

УДК 523.942

М. И. Стодилка

Астрономическая обсерватория Львовский национальный университет имени Ивана Франко
79005 Львов, ул. Кирилла и Мефодия 8
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

Структура конвективных движений в фотосфере Солнца

Путем решения неравновесной инверсной задачи переноса излучения с последующей $k - \omega$ и фазовой фильтрацией исследовано конвективное поле температуры и скоростей в фотосфере Солнца, их энергетика. В средней фотосфере наблюдаются мелкомасштабные неоднородности; в слоях средней и верхней фотосферы в больших конвективных потоках происходит инверсия температуры. Спектр мощности вариаций скорости конвективных движений монотонно уменьшается с высотой. Наибольшая мощность вариаций температуры сосредоточена в слоях нижней фотосферы; с высотой мощность уменьшается, достигая минимума в начале области проникающей конвекции; в средней и верхней фотосфере мощность вариаций увеличивается, что вызвано инверсией температуры, а также образованием более мелкомасштабного компонента. Инверсия температуры и мелкомасштабные неоднородности имеют конвективное происхождение.

СТРУКТУРА КОНВЕКТИВНИХ РУХІВ В ФОТОСФЕРІ СОНЦЯ, Стоділка М. І. — Шляхом розв'язку нерівноважної інверсної задачі переносу випромінювання з подальшою $k - \omega$ та фазовою фільтрацією досліджено конвективне поле температури і швидкостей в фотосфері Сонця, їхня енергетика. В середній фотосфері спостерігається дрібномасштабні неоднорідності; в шарах середньої і верхньої фотосфери у великих конвективних потоках відбувається інверсія температури. Спектр потужності варіацій швидкості конвективних потоків монотонно спадає з висотою. Найбільша потужність варіацій температури зосереджена в шарах нижньої фотосфери; з висотою потужність зменшується, досягаючи мінімуму на початку області проникної конвекції; у середній та верхній фотосфері потужність варіацій збільшується, що зумовлено інверсією температури та утворенням дрібномасштабного компонента. Інверсія температури і дрібномасштабні неоднорідності мають конвективне походження.

STRUCTURE OF CONVECTIVE MOTIONS IN THE SOLAR PHOTOSPHERE, by Stodilka M. I. — Solving the inverse non-equilibrium radiative transfer problem with subsequent $k - \omega$ and phase filtering, we investigated

the convective field of the temperature and velocities as well as their energetics. We revealed small-scale inhomogeneities in the middle photosphere and the temperature inversion of large convective flows in the middle and upper photosphere layers. Power spectrum of the velocity variations of convective flows decreases with height monotonously. The maximum of the temperature variation power is concentrated in the lower photosphere; the power decreases with height, reaching the minimum at the beginning of the overshooting convection region; in the middle and upper photosphere the power of the variations grows up again, and that is due to temperature inversion and formation of a small-scale component. The temperature inversion and small-scale inhomogeneities are of convective origin.

ВВЕДЕНИЕ

Структура фотосферы на малых временных и пространственных масштабах определяется грануляцией и волновыми движениями.

Наиболее полное эмпирическое исследование динамики солнечной фотосферы выполнено в серии работ [15—18]. Согласно полученным результатам фотосферу можно разделить на два слоя с разными физическими свойствами: гранулы, которые переносят конвективную энергию, распадаются в нижней фотосфере, процесс распада завершается на высоте $h \approx 170$ км. Большие гранулы путем турбулентного распада преобразуются в меньшие, причем высоты 170 км достигают большие гранулы (> 1000 км). В верхних слоях (выше 170 км) фотосфера снова становится сильно структурированной. Было предположено, что здесь проявляется отдельный вид вторичных, неконвективных особенностей, обусловленных проникающей конвекцией. Вторичные структуры часто связывают с гравитационными волнами [11, 23]. Результаты многих других аналогичных исследований качественно совпадают [5, 6, 25]. В работе [8] представлены результаты детального изучения вертикальной структуры фотосферы, куда гранулы проникают снизу. Если в нижних слоях фотосферы наблюдается высокая корреляция между температурой и вертикальной скоростью (за счет действия сил плавучести), то в верхних слоях, куда гранулы проникают по инерции, просматривается другой тип особенностей.

Одновременное исследование конвективных и волновых движений проведено в работах [7, 8, 10]. Основное внимание в работе [10] сосредоточено на пространственной связи между пятиминутными осцилляциями и грануляционной структурой; показано, что наиболее энергичные осцилляции скорости возникают над гранулами и межгранулами с наибольшим контрастом яркости.

