

УДК 523.942

О. А. Баран, М. І. Стоділка

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів, 79005
sun@astro.franko.lviv.ua

Структура фотосферної конвекції Сонця на грануляційних і мезогрануляційних масштабах

Досліджено вертикальну структуру фотосферної конвекції Сонця з використанням профілів лінії нейтрального заліза 639.3 нм, отриманих у центрі сонячного диску у спокійній області. Спостереження проводились на 70-см німецькому баштовому вакуумному телескопі VTT (Канарські острова, Іспанія) з високою просторовою роздільною здатністю. Просторово-часові варіації кінематичних і термодинамічних параметрів відтворені шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання. Хвильові рухи усунені шляхом k -фільтрації. Проаналізовано просторові варіації температури, вертикальної швидкості, густини і тиску у конвективних комірках на грануляційних масштабах ($0.5...5.0$ Мм) і на мезогрануляційних масштабах ($5...12$ Мм) на різних висотах у фотосфері Сонця ($h = 25...500$ км). Поширюючись у верхні шари фотосфери, конвективна структура на цих масштабах зазнає подібних змін: на висотах $h = 200...250$ км відбувається інверсія варіацій температури; інверсія конвективних швидкостей також зустрічається на цих висотах; на висотах $h = 50...100$ км виявлено інверсію відносних варіацій густини, відносні варіації густини і тиску всередині конвективних комірок збільшуються з висотою і набувають додатних значень у висхідних потоках і від'ємних значень у низхідних потоках.

СТРУКТУРА ФОТОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ СОЛНЦА НА ГРАНУЛЯЦИОННЫХ И МЕЗОГРАНУЛЯЦИОННЫХ МАСШТАБАХ, Баран А. А., Стоділка М. І. — Исследована вертикальная структура фотосферной конвекции Солнца с использованием профилей линии нейтрального железа 639.3 нм, полученных вблизи центра солнечного диска в спокойной области. Наблюдения проводились на 70-см немецком башенном вакуумном телескопе VTT (Канарские острова, Испания) с высоким пространственным разрешением. Пространст-

венно-временные вариации кинематических и термодинамических параметров воспроизведены путем решения неравновесной инверсной задачи переноса излучения. Волновые движения устранены путем k -фильтрации. Проанализированы пространственные вариации температуры, вертикальной скорости, плотности и давления в конвективных ячейках на грануляционных масштабах (0.5...5.0 Мм) и на мезогрануляционных масштабах (5...12 Мм) на разных высотах в фотосфере Солнца ($h = 25...500$ км). Распространяясь в верхние слои фотосферы, конвективная структура на этих масштабах претерпевает подобные изменения: на высотах $h = 200...250$ км происходит инверсия вариаций температуры; инверсия конвективных скоростей также встречается на этих высотах; на высотах $h = 50...100$ км обнаружена инверсия относительных вариаций плотности, относительные вариации плотности и давления внутри конвективных ячеек увеличиваются с высотой и становятся положительными в восходящих потоках и отрицательными — в нисходящих потоках.

THE STRUCTURE OF THE SOLAR PHOTOSPHERIC CONVECTION ON GRANULAR AND MESOGRANULAR SCALES, by Baran O. A., Stodilka M. I. — We investigated the vertical structure of the photospheric convection of the Sun using neutral iron line 639.3 nm profiles taken around the centre of the solar disc in a non-perturbed region. The observations were obtained at the 70-cm German Vacuum Tower Telescope (Canary Islands, Spain) with high spatial resolution. The spatio-temporal variations of kinematic and thermodynamic parameters were reproduced by solving nonequilibrium inverse radiation transfer problem. Acoustic waves were removed by k -filtration. We analyzed spatial variations of temperature, vertical velocity, density and gas pressure within convective cells of granular scales (0.5...5.0 Mm) and of mesogranular scales (5...12 Mm) at different heights of the solar photosphere ($h = 25...500$ km). Extending to upper photosphere layers, the convective structure changes similarly at these scales: at the heights $h = 200...250$ km the temperature inversion takes place; the convective velocity inversion may occur at the same heights; at the heights $h = 50...100$ km the inversion of relative variations of density is found, the relative variations of density and pressure increase with heights and they become positive within ascending flows and negative in descending flows.

ВСТУП

На спокійній сонячній поверхні найпомітнішим фотосферним явищем є грануляція. Це система яскравих комірок з горизонтальними масштабами порядку 1 Мм [21], розділених темними проміжками — міжгранулами. Середній час життя гранул визначений у межах від 5 хв [33] до 16 хв [20]. Грануляція — це процес проникнення з конвектив-

ної зони у стабільну стратифіковану фотосферу гарячої речовини з високою ентропією. В фотосферних шарах плавучість комірок поступово спадає, при цьому відбуваються втрати іонізаційної і теплової енергії за рахунок виходу випромінювання і виконання роботи із розширення газу. Речовина стає порівняно холодною і з більшою густиною, потік розвертається і формує міжгрануляційну сітку.

