

УДК 523.98
PACS 95.85 Bh

ДІАГНОСТИКА СОНЯЧНОЇ АТМОСФЕРИ МЕТОДОМ МУЛЬТИПЛЕТНИХ ЛІНІЙ

М. Ковальчук¹, Р. Рикалюк², М. Гірняк¹

¹ Львівський національний університет імені Івана Франка
Астрономічна обсерваторія
вул. Кирила і Мефодія 8, м. Львів, 79005, Україна
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua

² Львівського національного університету імені Івана Франка
Центр інформаційних технологій і дистанційного навчання
вул. Університетська, 1, м. Львів, 79000, Україна

Проведена інтерпретація спектральних спостережень високороздільних профілів ліній поглинання інфрачервоного мультиплету вуглецю поблизу $\lambda 10700 \text{ \AA}$ у різних точках сонячного диску. Співставлення теоретичних нерівноважних профілів зі спостережуваними дало змогу діагностувати фізичні умови в сонячній атмосфері. При розрахунках використано метод мультиплетних ліній. Отримано вміст вуглецю на Сонці, макро- і мікротурбулентні швидкості на різних оптичних глибинах, функції джерела кожної лінії мультиплету в рамках моделі спокійної атмосфери Сонця VAL-C, частотну залежність всередині кожної лінії, коефіцієнти селективного поглинання і випромінювання, досліджено чутливість цих ліній до температурної структури сонячної атмосфери.

Ключові слова: фізичні умови в сонячній атмосфері, вміст хімічних елементів, рівняння переносу випромінювання.

Дослідження спектру поглинання вуглецевих ліній становить значний астрофізичний інтерес, пов'язаний з побудовою реалістичних моделей сонячної атмосфери, зокрема в області температурного мінімуму.

Як відомо, виділення енергії у сонячному ядрі забезпечується двома процесами термоядерного синтезу, як *pp*-процесом, так і азотно-вуглецевим циклом. У спектрі Сонця дуже помітними є інфрачервоні лінії вуглецевого мультиплету поблизу довжин хвиль $\lambda 10700 \text{ \AA}$; їх інтенсивність зумовлена або високим вмістом вуглецю, або ж невеликою загальною непрозорістю атмосфери в цій області. Ці лінії мають високі потенціали збудження $\sim 7.4 \text{ eV}$, тому вони особливо чутливі до змін температури, тиску, густини і можуть слугувати індикаторами цих змін, що набирає великої ваги при діагностиці сонячної атмосфери, особливо верхніх шарів фотосфери. Більше того, досліджувати фізичні умови на Сонці за лініями вуглецю доцільно ще й з тієї

причини, що вони утворюються в широкому діапазоні висот, що відображається у зміні профілів цих ліній від центра сонячного диску до краю.

У роботі проведена інтерпретація високоякісних спостережень інфрачервоного мультиплету (ГЧ) атома вуглецю поблизу області $\lambda 10700 \text{ \AA}$, отриманих на сонячному спектрографі Львівського інституту астрофізики [1]. Спостереження отримані в областях незбуреної фотосфери в різних точках сонячного диску: $\cos \theta = 1.00; 0.75; 0.60; 0.50; 0.40; 0.30$ (θ - кут між напрямом випромінювання і нормаллю до центра сонячного диску) . У таблиці 1 подані основні атомні характеристики СІ-мультиплету.

Табл. 1: Основні атомні характеристики СІ-мультиплету

$\lambda, \text{ \AA}$	ЕР, eV		J	Перехід	lg gf
	нижн.	верх.			
10691.30	7.46	8.61	2 - 3	$3s^3 P^0 - 3p^3 D$ (1)	+ 0.32
10683.18	7.45	8.61	1 - 2		+0.05
10685.44	7.45	8.60	0 - 1		-0.28
10729.59	7.47	8.61	2 - 2		-0.41
10707.44	7.45	8.60	1 - 1		-1.58

Вибір континууму проводився відносно його локального значення. Такий вибір дещо впливає на еквівалентні ширини ліній, що утворюються в центрі сонячного диску; на краю цей вплив менший - всього 1-2%.

У таблиці 2 наведено обчислені нами деякі фізичні параметри цих ліній від центра до краю сонячного диску - центральні залишкові інтенсивності, півширини та еквівалентні ширини ліній.