В. Н. Карпинский [9] показал, что структуры яркости и скорости совпадают до 100 км над уровнем образования континуума, а поле скоростей в виде вертикальных цилиндрических колонок сохраняется до высоты $h \approx 250$ км; выше такая колончатая структура разрушается.

В работе [8] выполнено статистическое и морфологическое исследование грануляции в фотосферных слоях атмосферы; пятиминутные осцилляции устранены $k - \omega$ фильтрацией. Оказывается, что флуктуации интенсивности, связанные с гранулами, исчезают уже на высоте 60...90 км; в верхней фотосфере флуктуации интенсивности уже не связаны с грануляцией, а флуктуации скорости (конвективного происхождения) пересекают всю фотосферу.

В большинстве работ, опубликованных ранее, наблюдаемые поля интенсивности и скорости представлялись упрощенной двухколонной моделью солнечной грануляции. В работах [1, 10] исследовалась солнечная грануля-

ция в рамках 16-колонной модели. С помощью корреляционного анализа показано, что смена контраста гранул и межгранул происходит на высоте 250 км, а на высоте 490 км происходит перемена направления движения скорости вещества; наиболее типичными и эффективными являются четыре типа движений: в первых двух вещество изменяет только знак скорости относительно контраста, в двух последних имеет место изменение и знака контраста, и направления движения. Предложенная модель удовлетворительно воспроизводит все основные особенности конвективных полей интенсивности и скорости.

При исследовании структуры и динамики солнечной грануляции анализируют в основном флуктуации интенсивности и конвективных скоростей. Только в последнее время в связи с появлением инверсионных кодов появилась возможность изучать наблюдаемые пространственно-временные вариации физических параметров, описывающих состояние и физические условия в атмосфере, что позволяет строить полуэмпирические модели. Так, в работах [20, 22] изучалась стратификация осцилляций с оптической глубиной; в [13] построена полуэмпирическая модель исчезающей гранулы. В работах [12, 14] рассмотрена радиальная стратификация скорости движения вещества в центре яркой гранулы, которая постепенно исчезает: найден волновой компонент в высотной стратификации скорости, причем фаза колебаний с высотой почти не изменяется.

Однако комплексное исследование инверсионными методами наблюдаемой грануляции как проявления горизонтальной неоднородности фотосферы Солнца никем не проводилось.

Цель нашей работы — исследовать температурную инверсию, спектры мощности, природу флуктуаций температуры и скорости, вызванных чисто конвективными движениями, локализация источников этих вариаций. Пространственно-временные вариации физических параметров (температура, поле скоростей, давление и т.п.) воспроизведены путем решения неравновесной инверсной задачи переноса излучения с использованием стабилизаторов Тихонова [3].

Имея пространственно-временные вариации физических параметров, легко построить их спектры мощности, что дает возможность исследовать энергетику конвективных движений, преобразование энергии при ее переносе из конвективной зоны в верхние слои, режимы конвекции [8].

В нашем исследовании наряду со статистическим подходом, который нивелирует индивидуальные особенности неоднородностей, мы используем детерминированный подход.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Возмущение параметров (температура, поле скоростей) неоднородной атмосферы Солнца воспроизведены по профилям линии Fe I λ 5324.418 нм в центре диска Солнца с высоким пространственным ($0.5''$) и временным (9.3 с) разрешением. Наблюдения сделаны на Немецком вакуумном телескопе на Канарских островах Н. Г. Шукиной [10]. По профилям выбранной линии вдоль щели спектрографа рассчитан временной набор полуэмпирических моделей вдоль двух пространственных координат X , h , где X — координата вдоль поверхности Солнца, h — высота солнечной атмосферы.

Профили линии Fe I λ 5324.418 нм позволяют определить параметры модели от слоев образования континуума к области температурного минимума. Так как в верхних слоях атмосферы Солнца существенны эффекты отклонения от ЛТР, мы решали неравновесную инверсную задачу переноса излучения: в рамках каждой промежуточной модели, которая итерационно

уточняется, вычисляем неЛТР-параметры, которые затем используются в инверсной процедуре.

