

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВНУТРІШНІХ ХВИЛЬ ГРАВІТАЦІЇ В СОНЯЧНІЙ АТМОСФЕРІ

*Мирослав СТОДІЛКА¹, Михайло СКУЛЬСЬКИЙ²,
Марія КОВАЛЬЧУК¹*

¹ Астрономічна обсерваторія Львівського національного
університету імені Івана Франка,
79005 Львів вул. Кирила і Мефодія, 8, тел. 2384554

² Національний університет "Львівська політехніка",
79013 Львів вул. Степана Бандери, 12

Редакція отримала статтю 22 лютого 2013 р.

По даних спостережень в лінії λ 639.360 нм FeI центра диска спокійного Сонця на телескопі VTT (Іспанія) ми отримали параметри моделі атмосфери від шарів утворення континууму до шарів, що прилягають до температурного мінімуму. Досліджувались спектри потужності внутрішніх хвиль гравітації (ВХГ) у цій лінії нейтрального заліза. Виявлено ряд інтегральних особливостей збудження і розповсюдження ВХГ. Отримано, що ВХГ збуджуються динамічними процесами на початку області проникаючої конвекції. Ці хвилі здійснюють перенос механічної енергії у верхні шари сонячної фотосфери.

1. ВСТУП

В останні роки дослідники Сонця приділяють особливу увагу вивченню коливань і хвиль у сонячній атмосфері. Досліджувались рухи в фотосфері, хромосфері і короні, вивчалась періодичність коливань, зв'язок їхніх періодів з висотою в атмосфері Сонця, розподіл енергії коливань в структурах різних масштабів, потоки енергії у хвилях різного типу, умови генерації і дисипації хвиль різного типу і різної частоти і, нарешті, умови збудження і розповсюдження окремих мод коливань в атмосфері Сонця [1-6].

Вивчення коливних рухів в атмосфері Сонця може пояснити не тільки спостережувані зміни в структурі атмосфери, але дасть нові знання про фізичні умови як в глибоких, так і у високих шарах сонячної атмосфери, про процеси, що спричиняють прояви сонячної активності тощо. Коливні рухи, флуктуації поля швидкостей, як показують спостереження зв'язані з коливаннями інтенсивностей в окремих спектральних лініях, що дало можливість провести дослідження, викладені в даній роботі.

2. ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕНЬ

Предметом досліджень є виділення і локалізація внутрішніх хвиль гравітації (ВХГ) із сукупності різних типів рухів у сонячній фотосфері (хвильових і конвективних); виявлення особливостей збудження і розповсюдження ВХГ, визначення їх ролі в енергетиці атмосфери Сонця. Для цього були використані результати спостережень центра диска спокійного Сонця в лінії нейтрального заліза λ 639.360 нм, виконані рядом дослідників [1] із високим просторовим і часовим розділенням ($\Delta X \approx 252$ км, $\Delta t = 10$ с) на сонячному телескопі VTT (о. Тенеріфе, Іспанія). Для дослідження питання про хвилі, які розповсюджуються в сонячній атмосфері, виписується система рівнянь, що включає рівняння збереження речовини (маси), рівняння руху, стану речовини і формули для визначення параметрів, що входять у ці рівняння [5-6]. Область утворення профілів лінії FeI λ 639.360 нм дає можливість визначати параметри моделі, починаючи від шарів залягання континуумів і до шарів, що сягають температурного мінімуму. Оскільки у верхніх шарах атмосфери Сонця суттєвішими є відхилення від локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР), то ми розв'язуємо інверсну задачу нерівноважного переносу випромінювання. Це значно покращує достовірність відтворюваних із спостережень даних і дозволяє отримати надійні результати діагностики реальної атмосфери Сонця.

Відомо, що результати відтворення параметрів інверсними методами суттєво залежать від прийнятих початкових значень. Тому ми запропонували доповнити стандартну цільову функцію виразом, що забезпечує гладкість розв'язку і зменшує його осциляції. Це так звана процедура регуляризації, що базується на застосуванні тихонівських стабілізаторів [7].

