

## Список використаних джерел

1. Congdon A.B., Keeton C.R., Nordgren C.E. Identifying anomalies in gravitational lens time delays // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 709. – P. 552–571.
2. Koopmans L. V. E., Auger M., Barnabe M. et al. Strong gravitational lensing as a probe of gravity, dark-matter and super-massive black holes // arXiv:0902.3186.
3. Treu T., Marshall P. J., Cyr-Racine F. Y. et al. Dark energy with gravitational lens time delays // arXiv:1306.1272.
4. Suyu S. H., Treu T., Hilbert S. et al. Cosmology from gravitational lens time delays and Planck data // *The Astrophys. J. Let.* – 2014. – Vol. 788: L35 (6pp).
5. Александров О., Жданов В. Часова затримка критичних зображень точкового джерела поблизу каустики-складки гравітаційно-лінзової системи // *Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.* – 2016. – № 53(1). – С. 6–11.
6. Congdon A.B., Keeton C.R., Nordgren C.E. Analytic relations for magnification and time delays in gravitational lenses with fold and cusp configurations // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2008. – Vol. 389. – P. 398–406.
7. Alexandrov A.N., Koval S.M., Zhdanov V.I. Gravitational lens equation: critical solutions and magnification near folds and cusps // *Advances in Astronomy and Space Physics.* – 2012. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 184–187.
8. Александров О., Жданов В., Коваль С. Координати та підсилення критичних зображень в гравітаційно-лінзових системах: поправки другого порядку у околі симетричного каспу // *Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.* – 2013. – 1(50). – С. 5–10.
9. Chang K., Refsdal S. Flux variations of QSO 0957 + 561 A, B and image splitting by stars near the light path // *Nature.* – 1979. – Vol. 282. – P. 561–564.
10. Schneider P., Ehlers J., Falco E. E. Gravitational Lenses. – Berlin: Springer, 1992.

Надійшла до редколегії 05.07.16

A. Alexandrov, Ph.D., sen. researcher

V. Zhdanov, Dr. Sci., Prof.

Astronomical Observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv

## TIME DELAY OF CRITICAL IMAGES IN THE VICINITY OF CUSP POINT OF GRAVITATIONAL-LENS SYSTEM

*We consider approximate analytical formulas for time-delays of critical images of a point source in the neighborhood of a cusp-caustic. We discuss zero, first and second approximations in powers of a parameter that defines the proximity of the source to the cusp. These formulas link the time delay with characteristics of the lens potential. The formula of zero approximation was obtained by Congdon, Keeton & Nordgren (MNRAS, 2008). In case of a general lens potential we derived first order correction thereto. If the potential is symmetric with respect to the cusp axis, then this correction is identically equal to zero. For this case, we obtained second order correction. The relations found are illustrated by a simple model example.*

A. Александров, канд. физ.-мат. наук., ст. науч. сотрудник

B. Жданов, д-р физ.-мат. наук, проф.

Астрономическая Обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

## ВРЕМЕННАЯ ЗАДЕРЖКА КРИТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВБЛИЗИ КАСПОВОЙ ТОЧКИ ГРАВИТАЦИОННО-ЛИНЗОВОЙ СИСТЕМЫ

*Получены приближенные формулы для временной задержки критических изображений точечного источника вблизи касповой точки каустики. Мы обсуждаем формулы нулевого, первого и второго порядков по степеням параметра близости источника к каустике. Эти формулы связывают время задержки с характеристиками линзового потенциала. Формула для нулевого приближения была получена в работе Конгдона, Китона и Нордгрена (MNRAS, 2008). Для обобщенного потенциала мы нашли к ней поправку первого порядка. В случае потенциала, симметричного относительно оси каспа, эта поправка обращается в ноль. Для такого случая мы получили поправку второго порядка. Найденные соотношения проиллюстрированы на простом модельном примере.*

УДК 523.942

О. Баран, інженер

М. Стоділка, д-р фіз.-мат. наук

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка

## РОЗВИТОК КОНВЕКТИВНИХ СТРУКТУР У СОНЯЧНІЙ ФОТОСФЕРІ

*На основі моделей фотосферної конвекції, отриманих з використанням даних VTT шляхом розв'язку оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання, проведено дослідження розвитку конвективних структур у сонячній фотосфері. Для цього проаналізовано, як змінюються з часом варіації вертикальних швидкостей і температури всередині грануляційних комірок. Досліджено особливості утворення та розпаду гранул в залежності від їх розміру, формування "дерев" з гранул, що фрагментуються.*

Ключові слова: фотосферна конвекція, грануляційні комірки, фрагментація.

