

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.03.044>

УДК 524.3

**В. А. Шеминова**

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины  
ул. Академика Заболотного, 27, Киев, 03143  
shem@mao.kiev.ua

### **Турбулентность и вращение в звездах солнечного типа**

*Микротурбулентные, макротурбулентные и тепловые движения в звездных атмосферах наряду с вращением звезды расширяют профили линий в звездных спектрах. Надежные данные о распределении по скоростям турбулентных движений в звездных атмосферах необходимы для выполнения однозначной интерпретации спектров звезд солнечного типа в исследованиях и поисках экзопланет. Звездные спектры с высоким спектральным разрешением 115 000, полученные на спектрографе HARPS, дают возможность исследовать турбулентные скорости и их зависимости с глубиной в фотосферах звезд. Мы выполнили анализ Фурье для 17 линий железа в спектрах 13 звезд с эффективными температурами 4900...6200 К и ускорением свободного падения 3.9...5.0, а также в спектре Солнца как звезды. Модели звездных атмосфер были взяты из базы данных MARCS. Стандартная концепция изотропной гауссовой микро- и макротурбулентности предполагалась в данном анализе. Удовлетворительное согласие синтезированных профилей спектральных линий с наблюдениями подтвердило надежность метода Фурье. В результате мы получили наиболее вероятные значения турбулентных скоростей, скорость вращения и содержание железа и их зависимости с глубиной в фотосферных слоях. Микротурбулентность не проявляет существенного изменения с глубиной, тогда как макротурбулентность явно зависит от глубины. Макротурбулентная скорость увеличивается с глубиной в атмосферах звезд. Чем больше эффективная температура звезды и сила гравитации, тем больший градиент макротурбулентности можно ожидать. Среднее значение макротурбулентной скорости увеличивается для звезд с более высокими температурами, меньшей силой гравитации и быстрым вращением. В анализируемых звездах*

*средние скорости макро- и микротурбулентности коррелируют друг с другом и со скоростью вращения. Отношения значений скорости макротурбулентности и скорости вращения в звездах солнечного типа варьируют от 1 для наиболее горячих до 1.7 для наиболее холодных звезд. С возрастом звезды скорость вращения уменьшается более резко, чем скорость макротурбулентных движений.*

**Ключевые слова:** *профили линий, звезды солнечного типа, поле скоростей, вращение, содержание железа, метод Фурье.*

## ВВЕДЕНИЕ

Исследуемые звезды солнечного типа принадлежат к спектральным классам FGK и расположены на главной последовательности. Основными причинами расширения профилей линий в спектрах этих звезд являются нетепловые скорости. Среди них доминируют макротурбулентность наряду с вращением. Макротурбулентность обусловлена грануляцией, супергрануляцией, осцилляциями и другими крупномасштабными движениями. Согласно данным по измерению макротурбулентных скоростей [9, 10, 13, 17, 19, 20, 38, 43, 48] известно, что для этих звезд скорости макротурбулентности и вращения сравнимы по величине, они оказывают одинаковое влияние на форму профилей спектральных линий и увеличиваются с увеличением эффективной температуры и светимости. Нет надежных сведений об изменении макротурбулентности с глубиной в атмосферах, а полученные по слабым линиям значения макротурбулентной скорости больше, чем значения, полученные по сильным линиям. Классический метод исследования макротурбулентности — это сопоставление профилей линий с наблюдениями в шкале длин волн. Если параметры вращения ранее не определены, макротурбулентные скорости практически невозможно получить по профилям линий. Их можно получить с помощью метода Фурье, который более сложный в использовании и применяется реже, чем классический метод.

В 1970-х гг. метод Фурье активно использовался в работах Д. Ф. Грея и его коллег [14—17, 42—44]. Первоначально макрорасширяющаяся функция представлялась как свертка двух функций. Одна из них — это зависящая от положения на диске функция вращения, а другая — изотропная по диску функция макротурбулентности с гауссовой моделью GM. В работах [15, 16] было показано, что в реальности макротурбулентная функция имеет более широкие крылья и более узкое ядро по сравнению с гауссовой функцией. Было предложено использовать радиально-тангенциальную модель скоростей RTM, поскольку макротурбулентность является проявлением грануляционного поля скоростей. Проникающая конвекция создает грануляционную картину на поверхности звезды восходящими и нисходящими конвективными потоками и горизонтальными движениями между ними, поэ-

тому макротурбулентность можно упрощенно представить двумя потоками, направленными вдоль и поперек радиуса звезды. Практика показала, что не всегда RTM дает хорошее согласие с наблюдениями. Затем Грей [19] представил функцию макрорасширения как одну функцию, включающую комбинированные эффекты вращения и макротурбулентности. Эта функция вычислялась путем численного интегрирования по диску звезды. Детали описаны в 3-м издании его книги [21]. Однажды вычисленная, функция макрорасширения может быть повторно использована со многими наборами наблюдений. Кроме того, путем усреднения по многим линиям можно получить одно решение, определяющее параметры макротурбулентности и вращения. Такой подход сейчас активно применяется [22—24].

Недавно в работе [47] Такеда выразил сомнение относительно правомерности применения RTM для карликов солнечного типа и привел следующие аргументы. Полученное в работах [16, 24] для Солнца как звезды значение макротурбулентной скорости около 4 км/с существенно превышает типичные значения конвективных фотосферных скоростей (2...3 км/с), непосредственно измеренные по спектроскопическим наблюдениям высокого разрешения. Оно также выше, чем значения, полученные для центра и края диска [3, 25, 31]. Для выяснения этой ситуации в работе [47] было выполнено исследование нетепловых скоростей путем анализа большого числа профилей спектральных линий, наблюдаемых с высоким разрешением в разных точках солнечного диска, методом согласования профилей линий. Оказалось, что макротурбулентные скорости соответствуют почти нормальному распределению без каких-либо признаков особого распределения, ожидаемого для случая RTM. Такеда пришел к заключению, что в фотосфере Солнца поле скоростей направлено более хаотично, чем в RTM. Кроме этого, хорошим приближением макротурбулентного поля скоростей в солнечной фотосфере оказывается классическая анизотропная модель  $v_{ma}^2 = (v_{rad} \cos \theta)^2 + (v_{tan} \sin \theta)^2$ , где  $v_{rad}$  и  $v_{tan}$  — макротурбулентные скорости с гауссовым распределением в радиальном и тангенциальном направлениях. Такеда применил эту форму и получил  $v_{rad} = 2$  км/с и  $v_{tan} = 2.5$  км/с. Он сделал вывод, что сложная RTM не является адекватной моделью для описания макротурбулентности в звездах солнечного типа, тогда как классическая GM является более разумной и полезной.

В предыдущей нашей работе [40] мы использовали фурье-анализ с применением GM, RTM для интерпретации спектров двух звезд и солнечного потока. Согласно полученным результатам нельзя утверждать, что RTM по сравнению с GM существенно улучшает результаты согласования моделей скоростей с наблюдениями. Мы полагаем, что использование GM для звезд солнечного типа является вполне приемлемым и даже более предпочтительным в обычной практике спектрального анализа звезд из-за простоты данной модели.

Цель данной работы — для 13 звезд солнечного типа определить макро- и микротурбулентные скорости, скорость вращения, содержа-

ние железа, а также исследовать зависимости турбулентных скоростей с глубиной в атмосферах и от фундаментальных параметров звезд.

### АНАЛИЗ УШИРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Для анализа уширения профилей линий в спектрах медленно вращающихся звезд солнечного типа мы адаптировали технику Фурье [40] для случая, когда неизвестными параметрами являются макротурбулентная скорость  $v$ , микротурбулентная скорость  $w$ , проекция скорости вращения  $V \sin i$  и содержание химического элемента  $A$ . Кратко напомним основные этапы анализа.

Мы использовали предположение, что тепловая функция  $H(\lambda)$  не зависит от положения на диске звезды, и профиль наблюдаемой линии  $D(\lambda)$  можно представить двойной сверткой:

$$D(\lambda) = H(\lambda) * M(\lambda) * I(\lambda). \quad (1)$$

Здесь  $M(\lambda)$  — функция макрорасширения,  $I(\lambda)$  — функция инструментального расширения. Звездочкой обозначена операция свертки. В области Фурье свертка становится произведением, поэтому образ наблюдаемого профиля выражается произведением соответствующих образов:

$$d(\nu) = h(\nu) m(\nu) i(\nu), \quad (2)$$

где  $\nu$  — частота Фурье, выраженная в с/км, а строчными буквами обозначены образы соответствующих функций из уравнения (1). Разделив образ наблюдаемой линии на тепловой и инструментальный образы, получаем так называемый остаточный образ:

$$m(\nu) = \frac{d(\nu)}{h(\nu) i(\nu)}. \quad (3)$$

Этот остаточный образ содержит информацию о функции макрорасширения  $M(\lambda)$ . Чтобы ее получить, следует задать модель скоростей макротурбулентных движений и вращения звезды. Предположим, что распределение макротурбулентных скоростей является изотропным, и его можно представить гауссовой функцией  $G(\nu)$  с наиболее вероятной макротурбулентной скоростью  $w$ . Также предположим, что вращение звезды имеет твердотельный характер, тогда профиль вращения задается зависимой от положения на диске классической функцией вращения  $G(\nu)$  с параметром  $V \sin i$ . В таком случае функция  $M(\lambda)$  выражается сверткой этих двух функций:

$$M(\lambda) = G(\lambda) * G(\lambda). \quad (4)$$

Подбором параметров  $w$  и  $V \sin i$  можно получить лучшее совпадение образа функции  $M(\lambda)$  и остаточного образа в незашумленной области частот и определить неизвестные параметры  $w$  и  $V \sin i$ .