Завдяки тому, що в нас є профілі не лише окремих ліній, а цілої системи мультиплету, в роботі ми використали відомий метод мультиплетних ліній, запропонований у свій час різними авторами - де-Ягером і Невеном, Атеєм і Томсоном, Ситником [2-4]. Використовуються тісно розміщені мультиплетні лінії, що виникають із загального нижнього рівня або з нижніх підрівнів з малою енергетичною відмінністю.

Розрахунок теоретичних профілів цих мультиплетних ліній ґрунтується на розв'язку рівняння переносу нерівноважного випромінювання:

$$I_{ji}(\Delta\lambda_i, \mu) = \int_0^{\infty} S_{ji}(\tau_{ji}(\Delta\lambda_i)) \cdot e^{-\tau_{ji}(\Delta\lambda_i)/\mu} d\tau_{ji}(\Delta\lambda_i)/\mu,$$

де $\tau_{ji}(\Delta\lambda_i)$ - повна оптична глибина для j - лінії мультиплету на віддалі $\Delta\lambda_i$ від її центра, S_{ji} - повна функція джерела лінії. Перший індекс $j = 0, 1, 2, 3, 4$; для визначеності ми приймаємо, що значення $j = 0$ відноситься до найслабшої лінії мультиплету, а значення $j = 1, 2, 3, 4$ - до сильніших ліній. Другий індекс $i = 0, 1, 2, \dots, m$ вказує, до якої віддалі від центра лінії відноситься дана величина. Значення інтенсивності $I_{ji}(\Delta\lambda_i, \mu)$ повинні бути розраховані для всіх ліній мультиплету на одних і тих же віддальях $\Delta\lambda_i (i = 0, 1, 2, \dots, m)$ від центра відповідної лінії і для ряду різних значень μ ($\mu = \cos \theta$).

Ми розширили цей метод на всі п'ять ліній мультиплету, а головне, цей метод дозволив зменшити похибки параметрів, якими описується функція джерела.

Табл. 2: Фізичні параметри ліній СІ-мультиплету від центра і до краю сонячного диску

$\lambda, \text{Å}$	10691.36	10683.18	10685.44	10707.44	10729.59
$\cos \Theta$					
Центральні залишкові інтенсивності, r_0 , в од.неперерв.сп.					
1	2	3	4	5	6
1.00	0.462	0.509	0.576	0.605	0.609
0.75	0.470	0.529	0.609	0.626	0.632
0.60	0.486	0.545	0.626	0.644	0.645
0.50	0.487	0.554	0.640	0.656	0.668
0.40	0.494	0.560	0.639	0.674	0.683
0.30	0.509	0.574	0.652	0.678	0.684
півширини, $\Delta h_{1/2}, \text{mÅ}$					
1	2	3	4	5	6
1.00	408	396	355	350	348
0.75	396	373	351	341	334
0.60	386	368	337	333	332
0.50	372	363	333	330	330
0.40	368	359	328	321	319
0.30	348	340	324	312	308
еквівалентні ширини, $W, \text{mÅ}$					
1	2	3	4	5	6
1.00	312	271	193	188	174
0.75	286	213	181	173	169
0.60	260	172	152	150	149
0.50	258	166	142	140	137
0.40	232	160	143	136	132
0.30	221	150	134	126	124

Наступні співвідношення визначають функцію джерела у неперервному спектрі

$$S_c = (1 + r_i)S_{0i} - r_i S_{li} = (1 + n_1 r_i)S_{1i} - n_1 r_i S_{li} = (1 + n_2 r_i)S_{2i} - n_2 r_i S_{li} = \\ = (1 + n_3 r_i)S_{3i} - n_3 r_i S_{li} = (1 + n_4 r_i)S_{4i} - n_4 r_i S_{li}$$

і в лінії

$$r_i S_{li} = \frac{1}{n_1 - 1} [(1 + n_1 r_i)S_{1i} - (1 + r_i)S_{0i}] = \frac{1}{n_2 - 1} [(1 + n_2 r_i)S_{2i} - (1 + r_i)S_{0i}] = \\ = \frac{1}{n_3 - 1} [(1 + n_3 r_i)S_{3i} - (1 + r_i)S_{0i}] = \frac{1}{n_4 - 1} [(1 + n_4 r_i)S_{4i} - (1 + r_i)S_{0i}];$$

