

УДК 524.31.01-36

## ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОТУРБУЛЕНТНОСТИ ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ F ЗВЕЗД

© 2019 г. З. А. Самедов<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Шемахинская астрофизическая обсерватория НАНА, Шемаха, Азербайджан

Поступила в редакцию 06.05.2019 г.; после доработки 28.05.2019 г.; принята к публикации 31.05.2019 г.

Методом моделей атмосфер исследована микротурбулентность в атмосферах F звезд. Микротурбулентная скорость определена на основе сравнения вычисленных и наблюдаемых эквивалентных ширин спектральных линий Fe II. Вычисления эквивалентных ширин спектральных линий проводились с помощью программы *DASA*, разработанной в Крымской астрофизической обсерватории РАН. Обнаружена обратная зависимость микротурбулентной скорости  $\xi_t$  от ускорения силы тяжести  $g$  в атмосферах звезд, т.е. с увеличением  $g$  наблюдается уменьшение  $\xi_t$ .

DOI: 10.1134/S0004629919110057

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Уже давно известно, что при корректном учете всех механизмов уширения невозможно полностью объяснить наблюдаемые профили спектральных линий в спектрах звезд. Поэтому был введен еще один механизм — турбулентность. В астрофизике турбулентность считается одним из механизмов, расширяющих спектральную линию. Условно различают макро- и микротурбулентность. Макротурбулентность, подобно вращению, расширяет профили линий, не меняя величину эквивалентных ширин. Эквивалентные ширины линий зависят от микротурбулентности. Поэтому для анализа химического состава необходимо знать микротурбулентную скорость. Таким образом, исследование микротурбулентности важно для анализа химического состава звезд. Микротурбулентность определяется по доплеровским ширинам спектральных линий  $\Delta\lambda_D$ . Эмпирически найдено, что наблюдаемые доплеровские ширины спектральных линий нельзя объяснить одними только тепловыми движениями. Приходится вводить посредством выражения

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2RT}{M} + \xi_t^2}$$

величину  $\xi_t$ , интерпретируемую как “микротурбулентная скорость”.

В недавних исследованиях [1] изучена природа микро- и макротурбулентности. В [1] обнаружено,

что в 3D модели солнечной фотосферы рассчитанные и наблюдаемые профили спектральных линий полностью совпадают, и нет нужды вводить понятия микро- и макротурбулентности. Классические понятия микро- и макротурбулентности полностью объясняются конвективно-грануляционными полями скоростей, вибрационными движениями фотосферы, неоднородностью температуры.

Спектры избранных звезд были получены на 2-м телескопе ШАО НАНА, с помощью спектрографа с ПЗС матрицей ( $R = 28\,000$ ,  $S/N = 200$ ). Спектры обработаны программой *DESN*. Были измерены эквивалентные ширины бальмеровских линий и линий Fe II.

### 2. ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И УСКОРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Эффективная температура  $T_{\text{eff}}$  звезд и ускорение силы тяжести на их поверхностях  $\lg g$  определялись методом моделей атмосфер, описанным в [2]. При этом выполнялось:

1. сравнение наблюдаемых и теоретически вычисленных значений эквивалентных ширин бальмеровских линий;
2. сравнение наблюдаемых и теоретических значений индекса  $[c1]$ ;
3. сравнение наблюдаемых и теоретических значений индекса  $Q$ .

\*E-mail: zahir.01@mail.ru

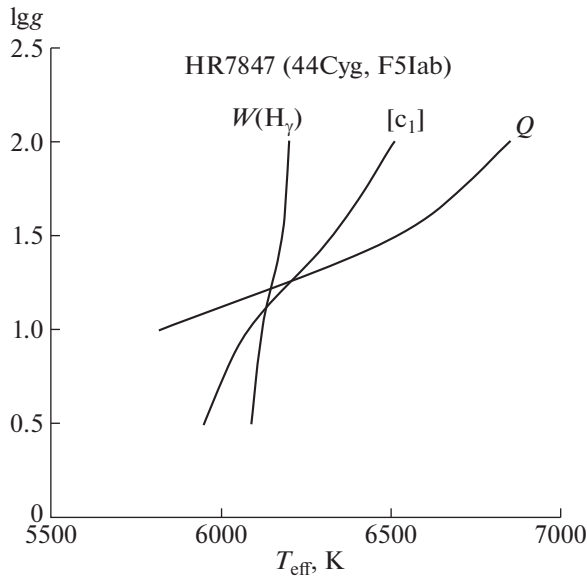


Рис. 1. Диаграмма для определения параметров  $T_{\text{эф}}$  и  $\lg g$  звезды HR 7847 (44 Cyg, F5 Ib).

