

УДК 523.942

**М. І. Стоділка**

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

### **Діагностика внутрішніх гравітаційних хвиль у фотосфері Сонця**

*Внутрішні гравітаційні хвилі (ВГХ) виділені з допомогою  $k$ - $\omega$ -фільтрації просторово-часових варіацій температури в фотосферних шарах Сонця; варіації температури отримані шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання з використанням профілів лінії нейтрального заліза з високим просторовим і часовим розділенням. ВГХ проявляються у всіх шарах фотосфери, причому вони подавлені в тонкому перехідному шарі до проникної конвекції, який розділяє джерела інжекції енергії коливань. Потужність джерел у середній фотосфері на порядок менша за потужність джерел, що знаходяться нижче вершини конвективної зони. Виявлено два види гравітаційних хвиль: 1) хвилі, для яких немає суттєвого горизонтального поширення (це стоячі хвилі, захоплені грануляційною структурою); 2) біжучі хвилі відносно невеликої амплітуди. Турбулентні потоки з високими горизонтальними градієнтами конвективних швидкостей підсилюють коливання, в таких про-шарках збуджуються інтенсивні гравітаційні коливання.*

**ДИАГНОСТИКА ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА, Стодилка М. И.** — Внутренние гравитационные волны (ВГВ) выделены с помощью  $k$ - $\omega$ -фильтрации пространственно-временных вариаций температуры в фотосферных слоях Солнца; вариации температуры получены путем решения неравновесной инверсной задачи переноса излучения с использованием профилей линий нейтрального железа с высоким пространственным и временным разрешением. ВГВ проявляются во всех слоях фотосферы, причем они подавлены в тонком переходном слое к проникающей конвекции, который разделяет источники инжекции энергии колебаний. Мощность источников в средней фотосфере на порядок меньше, чем мощность источников, которые находятся ниже вершины конвективной зоны. Обнаружено два вида гравитационных волн: 1) волны без существенного горизонтального распространения (это стоячие волны, захваченные грануляционной структурой); 2) бегущие волны сравнительно небольшой амплитуды. Турбулентные потоки с высокими горизонтальными градиентами конвективных скоростей усиливают колебания, в таких слоях возбуждаются интенсивные гравитационные колебания.

*DIAGNOSTICS OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN THE SOLAR PHOTOSPHERE, by Stodilka M. I. — Internal gravity waves (IGW) are separated by  $k$ - $\omega$  filtering of time-spatial temperature variations in the solar photosphere layers; the temperature variations are reproduced by solving the nonequilibrium inverse radiation transfer problem using neutral iron line profiles with a high spatial and time resolution. IGW exist in all the photosphere layers, but they are suppressed in the thin transition layer to the overshooting convection region. The power for middle photosphere sources is less by the order of magnitude than for the sources below the top of the convective zone. We revealed two types of gravity waves: 1) the waves without horizontal propagation are standing waves trapped by the convective structure; 2) running waves with moderate amplitude. Turbulent flows with high horizontal gradients of convective motions strengthen oscillations, and intensive gravity waves are excited in such layers.*

## ВСТУП

Для вирішення ряду проблем структури і динаміки сонячної атмосфери необхідно мати чіткі уявлення про природу та утворення як конвективних рухів, так і осциляцій.

Структура атмосфери Сонця представлена утвореннями різних масштабів: від найбільших, пов'язаних з диференціальним обертанням і меридіальною циркуляцією, до менших: супер-, мезогрануляція, грануляція, осциляції швидкостей та яскравостей. Кожен такий елемент неоднорідної сонячної атмосфери бере одночасно участь у багатьох рухах, які складають спостережуване поле швидкостей. Для детального вивчення структури і динаміки атмосфери Сонця спостережувані просторово-часові варіації розкладають на конвективну та хвильову складові.

У фотосфері Сонця серед різних типів коливань переважають акустично-гравітаційні хвилі, спектр яких охоплює хвилі, що вільно поширюються в атмосфері, еванесцентні хвилі та біжучі хвилі, що можуть відбиватися і утворювати стоячі хвилі [10, 11]. Внутрішні гравітаційні хвилі (g-моди) представлені нижчими частотами порівняно з p-модами і охоплюють нижню частину спектру акустико-гравітаційних хвиль. Теоретичне дослідження гравітаційних хвиль зроблено в роботах [10, 11, 15]. Траєкторії гравітаційних хвиль похилі (що дає незначні доплерівські зсуви), а довжини хвиль короткі порівняно з p-модами і сумірні з грануляційною структурою, внаслідок чого прямими спостереженнями важко виявити наявність внутрішніх гравітаційних хвиль.

Гравітаційні хвилі не можуть поширюватись в конвективно нестійких шарах атмосфери, бо в цьому випадку виникає сила, направлена в ту ж сторону, що і зміщення. Ця обставина спонукає пошук g-мод у вищих шарах атмосфери Сонця, зокрема в області проникної конвекції (середня та верхня фотосфера) та в нижній хромосфері. Тут слід зазначити зменшення стабільності гравітаційних хвиль у верхніх шарах хромосфери, де починається часткова іонізація водню [1].

