

УДК 523.942

**М. І. Стоділка**

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка  
79005 Львів, вул. Кирила і Мефодія, 8

### **Спектри потужності акустичних осциляцій фотосфери Сонця**

*Відтворено енергетику коливань в сонячній фотосфері на основі спектрів потужності флуктуацій температури та швидкості. Акустичні флуктуації температури та швидкості виділені з допомогою  $k$ - $\omega$ -фільтрації просторово-часових варіацій, відтворених шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання. В області п'ятихвилинних коливань потужність акустичних коливань зосереджена на мезо- та супергрануляційних масштабах. На початку області проникної конвекції потужність коливань температури подавлена розсіянням хвиль на конвективних неоднорідностях; у спектрі швидкості на цих висотах має місце збільшення потужності у високочастотному діапазоні, обумовлене викривленням фронтів хвиль. Високочастотні коливання захоплюються конвективною структурою середньої фотосфери  $100 \text{ км} < h < 400 \text{ км}$ . Локалізовано джерела п'ятихвилинних та високочастотних коливань.*

*СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ФОТОСФЕРЫ СОЛНЦА, Стодилка М. И. — Воспроизведена энергетика колебаний в солнечной фотосфере по спектрам мощности флуктуаций температуры и скорости. Акустические флуктуации температуры и скорости выделены с помощью  $k$ - $\omega$ -фильтрации пространственно-временных вариаций, воспроизведенных путем решения неравновесной инверсной задачи переноса излучения. В области пятиминутных колебаний мощность акустических колебаний сосредоточена на мезо- и супергрануляционных масштабах. В начале области проникающей конвекции мощность колебаний температуры подавлена рассеянием волн на конвективных неоднородностях; в спектре скорости на этих высотах имеет место увеличение мощности в высокочастотном диапазоне, вызванное искривлением волновых фронтов. Высокочастотные колебания захватываются конвективной структурой средней фотосферы. Локализованы источники пятиминутных и высокочастотных колебаний.*

*POWER SPECTRA OF ACOUSTIC OSCILLATIONS IN THE SOLAR PHOTOSPHERE, by Stodilka M. I. — We reproduced energetics of oscillations in the solar photosphere based on power spectra of temperature and*

*velocity fluctuations. Acoustic oscillations of temperature and velocity in the solar photosphere are separated by  $k$ - $\omega$  filtering of time-spatial variations reproduced by solving the nonequilibrium inverse radiation transfer problem. Acoustic oscillation power is localized on meso-supergranulation scales in the range of five-minute oscillations. At the beginning of the overshooting convection region the power of temperature oscillations is suppressed by the wave scattering on convective nonuniformities. The power of the observed velocity spectrum is increased in the high-frequency range at these heights; that is due to distortion of wave fronts. High-frequency oscillations are trapped by the convective structure of the middle photosphere. The sources of five-minute and high-frequency oscillations are localized.*

#### СТАН ПРОБЛЕМИ

При спостереженнях випромінювання Сонця виявляють коливання інтенсивності, швидкості та інших величин, що описують стан сонячної атмосфери.

Для аналізу результатів спостережень осциляцій використовують здебільшого морфологічний та статистичний підходи; основною складовою статистичного методу є вивчення спектрів потужності флуктуацій швидкості (кінетична енергія) та інтенсивності чи температури (теплова енергія), а також кореляційних та фазових співвідношень між спостережуваними величинами. Так, форма спектру потужності дає інформацію про енергетичні втрати та взаємоперетворення енергії на різних масштабах [3]; кореляційні співвідношення між спостережуваними даними на різних висотах дозволяють визначати положення джерел коливань, а фазові зсуви між інтенсивністю та швидкістю, наприклад, дають можливість деталізувати тип хвилі (біжуча, стояча, еванесцентна тощо).

Застосування спектроскопічних даних для досліджень осциляцій дозволяє зрозуміти, як перетворюється енергія на різних висотах, вивчати особливості грануляції та коливань, що розвиваються в різних шарах сонячної атмосфери.

В роботах [3, 4] проведено дослідження залежності спектрів флуктуацій інтенсивності випромінювання та швидкості від просторового масштабу  $k_{\perp}$ , що дозволило проаналізувати зміну енергії гранул з висотою, виявити збільшення потужності коливань в області міжгранул. Частотні залежності спектрів флуктуацій температури та швидкості отримано в роботах [8, 9]; а самі флуктуації досліджуваних величин відтворено по спостереженнях в лінії K I  $\lambda$  769.9 нм з допомогою відомого інверсного коду SIR [10]. Однак низьке просторове розділення не дозволило розділити флуктуації на конвективний та хвильовий компоненти; крім цього, відтворені параметри атмосфери представлено в залежності від оптичної глибини, тоді як для надійної інтерпретації бажана геометрична шкала у фіксованій системі відліку. Тим не менше, отримано ряд цікавих результатів: потужність 5-хв коливань зосереджена в трьох піках, відносний вклад яких змінюється з оптичною глибиною; потужність флуктуацій швидкості майже монотонно збільшується до верхніх шарів атмосфери, тоді як потужність флуктуацій температури досягає мінімуму при  $\lg \tau = 0 \dots -1.5$  і різко збільшується поза цим інтервалом. В роботі [7] інверсна техніка була застосована до спостережень сонячної грануляції з високою просторовою роздільною здатністю.

Наше дослідження виконано на базі профілів неоднорідної атмосфери Сонця з високим просторовим та часовим розділенням, що дозволяє коректно виділити хвильову складову. Просторово-часові варіації параметрів атмосфери відтворено шляхом розв'язку інверсної нерівноважної задачі переносу випромінювання (розділення по висоті при цьому під-

вищується) із застосуванням стабілізаторів Тихонова, які суттєво покращують достовірність відтворюваних величин; висотна стратифікація варіацій подана у геометричній шкалі висот.

Мета роботи — вивчити енергетику коливань в сонячній фотосфері на основі спектрів потужності флуктуацій температури та швидкості, що дають відповідь про статистичні закономірності осциляцій в атмосфері Сонця, їхні особливості на різних висотах; дослідити прояви осциляцій на різних масштабах.

#### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Локальні просторово-часові варіації параметрів (температура, поле швидкостей) неоднорідної атмосфери Сонця відтворено за профілями лінії Fe I  $\lambda$  532.42 нм з високим просторовим розділенням шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання з використанням стабілізаторів Тихонова. Визначена за функціями вкладу в емісію область утворення вибраної лінії охоплює шари від декількох до 500 км.

Профілі отримано Н. Г. Щукіною на Німецькому вакуумному телескопі [5]. Спостереження проводились поблизу центра сонячного диску в незбуреній області. Під час спостережень дрижання сонячної поверхні на входній щілині спектрографа не перебільшувало 0.5" (кожні три послідовні рядки пікселів було усереднено по щілині вздовж просторового напрямку), тобто просторова роздільна здатність складала 380 км. Зображення були виправлені за темновий струм і неоднакову чутливість окремих пікселів.

За аналогією роботи [5] ми отримали набір профілів, пронормованих на середній континуум (усереднений по спектральних доріжках протягом всього часу спостережень): всього 34000 профілів, яким відповідає поверхня атмосфери протяжністю 64337 км (170 профілів) через кожні 9.3 с протягом 31 хв. Для кожного профілю застосували інверсну процедуру, що дозволило відтворити стратифікацію температури та поле швидкостей ( $V_{\text{micro}}$ ,  $V_{\text{los}}$ ) у фотосфері Сонця вздовж двох просторових координат [1].