В узкополосной четырехцветной фотометрической системе  $uvby$  и в фотометрической системе  $UBV$  индексы  $[c1]$  и  $Q$  определяются формулами  $[c1] = c1 - 0.2(b - y)$  и  $Q = (U - B) - 0.72(B - V)$ , соответственно. Система  $uvby$  была дополнена величиной  $\beta$  для измерения интенсивности линий  $H_{\beta}$ . Путем сравнения значений указанных выше индексов, найденных из наблюдений, с теоретическими значениями, были определены значения  $T_{\text{эф}}$  и  $\lg g$ . Наблюдаемые значения  $[c1]$ ,  $Q$  и  $\beta$  находим с помощью каталога [3]. Расчеты показателей цвета в системах  $UBV$  и  $uvby$ , необходимые для вычисления индексов  $Q$  и  $[c1]$ , выполнили Кастелли и Куруц [4]. Теоретические значения  $\beta$ -индекса взяты у Кастелли и Куруца [5]. Расчеты эквивалентных ширин бальмеровских линий приведены у Куруца [6].

На рис. 1 в качестве примера представлена диаграмма  $T_{\text{эф}} - \lg g$  для звезды HR 7847 (44 Cyg, F5 Ib). На основании рис. 1 были приняты следующие значения параметров атмосферы:  $T_{\text{эф}} = 6200 \pm 200$  K,  $\lg g = 1.3 \pm 0.2$ .

### 3. МИКРОТУРБУЛЕНТНАЯ СКОРОСТЬ

Как было показано в [7], для определения скорости микротурбулентности  $\xi_t$  необходимо иметь список линий какого-либо атома или иона в широком диапазоне эквивалентных ширин  $W_{\lambda}$ , а скорость микротурбулентности  $\xi_t$  подбирается так, чтобы определяемые содержания элемента не показывали хода с ростом  $W_{\lambda}$ . Самыми многочисленными в спектрах исследуемых звезд оказались линии нейтрального железа Fe I, далее линии ионизованного железа Fe II. Однако линии нейтрального