У фотосфері Сонця температурні флуктуації, викликані проходженням хвиль, можуть бути сильно згладжені обміном випромінювання між гарячішими і холоднішими областями. Це особливо стосується довгоперіодичних коливань; згадана особливість веде до встановлення ізотермічного режиму коливань, що унеможливорює поширення гравітаційних хвиль (крім p-мод). З іншого боку, при коливаннях змінюється температура та густина речовини, що призводить до поступового висвічування, тобто радіаційного загасання, особливо у верхніх оптично тонких шарах, з яких випро-

мінювання досить легко виходить назовні, а не поглинається в області збурення. Крім цього, для ВГХ горизонтальна складова швидкості більша, ніж вертикальна, а отже, методи, що базуються на реєстрації доплерівських зсувів, чутливіші до проходження гравітаційних хвиль на краю диску Сонця. Звичайно, це не стосується реєстрації температурних варіацій.

Сонячні осциляції стохастично збуджуються турбулентною конвекцією у приповерхневих шарах, тут турбулентні та конвективні рухи генерують енергію, яка інжектується в  $p$ - чи  $g$ -моди. Що стосується гравітаційних хвиль, то вважається [10, 11], що вони можуть збуджуватись в конвективно стійкій стратифікованій області, яка межує з високо турбулентною; тут конвективні чарунки стикаються з вершиною конвективної зони і проникають в конвективно стійкі шари. Ці процеси можуть дати великий потік енергії гравітаційних хвиль [5, 10, 11]. Останнім часом домінує думка, що гравітаційні хвилі можуть збуджуватись в радіаційній зоні такими динамічними утвореннями, як плюми. На це вказують, зокрема, результати 2D-моделювання стискувальної конвекції [5]. Згідно з даними [6] плюми в середній та високій фотосфері гарячіші за шари незбуреної атмосфери, тоді як в нижній фотосфері їхній контраст різко зменшується. Дослідження реальної грануляційної структури інверсними методами [2] вказують на збільшення яскравості розвинених міжгранул у середній та верхній фотосфері. Отже, плюми можна розглядати як інтенсивні розвинуті нисхідні потоки. ВХГ можуть легко генеруватись у турбулентних потоках (супергранула, гранула, міжгранула, плум), де можливі різні нестабільності [10, 11], а також збуджуватись сильними потоками з градієнтом швидкостей на границі гранули (точніше, між низхідними і суміжними висхідними потоками) [6]. Деякі спостережні дані [1] вказують на можливість захоплення  $g$ -мод хромосферними шарами, а також на їхнє тунелювання через конвективну зону у верхні шари, де вони спостерігаються як довгоперіодичні осциляції малої амплітуди. Це дає можливість зондування такими хвилями внутрішніх шарів Сонця.

Результати спостережень [3, 4, 8, 16] переконливо свідчать про наявність гравітаційних хвиль у фотосфері Сонця. Так, просторово-часові дослідження коливань виявляють в сонячній фотосфері квазістаціонарні структури проміжних масштабів: більші за гранули і менші за супергранули. Зокрема, в роботі [16] за дослідженнями фазових різниць виявлено два типи гравітаційних хвиль у середній фотосфері: хвилі, що поширюються горизонтально (середні просторові і часові частоти) та хвилі, для яких немає суттєвого горизонтального поширення. А згідно з даними [13] атмосферні гравітаційні хвилі визначають на мезомасштабах УФ-фон випромінювання Сонця. У роботі [12] на основі спостережень показано, що в області проникної конвекції змінюється структура неоднорідностей, та робиться припущення, що ця зміна викликана як грануляцією, так і гравітаційними хвилями, особливо у верхній фотосфері, де переважає їхня інтерференція. Для прояснення ситуації необхідно порівняти спостереження з результатами моделювання. Таке дослідження проведено в [9]. На жаль, роль гравітаційних хвиль у формуванні структури атмосферних шарів Сонця так і залишилась не з'ясованою, не локалізовано джерела, що збуджують гравітаційні хвилі. У даній роботі ми спробуємо дати відповідь на згадані невіршені питання.

Будемо використовувати спектри випромінювання Сонця з високим просторовим та часовим розділенням, а просторово-часові варіації температури та поля швидкостей на різних глибинах фотосфери Сонця будемо відтворювати шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання з використанням стабілізаторів Тихонова, що суттєво

збільшує роздільну здатність по висоті та покращує можливості діагностики сонячної атмосфери.

#### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Збурення параметрів (температура, поле швидкостей) неоднорідної атмосфери Сонця відтворені за профілями лінії Fe I  $\lambda$  5324.418 нм у центрі диску Сонця. Спостереження зроблено на Німецькому вакуумному телескопі на Канарських островах Н. Г. Шукіною; часове розділення — 9.3 с, просторове — 0.35" [7]. За профілями вибраної лінії вздовж щілини спектрографа розраховано набір напівемпіричних моделей по координаті  $X$  вздовж поверхні Сонця та висоті  $h$ .

Профілі лінії Fe I  $\lambda$  5324.418 нм дозволяють визначити параметри моделі від шарів утворення континууму до області температурного мінімуму. Для верхніх шарів атмосфери Сонця суттєві ефекти відхилення від ЛТР, тому ми розв'язуємо нерівноважну інверсну задачу переносу випромінювання: в рамках кожної проміжної моделі, що ітераційно уточнюється, обчислюємо не-ЛТР-параметри, які потім використовуються в інверсній процедурі.