Дослідження коливних процесів, які розповсюджуються від свого джерела, дозволяє вивчити природу та енергетику коливань, механізми їх збудження.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У даній роботі ми провели виділення ВХГ із сукупності інших рухів у сонячній атмосфері такими шляхами:

- вилученням акустичних коливань (звукових і надзвукових рухів);
- вилученням повільних конвективних рухів ($V < 0.2$ км/с);
- виділенням рухів, фаза яких поширюється у нижні шари;
- фазовою фільтрацією, що враховує відповідні фазові співвідношення між варіаціями тиску і густини для хвиль гравітації: $0 \leq \Delta\varphi_{\rho,p} \leq \pi/2$ [6].

Шляхом розв'язку оберненої задачі переносу випромінювання отримано відтворений набір моделей неоднорідної атмосфери Сонця вздовж двох просторових координат (X , h) у певні моменти часу, тут X – просторова координата на поверхні Сонця, h – висота.

Далі, використовуючи ці напівемпіричні моделі, ми провели статистичні дослідження виділених ВХГ. Основною складовою статистичного методу є вивчення спектрів потужності флуктуацій швидкості (кінетична енергія) та інтенсивності або температури (теплова енергія), а також кореляційних і фазових співвідношень між спостережуваними величинами. Так, форма спектра потужності дає інформацію про енергетичні втрати і взаємоперетворення енергії на різних масштабах; кореляційні співвідношення між спостережуваними даними на різних висотах дозволяють ви-

значати положення джерел коливань, а фазові зсуви між інтенсивністю і швидкістю, наприклад, дають можливість деталізувати тип хвилі. Спектри потужності флуктуацій температури і швидкості дають інформацію про статистичні закономірності осциляцій в атмосфері Сонця, про характер спостережуваного хвильового поля, про фізичні властивості середовища, що підтримує хвильові рухи.

З допомогою вибраної лінії Fe I λ 639.360 нм ми провели діагностику шарів атмосфери Сонця від рівня утворення континуума до температурного мінімуму. А це в свою чергу, дозволяє вивчати енергетику коливань в залежності від частоти коливань і просторових масштабів.

Для цього, використовуючи відтворені просторово-часові варіації тиску вздовж просторової координати і часу, будемо розглядати частотні залежності потужності коливань (тобто потужності, просумованої по просторовій частоті) на різних висотах.

4. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Спектри потужності варіацій тиску хвиль гравітації приведені на Рис. 1, *a* (потужність нормована на її максимальне значення і зображена в логарифмічному масштабі). Діапазон зміни нормованої потужності обмежений значеннями $0.002 \div 0.8$, що краще відтворює контраст у верхніх шарах атмосфери. У нижній фотосфері майже на всіх частотах спектральний розподіл варіацій тиску (Рис. 1) нагадує білий шум, що свідчить на користь стохастичного збудження хвиль турбулентної конвекції. Оскільки коливання з нижчими частотами сильніше загасають, то найбільша потужність коливань припадає на частоти, менші за 0.6 мГц, що відповідає періодам більшим за 28 хв. Це припадає на суміжні шари нижньої і верхньої фотосфери $75 \text{ км} < h < 200 \text{ км}$. Для кожної, окремо взятої частоти, максимум потужності припадає на ті ж висоти.

Із збільшенням частоти значення потужності різко зменшується: так, на частотах ≈ 1.5 мГц ($T \approx 11$ хв) питома потужність енергії падає на порядок, а об'ємна густина енергії $\Delta p_{rms} = \sqrt{P}$ – в 3.16 разів, а на частотах ≈ 3.3 мГц ($T \approx 5$ хв) – вже на два порядки, а об'ємна потужність енергії – на порядок. На частотах > 4.3 мГц гравітаційні коливання практично відсутні, оскільки ці частоти вже сумірні з частотою Брента-Вяйсяля [6], а ця частота накладає обмеження зверху на частоти g -мод. Тому можна вважати, що перенос механічної енергії здійснюється хвилями гравітації середніх і великих періодів $T > 5$ хв. На Рис. 1, *b* приведений спектр потужності хвиль гравітації з врахуванням обмежень на частоту Брента-Вяйсяля.

