

МЕХАНІЗМ ЗБУДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ П'ЯТИХВИЛИННИХ КОЛИВАНЬ В АТМОСФЕРІ СОНЦЯ

Р.І. Костик

Головна астрономічна обсерваторія Національної Академії наук України, Київ

Досліджено взаємозв'язок сонячної грануляції та локальних п'ятихвилинних коливань швидкості та інтенсивності, спостережуваних з високою просторовою та часовою роздільними здатностями в спектральній лінії нейтрального заліза. Показано, що коливання і швидкості, і інтенсивності по різному реагують на тонку структуру нижньої фотосфери. Найбільш потужні коливання швидкості виникають над тими місцями, де максимальний контраст гранул та порул, тобто сонячні локальні п'ятихвилинні коливання збуджуються турбулентною конвекцією. Над гранулами та порулами коливання швидкості відбуваються з різним періодом.

Вступ

Розміри, маса та потужність випромінювання Сонця такі, що енергії, яка виникає в результаті ядерних реакцій в центральній частині не вистачає для повної іонізації його зовнішніх шарів. Це затрудняє вихід випромінювання з Сонця і створює сприятливі умови для конвекції: Відносно гарячий газ піднімається, випромінює надлишкову енергію, охолоджується і опускається вниз. Конвективні потоки досягають фотосфери і спостерігаються (на висоті утворення неперервного спектра, який умовно прийнятий за $H=0$ км) у вигляді яскравих гранул та темних порул. Ці неоднорідності-яскравості-видимої сонячної поверхні спостерігались ще в середині XVIII століття. Характерні розміри гранул та порул – 700 км, контраст -20%, середній час існування - 10хв, швидкість руху речовини падає від 1км/с на нижній межі фотосфери ($H=10$ км) до 0.1 км/с на $H=500$ км.

Хвилі на Сонці були відкриті Лейтоном та ін.(1962) майже 40 років тому як п'ятихвилинні локальні коливання швидкості та яскравості фотосфери. Розміри окремої ділянки на поверхні Сонця, що коливаються як єдине ціле, складають 2000-2500 км. Середня амплітуда швидкості з висотою в атмосфері Сонця збільшується від

0.15км/с на $H=10$ км до 0.8км /с на $H=500$ км. До сьогодні продовжуються дискусії про механізм збудження цих коливань. Припущення, що причиною виникнення локальних п'ятихвилинних коливань можуть бути гранули (Еванс, Мішард, 1962) не знайшло експериментального підтвердження (Фраз'є, 1968; Мусман, 1974).

В цій роботі на основі спостережень, проведених з високою просторовою (о. Тенеріфе, Іспанія) та спектральною (м. Київ) роздільними здатностями, і розроблених нових методів аналізу двовимірних зображень, ми досліджуємо взаємозв'язок конвективних та коливних рухів в фотосфері Сонця і приводимо докази, що найбільш потужні цуги п'ятихвилинних коливань швидкості виникають в тих локальних місцях фотосфери, де максимальні швидкості конвективних рухів, тобто звукові хвилі дійсно спричиняються турбулентною конвекцією. Ми також досліджуємо характеристики п'ятихвилинних коливань (зсув фаз, період) окремо над гранулами та порулами, чого раніше не вдавалось зробити.

Спостереження

Спостереження проведені автором в Головній астрономічній обсерваторії НАНУ (м. Київ) на монохроматорі подвійної дифракції телескопа АЦУ-5 з

високою спектральною (450000), але низькою просторовою (60000 км) роздільними здатностями та Щукіною в обсерваторії Дель Тейда Інституту Астрофізики на Канарських островах (о. Тенеріфе) на вакуумному баштовому телескопі VTT з високою просторовою (280 км), але помірною спектральною (250000) роздільними здатностями.