$$r_i = \frac{d\tau_{li}}{d\tau} = \left\{ \frac{S_{4i}}{n_4 - 1} - \frac{S_{3i}}{n_3 - 1} - \frac{S_{2i}}{n_2 - 1} - \frac{S_{1i}}{n_1 - 1} + \frac{(n_4 - n_3 - n_2 - n_1)}{(n_1 - 1)(n_2 - 1)(n_3 - 1)(n_4 - 1)} S_{0i} \right\} \times \\ \times \left\{ \left(\frac{n_1}{n_1 - 1} \right) S_{li} - \left(\frac{n_2}{n_2 - 1} \right) S_{2i} - \left(\frac{n_3}{n_3 - 1} \right) S_{3i} - \left(\frac{n_4}{n_4 - 1} \right) S_{4i} - \right. \\ \left. - \frac{(n_4 - n_3 - n_2 - n_1)}{(n_1 - 1)(n_2 - 1)(n_3 - 1)(n_4 - 1)} S_{0i} \right\}^{-1};$$

$$\tau_{li} = \int_0^{\tau} r_i d\tau.$$

Розв'язки рівняння переносу для кожної лінії мультиплету мають такий вигляд:

$$S_{0i} = S_{0i}(\tau_{0i}); \quad S_{1i} = S_{1i}(\tau_{1i}); \quad S_{2i} = S_{2i}(\tau_{2i});$$

$$S_{3i} = S_{3i}(\tau_{3i}); \quad S_{4i} = S_{4i}(\tau_{4i}).$$

Повна функція джерела в лінії і в неперервному спектрі записується таким чином:

$$\frac{n_j r_i S_{li} + S_c}{1 + n_j r_i} = S_{ji}(\tau + n_j \tau_{li}) = S_{ji},$$

де n_1 - відношення сил осциляторів для найслабшої і суміжної з нею лінії мультиплету і т.д.; r_i - відношення коефіцієнтів поглинання в лінії і в неперервному спектрі. Використовувалась багатопотокова модель Сонця VAL-80 [12]. Коефіцієнти поглинання в лініях обчислювались як фойгтівські профілі з врахуванням відхилень від ЛТР у розподілі атомів за їх енергетичними рівнями. Для останніх був використаний розподіл за висотою в атмосфері Сонця коефіцієнтів "b", що характеризують відхилення від ЛТР-заселеностей рівнів мультиплету CI. Ці коефіцієнти отримані у роботі Шукіної і Щербіної [5], де обгрунтовано показано, що відхилення від ЛТР для нижнього рівня суттєво менше, ніж для верхнього, причому верхній рівень недонаселений ($b < 1$). Це пояснюється тим, що ГЧ-випромінювання є холоднішим, ніж оточуюче середовище, що сприяє відтоку атомів (втраті фотонів), чим зумовлюється збільшення коефіцієнтів відхилення від ЛТР-заселеностей верхніх рівнів ГЧ-ліній відносно нижніх. Поблизу температурного мінімуму ($lg\tau = -3, 4$) додатковий нагрів випромінюванням призводить до перенаселеності як нижнього, так і верхнього рівнів.

У рамках методу мультиплетних ліній при розрахунках їх профілів ми покращували точність функції джерела, яка визначається радіативними і ударними переходами, імовірності яких здебільшого відомі з невисокою точністю, шляхом усереднення S_{ji} на кожній глибині для всіх ліній. Для розрахунку швидкості ударних переходів використовувалась формула ван Регемортера [6], для заборонених переходів - формула Остерброка [7], для імовірності іонізації електронним ударом - формула Лотца [8]. Швидкості радіативних переходів розраховувались за стандартними виразами [9].

Як основні механізми, що викликають розширення ліній мультиплету в сонячній атмосфері, приймались ван-дер-ваальсівська взаємодія з атомами водню, квадратичний ефект Штарка і загасання внаслідок випромінювання.

Вміст вуглецю у сонячній атмосфері неоднократно визначався багатьма авторами; за їхніми даними вміст вуглецю приймають від 8.05 до 8.88 (в логарифмічній шкалі, де $lgN_H = 12$). Отже, і надалі питання про його точне значення залишається відкритим. За результатами віденської бази даних [10] ми прийняли, що $lgN_C = 8.64$; при цьому вмісті ми отримали найкраще узгодження теоретичних і спостережуваних профілів.

