

УДК 523.942

М. И. Стодилка, О. А. Баран, С. З. Малинич

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

Особенности конвекции в фотосфере Солнца

Исследована фотосферная конвекция Солнца по воспроизведенным стратификациям лучевой скорости и температуры (решение неравновесной инверсной задачи переноса излучения по профилям линий нейтрального железа $\lambda \approx 523.42$ нм с высоким пространственным и временным разрешением). В средней и верхней фотосфере четко проявляется инверсия температурных флуктуаций как в широких гранулах, так и в межгранулах; для малых гранул инверсия встречается редко. Обнаружены большие гранулы, порожденные несколькими восходящими потоками, которые взаимодействуют между собой в процессе их развития и достигают слоев температурного минимума; встречаются гранулы меньших размеров, достигающие этих слоев. С высотой конвективная скорость уменьшается и достигает нуля в слоях, расположенных выше зоны температурного минимума. В нижних и верхних фотосферных слоях обнаружены значительные горизонтальные смещения гранул и межгранул (500...1000 км) в процессе их эволюции; скорость таких перемещений порядка 3...5 км/с, что вызвано выходом новой ячейки.

ОСОБЛИВОСТІ КОНВЕКЦІЇ В ФОТОСФЕРІ СОНЦЯ, Стоділка М. І., Баран О. А., Малинич С. З. — Досліджено фотосферну конвекцію Сонця за відтвореними стратифікаціями променевої швидкості і температури (розв'язок нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання за профілями ліній нейтрального заліза $\lambda \approx 523.42$ нм з високим просторовим і часовим розділенням). У середній і верхній фотосфері чітко проявляється інверсія температурних флуктуацій як в широких гранулах, так і в міжгранулах; для малих гранул інверсія зустрічається рідко. Виявлені великі гранули, породжені кількома висхідними потоками, що взаємодіють між собою в процесі їхнього розвитку і досягають шарів температурного мінімуму; зустрічаються гранули менших розмірів, що досягають цих шарів. З висотою променева швидкість зменшується і досягає нуля у шарах, розташованих вище від зони температурного мінімуму. У нижніх та верхніх фотосферних шарах виявлено значні горизонтальні зміщення гранул та міжгранул (500...1000 км) в процесі їхньої еволюції (швидкість таких переміщень 3...5 км/с), що обумовлено виходом нової комірки.

CONVECTION PECULIARITIES IN THE SOLAR PHOTOSPHERE, Stodilka M. I., Baran O. A., Malynych S. Z. — Peculiarities of the photospheric convection are investigated by means of reproduced spatio-time variations of the temperature and line of sight velocity. The investigations were performed by solving nonequilibrium inverse radiation transfer problem using

the neutral iron line $\lambda \approx 523.4$ nm profiles obtained with a high spatial and time resolution. In the middle and upper photosphere, the inversion of temperature fluctuations becomes apparent clearly in large granules and intergranules; for small granules the inversion is found seldom. The discovered large granules are generated by a few ascending flows, which interact between themselves in the process of their development. Large granules reach the temperature minimum layers, but the granules of less sizes, that achieve these layers, are found too. The line of sight velocity decreases with height reaching zero in the layers not lower the temperature minimum. We detected sufficient horizontal shifts of the granules and intergranules (500...1000 km) with a velocity of 3 to 5 km/s; that is due to rise up of a new cell.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечную фотосферу можно рассматривать как своеобразную переходную область, в нижних слоях и в оболочке которой доминирует термодинамическая конвекция, а в верхних слоях динамику вещества определяют осцилляции. Восходящие конвективные потоки газа в форме ярких гранул, сгенерированные в нижних слоях, проникают по инерции в стабильную фотосферу и вызывают в ее верхних слоях гидродинамические и температурные возмущения, которые взаимодействуют между собой. Такие сложные возмущения изучают в основном спектральными методами, анализируя пространственно-временные вариации скорости и температуры.

Согласно исследованиям [10] солнечная фотосфера делится на два отдельных слоя с границей на высоте 170 км: разница температур отдельных гранул и межгранул с максимального значения на высоте 0 км уменьшается до минимального на высоте 170 км и потом снова увеличивается в более высоких слоях фотосферы. Подобный результат получен и в работе [13]. Быстрое уменьшение температур на высоте 60 км отмечено в работе [8], а в работе [4] найдено, что уровень деления расположен на высоте 290 км над континуумом.