Телескоп АЦУ-5 та методика спостережень з монохроматором подвійної дифракції детально описані в роботі Гуртовеко, Костик (1979). Спектр незбуреної ділянки поверхні біля центра диску Сонця розмірами 280 км x 65000 км реєструвався за допомогою фотопомножувача, тобто без врахування тонкої структури (гранули, порули) фотосфери. Дисперсія спектрографа становила 0,01 пм /мм. Для спостережень була вибрана лінія нейтрального заліза FeI з довжиною хвилі 532.4185 нм. За даними цих спостережень було знайдено, що далекі крила цієї лінії поглинання утворюються на висоті $H=10$ км над рівнем неперервного спектра, тобто глибоко в фотосфері, а її центральна частина на $H=500$ км. Таким чином, досліджуючи контур лінії FeI 532.4185 нм на різних віддальх від її ядра, ми змогли одержувати інформацію про фізичні умови майже по всій висоті фотосфери від 10км до 500км.

На вакуумному баштовому телескопі VTT (Шрьотер та н., 1985) ця ж сама лінія нейтрального заліза реєструвалась з допомогою ПЗС-ґратки розмірами 512x512 комірок (2 см x 2 см). Висота однієї комірки відповідає 125 км на поверхні Сонця, а її ширина - 0.3 пм по довжині хвиль. Ширина вхідної щілини спектрографа була рівною 80 мкм, або 280 км на сонячному диску, тобто поле зору телескопа складало 280 км x 65000 км. Під час спостережень тремтіння сонячної поверхні, обумовлене нестабільністю земної атмосфери не перевищувало 260 км. Лінія FeI 532.4185 нм експонувалась з інтервалом часу 9.3 с протягом 31 хв. Тривалість однієї експозиції складала 5.7

с, а їх загальне число - 200. Таким чином, якщо з допомогою телескопа АЦУ-5 ми зареєстрували один спектр лінії FeI 532,4185 нм від ділянки сонячної поверхні розмірами 280км x 65000км, то з допомогою телескопа VTT - 512 спектрів, кожний від ділянки розмірами 280 км x 125 км, що дало нам можливість досліджувати характеристики п'ятихвилинних коливань окремо над гранулами та порулами.

Результати

Всі 200 зображень (експозицій) були виправлені за темновий струм та неоднакову чутливість окремих комірок, використовуючи вже відому методику (Кісельман, 1994). Для кожної спектральної доріжки $i=1-512$ та кожного окремого зображення $j=1-200$ ми вимірювали два параметри: інтенсивність $I(i,j)$ та швидкість $V(i,j)$ на 11 різних висотах H в атмосфері Сонця: від $H=10$ км до $H=500$ км. Виявилось, що максимальні варіації швидкості V досягають 1 км/с, а інтенсивності I - 10%. Зміни досліджуваних параметрів обумовлені, в основному, конвективними та хвильовими рухами.

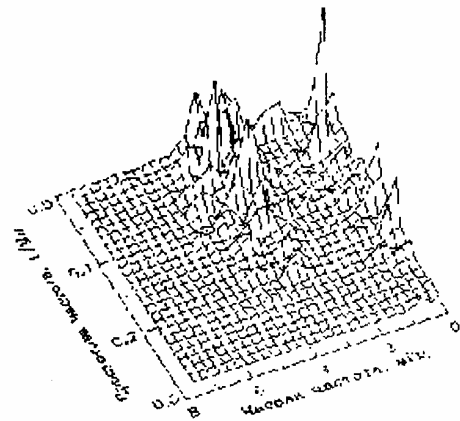


Рис.1. Діагностична діаграма простір-час для флуктуацій швидкості-лінії FeI 532.4185 нм. Потужність коливань дана в умовних одиницях. По осі x-в відкладені мегагерци, а по осі y-в - обернені мегаметри.