Таким чином, гранули — це явище, яке врівноважує втрати енергії на випромінювання і підтримує збереження маси у конвективних шарах [21, 32].

При дослідженні структури і динаміки сонячної грануляції аналізуються в основному спостережувані флуктуації інтенсивності та конвективних швидкостей. З іншого боку, використовуються результати числового моделювання сонячної конвекції [9, 14, 21, 23, 31, 32]. В останні роки збільшився інтерес до інверсних методів дослідження структури атмосфери Сонця, які, на відміну від класичного підходу, дозволяють безпосередньо зі спостережень отримувати інформацію про фізичні процеси, що впливають на випромінювання. У роботах [1—3, 5—7, 10—12] досліджено грануляцію за профілями ліній з високим просторовим розділенням та з урахуванням ефектів відхилення від локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР).

В роботі Р. І. Костика [16] під час дослідження тонкої структури фраунгоферових ліній вперше було помічено, що речовина центральних частин конвективних комірок на великих висотах може стати холоднішою, ніж у міжгранулах, хоча буде продовжувати рухатися догори. В даному випадку має місце інверсія варіацій температури, пов'язана зі швидким адіабатичним розширенням і радіаційним охолодженням газу висхідного потоку, розігрівом за рахунок стискання низхідного газу, а також чутливістю коефіцієнта поглинання від'ємного іона водню H^- до зміни температури [25]. Подальші експериментальні роботи та роботи з моделювання присвячені дослідженню варіацій температури в окремих гранулах і міжгранулах від максимальних значень на висоті $h = 0$ км до мінімальних значень на певній висоті, після якої температура знову зростає [7, 13, 17, 18, 25].

В роботі [18] показано, що на $h = 250$ км має місце зміна контрасту гранул і міжгранул, а на висоті $h = 490$ км відбувається зміна напрямку руху речовини. Було встановлено, що найбільш типовими і ефективними є чотири типи рухів: у перших двох речовина змінює тільки знак контрасту, в інших двох має місце зміна і знаку контрасту, і напрямку руху. На висоті $h = 0$ км виявлено приблизно 75 % конвективних утворень, які відповідають класичній грануляції: гаряча матерія піднімається, а холодна — опускається, а на $h = 700$ км — таких утворень лише 20 %.

В роботі [25] представлено стратифікацію температури, вертикальних швидкостей, тиску і густини всередині грануляційної комірки як функцію висоти: знайдено інверсію температури на висотах $h = 170$ км; інверсія густини має місце на висотах $h = 30$ км; показано,

що вертикальні швидкості зменшуються з висотою, проте інверсії швидкостей не виявлено. Подібні результати отримано в роботі [7]: температурні варіації змінюють знак на висотах $h = 100 \pm 50$ км, причому для більших гранул інверсія відбувається вище, вертикальні швидкості зменшуються з висотою і досягають нуля в шарах не нижче температурного мінімуму.

В роботі [17] виявлено і досліджено грануляцію в ширшому діапазоні висот — аж до нижньої хромосфери: показано, що з висотою змінюють знак варіації інтенсивності та швидкості, проте понад 40 % колончатої структури грануляції все ж проникає до висот $h = 650$ км, причому 80 % структур розміром більше 1500 км в континуумі досягають цих висот. Висота інверсії сильно залежить від контрасту інтенсивності та значення швидкості конкретної комірки в континуумі: що більші ці параметри, то вище має місце інверсія; в середньому це відбувається на висоті $h = 200 \dots 300$ км.

При спостереженнях випромінювання Сонця в роботі [22] було виявлено конвективні комірки на масштабах $5 \dots 10$ Мм з часом життя приблизно 2 год — мезогранули. На сьогоднішній день питання про представлення мезогрануляції окремими масштабами конвекції залишається досить сумнівним. Достатня кількість досліджень цього явища ґрунтуються на аналізі специфічних властивостей окремих гранул розширяться до більших (мезогрануляційних) масштабів (так звані активні, вибухаючі гранули) [15, 24, 26]. З роботи [28] стало відомо, що структурні утворення, більші за грануляційні, можуть виникати внаслідок просторового і часового усереднення даних, а отже, мезогрануляція не є справжнім елементом конвекції. Наступні роботи [19, 27, 30] підтвердили ці припущення. Отже, такі суперечливі результати з виявлення мезогрануляції як окремого виду конвекції вимагають подальших досліджень просторово-часових варіацій температури, швидкості, густини, тиску, магнітного поля на цих масштабах [2].