Тепловая функция  $H(\lambda)$  легко рассчитывается по стандартной процедуре с использованием атмосферных моделей звезд, которые были получены путем интерполяции данных из базы MARCS [27]. Эффективная температура  $T_{\text{эф}}$ , ускорение свободного падения  $lgg$ , металличность  $[M/H]$  были взяты из работы [29]. Химический состав для Солнца соответствовал данным [5]. Коэффициенты поглощения вычислялись согласно алгоритму SPANSAT [1], а постоянная затухания Ван-дер-Ваальса вычислялась согласно методу Ансти — Барклема — О'Мара [6, 7]. Так как функция  $H(\lambda)$  представляет собой свертку гауссового теплового профиля с гауссовым микротурбулентным профилем, она зависит также и от наиболее вероятной микротурбулентной скорости  $v$  и содержания элемента  $A$ . Эти параметры подбираются путем сопоставления вычисленной эквивалентной ширины теплового профиля с наблюдаемой эквивалентной шириной линии.

Решить эту задачу с четырьмя неизвестными параметрами можно способом итераций в следующей последовательности: 0) вычисляем образы  $i(\lambda)$ ,  $d(\lambda)$ ; 1) фиксируем начальное значение  $v = 0.5$ , подбираем  $A$ , вычисляем  $H(\lambda)$  и образы  $h(\lambda)$ ,  $m(\lambda)$ ; 2) фиксируем начальное значение  $V \sin i = 0.5$ , задаем ряд значений  $v = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  км/с и вычисляем соответствующий набор функций  $M(\lambda)$  и их образов; 3) сопоставляем эти образы с остаточным образом  $m(\lambda)$  и находим минимальное отклонение; 4) повторяем 2) и 3) с другим значением  $V \sin i$  из ряда 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 км/с; 5) задаем новое значение  $v$  из ряда 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 км/с и повторяем все этапы, начиная с 1); 6) находим минимум минимальных отклонений, который определяет все четыре неизвестные; 7) вычисляем профиль линий с полученными значениями переменных  $v$ ,  $V \sin i$ ,  $A$  и для контроля сравниваем его с наблюдаемым профилем в шкале длин волн.

Мы тщательно подобрали список линий нейтрального и ионизированного железа, используя базу данных [32] и спектр Солнца как звезды [28]. Он получился небольшим, но единым для всех звезд (табл. 1). Линии проверялись на наличие чистого от бленд профиля (хотя бы одного крыла), точных сил осцилляторов, параметров для расчета постоянной затухания. Кроме этого, линии выбирались так, чтобы был как можно большим диапазон глубин формирования этих линий. Эквивалентные ширины  $W$  всех избранных линий были в пределах  $260 > W > 20$  мА для исследуемых звезд. Силы осцилляторов  $lggf$  с погрешностью 3...10 % были взяты из работы [11] для линий Fe I, а также из [34] для линий Fe II. Данные наблюдений спектра Солнца как звезды с разрешением 300 000 были взяты из атласа [28]. Данные звездных спектров были любезно предоставлены Я. Павленко и А. Ивановом из наблюдений [30], выполненных на 3.6-м телескопе в Ла Силла (Чили) с использованием спектрографа HARPS с высоким отношением сигнал-шум ( $>100$ ) и спектральным разрешением  $R = 115\,000$ .

Мы выполнили согласование наблюдаемых и модельных остаточных образов для каждой линии отдельно, чтобы полученные парамет-

**Таблица 1.** Параметры использованных линий, их эквивалентные ширины и эффективные глубины формирования для Солнца

$\lambda$ , нм	$E_{exp}$ , эВ	$\lg gf$	$W$ , нм	$\lg \epsilon$
Fe I				
448.42198	3.603	-0.864	11.40	-1.70
460.20006	1.608	-3.154	7.71	-2.10
499.41295	0.915	-3.080	11.71	-2.62
524.24905	3.635	-0.968	9.43	-1.87
537.95734	3.695	-1.514	6.59	-1.59
550.14653	0.958	-3.047	12.22	-2.67
566.13455	4.285	-1.756	2.46	-1.00
570.54646	4.302	-1.355	4.15	-1.15
577.84533	2.588	-3.430	2.49	-1.23
606.54848	2.607	-1.530	12.88	-2.24
615.16170	2.175	-3.299	5.20	-1.63
625.25546	2.403	-1.687	13.50	-2.32
Fe II				
450.82802	2.860	-2.440	9.53	-1.80
457.63330	2.840	-2.950	6.98	-1.53
523.46228	3.220	-2.180	9.18	-1.76
541.40730	3.223	-3.580	2.97	-0.90
645.63830	3.904	-2.050	6.72	-1.45

ры скоростей можно было привязать к глубине формирования конкретной линии, которая вычислялась по функции вклада в депрессию согласно [26]. Если допустить независимость макротурбулентности с глубиной, тогда остаточные образы по всем линиям данной звезды должны совпадать между собой, и для согласования можно использовать усредненный остаточный образ. В реальности на остаточный образ оказывает влияние несовершенная коррекция линий из-за бленд, погрешности обработки наблюдений, неточный выбор уровня континуума и неточности в вычислении теплового профиля. В работах [22—24] было показано, что несмотря на возможные погрешности усредненный по всем линиям остаточный образ дает надежный результат. Рис. 1 демонстрирует наблюдаемые симметризованные профили линий и их образы Фурье для Солнца и звезды HD 189627. Наилучшее совпадение остаточных образов линий видно на самых низких частотах. Затем на средних частотах ( $-1.5 < \lg \epsilon < -1$ ) отклонение от среднего увеличивается из-за градиента макротурбулентной скорости. Для звезды HD 189627 разброс еще больший из-за меньшего спектрального разрешения и большего шума наблюдений. На более высоких частотах ( $\lg \epsilon > -1$ ) шумы наблюдений усиливаются еще и вследствие процесса деления наблюдаемого образа на тепловой. Мы сравнили полученное по усредненному образу решение и средний ре-