Поскольку температурная структура фотосферы Солнца определяется как волновыми, так и конвективными движениями, возникает задача корректного их разделения. В нашей работе разделение осцилляций проведено с помощью преобразования Фурье. Такое преобразование пространственно-временных вариаций позволяет с помощью линии ($\omega = v_s k_x$, где v_s — скорость звука) или гиперконуса Лемба ($\omega^2 = v_s^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$) 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: $\omega < v_{\text{conv}} k_z$ или $\omega^2 < v_{\text{conv}}^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$, где v_{conv} — максимальная (наблюдаемая или воспроизведенная) 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.

Дополнительная фазовая фильтрация фурье-образов пространственно-временных вариаций температуры и скорости позволяет изучать температурную инверсию конвективных потоков ($\Delta\varphi_{T-v} \approx 180^\circ$), акустические адиабатические колебания ($\Delta\varphi_{T-v} \approx 90^\circ$) и др.

Следует отметить, что выделение чисто конвективных движений по такой методике не совсем корректно, так как мы используем не точные значения, а оценку скорости конвективных движений. К счастью, полученные результаты слабо зависят от значения соответствующей оценки.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Конвективное поле температуры и скорости движения вещества. Конвективные потоки на масштабах грануляции будем представлять полем температуры и полем конвективных скоростей (распределение по X , h , t , где t — текущее время наблюдений). Структура конвективных потоков в представлении полем конвективных скоростей сохраняется вплоть до температурного минимума (рис. 1). 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. Согласно полученным результатам большинство конвективных потоков малых размеров ($\Delta X < 700$ км) доходит только до начала области проникающей конвекции (здесь и далее размеры потоков поданы в представлении полем скоростей на уровне образования континуума).

Но все же встречаются потоки малых размеров, достигающие до температурного минимума ($X = 25.5$ Мм, $\Delta X \approx 700$ км; $X = 54$ Мм, $\Delta X \approx 500$ км). Упомянутые два потока, особенно второй, четко проявляются в температурном представлении; причем инверсии температуры в верхних слоях этих потоков нет (рис. 2). Эти потоки, достигающие температурного минимума, — живут долго (10...20 мин).

В то же время восходящие потоки больших размеров, как правило, достигают температурного минимума ($X = 7.5$ Мм, $\Delta X \approx 1000$ км; $X = 14.5$ Мм, $\Delta X \approx 2000$ км; $X = 35$ Мм, $\Delta X \approx 1000$ км); в больших потоках осуществляется (за редким исключением) инверсия температуры. Кроме

