

УДК 523.942

О. А. Баран, М. І. Стоділка, А. І. Присяжний

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія 8, м. Львів, 79005, Україна
e-mail: lesiaab@gmail.com, sun@astro.franko.lviv.ua, andrij13p@gmail.com

Структура довгоживучих елементів сонячної грануляції

На основі даних спостережень на VTT (тривалість спостережень 2.6 год) шляхом розв'язку оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання досліджено просторово-часові варіації термодинамічних і кінематичних параметрів структурних елементів сонячної грануляції. У нижній фотосфері виявлено довгоживучі (з часом життя до 1.5 год) структури — дерева гранул, що фрагментують. Вони формуються у результаті ділення висхідних потоків грануляції на окремі фрагменти, і цей процес може повторюватись неодноразово. Знайдено, що близько 67 % областей з максимальними додатними варіаціями тиску припадають на час і місце фрагментації грануляційних потоків, ще приблизно 12 % таких областей відповідають моментам зближення сусідніх структур.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, дерева гранул.

ВСТУП

На спокійній сонячній поверхні спостерігається система яскравих комірок з горизонтальними масштабами порядку 1 Мм [16], розділених темними проміжками, — сонячна грануляція. Середній час життя окремої гранули лежить у межах від 5 [25] до 16 хв [15]. Зазвичай структуру сонячної грануляції досліджують шляхом аналізу флуктуацій інтенсивності та конвективних швидкостей [3, 4, 11, 12]. Важливу роль в утворенні конвективної структури сонячної фотосфери відіграють також варіації тиску. Вони визначають геометрію конвективних потоків у стратифікованому середовищі [10, 14]. В роботі [24] показано, що грануляційні комірки у процесі свого розвитку зазнають впли-

ву з боку сусідніх комірок: гранули з найбільшим тиском ростуть і розширюються, тоді як інші, з меншим надлишком тиску, обмежені в розвитку і загасають.

У роботах [2, 6, 9, 18] встановлено, що розміри гранул визначають спосіб, за яким вони виникають, і певною мірою прогнозують їхній подальший розвиток. В роботі [9] виявлено, що еволюція комірок визначається фізикою підфотосферних шарів, що має місце на масштабах 1.4 (1000 км) і призводить до фрагментації комірок на менші та ще менші елементи: для малих масштабів очікується більш ефективна передача тепла від гранул у міжгрануляційне середовище. Подібні результати отримано в роботі [8]: великі гранули менш стійкі через більший надлишок тиску всередині.

В роботі [2] досліджено особливості утворення та розпаду гранул шляхом аналізу часових змін варіацій температури і вертикальних швидкостей всередині комірок. Підтверджено, що малі гранули (з розмірами до 1.5 Мм) зазвичай виникають спонтанно чи із залишку попередньої гранули та поступово розчиняються; великі гранули (з розмірами понад 1.5 Мм) утворюються з декількох малих залишків шляхом їхнього об'єднання з подальшим поділом на окремі фрагменти. Процес фрагментації може повторюватись, внаслідок чого формуються просторово-часові структури на масштабах, близьких до мезогрануляційних. Такі структури, які з часом розгалужуються у просторі, були названі в [21] деревами гранул, що фрагментують. В цій же роботі виявлено, що час життя таких структур може сягати 8 год, що значно довше, ніж середній час життя окремої гранули — 10 хв. Знайдено, що 62 % поверхні займають дерева гранул з часом життя понад 1.5 год.

У роботі [23] за допомогою 3D-аналізу поля інтенсивності показано, що усереднення в часі довготривалих грануляційних утворень дає структури на мезогрануляційних масштабах (5...12 Мм, t 2 год [17]). З іншого боку, в роботі [1] на основі аналізу просторово-часових варіацій температури, вертикальних швидкостей, густини і тиску ми дослідили, що конвективна структура сонячної фотосфери на мезогрануляційних масштабах з висотою поводитьсь подібно до грануляції, а тому мезогранули — це великі довгоживучі гранули або їхні комплекси.