Р. И. Костык, исследуя тонкую структуру фраунгоферовых линий, впервые обратил внимание на то, что вещество центральных частей конвективных ячеек на больших высотах может стать холоднее, чем в межгранульных промежутках, хотя будет продолжать двигаться вверх. Поле яркости грануляции и конвективных скоростей в фотосфере Солнца исследованы в работе [1].

При исследовании вариаций яркости на спектрограммах в области линий H и K Ca II [16] наблюдались два вида непрерывного спектра. Один вид — в далеких крыльях линии (гранулярный континуум) — был связан с грануляцией. Другой вид наблюдался во внутренних крыльях линий H и K (k_0 -континуум). Допускалось, что он связан с межгранульными промежутками фотосферы и указывает на наличие в верхней части межгранул (для оптической глубины $\tau < 0.1$) более нагретого вещества.

Модельные расчеты солнечной конвекции, в частности на масштабах грануляции выполнялись в работах [3, 14, 15]. Так, в модели Нордлунда [15] показана решающая роль излучения в формировании структуры солнечной поверхности: в областях, где формируется межгранула, вещество при развороте не охлаждается монотонно, как обычно считалось, а часто нагревается излучением при прохождении оптически тонких слоев. Модель Стефена и др. [14] также прогнозирует для горизонтальных флуктуаций температуры смену их знака над нижним слоем. Над той частью гранул, которые всплывают, температура понижается, а над нисходящими межгранульными областями — повышается. Сопоставление вариаций интенсивно-

сти, наблюдаемых в верхней фотосфере и в континууме, показали инверсию контраста над межгранульными нисходящими потоками; в модели [14] наблюдаются нисходящие потоки в центре гранулы.

В моделях А. С. Гадуна [7] поведение температуры хорошо отображает наличие на высотах около 170 км переходного слоя в фотосфере, где температурные флуктуации изменяют знак. Однако положение уровня деления зависит от горизонтальных размеров конвективного потока (ячейки). Например, для ячеек с размером около 180 км область проникающей конвекции достигает высот не более 70...75 км.

Таким образом, получены разные значения высоты инверсии флуктуаций интенсивности. Причиной могут быть неточные оценки геометрической высоты по функциям вклада, наложение колебательных движений (особенно в верхних слоях фотосферы), несовершенная методика их фильтрации, и в первую очередь — ошибки воспроизведения вариаций.

Нерешенным остается вопрос о высоте проникновения больших и малых гранул. По результатам корреляционного анализа [6, 13] конвективные потоки для всех крупных гранул ($> 1.4''$) достигают верхних слоев фотосферы, в то время как высота проникновения мелких гранул ($< 1.4''$) небольшая. Согласно данным [11] в верхние слои фотосферы проникают гранулы с размерами более чем $1''$ (а не $1.4''$), а для флуктуаций температуры минимальный размер ячейки, в которой возможно проникновение в верхние слои и возникновение инверсии, составляет $2''$. В работе [12] выполнено исследование пространственно-временного распределения термодинамических величин и вертикальных скоростей потоков путем инверсии линий нейтрального железа с высоким пространственным и временным разрешением. Исследовано проникновение гранул в фотосферные слои атмосферы; обнаружено инверсию температуры, плотности вещества. Однако, несмотря на наличие не-ЛТР инверсных кодов, исследование ограничилось не-ЛТР-параметрами для спокойной атмосферы, что не совсем корректно, если речь идет о зондировании физических условий в верхних слоях фотосферы.

Цель работы — исследование особенностей фотосферной конвекции на основе наших оценок пространственно-временных вариаций скорости и температуры, изучение их эволюции во времени. Новизна работы состоит в том, что исследование грануляции сделано в рамках реальной (немоделированной) солнечной конвекции по профилям с высоким пространственным разрешением и с учетом эффектов отклонения от ЛТР. Для улучшения достоверности воспроизведенных величин в инверсный код были введены стабилизаторы Тихонова. При изучении динамики конвективных явлений в фотосфере мы исключаем влияние акустических колебаний, проводя фильтрацию пространственно-временных вариаций воспроизведенных величин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследовании мы использовали результаты наблюдений Н. Г. Щукиной на 70-см вакуумном башенном телескопе VTT на Канарских островах с высоким разрешением: временное — 9.3 с, пространственное — около $0.5''$ [9]. Наблюдалась спокойная область вблизи центра солнечного диска в линии нейтрального железа $\lambda \approx 523.4185$ нм, которая образуется в фотосферных слоях атмосферы. Линии железа обеспечивают прямую диагностику температуры и поля скоростей в атмосфере Солнца, поскольку доплеровское уширение линии формируется в основном фотосферными скоростями. Применяя инверсную процедуру для каждого профиля, мы воссоздали распределение температуры и скоростей ($V_{\text{микро}}$, V_{los}) в фотосфере Солнца по высоте и по поверхности Солнца.