Для того, щоб розділити ці рухи на окремі складові, ми скористались тим спостережним фактом, згідно якому,

хвильові рухи мають період біля 5 хвилин, а конвективні - 10 хвилин і побудували діагностичну діаграму (рис.1), на якій потужність варіацій швидкості наведена в залежності від часової (вісь x -в) та просторової (вісь y -в) частот. З цієї діаграми добре видно, що хвилі і конвекція надійно розділяються мінімумом в ділянці частоти 1.9 мГц (період $T=530$ с). У відповідності з цією діаграмою ми обмежили хвильові рухи частотами в діапазоні 1.8-5.7 мГц, а конвекційні - частотами меншими, ніж 2.2 мГц. По простору хвильові рухи від конвективних були відділені при частоті 0.18 1/Мм. Для цього ми використали відповідні високо - та низькочастотні фільтри. Аналогічно були розділені хвильова і конвективна складові

осциляцій інтенсивності. Як приклад, на рис.2 ми показуємо, як для двох положень на диску Сонця (верхня панель $i=100$, нижня панель $i=55$) змінюються з часом (в умовних одиницях) варіації інтенсивності (крапки) та швидкості (неперервна лінія) хвильових та конвективних (відповідно штрих-пунктирна та штрихова лінії) рухів. Зліва - в нижній фотосфері на висоті утворення неперервного спектра ($H=10$ км), а праворуч - на межі фотосфера-хромосфера ($H=500$ км). Звернемо увагу на добре відомий факт, що амплітуди інтенсивності та швидкості п'ятихвилинних коливань з висотою H збільшуються, а конвективних рухів - зменшуються. Крім того, коливання швидкості (неперервна лінія) відстають по фазі від коливань інтенсивності (крапки).

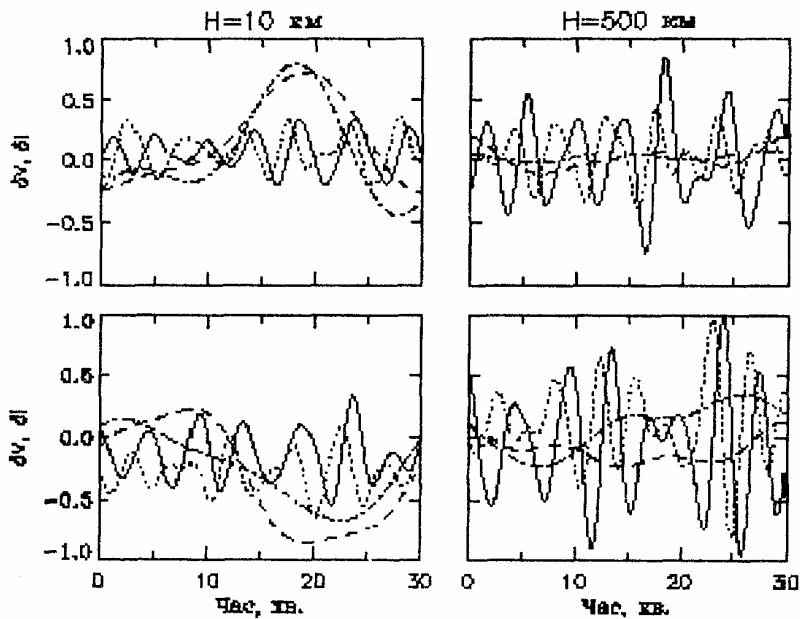


Рис.2. Зміни з часом хвильової та конвективної складових полів швидкості та інтенсивності для двох положень на диску Сонця. Згори для $i=100$, а внизу для $i=55$. Ліворуч - на висоті в атмосфері Сонця $H=10$ км, а праворуч - на $H=500$ км. Суцільна лінія відтворює зміни швидкості хвильових рухів, а крапки - зміни інтенсивності. Штриховою лінією нанесена швидкість конвективних рухів, а штрих-пунктирною - зміни інтенсивності конвективної складової. Швидкості та інтенсивності нанесені в безрозмірних одиницях, а по горизонтальній осі відкладені хвилини.