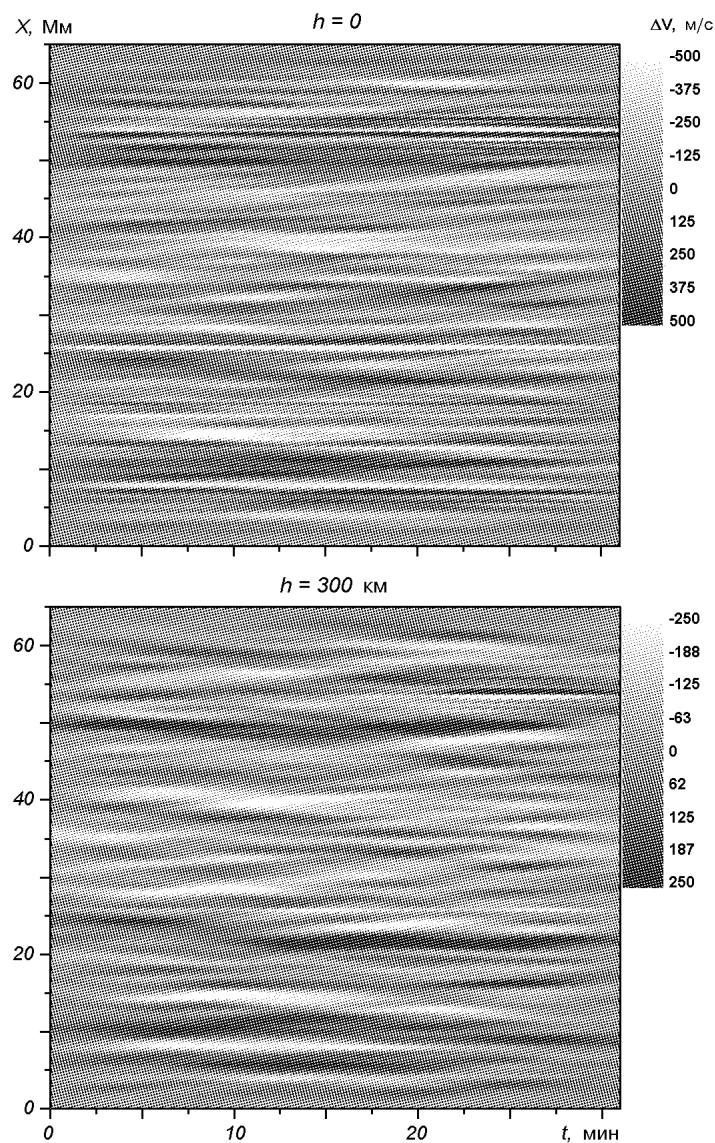


Рис. 1. Срезы поля конвективных скоростей на разных высотах

того, из рис. 1 легко видеть, что интенсивные нисходящие потоки зарождаются в верхних слоях фотосферы. А сама структура поля скоростей сохраняется на всей толще фотосферы ($X = 10, 21, 24.5, 50$ Мм, например). На уровне образования континуума ширина потоков порядка 1 Мм, в верхних слоях существенно больше (≈ 2 Мм). Отметим, что оценка горизонтальной протяженности потоков выполнена не по контрасту, а по конвективной скорости движения вещества. Большие потоки вещества в температурном представлении несколько шире.

На рис. 2 показаны срезы вариаций температуры на трех высотах: $h = 0, 300$ и 400 км. Температурная структура солнечной конвекции значительно сложнее: в нижней фотосфере $-50 < h < 100$ км она соответствует полю конвективных скоростей, т. е. более горячие элементы движутся вверх, а в более холодных межгранулах — вниз. Однако в области проникающей конвекции ($h > 100$ км [2]) проявляются отличительные

