

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.02.039>

УДК 524.3

В. А. Шемінова

Головна астрономічна обсерваторія НАН України
вул. Академіка Заболотного, 27, Київ, Україна, 03143
shem@mao.kiev.ua

Конвективні зміщення ліній у спектрах зірок сонячного типу

У роботі вимірюються доплерівські зміщення ліній у спектрах Сонця і зірок з ефективними температурами від 4800 до 6200 K та оцінюються середні конвективні (грануляційні) швидкості. Абсолютну шкалу зміщень для зірок було встановлено на основі отриманої залежності зміщень сонячних ліній від оптичної глибини. Для FGK-зірок сонячного типу вперше отримано криві залежностей конвективних швидкостей від висоти в атмосфері для великого діапазону висот від 150 до 700 км. Всі криві вказують на зменшення блакитних зміщень з висотою, що означає уповільнення грануляційних швидкостей через фотосферу до нуля. У нижній хромосфері спостерігаються червоні зсуви сильних ліній Mg I, які свідчать про зміну напряму грануляційних швидкостей на протилежний і підтверджують ефекти оберненої грануляції на висотах вище 600 км. У більш холодних K-зірках грануляційні зміщення змінюються з висотою в середньому від -150 до 100 м/с, а у гарячих FG-зірках вони змінюються більш різко: від -700 до 300 м/с. Градієнт кривих зміщень збільшується зі збільшенням ефективної температури, зменшенням гравітації, металічності та віку зірки. Середня по всіх аналізованих висотах конвективна швидкість зірки збільшується від -90 до -560 м/с від холодніших до гарячіших зірок. Вона корелює з макротурбулентністю, асиметрією спектральних ліній і швидкістю обертання зірки. Ми також отримали променеві швидкості досліджуваних зірок і порівняли їх з даними SIMBAD. Були виявлені великі відхилення -21050 і 1775 м/с для зірок HD 102361 і HD 42936 відповідно. Для інших зірок відхилення не перевищує ± 0.340 км/с, яке ймовірно пов'язане з використанням в

даних SIMBAD середньої грануляційної швидкості ~ 300 м/с. Як показав наш аналіз, середня конвективна швидкість не однакова для зірок сонячного типу. Вона менша (більша) для зірок, холодніших (гарячіших), ніж Сонце, тому у визначеннях променевих швидкостей необхідно враховувати індивідуальні конвективні швидкості зірок.

Ключові слова: зірки сонячного типу, грануляція, зміщення ліній, конвективні швидкості, променеві швидкості.

ВСТУП

В атмосферах зірок область грануляції — це область виходу конвективних потоків за межі конвективної оболонки. Формування і еволюцію зоряної грануляції детально описано Драйвінсом [13]. Потoki, що піднімаються вгору, створюють картину грануляції, яка спостерігається тільки на поверхні Сонця і не спостерігається на поверхні зірок через низьке просторове розділення. Спливаюча гаряча речовина називається гранулами, а та, що опускається — міжгранулами. Оскільки гранули домінують, спостережені спектральні лінії зазнають доплерівського блакитного зміщення. Швидкість конвективних потоків зменшується з висотою у фотосфері, тому ядра сильних ліній, які утворюються у вищих фотосферних шарах, зазнають невеликих блакитних зміщень. Що слабкішою є спектральна лінія, то у глибших шарах формується її ядро, і більшого блакитного зміщення вона зазнає. Загалом конвективні рухи, проникаючи у фотосферу, розширюють профілі ліній, роблять їх асиметричними і зміщують центральне положення ліній у порівнянні з випадком статичної атмосфери. Ці зміни ліній були названі першою, другою і третьою ознаками грануляції в зоряних атмосферах [24].

Перша ознака розширення профілів характеризується в основному швидкістю рухів, що виникають внаслідок підйому і падіння речовини у грануляційних структурах. Швидкість великомасштабних рухів уздовж променя зору, так звана макротурбулентна швидкість, змінює форму профілю без зміни еквівалентної ширини лінії. У FGK-зірках сонячного типу макротурбулентна швидкість зменшується з висотою в атмосфері, її градієнт збільшується, і середнє значення збільшується від 1.7 до 6.0 км/с зі збільшенням ефективної температури і з більшою світністю [25, 64]. Вважається, що макротурбулентна швидкість, виведена з профілів спостережуваних ліній, є фактично грубою мірою дисперсії конвективних (або грануляційних) швидкостей уздовж променя зору у фотосфері відносно їхнього середнього значення [43]. Швидкість грануляційних рухів на масштабах, менших у порівнянні з середньою довжиною вільного пробігу фотона у спектральній лінії, або мікротурбулентна швидкість, розширює профіль лінії і змінює еквівалентну ширину. За величиною вона невелика і слабо зменшується з висотою. У зірках сонячного типу вона збільшу-

ється з ефективною температурою від 0.7 до 1.5 км/с [64]. На профіль лінії впливає також швидкість обертання зірки $\sin i$, яка розширює профілі без зміни еквівалентної ширини. Як правило, її можна детектувати, якщо вона перевищує 2...3 км/с. В іншому випадку розширення через обертання може маскувати ефекти макротурбулентності. Інші рухи, наприклад нерадіальні коливання, осциляції, мало впливають на форму профілів.

Друга ознака грануляції, асиметрія профілів ліній, характеризується бісектором, форма якого відображає зміни зміщень у профілі лінії з висотою у фотосфері, оскільки висота формування кожної точки профілю збільшується, якщо пересуватися від далекого крила профіля до ядра. В області грануляції переважає рух гранул, швидкість яких змінюється з висотою і зумовлює асиметрію профілів ліній. У зірках сонячного типу форма бісектора в сильних лініях приблизно виглядає як літера «С» з максимальним відхиленням у блакитну сторону, тоді як у слабких лініях бісектор схожий на верхню частину літери «С», а в зірках зі швидким обертанням $\sin i > 5$ км/с він схожий на знак «слеш» [2, 27, 35, 63]. Розмах бісектора збільшується зі збільшенням ефективною температурою, що свідчить про збільшення сили конвекції [26, 63]. Починаючи з зірок F0 V і вище на головній послідовності форма бісектора змінюється на зворотну. Перехід від однієї форми до іншої був названий «межею грануляції» [23]. Це явище пояснюють іншою картиною грануляції в гарячих зірках: повільні холодні потоки вниз, що займають велику площу на поверхні, і гарячі швидші та вужчі потоки вгору [12, 26, 42].