Мета нашої роботи — за даними спостережень Сонця в лінії нейтрального заліза відтворити просторово-часові варіації температури, вертикальної швидкості, густини і тиску сонячної конвекції, дослідити особливості їхнього розподілу в конвективних комірках на різних висотах; порівняти конвективну структуру сонячної фотосфери на грануляційних і мезогрануляційних масштабах, встановити природу мезогрануляції.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ

Наші дослідження проведено на основі результатів спостережень в лінії нейтрального заліза 639.3 нм, отриманих Н. Г. Щукіною на 70-см вакуумному баштовому телескопі VTT (Канарські острови, Іспанія) поблизу центра сонячного диска у спокійній області з просторовим розділенням близько 0.5 [4]. Час спостереження — 2.6 год. Про-

тяжність області спостереження вздовж поверхні Сонця — 64 Мм, досліджувані глибини лежать у межах від 25 до 550 км (в рамках моделі спокійної атмосфери Сонця VAL-80 [34]).

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Застосувавши інверсну процедуру для спостережуваних профілів [8], ми відтворили просторово-часові варіації температури T , густини ρ і тиску p та вертикальні швидкості V вздовж двох просторових координат (h — по висоті, X — вздовж поверхні Сонця).

Конвективну складову варіацій у спостережуваній області виділено за допомогою k -фільтрації. Методом фільтрації просторових і часових частот ми виділили просторові варіації на грануляційних і мезогрануляційних масштабах: грануляцію — у межах просторових масштабів $\lambda = 0.5 \dots 5.0$ Мм з часом життя конвективних комірок $t = 3 \dots 20$ хв; мезогрануляцію — $\lambda = 5 \dots 12$ Мм, $t > 20$ хв (час життя мезогрануляційних комірок обмежений тривалістю спостережень 2.6 год). Просторові та часові масштаби підібрані згідно з даними [1—3, 22].

Для дослідження будемо використовувати варіації температури T , вертикальні швидкості V , відносні варіації густини $\rho/\bar{\rho}$ і відносні варіації тиску p/\bar{p} ; тут $\bar{\rho}$, \bar{p} — середні значення густини та тиску на відповідних висотах отриманої моделі. Відносні варіації дозволяють краще бачити динаміку комірок у верхніх шарах сонячної фотосфери.

За час спостереження в досліджуваній області ми виділили і проаналізували понад 1500 конвективних комірок на грануляційних масштабах (гранул і міжгранул), а також біля 40 конвективних потоків на мезогрануляційних масштабах (висхідних і низхідних потоків). З метою кращої візуалізації ми вибрали 30 конвективних комірок грануляційних масштабів (15 гранул і 15 міжгранул) і 12 конвективних комірок мезогрануляційних масштабів (6 висхідних і 6 низхідних потоків).

Таким чином, на рис. 1 показано варіації температури T , вертикальні швидкості V , відносні варіації густини $\rho/\bar{\rho}$ та тиску p/\bar{p} всередині грануляційних комірок в момент їхнього максимального розвитку (декілька ліній на кожному графіку відповідають варіаціям, що мають місце у межах однієї комірки): варіації у лівій колонці відповідають 15 гранулам, у правій — 15 міжгранулам.

Аналогічно на рис. 2 представлено просторові варіації всередині 6 висхідних і 6 низхідних конвективних комірок більших розмірів — на мезогрануляційних масштабах.

На рис. 3 показано коефіцієнти кореляції варіацій температури, вертикальних швидкостей, варіацій густини і варіацій тиску в нижній фотосфері (на висоті $h = 0$ км) з відповідними варіаціями у вищих шарах сонячної фотосфери на грануляційних і мезогрануляційних масштабах.

Температурна структура. У нижній фотосфері (на $h = 0$ км) гранулам характерні додатні варіації температури та конвективні потоки