Температурна структура фотосфери Сонця визначається як хвильовими, так і конвективними рухами. У нашій роботі розділення осциляцій проведено з допомогою перетворення Фур'є. Таке перетворення просторово-часових варіацій дозволяє з допомогою лінії  $\omega = v_s k_x$  чи гіперконуса Лемба  $\omega^2 = v_s^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$ , де  $v_s$  — швидкість звуку, виділити хвильову складову. Справді, області  $\omega \geq v_s k_x$  відповідають звукові коливання, а області  $\omega < v_s k_x$  — внутрішні гравітаційні хвилі і конвективні рухи. Для гравітаційних хвиль накладається додаткова умова  $\omega \leq N$ , де  $N$  — частота Брента—Вяйсаля. Конвективні рухи можна виділити аналогічно умовою:  $\omega < v_{\text{conv}} k_z$  або  $\omega^2 < v_{\text{conv}}^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$ , де  $v_{\text{conv}}$  — максимальна (спостережувана чи відтворена) швидкість конвективних рухів. Застосувавши до відповідно виділеної частини фур'є-образу обернене перетворення Фур'є, легко отримати просторово-часові варіації досліджуваних величин, викликаних акустичними, гравітаційними хвилями чи чисто конвективними рухами.

Використання вузькосмугових фільтрів дає можливість вивчати збудження та особливості поширення п'ятихвилинних, низькочастотних та високочастотних коливань в атмосфері Сонця.

#### ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Цікавими є результати дослідження як п'ятихвилинних, так і довгохвильових осциляцій (десятихвилинних, наприклад). На жаль, немає ефективної методики усунення конвективних рухів, що накладаються на низькочастотну область гравітаційних коливань. Тому ми обмежимося тільки п'ятихвилинним інтервалом  $g$ -мод, тим більше що час спостережень становить лише 31 хв.

При використанні діагностичної діаграми для незбуреної атмосфери нижня фотосфера попадає в область еванесцентних коливань. Але в нижніх спостережуваних шарах флуктуації температури найбільші ( $\Delta T \approx 1000$  К при  $h < 0$ ), що призводить до суттєвого розмивання положення дискримінантної лінії на діагностичній діаграмі. Крім цього, радіаційне загасання значно модифікує положення дискримінантної лінії. А тому ми усували акустичні моди при  $k$ - $\omega$ -фільтрації, використовуючи лінію Лемба, що практично не змінює структури гравітаційних коливань у середній та верхній фотосфері.

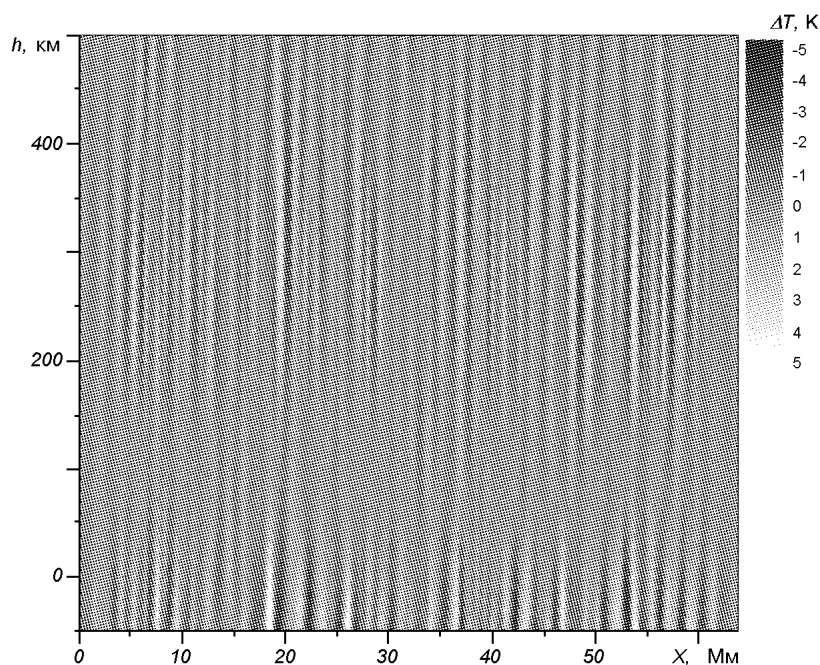


Рис. 1. 2D-структура гравітаційних хвиль

Двовимірна структура, обумовлена гравітаційними хвилями, показана на рис. 1; діапазон відтворюваних висот від  $-50$  км до  $550$  км. Як бачимо,  $g$ -моди спостерігаються по всій фотосфері. Оскільки швидкість поширення гравітаційних коливань менша за швидкість звуку, то структура п'ятихвилинних  $g$ -мод подібна до високочастотних акустичних коливань. Отже, через малу довжину хвилі  $g$ -моди чутливі до неоднорідностей атмосфери на грануляційних масштабах, зокрема на початку області проникної конвекції ( $h \approx 100$  км). Амплітуда коливань температури (при смузі пропускання  $0.3$  хв) найбільша у нижній фотосфері ( $6 \dots 8$  К), досягає мінімуму в перехідній області ( $1 \dots 2$  К), а потім знову збільшується у шарах середньої та верхньої фотосфери ( $4 \dots 5$  К). В області переходу до проникної конвекції коливання подавлені, що може бути викликане радіативним згладжуванням та розсіянням хвиль на неоднорідностях, а також наявністю нових джерел коливань в середній фотосфері. Хвильові поверхні  $g$ -мод є переважно вертикальними за винятком шарів  $50 \text{ км} < h < 100 \text{ км}$ . У деяких областях спостерігається підсилення амплітуди коливань, що може бути результатом захоплення хвиль грануляційною структурою [17] чи конструктивної інтерференції хвиль, що поширюються від різних джерел [13].