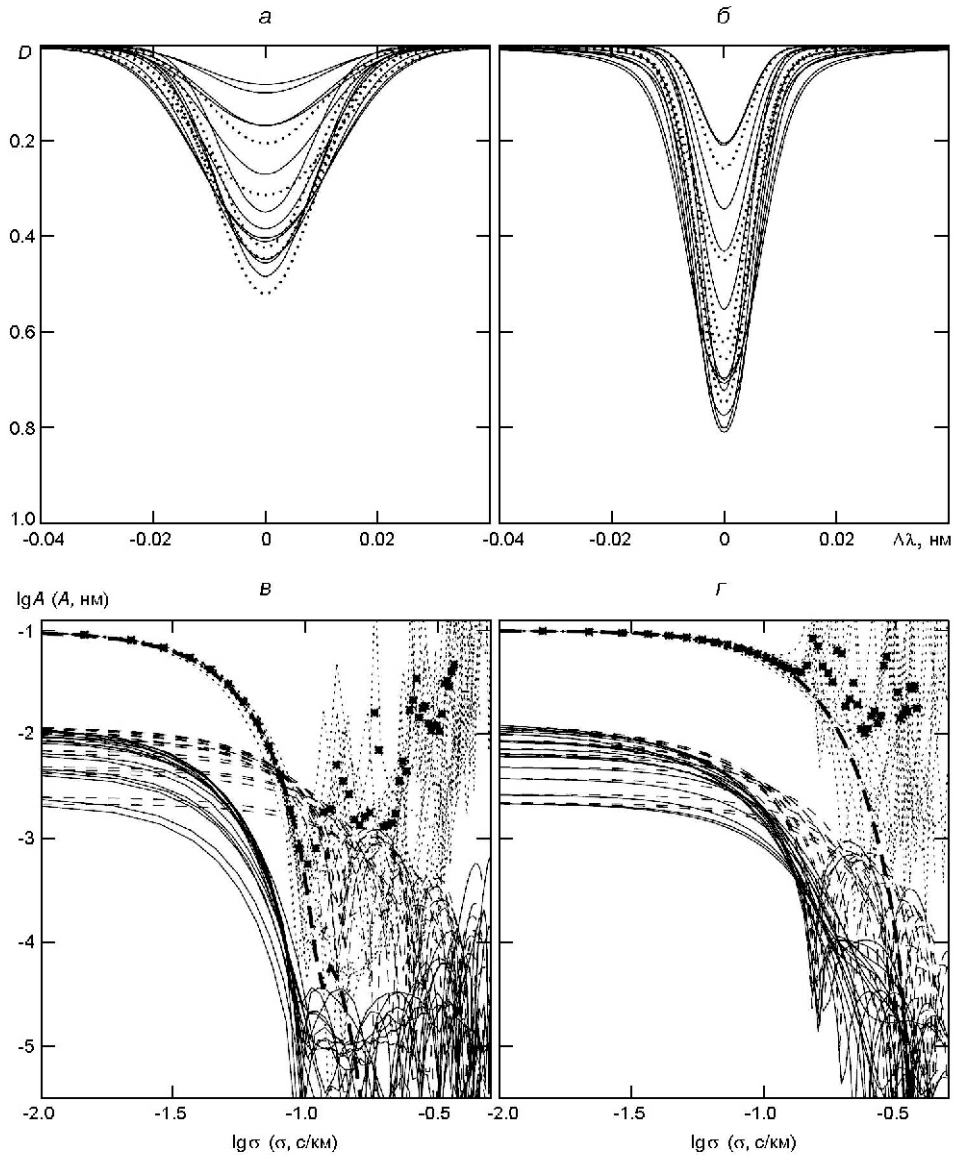


Рис. 1. Профили  $D = 1 - F/F_c$  всех анализируемых наблюдаемых симметризованных линий Fe I (сплошные линии) и Fe II (пунктирные линии) для быстровращающейся звезды HD 189627 (а) и для Солнца (б), а также амплитуды  $\lg A$  их образов Фурье (сплошные линии), образов тепловых профилей (штриховые линии), остаточных образов (пунктирные линии), усредненного остаточного образа (звездочки) и моделируемого образа функции макрорасширения (штрих-пунктирная линия) для HD 189627 (в) и для Солнца (г) в зависимости от частоты ( $\lg \sigma$ )

зультат по всем индивидуальным линиям. Они удовлетворительно согласуются. Отсюда следует, что использование усредненного остаточного образа существенно сократит время анализа, если необходимо получить усредненные значения параметров турбулентных скоростей по большому количеству линий.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

**О надежности результатов.** Достоверность результатов определения турбулентных скоростей  $v_{\text{turb}}$  и  $v_{\text{rot}}$ , проекции скорости вращения  $V \sin i$  и содержания железа  $A$  проверялась для каждой линии путем прямого сравнения вычисленных профилей линий с наблюдениями и нахождением минимума отклонений между ними. Из рис. 2 видно, что средний профиль отклонений имеет похожую форму почти для всех звезд. Наблюдаемый профиль оказывается более узким в центральной части и более широким в крыльях по сравнению с гауссовым профилем. Фактически подтверждается вывод, сделанный ранее Греем о том, что профили линий отклоняются от гауссовой колоколообразной формы. Согласно нашим результатам эти отклонения малы. В крыльях они в среднем не превышают 0.25 % для каждой звезды. Для индивидуальных линий отклонения в некоторых звездах достигают 1.5 %, что, по-видимому, связано с наличием слабых невидимых бленд или незначительной асимметрии в наблюдаемых профилях, особенно в Солнце и более холодных К звездах. Из отклонений на рис. 2 можно увидеть, что в центре линий наблюдаемые профили более глубокие, чем вычисленные профили почти для всех звезд, кроме трех с самыми высокими скоростями макротурбулентности и вращения, превышающими 5 км/с. Чем шире линии ( $V \sin i > 3$ ,  $v_{\text{rot}} > 3$  км/с), тем лучше воспроизводит расширение профилей изотропное гауссово распределение макротурбулентности. Дополнительно мы вычислили профили линий с распределением макротурбулентности по гауссовой модели GM и по радиально-тангенциальной модели RTM с интегрированием по диску и сделали вывод, что RTM только слегка улучшает результаты, но форма профиля отклонений остается почти той же. Учитывая тот факт, что отклонения от наблюдений в среднем находятся в пределах погрешностей данного анализа, мы полагаем, что полученные результаты являются достоверными.

Рис. 3 представляет полученные в данном анализе значения макротурбулентной скорости  $v_{\text{turb}}$ , микротурбулентной скорости  $v_{\text{micro}}$  и содержания железа  $A = 12 + \lg(N_{\text{Fe}} / N_{\text{H}})$  в зависимости от средней глубины формирования спектральной линии  $\lg \tau_{50}$ . Как видно, между результатами анализа линий Fe I и Fe II нет существенных различий в рамках используемых моделей атмосфер MARCS. Для каждой звезды результаты были аппроксимированы линейной зависимостью. Наибольший разброс значений наблюдается для макротурбулентных скоростей. Это может быть обусловлено рядом причин. В анализе Фурье точность метода могут ограничивать возможные перекрестные помехи среди переменных  $V \sin i$  и  $v_{\text{rot}}$  при сопоставлении остаточных образов, полученных из модели скоростей и наблюдений. Может наблюдаться слабая антикорреляция между переменными  $v_{\text{turb}}$  и  $v_{\text{micro}}$ . Сравнивая наши результаты на рис. 3, можно заметить небольшую антикорреляцию между  $v_{\text{turb}}$  и  $v_{\text{micro}}$  для некоторых звезд. Кроме этого, почти тот же профиль



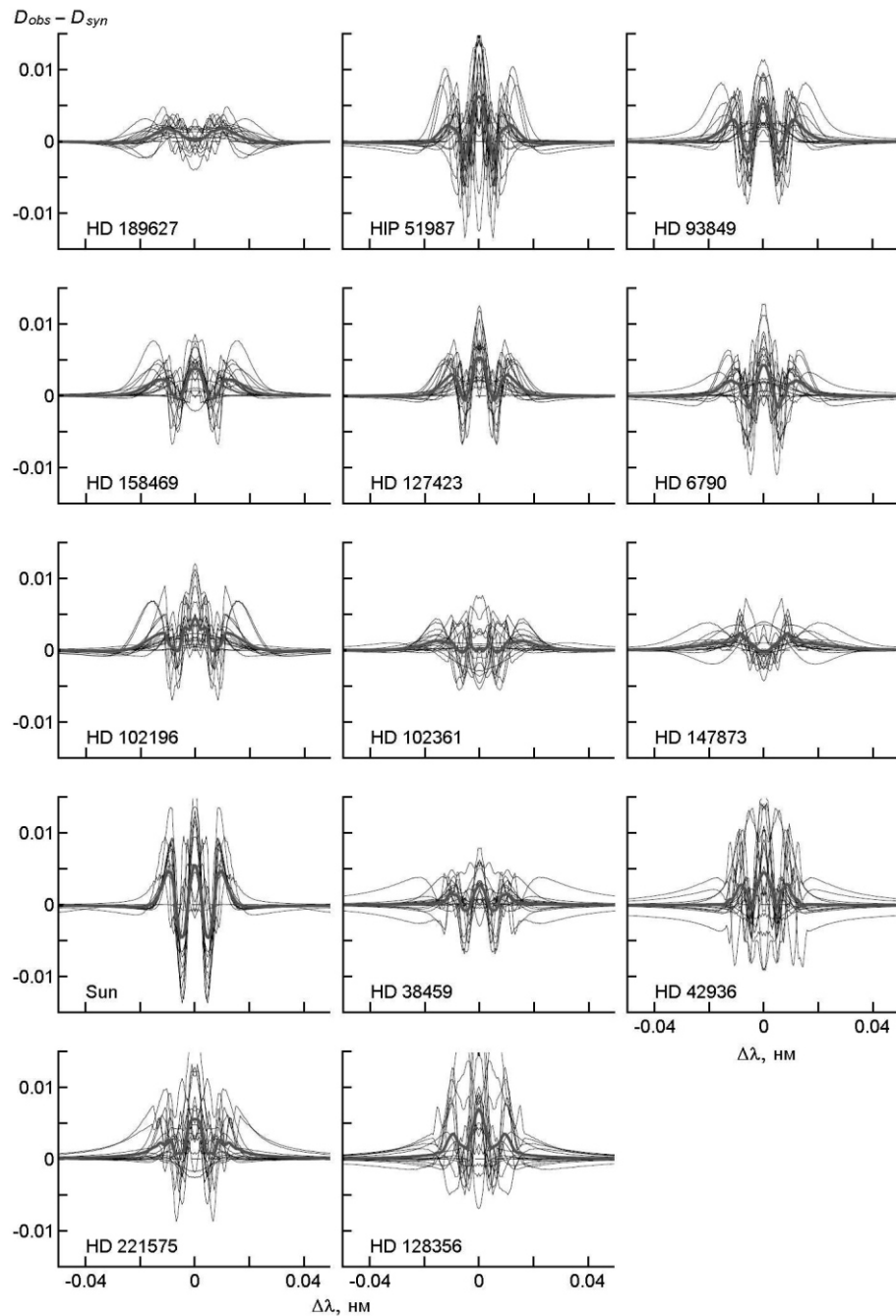


Рис. 2. Профиль отклонений между наблюдаемым ( $D_{obs}$ ) и синтезированным ( $D_{syn}$ ) профилями линии в зависимости от расстояния от центра линии для всех линий в каждой звезде. Жирная серая линия — средний профиль. Профиль линии вычислялся как  $D = 1 - F / F_c$