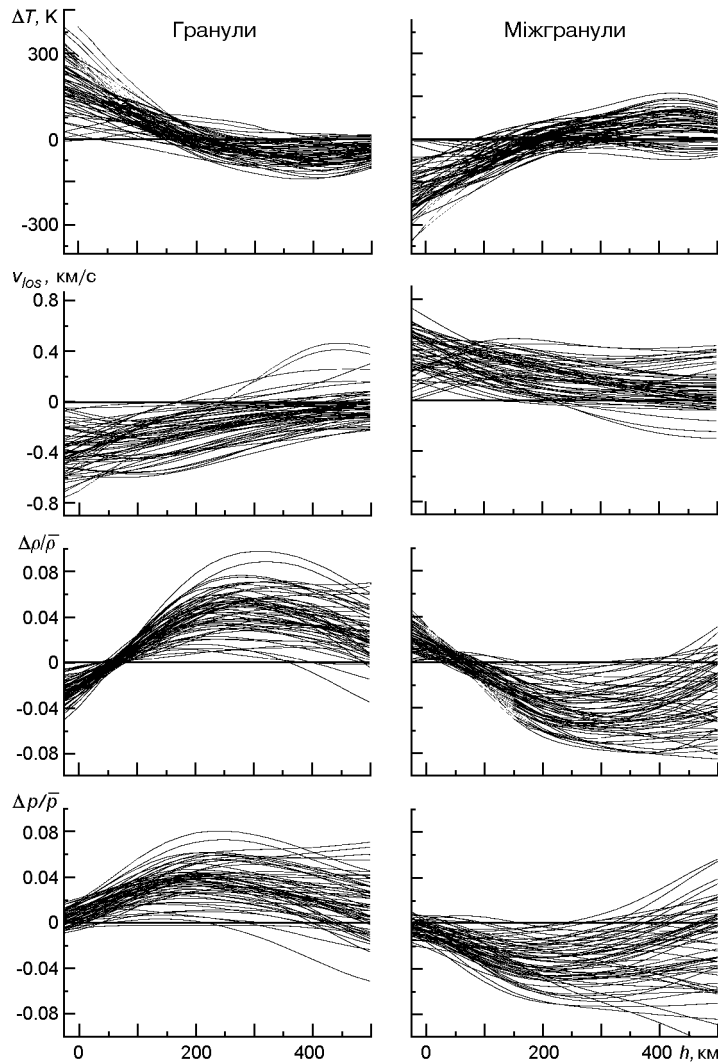


Рис. 1. Висотні зміни варіацій температури T , вертикальної швидкості V , густини ρ і тиску p/\bar{p} фотосферної конвекції на грануляційних масштабах: зліва представлено 15 гранул, справа — 15 міжгранул (на одну конвективну комірку припадає по декілька ліній)

з висхідним рухом речовини (від'ємні вертикальні швидкості). Міжгранулам відповідають холодніші конвективні потоки (від'ємні варіації температури T) та низхідні рухи речовини (додатні вертикальні швидкості). Варіації температури і вертикальних швидкостей такого самого знаку спостерігаються всередині висхідних і низхідних конвективних потоків мезогрануляційних масштабів (див. рис. 2). У нижній фотосфері варіації температури максимальні і сягають значень $|T| \approx 350$ К на грануляційних масштабах (рис. 1) і $|T| \approx 65$ К на мезогрануляційних масштабах (рис. 2). З висотою температурні варіації T всередині конвективних комірок на грануляційних і мезогрануляційних масштабах поведуться подібно — вони зменшуються і змінюють знак на протилежний: у верхніх шарах фотосфери у висхідних по-

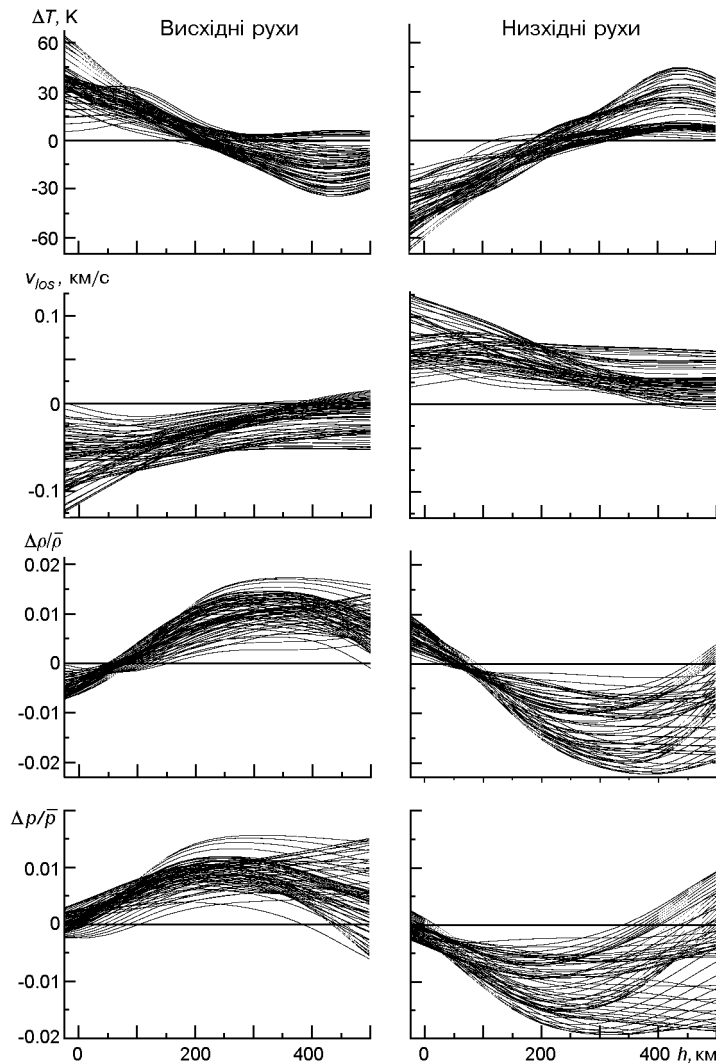


Рис. 2. Висотні зміни варіацій температури T , вертикальної швидкості V , густини ρ і тиску p/\bar{p} фотосферної конвекції на мезогрануляційних масштабах: зліва представлено 6 конвективних комірок з висхідним рухом речовини, справа — 6 комірок з низхідним рухом речовини (одній комірниці відповідає декілька ліній)