Слой, для которого была воспроизведена стратификация температуры и конвективных скоростей, достаточно широк: $-50 \text{ км} < h \leq 500 \text{ км}$; сверху он прилегает вплотную к зоне температурного минимума. При $h > 550 \text{ км}$ чувствительность выбранной линии к температуре среды уменьшается, но стабилизатор обеспечивает плавный переход к температуре согласно модели спокойного Солнца (например VAL80). Для скорости чувствительность линии падает уже при $h > 500 \text{ км}$. Диапазон высот воспроизведения параметров определяется чувствительностью функции отклика.

Температурная инверсия. Пространственное распределение температуры и поля скоростей показано на рис. 1. Диапазон изменения ΔT ограничен значениями $\pm 100 \text{ К}$, чтобы лучше воспроизвести контраст в верхних слоях атмосферы; для $|\Delta T| > 100 \text{ К}$ происходит насыщение контраста. Областям, где флуктуации температуры превышают 100 К , соответствует темносерый цвет. То же самое относится к пространственному распределению скорости (рис. 1, б). Видно, что конвективная скорость с высотой медленно уменьшается, а интенсивные восходящие потоки вещества полностью растворяются в слоях не ниже температурного минимума (согласно [12] при $h \approx 450 \text{ км}$). Температурное поле хуже отражает тонкую структуру потока, в то же время она более отчетливо проявляется в распределении конвективных скоростей: на $X = 13...15 \text{ Мм}$ и $X = 37.5...40 \text{ Мм}$ одна гранула представляет собой два потока.

Согласно рис. 1 строение солнечной фотосферы можно представить следующей схемой. Верхняя граница термической конвекции находится несколько выше видимой поверхности: при $h \approx 100 \pm 50 \text{ км}$ (в [12] $h \approx 170 \text{ км}$). В нижней фотосфере, т. е. в слоях со сверхадиабатическим градиентом [2], элемент плазмы, который движется вверх, горячее окружающей среды. Здесь флуктуации температуры в гранулах и межгранулах достигают $\pm 400 \text{ К}$ (реже $\pm 500 \text{ К}$) относительно средней на данной высоте температуры. Выше расположен переходной слой, в котором флуктуации температур минимальны ($\pm 50 \text{ К}$). Здесь начинается область проникающей конвекции, которая в значительной степени определяет температурную структуру верхней фотосферы. Ширина этой переходной области $50...150 \text{ км}$. Над ней снова восстанавливаются флуктуации температуры конвективного происхождения и сохраняются до высот 500 км или немного выше. Здесь они увеличиваются в среднем до $\pm 200 \text{ К}$, иногда до $\pm 300 \text{ К}$.

В средней и верхней фотосфере структура конвективных ячеек еще сохраняется за счет эффектов давления [7], зато становится хорошо заметной инверсия флуктуаций температуры: восходящий (более горячий в нижних слоях) поток газа становится здесь более холодным по сравнению с нисходящим (инверсия температуры обнаружена нами по результатам наблюдений в работе [2]). Данный эффект связан с быстрым адиабатическим расширением и радиационным охлаждением газа восходящего потока, разогревом за счет сжатия нисходящего газа, а также чувствительностью коэффициента поглощения H^- к изменению температуры [12]. Максимальные флуктуации температуры в гранулах с инверсией порядка 300 К .

Гранулы без инверсии встречаются реже, конвективные скорости таких гранул достигают в нижних слоях значений меньше 0.3 км/с . Как правило, это гранулы малых размеров. В то же время в крупных гранулах (размером около $1.5''$ и больше) инверсия возникает практически всегда (согласно [12] инверсия имеет место для потоков больше $1.5''$ на высотах $h > 200 \text{ км}$). Большие гранулы без температурной инверсии встречаются очень редко.

