

УДК 523.9

Микротурбулентность в солнечной грануляции

М.И. Стодилка, М.М. Ковальчук

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко, ул. Кирилла и Мефодия, 8, г. Львов, 79005

Поступила в редакцию 9 июня 2003 г.

Аннотация. В работе проведено исследование поля микротурбулентной скорости реальной солнечной грануляции с использованием профилей линии λ 523.42 нм FeI с высоким пространственным разрешением; параметры неоднородной атмосферы Солнца воспроизведены путем решения инверсной не-ЛТР задачи переноса излучения с использованием тихоновских стабилизаторов. В начале области проникающей конвекции микротурбулентность минимальна; она увеличивается в сверхадиабатическом слое и в верхней фотосфере. Большая микротурбулентность интенсивных потоков вызывает в верхней фотосфере более резкое понижение температуры, что в случае межгранул приводит к второй инверсии температуры.

MICROTURBULENCE IN THE SOLAR GRANULATION, by *M.I. Stodilka and M.M. Kovalchuk*. In the work we investigate the microvelocity field of a real solar granulation by using profiles of λ 523.42 nm FeI with a high spatial resolution; parameters of the inhomogeneous atmosphere are reproduced by means of solving the NLTE inverse radiation transfer problem using Tikhonov's stabilizers. The microturbulent velocity is minimal at the beginning of the overshooting convection region; it is being encreasing in a superadiabatic layer and a upper photosphere. The great microturbulence of the intensive flows causes the more sharp temperature decreasing in the upper photosphere which leads to the second temperature inversion in the case of intergranular lanes.

Ключевые слова: Солнце, грануляция, перенос излучения, инверсная задача, микротурбулентная скорость

1 Введение

Температурная стратификация солнечной фотосферы на данный момент исследована относительно хорошо (Фрутиджер и др., 2000; Борреро и др., 2002), чего нельзя сказать о поле скоростей.

В связи с ограниченным пространственным разрешением наблюдений невозможно прямо воспроизвести поле скоростей на малых масштабах; это заставляет вводить такие параметры как микро- и макротурбулентность. Эти величины традиционно вводятся, чтобы учесть дополнительные источники уширения линий.

Предыдущие исследования (Вернацца и др., 1981) дают высокие значения микротурбулентной скорости в нижней фотосфере ($V_{micro} \approx 2$ км/с при $h \approx 0$ км), которая уменьшается с высотой до 0.8 км/с в области температурного минимума, а потом снова увеличивается в хромосфере. Всесторонние исследования микротурбулентной скорости по линиям железа, выполненные Э.А. Гуртовенко

и Р.И. Костыком, дали меньшее значение микротурбулентной скорости в нижней фотосфере ≈ 1 км/с.

Результаты ранних исследований поля скоростей получены в основном путем синтеза профилей линий. В настоящее время при исследовании атмосфер Солнца и звезд начали интенсивно применяться инверсные методы, которые позволяют получать стратификацию параметров моделей атмосферы и изучать таким образом свойства конвекции на поверхности звезды.

Воспроизведение V_{micro} в гранулах и межгранулах по профилям линий железа выполнено в (Фрутиджер и др., 2000); однако, полученные результаты, как считают авторы, не вызывают доверия. Поэтому была выбрана самая простая модель микротурбулентности – микротурбулентная скорость не изменяется с высотой: в средней грануле $V_{micro} \approx 0.48 \div 0.65$ км/с, в межгрануле – $V_{micro} \approx 0.36 \div 1.02$ км/с для разных многокомпонентных моделей солнечной грануляции. Согласно исследованиям (Борреро и др., 2002), микротурбулентность средних гранул и межгранул слабо изменяется с высотой и составляет 0.23 км/с в средней грануле и 2.0 км/с – в средней межгрануле.

В данной работе исследования микротурбулентности выполнено по профилям с высоким пространственным разрешением, что позволяет изучать свойства не искусственной и не средней, а реальной солнечной грануляции.

Цель нашей работы – исследовать микротурбулентность реальной солнечной грануляции на разных высотах фотосферы. Работа прямо связана с проблемой влияния конвекции на физические условия в атмосфере Солнца и звезд, изучения физических условий в неоднородной солнечной атмосфере.

2 Основы метода

Настоящее исследование выполнено путем решения не-ЛТР инверсной задачи переноса излучения с использованием модифицированных функций отклика (Стодилка, 2002); в инверсный код внесены тихоновские стабилизаторы, что снимает ряд проблем самих инверсных методов и существенно повышает достоверность воспроизводимых результатов.