Просторово-часові варіації шарів атмосфери Сонця визначаються як хвильовими, так і конвективними рухами. Спектральні особливості варіацій дозволяють розділити їх на конвективну та хвильову складові. Для розділення різних типів рухів в сонячній атмосфері використовують багатовимірний фур'є-аналіз просторово-часової серії даних про інтенсивність, температуру чи вертикальну складову швидкості. Так,  $k$ - $\omega$ -фільтрація даних слугує для діагностики акустичних, гравітаційних мод коливань, а також конвективних рухів, або для усунення певної складової. Тут акустичні моди коливань також виділяються за допомогою  $k$ - $\omega$ -перетворення. Саме розділення роблять, провівши лінію  $\omega = v_s k_x$  чи гіперконус  $\omega^2 = v_s^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$  Лемба, де  $v_s$  — звукова швидкість. Так, області  $\omega \geq v_s k_x$  чи  $\omega \geq v_s^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$  відповідають акустичні коливання. Застосувавши до відповідно виділеної частини фур'є-образу обернене перетворення Фур'є, легко отримати просторово-часові варіації температури, швидкості та інших величин, викликаних коливними рухами.

Використання вузькосмугових фільтрів дає можливість вивчати зародження і поширення п'ятихвилинних, низькочастотних і високочастотних коливань в атмосфері Сонця.

У нашому підході відтворені параметри атмосфери прив'язано до геометричної шкали висот, а тому для розділення хвильової та конвективної складових ми використовуємо не фіксовану звукову швидкість (як у роботі [6]), а реальну швидкість звуку, що змінюється з висотою.

## ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Відтворені за лінією Fe I  $\lambda$  532.42 нм параметри (температура, поле швидкостей) описують динаміку спокійної ділянки в центрі диску Сонця довжиною 64.3 Мм протягом 31 хв [5]. З допомогою вибраної лінії нейтрального заліза ми провели діагностику шарів атмосфери Сонця від рівня утворення континууму (точніше:  $-50$  км) до температурного мінімуму. А це, в свою чергу, дозволяє вивчати енергетику коливань, перетворення та зміну теплової і кінетичної енергії, що проходить з підфотосферних шарів, через фотосферу в залежності від частоти коливань та на різних просторових масштабах.

Нижче ми подаємо спектри потужності варіацій температури та проєкції швидкості руху речовини на напрям променя зору. Через те що профілі вибраної лінії чутливіші до температури, ніж до поля швидкостей, при обговоренні отриманих результатів зроблено акцент на спектр потужності температурних варіацій. Оскільки час та область спостережень обмежені, ми відтворюємо обмежений набір різних мод коливань, що породжує піки та смуги в спектральних залежностях. Наявність багатьох піків говорить скоріше про погану статистичну стійкість отриманих результатів, ніж про властивості незбуреної атмосфери [2].

На рис. 1 показано отримані спектри варіацій температури та швидкості в залежності від частоти коливань. Всі спектри потужності в роботі нормовано до одиниці; у 2D-представленні вони зображені в логарифмічному масштабі. Згідно з отриманими результатами варіації температури в верхній та середній фотосфері розділені частотою 2.5 мГц на конвективну та хвильову складові; для розділення в нижній фотосфері необхідно виконати  $k-\omega$ -фільтрацію. Варіації швидкості розділені по всій фотосфері, однак дещо нижчою частотою 2 мГц. Для варіацій температури максимум потужності припадає на конвективну складову, тоді як для варіацій швидкості — на хвильову. Висотний розподіл спектру потужності конвективної складової вказує на те, що гранули досягають висот температурного мінімуму, а різке збільшення варіацій температури на висоті  $h \approx 400$  км і відповідне зменшення флуктуацій вертикальної швидкості конвективної складової свідчить, на наш погляд, про формування на висотах 350—450 км інтенсивних горизонтальних потоків. Зрештою, відтворені нами знімки конвективних варіацій показують різке зменшення конвективних швидкостей на висотах  $h > 350$  км, а на висотах  $300 \text{ км} < h < 500 \text{ км}$  найчіткіше проявляється температурна інверсія (як в гранулах, так і в міжгранулах), що додатково вказує на утворення горизонтальних потоків. Звичайно, безпосередньо виявити горизонтальні потоки зможе тільки дослідження варіацій на краю диску Сонця.

Спектр потужності акустичних коливань, виділений з допомогою  $k-\omega$ -фільтрації, показано на рис. 2. В нижній фотосфері на всіх частотах, за винятком області п'ятихвилинних коливань, спектральний розподіл варіацій температури (рис. 2, а, б) нагадує білий шум, що свідчить на користь стохастичного збудження хвиль турбулентною конвекцією. Потужність акустичних коливань температури в середній і верхній фотосфері зосереджена в трьох піках: 3.8, 4.6 і 5.9 мГц, а у нижній — у чотирьох піках: 1.2, 2.1, 3.0, 4.2 мГц; їхній відносний вклад змінюється з висотою. Найбільша потужність коливань припадає на 3.3—4.6 мГц у середній та на 3 мГц у нижній фотосфері. Різке положення максимумів потужності в шарах нижньої та середньої фотосфери свідчить, очевидно, про наявність у верхніх шарах фотосфери джерел коливань, що не зв'язані з нижніми шарами. У низькочастотній області ( $\nu < 2$  мГц), яка внаслідок накладання грану-