Відтворена стратифікація збурень температури гравітаційними хвилями дозволяє вивчати поширення хвиль на різних зрізах по висоті. Такі зрізи показані на рис. 2:  $h = 0$  (нижня фотосфера),  $h = 100$  км (перехідна область до проникної конвекції),  $h = 300$  км (середня фотосфера). На всіх висотах проявляються стоячі хвилі (вздовж поверхневої координати  $X$ ), які є захопленими грануляційною структурою фотосфери. Таке захоплення хвиль чіткіше виражене для шарів середньої та верхньої фотосфери, у перехідній області захоплення проявляється слабше. Середньостатистична структура гравітаційних хвиль відображена на просторово-часовому розподілі коефіцієнта автокореляції для температури (рис. 3). Флуктуації температури є достатньо когерентними. Так, згідно з рис. 3 область просторової кореляції не перевищує  $2$  Мм, а часової — двох періодів коливань, що свідчить про

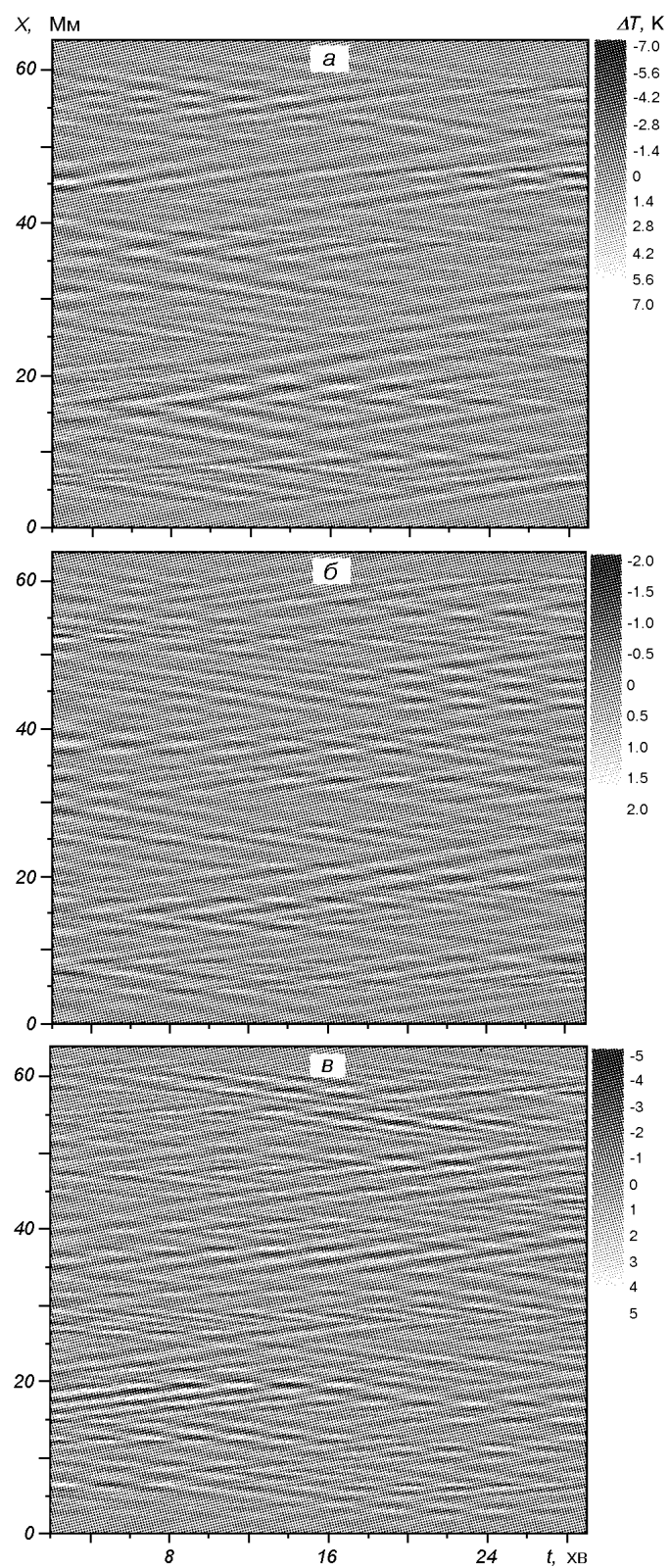


Рис. 2. Висотні зрізи гравітаційних коливань температури: *a* — нижня фотосфера ( $h = 0$ ); *б* — перехідна область до проникної конвекції ( $h = 100$  км); *в* — середня фотосфера ( $h = 300$  км)

