

УДК 523.98
PACS number(s): 96-60 Rd

ДОСЛІДЖЕННЯ ХРОМОСФЕРНОЇ СІТКИ ЯК ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ РЕАЛЬНОЇ ХРОМОСФЕРИ 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*

Відшукано та зіставлено загальні та індивідуальні елементи тонкої структури на спектрогеліограмах у лініях H_{α} та $K_{232} \text{ Ca II}$; визначено розміри, контрасти характерних тонкоструктурних елементів і відстаней між ними на різних висотних ділянках хромосфери. Статистичну обробку фотометричних даних виконували методом швидкого перетворення Фур'є за варіантом Кулі-Тьюкі. Отримані зміни радіусів кореляції, інтегральних масштабів кореляції та взаємодії кореляції фотометричних неоднорідностей, які збігаються з розмірами комірок хромосферної сітки у світлі ліній H_{α} і $K_{232} \text{ Ca II}$. Визначено зміну флуктуацій яскравості від розмірів неоднорідностей, що є відображенням їхньої залежності від висоти в атмосфері Сонця.

Ключові слова: атмосфера Сонця, хромосферна сітка, кореляційний аналіз.

Результати дослідження властивостей супергрануляції [1, 2], деяких закономірностей розвитку грануляції [3, 4] та інших сонячних неоднорідностей останнім часом сприяла зацікавленню до проблеми хромосферної сітки. Морфологія тонкої структури хромосферної сітки – це складова частина комплексу проблем, що пов'язані з дослідженнями фізики атмосфери Сонця.

Для розуміння природи тонкоструктурних утворень хромосфери та їхньої ролі в розвитку активних процесів у сонячній атмосфері важливе значення має виявлення загальних закономірностей у морфології тонкої структури на різних висотних ділянках атмосфери. Важливим діагностичним засобом у разі визначення фізичних умов у хромосфері Сонця є сильні лінії H_{α} і $K \text{ Ca II}$. Бальмерівську лінію H_{α} дуже широко використовують під час спектрогеліографічних досліджень хромосфери. Лінія резонансного дублету $K_{232} \text{ Ca II}$ вигідно розміщена у видимій області спектра і тому її роль у вивченні локальних властивостей хромосфери дуже велика.

Спостереження сонячної хромосфери в якійсь одній спектральній лінії дають інформацію про морфологію і структуру окремих утворень у цій лінії. Загалом це не дає змоги зробити певні висновки щодо фізичних умов в атмосфері Сонця. Саме тому особливий інтерес становлять одночасні спостереження у двох спектральних лініях, що відрізняються різними механізмами утворення та належать до певного рівня в сонячній атмосфері. Такі дослідження дають підстави отримати оцінні дані про значення фізичних параметрів атмосфери, що уможливорює побудову динамічної моделі структури хромосфери. У середній атмосфері одночасно формуються, зокрема, лінія H_{α} водню та K іонізованого кальцію. Центральні частини цих ліній виникають, згідно з [5], відповідно, на висотах в хромосфері 4 000 км і 3 000 км. Отож, відмінність висот у 1 000 км не перевищує розмірів найменших елементів структури хромосфери і суттєво менша від товщини шару, в межах якого ці лінії виникають.

У цій статті досліджено хромосферну сітку як горизонтальну неоднорідність реальної хромосфери Сонця. Проведено пошук статистичних закономірностей розподілу фотометричних неоднорідностей яскравості у сонячній хромосфері одночасно в обох областях спектра. Головним завданням було виявити та зіставити загальні та індивідуальні елементи тонкої структури на спектрогеліограмах у лініях H_{α} і K_{232} CaII та визначити розміри, контраст характерних тонкоструктурних елементів і відстані між ними на різних висотних ділянках хромосфери Сонця.

Матеріалом для дослідження послужили спектрогеліограми, отримані на подвійному спектрогеліографі БСТ Кримської астрофізичної обсерваторії (КрАО) [6] у лініях H_{α} і K_{232} Ca II (далі K Ca II).

