

УДК 523.942

О. Баран, інж., М. Стоділка, д-р фіз.-мат. наук
Астрономічна обсерваторія ЛНУ імені Івана Франка, Львів

СПОСТЕРЕЖУВАНА ЕВОЛЮЦІЯ КОНВЕКТИВНИХ ПОТОКІВ У СОНЯЧНІЙ ФОТОСФЕРІ (ПОЛЕ ШВИДКОСТЕЙ)

Досліджено еволюцію поля вертикальних швидкостей фотосферної конвекції Сонця шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання за спостережуваними профілями лінії нейтрального заліза $\lambda \approx 639,3$ нм. Профілі отримані з високою просторовою роздільною здатністю в центрі сонячного диску в спокійній області. Хеліологічні рухи усунені шляхом k - ω фільтрації. Проаналізовано просторові варіації вертикальної швидкості на різних висотах сонячної фотосфери ($h = -25 \div 550$ км): коефіцієнт кореляції швидкостей на різних висотах зі швидкостями на $h = 0$ км суттєво зменшується в верхніх шарах фотосфери; на висотах $h > 200$ км для 12% конвективних комірок (гранул і міжгранул) відбувається інверсія швидкостей. Виявлено, що висхідні потоки, як правило, виникають в нижній фотосфері та з часом збурення поширюються вгору; низхідні потоки здебільшого зароджуються у верхніх шарах фотосфери і область збурення опускається вниз.

Ключові слова: фотосфера, конвекція, вертикальна швидкість.

Вступ Основні досягнення в області дослідження фотосферної конвекції отримані на масштабах грануляції. Вона являє собою процес проникнення з конвективної зони в стабільну стратифіковану фотосферу гарячої речовини з високою ентропією. Явище грануляції врівноважує втрати енергії на випромінювання і підтримує збереження маси в конвективних шарах [10].

Дослідження часової послідовності грануляції на спокійному Сонці показує, що окремі гранули розвиваються протягом обмеженого проміжку часу: нова комірка формується на місці попередньої або зі злиття двох; інколи її виникнення відбувається спонтанно; розпадаються вони шляхом розділення, злиття або ж поступово зникають [1]. Різні механізми утворення і зникнення комірок визначається фізикою підфотосферних шарів [6; 7; 11].

В роботі [5] знайдено, що в нижніх шарах фотосфери спостерігається висока кореляція між інтенсивністю і вертикальною швидкістю (за рахунок дії сил плавучості); в верхніх шарах, куди гранули проникають по інерції, виявлено інший тип особливостей. Тут виявлено інверсію варіацій інтенсивності (температури) і велика кількість робіт присвячена дослідженню висот, на яких вона відбувається: на $h \approx 60 \div 90$ км в роботі [5], 170 км в [13], 100 ± 50 км в [3], 250 км в [8]. В роботах [5, 12, 13, 3] досліджено проникнення конвективних комірок в верхні шари фотосфери і встановлено розміри, при яких це можливо. В роботі [9] показано, що понад 40% гранул потрапляють до висот 650 км і середні розміри цих структур збільшуються з висотою.

В роботі [8] виявлено, що на висоті $h = 0$ км приблизно 75% конвективних утворень відповідають класичній грануляції: гаряча матерія піднімається, а холодна – опускається, а на $h = 700$ км тільки біля 20%. В цій роботі показано, що найбільш типовими і ефективними є чотири типи рухів: в перших двох речовина змінює тільки знак контрасту, в двох останніх має місце зміна і знаку контрасту, і напрямку руху. Пізніше в роботі [9] досліджено, що висота інверсії сильно залежить від контрасту інтенсивності і від значення швидкості конкретної комірки в континуумі: чим більші ці параметри, тим вище має місце інверсія; в середньому, це відбувається на $h \approx 200 \div 300$ км.

Мета нашої роботи – за даними спостережень Сонця в лінії нейтрального заліза з високим просторовим розділенням відтворити просторові варіації вертикальної швидкості в сонячній фотосфері, дослідити особливості розвитку висхідних і низхідних конвективних потоків. Аналіз еволюції грануляційних комірок проводиться в рамках реальної (немоделюваної) сонячної конвекції.

Експериментальні дані В роботі використано результати спостережень в лінії нейтрального заліза $\lambda \approx 639,3$ нм, отриманих Н. Г. Щукіною на 70-см вакуумному баштовому телескопі VTT (Канарські острови, Іспанія) поблизу центру сонячного диска в спокійній області з просторовим розділенням $\approx 0,5$ [8]. Час спостереження – 2,6 год. Протяжність області спостереження вздовж поверхні Сонця – 64,4 Мм, досліджувані глибини знаходяться в межах від -25 км до 550 км (в рамках моделі спокійної атмосфери Сонця VAL-80 [14]).

