}$	$\lg \tau_{5000}$	$T_e$ , °K	$n_e$	$\varepsilon_\lambda$
1	2	3	4	5	6	7
42	515	3,240-04*	-3,495	4350	2,664+11	0,005
43	450	9,844-04	-3,007	4360	4,736+12	0,041
44	350	5,393-03	-2,268	4520	1,135+12	0,096
45	250	2,617-02	-1,582	4795	2,690+12	0,232
46	150	1,113-01	-0,953	5175	6,475+12	0,415
47	100	2,202-01	-0,657	5450	1,064+13	0,650
48	50	4,403-01	-0,356	5840	2,125+13	0,866
49	0	9,975-01	-0,001	6420	6,441+13	0,900
50	-25	1,687+00	+0,227	6910	1,549+14	0,918
51	-50	3,347+00	+0,525	7610	4,650+14	0,930
52	-75	7,466+00	+0,873	8320	1,206+14	0,960

\*3,240-04=3,240·10<sup>-4</sup>.

є) Оцінка впливу відхилень від ЛТР на фізичні параметри лінії нейтрального калію. Щоб оцінити вплив відхилень від ЛТР на інтенсивності випромінювання  $J_\lambda(\mu)$ , на функції джерела в лініях  $S_\lambda(\mu)$ , на центральні залишкові інтенсивності  $r_0(\mu)$ , на профілі  $r(\mu)$  і на еквівалентні ширини  $W_\lambda(\mu)$  лінії нейтрального калію, значення цих величин, знайдені для різних положень  $\mu$  на диску Сонця, порівнювали з відповідними значеннями, обчисленими в наближенні ЛТР. Відношення населеностей рівнів під час відхилення збудження атомів від рівноважного стану записують так:

$$\frac{n_l}{n_u} = \frac{b_l}{b_u} \cdot \frac{g_l}{g_u} e^{\chi_l / kT_e}$$

Тут  $b_u, b_l$  і  $g_u, g_l$  – коефіцієнти відхилень від рівноважного стану і статистичні ваги, відповідно, верхнього і нижнього рівнів переходу,  $\chi_l$  – потенціал збудження. Відомо, що функція джерела в лінії пов’язана з відношенням населеностей цього рівня переходу таким співвідношенням [14]:

$$\frac{n_l}{n_u} = \frac{g_l}{g_u} \left( \frac{2hc^2}{\lambda^5} + S_\lambda(\tau_\lambda) \right) / S_\lambda(\tau_\lambda)$$

Отримані результати. У табл. 3 приведені спостережувані і теоретичні ЛТР та не-ЛТР центрально залишкові інтенсивності  $r_{\lambda_0}$  та еквівалентні ширини  $W_\lambda$  лінії КІ  $\lambda 7699\text{\AA}$ , розраховані від центра ( $\mu = 1$ ) до краю ( $\mu = 0,10$ ) сонячного диска в спокійних областях та у факельних майданчиках.

Таблиця 3

Зіставлення теоретичних і спостережуваних фізичних параметрів лінії КІ  $\lambda 7699 \text{\AA}$  під час переходу від центра до краю сонячного диска в спокійних областях (а) і факельних майданчиках (б)

а

Спокійна фотосфера, потік С						
cos $\theta$	$r_{\lambda_0}$ %			$W_\lambda$ , m $\text{\AA}$		
	Спо-стер.	ЛТР	не-ЛТР	Спо-стер.	ЛТР	не-ЛТР
1	2	3	4	5	6	7
1,00	0,179	0,268	0,181	159	139	157
0,93	–	–	–	–	–	–
0,85	0,179	0,295	0,189	164	132	163
0,80	0,184	0,310	0,203	165	126	168
0,70	0,186	0,434	0,208	166	117	179
0,60	0,182	0,356	0,213	169	98	182
0,57	–	–	–	–	–	–
0,40	0,180	0,393	0,217	176	87	187
0,30	0,183	0,435	0,220	179	71	192
0,10	0,186	0,529	0,226	195	65	200



б

cos $\theta$	Факельні площадки, потік E					
	$r_{\lambda_0}$ %			$W_{\lambda}$ , mÅ		
	Спо- стер.	ЛТР	Не- ЛТР	Спо- стер.	ЛТР	Не- ЛТР
1	2	3	4	5	6	7
1,00	0,249	0,295	0,252	156	130	153
0,93	0,243	0,302	0,258	160	118	158
0,85	0,244	0,343	0,264	176	101	164
0,80	–	–	–	–	–	–
0,70	0,234	0,386	0,270	166	98	175
0,60	–	–	–	–	–	–
0,57	0,249	0,405	0,272	185	87	183
0,40	0,229	0,478	0,275	208	76	188
0,30	0,252	0,498	0,279	217	63	196
0,10	–	–	–	–	–	–

Аналіз результатів цих досліджень дає змогу діагностувати фізичний стан сонячної атмосфери – як в незбуреній фотосфері, так і у факельних майданчиках.