скоростей в большей или меньшей степени может быть сформирован либо макротурбулентностью, либо вращением. Большой разброс можно объяснить также тем, что макротурбулентность может зависеть как от движущей силы конвекции, так и от других причин, на-

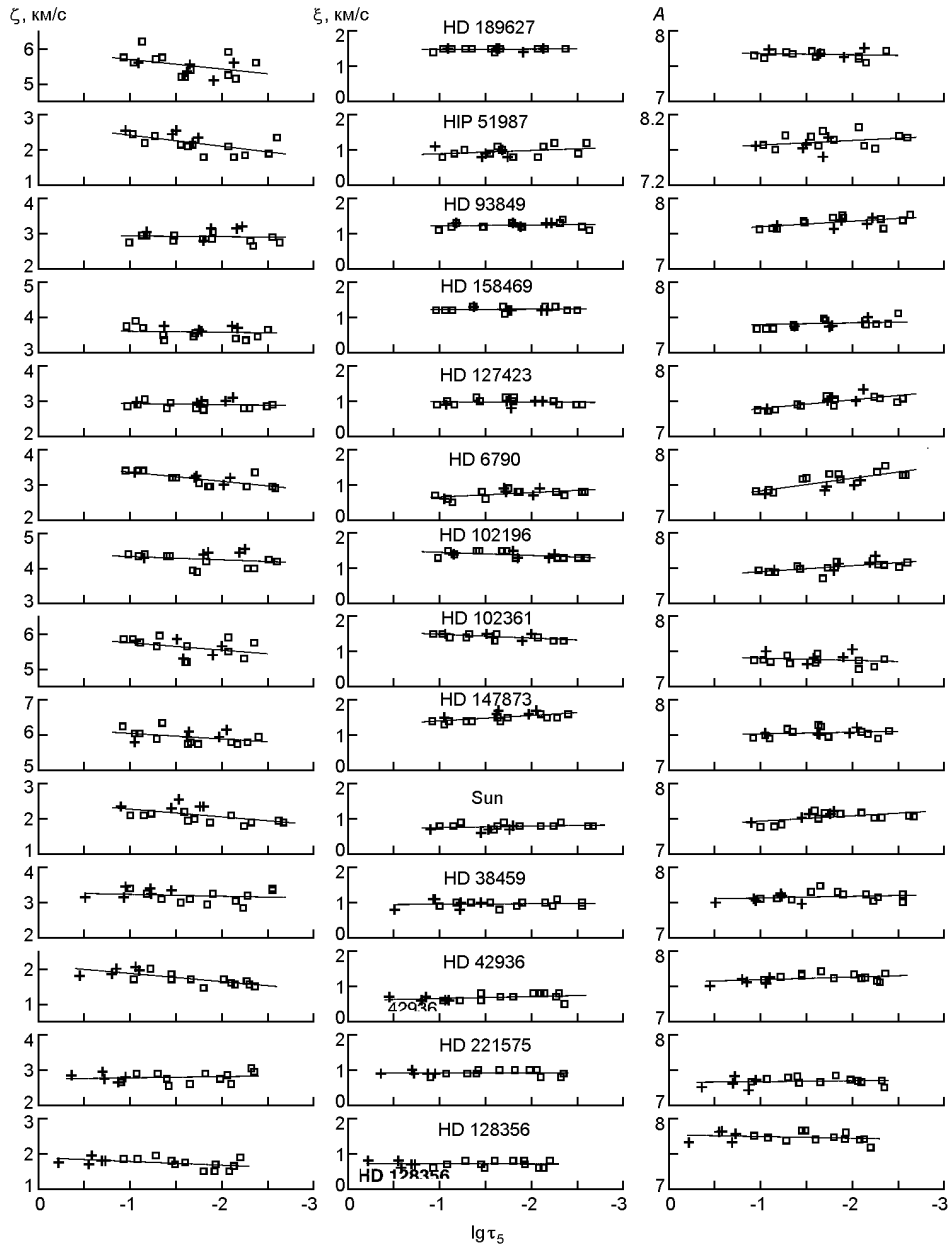


Рис. 3. Полученные значения макротурбулентной скорости  $\zeta$ , микротурбулентной скорости  $\xi$  и содержания железа  $A = 12 + \lg(N_{Fe} / N_H)$  в зависимости от средней глубины формирования спектральной линии  $\lg \tau_5$ . Данные для линий Fe I отмечены квадратиками, а для линий Fe II — крестиками. Сплошная линия — аппроксимация линейной зависимостью

пример от магнитного поля или других эффектов активности звезды, которые в данном анализе не учитываются. Несмотря на перечисленные недостатки метода, мы с помощью большого количества линий и минимизации отклонений между моделью и наблюдением получили добротный результат.

**Таблица 2.** Параметры анализируемых звезд и полученные из фурье-анализа средние по всем линиям значения микро- и макротурбулентных скоростей, скорости вращения и содержания железа

Звезда	$T_{\text{эф}}$ , К	lgg	[M/H]	$M/M_{\odot}$ [37]	Возраст, млрд лет [37]	$v_{\text{микро}}$ , км/с	$v_{\text{макро}}$ , км/с	$V \sin i$ , км/с	$A$
HD 189627	6210	4.40	0.07	1.244	4.0	1.48 0.04	5.52 0.30	5.93 0.02	7.67 0.05
HIP 51987	6158	5.00	0.27	1.087	7.2	0.96 0.14	2.20 0.25	2.09 0.03	7.81 0.10
HD 93849	6153	4.21	0.08	1.268	3.5	1.24 0.08	2.92 0.16	3.05 0.03	7.66 0.07
HD 158469	6105	4.19	-0.14	1.223	2.0	1.22 0.06	3.61 0.14	3.10 0.02	7.41 0.06
HD 127423	6020	4.26	-0.09	1.107	3.1	0.97 0.08	2.90 0.10	2.53 0.03	7.48 0.09
HD 6790	6012	4.40	-0.06	1.089	3.5	0.75 0.12	3.16 0.18	2.94 0.03	7.55 0.12
HD 102196	6012	3.90	-0.05	1.395	3.0	1.39 0.09	4.26 0.19	3.56 0.03	7.52 0.07
HD 102361	5978	4.12	-0.15	1.250	2.0	1.42 0.08	5.62 0.25	5.03 0.02	7.39 0.07
HD 147873	5972	3.90	-0.09	1.493	2.6	1.50 0.11	5.95 0.17	6.51 0.05	7.53 0.06
Солнце	5777	4.44	0.00	1.000	4.6	0.78 0.08	2.11 0.21	1.84 0.02	7.52 0.07
HD 38459	5233	4.43	0.06	0.882	9.0	0.96 0.10	3.20 0.17	1.85 0.05	7.58 0.06
HD 42936	5126	4.44	0.19	0.881	12.0	0.68 0.09	1.74 0.18	0.97 0.03	7.61 0.05
HD 221575	5037	4.49	-0.11	0.823	6.0	0.92 0.07	2.79 0.14	1.89 0.03	7.34 0.06
HD 128356	4875	4.58	0.34	0.824	15.5	0.71 0.08	1.74 0.14	1.01 0.05	7.73 0.07

Средние по всем линиям значения параметров  $v_{\text{микро}}$ ,  $v_{\text{макро}}$ ,  $V \sin i$  и  $A$  и их средние квадратичные отклонения (СКО) для каждой звезды представлены в табл. 2 и на рис. 4. Значения СКО позволяют судить о надежности вычислений, если нет некоторых систематических изменений параметров с силой линии. Мы получили СКО в пределах 0.10...0.32 км/с для  $v_{\text{микро}}$ , 0.05...0.12 км/с для  $v_{\text{макро}}$ , 0.07...0.14 для  $A$  и 0.02...0.05 км/с для  $V \sin i$ . Самые большие отклонения получены для макротурбулентности вследствие зависимости  $v_{\text{макро}}$  от глубины в фотосфере.

О надежности результатов анализа Фурье может свидетельствовать полученное нами для Солнца содержание железа  $A = 7.52 \pm 0.07$  dex, которое удовлетворительно согласуется с данными для центра диска  $7.47 \pm 0.04$  dex [39], а также значение параметра  $V \sin i = 1.84 \pm 0.02$  км/с, которое совпадает со значением синодической скорости вращения Солнца на экваторе 1.84 км/с [24].