Частота Брента-Вяйсяля визначається градієнтом рівноважної температури та адіабатичним градієнтом. В області температурного мінімуму частота Брента-Вяйсяля практично співпадає з такою для ізотермічної атмосфери, але в шарах середньої, а особливо нижньої фотосфери розбіжність між частотами Брента-Вяйсяля стає суттєвою.

Висотний розподіл спектру потужності гравітаційних коливань (Рис. 1, *a*) вказує на те, що хвилі генеруються біля основи області проникаючої конвекції, пакети хвиль розповсюджуються, поступово загасаючи, у верхні шари сонячної атмосфери. Згідно з отриманими даними (Рис. 1, *a*), на перших 100 км від 125 км до 225 км потужність варіацій тиску зменшується в ≈ 2 рази, далі від 225 км до 525 км – в середньому в п'ять разів на кожні 100 км. Таким чином, пройшовши 400 км, хвилі гравітації гублять

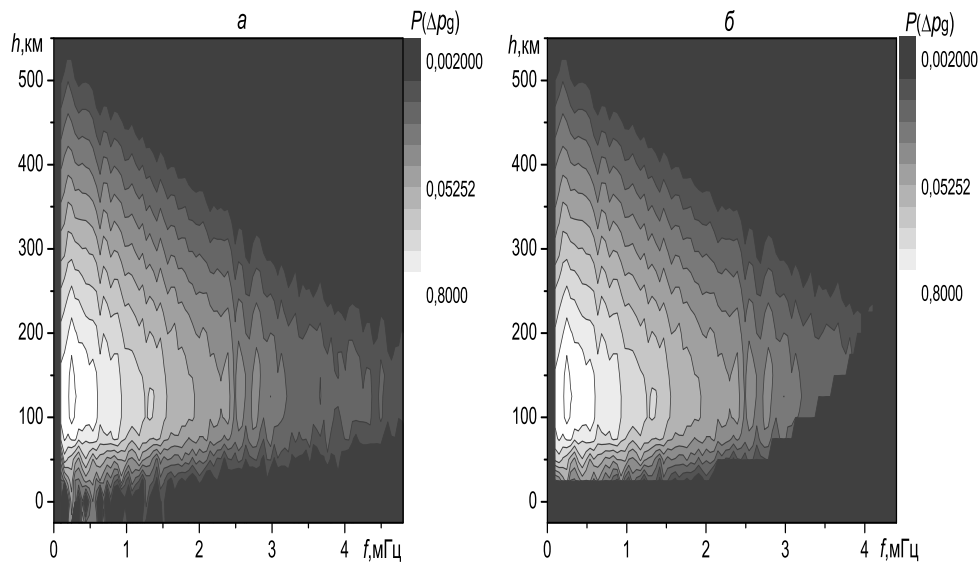


Рис. 1: Спектри потужності варіацій тиску виділених хвиль гравітації: *а* – без обмеження частот, більших за частоту Брента-Вяйсяля, *б* – з обмеженням частот.

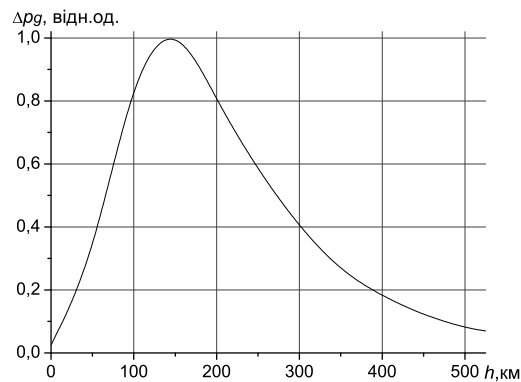


Рис. 2: Висотна залежність усереднених варіацій тиску (у відн. одиницях) для хвиль гравітації.