Инверсные методы страдают двумя основными недостатками: 1. проблема осцилляций решений и инициализация кода – полученные результаты зависят от начальных прикидок; 2. проблема выбора оптимального числа свободных параметров – при их увеличении легко получить профили идентичные наблюдаемым, но такой подход часто приводит к нереальным стратификациям исследуемых параметров. Эти трудности легко обойти путем введения тихоновских стабилизаторов. В таком случае целевая функция имеет вид:

$$\chi^2 = \chi_0^2 + \alpha S,$$

где: χ_0^2 – стандартная целевая функция; она есть мерой близости экспериментальных и теоретических профилей линий, S – тихоновский стабилизатор (или их линейная комбинация), α – параметр регуляризации. Тихоновские стабилизаторы позволяют получать решения из множества гладких функций и учитывают а priori информацию о решении.

Линеаризация χ^2 дает поправку к параметрам (температура, поле скоростей), которые описывают промежуточную модель неоднородной атмосферы; промежуточная модель итерационно уточняется.

Для нахождения газового давления использовали уравнение гидростатики с учетом дополнительного давления, создаваемого микротурбулентностью.

В рамках каждой промежуточной модели решали неравновесную задачу переноса излучения (методом многоуровневой ускоренной L – итерации). Полученные не-ЛТР параметры вводили в инверсную задачу, то есть в инверсной задаче искали стратификацию параметров модели по реальным населенностям уровней.

В связи с ограниченным пространственным разрешением наблюдений невозможно воспроизвести поле скоростей на малых масштабах. Поэтому мы использовали такой классический параметр,

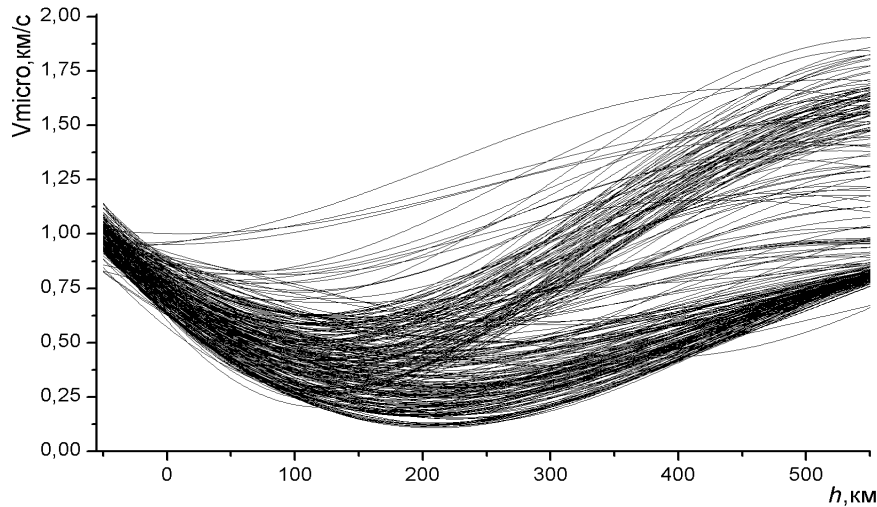


Рис. 1. Стратификация микротурбулентной скорости в солнечной грануляции

как микротурбулентная скорость, которая меняется с высотой и учитывает дополнительное уширение линии (мы рассматривали изотропную модель микротурбулентности), а также скорость вдоль луча зрения (V_{los}), обусловленную, в основном, конвективными и волновыми движениями. Этот параметр вызывает дальнейшее уширение линии и формирует ее асимметрию. Макротурбулентной скорости мы не вводили (она учитывает уширение линий макродвижениями); в нашем случае за макродвижения отвечает V_{los} .

3 Экспериментальные данные

В данном исследовании мы использовали результаты наблюдений в линии $\lambda 523.4185$ нм с высоким пространственным разрешением, выполненные Н.Г. Щукиной на германском вакуумном башенном телескопе VTT. Наблюдения проводились вблизи центра солнечного диска в невозмущенной области. После соответствующей обработки (Хоменко и др., 2001) мы получили набор профилей, нормированных на средний континуум. Для каждого профиля применили инверсную процедуру, что позволило воспроизвести стратификацию температуры и поле скоростей в фотосфере Солнца вдоль двух пространственных координат (X, h).