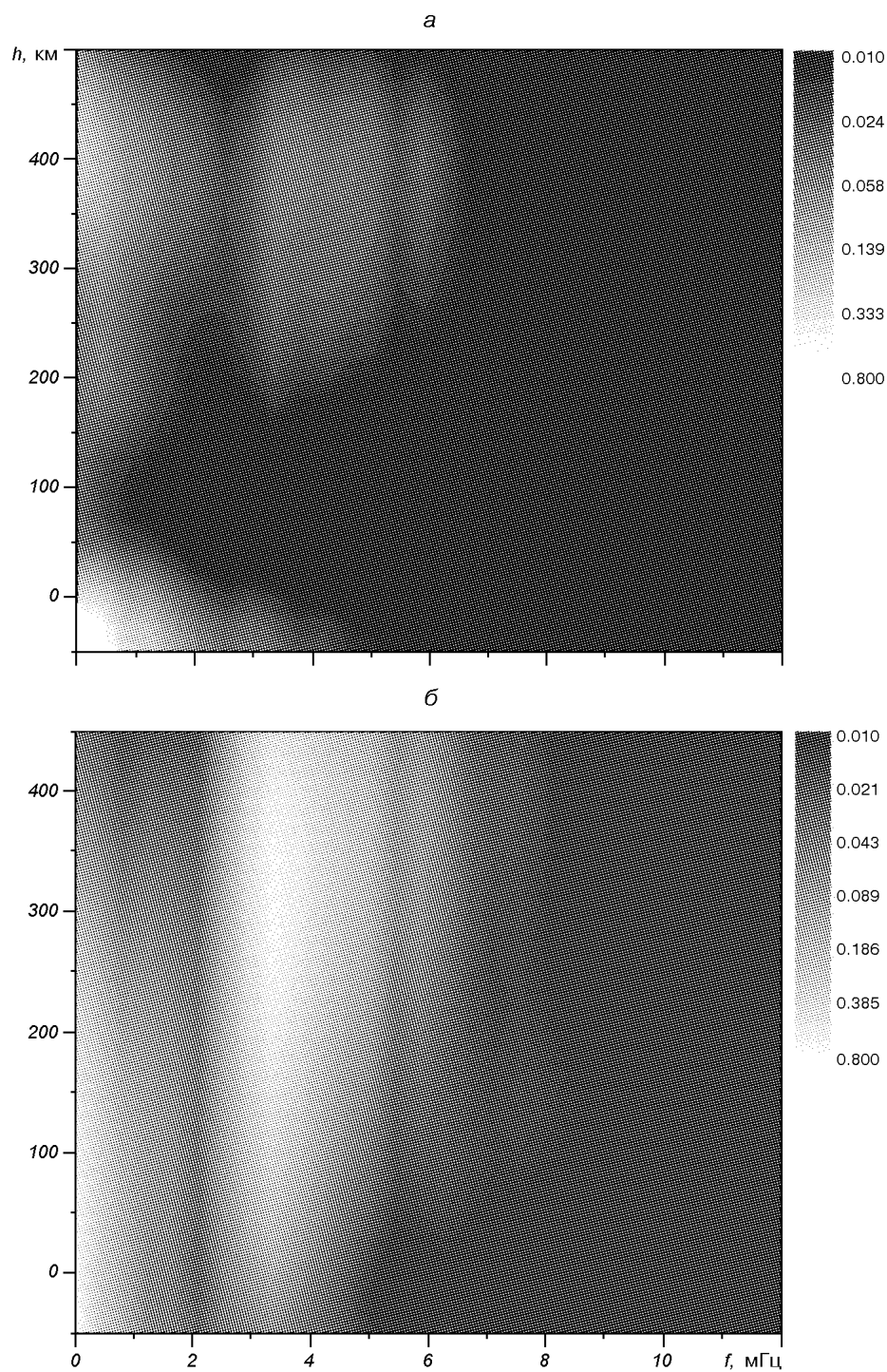


Рис. 1. Нерозділені спектри потужності (у відн. од.) коливань: *а* — температури, *б* — променевої швидкості

ляційних рухів складна для досліджень, інтенсивність акустичних коливань різко зменшується.

Спектр потужності швидкості (рис. 2, *в*, *г*) плавно збільшується з висотою, що обумовлено зменшенням густини речовини. Потужність швидкості зосереджена переважно в одному піку  $\nu = 3.3$  мГц; другий боковий пік

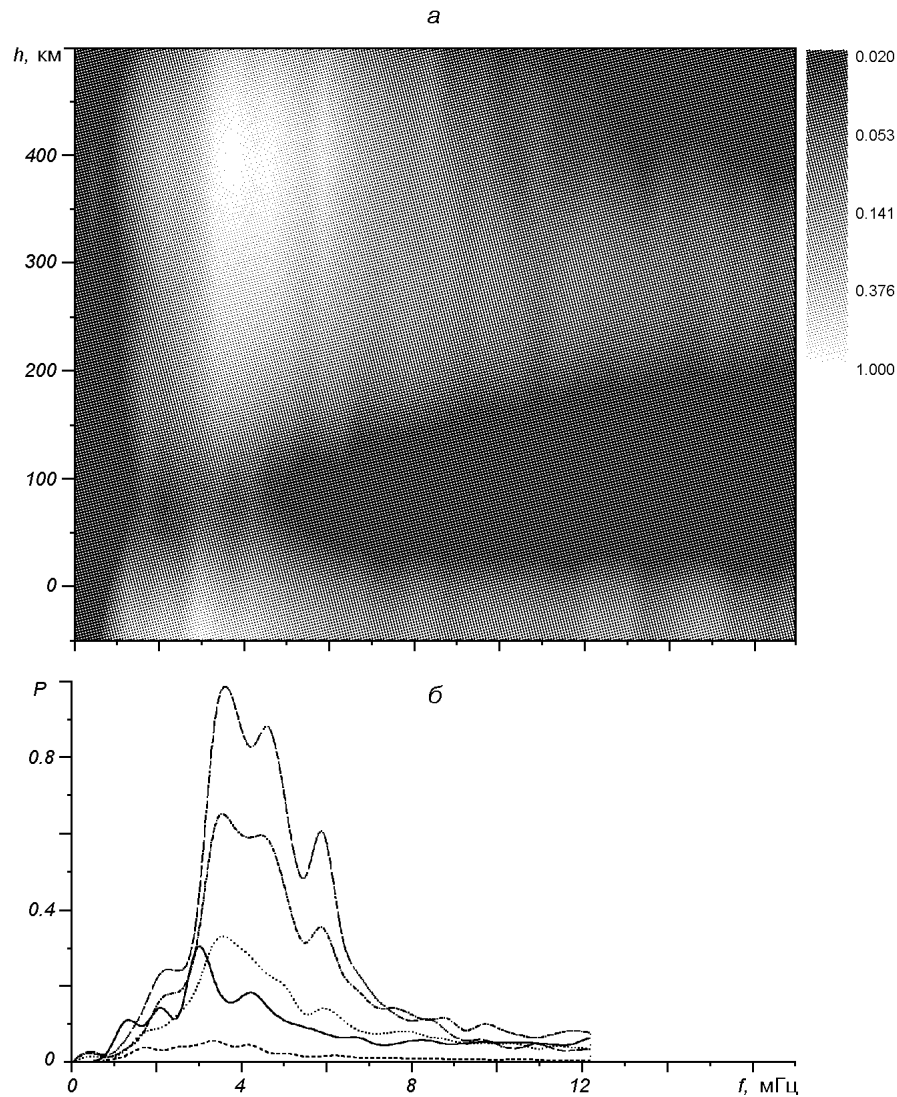


Рис. 2, а, б. Спектри потужності (у відн. од.) акустичних коливань температури

$\nu = 5.9$  мГц в нижній фотосфері значно слабший. Тут слід зауважити, що максимум функції відгуку для променевої швидкості (функція відгуку визначає чутливість лінії до варіацій відповідного параметра) для центра досліджуваної лінії припадає на висоти 425—450 км, при  $h = 500$  км функція відгуку зменшується втричі, в області температурного мінімуму — майже на два порядки, а тому ми подаємо результати для висот, менших від 500 км, бо у вищих шарах лінія не чутлива до варіацій променевої швидкості; аналогічний максимум функції відгуку для температури знаходиться трохи вище.