більшу частину своєї енергії – потужність варіацій тиску зменшується при цьому в $200 \div 300$ разів. Оскільки енергія визначається середньоквадратичним відхиленням тиску, то можна вважати, що об'ємна густина енергії при розповсюдженні від джерел до області температурного мінімуму зменшується в $14 \div 17$ разів.

На Рис. 2 показана стратифікація усереднених (по просторовій і часовій частотах) варіацій тиску. Як видно з рисунка, середня об'ємна густина енергії хвиль гравітації на участку довжиною 400 км зменшується на 1.2 порядку.

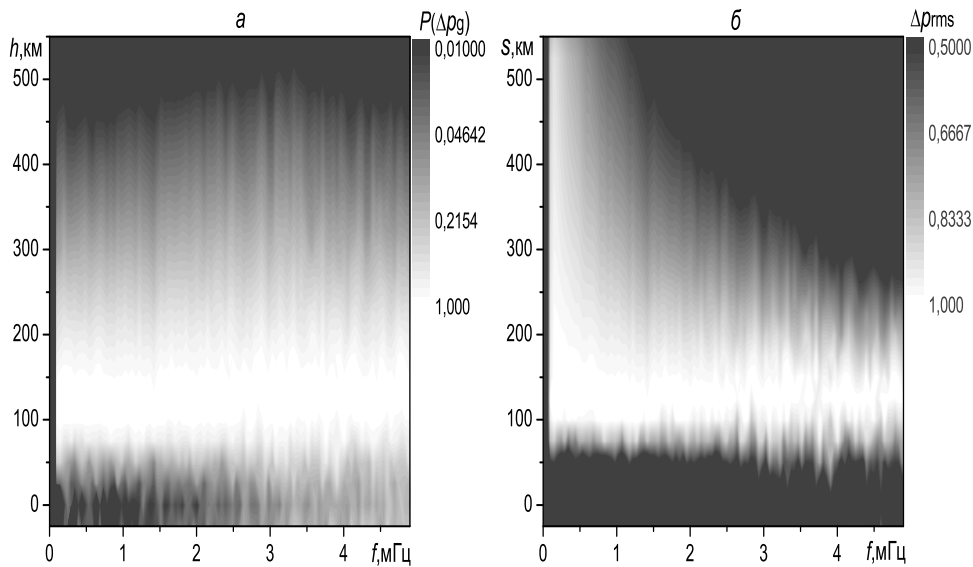


Рис. 3: Висотні залежності: *a* – спектра потужності варіацій тиску, нормованих на локальний максимум для кожної частоти, *б* – середньоквадратичного значення тиску з корекцією на частотну залежність кута поширення хвиль гравітації.

Пронормувавши висотну залежність спектру потужності для кожної частоти на її локальний максимум, маємо змогу оцінити поглинання неоднорідним середовищем енергії, що переноситься хвилями гравітації. При такому нормуванні на кожній частоті генерується приблизно однакова потужність (Рис. 3, *a*); 90 % потужності хвиль гравітації припадає на інтервал частот $0 \div 1.5$ мГц, причому із збільшенням частоти до 3.3 мГц їхня енергія дещо зростає.

Це дозволяє оцінити проникнення пакетів хвиль гравітації на різних частотах у верхні шари атмосфери, локалізувати джерела хвиль гравітації. Ці джерела знаходяться в перехідному шарі до області проникаючої конвекції. Смуга частот хвиль гравітації досить широка.

Зазначимо, що зі збільшенням частоти, траєкторії променів хвиль стають все похилішими, енергія розповсюджується майже вертикально, і як вже було сказано, трохи зменшується з частотою. Таке зменшення енергії хвиль, можливо, зв'язане з розмиванням частоти Брента-Вяйсяля неоднорідною структурою фотосфери. І, навпаки, при зменшенні частоти траєкторії променів хвиль гравітації відхиляються в сторону вертикалі, а енергія хвиль розповсюджується по все похиліших лініях. Висотна залежність варіацій тиску з корекцією на частотну залежність кута розповсюдження подана на Рис. 3, *б*. У результаті отримано представлення про поглинання фотосферними шарами хвиль гравітації вздовж напрямку переносу енергії у верхні шари залежно від віддалі від локалізації джерела.