Согласно нашим результатам доля гранул меньше $1''$ составляет 36% , из них половина с инверсией; доля гранул от 1 до $1.5''$ равна 39% , из них

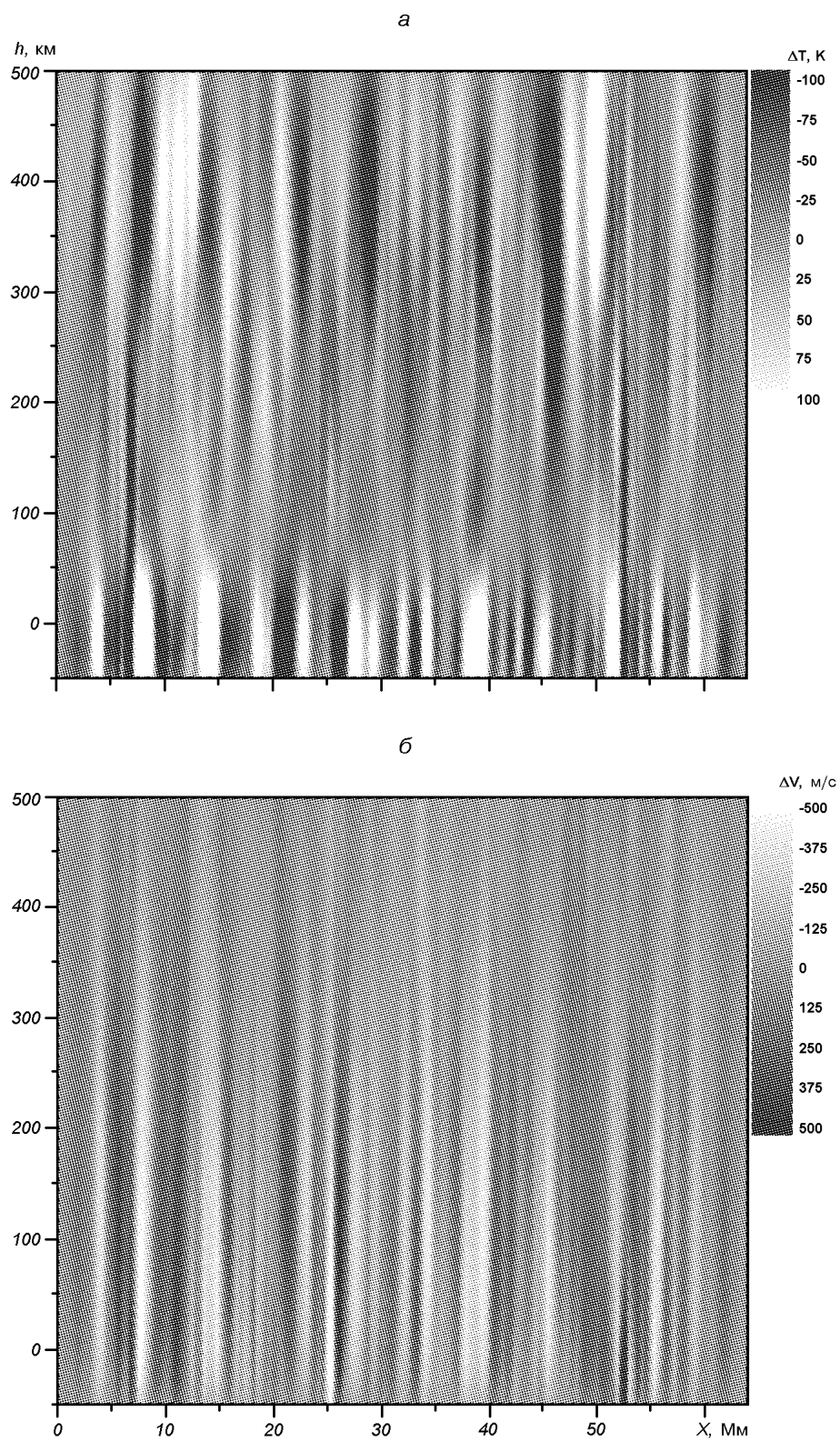


Рис. 1. Пространственное распределение температуры (а) и поля скоростей (б)

только 5 % без инверсии; остальные 25 % гранул больше 1.5", и все с инверсией. Область температурной инверсии простирается от 150 км до температурного минимума. При этом наблюдается тенденция: чем больше гранула, тем в более высоких слоях проявляется инверсия.

В межгранулах инверсия возникает практически всегда. Это происходит на этапе развития потока или же во время его «максимальной фазы».