На спектрогеліограмах у лінії H_{α} ми бачимо складну двокомпонентну структуру хромосфери – дрібні темні вузлики, що об'єднуються у великі темні вузли, в основі яких є яскраві точки, які облямовують обширну багатокутну ділянку, що становить окрему комірку хромосферної сітки.

Краще, ніж в лінії H_{α} , в лінії K Ca II дуже добре помітна загальна тонка структура хромосферної сітки. У лінії K Ca II комірки хромосферної сітки також окреслюються головню яскравими деталями. Уважно зіставивши спектрогеліограми в обох лініях, доходимо висновку, що строго однаковими і однаково розміщеними на одночасно знятих спектрогеліограмах є лише контрастні деталі, розміщені, зазвичай, у вузлах хромосферної сітки. Менш контрастні деталі можуть бути темними на спектрогеліограмах в одній довжині хвилі, наприклад, в лінії H_{α} , і світлими – на спектрогеліограмах в іншій довжині хвилі – відповідно, в K Ca II. З цієї причини вигляд спектрогеліограм, знятих навіть одночасно, але в різних довжинах хвиль, буде різний.

Діаметр зображення Сонця на спектрогеліограмах КрАО становить 48 мм. З метою фотометричної обробки вибирали спектрогеліограми, одночасно зняті в лініях H_{α} і K CaII в ті дні, коли поблизу центра диску Сонця активних областей не простежували. На відібраних спектрогеліограмах опрацьовували область розміром $200'' \times 200''$, що становить $140\,000 \times 140\,000$ км². На мікрофотометрі МФ-2 вимірювали густини почорнінь близько 150–200 точок, розміщених на однаковій відстані одна від одної. Одиницьній відстані r , що становить 0,05 мм на

спектрогеліограмі, відповідає 1 400 км на диску Сонця. Значення почорнінь переводили за відповідними характеристичними кривими у відносні інтенсивності. Одиничний інтервал між двома точками ми прийняли як одиничний зсув ($\Delta l = 1$) при подальших розрахунках.

Техніка розрахунків полягала у використанні методу кореляційного аналізу з теорії Тьюкі [7]. Цю теорію успішно застосовано під час розв'язку геофізичних задач [8], під час дослідження сонячної грануляційної сітки [9], під час аналізу спостережуваних даних про потоки випромінювання в різних областях сонячного спектра [10]. Статистичну обробку проводили по алгоритмах обчислення когерентних спектральних функцій, наведених в [11]. Більше того, ми скористалися методом швидкого перетворення Фур'є, або так званим алгоритмом Кулі-Тьюкі. Цей спосіб обчислення перетворення Фур'є ґрунтується на методі вкладених сум; його підпрограму приведена в книзі Д. Грея [12]. З метою забезпечення статистичної обробки цим методом було створено масиви даних для кожної пари реалізацій: для U_x і V_x – відносних інтенсивностей як функції відстані далі між точками у незбуреній області на спектрогеліограмах в лініях H_α і $K Ca$ II, відповідно. Середні значення \bar{U} і \bar{V} визначали для всієї реалізації загалом. Техніку розрахунків детально описано в [9].

Щоб з'ясувати, які частоти i в яких співвідношеннях входять в U_x (чи в V_x), будують автокореляційну функцію (АК-функція) $B(l)$. Як вже згадувалось, під час розрахунку кореляційних функцій інтервал між сусідніми реалізаціями в межах області був взятий 1 400 км. Максимальний зсув становив 140 000 км.

Перетворення Фур'є від АК-функції дає змогу отримати силу флуктуацій яскравості як функцію розмірів. Маємо так званий просторовий спектр потужності $S(k)$, де k – частота хвилі, що набуває значень $0, 1, 2, \dots, m$.