Отримані результати Застосувавши інверсну процедуру [2] для спостережуваних профілів, ми відтворили просторово-часові варіації вертикальної швидкості V в фотосфері Сонця вздовж двох просторових координат (h – по висоті, X – вздовж поверхні Сонця). Конвективну компоненту варіацій в спостережуваній області виділено за допомогою k - ω фільтрації.

На рис. 1 представлено поле вертикальних швидкостей фотосферної конвекції Сонця. Діапазон зміни V обмежений $\pm 0,5$ км/с, що краще відображає контраст висхідних і низхідних конвективних потоків: додатні значення швидкості (темні кольори) відповідають низхідним потокам, від'ємні (світлі кольори) – висхідним потокам.

Як бачимо з рисунка, поле конвективних швидкостей на грануляційних масштабах у вигляді вертикальних колонок проникає через всю фотосферу аж до висот температурного мінімуму: швидкості у висхідних потоках з висотою, як правило, зменшуються ($X = 30,0$ Мм; 31,5 Мм; 33,2 Мм; 35,2 Мм; 38,9 Мм; 44,8 Мм; 47,0 Мм; 48,0 Мм), в той час як у низхідних потоках в багатьох випадках спостерігається збільшення швидкостей в верхніх шарах фотосфери ($X = 30,2$ Мм; 35,7 Мм; 42,0 Мм; 44,3 Мм; 48,5 Мм). В окремих випадках у верхніх шарах фотосфери може відбуватися інверсія вертикальних швидкостей: на рис. 1 чітко видно, як з висотою міняється напрямок руху речовини в конвективних комірках на $X = 33,2$ Мм і 44,8 Мм. Зміна знаку вертикальних швидкостей відбувається на висотах $h > 200$ км, що узгоджується з роботами Р. Костика [8; 9].

Ми проаналізували понад 1500 конвективних комірок, що розвиваються в досліджуваній області за час спостережень, і виявили, що частка конвективних потоків з інверсією швидкостей складає 12%. Зазначимо також, що інверсія зустрічається майже однаково як в гранулах, так і в міжгранулах. Зміна знаку швидкостей в верхніх шарах фотосфери проявляється на різних стадіях еволюції конвективного потоку: на $X = 33,2$ Мм (рис. 1) спостерігається інверсія на початку виникнення потоку і з часом вона зникає; на $X = 44,8$ Мм (рис. 1) в нижніх шарах фотосфери виникає

гранула, пізніше над нею виникає потік з протилежним напрямком руху і веде до загасання висхідного потоку гранули в нижніх шарах.

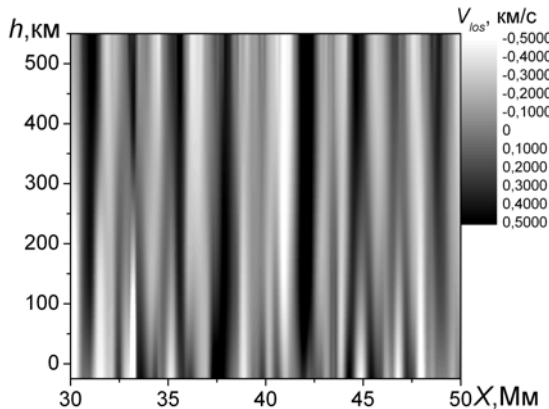


Рис.1. Поле вертикальних швидкостей сонячної конвекції

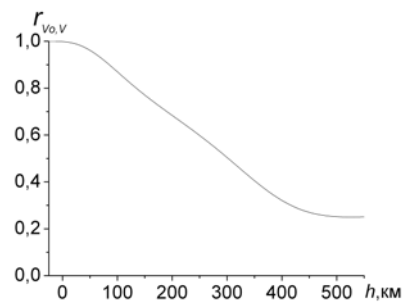


Рис. 2. Коефіцієнт кореляції вертикальних швидкостей на різних висотах в фотосфері зі швидкостями на $h=0$ км

Коефіцієнт кореляції r вертикальних швидкостей сонячної конвекції на різних висотах в фотосфері Сонця з відповідними швидкостями на висоті на $h=0$ км показано на рис. 2. Як бачимо, цей коефіцієнт суттєво зменшується в верхній фотосфері. Це є наслідком горизонтального зміщення структури вертикальних швидкостей в верхніх шарах фотосфери [4], а також можливої інверсії швидкостей, описаної вище.