Дослідження зв'язку між такими грануляційними структурами, горизонтальними та вертикальними потоками і акустичними хвилями в сонячній фотосфері [13] показало, що 80 % дерев гранул живуть до 2 год. У роботі [22] 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 дерева гранул є одним з основних елементів супергрануляції (20...40 Мм, t 1 доба [20]) і сприяють горизонтальному переміщенню магнітних полів по поверхні Сонця.

Таким чином, на сьогодні недостатньо вивченими залишаються фізичні умови, що призводять до формування довгоживучих потоків.

Для цього необхідно провести детальний аналіз просторово-часових варіацій фізичних параметрів усередині таких конвективних структур.

Мета нашої роботи — за даними спостережень Сонця з високим просторовим і часовим розділенням відтворити варіації термодинамічних і кінематичних параметрів сонячної конвекції, вивчити часові зміни цих параметрів у грануляційних потоках та встановити їхні особливості під час фрагментації потоків.

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ ТА ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наші дослідження ґрунтуються на спостережних 1D-рядах яскравості у лінії Fe I 639.3 нм, які були отримані Н. Г. Щукіною на 70-см німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT (Канарські острови, Іспанія). Спостерігалася спокійна область поблизу центра сонячного диска. Протяжність цієї області вздовж поверхні Сонця становила приблизно 64 Мм. Під час спостережень тремтіння сонячної поверхні на вхідній щілині спектрографа не перевищувало 0.5 [12]. Спостереження виконувались протягом 2 год 36 хв з часовим розділенням 10 с.

На основі спостережуваних профілів шляхом розв'язку оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання [5] ми відтворили варіації термодинамічних параметрів і вертикальних швидкостей сонячної фотосфери вздовж поверхні Сонця (координата X) та по висоті (координата h у межах від -25 до 550 км згідно з моделлю спокійної атмосфери Сонця VAL-80 [26]). Їхній конвективний компонент виділено за допомогою фур'є-аналізу просторово-часової серії спостережних даних (k -фільтрації).

У роботі ми аналізували розвиток вертикальних швидкостей V_{los} та варіацій тиску p . Часові зміни варіацій температури T дають більш розмиту структуру сонячної грануляції, тому в цьому дослідженні ми їх не використовували.

Еволюція поля конвективних швидкостей. У результаті обробки ми отримали набір іміджів з полем вертикальних швидкостей грануляції для різних моментів часу. На рис. 1, *a* показано відтворене поле конвективних швидкостей у фіксований момент часу $t = 1$ год 20 хв: світлі тони — висхідні потоки в гранулах (від'ємні значення швидкостей), темні — низхідні потоки у міжгранулах (додатні значення швидкостей).

На рис. 1, *b* показано картину розвитку грануляційної структури для конкретної висоти $h = 50$ км (це середина нижньої фотосфери, де конвекція проявляється найкраще). Світлими тонами показано зміни висхідних потоків з часом, а низхідні потоки повністю затемнені.

Згідно з результатами відтворення (рис. 1, *b*) у сонячній фотосфері разом з грануляційними потоками, середній час життя яких близький

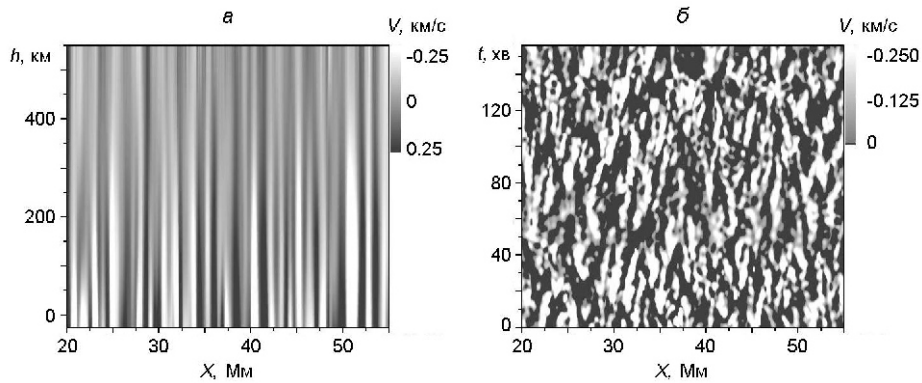


Рис. 1: *a* — поле вертикальних швидкостей сонячної грануляції у момент часу $t = 1$ год 20 хв, *б* — часові зміни структури вертикальних швидкостей у висхідних грануляційних потоках (значення $V > 0$ км/с затемнені) на висоті $h = 50$ км