Нагадаємо, що нашою метою є дослідження взаємозв'язку конвекції та локальних коливань, а саме характер хвильових рухів над гранулами та порулами. Оскільки середня тривалість існування конвективного елементу складає біля 10 хв., тобто двох періодів п'ятихвилинних коливань, то, на жаль, ми не можемо ефективно застосувати методи спектрального аналізу коливань до таких коротких рядів. Ми пропонуємо штучно "продовжити" тривалість існування коливань над гранулами та порулами. З цією метою ми поступили таким чином. Для кожної експозиції $j=1-200$ ми розділили всі спектральні доріжки $i=1-512$ на дві групи. За критерій вибрана середня по простору і часу інтенсивність випромінювання конвективної складової рухів в неперервному спектрі $\langle I_c \rangle$. Ми вважали, що окрема доріжка представляє собою спектр гранули, якщо контраст $K = I_c(i, j) - \langle I_c \rangle$ є додатнім. Доріжки з $K < 0$ розглядалися як спектри порул. Після усереднення в межах кожної експозиції

доріжок з $K > 0$ і окремо з $K < 0$ ми отримали, таким чином, дві часові послідовності ($t=31$ хв), одна з яких відтворювала тільки спектри гранул, а інша - тільки спектри порул. Відзначимо, що середня величина контрасту для всіх гранул склала $\langle K \rangle = +2.1\%$, а для всіх порул відповідно $\langle K \rangle = -2.1\%$. На рис.3 (криві з контрастами $+2.1\%$ та -2.1%) ми показуємо, як у верхній фотосфері ($H=500$ км) над гранулами (суцільна лінія) та порулами (штрих-пунктир) змінюються з часом швидкість (зліва) та інтенсивність (праворуч) хвильової складової рухів.

Щоб дослідити, чи залежить характер хвильових рухів не тільки від знаку контрасту в неперервному спектрі, але і від його величини, ми розділили по яскравості всі гранули і всі порули ще на шість підгруп кожна з $\langle K \rangle = -6.3\%, -5.9\%, -5.5\%, -4.7\%, -3.9\%, -3.0\%, 3.0\%, 3.9\%, 4.7\%, 5.5\%, 5.9\%, 6.5\%$. Деякі результати обчислень при такому розподілі гранул і порул на підгрупи наведені на рис.3.

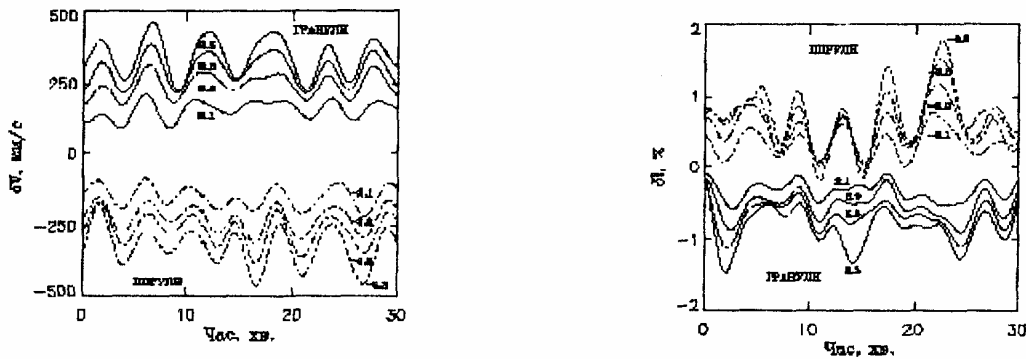


Рис.3. Зміни з часом хвильової складової швидкості (ліворуч) та інтенсивності (праворуч) в верхній фотосфері ($H=500$ км) над гранулами (суцільна лінія) та порулами (штрих-пунктир). Числа біля відповідних кривих - середнє значення контрасту $\langle K \rangle$. Швидкості вимарюються в км/с, а інтенсивності в процентах по відношенню до неперервного спектра. По осі x нанесені хвилини.

Аналіз залежностей на рис.3 дозволив нам зробити такі висновки: По-перше, зі збільшенням абсолютної величини середнього контрасту $\langle K \rangle$ від 2.1% до 6.5% середня амплітуда коливань швидкості $\langle V \rangle$ та інтенсивності $\langle I \rangle$ зросла в два рази як над гранулами, так і над порулами. По-друге, для одного і того ж контрасту ці амплітуди більші над

порулами, ніж над гранулами. По-третє, коливання над гранулами з різним контрастом відбуваються в фазі; це ж саме має місце і для порул. По-четверте, період коливань над гранулами і порулами є різним. В цьому легко впевнитись, якщо коливання над гранулами та порулами піддати спектральному аналізу.