1. Для спостережуваних профілів лінії КІ  $\lambda$  7699Å під час переходу від центра до краю сонячного диска як у спокійній фотосфері, так і у факелах виявлено збільшення центральних залишкових інтенсивностей (відсутність насичення) ліній та їх еквівалентних ширин.
2. В усіх випадках (як у центрі, так і на краю диска) відмінність профілів лінії у факелі від профілів у незбуреній фотосфері досить значна, що свідчить про чутливість цієї лінії до температурного розподілу в різних структурних утвореннях та в спокійній фотосфері. Такі ж відмінні між собою профілі лінії у факелі і в фотосфері були отримані теоретично.
3. В еквівалентних ширинах ліній в області спокійної фотосфери і в активних утвореннях таких відмінностей не простежено. Ця близькість еквівалентних ширин ліній у факелі та у спокійній фотосфері є наслідком збільшення півширини лінії  $\Delta h_{1/2}$  у факелі порівняно з фотосферою (див. табл. 1), що пояснюється протилежною дією двох факторів: збільшенням температури у верхніх шарах факела та одночасним зменшенням градієнта температури у факелі відносно фотосфери. Саме таким є хід температури у потоках С і Е моделі VAL.
4. Оскільки розподіл поля мікротурбулентних швидкостей у цих двох потоках моделі VAL однаковий на висотах, де формується лінія нейтрального калію  $\lambda$  7699Å, то вплив турбулентності на півширину лінії, а тим паче на еквівалентну ширину, є слабким або відсутнім.
5. Найвні суттєві розбіжності між спостережуваними профілями  $r_{\lambda}$ , центральними залишковими інтенсивностями  $r_{\lambda_0}$ , еквівалентними ширинами  $W_{\lambda}$  та їхніми теоретичними значеннями, що ґрунтуються на розрахунках у допущенні ЛТР, причому ці розбіжності значно збільшуються під час переходу до краю сонячного диска (табл. 3). Врахування ефектів відхилення від ЛТР у лініях набагато поліпшує

узгодження із спостереженнями центр-край (табл. 3 ). Але цілковитого узгодження досягнути не вдається, особливо на краю диска.

6. Показано, що для коректної інтерпретації профілів резонансної лінії калію та їх зміни на сонячному диску при переході центр-край важливо враховувати спільну дію механізмів утворення ліній – істинного поглинання, когерентного і некогерентного розсіяння та відхилення від рівноважного стану в населеностях енергетичних рівнів атомів.
7. На рівні шарів, найбільшим внеском в утворення досліджуваної лінії калію, значення  $\epsilon_\lambda$ , що показує, яка частина селективно поглинутої енергії атомами, які утворюють цю лінію, перетворює в теплову, а яка буде перевипромінена у вигляді розсіяння, що дорівнює 0. Ці значення залежно від висоти в атмосфері наведені у табл. 2.
8. У глибоких шарах атмосфери Сонця тип поведінки функції джерела  $S_\lambda$  і функції Планка  $B$  збігаються і відображають температурний хід моделі атмосфери: відхилення  $S_\lambda$  від  $B$  починається з  $\tau_{\lambda,5000} < 1$ , а відношення  $S_\lambda / B$  стає меншим від 1 і прямує до 0 в області нижньої хромосфери. Цим самим підтверджується вплив не-ЛТР ефектів на фраунгоферові лінії.
9. Поток  $C$  і  $E$  моделі сонячної атмосфери VAL досить добре описують профілі поглинання лінії калію в спокійній фотосфері та у факельних майданчиках на сонячному диску, що дає змогу отримати цінну інформацію про фізичний стан речовини сонячної атмосфери на різних глибинах.

У рамках моделі VAL теоретичні профілі лінії нейтрального калію  $\lambda 7699\text{\AA}$  добре узгоджуються із спостережуваними при значенні хімічного вмісту калію, рівному 5,08 dex.