Третя ознака — це конвективні, або грануляційні зміщення ліній, які вказують на середню швидкість піднімання і опускання конвективних потоків на глибині ефективного формування ядра лінії. Оскільки спектральні лінії формуються на різних висотах в атмосфері, можна простежити зміну величини зміщень з висотою. Грануляційні зміщення добре вивчено для Сонця і деяких зірок [2, 14, 24, 35, 58, 59]. Використання третьої ознаки має одну перевагу, яка полягає у можливості залучити для аналізу істотно більше число ліній, ніж у випадку першої і другої ознаки грануляції. Чисті від бленд ядра ліній зустрічаються у спектрах частіше, ніж чисті від бленд профілі. Велика кількість ліній дозволить істотно зменшити помилку результату. З іншого боку, досліджувати зміщення ліній досить важко, бо тут ми стикаємося з невизначеністю при вимірюванні центральної довжини хвилі лінії, з недостатнім спектральним розділенням і низьким відношенням сигнал-шум у спектрах зірок; недостатньо високою точністю лабораторних довжин хвиль, гравітаційного червоного зсуву і радіальної швидкості зірки відносно спостерігача. Крім того, низька просторова роздільність зоряних спектрів не дозволяє врахувати зміни від центра диска до лімба і простежити зміни зміщень з часом, які відбуваються протягом еволюції грануляції і циклічної магнітної активності, що ослаблює локальні конвективні рухи.

Додатково було введено ще четверту ознаку грануляції — дефіцит потоку [27]. Цей параметр є мірою контрасту потоку між гранулами і міжгранулами. На основі аналізу цього параметра було зроблено висновки про те, що добре відома межа грануляції у зірках [23] не свідчить про те, в яких зірках конвекція впливає або не впливає на поле фотосферних швидкостей, а замість цього вона показує співвідношення між величиною швидкостей і їхніх градієнтів через фотосфери [25, 26].

Наразі ми ще мало знаємо про грануляційні швидкості зірок. Їхні точні значення необхідні для вирішення проблеми вимірювання радіальних швидкостей, наприклад в задачах з пошуку екзопланет [15, 34, 53, 58]. Згідно з висновками [10] грануляцію слід розглядати як внутрішню невизначеність вимірювань транзитів екзопланет, тому повна характеристика грануляції важлива для визначення ступеня невизначеності параметрів планети. У зв'язку з цим ми поставили перед собою завдання детальніше дослідити грануляцію зірок сонячного типу: виміряти конвективні зміщення спектральних ліній, визначити середні грануляційні швидкості в ряді зірок з різними параметрами, дослідити зміну грануляційних швидкостей з висотою в атмосфері та простежити можливі тенденції конвективних зміщень в залежності від основних параметрів зірок.

КОРОТКИЙ ОГЛЯД ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сонячні зміщення. Систематичний аналіз зміщень ліній в інтегральному спектрі Сонця має особливе значення як еталон для дослідження зоряної грануляції. До даного часу отримано великий діапазон зміщень різноманітних фраунгоферових ліній [1, 4, 5, 14, 16, 35, 56]. Їхня величина залежить від сили ліній, потенціалу збудження і довжини хвилі. Всі дослідники відзначають, що залежність зміщень від глибини лінії є найсуттєвішою. Величина блакитних зміщень наближається до постійного значення, близького до нуля, зі збільшенням сили ліній і утворює «плато» для сильних ліній з еквівалентними ширинами, не меншими за 20 пм, що формується внаслідок насичення сильних ліній [1]. Залежність зміщень від потенціалу збудження виявилася уявною, тому що вона відображає чутливість до глибини лінії, а залежність від довжини хвилі має місце тільки для ліній з однаковими глибинами [35]. Що менша довжина хвилі, то більшим є блакитний зсув лінії через ослаблення континууму зі зменшенням довжини хвилі. В роботі [61] на основі нового атласу IAG з розділенням $R = 1000\ 000$ отримано вираз для зміщення V (у м/с) в залежності від глибини d лінії:

$$V = -504.891 - 43.7963d - 145.560d^2 + 884.308d^3.$$

Згідно з цим виразом різниця між грануляційним зміщенням слабких і сильних ліній становить в середньому -550 м/с. Трохи пізніше в

роботі [27] було отримано новий вираз на основі незалежних спостережень ($R = 100000$):

$$F / F_c = 0.3249 - 1.2919 \cdot 10^{-4} V + 5.8390 \cdot 10^{-7} V^2 - 2.0638 \cdot 10^{-9} V^3,$$

а також з використанням атласу [67] ($R = 700000$):

$$F / F_c = 0.3056 - 2.9902 \cdot 10^{-4} V + 3.2008 \cdot 10^{-7} V^2 - 2.1689 \cdot 10^{-9} V^3,$$

де F / F_c — відношення потоку в лінії до потоку в континуумі. Ці вирази були використані для масштабування спостережуваних зоряних зміщень [30].

На величину зміщень ліній відчутно впливає сонячна активність. Блакитні зміщення послаблюються у магнітних областях через зміну структури грануляції [8, 9]. На зміщення впливає також спектральне розділення, що призводить до зміни нахилу залежності зміщень від глибини лінії [35].

Важливим моментом у вимірюваннях грануляційних зміщень є коректність абсолютної шкали зміщень, яка не містить гравітаційного зсуву і скоригована за доплерівський зсув внаслідок відносного руху Землі та зірки вздовж променя зору. Шкали різних сонячних атласів порівнювались в роботі [61]. Виявилось, що шкала атласу Куроца [41] зміщена на -50 м/с в діапазоні $400 \dots 500$ нм, тоді як шкала для атласу IAG [61] узгоджена у всьому діапазоні довжин хвиль і є точною у межах точності положень телуричних ліній, тобто до 10 м/с. Шкала для сонячного спектру в атласі Хінклі та ін. [36] зміщена від -100 до -330 м/с в діапазоні $450 \dots 650$ нм, як було показано в роботі [63]. Наразі, крім атласу IAG, по довжині хвилі найточніше прокалібровано атлас HARPS LFC [46] з $R = 120\,000$.

Зоряні зміщення. Вимірювання грануляційних зміщень ліній у зіркових спектрах значно складніше виконати через недостатньо високе спектральне розділення, підвищений шум, а також через проблеми абсолютної шкали зміщень. Отримані результати показують дуже великий розкид зміщень не тільки для слабких, а й для всіх інших ліній [2, 14, 24, 35, 43, 48—50, 55, 58, 59]. Вивчаючи цю проблему, Грей [24] окреслив ряд причин великого розкиду для слабких ліній: 1) більш невизначена ситуація вимірювання центральної довжини хвилі лінії через більш плоске дно профілю у порівнянні з помірними лініями; 2) спотворення слабкими неідентифікованими блендами; 3) великі похибки лабораторних довжин хвиль в даних [51]; 4) використання ліній у великому діапазоні довжин хвиль. Крім того, на точність вимірювання зміщень додатково впливає швидкість обертання зірки. Щоб зменшити великий розкид, зміщення вимірюють як середнє по великому числу ліній зі схожими умовами їхнього формування, тобто з близькими ефективними висотами формування ліній.