**Вступ.** Однією з характерних особливостей конвективних рухів на поверхні Сонця є наявність комірчастої структури різних просторово-часових масштабів [1]. Грануляція є найпомітнішою неоднорідністю сонячної фотосфери. Конвективні потоки гарячого газу піднімаються до сонячної поверхні, утворюючи там яскраві комірки неправильної форми з розмірами порядку 1 Мм – гранули; з часом через швидке розширення газу та радіаційні втрати речовина в таких структурах охолоджується і гранули зникають, а pojawiaються інші. В роботах [2, 3] досліджено різні механізми утворення і зникнення грануляційних комірок.

В роботі [4] на основі 3D аналізу  $(x, y, t)$  поля інтенсивності на грануляційних масштабах виявлено, що значна частка гранул у сонячній фотосфері об'єднується в утворення, названі авторами як Trees of Fragmenting Granules (TFG) – "дерева" з гранул, що фрагментуються. Ці структури беруть початок з однієї гранули, яка розпалася, та з часом налічують цілу ієрархію, яка продовжує фрагментуватися. Виявлено, що час життя таких грануляційних сімейств може сягати 8 год, що значно довше, ніж середній час життя окремої гранули – 10 хв. Знайдено, що 62% поверхні займають гранули, які є частиною довготривалих TFG з часом життя понад 1.5 год. Ці утворення мають схожість з мезогранулами і наводять на думку, що мезогрануляція повинна бути пов'язана з властивостями просторової та часової структури гранул. В роботі [5] підтвержено, що усереднення в часі довготривалих грануляційних утворень дає структури на мезогрануляційних масштабах; знайдено кореляцію між магнітною сіткою і просторовим розподілом "дерев". Зв'язок таких грануляційних сімейств, горизонтальних та вертикальних потоків і акустичних хвиль до-

сліджено в [6]; 80 відсотків TFG, виявлених у цій роботі, існують до 2 годин. В наступній праці [7] встановлено, що еволюція згаданих вище конвективних утворень призводить до виникнення горизонтальних потоків з часом життя 1–2 год на масштабах до 12"; автори роблять висновок, що TFG є одним з основних елементів супергрануляції, який сприяє горизонтальному переміщенню магнітних полів по поверхні Сонця.

Таким чином, на сьогодні залишається актуальним дослідження еволюції фотосферної конвекції і, зокрема, формування вищезгаданих грануляційних об'єднань. Існує необхідність в проведенні детального аналізу часових змін термодинамічних та кінематичних параметрів усередині структурних елементів фотосферної конвекції.

Мета нашої роботи – за даними спостережень Сонця в лінії нейтрального заліза з високим просторовим розділенням відтворити просторово-часові варіації вертикальних швидкостей і температури фотосферної конвекції та дослідити просторово-часові зміни цих варіацій в межах конвективних комірок з метою виявити особливості їх розвитку і формування TFG.

**Спостережувані дані** Робота основана на часових серіях спостережуваних профілів лінії нейтрального заліза FeI  $\lambda 532.4$  нм, отриманих Щукиною Н.Г. на 70-см вакуумному баштовому телескопі VTT (Канарські острови, Іспанія) з просторовим розділенням приблизно  $0''.5$  [8]. Спостерігалися спокійні області поблизу центру сонячного диска протяжністю близько 64 Мм. Тривалість спостереження лінії FeI  $\lambda 532.4$  нм – 31 хв (з часовим розділенням 9.3 с).

**Отримані результати** Просторово-часові варіації вертикальних швидкостей і температури в сонячній фотосфері відтворені шляхом застосування інверсної процедури до профілів ліній [9]. З допомогою (k- $\omega$ )-фільтрації просторово-часових варіацій виділено конвективну складову.

