

УДК 523.942

М. И. Стодилка, О. А. Баран

Астрономическая обсерватория
Львовского национального университета имени Ивана Франко
79005 Львов, ул. Кирилла и Мефодия 8
E-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

Структура фотосферной конвекции Солнца на субгрануляционных масштабах

По результатам воспроизведения солнечной грануляции (путем решения инверсной задачи неравновесного переноса излучения по профилям линии нейтрального железа $\lambda \approx 523.42$ нм) исследована структура конвективных потоков в солнечной фотосфере на субгрануляционных масштабах. Волновые движения устранены с помощью k - ω -фильтрации. Для больших гранул ($1.5''$ и больше) в нижней фотосфере и в начале средней фотосферы имеет место асимметричное распределение лучевой скорости внутри конвективных потоков; в высших слоях фотосферы асимметрия ослабевает; для малых потоков распределение более симметрично по всей высоте. Асимметрия в температурном распределении менее выражена. Обнаружена тонкая структура больших конвективных потоков: поток фрагментирован на несколько меньших потоков. Тонкая структура больших потоков с одной стороны и пространственное замыкание с другой вызывают наблюдаемую асимметрию распределения конвективных скоростей внутри потоков.

СТРУКТУРА ФОТОСФЕРНОЇ КОНВЕКЦІЇ СОНЦЯ НА СУБГРАНУЛЯЦІЙНИХ МАСШТАБАХ, Стодилка М. І., Баран О. А. — За результатами відтворення сонячної грануляції (шляхом розв'язування інверсної задачі нерівноважного переносу випромінювання за профілями ліній нейтрального заліза $\lambda \approx 523.42$ нм) досліджено структуру конвективних потоків у сонячній фотосфері на субгрануляційних масштабах. Хвильові рухи усунені шляхом k - ω -фільтрації. Для великих гранул (понад $1.5''$) у нижній фотосфері і на початку середньої фотосфери має місце асиметричний розподіл променевої швидкості всередині конвективних потоків, у вищих шарах фотосфери асиметрія конвективного потоку у великих комірках послаблюється; для малих потоків розподіл більш симетричний по всій висоті. Асиметрія в температурному розподілі менше виражена. Виявлено тонку структуру великих конвективних потоків: потік фрагментований на декілька менших потоків. Тонка структура більших потоків з одного боку і просторове замивання з іншого зумовлюють

спостережувану асиметрію розподілу конвективних швидкостей всередині потоків.

STRUCTURE OF THE SOLAR PHOTOSPHERE CONVECTION ON SUB-GRANULATION SCALES, by Stodilka M. I., Baran O. A. — We investigated the structure of convective flows in the solar photosphere on subgranulation scales by solving the nonequilibrium inverse radiative transfer problem with the use of profiles of the neutral iron line $\lambda \approx 523.4$ nm. Acoustic and gravity waves were removed by k - ω filtration. An asymmetrical character of the distribution of the line of sight velocity takes place inside large convective flows (sizes are about $1.5''$ and more) in the low photosphere and bottom of the middle photosphere. In the higher layers of the photosphere the asymmetry of large convective flows is weaker. For small structures (sizes less than $1.5''$) the distribution is more symmetrical along all the heights. The asymmetry for the temperature distribution is less expressed. We revealed thin structure of convective flows: large flows consist of two (or more?) smaller ones. The observed asymmetry of the velocity distribution in convective structures is due to thin structure of convective flows, on the one hand, and the spatial smearing, on the other hand.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечную фотосферу можно рассматривать как своеобразную переходную область между термодинамической конвекцией, доминирующей в ее нижних слоях, и осцилляциями, которые определяют динамику вещества в верхних слоях. Восходящие конвективные потоки газа, сгенерированные в нижних слоях и видимые как яркие гранулы, проникают по инерции в стабильную фотосферу и приводят к возникновению в ее верхних слоях взаимодействующих между собой гидродинамических и температурных возмущений.

Физику таких сложных возмущений и их взаимодействие изучают в основном спектральными методами, анализируя пространственно-временные вариации скорости и температуры в данной области. Исследование природы разных структурных образований фотосферы Солнца и их физической взаимосвязи дает возможность понять процессы, которые происходят как в атмосфере, так и в более глубоких слоях Солнца.