Як відзначають багато дослідників, основна властивість грануляційних зміщень ліній в зірках — це їхнє збільшення зі збільшенням ефективної температури внаслідок сильнішої поверхневої грануляції.

У К-карликів ефекти грануляції менші, ніж у Сонця [11, 22]. У спектрах К-гігантів конвективні зміщення ліній, виміряні по слабких і сильних лініях, відрізняються майже на 1 км/с [2]. Це значно більше, ніж для GK-карликів і субгігантів аналогічних спектральних типів. Для червоних гігантів вони змінюються в діапазоні від -100 до -900 м/с [60]. Для зірок від K2 до G0 блакитні зміщення збільшуються від -150 до -500 м/с і зменшуються зі зменшенням зоряної маси і зі збільшенням металічності зірки [47, 48]. Нахил залежностей зміщень від сили ліній різний для різних зірок [24]. Величина зіркових зміщень залежить від магнітної активності [28, 29, 66]. Оскільки зайнята магнітними полями площа змінюється на диску зірки під час циклу зоряної активності, зміщення ліній модулюються з таким же періодом. Результати роботи [48] також показали послаблення грануляції з активністю зір в діапазоні ефективних температур $6300\dots 5200$ К для зір від F7 до K4.

ДАНІ АНАЛІЗУ І МЕТОД ВИМІРЮВАНЬ

Спостереження. Ми використовуємо спектри 12 зірок сонячного типу (табл. 1) з вибірки Calan-Hertfordshire Extrasolar Planet Search (CHEPS), які були отримані на телескопі HARPS в Ла Сілла, Чілі [38] з розділенням $R = 120000$ і відношенням сигнал/шум > 100 . Дані про ефективні температури T_{ef} , параметри гравітації $\lg g$ і металічності $[\text{Fe}/\text{H}]$ взято з роботи [37], дані про масу m та вік — із роботи [54], про мікро- і макротурбулентну швидкості u і w , параметри обертання $\sin i$ та вміст заліза A — з роботи [64]. Радіуси і променеві швидкості зірок

Таблиця 1. Параметри аналізованих зірок: ефективна температура T_{ef} , прискорення вільного падіння на поверхні $\lg g$, металічність $[\text{M}/\text{H}]$, маса M/M_{\odot} , вік, радіус r , світність L , вміст заліза A

HD	Тип	T_{ef} , К	$\lg g$	$[\text{M}/\text{H}]$	M/M_{\odot}	r	L	Вік, 10^9 р.	A
6790	G0 V	6012	4.40	-0.06	1.089	1.13	1.427	3.5	7.55
38459	K1 IV-V	5233	4.43	0.06	0.882	0.84	0.515	9.0	7.58
42936	K0 IV-V	5126	4.44	0.19	0.881	0.91	0.510	12.0	7.61
93849	G0/1 V	6153	4.21	0.08	1.268	1.52	2.974	3.5	7.66
102196	G2 V	6012	3.90	-0.05	1.395	1.97	4.719	3.0	7.52
102361	F8 V	5978	4.12	-0.15	1.250	1.54	2.775	2.0	7.39
127423	G0 V	6020	4.26	-0.09	1.107	1.16	1.546	3.1	7.48
128356	K2.5 IV	4875	4.58	0.34	0.824	0.84	0.371	15.5	7.73
147873	G1 V	5972	3.90	-0.09	1.493	2.36	6.568	2.6	7.53
158469	F8/G2 V	6105	4.19	-0.14	1.223	1.42	2.498	2.0	7.41
189627	F7 V	6210	4.40	0.07	1.244	1.43	2.719	4.0	7.67
221575	K2 V	5037	4.49	-0.11	0.823	0.82	0.368	6.0	7.34
Sun	G2 V	5777	4.44	0.00	1.000	1.00	1.000	4.6	7.52

відповідають даним з каталогу Gaia DR2 [20]. Спектральні типи взято з бази SIMBAD (<http://cdsportal.u-strasbg.fr>). Всі зірки є поодинокими і неактивними ($\lg R_{HK} = -4.5$ dex). Діапазон T_{ef} невеликий — від 4800 до 6200 К. Частина зірок злегка збагачені металами ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.06 \dots 0.34$), а інші мають невеликий дефіцит металів ($-0.05 \dots -0.15$). Ми також використовували сонячний спектр інтегрального потоку, отриманий на HARPS [46] (надалі — атлас HARPS). Для калібрування цього атласу був застосований ідеальний калібратор з рядом лазерних частот LFC (Laser Frequency Comb), і тому довжини хвиль HARPS є найточнішими з усіх можливих у даний час. Крім того, ми використовували атлас IAG сонячного потоку [61] з розділенням $R = 1000\,000$, нульову точку якого встановлено з точністю до 5...10 м/с.

Вимірювання центральної довжини хвилі спектральної лінії.

Відомі різні методи вимірювання центральної довжини хвилі лінії, які забезпечують різну точність отриманих результатів. Найбільш популярні методи включають гауссіану і поліноміальну апроксимацію [1, 2, 5, 58, 61]. Застосування поліномів виявилось цілком ефективним при високому розділенні. Крім того, також використовується точка бісектора, на 7 % вище від мінімуму лінії [11], центр мас ядра лінії [8], дві найнижчі точки бісектора в ядрі лінії [35], найнижча точка бісектора, яка відповідає одній точці даних зліва від мінімуму [27]. У більшості методів точність вимірювання залежить від сили лінії і ширини в ядрі лінії.

Щоб вибрати найбільш стійкий до шумів метод для наших конкретних спостережуваних спектрів, ми протестували більшість відомих методів. Спостережувані профілі ліній були згладжені для зменшення шумів і проінтерпольовані. Ширина ділянки навколо ядра лінії підбиралася в залежності від зірки і становила 3...7 км/с. При використанні центра мас оптимальна ділянка відповідала частині ядра на висоті 5...7 % вище від мінімуму. Щоб представити результати тестування у шкалі конвективних швидкостей, ми виміряли зміщення ліній відносно лабораторної довжини хвилі і відняли зміщення, обчислене на основі променевих швидкостей з бази SIMBAD, і гравітаційний зсув, обчислений з використанням маси [54] і радіуса [20] зірки.