У середній та верхній фотосфері потужність коливань температури різко збільшується, це може бути викликано як зменшенням густини речовини, так і наявністю у верхніх шарах джерел коливань. Щоб врахувати перший фактор збільшення температури з висотою, будемо розглядати потік внутрішньої енергії осциляцій, що зводиться до формального домноження потужності на густину речовини та швидкість звуку. Відповідний розподіл потоку потужності зображено на рис. 2, д, е. Розподіл потоку потужності дозволяє чітко локалізувати джерела осциляцій Сонця. Потужність

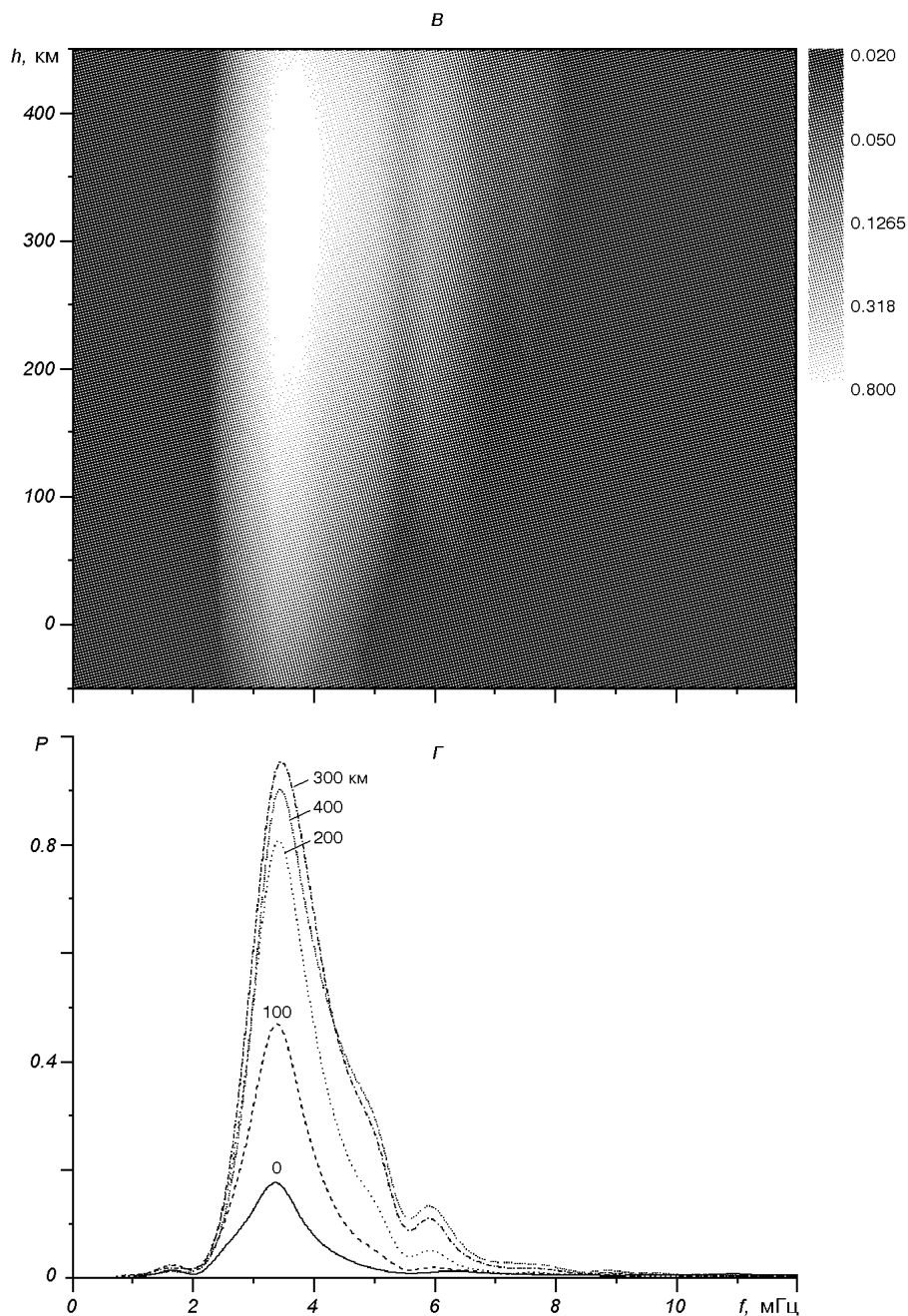


Рис. 2, а, б. Спектри потужності (у відн. од.) акустичних коливань швидкості

фотосферних коливань температури збільшується у нижній фотосфері:  $h < 50$  км, а також в середній фотосфері. На висоті  $h \approx 100$  км (початок області проникної конвекції) потік потужності найменший — за рахунок розсіювання хвиль на атмосферних неоднорідностях [12], а також через радіаційне згладжування температурних флуктуацій. Знімок потоку (по модулю) енергії п'ятихвилинних коливань температури показано на рис. 3, а; в шарах переходу до проникної конвекції фронти хвиль викривляються фотосферними неоднорідностями. Із просторового потоку енергії легко визначити положення джерел коливань. Більшість потужних джерел коли-

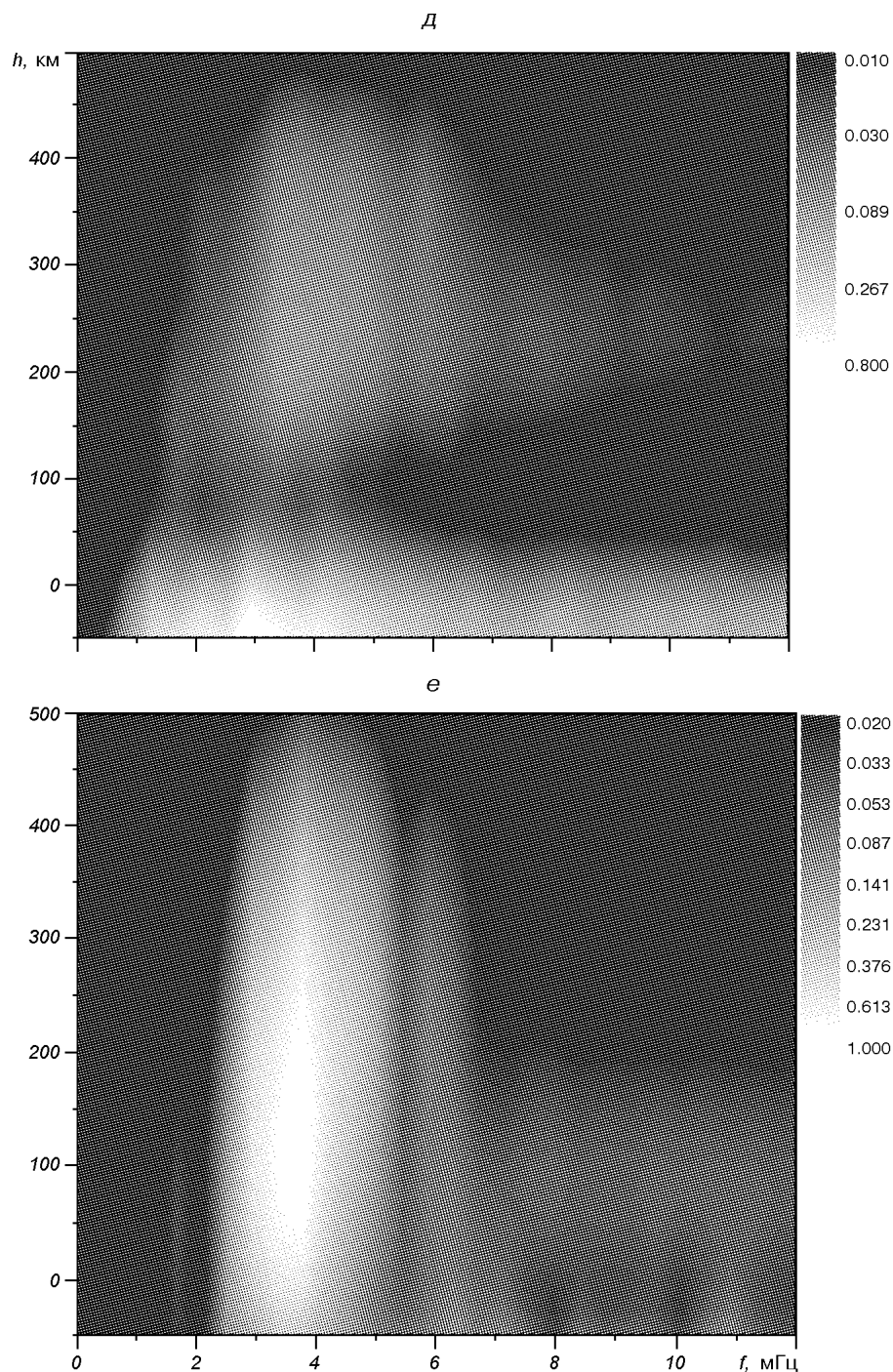


Рис. 2, *д*, *е*. Спектри потужності (у відн. од.) акустичних коливань: *д* — потоку потужності коливань температури, *е* — потоку потужності коливань швидкості