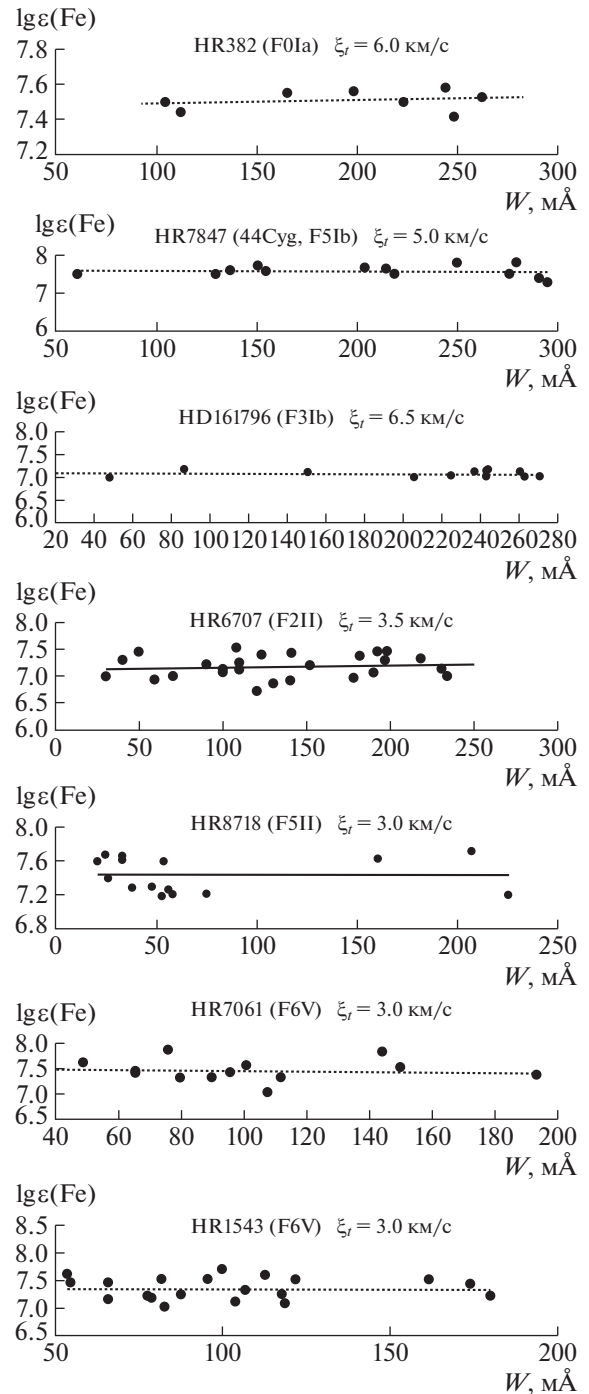


Рис. 2. Примеры определения параметра микротурбулентности  $\xi_t$  для избранных звезд.

железа Fe I могут быть подвержены значительным отклонениям от ЛТР. Если не учитывать отклонения от ЛТР, то это приведет к занижению определяемого содержания железа  $\lg \epsilon(\text{Fe})$ . Впервые для F-сверхгигантов это было показано Боярчуком и др. [8], позже для F- и G-звезд подтверждено другими авторами (см., напр., [9]). Интересно, что в отличие от линий Fe I, линии Fe II оказались

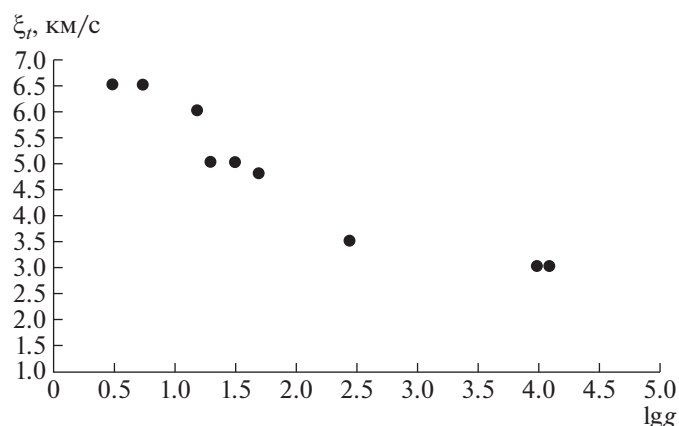


Рис. 3. Зависимость микротурбулентной скорости  $\xi_t$  от ускорения силы тяжести  $g$ .

нечувствительными к не-ЛТР эффектам. Поэтому при определении микротурбулентной скорости в атмосфере звезд мы использовали линии Fe II.

Как показали Любимков и Самедов [10], параметр микротурбулентности  $\xi_t$  в атмосферах F-сверхгигантов может расти с высотой. Чем сильнее линия, тем заметнее действие этого эффекта. Однако для сравнительно слабых линий этой зависимостью можно пренебречь и считать параметр  $\xi_t$  в атмосфере постоянным. Поэтому при определении  $\xi_t$  мы используем только достаточно слабые линии Fe II с эквивалентными ширинами  $W < 250 \text{ m\AA}$ . Эти линии образуются в глубоких слоях, которые вполне можно считать плоскопараллельными слоями, находящимися в состоянии ЛТР.