На рис. 1 для кожної зірки приведено поліноміальні апроксимації грануляційних зміщень ліній, отриманих з використанням різних методів вимірювання довжини хвилі лінії. Всі ці криві зміщень приведені в одному масштабі. Для зірок HD 102361 і HD 42936 ми виявили нереальні значення зміщень. Цілоком ймовірно, що причиною цього є помилки використаних променевих швидкостей з бази SIMBAD. Як видно з рис. 1, слабкі лінії ($d < 0.2$) показують найбільші відмінності між кривими, отриманими різними методами, через більшу чутливість до бленд і шумів. Те ж саме ми бачимо для сильних ліній ($d > 0.8$) в зірках з великими швидкостями обертання, в основному через розширене та плоске ядро ліній і малу кількість сильних ліній у цих зірках. Метод двох точок виявився найбільш чутливим до шумів і до плос-

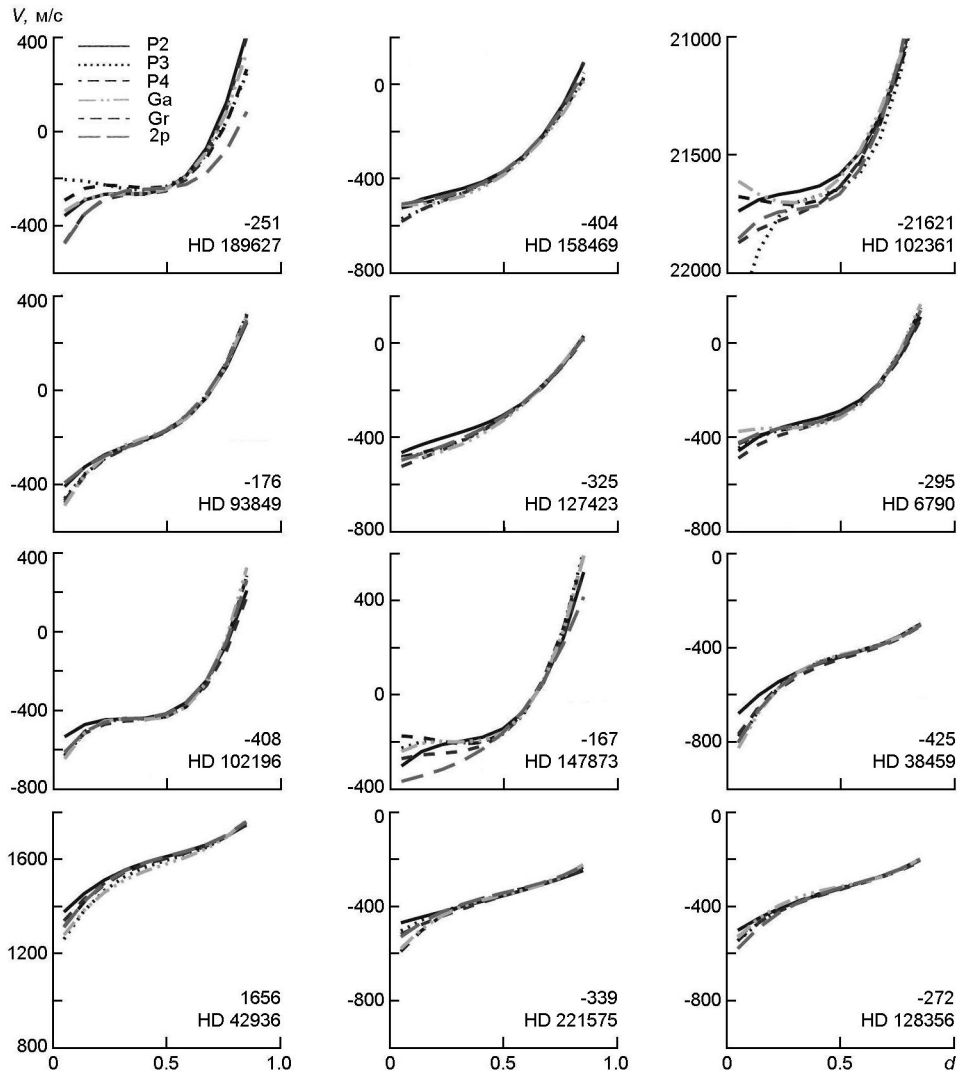


Рис. 1. Тестування методів вимірювання центральної позиції лінії у спектрі зірок сонячного типу. Кожна крива є поліноміальною апроксимацією конвективних зміщень V у залежності від глибини лінії d , отриманими різними методами з використанням поліномів другого степеня (P2), 3-го степеня (P3), 4-го степеня (P4), гауссіани (Ga), центра мас (Gr) і двох найближчих до центра лінії точок (2p). На кожній панелі вказано середнє грануляційне зміщення у м/с

кого ядра лінії. Для найбільш гарячої зірки HD 189627 відмінності у зміщеннях сильних ліній особливо великі. Щоб оцінити надійність методу, ми порівняли середні по всіх бінах стандартні відхилення зміщень для кожної зірки. Виявилось, що найкращий результат дає парабола ($\langle \rangle = 100...180$ м/с), а найгірший результат дає гауссіана і метод двох точок ($\langle \rangle = 150...260$ і $120...300$ м/с відповідно). Ширина зазначених діапазонів показує зміну значень $\langle \rangle$ від холодних до гарячих зірок. Найбільше значення $\langle \rangle$ отримано для слабких ліній у га-

рячих зірках HD 189627, HD 147873, HD 102361 зі швидкістю обертання $\sin i > 5$ км/с. На основі цих тестів зроблено висновок, що для вимірювання довжин хвиль ліній у спектрах зірок нашої вибірки найбільш надійним є поліном другого степеня.

Вимірювання грануляційної швидкості. Ми виміряли центральну довжину хвилі λ_{obs} лінії в зоряному спектрі за допомогою параболи і отримали спостережуваний зсув за відомою формулою доплерівського зсуву (у м/с): $V_{obs} = c(\lambda_{obs} - \lambda_{lab}) / \lambda_{lab}$. Тут λ_{lab} — лабораторна довжина хвилі, c — швидкість світла. Щоб отримати грануляційну швидкість на глибині формування ядра даної лінії, необхідно відняти від V_{obs} гравітаційний зсув V_{grav} і швидкість відносного руху Землі та зірки вздовж променя зору, тобто променеву (радіальну) швидкість RV . Швидкість V_{grav} була обчислена за відомою формулою: $V_{grav} = (M_{star} / M_{\odot})(R_{\odot} / R_{star})V_{grav,\odot}$, де M_{star} , R_{star} — маса і радіус зірки, $V_{grav,\odot} = 633$ м/с — гравітаційний сонячний зсув відповідно [44]. Наведені на рис. 1 тестові результати із застосуванням променевих швидкостей з бази SIMBAD показали, що отримані середні конвективні зміщення в зірках не узгоджуються з основними параметрами зірок, зокрема вони не залежать від ефективної температури. Це можна простежити на рис. 1, де температура зірок збільшується зліва направо і зверху донизу. Сучасні дані променевих швидкостей отримують спектроскопічними і астрометричними методами. Останні дозволяють отримувати радіальні швидкості, що не залежать від таких факторів, як пульсації, конвекція, обертання, вітер, ізотопний склад, тиск і гравітаційний потенціал [17]. На жаль, вони відомі не для всіх зірок. Спектроскопічні вимірювання дають менш точні значення променевих швидкостей через погано відомі значення конвективних швидкостей. Оскільки проблема променевих швидкостей повністю не вирішена, часто вимірюють або диференційні конвективні зміщення ліній, наприклад зміщення слабких ліній відносно сильних ліній у спектрі однієї і тієї ж зірки, або зміщення відносно обраного репера. Наприклад, для вимірювання конвективних зміщень у магнітних утвореннях у фотосфері Сонця репером служила дуже сильна лінія Mg I 517.27 нм [8, 45]. Передбачалося, що її ядро утворюється високо в атмосфері, де кореляція між інтенсивністю і швидкістю конвективних рухів слабка, тому її конвективне зміщення буде майже нульовим. Як репер використовується також група сильних ліній заліза [1, 8, 58] або абсолютна шкала зміщень ліній у спектрі сонячного потоку, отриманого з високоточним калібруванням по довжині хвилі [24, 47].