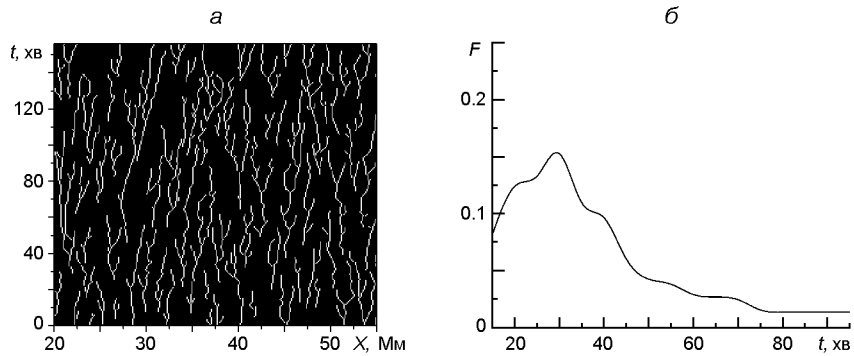


Рис. 2: *a* — відтворені дерева гранул, що фрагментують, у нижній фотосфері ($h = 50$ км), *б* — функція F розподілу дерев гранул по значенням часу життя t

до 10 хв [16], знайдено висхідні потоки, які живуть довше (> 15 хв). За час спостережень у досліджуваній області ми виявили біля 70 довгоживучих висхідних потоків грануляції, які у процесі свого розвитку неодноразово поділяються на два чи більше потоків і, таким чином, формують дерева гранул, що фрагментують.

Для кращого виділення дерев гранул на рис. 1, *б* ми вибрали такі потоки, що фрагментують принаймні один раз. Положення максимумів вертикальних швидкостей у цих потоках ми показали на рис. 2, *a* білими лініями, а все інше — затемнили. Виявлено дерева гранул, у яких потоки відокремлюються до семи разів.

На рис. 2, *б* подано функцію розподілу відтворених дерев гранул по часу життя ($t = 15 \dots 95$ хв). Виявлено структури грануляційних потоків, що живуть до 1.5 год і довше. Крива розподілу різко асиметрична: максимум функції розподілу припадає на час життя 30 хв; приблизно 70 % дерев гранул спостерігаються протягом 17...40 хв, а кількість дерев з довгим часом життя значно менша.

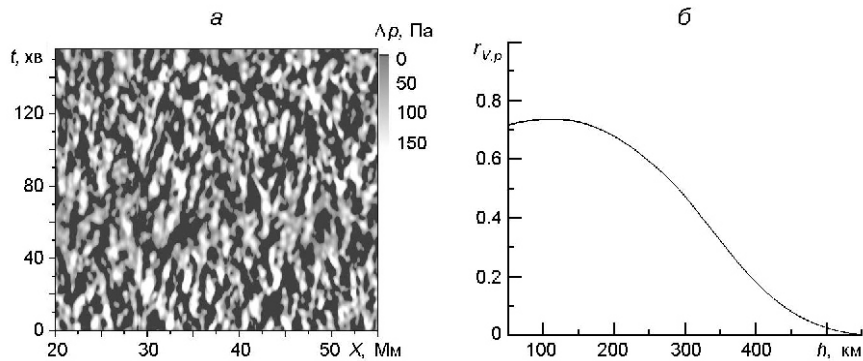


Рис. 3: *а* — часові зміни структури додатних конвективних варіацій тиску (варіації $p < 0$ Па затемнені) на висоті $h = 50$ км, *б* — коефіцієнт кореляції $r_{v,p}$ вертикальних швидкостей грануляції з конвективними варіаціями тиску на різних висотах h сонячної фотосфери

Просторово-часові зміни конвективних варіацій тиску. Згідно з результатами моделювання [8] тиск всередині гранул повинен бути більший за тиск всередині міжгранул, оскільки різниця тисків зумовлює висхідні та низхідні потоки і горизонтальні рухи речовини. В роботах [1, 7, 19] на основі спостережних даних підтверджено, що варіації тиску переважно додатні всередині висхідних потоків та від'ємні у низхідних потоках.