Основные достижения в области исследования структуры солнечной фотосферы были сделаны в работах [6, 9, 19], а также в серии работ по динамике грануляции [11, 12, 14–16]. В них фотосфера делится на два отдельных слоя с границей на определенной высоте, где разница между интенсивностями гранул и межгранул минимальная. В работе [13] исследована временная эволюция динамики грануляции и переноса энергии в фотосфере Солнца. Однако полученные вариации конвективной и турбулентной скорости и интенсивности выявляют почти синхронные изменения во времени, что может быть связано как с не вполне точным подходом к решению проблемы, так и взаимозависимостью исследуемых параметров. Мощность пространственно-временных вариаций конвективной скорости на больших масштабах не претерпевает существенных изменений: это скорее связано с влиянием волнового компонента. В то же время высотная зависимость для мелкомасштабного компонента резко обрывается на высоте 200 км. Наши исследования также подтверждают наличие такого компонента, который связан с распадом слабых восходящих потоков [2].

Теоретические работы [5, 7, 20, 22] посвящены моделированию солнечной конвекции, в частности на масштабах грануляции.

Открытым остается вопрос о природе асимметричного распределения скорости внутри конвективных потоков. Двухмерные осесимметричные модели [20] дают симметричный характер распределения конвективной скорости внутри ячейки. С другой стороны, грануляционная структура рассматривается как исключительно поверхностное образование, основанное на радиационном охлаждении в фотосфере [21, 22]. Полученные в работах [15, 16] резкие доплеровские сдвиги на краю ячейки тоже свидетельствуют об асимметрии конвективного потока внутри гранулы, максимум скорости лежит на краю гранулы; часто встречаются яркие области, отображающие нисходящие потоки. С этими результатами хорошо согласуются модели Рафта [18], в которых самые быстрые и яркие части ячейки являются образованиями со смещенного вещества при быстром развитии нисходящих потоков. Позже в работах [8] и [17] исследовано распределение интенсивности и скорости внутри гранулы в зависимости от ее размеров и отмечено асимметричное распределение конвективной скорости внутри больших ячеек.

Таким образом, возникает необходимость еще раз пересмотреть структуру фотосферной конвекции на субгрануляционных масштабах, особенности распределения температуры и скорости внутри конвективных ячеек, выяснить причину наблюдаемой асимметрии распределения, исследовать структуру как самой грануляции, так и ее структурных элементов, оценить влияние пространственного замыкания на результаты воспроизведения структуры конвективных потоков.

Исследование грануляции выполнено в рамках полученных нами моделей реальной (немоделированной) солнечной грануляции с использованием профилей с высоким пространственным разрешением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Наши исследования основываются на результатах наблюдений в линии нейтрального железа ($\lambda \approx 523.4185$ нм), проведенных Н. Г. Щукиной на 70-см вакуумном башенном телескопе VTT на Канарских островах (пространственное разрешение $0.5''$). С помощью инверсной процедуры мы воссоздали для атмосферы Солнца распределение флуктуаций температуры и поля скоростей (V_{micro} , V_{los}) вдоль двух пространственных координат: вертикальной h и горизонтальной X , а также изменения во времени. Протяженность вдоль поверхности Солнца 64 000 км — результаты получены по одномерным измерениям двухмерных массивов.

Так как в верхних слоях атмосферы Солнца существенны эффекты отклонения от ЛТР, мы решали неравновесную инверсную задачу переноса излучения следующим образом: в рамках каждой промежуточной модели, которая итерационно уточняется, вычисляем не ЛТР-параметры, которые затем используются в инверсной процедуре. Для улучшения достоверности воспроизведенных величин в инверсный код были введены стабилизаторы Тихонова [4].

Структура фотосферы Солнца определяется как волновыми, так и конвективными движениями; поэтому возникает задача корректного их разделения. В нашей работе разделение осцилляций проведено с помощью преобразования Фурье. Такое преобразование пространственно-временных