Ми проаналізували часові зміни вертикальних швидкостей та температурних варіацій всередині різних за розміром грануляційних комірок. За особливостями формування-розпаду комірок виявлено відмінності в розвитку малих і великих гранул. Понад 80% грануляційних комірок, виявлених в області дослідження, мають розміри до 1.5 Мм. Такі малі за розміром комірки зазвичай виникають із залишку попередньої гранули (з малими значеннями варіацій температури та вертикальних швидкостей в області зародження) або появляються спонтанно в міжгрануляційному середовищі.

З часом варіації зростають, причому вони набувають максимальних значень у центральній частині комірки. Наприкінці розвитку варіації всередині гранули зменшуються до мінімуму і, можливо, дають початок новій гранулі (вона формується на тому ж місці або поряд), або ж комірка повністю розчиняється у навколишньому середовищі. Розпад типової малої гранули, що в момент максимального розвитку набуває розміру близько 1.5 Мм, показано на рис. 1, а.

Великі гранули з розмірами понад 1.5 Мм зустрічаються значно рідше, ніж малі гранули. Такі комірки рідко формуються з одного утворення, яке набуває великих розмірів, а, частіше, – з декількох малих залишків шляхом їх об'єднання в одну велику конвективну структуру з асиметричним розподілом варіацій температури і вертикальних швидкостей всередині. Вочевидь, ця спостережувана асиметрія викликана тонкою структурою потоків в межах комірки, з одної сторони, і просторовим замиванням, з іншої (тонку структуру потоків досліджено нами раніше в роботі [10]). Наприкінці свого розвитку великі гранули, як правило, поділяються на декілька фрагментів. Фрагментацію типової великої гранули, яка в процесі свого розвитку в діаметрі сягає 2.5 Мм і більше, показано рис. 1, б.

Отже, шляхи утворення-розпаду малих (з розмірами до 1.5 Мм) та великих (з розмірами більше 1.5 Мм) гранул відрізняються. Розміри комірок 1.5 Мм вибрано як критерій поділу, оскільки таке їх значення дозволяє провести найбільш чітку межу між двома групами. При такому поділі процент попадання комірок однієї групи в іншу групу – мінімальний (порядку пару процентів комірок однієї групи за розміром розвиваються, як інша група).