Наші результати відтворення еволюції конвективних варіацій тиску p в нижній фотосфері ($h = 50$ км) зображено на рис. 3, *а*. Просторово-часові додатні варіації тиску в гранулах показано світлими тонами, а від'ємні варіації — повністю затемнені. Як бачимо, варіації тиску на рис. 3, *а* еволюціонують подібно до часових змін поля вертикальних швидкостей на рис. 1, *б*: тут також спостерігаються відповідні короткотривалі та довготривалі елементи.

Коефіцієнт кореляції $r_{v,p}$ вертикальних швидкостей грануляції з конвективними варіаціями тиску на різних висотах у сонячній фотосфері показано на рис. 3, *б*. Як бачимо, цей коефіцієнт досягає максимальних значень $r_{v,p} \approx 0.7$ на висотах $h < 200$ км і зменшується у вищих шарах. Це дає можливість порівнювати структуру варіацій тиску і поля швидкостей принаймні в нижній фотосфері.

Стратифікацію варіацій тиску p у висхідних потоках грануляції показано на рис. 4, *а*: сірі лінії — варіації тиску всередині гранул, котрі в кінці свого розвитку розчиняються в навколишньому середовищі; чорні лінії — варіації тиску всередині гранул, що наприкінці поділяються на фрагменти. В шарах нижньої фотосфери ($h = 50 \dots 100$ км) варіації тиску максимальні: вони сягають значень $p \approx 100 \dots 200$ Па в гранулах, що розчиняються, і $p \approx 200 \dots 300$ Па в гранулах, що фрагментують. Отже, у місцях фрагментації варіації тиску в 1.5...2 рази більші, ніж у гранулах, що розчиняються. З висотою варіації тиску у всіх грануляційних потоках суттєво зменшуються, але варіації в гранулах, що фрагментують, переважають.

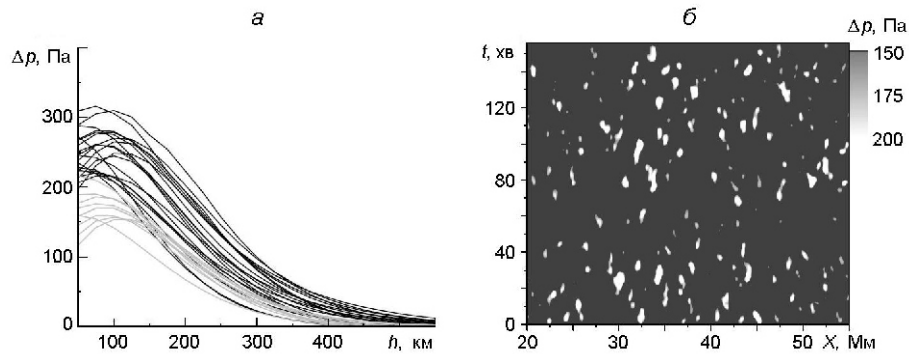


Рис. 4: *a* — стратифікація варіацій тиску у гранулах, що розчиняються (сірі лінії), і у гранулах, що фрагментують (чорні лінії), *б* — часові зміни положень максимальних додатних варіацій тиску (білий колір — $p = 200$ Па) у нижній фотосфері ($h = 50$ км)

На рис. 4, *б* відтворено часові зміни структури варіацій тиску в нижній фотосфері таким чином, що варіації $p = 150$ Па повністю затемнені, а варіації $p = 200$ Па показано білим кольором. Ми зіставили цю картину розвитку максимумів варіацій тиску з деревами гранул на рис. 2, *a*. Бачимо, що 67 % областей з найбільшими додатними варіаціями тиску на рис. 4, *б* припадають на час і місце фрагментації грануляційних потоків на рис. 2, *a*, і ще приблизно 12 % таких областей відповідають моментам дотику віток грануляційних дерев (зближення сусідніх структур).

Проведений аналіз варіацій тиску говорить про те, що процес фрагментації грануляційних потоків пов'язаний з високими значеннями варіацій тиску в таких потоках. Наші результати узгоджуються з модельними дослідженнями загальних властивостей сонячної грануляції [8, 16, 24].