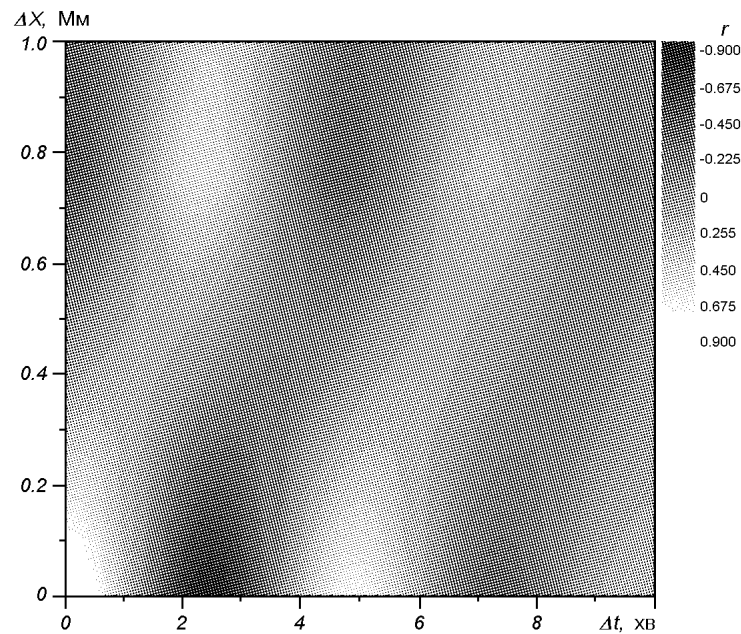


Рис. 3. Просторово-часовий розподіл коефіцієнта автокореляції  $r$  для температури

значне загасання коливань. Коефіцієнт кореляції для найближчих екстремумів становить  $-0.9$  вздовж часової осі та  $-0.5$  вздовж просторової координати, тобто коливання відбуваються у протифазі. Рис. 3 дозволяє оцінити фазову швидкість гравітаційних хвиль. Справді, відстань між двома найближчими пучностями становить  $0.75$  Мм; цій відстані відповідає половина періоду коливань. Отже, фазова швидкість гравітаційних хвиль у нижній фотосфері (при  $h \approx 0$ ) становить приблизно  $5$  км/с. Ця швидкість поширення збурення виділених структур значно більша за конвективну швидкість, але менша за звукову. Аналогічні оцінки для довгоперіодичних коливань ( $T = 10$  хв) дають для цих висот дещо менше значення фазової швидкості ( $4$  км/с). Зазначимо, що швидкість поширення гравітаційних хвиль ( $\nu = 0.5 \dots 1$  мГц), виділених у роботі [16] за допомогою фазової фільтрації, лежить в межах  $2\text{—}4$  км/с. Очевидно, має місце тенденція до зменшення фазової швидкості гравітаційних хвиль зі збільшенням періоду коливань. Проте довгоперіодичні гравітаційні хвилі у фотосфері все ж можуть бути прив'язані певним чином до мезоструктур, тим більше що їхні амплітуди сумірні з п'ятихвилинними гравітаційними коливаннями.

Крім цього, на всіх фотосферних висотах є області з підвищеною амплітудою стоячих хвиль. Просторова протяжність таких областей декілька тисяч кілометрів, а часова до  $10\text{—}15$  хв; часова розгортка таких коливань є звичайним цугом, амплітуда якого спочатку збільшується, а потім зменшується.

На рис. 4 показана часова розгортка перерізу при  $h = 0$  структур стоячих хвиль, утворених областями підвищеної амплітуди:  $|\Delta T| > 7$  К. (смуга пропускання  $0.9$  хв). Розміри цих структур — від однієї до декількох півхвиль. Вздовж просторової координати фаза коливань різко змінюється на  $\pi$ . Оскільки ширина областей однакової фази сумірна з розмірами вузьких гранул та міжгранул (сумірні також часові масштаби: час існування згаданих структур та час життя гранул), то можливий зв'язок областей підвищеної амплітуди коливань з грануляційною структурою фотосфери.

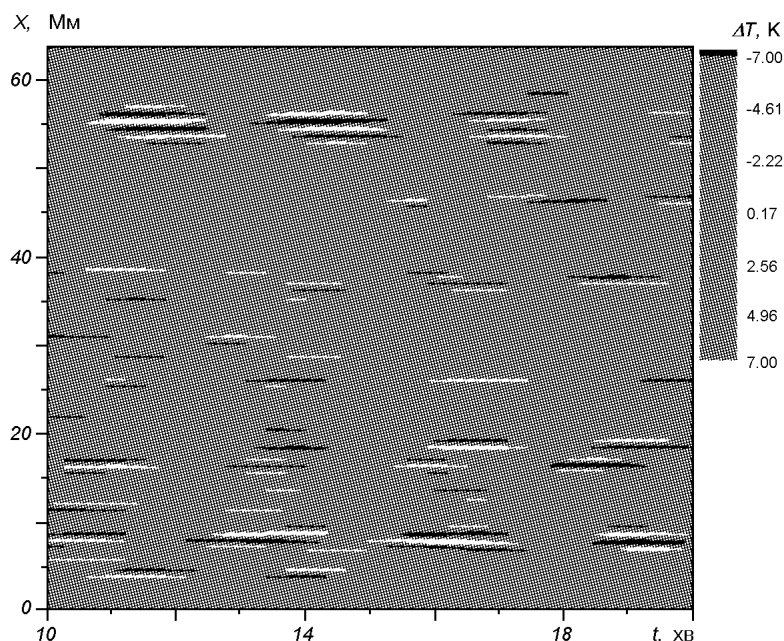


Рис. 4. Часова розгортка структур підвищеної амплітуди

Справді, зіставлення рис. 4 з розподілом флуктуацій температури показує, що згадане підсилення амплітуди g-мод має місце при наявності відносно вузьких гранул та міжгранул. У широких міжгранулах (з низхідними потоками) підсилення коливань не спостерігається ( $X = 9...11, 47...50$  Мм).