Следует отметить, что дополнительная фильтрация фазовых сдвигов между температурой и скоростью (наряду с $k - \omega$ фильтрацией) может увеличить пространственное разрешение областей с инверсией температуры.

Динамика грануляции. Характер поля конвективных скоростей в фотосферных слоях практически полностью определяется проникающей конвекцией. Размеры гранулы увеличиваются по мере ее развития, одновременно увеличивается конвективный поток вещества вверх; при этом амплитуда конвективных скоростей все же уменьшается с высотой. Большие гранулы (размером не меньше 1.5") достигают к моменту максимального развития высот температурного минимума (согласно [12] на высотах $h \approx 370$ км можно обнаружить потоки порядка 4"). Правда, встречаются гранулы меньших размеров (около 1"), которые также попадают в слои температурного минимума (в работе [12] на высотах $h \approx 280$ км обнаружены структуры более 1.4"). Такое же поведение гранул отмечено и в работах [10, 13].

Обычно новая ячейка формируется на месте предыдущей либо путем слияния двух, либо она возникает спонтанно. Распадаются ячейки также разными способами: путем разделения, слияния или постепенно исчезают [5]. Все эти процессы можно наблюдать по нашим результатам воспроизведения. Образование и распад гранулы происходит чаще всего путем разделения или слияния [11]. Появление гранулы вызывает образование восходящего потока. Развитие гранулы начинается снизу; область, занятая гранулой, расширяется — формируется восходящий поток; в верхней части потока температура вещества уменьшается (это касается, как правило, больших потоков) — наступает температурная инверсия. В верхних слоях вертикальная скорость движения вещества, несмотря на уменьшение плотности вещества, уменьшается, поскольку возникают горизонтальные потоки. После достижения максимальной фазы гранула начинает гаснуть. Распад больших гранул начинается сверху. Действительно, трехмерное моделирование показывает, что солнечная конвекция управляется скорее всего процессами охлаждения на поверхности, нежели нагревом на нижней границе [15].

По нашим результатам воспроизведения часто наблюдается перетекание холодного вещества верхних слоев вниз, где уже формируется целая область холодного нисходящего газа (рис. 2, $X = 29$ Мм). Образование этих каналов перетекания вещества свидетельствует о начале разрушения гранулы на $X = 28$ Мм и образования межгранулы $X = 30$ Мм. Изменение всей структуры от начала и до конца происходит в среднем за время порядка 8 мин, что близко к времени жизни гранулы.

Горизонтальные движения. Иногда процесс зарождения нового потока вызывает сдвиги и отклонение соседних конвективных ячеек, что проявляется в динамике флуктуации температуры и скорости. Вследствие этого наблюдаются горизонтальные смещения некоторых гранул от места их образования в процессе эволюции. В нижних и верхних фотосферных слоях выявлены значительные горизонтальные смещения гранул и межгранул: $\Delta X \approx 500...1000$ км (10 таких случаев за время наблюдения 31 мин). Скорость таких горизонтальных смещений порядка 3...5 км/с.

На рис. 3 показан процесс зарождения нового потока на $X = 29...30$ Мм.