вань залягають в нижніх шарах фотосфери  $h < 50$  км. На жаль, за фраунгоферовими лініями можна спостерігати лише вершину тих осциляцій, які розміщені значно нижче. В середній фотосфері потік потужності має другий (відносно невеликий) максимум; а отже, в шарах середньої фотосфери  $100 \text{ км} < h < 400$  км (рис. 3, *а*) також є джерела коливань:  $X = 5, 20, 29, 45$  Мм. Такі джерела коливань в шарах середньої фотосфери



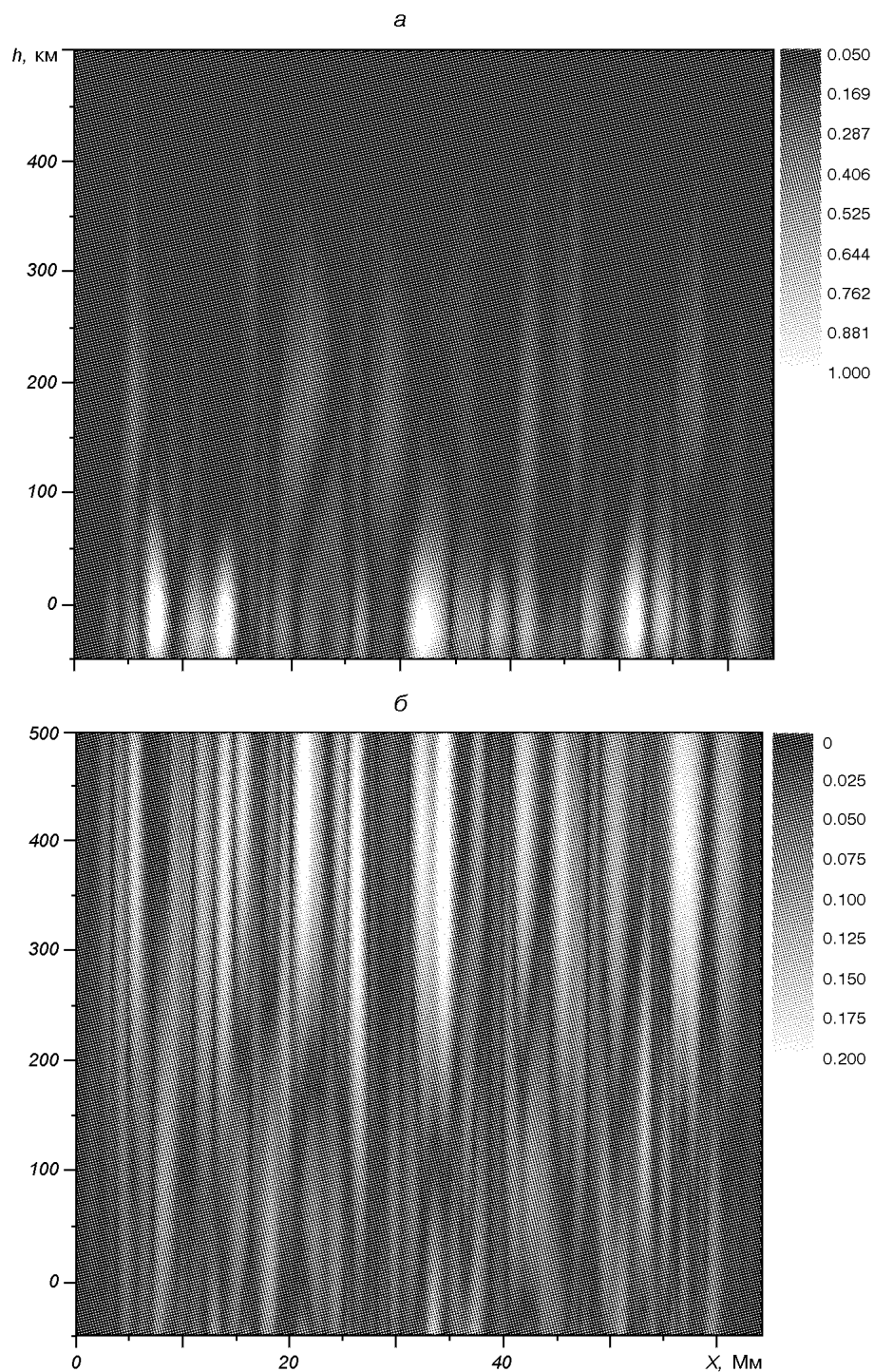


Рис. 3. Знімок просторового розподілу осциляцій (по модулю): *a* — потоку енергії (у відн. од.) п'ятихвилинних флуктуацій температури, *б* — флуктуацій швидкості (км/с) ( $T = 2-2.5$  хв)

обумовлені (згідно з нашими морфологічними дослідженнями) здебільшого розпадом гранул і утворенням або ж розширенням на їхнє місце міжгранул.

В області високих частот ( $f > 5$  мГц) джерела коливань температури розділені смугою шириною 100 км:  $50 \text{ км} < h < 150 \text{ км}$  (рис. 2, *д*), смуга припадає на початок області проникної конвекції. На частотах від 1.5 до

4.5 мГц є вузькі «канали», по яких енергія від джерел коливань поширюється в верхні шари атмосфери з найменшими втратами. Такі «канали» виявляє, зокрема, морфологічне дослідження коливань (рис. 3, а:  $X = 5.5, 17, 20, 42$  Мм); цим каналам відповідають здебільшого гранульно-міжгранульні прошарки. Згадані «канали» найефективніше працюють на частотах п'ятихвилинних коливань (рис. 2, д).

Для флуктуацій швидкості у шарах, що прилягають до початку області проникної конвекції, спостерігається незначне збільшення потоку потужності (рис. 2, е), в тому числі у високочастотній області. На рис. 3, б показано знімок високочастотних коливань швидкості ( $T = 2 \dots 2.5$  хв); для кращого розділення фронтів хвиль подаються модулі варіацій швидкості. Як бачимо, в області переходу до проникної конвекції зустрічаються викривлені fronti хвиль, а також виявляються нові джерела коливань швидкості. Але оскільки високочастотних джерел коливань температури у цій області практично немає (рис. 2, а, д), то видимі джерела високочастотних коливань швидкості є результатом викривлення фронтів хвиль у бік вертикалі, проекція швидкості коливального руху речовини на промінь зору при цьому збільшується.