Висотну стратифікацію макротурбулентної швидкості брали відповідно до визначень Гуртовенка і Костика [11]: $V_{macro} = 1.85$ км/с для центра диска, $V_{macro} = 1.69$ км/с для краю диска. Використання розподілу мікротурбулентних швидкостей моделі VAL-80 [12] приводить до погіршення поведінки центр-край для профілів ліній C1. З умови найкращої збіжності обчислених профілів мультиплетних ліній зі спостережуваними для різних положень на диску Сонця отримано розподіл мікротурбулентної швидкості з висотою (рис.1).

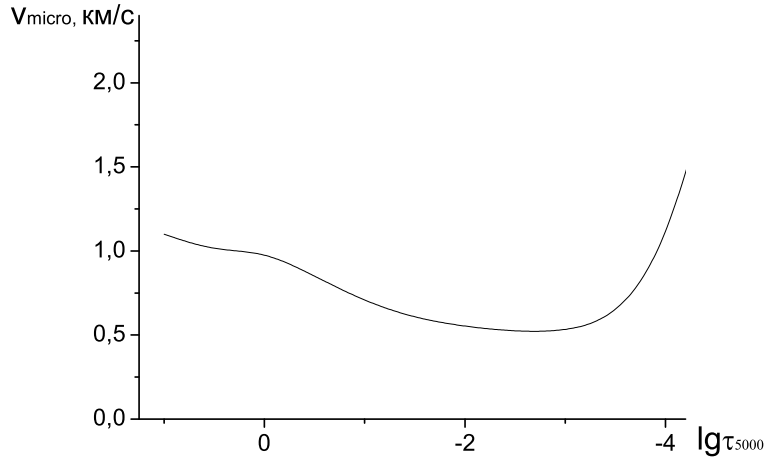


Рис. 1: Залежність мікротурбулентної швидкості від висоти в атмосфері Сонця.

Розраховані профілі ліній вуглецевого мультиплету ми співставляли із спостережуваними на диску Сонця.

У таблиці 3 наведено порівняння теоретичних і спостережуваних центральних залишкових інтенсивностей, півширин і еквівалентних ширин усіх п'яти ліній мультиплету від центра до краю сонячного диска.

Для дослідження чутливості цих ліній до температурної структури в сонячній атмосфері ми провели розрахунки з використанням багатопотокової моделі сонячної атмосфери у рамках середнього C-, холодного A- та гарячого F- потоків.

На рис.2. наводимо хід різниці в холодному та гарячому потоках центральних залишкових інтенсивностей Δr_0 (нижня крива) та хід різниці еквівалентних ширин ΔW (верхня крива) у цих потоках в залежності від висоти H в сонячній атмосфері.

Висновки

Аналіз результатів розв'язку рівняння нерівноважного переносу випромінювання узагальненим методом мультиплетних ліній для вуглецевого спектру в ГЧ-області дає змогу діагностувати фізичний стан сонячної атмосфери на різних глибинах. Підтверджено суттєву роль не ЛТР-ефектів у механізмах утворення ліній поглинання. У нашій роботі узагальнено метод мультиплетних ліній. Показано, що врахування відхилень від ЛТР в населеностях рівнів мультиплету C1 дає надійне зростання залишкових інтенсивностей вздовж профілів ліній і при переході від центра до краю диску Сонця, яке узгоджується із спостережуваними даними. На основі співставле-

Табл. 3: Теоретичні і спостережувані фізичні параметри ліній СІ мультиплету від центра до краю сонячного диску

$\lambda, \text{Å}$ $\cos \Theta$	10691.36		10683.18		10685.44		10707.44		10729.59	
	спост.	теор.	спост.	теор.	спост.	теор.	спост.	теор.	спост.	теор.
Центральні залишкові інтенсивності, r_0 , в один.неперер.сп.										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.00	0.462	0.454	0.509	0.491	0.576	0.563	0.605	0.580	0.609	0.589
0.75	0.470	0.466	0.529	0.504	0.609	0.588	0.626	0.598	0.632	0.622
0.60	0.486	0.478	0.545	0.527	0.626	0.603	0.644	0.632	0.645	0.630
0.50	0.487	0.480	0.554	0.544	0.640	0.625	0.656	0.644	0.668	0.656
0.40	0.494	0.490	0.560	0.555	0.639	0.632	0.674	0.666	0.683	0.678
0.30	0.509	0.495	0.574	0.562	0.652	0.643	0.678	0.670	0.684	0.679
півширини $\Delta h_{1/2}, \text{mÅ}$										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.00	408	405	396	394	355	349	350	343	348	342
0.75	396	390	373	369	351	341	341	339	334	330
0.60	386	381	368	361	337	332	333	330	332	328
0.50	372	369	363	358	333	328	330	328	330	326
0.40	368	361	359	352	328	321	321	320	319	312
0.30	348	357	340	340	324	319	312	315	308	310
еквівалентні ширини $W, \text{mÅ}$										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.00	312	300	271	265	193	187	188	180	174	170
0.75	286	280	213	206	181	179	173	169	169	164
0.60	260	252	172	170	152	148	150	148	149	145
0.50	258	248	166	161	142	136	140	137	137	134
0.40	232	230	160	155	143	130	136	130	132	129
0.30	221	230	150	149	134	126	126	128	124	122