токах стає холодніше, а в низхідних потоках стає гарячіше. На висоті $h = 400$ км температурні варіації знову збільшуються до значень $|T| = 150$ К у грануляційних масштабах (рис. 1) і $|T| = 40$ К на мезогрануляційних масштабах (рис. 2).

Зазначимо, що температурна інверсія майже завжди проявляється у процесі еволюції конвективної комірки. Вона відбувається як у гранулах, так і у міжгранулах. Область висот інверсії досить протяжна, оскільки для кожної окремої комірки висота інверсії залежить від контрасту інтенсивності в континуумі [17] та розмірів самої комірки [7].

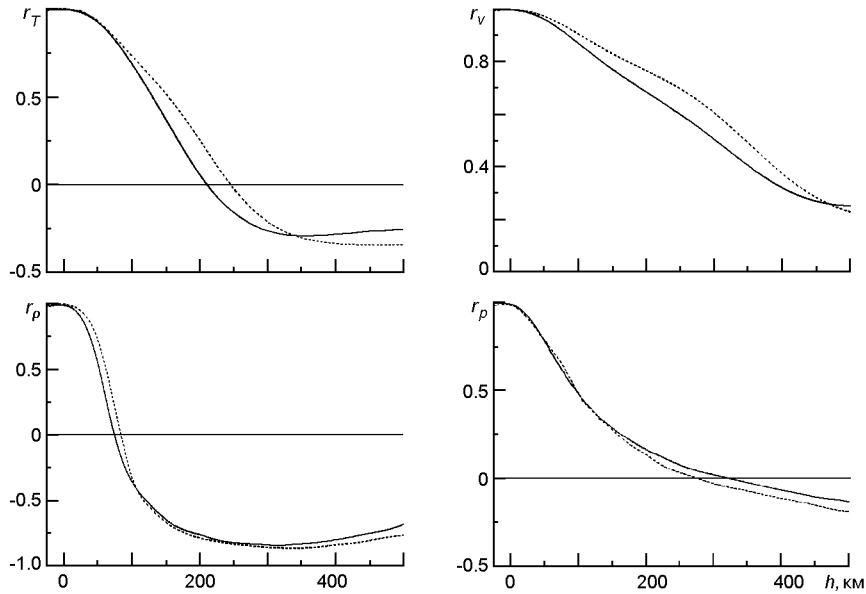


Рис. 3. Коефіцієнти кореляції варіацій температури r_T , вертикальних швидкостей r_v , густини r_ρ і тиску r_p грануляції (суцільна лінія) і мезогрануляції (штрихова лінія) на різних висотах з відповідними варіаціями на висоті $h = 0$ км

Коефіцієнт кореляції r_T температурних варіацій грануляції на різних висотах в досліджуваній області з відповідними варіаціями на висоті $h = 0$ км представлено на рис. 3 суцільною лінією. Як бачимо, зі збільшенням висоти коефіцієнт кореляції зменшується падає від $r_T = 1$ до $r_T = 0$ на висоті $h = 210$ км. Коефіцієнт кореляції r_T температурних варіацій мезогрануляції, зображений на рис. 3 штриховою лінією, змінює знак на висотах $h = 245$ км. У верхніх шарах фотосфери коефіцієнти в обох випадках набувають мінімальних від'ємних значень.

Значення висот, де температурні варіації змінюють знак, за даними різних досліджень становлять: $h = 250$ км [18], 100–50 км [7], 170 км [25], 200...300 км [18]. Отримані нами значення висот, на яких кореляція температурних варіацій на грануляційних і мезогрануляційних масштабах змінює знак, лежать у цих межах.