вариаций позволяет с помощью линии $\omega = v_s k_x$ или гиперконуса $\omega^2 = v_s^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$ Лемба (v_s — скорость звука) удалить волновую составляющую. Действительно, области фурье-образа $\omega \geq v_s k_x$ отвечают звуковые колебания, а области $\omega < v_s k_x$ — внутренние гравитационные волны и конвективные движения. Конвективные движения можно выделить аналогично: $\omega < v_{conv} k_z$, где v_{conv} — полученная нами при воспроизведении максимальная скорость конвективных движений. Применив к соответственно выделенной части фурье-образа обратное преобразование Фурье, легко получить пространственно-временные вариации исследуемых величин, вызванных гравитационными волнами и конвективными движениями или чисто конвективными движениями.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные модели фотосферной конвекции представлены распределением температуры, конвективной скорости и других параметров моделей по пространству и времени. Диапазон глубин, для которого была воспроизведена стратификация температуры и конвективных скоростей, достаточно широк ($h = -50 \dots 550$ км) и сверху прилегает вплотную к температурному минимуму; при $h > 550$ км чувствительность выбранной линии к температуре среды уменьшается, но используемый нами стабилизатор Тихонова обеспечивает плавный переход к температуре согласно модели спокойного Солнца (например VAL80). Чувствительность линии к вариациям скорости падает уже при $h > 500$ км. Диапазон высот воспроизведения параметров определяется чувствительностью функции отклика.

Структура конвективных движений. Пространственное распределение возмущений температуры показано на рис. 1, а; светлым тоном соответствуют положительные, а темным — отрицательные изменения температуры. Диапазон изменения ΔT ограничен значениями ± 100 К, что лучше воспроизводит контраст в верхних слоях атмосферы; для $|\Delta T| > 100$ К происходит насыщение контраста, т. е. областям, где флуктуации температуры больше 100 К, соответствует темный цвет. То же самое относится к пространственному распределению скорости: светлым тоном соответствуют восходящие потоки (скорости отрицательные). Для больших конвективных потоков имеет место инверсия температуры: восходящий (более горячий в нижних слоях) поток газа становится в верхних слоях более холодным по сравнению с нисходящим, аналогично ведут себя межгранулы (инверсия температуры обнаружена нами по результатам наблюдений [1]).

Воспроизведенная стратификация конвективной скорости в фотосфере Солнца изображена на рис. 1, б. Структура конвективных потоков в представлении полем конвективных скоростей состоит из вертикальных колонок и сохраняется вплоть до температурного минимума. За счет возникновения горизонтальных потоков скорость конвективных движений, несмотря на уменьшение плотности газа, уменьшается с высотой; это касается как восходящих, так и нисходящих течений газа. В области проникающей конвекции ($h > 100$ км) гранулы движутся вверх по инерции, это также приводит к уменьшению скорости конвективных движений. Совместное распределение температуры и поля скоростей на разных высотах выявляет соответствующие пространственные сдвиги в их распределении. На рис. 2 представлено распределение ΔT и V вдоль горизонтальной