Труднощі даного завдання полягають також в тому, що для зірок ми не маємо спектрів з високою роздільною здатністю та точним калібруванням по довжині хвилі, точних лабораторних довжин хвиль та точних променевих швидкостей. Найточніші на сьогодні лабораторні довжини хвиль ліній представлено у базі даних NIST (<https://physics.nist.gov/asd>), яка містить для ліній заліза скоректовані значення [51]. Ці дані були використані в нашому аналізі.

Щоб визначити нуль-пункт абсолютної шкали зміщень ліній у спектрах зірок, для яких променеві швидкості невідомі, ми за еталон вибрали абсолютні зміщення сонячних ліній. Схема обчислень була такою.

1. Обчислюємо ефективні глибини формування ядер ліній для Сонця і всіх зірок.

2. Вимірюємо грануляційні зміщення ліній для Сонця в абсолютній шкалі, в якій враховані гравітаційний зсув та радіальний рух зірки, і будуємо графік отриманих зміщень в залежності від ефективних глибин формування ліній.

3. Визначаємо оптичну (або геометричну) глибину, на якій грануляційні зміщення сонячних ліній дорівнюють нулю і припускаємо, що вона однакова для всіх зірок сонячного типу. Ця глибина є нуль-пунктом абсолютної шкали зміщень для кожної зірки. Називаємо її глибиною нульових зміщень.

4. Вимірюємо зміщення спостережених ліній V_{obs} в зірках і будуємо їхні графіки в залежності від ефективної глибини формування цих ліній для кожної зірки.

5. Зсуваємо шкалу зоряних зміщень так, щоб нульові зміщення відповідали глибині нульових зміщень. Застосування цієї схеми дозволяє встановити нуль-пункт абсолютних зміщень і отримати грануляційні зміщення V для кожної зірки, а також обчислити променеву швидкість RV зірки, віднімаючи гравітаційне зміщення зірки V_{grav} від величини зсуву зоряної шкали зміщень.

Ефективні оптичні глибини формування ядер ліній $lg \tau_5$ були розраховані на основі депресійних функцій вкладу [31, 32]. Для цього ми виконали синтез ліній поглинання у зіркових спектрах у наближенні LTE з використанням коду SPANSAT [21] і моделей атмосфер MARCS [33] з представленими у табл. 1 значеннями основних параметрів зірок, а також параметрів мікро- і макротурбулентної швидкості, швидкості обертання $v \sin i$, вмісту заліза A . Сили осциляторів ліній заліза були взяті з таблиць [18]. Константа загасання, пов'язана з силою Ван-дер-Ваальса, дорівнює ϵ_6 згідно з класичним наближенням Унзольда. Використані нами припущення прийнятні для оцінки середньої глибини формування спектральних ліній поглинання в зоряних атмосферах. Список ліній заліза для даного аналізу був підібраний так, щоб охопити великий діапазон глибин ліній для кожної конкретної зірки. Крім того були використані три дуже сильні лінії Mg I 517.26, 518.36, 552.84 нм і дві лінії Ca I 612.2, 616.2 нм, щоб розширити діапазон червоних зміщень. Грунтуючись на ідеї, що грануляція впливає однаково на лінії, які формуються у вузькому атмосферному шарі, всі лінії були розділені на групи з близькими глибинами формування. Таким чином було отримано статистично надійний результат.

РЕЗУЛЬТАТИ І ДИСКУСІЯ

У даній роботі ми зосередили основну увагу на залежності конвективних зміщень від оптичної глибини в атмосфері, яка безпосередньо демонструє зміну швидкості грануляції через фотосферу. Додатково ми також розглянули залежності зміщень від глибини лінії, оскільки вони часто використовуються в літературі при інтерпретації конвективних зміщень і можуть становити інтерес для порівняння. Що стосується залежності зміщень від еквівалентної ширини, потенціалу збудження і довжини хвилі, вони за своїм характером і властивостями схожі на раніше отримані подібні залежності, тому ми не наводимо їх тут.

Сонячні криві конвективних зміщень. На рис. 2 показано зміщення сонячних ліній, отримані для 476 ліній з атласу IAG ($R = 1000000$) і 287 ліній з атласу HARPS ($R = 120000$), в шкалах оптичних глибин, геометричних висот і глибин ліній. Графіки залежностей зміщень від оптичної глибини і геометричної висоти H в атмосфері демонструють, що співвідношення між $\lg \tau_{50}$ і H практично пропорційне. Геометрична шкала висот задана в кілометрах над $\tau_{50} = 1$. За допомогою цих графіків ми визначили глибину нульових зміщень для встановлення нуль-пункту шкали зміщень у зірках. Вона дорівнює $\lg \tau_{50} = -4.85$, або $H = 650$ км, і не залежить від спектрального розділення. Для визначення нуль-пункту шкали зміщень можна також користуватися залежністю зміщень від глибини лінії d , як це було зроблено в роботі [24]. Наші результати показують, що в цьому випадку нуль-пункт буде залежати від спектрального розділення. Ми отрима-