**Изменение полученных параметров с глубиной в фотосфере.** Наши результаты показывают, что макротурбулентная скорость  $v_{\text{макро}}$  изменяется с глубиной для большинства звезд (рис. 3). Наиболее резкое изменение  $v_{\text{макро}}$  происходит в звездах с более высокой эффективной температурой и большей силой гравитации, т. е. в более горячих, плотных и менее протяженных атмосферах. Макротурбулентность как признак конвекции в звездах связана со скоростями конвективных потоков в подфотосферных и фотосферных слоях. Градиент  $v_{\text{макро}}$  тем больший, чем большее значение имеют конвективные скорости и плотность фотосферы. Поэтому в тех звездах, где конвекция более сильная, там и макротурбулентность более сильная, и ее изменения с глубиной более

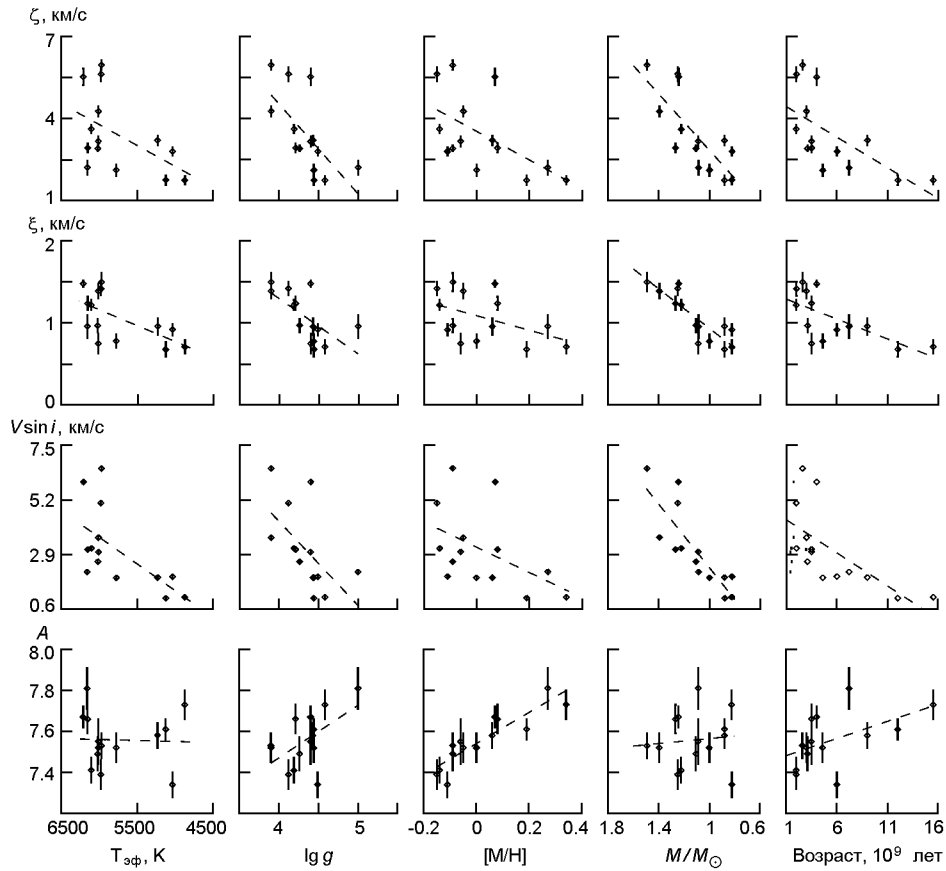


Рис. 4. Средние значения макротурбулентной скорости  $\zeta$ , микротурбулентной скорости  $\xi$ , скорости вращения  $V \sin i$  и содержания железа  $A$  в зависимости от основных параметров звезды: эффективной температуры  $T_{\text{эф}}$ , ускорения свободного падения  $\lg g$ , металличности  $[M/H]$ , массы  $M/M_{\odot}$  и возраста звезды

выражены. Для Солнца как звезды также хорошо заметно увеличение  $\zeta$  с глубиной. По результатам исследования профилей линий, наблюдаемых на разрешенном диске Солнца [25, 31, 47], увеличение макротурбулентной скорости с глубиной известно уже давно.

Как видно из рис. 3, микротурбулентная скорость  $\xi$  мало изменяется с глубиной для исследуемых звезд. Можно утверждать, что градиенты микротурбулентных скоростей незначительны для звезд солнечного типа. Для одних звезд величина  $\xi$  слегка уменьшается с глубиной, для других звезд, наоборот, слегка увеличивается, а для третьей группы звезд — почти не изменяется с глубиной. Для Солнца как звезды микротурбулентная скорость мало изменяется с глубиной, и по нашим данным она равна в среднем  $0.8 \pm 0.1$ . Согласно результатам анализа для центра диска Солнца [2, 25, 31] величина  $\xi$  увеличивается в глубоких слоях фотосферы и уменьшается с глубиной выше температурного минимума, а в среднем для центра и края диска она равна

$v_{rad} = 0.8 \dots 1.0$  и  $1.4 \dots 1.7$  км/с соответственно. Возможно, вследствие эффекта усреднения по диску мы не получили изменение  $v_{rad}$  с глубиной. В обзоре [17] Грей подчеркнул, что данные о характере изменения турбулентных скоростей с глубиной остаются противоречивыми, и пока нет возможности делать окончательные выводы.

Содержание железа  $A$  не должно изменяться от линии к линии и не должно зависеть от глубины в фотосфере. Из рис. 3 видно, что значения  $A$  для некоторых звезд и Солнца уменьшаются с глубиной, а для других звезд такой зависимости нет. Можно отметить, что между параметрами  $v_{rad}$  и  $A$  нет антикорреляции, а также что изменение  $A$  с глубиной не является результатом неучета неЛТР-эффектов, поскольку значения  $A$ , полученные по линиям Fe I и Fe II, согласуются между собой. Возможно, что изменение содержания железа с глубиной связано с погрешностями определения эквивалентных ширин наблюдаемых слабых линий, которые могут быть занижены из-за ненадежно установленного уровня континуума. Наоборот, эквивалентные ширины сильных линий могут быть завышены из-за невидимых и неучтенных бленд в более широких крыльях линий.

Полученные значения скорости вращения  $V \sin i$  практически не изменяются от линии к линии для всех звезд, поэтому они не представлены на рис. 3.

#### **Изменение полученных параметров вдоль диаграммы $\Gamma - P$ .**

Фактически анализируемые звезды можно разделить на две группы по эффективной температуре. Одна группа имеет в среднем температуру  $T_{эф}$  около 6000 К, а другая — около 5000 К, поэтому трудно говорить о зависимости от  $T_{эф}$  вдоль диаграммы  $\Gamma - P$ . Рис. 4 демонстрирует средние по всем линиям значения  $v_{rad}$ ,  $V \sin i$ ,  $A$  для каждой звезды. Полученные значения турбулентных скоростей в среднем увеличиваются в два раза от самых горячих до самых холодных звезд. В общем, можно сказать, что величины  $v_{rad}$ ,  $V \sin i$  увеличиваются с увеличением температуры  $T_{эф}$  и массы  $M/M_{\odot}$ , но уменьшаются с увеличением гравитации  $lgg$ , металличности  $[M/H]$  и возраста звезды. Из рис. 4 видно, что с возрастом наиболее резко уменьшается  $V \sin i$ , менее резко —  $v_{rad}$  и  $A$ . Полученные нами зависимости подтверждают ранее известные закономерности для звезд.

Из рис. 5 видна почти линейная зависимость между микро- и макротурбулентными скоростями  $v_{rad} = 4.21 - 1.11 V \sin i$ . В связи с этим их зависимости от параметров звезд похожи. Макротурбулентная скорость в среднем уменьшается от 4 до 2 км/с от горячих до холодных звезд, а для Солнца она равна 2.1 км/с. Согласно данным [18] средняя конвективная скорость уменьшается от 5.3 км/с до почти нулевого значения в звездах от F5 V до G8 V типа, а далее в более холодных звездах она снова увеличивается. Для Солнца конвективная скорость равна  $1.9 \pm 0.2$  км/с. Полученные нами значения  $v_{rad}$  в звездах солнечного типа не противоречат выводам [18] о пропорциональности между  $v_{rad}$  и конвективными скоростями.

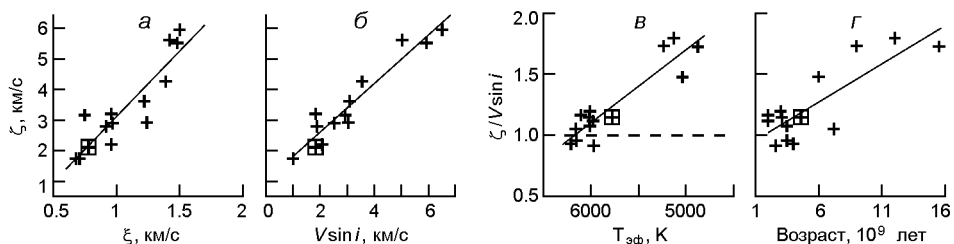


Рис. 5. Зависимость средних значений макротурбулентной скорости от значений микро-турбулентной скорости и скорости вращения  $V \sin i$ , а также зависимость отношения  $\zeta / V \sin i$  от эффективной температуры и от возраста. Квадратики — данные для Солнца

Разброс значений  $\zeta$ ,  $V \sin i$  в звездах с одинаковыми значениями  $T_{\text{эф}}$  в основном обусловлен различием значений  $l \text{gg}$ . При повышении ускорения свободного падения  $l \text{gg}$  турбулентные скорости будут меньше, так как увеличивается плотность фотосферы и уменьшается ее толщина. Химический состав фотосферы или металличность тоже могут повлиять на зависимость от температуры. Чем больше металлов в фотосфере, тем меньше ее прозрачность, больше плотность вещества, и турбулентность ослабевает. Только при равных  $l \text{gg}$  и одинаковой металличности можно ожидать более четкую зависимость турбулентных скоростей от эффективной температуры в FGK-звездах.