Морфологічне дослідження 5-хв коливань виявляє у фотосферних шарах поряд з джерелами коливань температури джерела, що збуджують коливання швидкості. Якісне зіставлення динаміки розподілу акустичних флуктуацій температури та швидкості показує, що згадані джерела збігаються. Для оцінки відповідності коливань температури та швидкості було визначено двовимірний коефіцієнт взаємної кореляції між  $T$  та  $V$ :

$$r(t, X) = \int_{-\infty}^{\infty} dt \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{T}(\tau, \xi) \cdot \tilde{V}(\tau + t, \xi + X) d\xi,$$

де  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{V}$  — центровані та нормовані на середні квадратичні відхилення варіації температури та променевої швидкості.

На рис. 4 зображено просторово-часовий розподіл коефіцієнта взаємної кореляції в нижній ( $h = 0$ ) та середній ( $h = 300$  км) фотосфері. Отримані залежності підтверджують відповідність флуктуацій швидкості та температури (максимум  $r$  має місце при  $X = 0$ ) та дають можливість оцінити протяжність (декілька Мм) та тривалість (декілька періодів) коливань. Взаємна кореляція у верхніх шарах збільшується. На основі часових залежностей  $r(t, 0)$  легко визначити фазові зсуви між температурою та променевою швидкістю. Зсув фаз між температурою та швидкістю для джерел середньої фотосфери здебільшого близький до  $110^\circ$ , що вказує на адіабатичний режим коливань. Для джерел, що залягають у нижній фотосфері, він становить  $24^\circ$ .

У залежності від просторового масштабу фотосферні неоднорідності поділяють на грануляцію ( $0.3 \text{ Мм}^{-1} < k_h < 1 \text{ Мм}^{-1}$ ), мезогрануляцію ( $0.1 \text{ Мм}^{-1} < k_h < 0.3 \text{ Мм}^{-1}$ ) та супергрануляцію ( $k_h < 0.1 \text{ Мм}^{-1}$ ) [11]. На неоднорідності конвективного походження накладаються коливні рухи. Оцінимо їхні горизонтальні масштаби. Нехай швидкість звуку в середній фотосфері дорівнює 8 км/с, тоді 5-хв коливанням відповідають масштаби  $k_h \approx 0.4 \text{ Мм}^{-1}$ ; довгоперіодичним ( $T = 10$  хв) —  $0.2 \text{ Мм}^{-1}$ , короткоперіодичним ( $T = 2$  хв) —  $1 \text{ Мм}^{-1}$ . Оскільки ми маємо результати спостережень поверхні Сонця вздовж щілини спектрографа, то можна говорити тільки про  $k_x$ , тобто для 5-хв коливань  $0 < k_x \leq 0.4 \text{ Мм}^{-1}$ , довгоперіодичних —  $0 < k_x \leq 0.2 \text{ Мм}^{-1}$ , короткоперіодичних —  $0 < k_x \leq 1 \text{ Мм}^{-1}$ . Отже, довгоперіодичні та п'ятихвилинні коливання попадають в область мезо- та супергрануляційних масштабів; короткоперіодичні коливання охоплюють в основному грануляційні масштаби.

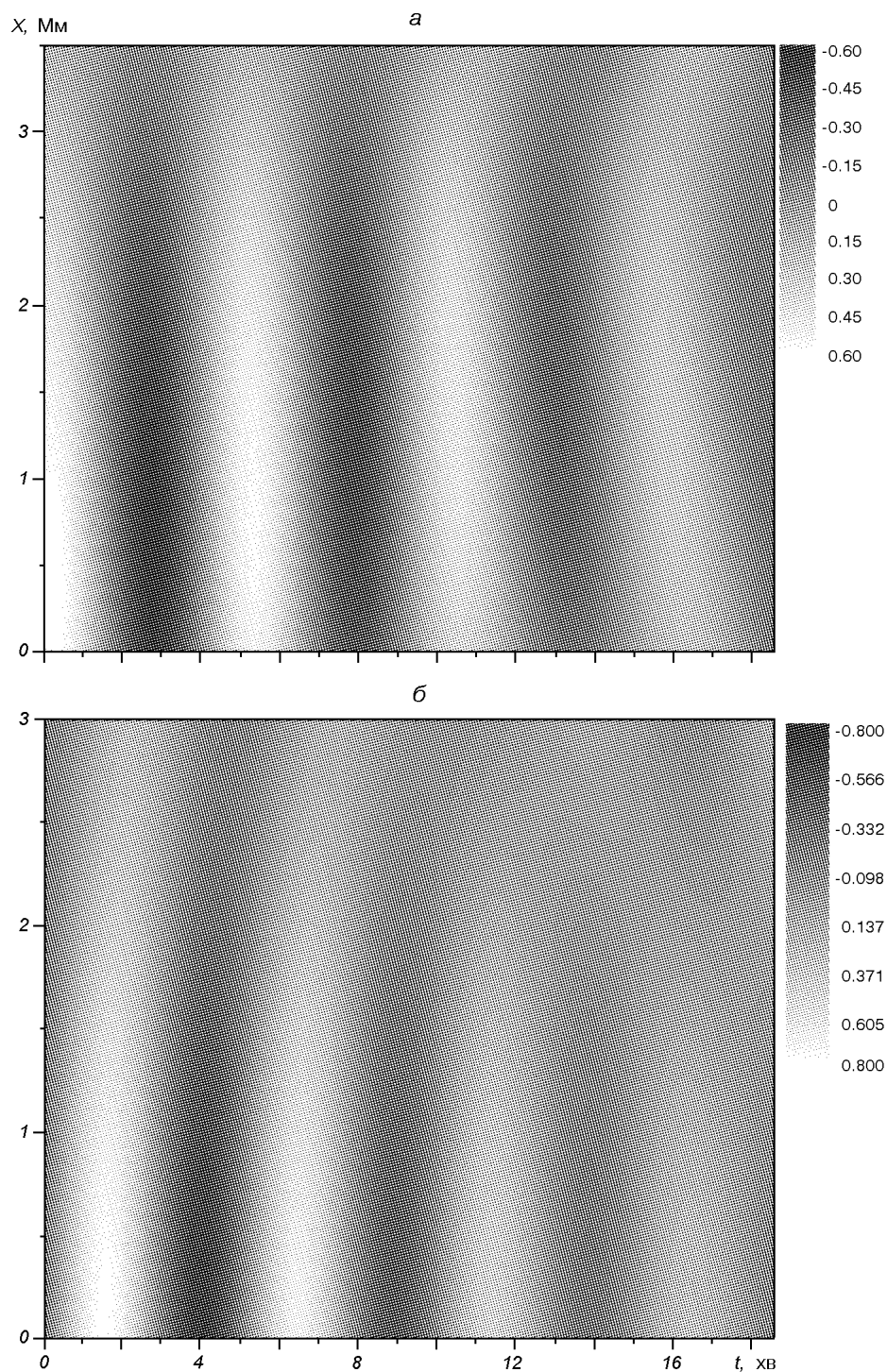


Рис. 4. Просторово-часовий розподіл коефіцієнта взаємної кореляції між варіаціями температури та швидкості: *a* — у нижній фотосфері ( $h = 0$ ); *б* — у середній фотосфері ( $h = 300$  км)

Спектри потужності в залежності від просторового масштабу (без частотного розділення: потужність проінтегрована по часовій частоті) приведено на рис. 5. Оскільки вклад довгоперіодичних коливань незначний (рис. 1), то потужність осциляцій на просторових масштабах визначається 5-хв та короткоперіодичними коливаннями. Для флуктуацій температури та