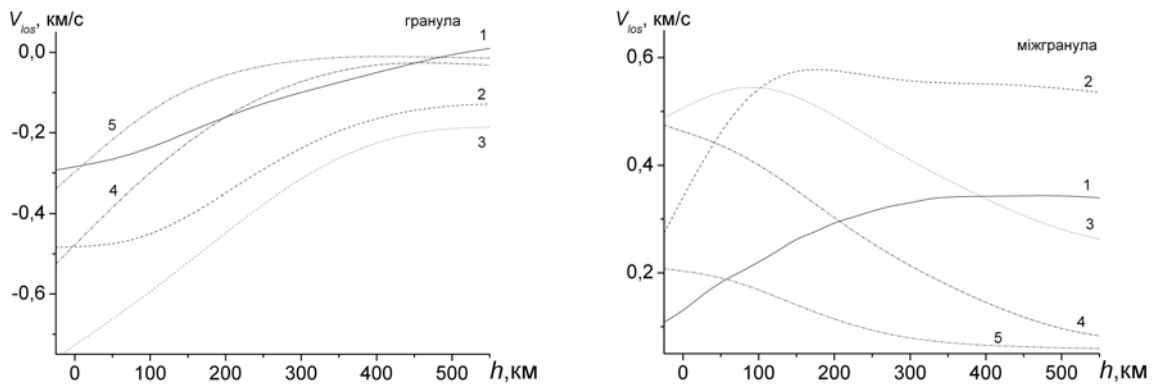


Рис.3. Часові зміни вертикальних швидкостей всередині конвективних потоків під час їх розвитку:
зліва – всередині гранули ($\Delta t_{1,2}=\Delta t_{2,3}=1$ хв20с; $\Delta t_{3,4}=\Delta t_{4,5}=2$ хв00с);
справа – всередині міжгранули ($\Delta t_{1,2}=40$ с; $\Delta t_{2,3}=\Delta t_{3,4}=1$ хв20с; $\Delta t_{4,5}=3$ хв20с)

Еволюція конвективних комірок протягом $\Delta t_{1-5} \approx 7$ хв представлена на рис. 3: зліва зображено стратифікацію вертикальних швидкостей для різних моментів часу у висхідному потоці (гранулі), справа – у низхідному потоці (міжгранулі). Згідно з рис. 3, зліва, висхідний потік в гранулах появляється в нижніх шарах фотосфери (лінія 1). З часом вертикальна швидкість в нижніх шарах зростає і потік поширюється в верхні шари (лінія 2). Через час $\Delta t_{1-3} \approx 3$ хв вертикальні швидкості досягають максимальних значень в нижній фотосфері (лінія 3). Далі йде процес загасання потоку: швидко зменшуються вертикальні швидкості в верхніх шарах фотосфери і повільніше – в нижніх шарах (лінії 4,5). Згідно з рис. 3, справа, висхідний потік в міжгранулах появляється в верхніх шарах фотосфери (лінія 1). З часом вертикальна швидкість зростає по всій висоті, проте максимум швидкостей поширюється у нижні шари (лінія 2). Потім вертикальна швидкість починає зменшуватись в верхніх шарах фотосфери (лінія 3), а далі швидкість падає по всій висоті: швидше – в верхніх шарах, повільніше – в нижніх шарах (лінії 4,5). З часом потік загасає.

Представлені на рис. 3 графіки відображають типові зміни, які відбуваються всередині конвективних потоків протилежних напрямків. Таким чином, отримані нами результати свідчать про те, що висхідні потоки виникають в підфотосферних шарах і поширюються у верхні шари фотосфери, в той час як низхідні потоки здебільшого зароджуються у верхніх шарах атмосфери, а потім область збурення опускається в нижні шари. Отримані дані узгоджуються з числовим моделюванням сонячної конвекції [6;7;11], в яких еволюцію гранул пов'язують з явищами, що мають місце поблизу сонячної поверхні.

Висновки Шляхом обробки даних VTT-спостережень спокійного Сонця в лінії $\lambda \approx 639.3$ нм FeI з високим просторовим і часовим розділенням відтворено просторово-часові варіації вертикальних швидкостей фотосферної конвекції.

Проаналізовано просторові варіації вертикальної швидкості на різних висотах сонячної фотосфери (від -25 км до 550 км): поле конвективних швидкостей на грануляційних масштабах у вигляді вертикальних колонок проникає через всю фотосферу аж до висот температурного мінімуму; кореляція швидкостей на різних висотах зі швидкостями на $h=0$ км суттєво знижується в верхніх шарах фотосфери; на висотах $h>200$ км виявлено інверсію швидкостей на різних стадіях еволюції конвективного потоку; частка потоків (гранул і міжгранул) з інверсією швидкостей складає 12%. Наші результати узгоджуються з роботами [8;9], де було вперше виявлено і детально проаналізовано це явище.

Досліджено часові зміни вертикальних швидкостей всередині конвективних потоків: висхідні потоки виникають в підфотосферних шарах і поширюються у верхні шари фотосфери; низхідні потоки здебільшого зароджуються у верхніх шарах атмосфери, а потім область збурення опускається в нижні шари. Отримані дані по дослідженню еволюції конвективних комірок узгоджуються з числовим моделюванням сонячної конвекції [6;7;11].