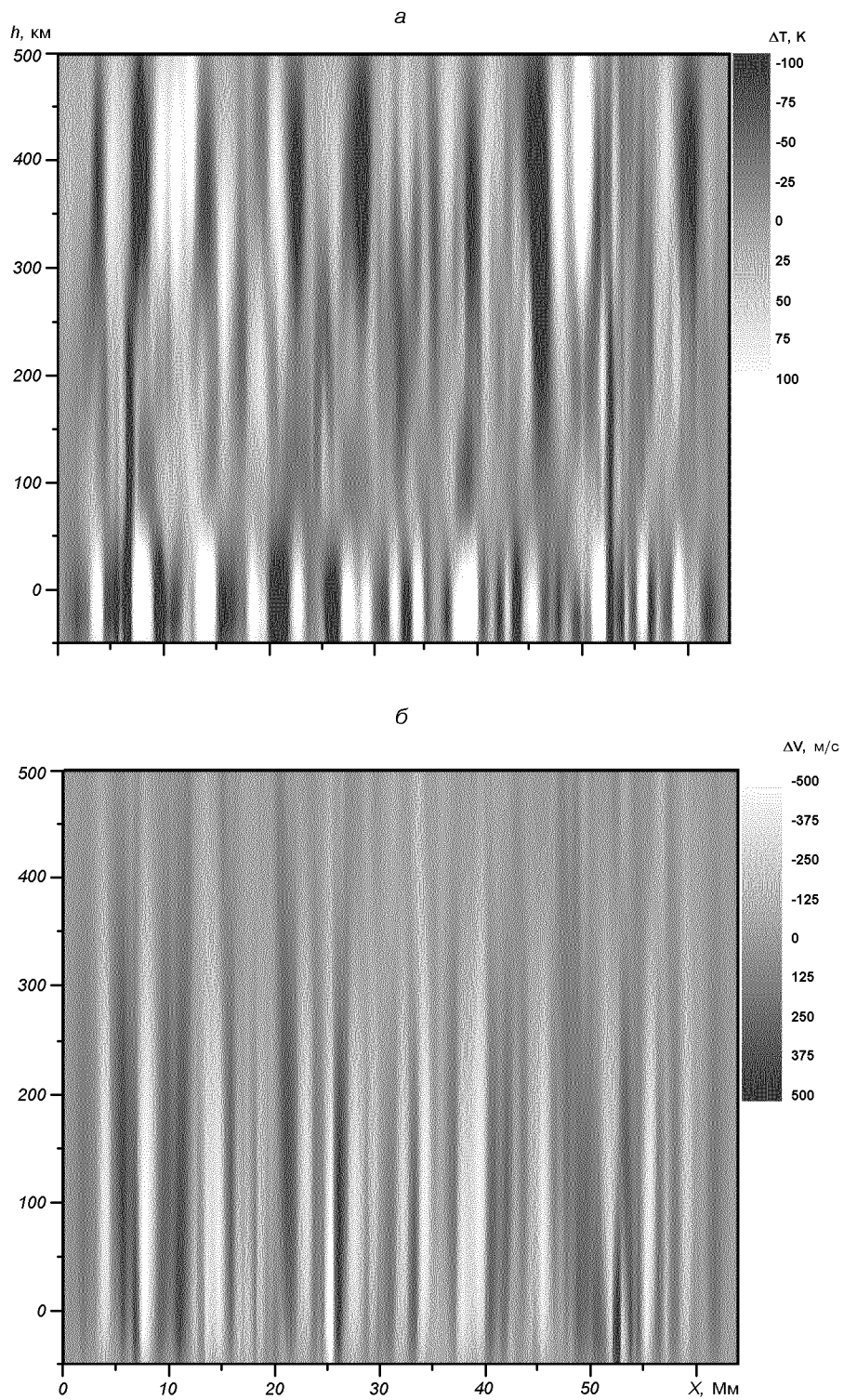


Рис. 1. Пространственное распределение возмущений температуры (а) и поля скоростей (б) в фиксированный момент времени

координаты X на высотах $h = 0, 200$ и 300 км.

В нижней фотосфере, где существенную роль играет конвекция, распределение скорости и температуры практически совпадают: горячее вещество поднимается в гранулах ($X = 3, 7, 12, 14, 17, 23, 27, 28, 32, 34, 36, 38, 43, 45, 51, 55, 58$ Мм), в межгранулах холодное вещество опускается ($X = 2, 6, 10, 12, 16, 22, 24, 26, 31, 33, 37, 41, 42, 49, 52, 54, 56, 58, 62$ Мм). Однако во многих случаях температурная структура потока и структура поля его конвективной скорости более или менее смещены (в горизонтальном направлении): не всегда их границы совпадают [3]. Структура поля температур может быть шире ($X = 7...9$ Мм — гранула, $X = 16...18$ Мм — межгранула) или, наоборот, уже, чем структура поля конвективной скорости ($X = 2.5...5$ Мм — гранула, $X = 30...31$ Мм — межгранула). Более того, центры этих структур в большинстве случаев смещены на 500 км и более в нижней и верхней фотосфере. В нижних слоях средней фотосферы $100 < h < 200$ км вообще сложно проследить какую-то температурную структуру.

Обнаружены некоторые несоответствия для $h = 0$ км: на $X = 15...18$ Мм, например, наблюдаются узкий нисходящий и широкий (с тонкой структурой) восходящий потоки, но в температурном представлении на этом самом месте наблюдается большая межгранула (спустя 2 мин она сместится, и на ее месте сформируется новая гранула); на $X = 25.5$ Мм виден восходящий поток, однако в температурном представлении на протяжении всего времени наблюдения (31 мин) гранулы в этой области не наблюдались.

Подобное отмечалось и ранее в [15]: только третья часть всех рассмотренных случаев давала полное соответствие между максимумом скорости и максимумом интенсивности внутри гранулы; иногда максимум восходящей скорости соответствовал практически нулевой интенсивности, или же наоборот, максимуму интенсивности — нисходящий поток.