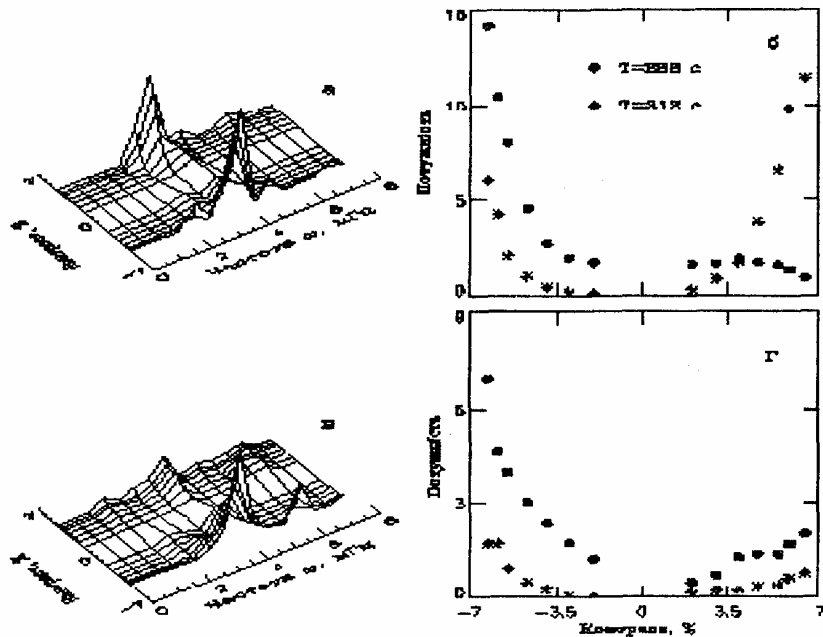


Рис.4. Спектр потужності коливань швидкості (а, б) та інтенсивності (в, г) на висоті в фотосфері Сонця $H=500$ км над гранулами та порулами з різним контрастом. Ліворуч - для всіх досліджуваних частот, а праворуч - для частот, в яких зосереджена найбільша потужність. Потужність коливань виражена в умовних одиницях.

На рис. 4а наведена діаграма контраст-частота, на якій потужність коливань швидкості показана в залежності від частоти та середнього контрасту. З цієї діаграми слідує, що найбільша потужність локальних п'ятихвилинних коливань швидкості сконцентрована в двох основних частотах: 3.73 мГц та 3.21 мГц

(періоди відповідно рівні 268 с та 312 с), причому над гранулами речовина коливається з періодом 312 с, а над порулами, в основному, з періодом 268 с. Більш наочно цей висновок продемонстровано на рис. 4б. Потужність коливань над порулами зі збільшенням контрасту швидко збільшується як для

періоду 268 с (крапки), так і для періоду 312 с (хрестики). Над гранулами зі збільшенням контрасту потужність коливань для періоду 268 с падає, а для періоду 312 с - росте.

По іншому розподілена потужність коливань інтенсивності (рис. 4в, г). З ростом контрасту потужність коливань з періодами 268 с та 312 с і над гранулами, і над порулами збільшується, але найбільш потужні коливання інтенсивності відбуваються тільки над порулами. Запропонований нами метод дослідження хвильових рухів над гранулами та порулами може мати і недоліки. Зі спостережень відомо (Таненбаум та н., 1969), що амплітуда коливань падає зі збільшенням апертури. Таким чином, існує ймовірність того, що знайдене на рис.3 зростання амплітуди коливань швидкості та інтенсивності спричинено не специфікою поведінки речовини над різними фотосферними утвореннями, а зменшенням з 52% ($\langle K \rangle = 2.1\%$) до 4% ($\langle K \rangle = 6.5\%$) площі сонячної поверхні, по якій відбувалось усереднення спектрів. Для перевірки, чи присутні ці особливості нашому методі, ми повторили обчислення, але без розподілу поля яскравості в континуумі на гранули та порули. Ми тільки дотримувались умови, що би в кожний проміжок часу j , спектри усереднювались по такій кількості доріжок, як і у випадку врахування грануляційної структури, але на цей раз "квазівипадково" розміщених по щілині спектрографа.