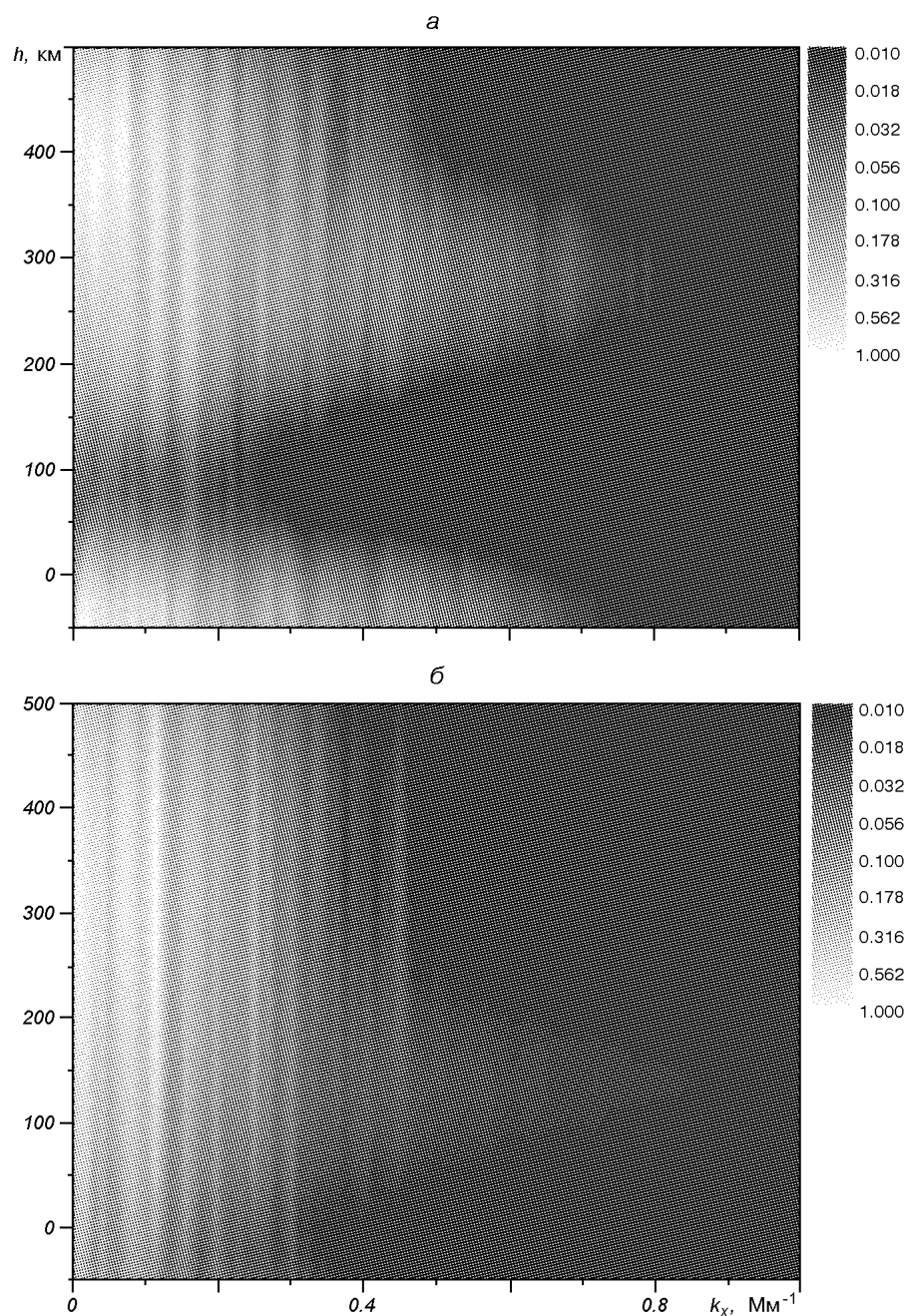


Рис. 5, а, б. Спектри потужності (у відн. од.) акустичних коливань в залежності від просторового масштабу: а — температури, б — швидкості

швидкості максимум потужності припадає на мезо- та супергрануляційні масштаби. На грануляційних масштабах ( $0.3 \text{ Мм}^{-1} < k_x < 1 \text{ Мм}^{-1}$ ) спостерігається різке зменшення потужності коливань у перехідній зоні до проникної конвекції (рис. 5, а), аналогічна картина для високочастотних коливань (рис. 2, а); тобто нижня фотосфера виконує роль резонатора для високочастотних коливань, тоді як трохи вище, у середній фотосфері, потужність флуктуацій температури знову збільшується. Високочастотні коливання виникають на висотах  $100 \text{ км} < h < 400 \text{ км}$ . Зазначимо, що висоті  $h = 100 \text{ км}$  відповідає початок області проникної конвекції, а в шарах