Результаты наших спектрометрических измерений параметра  $V \sin i$  в зависимости от параметров звезд приведены на рис. 4. Как видно, тенденции изменений  $V \sin i$  весьма похожи на тенденции изменений  $\zeta$ . По-видимому, это отражает связь макротурбулентности с вращением через процессы конвекции. Макротурбулентность зависит от свойств конвекции, на которую оказывает влияние вращение звезды. Вращение является движущей силой магнитной активности в конвективных слоях. Всплывающие на поверхность магнитные поля создают хромосферную активность звезды. Уменьшение скорости вращения с уменьшением эффективной температуры обычно объясняют торможением вращения из-за выбросов вещества (звездного ветра), что приводит к потере массы. Причиной звездного ветра в F0-звездах главной последовательности и холоднее может быть конвекция и хромосферная активность, которые создают звездный ветер. Таким образом, вращение влияет на конвекцию, а конвекция влияет на макротурбулентность, и через магнитное поле и хромосферную активность влияет на вращение. Это подтверждает зависимость между макротурбулентностью и вращением (рис. 5), которую можно выразить эмпирической зависимостью  $\zeta = 1.25 + 0.68V \sin i$ . Также интересно проследить, как изменяется отношение макротурбулентной скорости и скорости вращения  $\zeta / V \sin i$  в зависимости от эффективной температуры звезды (рис. 5). Как видно, это отношение в среднем равно единице для группы горячих звезд и 1.7 для группы более холодных K-звезд. Отсюда следует, что с возрастом макротурбулентная скорость уменьшается медленнее, чем скорость вращения в звездах солнечного типа.

## СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В разных исследованиях макротурбулентная скорость определялась с использованием либо изотропной гауссовой модели GM (значение  $\sigma_G$ ), либо радиально-тангенциальной модели RTM (значение  $\sigma_{RT}$ ). Для связи между радиально-тангенциальными и изотропными гауссовыми значениями в работе [17] получено значение фактора  $\sigma_{RT}/\sigma_G = 1.44$  в случаях согласования фурье-образов, а в работе [43] оно составило примерно 1.5. Такеда [47] полагает, что этот фактор может зависеть от дополнительного уширения спектральной линии, и для спектра солнечного потока он равен 1.67. Мы также определили этот фактор путем согласования наблюдаемых и вычисленных профилей линий с использованием GM и RTM и получили значение  $\sigma_{RT}/\sigma_G = 1.5$ , которое было использовано для преобразования  $\sigma_{RT}$  в  $\sigma_G$ , выведенных из профилей линий. Для преобразования выведенных из фурье-образов оценок  $\sigma_{RT}$  было использовано значение 1.44 [17].

На рис. 6а показаны значения макротурбулентных скоростей в FGK-звездах в зависимости от эффективной температуры, полученные в разных исследованиях [8—10, 13, 20, 38, 47, 48]. Следует отметить, что в результате преобразования все эмпирические кривые совпали значительно лучше, чем на подобном графике в работе [47]. На рис. 6б приведены оценки микротурбулентных скоростей, полученные ранее в работах [9, 29, 35, 36, 45]. Наши оценки, отмеченные квадратиками, удовлетворительно согласуются с результатами других исследований и подтверждают как достоверность наших результатов, так и ранее установленные закономерности.

Согласно ранее полученным данным о макротурбулентности в работах Грея [17, 21] известны следующие факты. Макротурбулентная скорость является более крутой функцией спектрального типа, чем микротурбулентная скорость. Скорость резко уменьшается в сторону более поздних спектральных типов от F0 до K0. Микротурбулентная скорость уменьшается с большим разбросом значений в более горячей части от A5 до G0, затем слегка увеличивается до K-звезд. Чем меньше сила гравитации на поверхности звезды, тем большие скорости турбулентности. Скорость вращения вдоль главной последовательности резко увеличивается от F-звезд (50...5 км/с) до B0—A0-звезд (около 200 км/с). Для холодных GK-звезд она достигает предела измерений. Звезды с меньшей светимостью имеют более высокие скорости вращения, чем звезды главной последовательности. Все это подтверждается полученными в этой работе данными о макро- и микротурбулентности и скорости вращения в звездах солнечного типа.

**Оценки для Солнца.** Известно, что Солнце служит стандартом для исследований других звезд и многие авторы используют солнечный спектр потока для тестирования своих результатов. В табл. 3 собраны опубликованные в последние годы результаты для Солнца как звезды. Большой разброс значений  $\sigma_{RT}$  и  $\sigma_G$  в основном связан с изменением

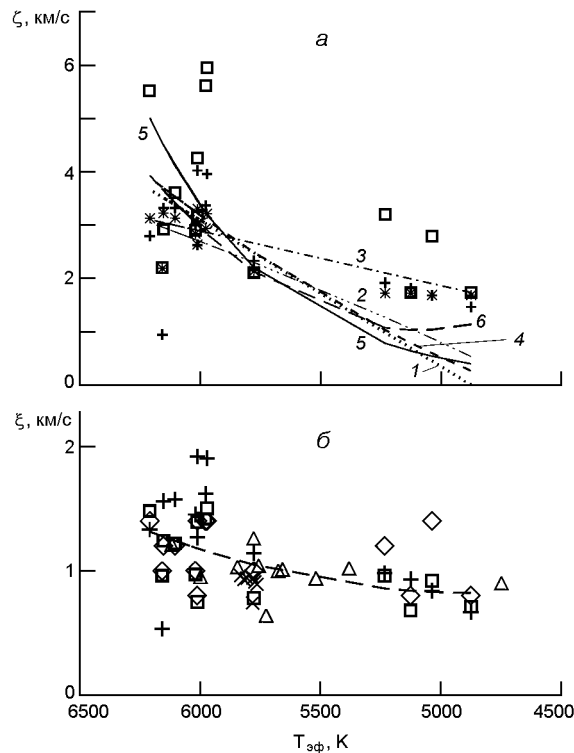


Рис. 6. Зависимости от эффективной температуры звезд: *a* — макротурбулентной скорости (квадратики — наши данные, звездочки — данные [10], крестики — [13], пунктир 1 — [20], штрих-пунктир 2 — [38], штрих-пунктир 3 — [48], штриховая кривая 4 — [9], сплошная линия 5 — [8], длинные штрихи 6 — [47]); *б* — микротурбулентная скорость (квадратики — наши данные, крестики — [36], треугольники — [35], косые крестики — [45], ромбики — [29], штриховая кривая — [9]). Все скорости приведены к шкале макротурбулентных скоростей с гауссовым распределением  $\sigma$

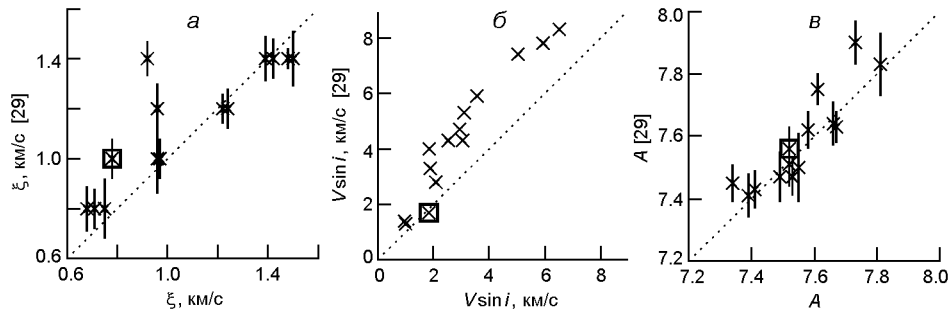
макротурбулентности с глубиной в фотосфере Солнца. Полученные по слабым линиям значения  $\sigma$  составляют 2.2...2.6 км/с, а по сильным линиям — 1.9...2.0 км/с. Значение микротурбулентной скорости колеблется между 0.4 и 1.2 км/с и не зависит от силы линий. Наиболее вероятно, что причиной разногласий оценок микротурбулентности являются погрешности определения наблюдаемых эквивалентных ширин, используемых сил осцилляторов и постоянной затухания. Отсюда следует, что при анализе звездных спектров следует ожидать большего разброса значений турбулентных скоростей.