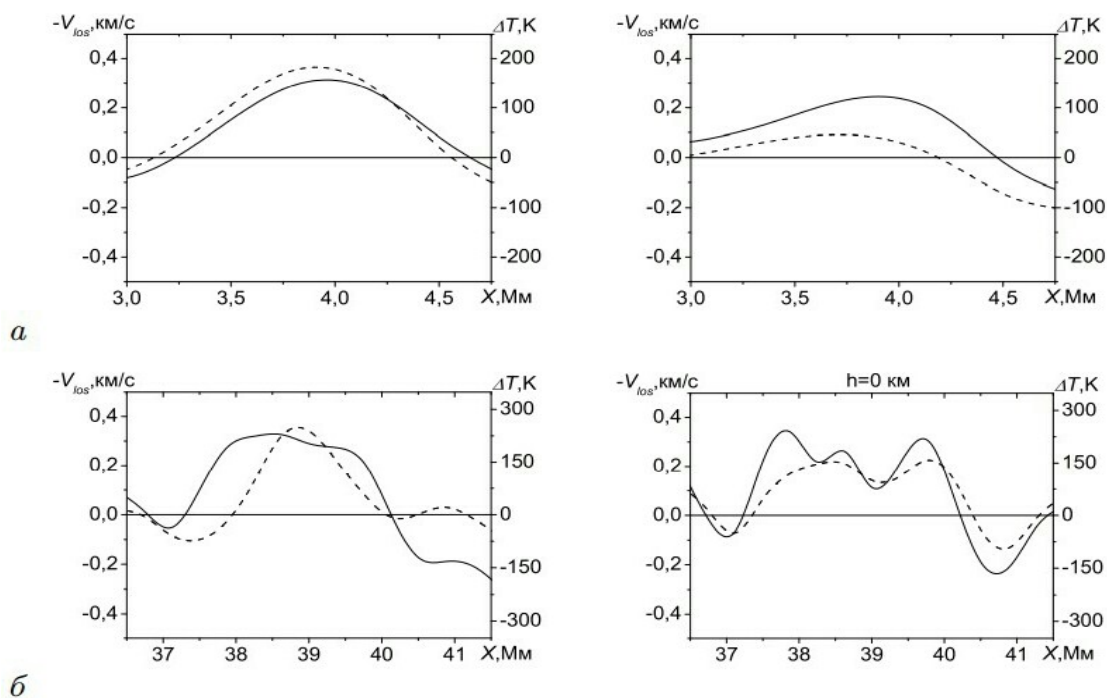


Рис. 1. Розпад малих (а) і великих (б) гранул, представлений змінами вертикальних швидкостей (суцільна лінія) та варіацій температури (штрих) всередині комірок на висотах  $h = 0$  км за час  $\Delta t \approx 6$  хв 16 с

Наші висновки про різні сценарії розвитку малих і великих грануляційних комірок підтверджують результати, отримані раніше в роботах [2, 3, 10] про те, що гранули можна розділити на дві групи: розміри гранул визначають спосіб, за яким вони виникають, і певною мірою прогнозують їх подальший розвиток.

Великі комірки розпадаються на два чи більше фрагментів, які теж можуть об'єднуватися, розпадатися і т. д. Таким чином, з часом формуються великі конвективні утворення, які існують довше, ніж середній час життя гранул (10 хв). В літературі [3–7] їх називають "деревом" з гранул, що фрагментуються. На наших результатах відтворення ми виявили декілька подібних конвективних структур. Одна з них представлена на рис. 2 часовими варіаціями температури в нижніх шарах фотосфери, на висоті  $h = 0$  км (додатні температурні варіації, що відповідають гранулам, відтворені світлими кольорами, а від'ємні варіації затемнені).

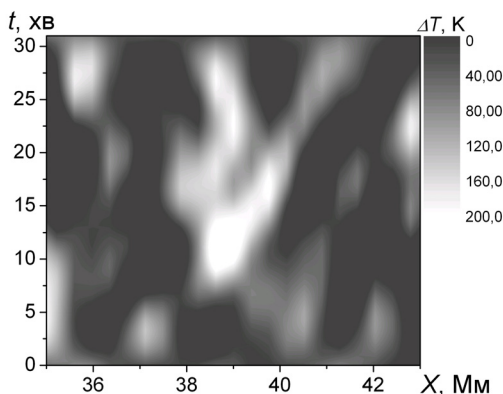


Рис. 2 "Дерево" з гранул, що фрагментуються, в температурній структурі грануляції ( $h = 0$  км)

Конвективна структура, показана на рис. 2 в межах координат  $X \approx 37\text{--}42$  Мм, бере початок з утворення однієї великої гранули розміром близько 2 Мм (варіації температури і вертикальної швидкості всередині цієї гранули в момент її максимального розвитку показані на рис. 1б, праворуч). Через час  $\Delta t \approx 7$  хв ця грануляційна комірка розпадається на дві. Далі одна з новоутворених гранул за короткий проміжок часу  $\Delta t \approx 2\text{--}3$  хв знову розпадається на два фрагменти. Таким чином, за час  $\Delta t \approx 25$  хв розвивається "дерево" з гранул, що фрагментуються, з розмірами до 4 Мм і, ймовірно, розвивається далі (дослідження цього явища обмежене тривалістю спостережень). Отже, такі просторово-часові структури еволюціонують до масштабів, близьких до мезогрануляційних. Швидкість розходження елементів "дерева" становить приблизно 1.7 км/с (в роботі [4] ця швидкість – 2 км/с).

Таким чином, наші результати підтверджують наявність великих грануляційних формувань у сонячній фотосфері, які в роботах [4–7] пов'язують з конвективними явищами на більших масштабах – з

мезогрануляцією і супергрануляцією.

**Висновки.** На основі аналізу просторово-часових варіацій вертикальних швидкостей та температури, отриманих із VTT-спостережень у лініїх FeI  $\lambda 523.4$  нм отримано такі результати:

1. Виявлено, що малі гранули (з розмірами до 1.5 Мм), які становлять понад 80% виявлених нами комірок, та великі (з розмірами більше 1.5 Мм) гранули відрізняються шляхами формування і розпаду.