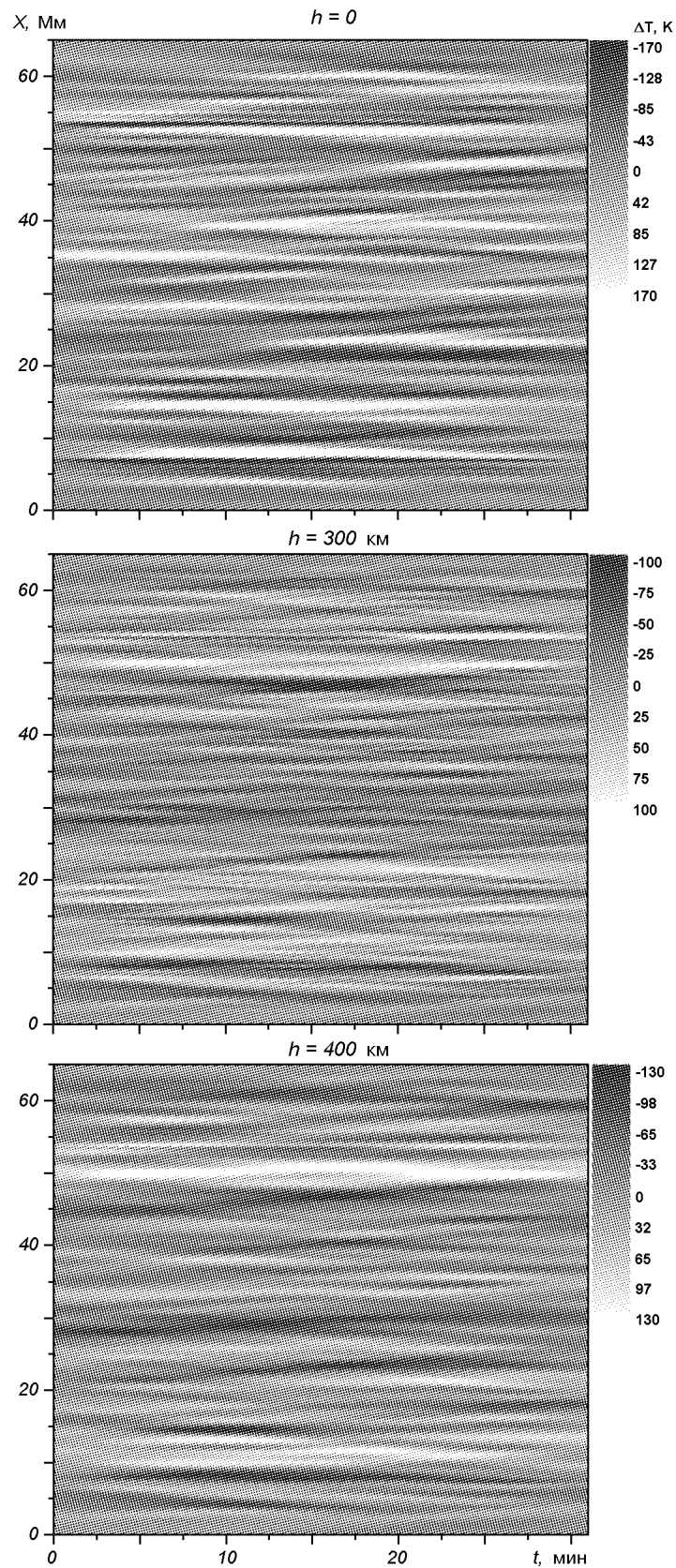


Рис. 2. Срезы поля вариаций температуры на разных высотах

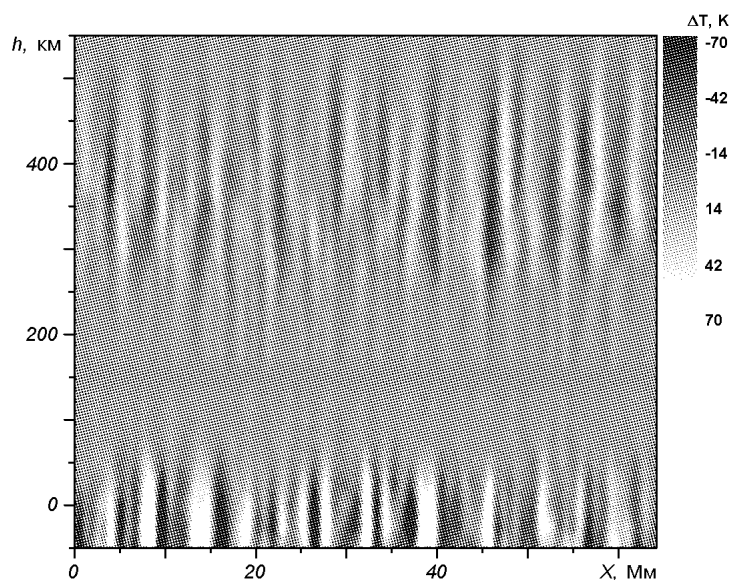


Рис. 3. Пространственная структура температурной инверсии в солнечной грануляции (сшива-
ние на высоте 150 км)

особенности температурного поля: для больших конвективных потоков имеет место инверсия температуры, последняя для некоторых потоков начинает проявляться уже в начале области проникающей конвекции. Пространственные масштабы областей с инверсией температуры сравнимы с грануляцией. Температурная структура потоков чувствительна к динамическим эффектам, что приводит к модуляции плотности и температуры вещества, и следовательно, модуляции его высвечивания. Поэтому в восходящих и нисходящих потоках наблюдается более чем одна температурная инверсия. Пространственно-временные вариации температуры в упомянутых областях носят флуктуационный характер. В случае больших развитых потоков такая флуктуационность выражена слабее.

Инверсию температуры в ее чистом виде, т. е. охлаждение восходящих и нагрев нисходящих потоков, легко получить путем фазовой фильтрации вариаций температуры и скорости. Мы выделили такие вариации, для которых разность фаз между скоростью и температурой лежит в пределах $0 \pm 20^\circ$ (классическая конвекция) и $180 \pm 20^\circ$ (инверсия температуры). Вертикальный разрез вариаций температуры в фотосфере Солнца после фазовой фильтрации показан на рис. 3. В нижней части рисунка ($h < 150$ км) изображены вариации температуры, которые происходят почти синфазно с конвективной скоростью вещества, в верхней части — вариации температуры, изменяющиеся во времени в противофазе со скоростью. Как видим, в нижней фотосфере доминирует классическая конвекция; в верхних слоях фотосферы осуществляется инверсия температуры. Естественно, структура температурной инверсии отображает структуру поля конвективных скоростей и проявляется преимущественно для относительно больших потоков, которые достигают температурного минимума и проходят его. Наибольший вклад в инверсию температуры дают верхние слои фотосферы: $250 < h < 500$ км. В колонках $X = 12, 13, 29, 54.5$ Мм изменения контраста температуры на противоположный не наблюдается; здесь имеет место инверсия скорости движения вещества — в верхних слоях над гранулой вещество движется вниз, для междугранул — наоборот [1].