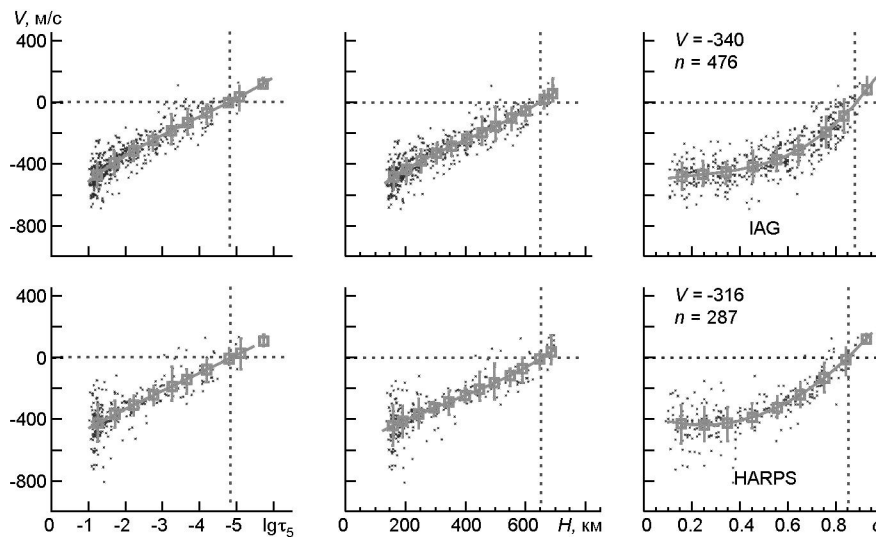


Рис. 2. Графіки залежностей зміщень V від оптичної глибини $\lg \tau_{50}$, геометричної висоти H і глибини лінії d , отримані для сонячних ліній з атласу IAG (верхня панель) і атласу HARPS (нижня панель). Точки — зміщення індивідуальних ліній, сірі квадратики з вертикальними лініями — середні значення та похибки в кожному біні. Сірі криві — поліноміальні апроксимації третього порядку. Вгорі вказано середнє грануляційне зміщення V (у м/с) і кількість n використаних ліній

ли, що нуль-пункт відповідає глибинам ліній $d = 0.88$ для IAG і 0.85 для HARPS. Це означає, що можна допустити похибку близько 70 м/с за шкалою зміщень через менше розділення атласу HARPS. З рис. 2 видно, що розкид індивідуальних значень більший на графіку залежності зміщень від глибини лінії d , ніж на графіку від оптичної глибини $\lg \lambda_5$. Це пов'язано з впливом довжини хвилі і потенціалу збудження на d . Загалом величина розкиду в кожному біні зумовлена в основному шумами спостережень, наявністю невидимих бленд, похибками лабораторних довжин хвиль, а також різною кількістю ліній. Ми отримали середнє конвективне зміщення -340 ± 159 м/с (IAG) і -316 ± 165 м/с (HARPS). Невелике розходження (24 м/с) зумовлене різним спектральним розділенням. Це відомий факт, коли зміщення ліній зменшуються з погіршенням спектрального розділення [3]. Наші результати задовільно узгоджуються з результатами [14, 47] (300 і 355 м/с відповідно).

Ми отримали вирази для залежності сонячних конвективних зміщень V (м/с) від оптичної глибини $\lg \lambda_5$ згідно з даними атласу HARPS:

$$V = -601.2 - 145.9 \lg \lambda_5 - 8.71 \lg \lambda_5^2 - 0.81 \lg \lambda_5^3,$$

і згідно з даними атласу IAG:

$$V = -737.8 - 245.4 \lg \lambda_5 + 32.11 \lg \lambda_5^2 - 2.71 \lg \lambda_5^3,$$

і відповідно для залежностей від глибини лінії:

$$V = 369.7 - 550.3d + 1105.5d^2 - 70.4d^3,$$

$$V = 518.6 - 326.7d - 783.5d^2 + 1211.4d^3.$$

Ці вирази можна використовувати для побудови стандартних кривих конвективних швидкостей для Сонця як зірки. На рис. 3а ми порівняли наші стандартні криві з отриманими раніше кривими [24, 35, 61]. У загальних рисах вони схожі між собою, але зміщені одна відносно іншої у межах 100 м/с, крім кривої [24], яка зміщена значно більше. Відмінності в нуль-пункті шкали зміщень можуть бути зумовлені похибками калібрування шкали довжин хвиль, вибором спектральних ліній, різними способами вимірювання позиції ядра лінії та ін. Якщо поєднати всі криві, як показано на рис. 3б, тоді видно, що вони демонструють задовільний збіг між собою у межах допустимих похибок даного аналізу.

Зоряні криві конвективних зміщень. На рис. 4...6 представлено результати вимірювання конвективних зміщень для зірок (крива 1) у порівнянні зі стандартною кривою (крива 2) зміщень, отриманою для Сонця з атласу HARPS. Перш за все зазначимо, що кількість індивідуальних зміщень істотно менша для найбільш гарячих зірок HD 189627, HD 102361, HD 147873 з великими значеннями $\sin i = 5.5, 5.6, 6.5$ км/с відповідно (рис. 4). Це пов'язано з ослабленням профілів ліній, які стають менш глибокими, більш широкими і зашумленими. Внаслідок цього кількість ліній, придатних для аналізу, зменшується,

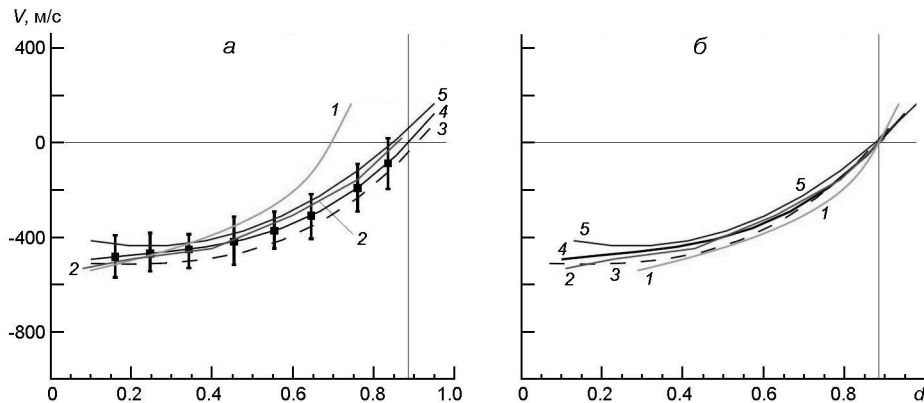


Рис. 3. Криві конвективних зміщень, отримані для Сонця в роботах [24, 35] (криві 1, 2), [61] (крива 3), даний аналіз, атлас IAG (крива 4) і атлас HARPS (крива 5). На панелі *a* всі криві представлені у власних шкалах зміщень, а на панелі *б* вони зміщені по горизонталі так, щоб на всіх кривих нульовий зсув відповідав глибині лінії $d = 0.88$ (вертикальна лінія)

і дисперсія збільшується. Друге, що слід підкреслити, — це зміна кривизни отриманих залежностей і їхнього нахилу зі зміною ефективною температурою і швидкості обертання. Це добре простежується у порівнянні з кривою сонячних зміщень. Характер кривих між $\lg \tau = -1$ і -3 ($H = 150$ і 350 км) майже лінійний, а вище градієнт зміщень змінюється в залежності від температури зірки. Він більший у гарячіших, ніж Сонце, зірок (рис. 4, 5) і значно менший у холодніших зірок (рис. 6). Лінійний характер висотної залежності зміщень у нижніх шарах фотосфери був раніше відмічений для сонячних ліній в дослідженні гранульних швидкостей [39].