На рис. 5 показано розподіл флуктуацій температури та поля швидкостей, породжені конвективною складовою у момент часу  $t = 17$  хв. Світлим тонам відповідають області підвищеної температури і відповідно висхідні потоки (гранули), темним тонам — області пониженої температури та низхідні потоки (міжгранули); шарам  $h > 100$  км відповідає область проникної конвекції, тут має місце температурна інверсія грануляції. Згідно з отриманими результатами пучності гравітаційних коливань перебувають переважно у вузьких гранульно-міжгранульних прошарках, де межують інтенсивні конвективні потоки ( $\uparrow$  — висхідні,  $\downarrow$  — низхідні):  $X = 6.6$  Мм ( $\downarrow\uparrow$ ),  $7.4$  Мм ( $\downarrow\uparrow$ ),  $8.6$  Мм ( $\uparrow\downarrow$ ),  $18.4$  Мм ( $\downarrow\uparrow$ ),  $19.1$  Мм ( $\uparrow\uparrow$ ),  $26$  Мм ( $\uparrow\downarrow$ ),  $36.1$  Мм ( $\downarrow\uparrow$ ),  $36.9$  Мм ( $\uparrow\downarrow$ ),  $46$  Мм ( $\uparrow\uparrow$ ),  $46.8$  Мм ( $\downarrow\downarrow$ ),  $52.9$  Мм ( $\downarrow\uparrow$ ),  $53.6$  Мм ( $\uparrow\downarrow$ ),  $54.3$  Мм ( $\downarrow\downarrow$ ),  $55.1$  Мм ( $\downarrow\uparrow$ ),  $56.1$  Мм ( $\uparrow\downarrow$ ). При  $46$  Мм на момент часу, що розглядається, формується висхідний потік, який розширюється і зміщується направо (можливо, тут є нерозділені висхідні потоки), при  $46.8$  Мм низхідний потік, що зліва, слабкий і залягає лише у нижній фотосфері. Таким чином, підсилення коливань відбувається здебільшого для випадку протилежно напрямлених потоків. Зміна топології потоків призводить до зміни областей підвищеної амплітуди коливань. Як бачимо, амплітуда коливань найбільша у прошарках з високими горизонтальними градієнтами конвективних швидкостей. У таких прошарках збільшується турбулентність газу, що генерує акустично-гравітаційну енергію, яка в свою чергу інжектується в p- чи g-моди [4]. А грануляційна структура в цих місцях виконує роль резонатора для певних частот. Зазначимо, що амплітуда коливань таких «гарячих» областей більш ніж удвічі перевищує амплітуду сусідніх областей. Отже, малоймовірно, що «гарячі» області



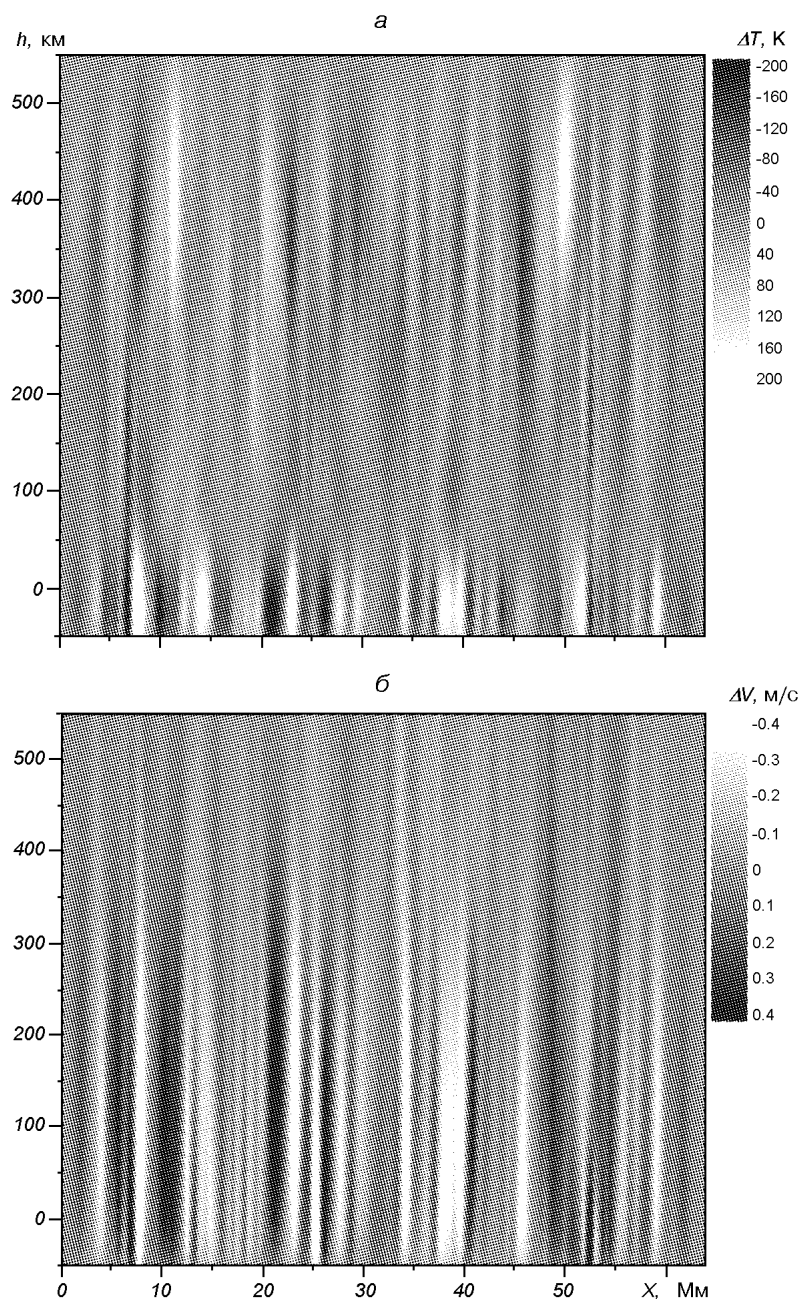


Рис. 5. Конвективна структура фотосфери Сонця; просторовий розподіл: *a* — флуктуацій температури, *б* — конвективних швидкостей

пов'язані з інтерференцією хвиль, а тим більше від різних, але когерентних джерел. Як бачимо, гравітаційні хвилі є індикатором горизонтальних градієнтів конвективних швидкостей.