Поле вертикальних швидкостей. Вертикальні швидкості на грануляційних масштабах (рис. 1) сягають значень $|V| = 0.70$ км/с у нижній фотосфері. Як бачимо з рис. 1, потоки грануляції проникають до висот $h = 500$ км і вище. У верхніх шарах фотосфери можлива зміна напрямку руху речовини в грануляційній комірці: так, серед комірок, представлених на рис. 1, інверсія вертикальних швидкостей відбувається для двох гранул на висотах $h > 150$ км і $h > 250$ км і для однієї міжгранули на висотах $h > 200$ км. Ми проаналізували понад 1500 конвективних комірок (гранул і міжгранул), що розвиваються в досліджуваній області за час спостережень, і знайшли, що частка конвективних потоків з інверсією швидкості (виявленою за час життя комірки) складає 12%. Зазначимо також, що інверсія зустрічається май-

же однаково як у гранулах, так і у міжгранулах. Зміна знаку швидкостей у верхніх шарах фотосфери проявляється на різних стадіях еволюції конвективного потоку.

Вертикальні швидкості на мезогрануляційних масштабах (рис. 2) сягають значень $|V| \approx 0.15$ км/с в нижній фотосфері. Поле швидкостей мезогрануляції також простягається до висот температурного мінімуму. У верхніх шарах фотосфери зустрічається інверсія швидкостей на мезогрануляційних масштабах: на рис. 2 (зліва) один мезогрануляційний потік змінює напрямку руху на висотах $h > 350$ км. За час спостереження в досліджуваній області нам вдалось виділити біля 40 конвективних потоків на мезогрануляційних масштабах (висхідних і низхідних). Приблизно у 23 % з них у певні моменти розвитку змінювався напрямку руху речовини у верхніх шарах фотосфери.

Коефіцієнт кореляції r_v вертикальних швидкостей грануляції на різних висотах з відповідними швидкостями на висоті $h = 0$ км показано на рис. 3 суцільною лінією. Аналогічний коефіцієнт кореляції r_v вертикальних швидкостей на мезогрануляційних масштабах представлено на рис. 3 штриховою лінією. Як бачимо, ці коефіцієнти з максимальних значень в нижній фотосфері суттєво зменшуються у верхній фотосфері. Це є наслідком горизонтального зміщення структури вертикальних швидкостей у верхніх шарах фотосфери [6], а також інверсії швидкостей.

Наші результати узгоджуються з роботами [17, 18], де вперше виявлено інверсію швидкостей. Згідно з даними [17] зміна напрямку руху речовини в грануляційному потоці відбувається на висотах $h = 200...300$ км. Виявлені нами випадки інверсії швидкостей зустрічаються приблизно на тих же висотах.

Просторові варіації густини. На висоті $h = 0$ км відносні варіації густини в гранулах (рис. 1, зліва) від'ємні, а у міжгранулах (рис. 1, справа) — додатні зі значеннями в межах $|\delta\rho/\rho| \approx 0.04$. На висотах $h = 50...100$ км відбувається інверсія, а вище цього рівня варіації густини в гранулах стають додатними, а у міжгранулах — від'ємними. У вищих шарах фотосфери відносні варіації густини набувають значень $|\delta\rho/\rho| \approx 0.08$, причому максимум цих варіацій досягається на висотах $h = 200...400$ км, а ще вище — відносні варіації густини у більшості випадків зменшуються, рідше вони слабо змінюються з висотою. Аналогічні зміни відбуваються з відносними варіаціями густини на мезогрануляційних масштабах (рис. 2): зі значень $|\delta\rho/\rho| < 0.010$ на висоті $h = 0$ км вони зменшуються до нуля, на висотах $h = 50...150$ км змінюють знак на протилежний, а у вищих шарах фотосфери набувають значень $|\delta\rho/\rho| \approx 0.025$.

Ми обчислили коефіцієнт кореляції r варіацій густини на різних висотах з відповідними варіаціями на висоті $h = 0$ км для грануляційних масштабів (рис. 3, суцільна лінія) і для мезогрануляційних масштабів (рис. 3, штрихова лінія). Як бачимо, для грануляції із збіль-

шенням висоти коефіцієнт кореляції зменшується від $r = 1$ до $r = 0$ на висоті $h = 75$ км. Коефіцієнт кореляції r варіацій густини мезогрануляції змінює знак на висоті $h = 85$ км. У верхніх шарах фотосфери коефіцієнти в обох випадках набувають максимальних від'ємних значень $r = 0.8 \dots 0.9$ на висоті $h = 250 \dots 400$ км.

Раніше в роботі [25] було виявлено, що варіації густини змінюють знак на висоті 30 км. В нашому випадку інверсія відбувається трохи вище — на висотах $h = 75 \dots 85$ км.

Просторові варіації тиску. Відтворені зі спостережень відносні варіації тиску p/\bar{p} на грануляційних (рис. 1) і мезогрануляційних (рис. 2) масштабах мінімальні в нижній фотосфері, і на висоті $h = 0$ км становлять $|p/\bar{p}| = 0.020$ і $|p/\bar{p}| = 0.003$ відповідно. У висхідних конвективних потоках переважають додатні варіації, а в низхідних — від'ємні. З висотою вони збільшуються і набувають максимальних значень на висотах $h = 200$ км: на грануляційних масштабах $|p/\bar{p}|$

0.08 , на мезомасштабах $|p/\bar{p}| = 0.02$. Вище відносні варіації тиску на всіх масштабах у більшості випадків зменшуються, рідше вони слабо змінюються з висотою. Зазначимо, що за даними [25] відносні варіації тиску фотосферної конвекції поведуться так само: вони додатні у гранулі та від'ємні у міжгранулі.