4 Обсуждение результатов и выводы

Применение инверсной процедуры к профилям линии $\lambda 523.4185$ нм FeI дает возможность воспроизвести параметры неоднородной фотосферы Солнца в интервале высот $-50 \text{ км} \leq h \leq 500 \text{ км}$. На рис. 1 представлены полученные зависимости V_{micro} от h для 256 вертикальных колонок модели шириной 250 км каждая. В нижней фотосфере микротурбулентная скорость возрастает до 1 км/сек, что качественно согласуется с моделью микротурбулентности, предложенной в (Гуртовенко, Костык, 1989). В нижних фотосферных слоях ($h < 0$ км) существует сверхадиабатический слой ($\nabla - \nabla_{ad} \approx 1$), в котором имеет место конвективная неустойчивость, что приводит к возрастанию микротурбулентности и флуктуаций термодинамических параметров газовой среды.

В высших слоях микротурбулентность уменьшается и принимает наименьшее значение в начале области проникающей конвекции ($100 \text{ км} < h < 200 \text{ км}$). В области проникающей конвекции

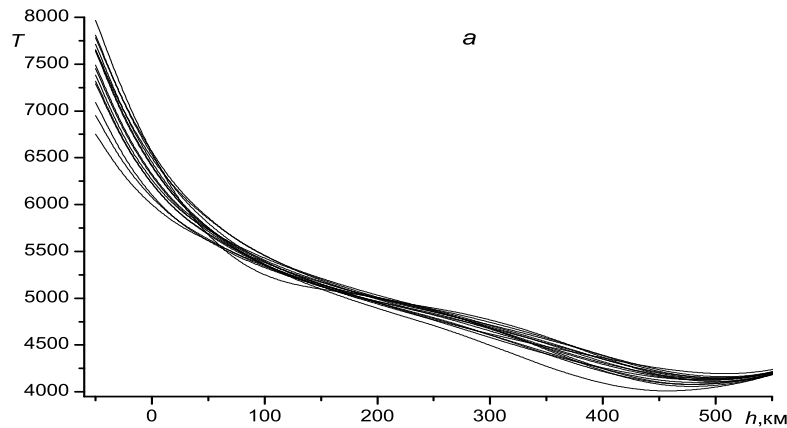


Рис. 2. (а)

($h > 100$ км) температура для большинства гранул ниже температуры межгранул; для этой области характерны большие горизонтальные (гранула-межгранула) флуктуации микротурбулентной скорости: $\Delta V_{micro} \approx 1$ км/с (рис. 1).

В более высоких слоях области проникающей конвекции микротурбулентная скорость возрастает, а ее зависимость от высоты раздваивается: нижняя ветвь — это относительно слабые потоки вещества, верхнюю часть которой (большая микротурбулентность) составляют в основном межгранулы, нижняя часть представлена главным образом гранулами. Минимальное значение микротурбулентной скорости ~ 0.1 км/с при $h \approx 200$ км. Как видим, в гранулах с неинтенсивными восходящими потоками потоки вещества в начале области проникающей конвекции наиболее ламинарны: $100 \text{ км} \leq h \leq 300 \text{ км}$. Верхнюю ветвь представляют более интенсивные потоки ($|V_{los}| \geq 0.5$ км/с) и снова за нижнюю часть ветви отвечают гранулы. Как видим, в межгранулах микротурбулентность усиливается, а для интенсивных потоков характерны большие градиенты микротурбулентной скорости, что свидетельствует о сильной затурбулентизованности газовой среды в области температурного минимума, особенно в межгранулах и прилегающих к ним областях, тогда как флуктуации температуры в этой области, согласно нашим исследованиям, уменьшаются. В самом деле, контраст грануляции при переходе к краю солнечного диска постепенно падает.

Отметим, что в классической модели микротурбулентности V_{micro} принимает минимальное значение в несколько высших слоях и сам минимум довольно таки размыт (300 км ÷ 400 км). А при воспроизведении физических условий в грануляции исследователи часто используют самую простую модель (Фрутиджер и др., 2000; Борреро и др., 2002).

Наряду с дополнительным уширением фраунгоферовых линий микротурбулентность играет немаловажную роль в гидростатике атмосферы Солнца. Поскольку $P_{turb.}/P_{gas} \approx (V_{turb.}/V_T)^2$, где: $V_{turb.} = V_{micro}$ — турбулентная скорость, а V_T — тепловая скорость вещества, то относительный вклад в общее давление более ощутим в области температурного минимума. Но гидростатическое равновесие определяется не столько самим давлением, сколько его градиентом. В нижней фотосфере градиент V_{micro} отрицателен, что содействует поддержанию соответствующих слоев, в то же время в верхней фотосфере он положителен и отрицательный градиент газового давления должен увеличиться (по модулю), чтобы скомпенсировать дополнительную направленную вниз силу, вызванную увеличением турбулентности. На рис. 2 показана температурная стратификация вдоль вертикальных колонок неоднородной модели Солнца; в случае а) микротурбулентность высокая (особенно в верхних слоях); в случае б) — микротурбулентность низкая. Для гранул (рис. 2а — верх-