Для визначення того, який зв'язок існує між двома флуктуаціями U_x і V_x будують крос-кореляційну функцію (КК-функцію) $B_{uv}(l)$. Взаємну кореляцію між ними отримуємо через перетворення Фур'є від КК-функції – $R_{uv}(K)$. $R_{uv}(K)$ характеризує когерентність між компонентами Фур'є для однієї і тієї ж частоти. Якщо взаємна кореляція значна, то $R_{uv}(K) > 0,5$; якщо $R_{uv}(K) > 0,8$, то взаємна кореляція вважається високою.

На рис. 1 показано результати обчислень нормованих АК-функцій для пари реалізацій в лініях а) H_α і б) $K Ca II$. Для кожної АК-функції обчислювали R -радіус кореляції, тобто відстань, на якій нормована АК-функція має значення 0,5; L – інтегральний масштаб кореляції, що визначається площею під кривою в її зміні від одиниці до першого нуля, Λ – середня відстань між двома сусідніми максимумами або мінімумами періодичної компоненти АК-функції для кожної реалізації.

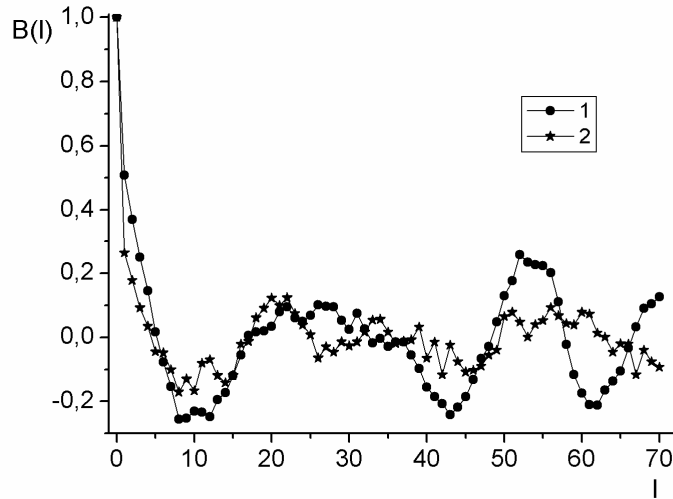


Рис. 1. Автокореляційна функція флуктуації яскравості для пари реалізацій у лініях: 1 – H_{α} , 2 – $K Ca II$

Як видно з рисунка, ми отримали $R_{H_{\alpha}} = 1,35 \times 10^3$ км і $R_{K Ca II} = 0,78 \times 10^3$ км; $L_{H_{\alpha}} = 2,38 \times 10^3$ км; $L_{K Ca II} = 1,41 \times 10^3$ км. Отже, розміри малих неоднорідностей (вузликів), що визначаються АК-функціями, залежать від довжини хвилі, в якій ведуться спостереження, збільшуючись із збільшенням λ .

Великий зсув (до 140 000 км) дав змогу зафіксувати в межах кожної лінії H_{α} і $K Ca II$ кілька максимумів близького, але неоднакового періодів. Появу першого максимуму на кожній з АК-функцій яскравості на відстані 14 000 (в лінії H_{α}) та 12 000 км (в лінії $K Ca II$) можна інтерпретувати як прояв масштабів крупних неоднорідностей (вузлів), що є складовими на різних висотних ділянках хромосферної сітки.

Далі з цього ж рисунка визначаємо відстань Λ (км) між двома сусідніми максимумами чи мінімумами періодичної компоненти АК-функції окремо в межах кожної лінії. У лінії H_{α} Λ дорівнює 30 000–35 000 км, а в $K Ca II$ Λ менша – 18 000–22 000 км. Такі розміри періодичної компоненти відображають елементи тонкої структури хромосферної сітки, тобто розміри її окремих комірок. Переважно ці великомасштабні неоднорідності хромосферної сітки ототожнюються із супергранулами, оскільки їх розміри є в межах відомої шкали супергрануляції.

Спостережувані зміни R , L , Λ зі зміною довжини хвилі, що збігаються з розмірами вузликів, вузлів та комірок хромосферної сітки підпорядковуються загальній, зазначеній у працях [1, 13], тенденції, яка полягає у збільшенні середніх розмірів комірок вертикальних рухів з висотою.