ння теоретичних і спостережуваних півширин і еквівалентних ширин ліній по диску Сонця відтворено висотну стратифікацію мікротурбулентної швидкості в широкому діапазоні висот - від нижньої фотосфери до області температурного мінімуму. З'ясовано, що лінії ГЧ вуглецевого мультиплету є індикаторами чутливості до температурної структури сонячної атмосфери, особливо у верхніх шарах її фотосфери. У гарячому потоці, де температура і густина найбільші, ядра ліній вуглецевого мультиплету є глибшими і ширшими, ніж ядра цих же ліній у холодному потоці моделі. Одне з можливих пояснень зміни півширини ліній від центра сонячного диска до краю може ґрунтуватись на допущенні про зміни турбулентної швидкості з глибиною, внаслідок чого на лімбі, де в утворенні ліній приймають участь вищі шари, що мають менші турбулентні швидкості, спостережувані фраунгоферові лінії виявляються вузькими, ніж у центрі диска. Для розрахованих ліній у трьох потоках моделі характерна така закономірність: їхні еквівалентні ширини у холодному потоці є меншими від еквівалентних ширин цих же ліній в незбуреній середній атмосфері Сонця. Найбільші еквівалентні ширини відповідних ліній формуються в гарячому потоці моделі. Для еквівалентних ширин ефект відмінностей в холодному і гарячому потоках трохи більший, ніж для центральних залишкових інтенсивностей.

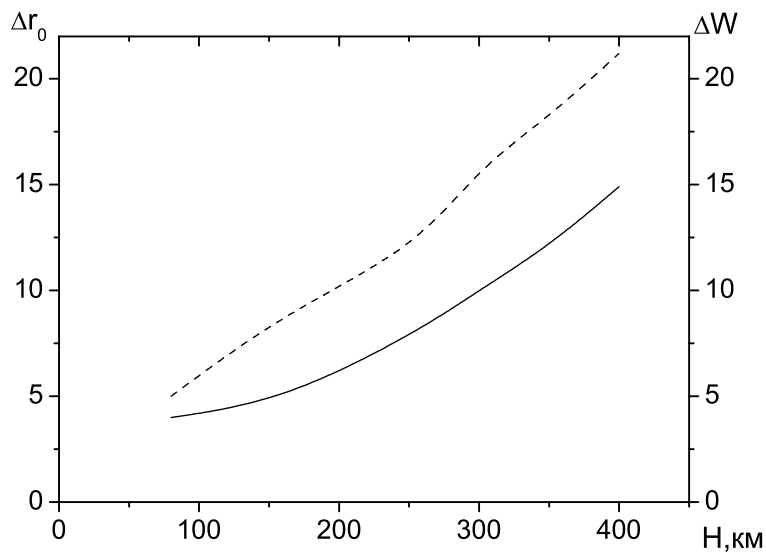


Рис. 2: Залежність температурної чутливості лінії $\lambda 10691.36$ від висоти в сонячній атмосфері.