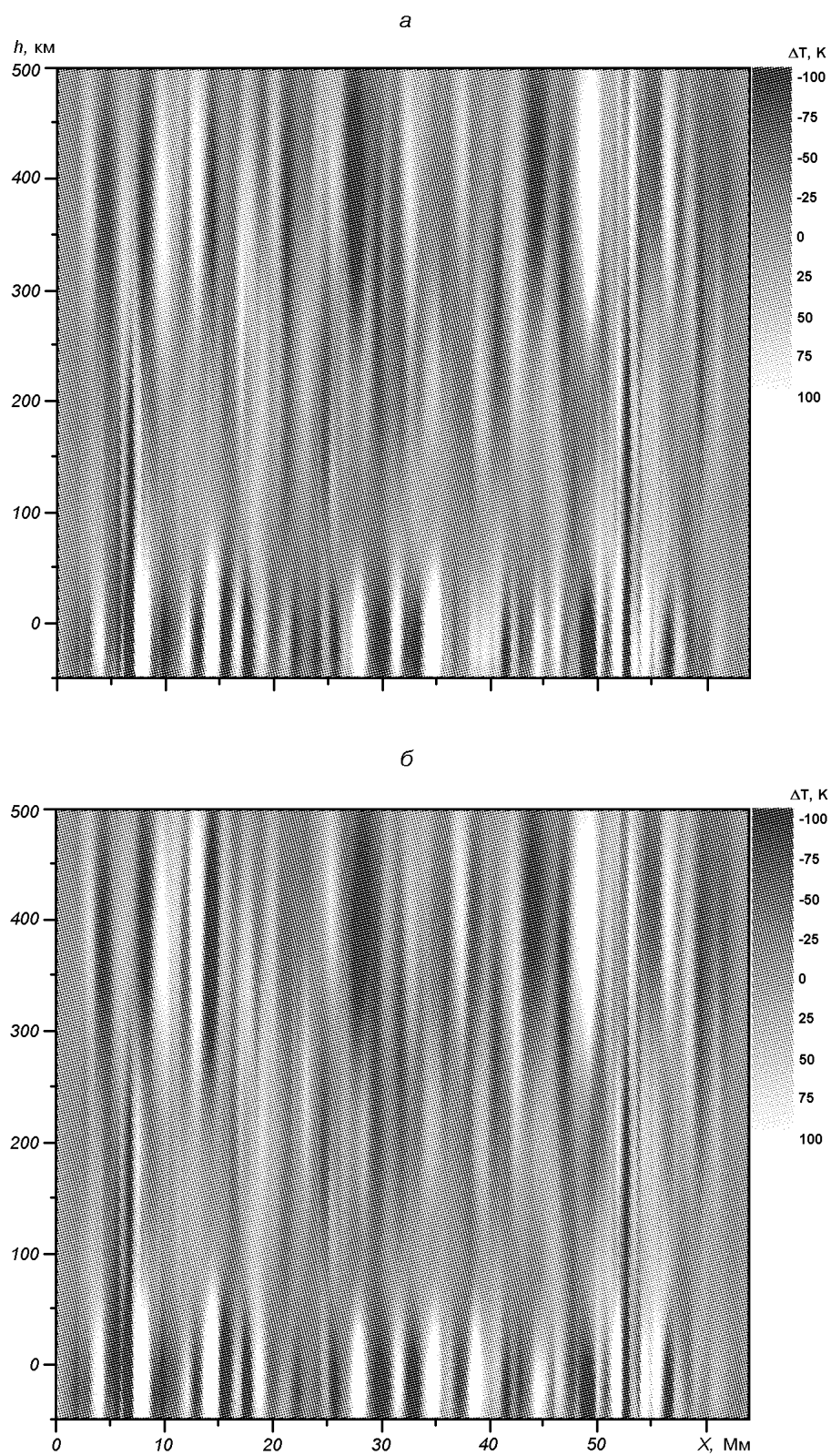


Рис. 2. Пространственное распределение температуры: *a* — в момент $t = 0$, *б* — $t = 1$ мин 53 с