Зростання розмірів елементів хромосферної сітки з висотою спричинює те, що, збільшуючись від висот у лінії К CaII до висот в лінії H_{α} , вони стають більш розпливчатыми, між ними зникають чіткі демаркаційні лінії. Тонкоструктурна хромосферна сітка перетворюється у відносно більш крупно-структурну. Однак існує спільність у морфології структури хромосферної сітки на різних висотних рівнях атмосфери Сонця. Усі неоднорідності хромосфери на різних висотах мають подібну двокомпонентну структуру – яскраві та темні вузлики подовгастої форми, що пов'язані між собою просторово у крупні вузли, розподіл яких не є ізотропним. Явно не випадково вони утворюють окремі багатокутні комірки, кожен з яких можна трактувати як елемент хромосферної сітки.

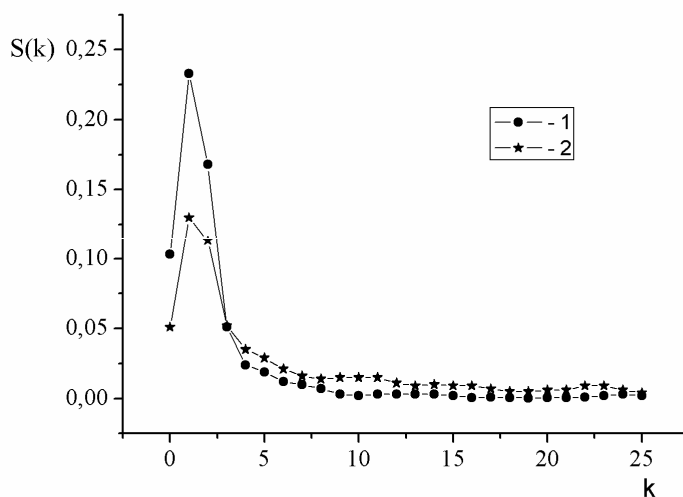


Рис. 2. Спектр потужності флуктуацій яскравості в лініях: 1 – H_{α} , 2 – К CaII

На рис. 2 у логарифмічній шкалі показано спектри потужності $S(k)$ фотометричних неоднорідностей хромосфери в лініях H_{α} і К CaII. Аргумент k функції $S(k)$ має значення $k = \frac{1}{\Lambda} \times 2 m \Delta l$. З попереднього рис. 1 ми отримали середні значення $\Lambda = 3,2 \times 10^4$ в H_{α}) і $\Lambda = 2,0 \times 10^4$ км (в К CaII); $\Delta l = 1,4 \times 10^3$ км; ми задавали біжуче значення частоти хвилі від $m=0$ до $m=125$. Вивчення розрахованих спектрів потужності свідчить, що спектри мають максимуми на $k=1-2$, що становить 30 000–20 000 км, відповідно, в лініях H_{α} і К CaII. Помітне зниження потужності яскравості відбувається під час переходу до більших неоднорідностей, що підтверджує зниження контрасту при переході від висот у лінії К CaII до висот у лінії H_{α} .

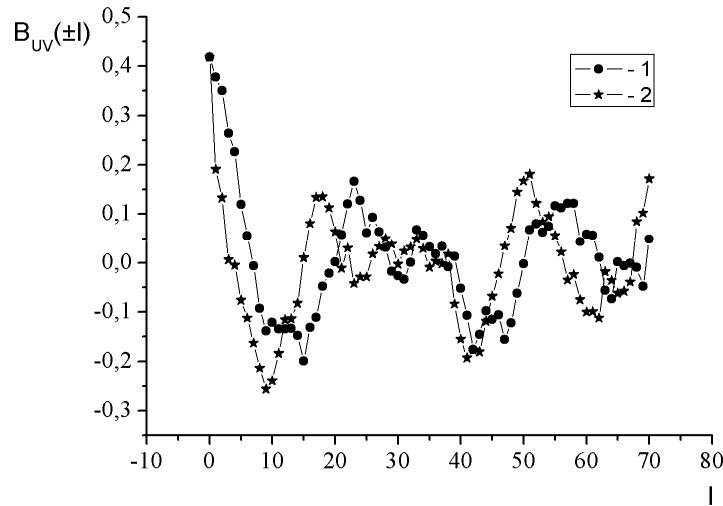


Рис. 3. Кроскореляційна функція флуктуацій яскравості для ліній H_{α} і $K Ca II$:
 1 – для $l > 0$; 2 – для $l < 0$