- 
1. *Palle H.L., Perez J.C., Regulo C., Roca Cortes T. et al.* The global oscillation spectrum of the Sun. I. Analysis of daily power spectra of velocity measurements // *Astron. Astrophys.* 1986. Vol. 169. N 1–2. P. 313–318.
  2. *Gomez M.T., Severino G., Rutten R.J.* Photospheric dynamics and the NLTE formation of the solar KI  $\lambda 769,9$  nm line // *Astron. Astrophys.* 1991. Vol. 244. N 2. P. 501–511.
  3. *Кохан Е.К., Крам В.А.* Долгопериодические изменения центральной интенсивности, полуширины и эквивалентной ширины избранных фраунгоферовых линий // *Изв. ГАО.* 1991. Т. 244. N 2. С. 501–511.
  4. *Щукина Н.Г.* Эффекты отклонения от локально-термодинамического равновесия во фраунгоферовом спектре Солнца. Резонансная линия KI  $\lambda 769,9$  нм // *Кинематика и физика небесных тел.* 1987. Т. 3. №2. С. 40–48.
  5. *Bruls J.H.M.J., Rutten R.J., Shchukina N.G.* The formation of helioseismology lines. I-NLTE effects in alkali spectra // *Astron. Astrophys.* 1992. Vol. 265. N 1. P. 237–256.
  6. *Гасаналидзе А.Г.* Исследование асимметрии и красного смещения линии 7699 $\text{\AA}$  калия в спектре Солнца // *Солн. дан.* 1979. №7. С. 85–91.
  7. *Bonet J.A., Marquez I., Vazquez M., Wöhl H.* Temporal and center-to-limb variations of the KI 769.9 nm line profiles in quiet and active solar regions // *Astron. Astrophys.* 1988. Vol. 198. N 1/2. P. 322–330.
  8. *Delbouille L., Neven L., Roland G.* Photometric atlas of the solar spectrum from  $\lambda 3000\text{\AA}$  to  $\lambda 10\,000\text{\AA}$ . – Liege: Institut d’Astrophysique de l’Universite de Liege. 1973.

9. Vernazza J., Avrett E., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III. Models of EUV brightness of the quiet Sun // *Astron. J. Suppl. Ser.* 1981. Vol. 45. N 4. P. 635–725.
10. Piskunov N.E., Kupka F., Ryabchikova T.A. et al. VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1995. Vol. 112. N 3. P. 525–535.
11. Asplund M. The solar chemical composition // *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis ASP Conference Series*, 2005. Vol. XXX. P. 1–14.
12. Бабий Б.Т., Ковальчук М.М. Сочетание поглощения и рассеяния как механизма образования фраунгоферовых линий в спектре Солнца // *Проблемы космической физики*. 1981. Вып. 16. С. 34–37.
13. Гиббсон Э. Спокойное Солнце. М.: Мир, 1977. 408 с.
14. Михалас Д. Звездные атмосферы в 2-х томах. М.: Мир, 1982. 774 с.
15. Иванов В.В. Перенос излучения и спектры небесных тел. М.: Наука, 1969. 472 с.

### ANALYSIS OF BEHAVIOUR OF RESONANCE LINE KI $\lambda$ 7699Å ON THE SOLAR DISK IN QUIET AND ACTIVE REGIONS

**M. Koval'chuk, M. Hirnyak, M. Stodilka**

*Ivan Franko National University of Lviv  
Kyryla and Mefodia Str., 8, UA – 79005 Lviv  
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

The formation of neutral line KI  $\lambda$  7699Å and her behaviour by passage from centre to limb are considered with accounting of deviations from local thermodynamical equilibrium (LTE) in condition of inhomogeneous atmosphere of the Sun. The investigation is based on numerical solving of radiation transfer equation in limits of multilayer model of solar atmosphere. Received theoretical profiles of line KI  $\lambda$  7699Å are agree with observed profiles on solar disk. It is examined that common influence of true absorption and coherent and noncoherent scattering are corresponding for the mechanism of formation of that absorption line. The sensivity of this line to thermal distribution in different structured creations in quiet and active regions of solar atmosphere is studied. It is shown that accounting non-LTE improves agreement with observations especially on the limb. The chemical KI abundance on the Sun is improved.

*Key words:* equation of nonequilibrium emission transfer; profiles of absorption lines; model of solar atmosphere; quiet and active regions.

**АНАЛІЗ ПОВЕДЕННЯ РЕЗОНАНСНОЇ ЛІНІЇ КІ  $\lambda$  7699Å  
НА ДИСКЕ СОЛНЦА****М. Ковальчук, М. Гирняк, М. Стодилка**

*Астрономическая обсерватория  
Львовского национального университета им. И. Франко  
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 Львов, Украина  
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv*

С учетом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР) в условиях неоднородной атмосферы Солнца рассматривается образование нейтральной линии калия  $\lambda$  7699Å и ее поведение при переходе от центра к краю солнечного диска, чем охвачен большой диапазон оптических глубин солнечной атмосферы. Исследование базируется на числовом решении уравнения переноса излучения в рамках многопоточковой модели солнечной атмосферы. Полученные теоретические профили КІ  $\lambda$  7699Å согласовываются с наблюдаемыми на диске Солнца. Выяснено, что за механизм образования исследуемой линии поглощения отвечает общее действие истинного поглощения и когерентного и некогерентного рассеяния; исследована чувствительность этой линии к температурному распределению в разных структурных образованиях в спокойных и активных областях солнечной атмосферы; показано, что учет эффектов отклонений от ЛТР улучшает согласование с наблюдениями, особенно на краю диска; уточнен химический состав калия на Солнце.

*Ключевые слова:* уравнение переноса неравновесного излучения; профили линий поглощения; модель солнечной атмосферы; спокойные и активные образования.

Стаття надійшла до редколегії 25.12.2008  
Прийнята до друку 20.07.2009