Несколько выше, в начале средней фотосферы ($h = 200$ км, рис. 2, б), характеры этих структур начинают качественно различаться. Амплитуда конвективных скоростей падает с высотой, но колончатая структура скоростей сохраняется, структура конвективных скоростей уже перестает коррелировать со сложной структурой температурных флуктуаций.

На высоте $h = 300$ км (рис. 2, в) абсолютные значения конвективных скоростей уже заметно снижены. А для температуры из-за ее инверсии [3] контраст ячеек изменяется на противоположный: вверх движется холодное вещество, а вниз — горячее. Здесь также встречаются несовпадения границ температурной структуры относительно структуры конвективных скоростей, как и в нижней фотосфере.

В верхней фотосфере $400 \text{ км} < h < 550$ км из-за диссипации части гранул нарушается структура конвективных потоков.

Асимметрия распределения скоростей внутри конвективных потоков. При исследовании структуры солнечной грануляции часто наблюдается смещение положения максимума скорости движения вещества к краям конвективного потока. Так, в работе [17] отмечено асимметричное распределение конвективной скорости внутри больших ячеек: в нижней их части максимум восходящего потока сосредоточен ближе к краю ячейки, в то же время в высших слоях больших ячеек и в случае малых ячеек (во всех фотосферных слоях) вертикальная скорость распределена симметрично относительно центра ячейки.

Согласно полученным нами результатам асимметрия конвективных скоростей встречается как для слабых, так и для сильных потоков. В то же