Результати розрахунків нормованих КК-функцій $B_{uv}(\pm l)$ (рис. 3) з максимальним зсувом $l = 70$, що становить $\sim 98\,000$ км на диску також показують періодичну компоненту. При цьому $B_{uv}(l)$ виявляється зсунутою порівняно з $B_{uv}(-l)$. Виявлення такої асиметрії в $B_{uv}(l)$ означає асиметрію в розподілі структур неоднорідностей з висотою. Кроскореляція

$$B_{uv}(0) / (\sqrt{B_u(0)} \times \sqrt{B_v(0)}) < 0,5$$

для спектрального інтервалу $\Delta\lambda = \lambda_{H_{\alpha}} - \lambda_{K Ca II}$. Таке досить низьке значення кроскореляції є наслідком того, що появляются порушення подібності спектрів потужності на різних глибинах. Інакше кажучи, це означає, що справді, дуже важко ототожити одночасно на двох спектродіаграмах, знятих у різних лініях, одні і ті ж дрібні неоднорідності. Отож, дрібні неоднорідності не вносять суттєвого вкладу в кроскореляцію, оскільки вони відсутні одночасно в обох областях спектра. Великі неоднорідності мають більш плавний спектр випромінювання, інтенсивність якого мало змінюється протягом значної ділянки спектра.

Одержані результати в основних рисах добре узгоджуються з результатами досліджень [4, 9, 14, 15], в яких вивчали розподіл яскравостей, поля швидкостей, магнітного поля на різних висотах атмосфери Сонця.

Отже, всі отримані зі спостережень масштаби хромосферних структур, що відповідають елементам хромосферної сітки на різних висотах є генетично взаємозв'язаними утвореннями. Вони відображають процеси, що відбуваються у відповідно різних як за висотою, так і за фізичним станом шарів сонячної

атмосфери. Отже, структуровані елементи хромосферної сітки є просторово і еволюційно взаємопов'язаними і становлять продукт єдиного процесу конвективних рухів, що відбуваються на великій глибині у сонячній атмосфері. Цю ідею вперше висунув і обґрунтував С. Пікельнер [16]. Однак сама структура хромосферної сітки потребує подальшого вивчення і отримання нового спостережувального матеріалу і залишається актуальною.

Висновки:

1. Зіставлено особливості тонкої структури хромосфери на різних її рівнях у лініях H_{α} і К CaII. З'ясувалося, що морфологія тонкої структури хромосфери на цих двох висотних рівнях має подібну двокомпонентну будову.

2. Побудовано автокореляційні і кроскореляційні криві, а також спектри потужності для одночасних H_{α} - і К CaII-спектрогеліограм сонячної хромосфери.

3. Отримано наявність періодичної компоненти в розподілі фотометричних неоднорідностей по диску. Для кожної автокореляційної функції було обчислено R – радіус кореляції, L – інтегральний масштаб кореляції, Λ – розмір періодичної компоненти та зміни цих величин з довжиною хвилі. Значення цих величин такі: в лінії H_{α} – $R=1,35 \times 10^3$ км; $L=2,38 \times 10^3$ км; $\Lambda=3,2 \times 10^4$ км; К CaII – $R=0,78 \times 10^3$; $L=1,41 \times 10^3$; $\Lambda=2,0 \times 10^4$ км.

4. Розрахунок спектрів потужностей свідчить, що спектри мають максимуми на просторових масштабах 30 000–20 000 км, (відповідно, в лініях H_{α} і К CaII), що розміщені в межах відомої шкали супергрануляції.