На основе модели атмосферы Куруца [6], соответствующей найденным параметрам  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$ , мы рассчитали содержание  $\lg \varepsilon$  (Fe II) для нескольких значений  $\xi_t$ . Содержание железа определено

Таблица 1. Фундаментальные параметры исследованных звезд

Звезда	Sp	$T_{\text{eff}}, K$	$\lg g$	$\xi_t, \text{ км/с}$	$\lg \varepsilon$ (Fe)
HR 382	F0 Ia	6800	1.2	6.0	7.48
HR 6978	F7 Ib	6000	1.7	4.8	7.49
HR 690	F7 Ib	6250	1.5	5.0	7.38
HR 7847	F5 Iab	6200	1.3	5.0	7.58
HR 6685	F2 Ib	6300	0.5	6.5	6.94
HD 161796	F3 Ib	6550	0.75	6.5	7.03
HR 6707	F2 II	6670	2.45	3.5	7.21
HR 8718	F5 II	6800	4.0	3.0	7.47
HR 1543	F6 V	6450	4.1	3.0	7.40
HR 7061	F6 V	6400	4.0	3.0	7.44

на основе сравнения вычисленных и наблюдаемых эквивалентных ширин спектральных линий Fe II. Вычисления эквивалентных ширин спектральных линий проводились с помощью программы DASA, разработанной в Крымской астрофизической обсерватории РАН. Мы использовали для спектральных линий атомные данные из базы данных VALD-2 [11].

На рис. 2 показано определение параметра  $\xi_t$  для нескольких F-звезд. Ошибка определения  $\xi_t$  составляет  $\pm 0.5 \text{ км/с}$ . В табл. 1 приведены фундаментальные параметры исследованных звезд.

Рассмотренные звезды исследованы другими авторами (см., напр., [12–14]). Метод, который мы применяем, подробно описан в [2] и точность этого метода обоснована. Поэтому мы считаем, что результаты, которые мы получили, являются более предпочтительными.

На рис. 3 представлена зависимость микротурбулентной скорости  $\xi_t$  от ускорения силы тяжести  $g$ . Видно, что с увеличением  $g$  уменьшается  $\xi_t$ . Для звезд главной последовательности мы получили микротурбулентную скорость  $3 \text{ км/с}$ . Но ожидается, что это значение должно быть  $< 3 \text{ км/с}$ . Вероятной причиной этого несоответствия является ограничение наблюдений (спектральное разрешение).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методом моделей атмосфер определены эффективная температура, ускорение силы тяжести и содержание железа в атмосферах звезд спектрального класса F (табл. 1).
2. По линиям Fe II вычислена скорость микротурбулентности (табл. 1).
3. Обнаружено, что микротурбулентная скорость  $\xi_t$  зависит от ускорения силы тяжести  $g$  в атмосферах звезд, а именно,  $\xi_t$  уменьшается с увеличением  $g$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Asplund, A. Nordlund, R. Trampedach, C. Allende Prieto, and R. F. Stein, *Astron. and Astrophys.* **359**, 729 (2000).
2. Л. С. Любимков, Т. М. Рачковская, Д. Б. Поклад, *Астрофизика* **52**(2), 237 (2009).
3. B. Hauck and M. Mermilliod, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **129**, 431 (1998).
4. F. Castelli and R. L. Kurucz, in *Modelling of Stellar Atmospheres*, edited by N. E. Piskunov, W. W. Weiss, and D. F. Gray, *Proc. IAU Symp.* **210**, id. A20 (2003).
5. F. Castelli and R. L. Kurucz, *Astron. and Astrophys.* **454**, 333 (2006).
6. R. L. Kurucz, CD-ROM 13, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid (Cambridge, Mass.; Smithsonian Astrophys. Obs., 1993).
7. Л. С. Любимков, *Химический состав: Метод и результаты анализа* (Одесса: Астропринт, 1995).
8. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Н. А. Сахибуллин, *Астрофизика* **22**(3), 339 (1985).
9. F. Thevenin and T. P. Idiart, *Astrophys. J.* **521**, 753 (1993).
10. Л. С. Любимков, З. А. Самедов, *Астрофизика* **32**(1), 49 (1990).
11. F. N. Kupka, T. Piskunov, A. Ryabchikova, H. C. Stempels, and W. W. Weiss, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
12. R. E. Luck, *Astron. J.* **147**, 137 (1999).
13. S. M. Andrievsky, J. R. D. Lepine, S. A. Korotin, R. E. Luck, V. V. Kovtyukh, and W. J. Maciel, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **428**, 3252 (2013).
14. V. V. Kovtyukh, N. I. Gorlova, and S. I. Belik, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **423**, 3268 (2012).