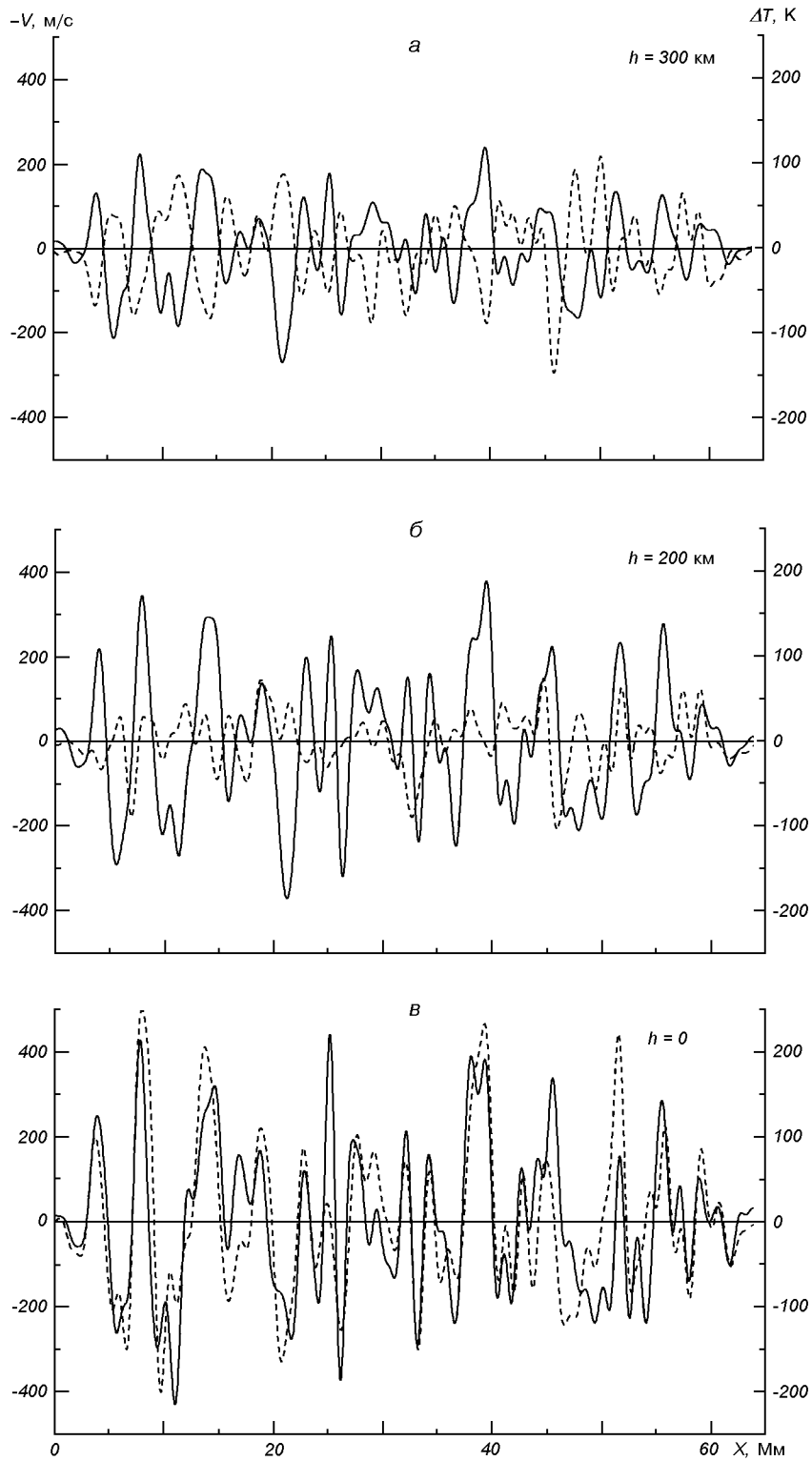


Рис. 2. Горизонтальное распределение лучевых скоростей и флуктуаций температуры на высотах 0, 200 и 300 км (сплошная линия — скорость, штриховая — температура)

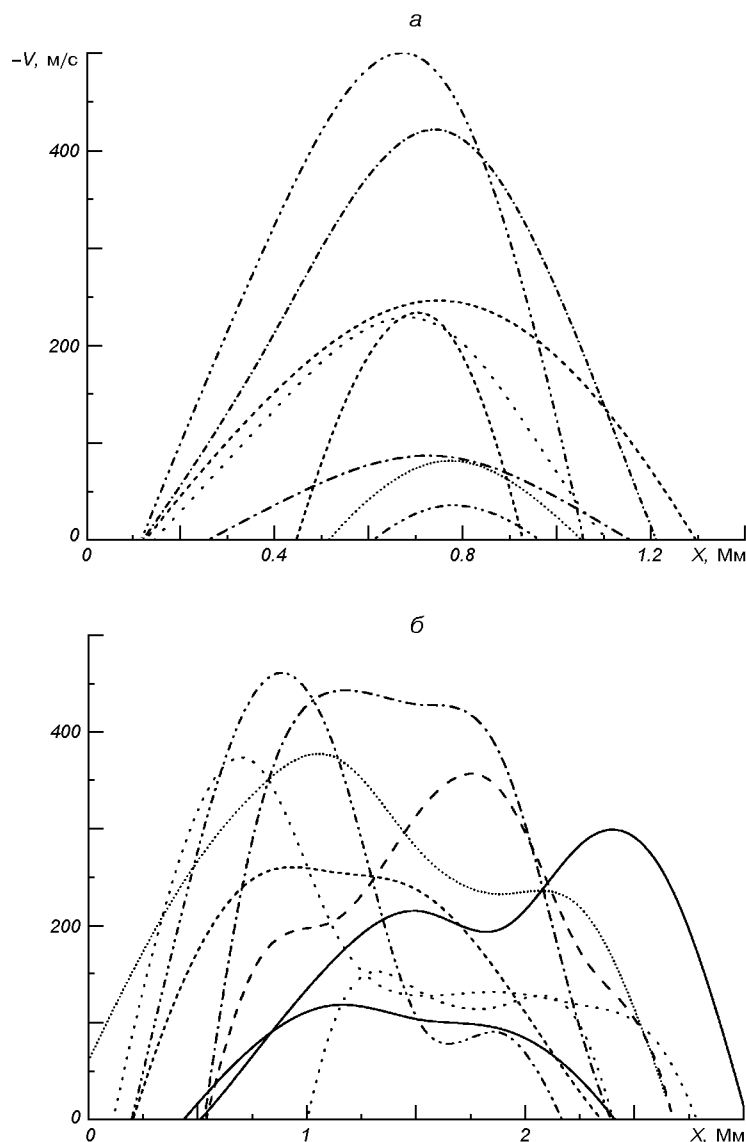


Рис. 3. Горизонтальное распределение поля скоростей (тонкая структура): а — внутри малых гранул, б — внутри больших гранул

время наличие или же отсутствие асимметрии горизонтального распределения скорости внутри гранул в периоды между их зарождением и распадом определяется горизонтальными размерами конвективных потоков, поэтому мы провели исследования распределения скоростей внутри конвективных потоков для малых ($< 1.5''$) и больших ($\geq 1.5''$) ячеек. На рис. 3 показаны полученные распределения конвективной скорости внутри ячеек на высоте $h = 0$ км.