Згідно з розподілом гравітаційних коливань (рис. 1) структура коливань в області проникної конвекції ( $h > 100$  км) дещо інша. Так, у вищих шарах структура дещо дрібніша; у перехідній області хвильові фронти викривлюються, а також з'являються нові фронти; у шарах нижньої фотосфери ( $h < 100$  км) структура коливань змінюється з висотою відносно слабо. А тому виникає

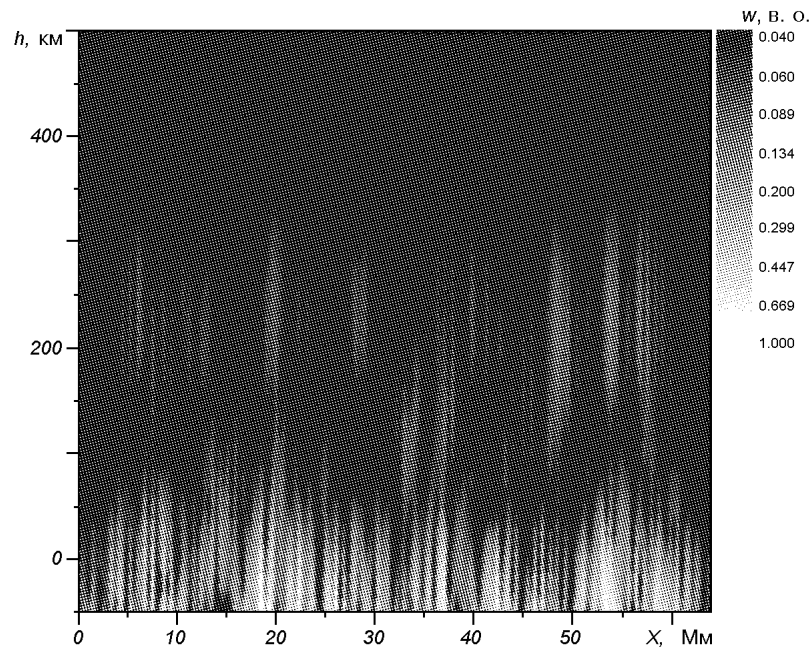


Рис. 6. Просторовий розподіл густини енергії гравітаційних коливань

запитання про висотну стратифікацію джерел гравітаційних коливань. Крім цього, треба врахувати збільшення амплітуди коливань з висотою, пов'язане із зменшенням густини середовища. А отже, будемо розглядати варіації теплової енергії коливань, приведені до одиниці об'єму. Такий підхід дозволяє виявити області з підвищеною густиною енергії, які будемо інтерпретувати як джерела гравітаційних коливань. На рис. 6 представлено просторовий розподіл абсолютного значення густини енергії коливань. Джерела коливань послаблені в тонкому перехідному шарі до проникної конвекції, який також розділяє джерела інжекції енергії коливань. Потужніші джерела залягають у нижній фотосфері, нижче вершини конвективної зони ( $h < 100$  км). Найпотужніші джерела дають області з підвищеною амплітудою коливань. Досить часто коливання, поширюючись вгору, досягають шарів середньої фотосфери.

Зазначимо, що густина енергії коливань у нижній фотосфері збільшується із глибиною. Можливо, саме у підфотосферних шарах збуджуються інтенсивні коливання, які досягають шарів нижньої фотосфери.

Менш потужні джерела локалізовані в шарах середньої фотосфери, густина енергії джерел в середній фотосфері на порядок нижча за ту ж у нижній фотосфері. Максимуми амплітуди також припадають на прошарки з великими горизонтальними градієнтами конвективних швидкостей. У верхній фотосфері відносно інтенсивні джерела коливань не проявляються; тут, очевидно, механізм збудження коливань потоками з градієнтом швидкостей недостатньо ефективний.

На всіх висотах (рис. 2) проявляються біжучі хвилі невеликої амплітуди, вони накладаються на інтенсивніші захоплені стоячі хвилі. Біжучі хвилі породжуються локальними джерелами (виходять з області підвищеної амплітуди коливань) і часто поширюються у протилежні боки. Біжучі ВГХ порівняно чіткіше проявляються в шарах нижньої фотосфери. Наявність біжучих хвиль призводить до розмивання екстремумів двовимірної кореляції, що породжує відповідні смуги, нахил яких дозволяє оцінити фазову

швидкість поширення хвиль. Значення фазової швидкості збігається з отриманим раніше. Крім цього, згідно з рис. 2 області підвищеної амплітуди коливань не завжди паралельні часовій осі, що пов'язано з поширенням збурень по поверхні Сонця. Зустрічаються збурення, які слабо загасають і поширюються на відстані до 5 Мм.