На рис. 4...6 можна побачити загальну для всіх зірок тенденцію зміни конвективних зміщень з висотою. У групі холодних К-зірок (рис. 6) блакитні зміщення зменшуються в середньому від -250 м/с до нуля в шарах від $\lg \tau = -1$ до -4 . У групі більш гарячих FG-зірок (рис. 4, 5), температура яких в середньому на 1000 К більша, величина грануляційних швидкостей і темп зміни більші. В середньому вони змінюються від -700 м/с до 0 м/с в шарах від $\lg \tau = -1$ до -5 . Вище цих шарів ми бачимо червоні зміщення у всіх зірках. Вони збільшуються у досить вузькому шарі нижньої хромосфери від $\lg \tau = -5$ до -5.5 або до -6 . У холодних вони досягають значень 100 м/с, а в гарячих — $300...500$ м/с. Наші результати переконливо показують, що грануляційні швидкості змінюють свій напрямок у найвищих шарах фотосфери.

Для зірок середня конвективна швидкість, отримана з середнього значення зміщень всіх ліній, представлена в табл. 2 і на рис. 7 в залежності від характерних параметрів зірки. Залежність конвективної швидкості від ефективною температури найбільш виражена у порівнянні з іншими залежностями. Вона чудово підтверджується результатами [47] для GK-карликів. Також простежується тенденція збільшення конвективної швидкості в зірках з меншим вмістом металів,

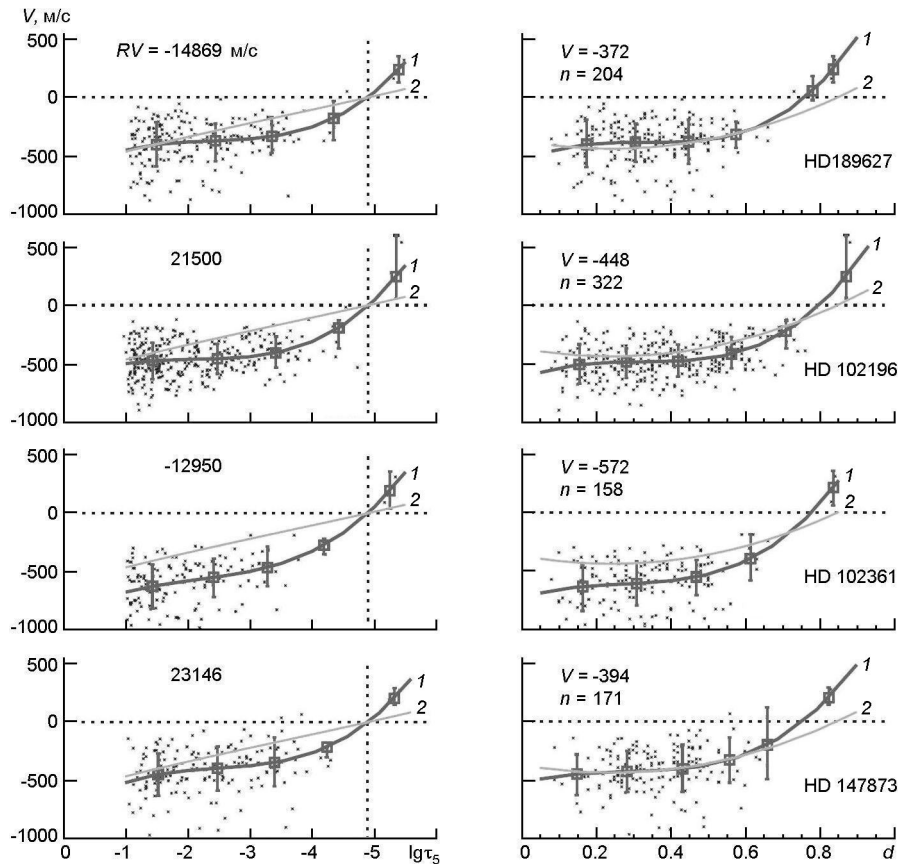


Рис. 4. Графіки залежностей конвективних зміщень ліній від оптичної глибини $\lg \tau_5$ (зліва) і глибини лінії d (справа) у спектрах гарячих зірок (ефективна температура зменшується зверху вниз від 6200 до 6000 К) зі швидкостями обертання $\sin i = 3.5 \dots 6.5$ км/с. Точки — зміщення індивідуальних ліній, квадратики з вертикальними лініями — середні значення та похибки в кожному біні. Криві 1 — поліноміальні апроксимації третього порядку, 2 — крива конвективних зміщень для Сонця. Середня конвективна швидкість V по всіх лініях, кількість n використаних ліній і отримана променева швидкість RV для кожної зірки вказані на панелях

меншою гравітацією і меншим віком та з більшою масою, більшою швидкістю обертання. Перша ознака грануляції — макро- і мікротурбулентність — і друга ознака — асиметрія ліній — помітно корелюють з конвективною швидкістю. Тут асиметрія ліній представлена розмахом середнього бісектора. Макро- і мікротурбулентність та розмах бісектора для цих зірок були виміряні нами у попередній роботі [63].

Поведінка представлених на рис. 7 залежностей від параметрів зірки пояснюється фізичними процесами загасання конвективних рухів у фотосфері, які раніше обговорювалися в роботах [2, 24, 48, 58]. Безумовно, що температура відіграє визначальну роль у розвитку зоряної грануляції. Головною причиною грануляції є потік енергії, що надходить з надр зірки. Що вища температура зірки, та більше енергії йде на транспортування потоку випромінювання на поверхню зірки, то сильнішою є грануляція. Збільшення нахилу кривих конвективних