Список використаної літератури

1. *C.de Jager*. C-multiplet near 10700 angstrom im the solar spectrum / C.de Jager, L.Neven // Mem.Soc.roy.Sci.Liege A. – 1963. – V. 9, № 7. – P. 213-234.
2. *C.de Jager*. A systematic method for the analysis of high-resolution fraunhofer line profiles / C.de Jager, L. Neven // Utrechtse Sterrekundige overdrukken. – 1967. – №37. – P. 27-59.
3. *Athay R.Y.* On the use of the early Balmer lines to extend the photospheric model / Athay R.J., Thomas R.V. // Astrophys.J. – 1958. – V. 127. – P. 96-102.
4. *Ситник Г.Ф.* Новый метод интерпретации линий солнечного спектра / Ситник Г.Ф. // Астрон.журн. – 1975. – Т. 52, Вып. 3. – С. 553-560.
5. *Щукина Н.Г.* Эффекты отклонения от локального термодинамического равновесия во фраунгоферовом спектре Солнца / Щукина Н.Г., Щербина Т.Г. // Кинематика и физика небесных тел. – 1990. – Т. 6, № 2. – С. 44-52.
6. *Van Regemorter H.* Rate of collisional Extitation in stellar atmosphere / H. Van Regemorter // Astrophys.J. – 1962. – V. 136. – P. 906-914.
7. *Osterbrok D.E.* Astrophysics of gaseous nebulae / D.E. Osterbrok. – San-Francisco:W.H.Freeman and Co, 1974. – 263 p.
8. *Вайнштейн Л.А.* Возбуждение атомов и ионов электронами / Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юхов Е.А. – Москва: Наука, 1973. – 320 с.
9. *Михалас Д.* Звездные атмосферы / Михалас Д. // Москва: Мир, 1982. – Т. 1. – 352 с.

10. *Piskunov N.E.* WALS: The Vienna Atomic Line Data Base / Piskunov N.E., Kupka F., Ryabchikova T.A., Weiss W.W., Jefferi C.S. // *Astron. and Astrophys. Suppl. Series.* – 1995. – V. 112, № 3. – P. 525-535.
11. *Гуртовенко Э.А.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов / Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. – Киев: Наукова думка, 1989. – 200 с.
12. *Vernazza J.* Structure of the Solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun / Vernazza J., Avrett E., Loeser R. // *Astrophys. J. Suppl. Series.* – 1981. – V. 45, №4. – P. 635-725.

Стаття надійшла до редакції 1.04.2012
прийнята до друку 17.10.2012

DIAGNOSTIC OF SOLAR ATMOSPHERE BY MULTIPLY LINES METHOD

M. Koval'chuk¹, R. Rykalyuk², M. Hirnyak¹

¹ *The Ivan Franko National University of Lviv,
Astronomical Observatory
8, Kyrylo and Methodij Str., Lviv, 79005, Ukraine
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

² *Centre of Information Technologies and Distance Learning,
The Ivan Franko National University of Lviv
University str., 1, Lviv, 79000, Ukraine*

Interpretation of spectral observations of high-precise profiles of absorption lines of carbon infrared multiplet near 10700 Å in different points of solar disk was carried out. Comparison of theoretical non-equilibrium profiles with observational had possibility to diagnostic of physical condition in solar atmosphere. Method of multiplet line was used for calculations. Carbon abundance on the Sun, macro- and microturbulent speeds on different optical depths, function of source of multiplet lines in the context of model solar quiet atmosphere VAL-C, their frequency dependence inside line, coefficients of selective absorption and radiation were received. The sensitivity of their lines to temperature structure of solar atmosphere are investigated.

Key words: physical conditions of solar atmosphere, solar abundance, radiative transfer equation.

ДИАГНОСТИКА СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ МУЛЬТИПЛЕТНЫХ ЛИНИЙ

М. Ковальчук¹, Р. Рыкалюк², М. Гирняк¹

¹ Львовский национальный университет имени Ивана Франко
Астрономическая обсерватория г. Львов, ул. Кирилла и Мефодия,
8, 79005, Украина
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua

² Центр информационных технологий и дистанционного обучения
г. Львов, ул. Университетская, 1, 79000, Украина

Выполнена интерпретация спектральных наблюдений высокоразрешенных профилей линий поглощения инфракрасного мультиплета углерода вблизи $\lambda 10700 \text{ \AA}$ в различных точках солнечного диска. Сопоставление теоретических неравновесных профилей с наблюдаемыми дало возможность диагностировать физические условия в солнечной атмосфере. При расчетах использован метод мультиплетных линий. Получено содержание углерода на Солнце, макро- и микротурбулентные скорости на разных оптических глубинах, функции источника каждой линии мультиплета в рамках модели спокойной атмосферы Солнца VAL-C, частотную зависимость внутри каждой линии, коэффициенты селективного поглощения и излучения, исследована чувствительность этих линий к температурной структуре солнечной атмосферы.

Ключевые слова: физические условия в солнечной атмосфере, содержание химических элементов, уравнение переноса излучения.