В средней фотосфере проявляются мелкомасштабные неоднородности скорее всего конвективного происхождения: это остатки слабых потоков, которые растворяются уже в начале области проникающей конвекции. Действительно, результаты фильтрации: $\Delta\varphi_{T-V} \approx 0 \pm 20^\circ$ показывают, что в слоях 150...250 км имеет место увеличение амплитуды синфазных вариаций температуры и конвективной скорости вещества. Кроме того, формальное занижение звуковой скорости в 2-3 раза при $k - \omega$ фильтрации (при этом устраняются g-моды) не приводит к существенному изменению пространственной структуры вариаций. В верхней фотосфере эти неоднородности сглажены. Временные масштабы таких неоднородностей несколько меньше среднего времени жизни грануляции (рис. 2).

Спектры мощности. Рассмотрим энергетику конвективных движений. Для этого будем использовать воспроизведенные пространственно-временные вариации температуры и лучевой скорости конвективных движений. Мощность конвективных движений на определенной глубине зависит от временной и пространственной частоты:

$$P_h = \iint d\omega dk P(\omega, k).$$

В нашем исследовании будем использовать мощность, просуммированную по пространственной частоте:

$$P_h(\omega) = \int dk P(\omega, k).$$

Изменение мощности конвективного компонента с высотой показано на рис. 4. Как следовало ожидать, наибольшая мощность вариаций температуры сосредоточена в слоях нижней фотосферы, где наблюдается классическая

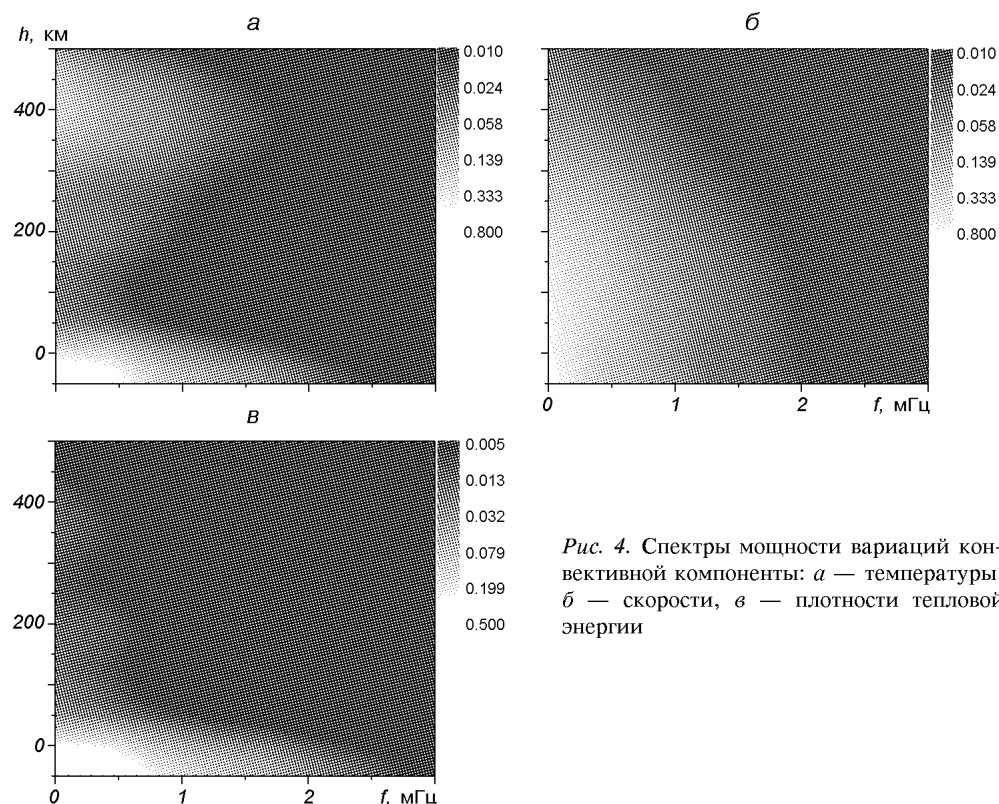


Рис. 4. Спектры мощности вариаций конвективной компоненты: a — температуры, b — скорости, v — плотности тепловой энергии

картина конвекции. С высотой вариации конвективного компонента температуры уменьшаются, достигая минимума при $h \approx 100$ км (этим слоям соответствует начало области проникающей конвекции). В средней и верхней фотосфере мощность вариаций увеличивается, что вызвано инверсией температуры в больших восходящих и нисходящих конвективных потоках, а также образованием более мелкомасштабной конвективной составляющей. С высотой изменяется также частотный диапазон, в котором осуществляются конвективные движения. Так, ширина полосы, в пределах которой мощность уменьшается в десять раз, становится 3 мГц в нижней фотосфере, 1 мГц в начале области проникающей конвекции и 2 мГц в верхних слоях фотосферы.