В малых структурах конвективная скорость, как правило, распределена симметрично относительно центральной части (рис. 3, а). С увеличением размера симметрия начинает нарушаться. Как видно из рис. 3, а, для ячеек $X = 0.1...1.2$ Мм и $X = 0.1...1.3$ Мм максимум конвективной скорости уже приблизительно на 100 км смещен от центра.

В больших ячейках наблюдается асимметрия распределения конвективной скорости (рис. 3, б): в нижней фотосфере скорость внутри ячейки уменьшена, а при приближении к краю с обеих сторон скорость увеличивается (рис. 2, в, $X = 13...15$ Мм и $X = 37.5...40$ Мм) или же наблюдается максимум с одной стороны и спад с противоположной. Выше (рис. 2, б) скорость уменьшается и наблюдается, как правило, менее асимметричное распределение скорости по горизонтали внутри конвективной ячейки. Начиная с $h = 300...350$ км (рис. 2, а) распределение конвективных скоростей внутри больших гранул стает более-менее симметричным.

В работе [8] найдено, что распределение интенсивности внутри гранулы аналогично скорости, т. е. зависит от ее размеров: в малых структурах максимум локализован по центру, в то время как в больших гранулах он приближается к краю.

Для полученного нами температурного распределения имеет место дополнительное сглаживание флуктуаций по горизонтали; возможно, в данном случае в верхних слоях проявляется воздействие горизонтальных эффектов переноса излучения. Однако асимметрия в температурном распределении все же вероятна. Например, при $X = 37.5...40$ Мм на $h = 0$ км максимум флуктуаций температуры смещен от центра в правую сторону, в то время как по скорости имеем два максимума практически одинаковой величины по сторонам и минимум посередине. Поэтому целесообразно провести аналогичные исследования с большим пространственным разрешением.

Исследование скоростей внутри широких конвективных потоков наводит на мысль, что асимметрия распределения скоростей в таких ячейках может быть вызвана тонкой структурой потока. Иными словами, поток может состоять из нескольких потоков меньших размеров.

Тонкая структура конвективных потоков легко обнаруживается при пространственном разрешении $0.5''$. Так, две широкие гранулы при $X = 13...15$ Мм и $X = 37.5...40$ Мм состоят из двух восходящих потоков меньших размеров (рис. 1, б и рис. 2, в).

Для более детального исследования нужны наблюдения с большим пространственным разрешением, чем используемое разрешение $0.5''$. Однако, имея функцию пространственного замыывания, можно получить оценку тонкой структуры потоков с улучшенным разрешением. Для более корректного исследования нужны 2D-данные наблюдений. Тем не менее, мы получили аналогично [23] оценки влияния исправления за пространственное замыывание на воспроизведенную структуру конвективных потоков: более отчетливо проявляется тонкая структура больших конвективных потоков.

ВЫВОДЫ

По профилям линии Fe I λ 523.42 нм с высоким пространственным и временным разрешением воспроизведены пространственно-временные вариации температуры и поля скоростей в фотосфере Солнца. С помощью k - ω -фильтрации выделена чисто конвективная составляющая. Исследовано конвективное поле температуры и скоростей реальной солнечной грануляции в разных слоях фотосферы на субгрануляционных масштабах. Основные результаты нашего исследования таковы.

1. В нижней фотосфере конвективные структуры скорости и температуры практически совпадают. Наблюдаются смещения (в горизонтальном

направлении) температурной структуры потока относительно структуры его конвективной скорости. Выше характер этих структур начинает качественно различаться.

2. Распределение скорости внутри ячеек зависит от их размеров:

- в малых структурах (меньше $1.5''$) имеет место классическая картина грануляции: конвективная скорость распределена симметрично относительно центральной части ячейки;
- в больших структурах (около $1.5''$ и больше) наблюдается асимметрия распределения скорости внутри ячейки, она вызвана наличием тонкой структуры потока: в нижних слоях фотосферы $h \leq 50$ км внутри ячейки наблюдается меньшая скорость в центре и увеличение ее к краю с обеих сторон, или же имеем максимум с одной стороны и спад с противоположной. В высших слоях наблюдается, как правило, менее асимметричное распределение скорости внутри потока.