Ми також обчислили коефіцієнт кореляції r_p варіацій тиску на різних висотах з відповідними варіаціями на висоті $h = 0$ км для грануляційних масштабів (рис. 3, суцільна лінія) і для мезогрануляційних масштабів (рис. 3, штрихова лінія). Обидва коефіцієнти зменшуються до $r_p = 0$ на висотах $h = 320$ км у випадку грануляції та на висотах $h = 280$ км для мезогрануляції.

Отриманий в нашій роботі аналіз стратифікації термодинамічних параметрів і вертикальних швидкостей фотосферної конвекції Сонця узгоджується з числовим моделюванням сонячної грануляції [21, 32]. Зазначимо, що просторові варіації температури, вертикальних швидкостей, густини і тиску на грануляційних і мезогрануляційних масштабах та відповідні коефіцієнти кореляції поведуться однаково: в обох випадках виявлено інверсію варіацій температури і вертикальних швидкостей, збільшення значень відносних варіацій густини і тиску у верхніх шарах фотосфери.

Проведений аналіз варіацій температури, вертикальних швидкостей, варіацій густини та тиску вказує на те, що мезоструктури є частиною протяжного розподілу грануляційних масштабів. Наші висновки узгоджуються з даними [1, 3, 12, 29, 30].

ВИСНОВКИ

В роботі використано дані VTT-спостережень в лінії Fe 639.3 нм з високим просторовим і часовим розділенням. Шляхом розв'язку не-

рівноважної інверсної задачі переносу випромінювання відтворено просторово-часові варіації температури, густини і тиску та вертикальні швидкості фотосферної конвекції Сонця. Досліджено висотні зміни цих варіацій на грануляційних (0.5...5.0 Мм) та мезогрануляційних (5...12 Мм) масштабах. Отримано коефіцієнти кореляції варіацій температури, вертикальних швидкостей, густини і тиску в нижній фотосфері (на висоті $h = 0$ км) з відповідними варіаціями в верхніх шарах сонячної фотосфери. Ми показали, що на грануляційних масштабах:

- у процесі еволюції конвективної комірки на висоті $h = 210$ км майже завжди відбувається температурна інверсія (у гранулах і у міжгранулах);

- вертикальні швидкості спостерігаються до висот $h = 500$ км і вище, на висотах $h = 200$ км в процесі розвитку потоку може змінюватись напрямок руху (частка конвективних комірок з інверсією швидкості складає 12 %);

- в нижній фотосфері (на $h = 0$ км) відносні варіації густини від'ємні у гранулах і додатні у міжгранулах; ці варіації зазнають інверсії на висоті $h = 75$ км, а вище цього рівня збільшуються до максимальних додатних значень у гранулах і від'ємних — у міжгранулах;

- відносні варіації тиску зазвичай додатні в гранулах і від'ємні у міжгранулах; ці варіації збільшуються з висотою.

На мезогрануляційних масштабах просторові варіації температури, вертикальних швидкостей, густини та тиску зі зміною висоти поводяться подібно:

- температурна інверсія на цих масштабах відбувається на висотах $h = 245$ км;

- вертикальні швидкості проникають до висот температурного мінімуму, у верхніх шарах фотосфери знайдено випадки зміни напрямку руху мезогрануляційного потоку у процесі його розвитку (23 %);

- в нижній фотосфері відносні варіації густини від'ємні у висхідних потоках мезогрануляції і додатні — у низхідних потоках; вони зазнають інверсії на висоті $h = 85$ км, а вище цього рівня — збільшуються з протилежним знаком;

- відносні варіації тиску збільшуються з висотою та набувають здебільшого додатних значень у висхідних мезогрануляційних потоках і від'ємних — у низхідних потоках.

Отримана стратифікація термодинамічних параметрів і вертикальних швидкостей фотосферної конвекції Сонця узгоджується з результатами числового моделювання сонячної грануляції [21, 32]. На основі аналізу просторових варіацій температури, вертикальних швидкостей, густини і тиску показано, що конвективна структура сонячної фотосфери на мезогрануляційних масштабах з висотою поводиться подібно до грануляції, а тому мезоструктури є частиною протяжного розподілу грануляційних масштабів.