Спектр мощности вариаций скорости конвективных движений (рис. 4, б) убывает с высотой, так как в верхних слоях фотосферы возникают горизонтальные потоки, из которых формируются межгранулы.

Как показывают соответствующие оценки, вклад g-мод в энергетику конвективных движений незначительный.

Естественно, возникает вопрос: какова природа инверсии температуры в верхних слоях фотосферы, не связана ли температурная инверсия конвективной составляющей с наличием дополнительных источников, порождающих температурные вариации. С этой целью рассмотрим спектры мощности, приведенные к единице объема газовой среды (они характеризуют плотность тепловой энергии конвективных движений). Распределение плотности тепловой энергии показано на рис. 4, в. Согласно полученной зависимости плотность тепловой энергии резко уменьшается с высотой; в верхних слоях фотосферы прослеживаются два дополнительных максимума мощности, однако они на два-три порядка меньше максимума, наблюдаемого в нижней фотосфере. Таким образом, в слоях средней фотосферы выявляются дополнительные источники температурных возмущений, отвечающие за инверсию температуры ($h \approx 350$ км) и образование мелкомасштабной составляющей ($h \approx 200$ км); однако плотность мощности этих источников более чем на два порядка меньше, чем плотность мощности, создаваемой конвективными движениями в нижней фотосфере.

Инверсия температуры указывает на формирование нисходящих потоков: поскольку на высотах больше 450 км (рис. 4, в) источники флуктуаций температуры отсутствуют, можно утверждать, что в этих слоях преобладают горизонтальные потоки. Более того, температурная инверсия приводит к дополнительному возмущению среды из-за резкого изменения плавучести восходящих потоков, что может служить в качестве одного из механизмов возбуждения или же энергетической подпитки гравитационных колебаний в конвективно устойчивых слоях фотосферы.

В верхних слоях фотосферы вариации поля температуры наряду с инверсией обусловлены также неадиабатическими флуктуациями энтропии, но последние порождают акустические колебания, которые мы исключаем при рассмотрении конвективных движений.

Таким образом, инверсия температуры, наблюдаемая над гранулами и межгранулами в верхних слоях фотосферы, имеет чисто конвективное происхождение.

Мы рассмотрели пространственно-временные вариации температуры и скорости конвективного компонента. Возможно, колебательные движения также дают свой вклад в вариации рассматриваемых величин, вызывая, например, дополнительную инверсию температуры в верхних слоях фотосферы.

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 $k - \omega$ и фазовой фильтрации выделена конвективная составляющая. Исследовано конвективное поле температуры и скоростей солнечной грануляции. Получены следующие выводы.

1. Большинство конвективных потоков малых размеров доходит только до начала области проникающей конвекции. Но все же встречаются потоки малых размеров, которые достигают слоев температурного минимума: это долгоживущие потоки (время существования порядка 10...20 мин).

2. В области проникающей конвекции для больших потоков происходит инверсия температуры вещества в слоях средней и верхней фотосферы. Пространственно-временные вариации температуры в областях, где осуществляется инверсия, носят флуктуационный характер; для больших, развитых потоков такая флуктуационность выражена слабее. В средней фотосфере наблюдаются мелкомасштабные неоднородности.

3. По спектрам пространственно-временных вариаций температуры и скорости исследована энергетика конвективных движений. Спектр мощности вариаций скорости конвективных движений убывает с высотой.

Наибольшая мощность вариаций температуры сосредоточена в слоях нижней фотосферы; с высотой мощность уменьшается, достигая минимума в начале области проникающей конвекции; в средней и верхней фотосфере мощность вариаций увеличивается.

В верхних конвективно устойчивых слоях фотосферы выявлены дополнительные источники температурных возмущений, возможно отвечающие за инверсию температуры и образование мелкомасштабных неоднородностей; однако плотность мощности этих источников более чем на два-три порядка меньше плотности мощности, создаваемой конвективными движениями в нижней фотосфере.

Инверсия температуры, наблюдаемая в слоях средней и верхней фотосферы в потоках больших размеров, и мелкомасштабные неоднородности средней фотосферы имеют конвективное происхождение.