**Сравнение наших данных с оценками работы [29].** Интересно сравнить наши данные с оценками, полученными для одних и тех же звезд. В работе А. Иванюка и др. [29] были проанализированы спектры 107 звезд солнечного типа на основании однородного высококачественного наблюдательного материала [30] и определены значения эффективной температуры, ускорения свободного падения и химический состав звезд. Кроме того, из анализа профилей линий были получены значения микротурбулентной скорости и параметра вращения



**Таблица 3.** Результаты разных исследований по определению параметров турбулентных скоростей для Солнца как звезды. Звездочкой отмечены значения скоростей, полученные путем преобразования  $v_{RT} \kappa_G$  и наоборот

$v_{RT}$ , км/с	$\kappa_G$ , км/с	$v$ , км/с	$V \sin i$ , км/с	Метод	Литературный источник
Очень сильные линии					
2.3	1.5*	0.5	2.0	профиль линии	[46]
Сильные линии					
3.0*	2.0	0.5	1.9	профиль линии	[47]
3.1	2.15*	0.5	1.9	образ Фурье	[16]
2.58*	1.72	1.07	1.9	профиль линии	[12]
2.6	1.9	0.70	1.85	образ Фурье	[41]
2.89	1.99	0.85	1.75	образ Фурье	[40]
2.92*	2.03	0.78	1.84	образ Фурье	данный анализ
Слабые линии					
3.45*	2.3	1.2	2.03	профиль линии	[4]
3.7	2.5*	0.5	2.0	профиль линии	[46]
3.45*	2.3	0.8	1.9	профиль линии	[38]
3.45*	2.3	0.5	1.9	профиль линии	[47]
3.8	2.64*	0.5	1.9	образ Фурье	[16]
3.77	2.6*	—	1.75	образ Фурье	[24]
3.22	2.22	0.85	1.75	образ Фурье	[40]
3.15*	2.19	0.78	1.84	образ Фурье	данный анализ
Сильные и слабые линии					
3.2	2.13*	—	2.2	образ Фурье	[43]
3.21	2.14*	0.85	1.9	профиль линии	[10]
3.5	2.2*	0.40	1.7	образ Фурье	[13]



**Рис. 7.** Коррелятивные зависимости средних значений микротурбулентности  $\xi$ , вращения  $V \sin i$ , содержания железа  $A$ , полученных в работе [29], от результатов данного исследования для одних и тех же звезд. Квадратики — данные для Солнца, пунктир — линия равных значений

при фиксированном значении макротурбулентной скорости  $v = 2$  км/с для всех звезд. В принципе это предположение может внести некоторую ошибку в результаты анализа вследствие зависимости макротурбулентности от эффективной температуры и ускорения свобод-

ного падения. На рис. 7 приведены коррелятивные зависимости значений  $\sigma$ ,  $V \sin i$  и содержания железа, полученных нами, и оценок, полученных в работе [29]. Как и следовало ожидать, значение параметров  $V \sin i$ , полученные в работе [29], завышены по сравнению с нашими, так как они компенсируют недостаток макротурбулентного расширения. Данные о микротурбулентной скорости и содержании железа в основном согласуются в пределах погрешностей выполненных анализов.

## ВЫВОДЫ

Мы провели исследование направленных вдоль луча зрения турбулентных скоростей, а также скорости вращения и содержания железа в звездах солнечного типа на основании спектральных наблюдений на HARPS. Для 17 линий железа в спектрах 13 звезд и Солнца был выполнен фурье-анализ с применением изотропной гауссовой модели микро- и макротурбулентности. Так как все свойства атмосферы определяются потоком энергии и плотностью газов или, другими словами, температурой и ускорением свободного падения, результаты нашего анализа были проверены на зависимость от этих параметров звезды. В общем они подтвердили установленные ранее зависимости от фундаментальных параметров звезд. Кроме того, мы сделали попытку вывести зависимости турбулентных скоростей с глубиной в атмосферах звезд. Основные выводы следующие.

Макротурбулентная скорость в атмосферах звезд увеличивается с увеличением эффективной температуры и с уменьшением ускорения свободного падения. Макротурбулентная скорость увеличивается с глубиной в фотосфере. Градиент изменения макротурбулентных скоростей с глубиной увеличивается с увеличением эффективной температуры и силы гравитации на поверхности звезды. Для наиболее холодных звезд макротурбулентная скорость почти не изменяется с высотой.

Микротурбулентная и макротурбулентная скорости тесно связаны между собой. В среднем с увеличением макротурбулентности увеличивается и микротурбулентность в атмосферах звезд солнечного типа. Зависимости этих скоростей от фундаментальных параметров в общих чертах похожи друг на друга с той лишь разницей, что для микротурбулентности они менее крутые. Микротурбулентная скорость мало изменяется с глубиной в атмосферах исследуемых звезд. Для Солнца и некоторых звезд она почти постоянная, в других случаях наблюдается как уменьшение, так и увеличение микротурбулентной скорости с глубиной.

Проекция скорости вращения в звездах зависит от эффективной температуры и силы гравитации подобно турбулентным скоростям. Чем выше эффективная температура и меньше ускорения свободного

падения, тем быстрее звезда вращается вокруг своей оси. Чем больший возраст звезды и меньшая масса звезды, тем меньше скорость вращения.

Скорость вращения звезды коррелирует с макротурбулентностью. Чем больше скорость вращения, тем больше макротурбулентная скорость. Отношение между макротурбулентной скоростью и скоростью вращения равно приблизительно единице для группы звезд с эффективными температурами около 6000 К. Для более холодных звезд с эффективными температурами около 5000 К это отношение составляет 1.7. С возрастом звезды скорость вращения уменьшается более резко, чем скорость макротурбулентных движений.

Автор благодарна Я. Павленко и А. Иванюку за предоставленные наблюдаемые спектры звезд и обсуждение результатов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась в рамках планового финансирования учреждений Национальной академии наук Украины.

1. Гадун А. С., Шеминова В. А. SPANSAT: Программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР-приближении. — Киев, 1988. 37 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-88-87Р).
2. Гуртовенко Э. А., Ратникова В. А. Исследование микротурбулентности по эквивалентным ширинам умеренных и умеренно-сильных линий. *Астрометрия и астрофизика*. 1976. 30. С. 14—25.
3. Шеминова В. А. Определение микро-макротурбулентных скоростей и уточнение постоянной затухания по профилям фраунгоферовых линий. *Астрометрия и астрофизика*. 1984. 51. С. 42—45.
4. Шеминова В. А. Турбулентность в фотосфере солнца как звезды. III. Микро-макротурбулентность. Солнеч. данные. *Бюлл. Глав. астрон. обс.* 1984. 8. С. 70—78.
5. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J. The solar chemical composition. *ASP Conf. Ser.* 2005. 336. P. 25—38.
6. Barklem P. S., Aspelund-Johansson J. The broadening of Fe II lines by neutral hydrogen collisions. *Astron. and Astrophys.* 2005. 435. P. 373—377.
7. Barklem P. S., Piskunov N., O'Mara B. J. A list of data for the broadening of metallic lines by neutral hydrogen collisions. *Astron. and Astrophys. Suppl.* 2000. 142. P. 467—473.
8. Brewer J. M., Fischer D. A., Valenti J. A., Piskunov N. Spectral properties of cool stars: extended abundance analysis of 1,617 planet-search stars. *Astrophys. J.* 2016. 225. Id. 32. 36 p.
9. Bruntt H., Bedding T. R., Quirion P.-O., Lo Curto G., Carrier F., Smalley B., Dall T. H., Arentoft T., Bazot M., Butler R. P. Accurate fundamental parameters for 23 bright solar-type stars. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2010. 405. P. 1907—1923.
10. Doyle A. P., Davies G. R., Smalley B., Chaplin W. J., Elsworth Y. Determining stellar macroturbulence using asteroseismic rotational velocities from Kepler. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2014. 444. P. 3592—3602.

11. Fuhr J. R., Wiese W. L. A critical compilation of atomic transition probabilities for neutral and singly ionized iron. *J. Phys. and Chem. Ref. Data*. 2006. 35. P. 1669—1809.
12. Gadun A. S., Kostyk R. I. Analysis of absorption line profiles in the spectra of the Sun and Procyon — velocity field and size of inhomogeneities. *Sov. Astron.* 1990. 34. N 3. P. 260—263.
13. Gonzalez G. Spectroscopic analyses of the parent stars of extrasolar planetary system candidates. *Astron. and Astrophys.* 1998. 334. P. 221—238.
14. Gray D. F. On the existence of classical microturbulence. *Astrophys. J.* 1973. 184. P. 461—472.
15. Gray D. F. Atmospheric turbulence measured in stars above the main sequence. *Astrophys. J.* 1975. 02. P. 148—164.
16. Gray D. F. A test of the micro-macro-turbulence model on the solar flux spectrum. *Astrophys. J.* 1977. 218. P. 530—538.
17. Gray D. F. Turbulence in stellar atmospheres. *Solar Phys.* 1978. 59. P. 193—236.
18. Gray D. F. Observations of spectral line asymmetries and convective velocities in F, G, and K stars. *Astrophys. J.* 1982. 255. P. 200—209.
19. Gray D. F. The temperature dependence of rotation and turbulence in giant stars. *Astrophys. J.* 1982. 262. N 2. P. 682—699.
20. Gray D. F. Measurements of rotation and turbulence in F, G, and K dwarfs stars. *Astrophys. J.* 1984. 281. P. 719—722.
21. Gray D. F. The observation and analysis of stellar photospheres. 3rd Edition, by D. F. Gray. ISBN 0521851866, UK: Cambridge University Press. 2005. 484 p.
22. Gray D. F. The stable K0 giant star beta Gem. *Astrophys. J.* 2014. 796. N 4. Id. 88. 11 p.
23. Gray D. F. A spectral-line analysis of the G8 III standard Vir. *Astrophys. J.* 2017. 845. Id. 62. 10 p.
24. Gray D. F. A Solar-flux line-broadening analysis. *Astrophys. J.* 2018. 857. Id. 139. 8 p.
25. Gurtovenko E. A., Sheminova V. A. 'Crossing' method for studying the turbulence in solar and stellar atmospheres. I — Application to the Sun. *Solar Phys.* 1986. 106. P. 237—247.
26. Gurtovenko E. A., Sheminova V. A. Formation depths of Fraunhofer lines. arXiv:1505.00975. 2015. 35 p.
27. Gustafsson B., Edvardsson B., Eriksson K., Jorgensen U. G., Nordlund A., Plez B. A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. I. Methods and general properties. *Astron. and Astrophys.* 2008. 486. P. 951—970.
28. Hinkle K., Wallace L. The spectrum of Arcturus from the infrared through the ultraviolet. *ASP Conference Ser.* . 321 p. (Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, eds. T. G. Barnes, F. N. Bash).
29. Ivanyuk O. M., Jenkins J. S., Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A., Pinfield D. J. The metal-rich abundance pattern — spectroscopic properties and abundances for 107 main-sequence stars. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. 468. P. 4151—4169.
30. Jenkins J. S., Jones H. R. A., Gozdziewski K. First results from the Calan-Hertfordshire Extrasolar Planet Search: exoplanets and the discovery of an eccentric brown dwarf in the desert. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2009. 398. P. 911—917.
31. Kostik R. I. Damping constant and turbulence in the solar atmosphere. *Solar Phys.* 1982. 78. P. 39—57.
32. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., Stempels H. C., Weiss W. W. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base. *Astron. and Astrophys. Suppl.* 1999. 138. P. 119—133.