5. ВИСНОВКИ

Підсумуємо отримані результати. За даними спостережень сонячної грануляції з високим просторовим розділенням побудовано сітку моделей фотосфери Сонця і виділено внутрішні хвилі гравітації.

Досліджуючи спектри потужності хвиль, ми виявили ряд інтегральних особливостей збудження і розповсюдження гравітаційних g -мод. Подаємо згруповані результати щодо ролі внутрішніх гравітаційних хвиль в енергетиці реальної сонячної атмосфери:

1. локальні внутрішні хвилі гравітації збуджуються динамічними процесами на початку області проникаючої конвекції. Ці хвилі, саме середніх і низьких частот ($\nu < 3.3$ мГц) здійснюють перенос механічної енергії у верхні шари сонячної фотосфери;
2. температурна структура сонячної грануляції розмиває стратифікацію частоти Брента-Вяйсяля – верхньої граничної частоти для g -мод, внаслідок чого здійснюється просочування потужності хвиль гравітації в область вищих частот $\omega > \omega_{B-V}$;
3. поглинання енергії хвиль гравітації фотосферними шарами в низькочастотній області зменшено;
4. для хвиль гравітації проявляється слабка частотна залежність проникнення їх енергії у верхні шари – незначне збільшення проникнення із збільшенням частоти до 3.3 мГц.

Література

- [1] *Kostyk R.I.* Fine structure of wave motions in the solar photosphere: observations and theory / Kostyk R.I., Shchukina N.G., Khomenko E.V. // Astr.Rep. - 2006. - Vol. 50, №7. - P.588-600.
- [2] *Dintrans B.* Spectrum and amplitudes of internal gravity waves excited by penetrative convection in solar-type stars / Dintrans B., Brandenburg A., Nordlund A., Stein R.F. // Astron. and Astrophys. - 2005. - Vol. 438, № 1. - P. 365-376.
- [3] *Mihalas B. W.* Internal gravity waves in the solar atmosphere. I. - Adiabatic waves in the chromosphere / Mihalas B.W., Toomre J. // Astrophys J. - 1981. - Vol. 249, part 1. - P. 349-371.
- [4] *Rogers T.M.* Gravity waves in the Sun / Rogers T.M., Glatzmaier G.A. // MNRAS - 2005. - Vol. 364, № 4. - P.1135 - 1146.
- [5] *Schmieder B.* Linear hydrodynamical equations coupled with radiative transfer in a non-isothermal atmosphere. I.- Method / Schmieder B. // Solar Phys. - 1977. - Vol. 54.-P. 269-288.
- [6] *Mihalas B. W., Toomre J.* Internal gravity waves in the solar atmosphere. I. - Adiabatic waves in the chromosphere // Astrophys. J. - 1981. - V.249, part 1. - P.349-371.

- [7] *Стоділка М.І.* Температурна структура реальної сонячної грануляції/
Стоділка М.І.// Кинем. и физ. небесн.тел. - 2003. - Т.19, № 5. - С. 407-416.

RESEARCH OF THE DYNAMICS OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN THE SOLAR ATMOSPHERE

*Myroslav STODILKA*¹, *Mykhailo SKULSKY*², *Maria KOVAL'CHUK*¹

¹ Astronomical observatory of Ivan Franko National University of L'viv,
8 Kyrylo and Mefodiy Street, L'viv, 79005, Ukraine

² National university Lviv Polytechnic
12 Bandera street, Lviv, 79013, Ukraine

Using the observed data in line $\lambda 639.360$ nm Fe I of the center of the quiet Sun disk, we determined the parameters of solar atmosphere models from the lower photosphere to the temperature minimum. Power spectra of internal gravity waves (IGW) were investigated in this neutral iron line. A number of integral peculiarities of IGW excitation and expansion were found. It was established that IGW are excited by dynamic processes in the beginning of the region of penetrative convection. These waves transfer the mechanical energy into the higher solar photosphere layers.