1. Костык Р. И., Щукина Н. Г. Тонкая структура конвективных движений в фотосфере Солнца: наблюдения и теория // Астрон. журн.—2004.—81, № 9.—С. 846—859.
2. Стоділка М. І. Температурна структура реальної сонячної грануляції // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 5.—С. 407—416.
3. Стоділка М. І. Тихонівські стабілізатори в інверсних задачах спектральних досліджень // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 4.—С. 334—343.
4. Стоділка М. І. Діагностика внутрішніх гравітаційних хвиль у фотосфері Сонця // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—21, № 3.—С. 197—208.
5. Deubner F.-L. Has turbulent granular decay been observed? // Astron. and Astrophys.—1988.—204, N 1-2.—P. 301—305.
6. Deubner F.-L., Fleck B. Dynamics of the solar atmosphere. I. Spatio-temporal analysis of waves in the quiet solar atmosphere // Astron. and Astrophys.—1989.—213, N 1-2.—P. 423—428.
7. Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al. Spatial relation between the 5-minute oscillations and granulation patterns // Astron. and Astrophys.—1996.—313, N 1.—P. 297—305.
8. 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.
9. Karpinsky V. N. Properties of the solar granulation // Solar photosphere: structure, convection, and magnetic fields / Ed. by J. O. Stenflo. — Dordrecht: Kluwer, 1990.—P. 67.
10. 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.
11. Komm R., Mattig W., Nesis A. The decay of granular motions and the generation of gravity waves in the solar photosphere // Astron. and Astrophys.—1991.—252, N 2.—P. 827—834.

12. *Koza J., Bellot Rubio L. R., Kucera A., et al.* Evolution of temperature in granule and intergranular space // *Astron. Nachr.*—2003.—**324**, N 4.—P. 349—351.
13. *Koza J., Bellot Rubio L. R., Kucera A., et al.* Line-of-sight velocity in a semiempirical model of a disappearing granule // *Solar variability: from core to outer frontiers: The 10th European Solar Physics Meeting, 9—14 September 2002, Prague, Czech Republic. Prague, 2002.*—Vol. 1.—P. 443—446.
14. *Kucera A., Koza J., Bellot Rubio L. R.* Velocity field in the intergranular atmosphere // *Hvar Observ. Bull.*—2004.—**28**, N 1.—P. 19—26.
15. *Nesis A., Hammer R., Roth M., Schleicher H.* Dynamics of the solar granulation. VIII. Time and space development // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**396**.—P. 1003—1010.
16. *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.
17. *Nesis A., Hammer R., Roth M., et al.* Dynamics of the solar granulation — On the Time Variation of the Granular Flow // *Solar Phys.*—2001.—**200**, N 1/2.—P. 11—22.
18. *Nesis A., Hammer R., Roth M., Schleicher H.* Development of the dynamics of solar granulation in space and time // *American Geophysical Union, Spring Meeting.*—2001.—Abstract N SP41B-03.
19. *Nesis A., Hanslmeier A., Hammer R., et al.* Dynamics of the solar granulation. 2: A quantitative approach // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**279**, N 2.—P. 599—609.
20. *Rodriguez Hidalgo I., Ruiz Cobo B., Collados M., et al.* Lagrangian and Eulerian stratifications of acoustic oscillations through the solar photosphere // *Astrophys. J.*—2001.—**547**, N 1.—P. 491—502.
21. *Rodriguez Hidalgo I., Ruiz Cobo B., Collados M., et al.* Granular and intergranular model atmospheres from inversion of solar two-dimensional spectroscopic data // *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*—1999.—**173**.—P. 313—316.—(Proc. on Theory and Tests of Convection in Stellar Structures / Eds A. Gimenez, E. F. Guinan, B. Montesinos).
22. *Ruiz Cobo B., Rodriguez Hidalgo I., Collados M.* Stratification with optical depth of the 5 minute oscillations through the solar photosphere // *Astrophys. J.*—1997.—**488**, N 1.—P. 462—472.
23. *Rutten R. J., de Wijn A. G., Sutterlin P.* DOT tomography of the solar atmosphere II. Reversed granulation in Ca II H // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**416**, N 1.—P. 333—340.
24. *Zhugzhda Y. D.* Waves and shear flows // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—2003.—**22**, N 4-5.—P. 593—606.
25. *Salucci G., Bertello L., Cavallini F., et al.* The height dependence of intensity and velocity structures in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**285**, N 1.—P. 561—576.

Поступила в редакцию 05.03.06