В температурном распределении имеет место дополнительное пространственное сглаживание тонкой структуры, однако асимметрия в температурном распределении все же вероятна.

3. Мы обнаружили тонкую структуру конвективных потоков: большой поток часто фрагментирован на несколько меньших потоков. Тонкая структура больших потоков, с одной стороны, и пространственное замывание, с другой, формируют наблюдаемую асимметрию распределения конвективных скоростей внутри потоков.

1. *Стодилка М. И.* Температурная структура реальной солнечной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 3.—С. 407—416.
2. *Стодилка М. И.* Структура конвективных движений в фотосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22.—№ 4.—С. 260—270.
3. *Стодилка М. И., Баран О. А., Малинич С. З.* Особенности конвекции в фотосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 3.—С. 173—182.
4. *Стодилка М. И.* Тихонівські стабілізатори в інверсних задачах спектральних досліджень // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 4.—С. 334—343.
5. *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.
6. *Bendlin C., Volkemer R.* Results from two-dimensional spectroscopic observations of solar granulation with a Fabry-Perot interferometer // *Astron. and Astrophys.*—1993.—278, N 2.—P. 601—606.
7. *Gadun A. S., Solanki S. K., Johannesson A.* Two-dimensional simulation of solar granulation: description and comparison with observations // *Astron. and Astrophys.*—1999.—350, N 2.—P. 1018—1034.
8. *Hirzberger J.* On the brightness and velocity structure of solar granulation // *Astron. and Astrophys.*—2002.—392, N 2.—P. 1105—1118.
9. *Keil S. L., Canfield R. C.* The height variation of intensity and velocity structures in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1978.—70, N 1.—P. 169—179.
10. *Musman S.* The effect of finite resolution on solar granulation // *Solar Phys.*—1969.—7.—P. 178—186.
11. *Nesis A., Hammer R., Hanslmeier A., et al.* Dynamics of the solar granulation. IV. Granular shear flow // *Astron. and Astrophys.*—1997.—326, N 2.—P. 851—859.
12. *Nesis A., Hammer R., Roth M., Schleicher H.* Dynamics of the solar granulation. VII. A nonlinear approach // *Astron. and Astrophys.*—2001.—373, N 1.—P. 307—317.
13. *Nesis A., Hammer R., Schleicher H.* Dynamics of the solar granulation. IX. A global approach // *Astron. and Astrophys.*—2006.—451, N 3.—P. 1081—1090.
14. *Nesis A., Hanslmeier A., Hammer R., et al.* Dynamics of the solar granulation. I. A phenomenological approach // *Astron. and Astrophys.*—1991.—253, N 1.—P. 561—566.
15. *Nesis A., Hanslmeier A., Hammer R., et al.* Dynamics of the solar granulation. II. A Quantitative approach // *Astron. and Astrophys.*—1993.—279, N 2.—P. 599—609.
16. *Nesis A., Hanslmeier A., Hammer R., et al.* Dynamics of the solar granulation. VIII. Time and space development // *Astron. and Astrophys.*—2002.—396, N 2.—P. 1003—1010.

17. *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.
18. *Rast M. P.* On the nature of “exploding” granules and granule fragmentation // *Astrophys. J.*—1995.—**443**, N 2.—P. 863—868.
19. *Salucci G., Bertello L., Cavilliti F., Ceppatelli G., Righini A.* The height dependence of intensity and velocity structures in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**285**, N 1.— P. 322—332.
20. *Steffen M., Ludwig H.-G., Kruess A.* A numerical simulation study of solar granular convection in cells of different horizontal dimension // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**213**, N 1-2.— P. 371—382.
21. *Stein R. F., Nordlund A.* Topology of convection beneath the solar surface // *Astrophys. J.*—1989.—**342**.—P. L95—L98.
22. *Stein R. F., Nordlund A.* Simulation of solar granulation. I. General properties // *Astrophys. J.*—1998.—**499**.—P. 914—933.
23. *Stodilka M. I., Malynych S. Z.* Spatial variations in the velocity field and real solar granulation // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**373**, N 4.—P. 1523—1530.

Поступила в редакцию 24.05.07