2. Знайдено, що під час повторних процесів об'єднання-фрагментації грануляційних комірок формуються т. зв. "деревом" з гранул, що фрагментуються. Їх відгалуженнями є фрагменти, утворені внаслідок розпаду великої гранули. Такі просторово-часові структури еволюціонують до масштабів, близьких до мезогрануляційних.

#### Список використаних джерел

1. Nordlund, A.; Stein, R. F.; Asplund, M. Solar Surface Convection // Liv. Rev. Solar Phys. – 2009. – V.6, № 2. – 117 pp.
2. Hirzberger J., Bonet J.A., Vazquez M., Hanslmeier A. Time Series of Solar Granulation Images. II. Evolution of Individual Granules // Astrophys. J. – 1999. – V.515, Issue 1. – P. 441–454.
3. Ploner S.R.O., Solanki S.K., Gadun A.S. The evolution of solar granules deduced from 2-D simulations // Astron. Astrophys. – 1999. – V.352, № 2. – P. 679–696.
4. Roudier Th., Lignieres F., Rieutord M. et al. Families of fragmenting granules and their relation to meso- and supergranular flow fields // Astron. Astrophys. – 2003. – V.409. – P. 299–308.
5. Roudier Th., Muller R. Relation between families of granules, mesogranules and photospheric network // Astron. Astrophys. – 2004. – V.419. – P. 757–762.
6. Malherbe J.-M., Roudier Th., Frank Z., Rieutord M. Families of Granules, Flows, and Acoustic Events in the Solar Atmosphere from Honode Observations // Solar Phys. – 2015. – V.290, Issue 2. – P. 290–321.
7. Roudier Th., Malherbe J.-M., Rieutord M., Frank Z. Relation between trees of fragmenting granules and supergranulation evolution // Astron. Astrophys. – 2016. – V.590, id.A121. – 11 pp.
8. Khomenko E.V., Kostik R.I., Shchukina N.G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lines // Astron. Astrophys. – 2001. – V. 369. – P. 660–671.
9. Стодилка М.І. Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір // Журнал фізичних досліджень. – 2002. – Т. 6, № 4. – С. 435–442.
10. Стодилка М.І., Баран О.А. Структура фотосферної конвекції Сонця на субгрануляційних масштабах // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2008. – Т. 24, № 2. – С. 99–109.
11. Espagnet O., Muller R., Roudier T., Mein N. Turbulent power spectra of solar granulation // Astron. Astrophys. – 1993. – V. 271. – P. 589–600.

Надійшла до редколегії 23.06.16

О. Баран, інженер, М. Стодилка, д-р физ.-мат. наук

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко

## РАЗВИТИЕ КОНВЕКТИВНЫХ СТРУКТУР В СОЛНЕЧНОЙ ФОТОСФЕРЕ

На основе моделей фотосферной конвекции, полученных с использованием данных VTT путем решения обратной задачи неравновесного переноса излучения, проведено исследование развития конвективных структур в солнечной фотосфере. Для этого проанализировано, как изменяются во времени вариации вертикальных скоростей и температуры внутри грануляционных ячеек. Исследованы особенности образования и распада гранул в зависимости от их размера, формирование "деревьев" з фрагментирующихся гранул.

Ключевые слова: фотосферная конвекция, грануляционные ячейки, фрагментация.

O. Baran, engineer, M. Stodilka, Dr. Phys. and Math. Sciences

Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of L'viv

## THE DEVELOPMENT OF CONVECTIVE STRUCTURES IN THE SOLAR PHOTOSPHERE

We study the development of convective structures in the solar photosphere on the basis of the photospheric convection models obtained using data from VTT by the solving of the inverse nonequilibrium radiative transfer problem. Temporal changes of the variations of vertical velocity and temperature within granular cells are analyzed. Features of the appearance and the disappearance of granules according to their size, the formation of "trees" of fragmenting granules are investigated.

Key words: photosphere convection, granular cells, fragmentation.