Обчислена для цього останнього випадку амплітуда коливань швидкості та інтенсивності виявилась незалежною від площі усереднення, що підтверджує правочинність запропонованого методу. Відзначимо також, що від величини площі, по якій усереднюються спектри при квазівипадковому розміщенню комірок ґратки, не залежить не тільки амплітуда, але також період і потужності коливань.

Значну інформацію про характер та умови розповсюдження хвиль в фотосфері

Сонця може дати зсув фаз. Наскільки нам відомо, раніше такі дослідження окремо для гранул та порул не проводились.

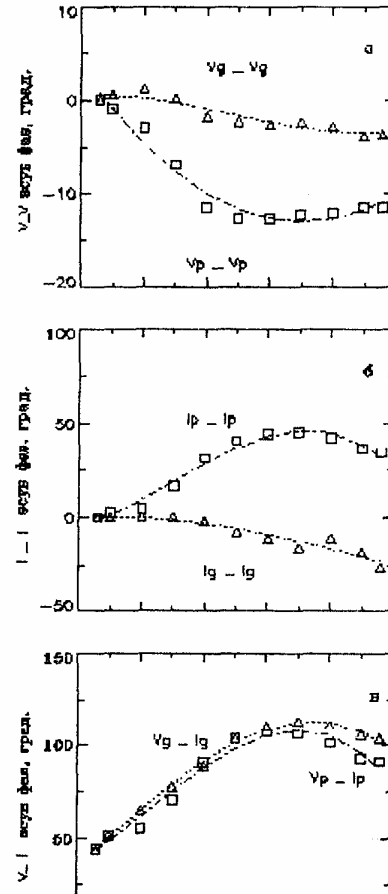


Рис.5. (а) - зсув фаз між коливанням швидкості на висоті $H=10$ км та коливанням швидкості на всіх інших висотах над гранулами (трикутники) та порулами (квадрати). (б) - те ж саме, але для коливання інтенсивностей. (в) - зсув фаз між коливаннями швидкості та коливаннями інтенсивності на різних висотах в атмосфері Сонця. По горизонтальній осі відкладені кілометри, а по вертикальній - градуси.

Нагадаю, що в нашому розпорядженні є дані про коливання швидкості та інтенсивності на 11 висотах в фотосфері Сонця в межах $H=10-500$ км на протязі 31 хв. окремо над гранулами та порулами. На рис.5а показано зсув фаз між швидкістю на висоті утворення континууму ($H=10$ км) і всіма іншими висотами для гранул

(трикутники) та порул (квадрати). На всіх висотах зсув фаз не перевищує 15 град., тобто хвилі близькі до стоячих. Від'ємний знак цієї величини стверджує, що коливання на всіх висотах відстають від коливань в континуумі, тобто хвилі і в гранул, і в порулі розповсюджуються знизу-вверх. Зсув фаз між інтенсивностями на різних висотах (рис. 5б) для гранул від'ємний, а для порул має зворотній характер, що було для нас несподіваним. По абсолютній величині зсув фаз в порулах значно більший, ніж в гранулах. Ці різниці обумовлені різними фізичними умовами (температура, тиск) в гранулах та порулах, а також особливостями руху речовини: над гранулами газ в основному піднімається, а в порулах - опускається. Не дивлячись на такі відмінності в V_V та I_I зсувах фаз в гранулах та порулах, V_I зсуви фаз (рис. 5в) в цих утвореннях майже не відрізняються. На висотах $H=10-200$ км цей зсув менший за 90 град., що вказує на адіабатичний характер розповсюдження хвилі. В верхній фотосфері, де час релаксації температурних неоднорідностей збільшується, як і слід було очікувати, процес розповсюдження хвиль наближається до ізотермічного. На всіх висотах фотосфери коливання швидкості відстають від коливань інтенсивності (температури).