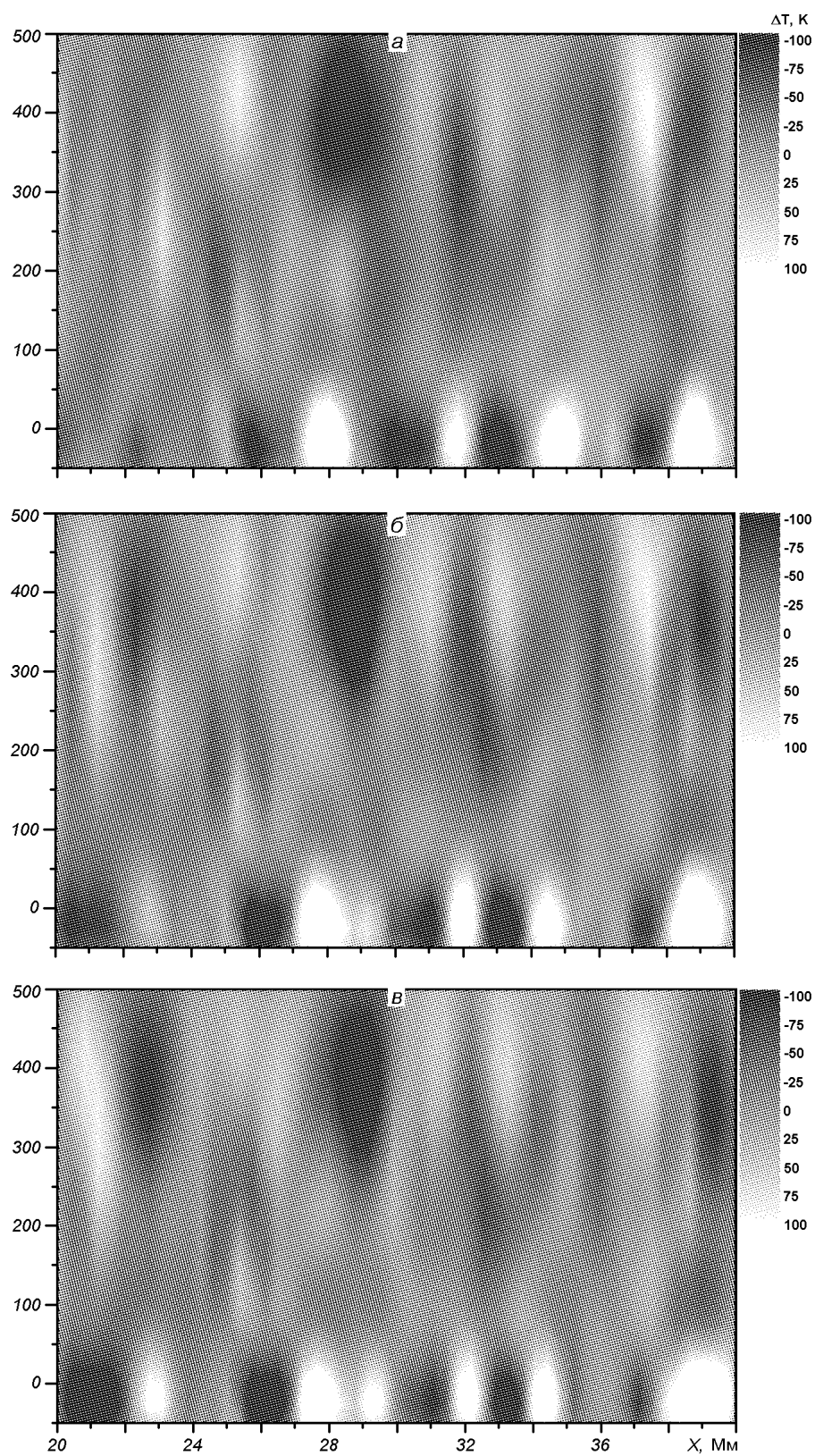


Рис. 3. Процесс зарождения нового потока на $X = 29...30$ Мм на моменты наблюдения: *а* — $t = 9$ мин 43 с, *б* — $t = 12$ мин 14 с, *в* — $t = 13$ мин 48 с

На момент наблюдения $t = 9$ мин 30 с при $X = 28, 30, 31.7$ Мм видны большие образования: гранула, межгранула и гранула. Ширина первых двух ячеек около 2 Мм, третьей — 1.1 Мм. На $X = 29$ Мм возникает новая гранула, появление которой вызывает горизонтальные сдвиги соседних конвективных ячеек вправо (межгранула смещается на 0.8 Мм, гранула — на 0.4 Мм за время $\Delta t = 4$ мин 5 с).

Горизонтальные движения гранул более четко проявляются в распределении температуры; поле конвективных скоростей проявляет некоторую инерцию к горизонтальным сдвигам. Наблюдаются также незначительные горизонтальные смещения температурной структуры потока относительно структуры его конвективной скорости: не всегда самые большие скорости потока находятся в середине области температурной структуры. Иногда даже наблюдаются вертикальные потоки без заметных проявлений температурной структуры: например, при $X = 25.5$ Мм (рис. 1, б) имеем такой долгоживущий (все время наблюдения $t = 31$ мин) восходящий поток. Рядом с ним возникают межгранулы (нисходящие потоки), обладающие к тому же горизонтальным движением.

Тонкая структура конвективных потоков. Встречаются большие гранулы, порожденные несколькими (два-три) восходящими потоками (рис. 1, б), которые взаимодействуют между собой в процессе их развития (разделение, слияние). Так, на $X = 38...41$ Мм, согласно температурному распределению, при слиянии трех (рис. 2) формируется одна большая ячейка (рис. 1, а). Внутренняя структура гранул более отчетливо проявляется в распределении конвективных скоростей. На рис. 1, б гранула, упомянутая выше, состоит из двух потоков. В то же время пространственное распределение температуры в грануле значительно хуже отражает тонкую структуру потока: только спустя 5 мин после того как потоки еще больше разошлись, снова выделяются отдельные гранулы. Здесь, очевидно, из-за эффектов теплового взаимодействия потоков имеет место сглаживание горизонтальных флуктуаций температуры между потоками.