33. Kurucz R. L. Atlas: a computer program for calculating model stellar atmospheres. 1970. *SAO Special Report* N309, Cambridge, 292 p.
34. Melendez J., Barbuy B. Both accurate and precise  $gf$ -values for Fe II lines. *Astron. and Astrophys.* 2009. 497. P. 611—617.
35. Neves V., Santos N. C., Sousa S. G., Correia A. C. M., Israelian G. Chemical abundances of 451 stars from the HARPS GTO planet search program. Thin disc, thick disc, and planets. *Astron. and Astrophys.* 2009. 497. P. 563—581.
36. Nissen P. E. Metal abundance and microturbulence in F0-G2 stars and the calibration of the Stromgren m1 index. *Astron. and Astrophys.* 1981. 97. P. 145—156.
37. Pavlenko Y. V., Kaminsky B. M., Jenkins J. S., Ivanyuk O. M., Jones H. R. A., Lyubchik Y. P. Masses, Oxygen and Carbon abundances in CHEPS dwarf stars. *Astron. and Astrophys.* 2019. 621. Id. A112. 13 p.
38. Saar S. H., Osten R. A. Rotation, turbulence and evidence for magnetic fields in southern dwarfs. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1997. 284. P. 803—810.
39. Scott P., Asplund M., Grevesse N., Bergemann M., Sauval A. J. The elemental composition of the Sun. II. The iron group elements Sc to Ni. *Astron. and Astrophys.* 2015. 537. Id. A26, 33 p.
40. Sheminova V. A. Fourier analysis of spectra of solar-type stars. *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* 2017. 33. P. 217—230.
41. Sheminova V. A., Gadun A. S. Fourier analysis of Fe I lines in the spectra of the Sun, alpha Centauri A, Procyon, Arcturus, and Canopus. *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* 1998. 14. N 3. P. 169—179.
42. Smith M. A. Applications of Fourier analysis to broadening of stellar line profiles. IV. A technique for separating macroturbulence from rotation in solar-type stars. *Astrophys. J.* 1976. 208. P. 487—499.
43. Smith M. A. An anticorrelation between macroturbulence and age in G stars near the main sequence. *Astrophys. J.* 1978. 224. P. 584—594.
44. Smith M. A. Rotational studies of lower main-sequence stars. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 1979. 91. P. 737—745.
45. Sousa S. G., Santos N. C., Israelian G., Lovis C., Mayor M., Lo Curto G., Udry S. Spectroscopic stellar parameters for 582 FGK stars in the HARPS volume-limited sample. Revising the metallicity-planet correlation. *Astron. and Astrophys.* 2011. 533. Id. A141. 9 p.
46. Takeda Y. Analyses of line profiles in the solar flux spectrum for determining rotation and micro/macro turbulence. *Publ. Astron. Soc. Jap.* 1995. 47. P. 337—354.
47. Takeda Y., UeNo S. Does the radial-tangential macroturbulence model adequately describe the spectral line broadening of solar-type stars? *Publ. Astron. Soc. Jap.* 2017. 69. Id. 46. 25 p.
48. Valenti J. A., Fischer D. A. Spectroscopic Properties of Cool Stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K Dwarfs from Keck, Lick, and AAT Planet Search Programs. *Astrophys. J. Suppl.* 2005. 159. P. 141—166.

В. А. Шемінова

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
Київ, Україна

#### ТУРБУЛЕНТНІСТЬ І ОБЕРТАННЯ У ЗОРЯХ СОНЯЧНОГО ТИПУ

Мікротурбулентні, макротурбулентні і теплові рухи в зоряних атмосферах разом із обертанням зорі розширюють профілі ліній у зоряних спектрах. Надійні дані про

розподіл турбулентних рухів по швидкостях в зоряних атмосферах необхідні для виконання однозначної інтерпретації спектрів зірок сонячного типу в дослідженнях і пошуках екзопланет. Зоряні спектри з високим спектральним розділенням 115 000, отримані на спектрографі HARPS, дають можливість досліджувати турбулентні швидкості і їхні залежності з глибиною у фотосфері зірок. Ми виконали аналіз Фур'є для 17 ліній заліза у спектрах 13 зірок з ефективними температурами 4900...6200 К і прискоренням вільного падіння 3.9...5.0, а також у спектрі Сонця як зірки. Моделі зоряних атмосфер були взяті з бази даних MARCS. У даному аналізі передбачалася стандартна концепція ізотропної гауссової мікро- і макротурбулентності. Задовільний збіг синтезованих профілів спектральних ліній із спостережуваними підтвердив надійність методу Фур'є. В результаті ми отримали найбільш імовірні значення турбулентних швидкостей, швидкість обертання, вміст заліза і їхні зміни з глибиною у фотосферних шарах. Мікротурбулентність істотно не змінюється з глибиною, тоді як макротурбулентність явно залежить від глибини. Вона збільшується з глибиною в атмосферах зірок. Що більша ефективна температура зірки і сила гравітації, то більшого градієнта макротурбулентності можна очікувати. Середнє значення макротурбулентної швидкості збільшується для зірок з вищими температурами, меншою силою гравітації і швидким обертанням. В аналізованих зірках середні швидкості макро- і мікротурбулентності корелюють одна з одною і з швидкістю обертання. Відношення значень швидкості макротурбулентності і швидкості обертання змінюється від 1 для найбільш гарячих зірок сонячного типу до 1.7 для найбільш холодних зірок. З віком зірки швидкість обертання зменшується більш різко, ніж швидкість макротурбулентних рухів.

**Ключові слова:** профілі ліній, зорі сонячного типу, поле швидкостей, обертання, вміст заліза, метод Фур'є.

*V. A. Sheminova*

Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

#### TURBULENCE AND ROTATION IN SOLAR-TYPE STARS

Microturbulence, macroturbulence, rotation along with thermal motions expand the profiles of lines in stellar spectra. Reliable data on the velocity distribution of turbulent motions in stellar atmospheres are necessary to perform an unambiguous interpretation of the spectra of solar-type stars in studies and searches for exoplanets. Stellar spectra with a high spectral resolution of 115 000 obtained with the HARPS spectrograph make it possible to investigate the turbulent velocities and their dependencies with depth in the photosphere of stars. We performed Fourier analysis for 17 iron lines in the spectra of 13 stars with effective temperatures of 4900...6200 K and the gravity of 3.9...5.0, as well as in the spectrum of the Sun as stars. Models of star atmospheres were taken from the MARCS database. The standard concept of isotropic Gaussian microturbulence was assumed in this analysis. The satisfactory fit of the synthesized profiles of spectral lines with observations confirmed the reliability of the Fourier method. As a result, we obtained the most probable values of the turbulent velocities, the rotation velocity, the iron abundance and their dependencies with depth in the photosphere layers. Microturbulence does not show a significant dependence with depth, while macroturbulence clearly depends on depth. The macroturbulent velocity grows with depth in the photospheres of stars. The greater the effective temperature of the star and the greater of gravity, the greater the gradient of macroturbulence can be expected. The average value of the macroturbulent velocity increases for stars with higher temperatures, less gravity and faster rotation. In the stars analyzed, the average velocity of macroturbulence and microturbulence correlate with each other and with the rotation velocity. The relationship between the macroturbulence velocity and the rotational velocity varies from 1 to 1.7 from the hottest to the coldest

solar-type stars. With the age of the star, the rotational velocity decreases more sharply than the velocity of macroturbulent motions.

**Keywords:** line profiles, solar-type stars, velocity field, rotation, iron abundance, Fourier method.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2018

Після доробки 07.02.2019

Прийнята до друку 21.02.2019