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

1. Баран А. А., Стоділка М. І. Пространственные вариации конвективных движений в реальной фотосфере Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2013.—**109**, № 3.—С. 31—39.
2. Баран О. А. Мезогрануляція в сонячній атмосфері // Журн. фіз. досліджень.—2012.—**16**, № 3.—С. 3902 (7 с.).
3. Баран О. А., Стоділка М. І. Особливості фотосферної конвекції Сонця на грануляційних, мезогрануляційних і супергрануляційних масштабах // Кинематика и физика небес. тел.—2014.—**30**, № 4.—С. 23—37.
4. Костык Р. И., Щукина Н. Г. Тонкая структура конвективных движений в фотосфере Солнца: наблюдения и теория // Астрон. журн.—2004.—**81**, № 9.—С. 846—859.
5. Стоділка М. І. Температурная структура реальной солнечной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 3.—С. 407—416.
6. Стоділка М. І., Баран О. А. Структура фотосферной конвекции Солнца на субгрануляционных масштабах // Кинематика и физика небес. тел.—2008.—**24**, № 2.—С. 99—109.
7. 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.
8. Стоділка М. І. Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір // Журн. фіз. досліджень.—2002.—**6**, № 4.—С. 435—442.
9. Asplund M., Ludvig H.-G., Nordlund A., Stein R. F. The effects of numerical resolution on hydrodynamical surface convection simulations and spectral line formation // Astron. and Astrophys.—2000.—**359**, N 2.—P. 669—681.
10. Baran O. A. Structure of convective flows of the real Solar granulation // Adv. Astron. and Space Phys.: conf. proc.—2011.—**1**.—P. 53—56.
11. Baran O. A. Structure of convective flows on supergranular scales in the solar photosphere // Adv. Astron. and Space Phys.: conf. proc.—2012.—**2**.—P. 153—156.
12. Baran O. A. Power spectra of convective motions in the solar photosphere // Adv. Astron. and Space Phys.: conf. proc.—2013.—**3**.—P. 89—93.
13. 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.
14. Gadun A. S., Hanslmeier A., Pikalov K. N., et al. Size-dependent properties of simulated 2-D solar granulation // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—2000.—**146**.—P. 267—291.
15. Hinzberger J., Bonet J. A., Vazquez M., Hanslmeier A. Time series of solar granulation images. III. Dynamics of exploding granules and related phenomena // Astrophys. J.—1999.—**527**.—P. 405—414.
16. Kostik R. I. Fine structure of Fraunhofer lines and the structure of the solar atmosphere // Soviet Astron. (tr: A. Zhurn.) — 1985.—**29**.—P. 65—71.
17. 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.
18. Kostyk R. I., Shchukina N. G. Fine structure of convective motions in the solar photosphere: Observations and theory // Astron. Repts.—2004.—**48**, N 9.—P. 769—780.

19. *Matloch L., Cameron R., Schmitt D., Schussler M.* Modelling of solar mesogranulation // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**504**.—P. 1041—1055.
20. *Mehlretter 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.
21. *Nordlund A., Stein R. F., Asplund M.* Solar surface convection // *Liv. Rev. Solar Phys.*—2009.—**6**, N 2.—117 p.
22. *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.
23. *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.
24. *Potzi W., Brandt P. N., Hanslmeier A.* Variation of granular evolution at meso-scales // *Hvar Observ. Bull.*—2003.—**27**, N 1.—P. 39—46.
25. *Puschmann K., Ruiz Cobo B., Vazquez M., et al.* 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.
26. *Rast M. P.* On the nature of “exploding” granules and granule fragmentation // *Astrophys. J.*—1995.—**443**.—P. 863—868.
27. *Rast M. P.* The scales of granulation, mesogranulation, and supergranulation // *Astrophys. J.*—2003.—**597**, N 2.—P. 1200—1210.
28. *Rieutord M., Roudier T., Malherbe J. M., Rincon F.* On mesogranulation, network formation and supergranulation // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**357**.—P. 1063—1072.
29. *Roudier Th., Lignières F., Rieutord M., et al.* Families of fragmenting granules and their relation to meso- and supergranular flow fields // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**409**.—P. 299—308.
30. *Roudier Th., Muller R.* Relation between families of granules, mesogranules and photospheric network // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**419**.—P. 757—762.
31. *Stein R. F.* Solar surface magneto-convection // *Liv. Rev. Solar Phys.*—2012.—**9**, N 4.—P. 1—51.
32. *Stein R. F., Nordlund A.* Topology of convection beneath the solar surface // *Astrophys. J.*—1989.—**342**.—P. L95—L98.
33. *Title A. M., Tarbell T. D., Topka K. P., et al.* Statistical properties of solar granulation derived from the SOUP instrument on Spacelab 2 // *Astrophys. J.*—1989.—**336**, N 8.—P. 475—494.
34. *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.

Стаття надійшла до редакції 11.07.14