Висновки

Проведені спостереження з високою просторовою (<0.5 кутових сек) і часовою роздільними здатностями (9.3 сек), а також застосування нового методу дало нам можливість детально дослідити характер локальних п'ятихвилинних коливань над гранулами та над порулами.

В верхній фотосфері на висоті $H=500$ км амплітуди коливань швидкості над

гранулами і над порулами тим більш, чим вищий контраст цих утворень, а значить, чим більші інвективні швидкості на висоті утворення неперервного спектру ($H=0$ км). Цим самим ми експериментально підтверджуємо, що локальні п'ятихвилинні коливання швидкості та яскравості в атмосфері Сонця обумовлені турбулентною конвекцією у повній відповідності з теоретичними розрахунками Гуде та ін. (1992).

Нам здається закономірним, що основна потужності коливань швидкості над гранулами, де газ в основному піднімається, і порулами з переважними низхідними рухами сконцентрована в різних періодах. Зовсім природним виглядає і висновок, що коливання інтенсивності над яскравими гранулами і темними порулами відбуватися з однаковим періодом, але з різною потужністю.

Робота виконана за підтримки Українського фонду фундаментальних досліджень, проект 2.4/85. Я вдячний Інституту Астрофізики на Канарських островах за фінансову підтримку роботи і можливість проведення спостережень на телескопі VTT. Автор виносить подяку співробітникам цього інституту др. М. Васкесу (M. Vazquez), др. Х.А.Бонэ (J.F. Bonet), др. М.Койядосу (M. Collados), др. Х.Трухильо Буэно (J. Trujillo Bueno) та др. К.Бран (C. Briand) за плідної обговорення та допомогу при виконанні цієї роботи. Я вдячний Нідерландській Організації Наукових Досліджень, за рахунок якої придбана робоча станція, на якій проведена обробка спостережувального матеріалу. Моя особлива подяка др. Н.Щукиній за надану можливість скористуватися результатами її спостережень.

Автор також вдячний редколегії журналу за пропозицію надрукувати цю статтю.

1. Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. Астрометрия и астрофизика, 1974, вып.39, с.88.

2. Evans J.W., Mishard R. *Astrophys J.*, 1962, v.136, p.493.

3. Frazier E.N. *Astrophys J.*, 1968, v.152, p.557.
4. Goode P.R., Gough D., Kosovichev A. *Astrophys J.*, 1992, v.387, p.707.
5. Kiselman D. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1994, v.104, p.23.
6. Leiton R.B., Noyes R.W., Simon G.W. *Astrophys J.*, 1962, v.135, p.474.
7. Musman S. *Solar Phys.*, 1974, v.36, p.313.
8. Schroter E.H., Soltau D., Wiehr E. *Vistas Astron.*, 1985, v.28, p.519.
9. Tanenbaum A.S., Wilcox J.M., Frazier E.N. *Solar Phys.*, 1969, v.9, p.328.

EXCITATION OF THE LOCAL FIVE-MINUTE OSCILLATIONS IN THE SOLAR ATMOSPHERE

R.I.Kostik

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

We analyze the spatial relationship between the solar granulation and the local five-minute oscillations of velocity and intensity recorded with high spatial and temporal resolution in the FeI spectral line. The five-minute velocity and intensity fluctuations are shown to respond differently to the fine structure of the lower photosphere. The most energetic velocity fluctuations occur above the regions where the largest granules and porules brightness contrast are observed. It means that the excitation of the solar local five-minute oscillations is turbulent convection in nature. Above granules and porules, the matter oscillates with different periods.



Роман Іванович Костик народився 26.05.1940 р. В 1961р. закінчив - фізико-математичний факультет Ужгородського державного університету. В 1967 р. захистив кандидатську дисертацію, а в 1984р. - докторську ("В 1992р. обраний членом-кореспондентом НАНУ (відділення фізики і астрономії, астрофізика). Член Міжнародного Астрономічного Союзу (з 1985 р.), лауреат премії ім. М.П.Барабашова НАНУ (1990р.).