ВИСНОВКИ

В роботі використано 1D-дані VTT-спостережень у лінії Fe I 639.3 нм з високим просторовим і часовим розділенням. Шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання відтворено і досліджено просторово-часові зміни вертикальних швидкостей та варіацій тиску фотосферної конвекції Сонця. Основні результати:

— Довгоживучі структури, які називають деревами гранул, формуються в результаті процесів фрагментації висхідних потоків грануляції на два чи більше потоків, що може повторюватись неодноразово. Тривалість життя таких структур становить від 15 до 95 хв, проте приблизно 70 % дерев гранул живуть 17...40 хв.

— У нижній фотосфері варіації тиску в гранулах, що в кінці свого розвитку поділяються на фрагменти, у 1.5...2 рази більші за варіації

тиску в гранулах, котрі розчиняються у навколишньому середовищі. З висотою варіації тиску у всіх грануляційних потоках суттєво зменшуються, але варіації в гранулах, що фрагментують, переважають.

— На гілках розгалуження дерев гранул виявлено збільшення варіацій тиску: майже 67 % областей з максимальними додатними варіаціями тиску припадають на місця фрагментації грануляційних потоків, ще приблизно 12 % таких областей відповідають моментам дотику гілок грануляційних дерев (зближення сусідніх структур).

Результати дослідження вказують на те, що високі значення додатних варіацій тиску призводять до фрагментації грануляційних потоків. Аналіз варіацій тиску та поля вертикальних швидкостей фотосферної конвекції Сонця підтвердив результати числового моделювання сонячної грануляції [8, 16, 24].

Ми щиро вдячні Н. Г. Щукіній і Р. І. Костику за надані результати спостережень.

1. Баран О. А., Стоділка М. І. Структура фотосферної конвекції Сонця на грануляційних і мезогрануляційних масштабах. *Кинематика и физика небес.* тел. 2015. 31. № 2. С. 21—33.
2. Баран О. А., Стоділка М. І. Розвиток конвективних структур у сонячній фотосфері. *Вісник Київ. нац. ун-та. Астрономія.* 2016. Вип. 2 (54). С. 25—27.
3. Стоділка М. І., Баран О. А. Структура фотосферної конвекції Сонця на субгрануляційних масштабах. *Кинематика и физика небес.* тел. 2008. 24. № 2. С. 99—109.
4. Стоділка М. І., Баран О. А., Малинич С. З. Особенности конвекции в фотосфере Солнца. *Кинематика и физика небес.* тел. 2006. 22. № 3. С. 173—182.
5. Стоділка М. І. Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір. *Журн. фіз. досліджень.* 2002. 6. № 4. С. 435—442.
6. Baran O. A. Structure of convective flows of the real solar granulation. *Adv. Astron. and Space Phys.: Conf. proceedings.* Kyiv: Kyiv. Univ., 2011. P. 53—56.
7. Baran O. A., Stodilka M. I. Convective pressure variations in the solar photosphere. *Astron. and Space Phys., Annual International Conference, May 25—29, 2014, Kyiv, Ukraine: Abstracts.* Kyiv: Kyiv. Univ., 2015. P. 32.
8. Gadun A. S., Hanslmeier A., Pikalov K. N., Ploner S. R. O., Puschmann K. G., Solanki S. K. Size-dependent properties of simulated 2-D solar granulation. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 2000. 146. P. 267—291.
9. Hirzberger J., Bonet J. A., Vazquez M., Hanslmeier A. Time series of solar granulation images. II. Evolution of individual granules. *Astrophys. J.* 1999. 515. P. 441—454.
10. Hurlburt N. E., Toomre J., Massaguer J. M. Two-dimensional compressible convection extending over. *Astrophys. J.* 1984. 282, Part 1. P. 557—573.
11. Kostik R., Khomenko E., Shchukina N. Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 Å line. *Astron. and Astrophys.* 2009. 506, N 3. P. 1405—1414.
12. Kostyk R. I., Shchukina N. G. Fine structure of convective motions in the solar photosphere: observations and theory. *Astron. Reports.* 2004. 48. N 9. P. 769—780.
13. 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. 290. N 2. P. 290—321.
14. Massaguer J. M., Zahn J.-P. Cellular convection in a stratified atmosphere. *Astron. and Astrophys.* 1980. 87. N 3. P. 315—327.