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

Список використаних джерел

1. Baran O. A. Structure of convective flows of the real Solar granulation // Advances in Astronomy and Space Physics: conference proceedings. – Printed in "Kyivskiy Universytet", Kyiv, Ukraine, 2011. – P. 53-56.
2. Стодилка М.І. Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір // Журнал фізичних досліджень. – 2002. – Т.6, № 4. – С.435-442.
3. Стодилка М. І., Баран О. А., Малинич С. З. Особенности конвекции в фотосфере Солнца // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2006. – Т.22, № 3. – С.173-182.
4. Стодилка М. І., Баран О. А. Структура фотосферной конвекции Солнца на субгрануляционных масштабах // Кинем. и физ. небес. тел. – 2008. – Т. 24, № 2. – С. 99-109.
5. Espagnet, O.; Muller, R.; Roudier, T.; Mein, P.; Mein, N. Penetration of the solar granulation into the photosphere: height dependence of intensity and velocity fluctuations // Astron. Astrophys., Suppl. Ser. – 1995. – V.109, № 1. – P.79-108.
6. Gadun A. S., Solanki S. K., Johannesson A. Two-dimensional simulation of solar granulation: description of technique and comparison with observations // Astron. and Astrophys. – 1999. – V.350, N2. – P.1018-1034.
7. 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.
8. Kostyk, R. I.; Shchukina, N. G. Fine Structure of Convective Motions in the Solar Photosphere: Observations and Theory // Astronomy Reports. – 2004. – V.48, Issue 9. – P.769-780.
9. Kostik, R.; Khomenko, E.; Shchukina, N. Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 Å line // Astron. Astrophys. – 2009. – V.506, Issue 3. – P.1405-1414.
10. Nordlund, A.; Stein, R. F.; Asplund, M. Solar Surface Convection // Liv. Rev. Solar Phys. – 2009. – V.6, № 2. – 117 pp.
11. 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.
12. Puschmann K., Vazquez M., Bonet J. A., Ruiz Cobo B., Hanslmeier A. 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. Astrophys. – 2003. – V.407, N1. – P.363-378.
13. 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. Astrophys. – 2005. – V.441, № 3. – P.1157-1169.
14. 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. – V.45. – P.635-725.

Надійшла до редколегії 27.06.14

О. Баран, инж., М. Стодилка, д-р физ.-мат. наук
Астрономическая обсерватория ЛНУ имени Ивана Франко, Львов

НАБЛЮДАЕМАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ В СОЛНЕЧНОЙ ФОТОСФЕРЕ (ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ)

Исследована эволюция поля вертикальных скоростей фотосферной конвекции Солнца путем решения неравновесной инверсной задачи переноса излучения по наблюдаемым профилям линии нейтрального железа $\lambda=639,3$ нм. Профили получены с высоким пространственным разрешением в центре солнечного диска в спокойной области. Волновые движения устранены путем k - ω фильтрации. Проанализированы пространственные вариации вертикальной скорости на разных высотах солнечной фотосферы ($h=-25\div 550$ км): коэффициент корреляции скоростей на разных высотах со скоростями на $h=0$ км существенно уменьшается в верхних слоях фотосферы; на высотах $h>200$ км для 12% конвективных ячеек (гранул и межгранул) происходит инверсия скоростей. Обнаружено, что восходящие потоки, как правило, возникают в нижней фотосфере и со временем возмущение распространяется вверх; нисходящие потоки в основном зарождаются в верхних слоях фотосферы и область возмущения опускается вниз.

Ключевые слова: фотосфера, конвекция, вертикальная скорость.

O. Baran, engineer, M. Stodilka, Dr. Phys. and Math. Sciences
Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of L'viv, L'viv

THE OBSERVED EVOLUTION OF CONVECTIVE FLOWS IN THE SOLAR PHOTOSPHERE (VELOCITY FIELD)

We investigate the evolution of the vertical velocity field by solving the inverse problem of nonequilibrium radiative transfer using neutral iron line $\lambda=639.3$ nm profiles. The profiles were taken with high spatial resolution around the centre of the solar disc in the non-perturbed region. The acoustic waves were removed by k - ω filtration. We analyze the spatial variations of vertical velocity at different heights of the solar photosphere ($h=-25\div 550$ km): the correlation coefficient of velocities at different heights with velocities at $h=0$ km is significantly reduced in the upper photosphere; at heights $h>200$ km the velocity inversion is detected for 12% of convective cells (granules and intergranules). We found that upflows usually arise in the lower photosphere and eventually perturbation extends upwards; downflows mostly originate in the upper layers of the photosphere and later the perturbation region goes down.

Key words: photosphere, convection, vertical velocity.