Таким чином, у фотосферних шарах атмосфери Сонця є гравітаційні моди коливань. Вони чутливі до грануляційної структури, зокрема до горизонтальних градієнтів конвективних потоків. Отримані результати дослідження гравітаційних хвиль, що поширюються горизонтально, є попередніми. Для повного вивчення необхідно подавити значно потужніші захоплені коливання. На жаль, використаний нами підхід не дозволяє надійно розділити конвективну складову від  $g$ -мод, особливо в області періодів  $T > 5$  хв, у яку попадають конвективні рухи.

Ми не розглядали вплив гравітаційних коливань на варіації поля швидкостей, оскільки ВГХ поширюються похило, що дає незначні доплерівські зсуви в центрі диску Сонця. У цьому відношенні цікавими є результати дослідження  $g$ -мод на краю диску Сонця, бо горизонтальна складова амплітуди швидкості суттєво перевищує вертикальну.

## ВИСНОВКИ

Внутрішні гравітаційні хвилі виділено з допомогою  $k$ - $\omega$ -фільтрації просторово-часових варіацій температури у фотосфері Сонця; останні отримані шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання з використанням стабілізаторів Тихонова.

Показано, що  $g$ -моди чутливі до неоднорідностей фотосфери на грануляційних масштабах: 1) на всіх фотосферних висотах гравітаційні хвилі — це переважно стоячі хвилі, захоплені грануляційною структурою фотосфери; 2) області з найбільшою амплітудою коливань знаходяться переважно у вузьких гранульно-міжгранульних прошарках, де межують інтенсивні конвективні потоки. У таких прошарках з високими горизонтальними градієнтами конвективних швидкостей відбувається інжекція енергії в  $g$ -моди коливань. А грануляційна структура в таких місцях виконує роль резонатора для певних частот. ВГХ є індикатором горизонтальних градієнтів конвективних швидкостей.

Колівання в області переходу до проникаючої конвекції подавлені, а відповідно у вищих (середня та верхня фотосфера) та нижчих шарах (нижня фотосфера) амплітуда коливань збільшується.

Джерела коливань розділені перехідним шаром до області проникної конвекції. Потужність джерел, що залягають в середній фотосфері, на порядок менша, ніж потужність джерел, що знаходяться нижче вершини конвективної зони.

На всіх висотах, особливо в шарах нижньої фотосфери, проявляються біжучі хвилі невеликої амплітуди; біжучі і стоячі хвилі породжуються спільними локальними джерелами коливань. Зустрічаються збурення, які слабо загасають і поширюються на відстані до 5 Мм.

1. Дубов Э. Е. Колебания и волны в атмосфере Солнца // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.—1978.—14.—С. 148—266.
2. Стоділка М. І. Температурна структура реальної сонячної грануляції // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 3.—С. 407—416.
3. Bonet J. A., Marquez I., Vazquez M., Woehl H. Asymmetries and shifts of the solar K I 7699 Å line and possible evidence for gravity waves in the quiet photosphere // Astron. and Astrophys.—1991.—244, N 2.—P. 492—500.
4. Deubner F.-L., Fleck B. Dynamics of the solar atmosphere. I. Spatio-temporal analysis of waves in the quiet solar atmosphere // Astron. and Astrophys.—1989.—213, N 1-2.—P. 423—428.

5. *Dintrans B., Brandenburg A., Nordlund A., Stein R. F.* Stochastic excitation of gravity waves by overshooting convection in solar-type stars // *Astrophys. and Space Sci.*—2003.—**284**, N 1.—P. 237—240.
6. *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.
7. *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.
8. *Komm R., Mattig W., Nesis A.* The decay of granular motions and the generation of gravity waves in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**252**, N 2.—P. 827—834.
9. *Leenaarts J., Wedemeyer-Bohm S.* Observations and simulations of reversed granulation on the Sun DOT tomography of the solar atmosphere. III // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**431**, N 2.—P. 687—692.
10. *Mihalas B. W., Toomre J.* Internal gravity waves in the solar atmosphere. I. Adiabatic waves in the chromosphere // *Astrophys. J.*—1981.—**249**, part 1.—P. 349—371.
11. *Mihalas B. W., Toomre J.* Internal gravity waves in the solar atmosphere.. II. Effects of radiative damping // *Astrophys. J.*—1982.—**263**, part 1.—P. 386—408.
12. *Rutten R. J., de Wijn A. G., Sütterlin P.* DOT tomography of the solar atmosphere. II. Reversed granulation in Ca II H // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**416**, N 1.—P. 333—340.
13. *Rutten R. J., Krijger J. M.* Dynamics of the solar chromosphere. IV. Evidence for atmospheric gravity waves from TRACE // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**407**, N 2.—P. 735—740.
14. *Samadi R., Nordlund A., Stein R. F., et al.* Numerical constraints on the model of stochastic excitation of solar-type oscillations // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**403**, N 1.—P. 303—312.
15. *Schmieder B.* Linear hydrodynamical equations coupled with radiative transfer in a non-isothermal atmosphere. I. Method // *Solar Phys.*—1977.—**54**.—P. 269—288.
16. *Straus Th., Bonaccini D.* Dynamics of the solar photosphere I. Two-dimensional photometry of mesoscale phenomena // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**324**, N 2.—P. 704—712.
17. *Zhugzhda Y. D., Stix M.* Acoustic waves in structured media and helioseismology // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**291**, N 1.—P. 310—319.

Поступила в редакцію 21.01.05