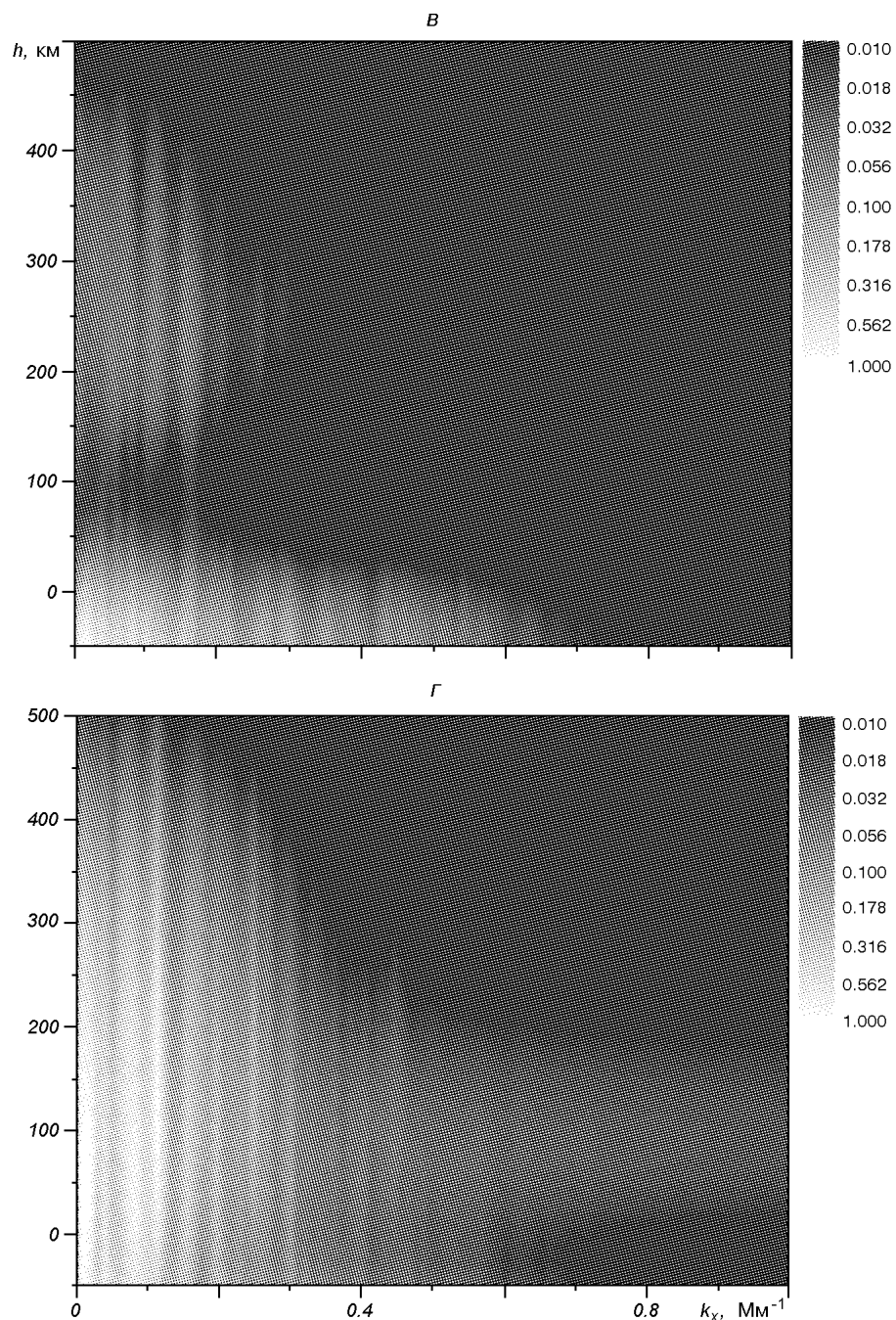


Рис. 5, в, г. Спектри потужності (у відн. од.) акустичних коливань в залежності від просторового масштабу: в — потоку потужності коливань температури, г — потоку потужності коливань швидкості

$350 \text{ км} < h < 450 \text{ км}$  існують інтенсивні горизонтальні потоки, що спричиняє відбивання хвиль. Отже, високочастотні коливання захоплюються конвективною структурою фотосфери.

На мезо- та супергрануляційних масштабах у перехідній області до проникної конвекції відбувається незначне послаблення амплітуди коливань. У середній та верхній фотосфері потужність коливань збільшується. На рис. 5, в, г зображено розподіл потоку потужності осциляцій температури-

ри та швидкості в залежності від просторового масштабу. Спектр потоку флуктуацій температури відображає наявність двох зон, в яких локалізовані джерела коливань: 1) в нижній фотосфері на супер- та мезогрануляційних масштабах, 2) в середній та верхній фотосфері на супер- та мезогрануляційних масштабах. Потік потужності високочастотних коливань, захоплених грануляційною структурою середньої фотосфери, яким відповідають грануляційні масштаби (рис. 5, *в*), суттєво менший за потік енергії п'ятихвилинних коливань (супер- та мезогрануляційні масштаби). Потужність флуктуацій швидкості (рис. 5, *г*) також зосереджена переважно на мезо- та супергрануляційних масштабах; з висотою вона збільшується. Область підвищеного потоку потужності, що припадає на початок проникної конвекції, обумовлена на грануляційних масштабах викривленням хвильових фронтів, про що згадувалось вище. На жаль, за проекцією швидкості нічого не можна сказати про кінетичну енергію, що переноситься хвилею.

Як бачимо, спектри потужності температури більш інформативні при вивченні особливостей зародження та поширення коливань в атмосфері Сонця, ніж спектри променевих швидкостей.

Ми розглянули спектри потужності акустичних коливань, що збуджуються та поширюються у фотосфері Сонця.

Надалі планується зробити більш детальне вивчення фотосферних коливань статистичними методами з використанням когерентності та фазових співвідношень.

## ВИСНОВКИ

В роботі відтворена енергетика коливань в сонячній фотосфері на основі спектрів потужності флуктуацій температури та швидкості за профілями фраунгоферових ліній з високим просторовим та часовим розділенням: досліджені спектри акустичних флуктуацій температури та швидкості на різних висотах; акустичні флуктуації виділені шляхом  $k-\omega$ -фільтрації просторово-часових варіацій. Основні результати нашого дослідження:

1) спектри конвективної складової флуктуацій температури та швидкості вказують на формування на висотах 350—450 км інтенсивних горизонтальних потоків;

2) потужність акустичних коливань температури зосереджена на мезо- та супергрануляційних масштабах в декількох піках; їхній відносний вклад змінюється з висотою. Потужність флуктуацій швидкості зосереджена в одному піку при  $\nu = 3.3$  мГц. Найбільша потужність коливань температури припадає на 3.3—4.6 мГц в середній та на 3 мГц в нижній фотосфері;

3) на висотах початку області проникної конвекції потужність коливань температури досягає (внаслідок розсіяння хвиль на атмосферних неоднорідностях та радіаційного згладжування температурних флуктуацій) мінімальних значень, тоді як потужність швидкості у високочастотному діапазоні збільшується, що викликано викривленням в цих шарах фронтів акустичних хвиль; спектр флуктуацій швидкості плавно збільшується з висотою;

4) високочастотні акустичні коливання захоплюються конвективною структурою середньої фотосфери Сонця:  $100 \text{ км} < h < 400 \text{ км}$ ;

5) джерела збудження п'ятихвилинних температурних коливань розміщені здебільшого в нижній, а також в середній фотосфері; ці джерела коливань температури збігаються з джерелами коливань швидкості. Зсув фаз між температурою та швидкістю для джерел середньої фотосфери здебільшого близький до  $110^\circ$ , тоді як для джерел, що залягають у нижній фотосфері, він становить  $24^\circ$ .

1. *Стоділка М. І.* Температурна структура реальної сонячної грануляції // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 3.—С. 407—416.
2. *Deubner F.-L.* Some Properties of Velocity Fields in the Solar Photosphere. IV: Long periods, Five Minute Oscillations, and the Supergranulation at Lower Layers // *Solar Phys.*—1972.—**22**.—P. 263—275.
3. *Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al.* Penetration of the solar granulation into the photosphere: height dependence of intensity and velocity fluctuations // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**109**, N 1.—P. 79—108.
4. *Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al.* Spatial relation between the 5-minute oscillations and granulation patterns // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**313**, N 1.—P. 297—305.
5. *Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G.* Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**369**, N 2.—P. 660—671.
6. *Puschmann K., Vazquez M., Bonet J. A., et al.* Time series of high resolution photospheric spectra in a quiet region of the Sun. I. Analysis of global and spatial variations of line parameters // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**408**, N 1.—P. 363—378.
7. *Rodriguez Hidalgo I., Ruiz Cobo B., Collados M., del Toro Iniesta J. C.* Granular and intergranular model atmospheres from inversion of solar two-dimensional spectroscopic data // *Astron. Soc. Pac. Conf. Series.*—1999.—**173**.—P. 313—316.—(Proc. on Theory and Tests of Convection in Stellar Structures / Eds Alvaro Gimenez, Edward F. Guinan and Benjamin Montesinos).
8. *Rodriguez Hidalgo I., Ruiz Cobo B., Collados M., Bellot Rubio L. R.* Lagrangian and Eulerian Stratifications of Acoustic Oscillations through the Solar photosphere // *Astrophys. J.*—2001.—**547**, N 1.—P. 491—502.
9. *Ruiz Cobo B., Rodriguez Hidalgo I., Collados M.* Stratification with Optical Depth of the 5 Minute Oscillation through the solar Photosphere // *Astrophys. J.*—1997.—**488**, N 1.—P. 462—472.
10. *Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C.* Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*—1992.—**398**, N 1.—P. 375—385.
11. *Straus Th., Bonaccini D. I.* Two-dimensional spectroscopy of mesoscale phenomena // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**324**, N 2.—P. 704—712.
12. *Zhugzhda Y. D., Stix M.* Acoustic waves in structured media and helioseismology // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**291**, N 1.—P. 310—319.

Надійшла до редакції 13.10.04