5. Результати розрахунків кроскореляційних функцій засвідчили досить низьке значення кроскореляції, що можна трактувати як порушення подібності спектрів потужності на різних глибинах.

-
1. *Leighton R.B., Noyes R.W., Simon G.W.* Velocity Fields in the Solar Atmosphere. I. Preliminary Report // J. Appl. 1962. Vol.135. N 2. P. 474–498.
 2. *Simon G.W., Leighton R.B.* Velocity Fields in the Solar Atmosphere. III. Large-Scale Motions, the Chromospheric Network and Magnetic Fields // J. Appl. 1964. Vol.140. N 3. P. 1120–1147.
 3. *Deubner F.L.* // In Solar and Stellar Granulation. Dordrecht. 1989. P. 195–204.
 4. *Dialetis D., Macris C., Prokakis T., Muller R.* A possible relation between lifetime and location of solar granules // Astron. and Astrophys. 1988. Vol. 204. N1/2. P. 275–278.
 5. *Кононович Э.В., Никулин И.Ф.* Контраст флоккулов и модель возмущенной солнечной атмосферы // 1974. Т. 51. Вып. 5. С.1021–027.
 6. *Северный А.Б.* Башенный солнечный телескоп Крымской астрофизической обсерватории АН СССР // Изв. КрАО. 1955. Т. 15. С. 31–53.
 7. *Мюстеллер Ф., Тьюки Дж.* Анализ данных и регрессия. 1982. Вып. 1, 2.
 8. *Munk W.H., Snodgrass F.E., Tucker M.J.* Spectra of low-frequency ocean waves // Bull. Scripps. Inst. Oceanography (Tech. Series). 1959. Vol. 7. N 4. P. 283–361.

9. Васильева Г.Я., Жербина А.С., Найденова К.А., Юдина И.В., Чандаев А.К. Фотоэлектрическая фотометрия солнечной грануляции в нескольких областях континуума // Изв. ГАО. 1967. Т. XXIV. № 182. Вып. 6. С. 6–61.
10. Гірняк М.Б., Ковальчук М.М. Комплексний аналіз спостережуваних даних про потоки випромінювання від хромосферних спалахів в оптичній, рентгенівській та радіообластях сонячного спектру // Вісник фізич. ф-ту ЛНУ. 1999. № 32. С. 108–114.
11. Дженкинс Г., Ваттс В. Спектральный анализ и его приложения. М., 1971. Вып. 1, 2.
12. Грей Д. Наблюдения и анализ звездных фотосфер. М., 1980.
13. Bernière G., Michard R., Rigal G. Etude statistique des fluctuations locales de brillance et de vitesse dans la photosphere // Ann. Astrophys. 1962. Vol. 25. N 4. P. 279–292.
14. Новиков С.Б., Цап Т.Т. Временные изменения хромосферной сетки // Изв. КрАО. 1968. Т. 38.
15. Гонасюк С.П., Калман Б. О крупномасштабном поле скоростей в фотосфере Солнца // Изв. КрАО. 1972. Т. 44.
16. Пикельнер С.Б. Образование хромосферной сетки и структура магнитного поля // 1962. Т. 39. Вып. 6. С. 973–976.

INVESTIGATION 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*

Common and individual elements of thin structure on the spectroheliograms in H_{α} and K_{232} CaII are revealed and compared.

The dimensions and contrasts of characteristic thin structural elements and distances between its on different multi-storeyed ranges of chromosphere are determined.

Statistical adaptation of photometrical data was carried out by method of fast Fourier transformation of Kuli-Tukey variant.

The changes of correlation radii, integral scales of correlation and relation of photometric heterogeneousness, which with dimensions of cells of photospheric net in light of H_{α} and K_{232} Ca II are coincided.

The change of fluctuations of brightness from dimensions of heterogeneousnesses is found, that is reflection of their dependence on height in solar atmosphere.

Key words: solar atmosphere, chromospheric net, correlation analysis.

Стаття надійшла до редколегії 01.12.2005

Прийнята до друку 26.02.2007