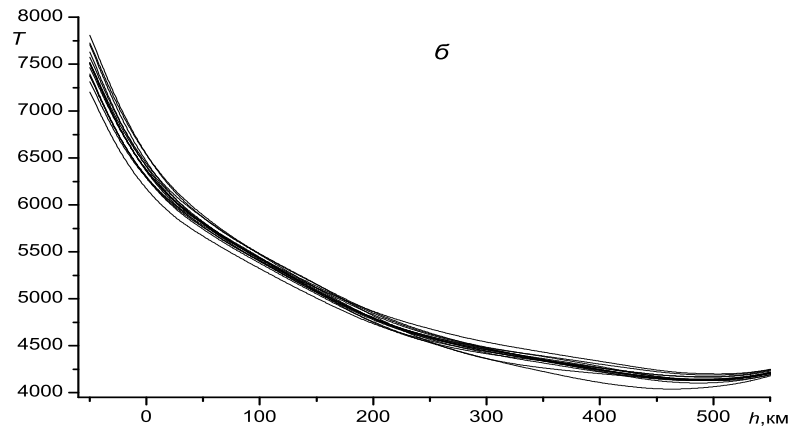


Рис. 2. (б). Зависимость температуры от высоты в солнечной грануляции: а – высокая микротурбулентность, б – низкая микротурбулентность

няя часть зависимостей при $h < 100$ км), которые имеют в верхней фотосфере высокие скорости конвективного движения, характерно возрастание микротурбулентности в этих же слоях. Температура таких потоков в верхних слоях более резко уменьшается за счет выполнения газом работы при расширении, кроме того, такое более резкое уменьшение температуры компенсирует эффекты, вызванные увеличением микротурбулентности. Для нисходящих сильнотурбулентных потоков (рис. 2а – нижняя часть зависимостей при $h < 100$ км) также характерно понижение температуры в этой области, что приводит к второй инверсии температуры межгранул; первая инверсия – начало области проникающей конвекции (межгранулы горячее гранул), вторая – в высших слоях: $h > 250$ км – температура ряда межгранул резко уменьшается и они снова становятся холоднее окружающей среды. В случае низкой микротурбулентности резкое уменьшение температуры в верхней фотосфере отсутствует (рис. 2б); причём большую часть колонок, представленных на рис. 2б, составляют гранулы, которым соответствует нижняя часть зависимостей, представленных на рис. 1.

Таким образом, как следует из полученных результатов, микротурбулентность оказывает немаловажное влияние на температурную структуру неоднородной атмосферы Солнца.

Мы рассмотрели изотропную модель микротурбулентности и при этом только в центре солнечного диска. Неизотропную модель можно получить при аналогичном дополнительном изучении на краю диска, однако, решение инверсной задачи при этом существенно усложняется, так как необходимо одновременно рассматривать не одну, а несколько вертикальных колонок неоднородной атмосферы звезды.

5 Выводы

1. Воспроизведена микротурбулентность реальной солнечной грануляции.
2. В начале области проникающей конвекции значения микротурбулентной скорости минимальны; а слабые восходящие потоки вещества наиболее ламинарны. Микротурбулентность резко возрастает в сверхадиабатическом слое и в верхней фотосфере (область температурного минимума). Для верхней части области проникающей конвекции характерны большие горизонтальные (гранула-межгранула) флуктуации микротурбулентной скорости.
3. Большая микротурбулентность интенсивных потоков вызывает в верхней фотосфере более резкое понижение температуры, что в случае межгранул приводит ко второй инверсии температу-

ры.

Литература

- Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. // *Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов*. К.: Наукова думка. 1989. С. 200.
- Борреро и Беллот Рубио (Borrero J.M. & Bellot Rubio L.R.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 385. P. 1056.
- Вернацца и др. (Vernazza J., Avret E., Loezer R.) // *Astrophys.J.Suppl.Ser.* 1981. V. 45. P. 635.
- Стодилка (Stodilka M.I.) // *Journal of Phys. Studies.* 2002. V. 6. P. 435.
- Фрутиджер и др. (Frutiger C., Solanki S.K. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 358. P. 1109.
- Хоменко и др. (Khomenko E.V., Kostik R.I., Shchukina N.G.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 369. P. 660.