15. Mehltrretter J. P. Balloon-borne imagery of the solar granulation. II. The lifetime of solar granulation. *Astron. and Astrophys.* 1978. 62. N 3. P. 311—316.
16. Nordlund A., Stein R. F., Asplund M. Solar surface convection. *Liv. Rev. Solar Phys.* 2009. 6. N 2. 117 p.
17. November L. J., Toomre J., Gebbie K. B., Simon G. W. The detection of mesogranulation on the Sun. *Astrophys. J.* 1981. 245, Part 2. P. L123—L126.
18. Ploner S. R. O., Solanki S. K., Gadun A. S. The evolution of solar granules deduced from 2-D simulations. *Astron. and Astrophys.* 1999. 352. N 2. P. 679—696.
19. Puschmann K., Ruiz Cobo B., Vazquez M., Bonet J. A., Hanslmeier A. Time series of high resolution photospheric spectra in a quiet region of the Sun. II. Analysis of the variation of physical quantities of granular structures. *Astron. and Astrophys.* 2005. 441. N 3. P. 1157—1169.
20. Rieutord M., Rincon F. The Sun's supergranulation. *Liv. Rev. Solar Phys.* 2010. 7. N 2. 82 p.
21. Roudier Th., Lignieres F., Rieutord M., Brandt P. N., Malherbe J. M. Families of fragmenting granules and their relation to meso- and supergranular flow fields. *Astron. and Astrophys.*—2003.—409.—P. 299—308.
22. Roudier Th., Malherbe J.-M., Rieutord M., Frank Z. Relation between trees of fragmenting granules and supergranulation evolution. *Astron. and Astrophys.* 2016. —590. id.A121. 11 p.
23. Roudier Th., Muller R. Relation between families of granules, mesogranules and photospheric network. *Astron. and Astrophys.* 2004. 419. P. 757—762.
24. Stein R. F., Nordlund A. Simulation of solar granulation. I. General properties. *Astrophys. J.* 1998. 499. P. 914—933.
25. Title A. M., Tarbell T. D., Topka K. P., Ferguson S. H., Shine R. A. Statistical properties of solar granulation derived from the SOUP instrument on Spacelab 2. *Astrophys. J.* 1989. 336. N 8. P. 475—494.
26. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-Sun. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1981. 45. P. 635—725.

Статья поступила в редакцию 24.07.2017

А. А. Баран, М. И. Стодилка, А. И. Присяжний

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко

СТРУКТУРА ДОЛГОЖИВУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СОЛНЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ

На основе данных наблюдений на VTT (длительность наблюдений 2.6 ч) путем решения обратной задачи неравновесного переноса излучения исследованы пространственно-временные вариации термодинамических и кинематических параметров структурных элементов солнечной грануляции. В нижней фотосфере обнаружены долгоживущие (со временем жизни до 1.5 ч) структуры — деревья фрагментирующих гранул. Они формируются в результате деления восходящих потоков грануляции на отдельные фрагменты, и этот процесс может повторяться неоднократно. Найдено, что около 67 % областей с максимальными положительными вариациями давления приходятся на время и место фрагментации грануляционных потоков, еще примерно 12 % таких областей соответствуют моментам сближения соседних структур.

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, деревья гранул.

O. A. Baran, M. I. Stodilka, A. I. Prysiaznyi
Astronomy Observatory of the Ivan Franko National University,
Lviv, Ukraine

STRUCTURE OF THE LONG-LIVING ELEMENTS
OF THE SOLAR GRANULATION

Spatial and temporal variations of thermodynamic and kinematic parameters of structural elements of the solar granulation are investigated using data of observations on VTT (duration of observations 2.6 hours) by the solution of the inverse nonequilibrium radiative transfer problem. In the lower photosphere we have detected long-living (with lifetime up to 1.5 h) structures — trees of fragmenting granules. They occur as a result of the fission process of an upward granular flow into several fragments and it can be repeated several times. We have found that about 67 % of areas with the highest positive variations of pressure correspond to the time and place of fragmentation of granular flows, approximately 12 % of areas correspond to the approaching of adjacent structures.

Keywords: Sun, photosphere, granule trees.