По результатам наших исследований тонкая структура межгранул проявляется хуже. Упомянутая тонкая структура выявлена для шести гранул и только одной межгранулы. Возможно, именно тонкая структура конвективных потоков вызывает наблюдаемую асимметрию распределения конвективных скоростей внутри потоков.

Для более основательной аргументации сделанного предположения о структуре потоков необходимы аналогичные исследования для площадки на поверхности Солнца с лучшим пространственным разрешением.

Укажем вкратце на возможные причины качественных различий наших результатов и результатов [12]:

- мы не используем не-ЛТР-параметры, взятые для модели спокойного Солнца, а рассчитываем их для каждой вертикальной колонки текущей воспроизводимой модели;
- мы используем уравнение гидродинамического равновесия для общего давления, а не гидростатики для газового давления;
- наряду с T и V_{los} мы воспроизводим стратификацию микротурбулентной скорости;
- привязка к геометрической шкале высот сделана из условия горизонтального баланса на нижней границе полного (а не только газового) давления (см. также [2]);
- используемые нами стабилизаторы Тихонова дают более высокую достоверность и обеспечивают лучшее пространственное разрешение при воспроизведении.

ВЫВОДЫ

В результате исследования конвективной структуры фотосферы Солнца по воспроизведенным нами стратификациям лучевой скорости и температуры получены следующие выводы.

1. В верхней и средней фотосфере происходит инверсия флуктуаций температуры: восходящие (более горячие в нижних слоях) потоки становятся здесь более холодными по сравнению с нисходящими и наоборот. Температурная инверсия имеет место для больших гранул и большинства межгранул. Для малых гранул инверсия встречается редко.

2. С высотой конвективная скорость медленно уменьшается, достигая нуля в слоях не выше температурного минимума.

3. Обнаружены значительные горизонтальные смещения гранул в процессе их эволюции, которые вызваны зарождением новых конвективных потоков.

4. Выявлены большие гранулы, порожденные несколькими восходящими потоками. Внутренняя структура гранул более отчетливо проявляется в распределении конвективных скоростей, в то время как пространственное распределение температуры значительно хуже отражает тонкую структуру конвективных потоков. Возможно, именно тонкая структура конвективных потоков дает наблюдаемую асимметрию распределения конвективных скоростей внутри потоков.

1. Костык Р. И., Щукина Н. Г. Тонкая структура конвективных движений в фотосфере Солнца: наблюдения и теория // *Астрон. журн.*—2004.—81, № 9.—С. 846—858.
2. Стодилка М. И. Температурная структура реальной солнечной грануляции // *Кинематика и физ. небес. тел.*—2003.—19, № 3.—С. 407—416.
3. 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.
4. 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.
5. Dialetis D., Macris C., Prokakis Th., Sarris E. The lifetime and evolution of solar granules // *Astron. and Astrophys.*—1986.—168, N 1.—P. 330.
6. 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.
7. Gadun A. S., Solanski S. K., Johannesson A. Two-dimensional simulation of solar granulation: description of technique and comparison with observations // *Astron. and Astrophys.*—1999.—350, N 2.—P. 1018—1034.
8. Keil S. L., Canfield R. C. The height dependence of intensity and velocity structures in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1978.—70, N 1.—P. 169.
9. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // *Astron. and Astrophys.*—2001.—369, N 2.—P. 660—671.
10. Nesis A., Hanslmeier A., Hammer R., et al. Dynamics of the solar granulation // *Astron. and Astrophys.*—1993.—251, N 1.—P. 561.
11. Puschmann K., Vazquez M., Bonet J. A., et al. 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. and Astrophys.*—2003.—407, N 1.—P. 363—378.
12. 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.
13. Salucci G., Bertello L., Cavilliti F., et al. The height dependence of intensity and velocity structures in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1994.—285, N 1.—P. 561.
14. Steffen M., Ludvig 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.—P. 371.
15. Stein R. F., Nordlund A. Simulation of Solar Granulation. I. General Properties // *Astrophys. J.*—1998.—499.—P. 914—933.
16. Suemoto Z., Hiel E. Bright features in the intergranular region // *Solar photosphere: Structure, Convection and Magnetic Fields* // *IAU Symp. 138, Kiev, May 15—20* / Ed. J.-O. Stenflo.—Dordrecht: Kluwer, 1990.—P. 97—100.

Получила в редакцию 21.12.05