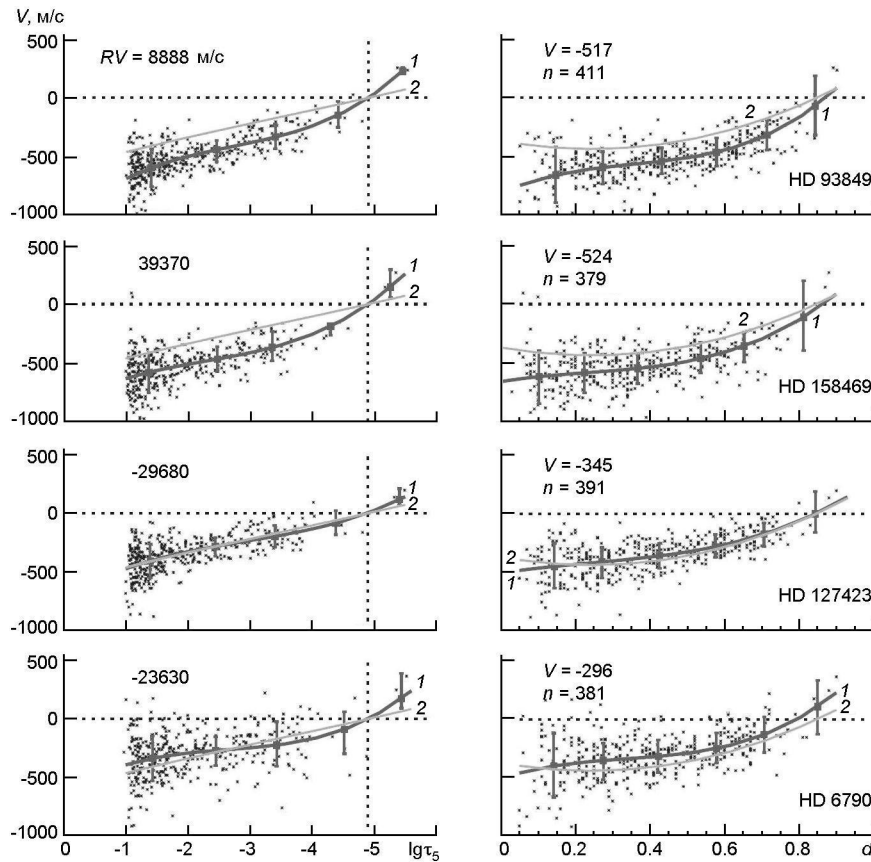


Рис. 5. Те ж, що й на рис. 4, для більш гарячих (6100...6000 K) зір зі швидкістю обертання $\sin i = 2.5...3.1$ км/с

зміщень (рис. 4...6) зі збільшенням ефективної температури частково відбувається через загальне зменшення непрозорості завдяки зменшенню поглинання негативним іоном водню, і тому можна спостерігати глибші шари, де швидкості більші. Менша гравітація і низька металічність призводять до більш протяжної і прозорішої фотосфери, що також дає змогу відслідковувати більші швидкості. Що вища ефективна температура і менша гравітація та металічність, то більшими будуть сила проникної конвекції та середнє конвективне зміщення. На грануляцію також впливає температурний градієнт [7, 65]. Що він більший, то вища температура досягається на коротшій геометричній відстані. Тому оптична глибина буде меншою, і, отже, ми спостерігаємо глибші шари, що мають вищу температуру газу і великі конвективні швидкості. Температура зірки також впливає на структурування зоряних атмосфер [7]. Що яскравіша гранула, то вища її швидкість. Великі гранули мають в середньому нижчу швидкість, ніж маленькі гранули. Середній розмір гранул менший для більш холодних і компактних зірок, тобто гранули зірок головної послідовності стають меншими у міру зменшення ефективної температури і збільшення прискорення вільного падіння.

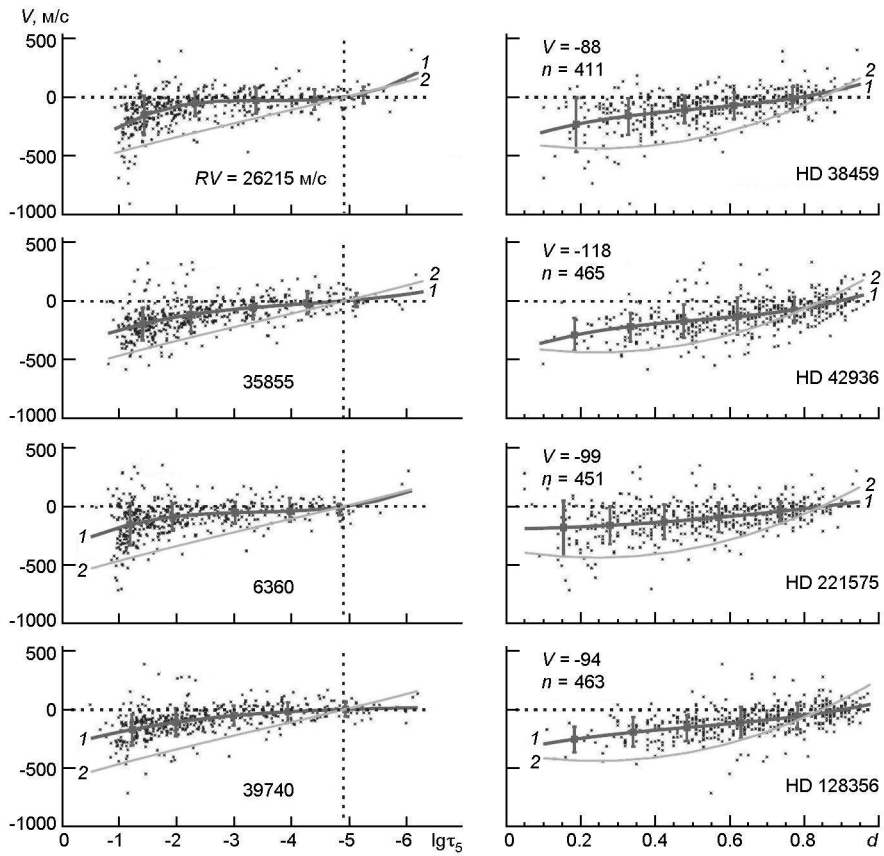


Рис. 6. Те ж, що й на рис. 4, для більш холодних (5200...4900 K) зір зі швидкістю обертання $v \sin i = 1.0...1.9$ км/с

Таблиця 2. Результати вимірювання конвективної швидкості V , усередненої по n лініях, а також отримана нами променева швидкість RV , променева швидкість RV_{SIM} з бази SIMBAD, дані про мікро- і макротурбулентні швидкості σ і швидкість обертання $\sin i$

HD	Тип	T_{ef} , K	V , м/с	rms	n	RV , км/с	RV_{SIM} , км/с	σ , км/с	σ , км/с	$\sin i$, км/с
6790	G0 V	6012	-296	190	381	-23.630	-23.630	0.8	3.2	2.9
38459	K1 IV-V	5233	-88	149	436	26.215	26.552	1.0	3.2	1.9
42936	K0 IV-V	5126	-118	144	469	35.855	34.080	0.7	1.7	1.0
93849	G0/1 V	6153	-517	192	411	8.888	8.548	1.2	2.9	3.1
102196	G2 V	6012	-448	163	322	21.500	21.460	1.4	4.3	3.6
102361	F8 V	5978	-572	209	158	-12.950	8.100	1.4	5.6	5.0
127423	G0 V	6020	-345	156	391	-29.680	-29.700	1.0	2.9	2.5
128356	K2.5 IV	4875	-94	126	463	39.740	39.918	0.7	1.7	1.0
147873	G1 V	5972	-394	202	171	23.146	22.916	1.5	6.0	6.5
158469	F8/G2 V	6105	-524	184	379	39.370	39.250	1.2	3.6	3.1
189627	F7 V	6210	-372	187	204	-14.869	-14.989	1.5	5.5	5.9
221575	K2 V	5037	-99	147	451	6.360	6.600	0.9	2.8	1.9
Sun	G2 V	5777	-316	165	287	—	—	0.8	2.1	1.8
Sun (IAG)		5770	-340	159	476	—	—	0.8	2.1	1.8

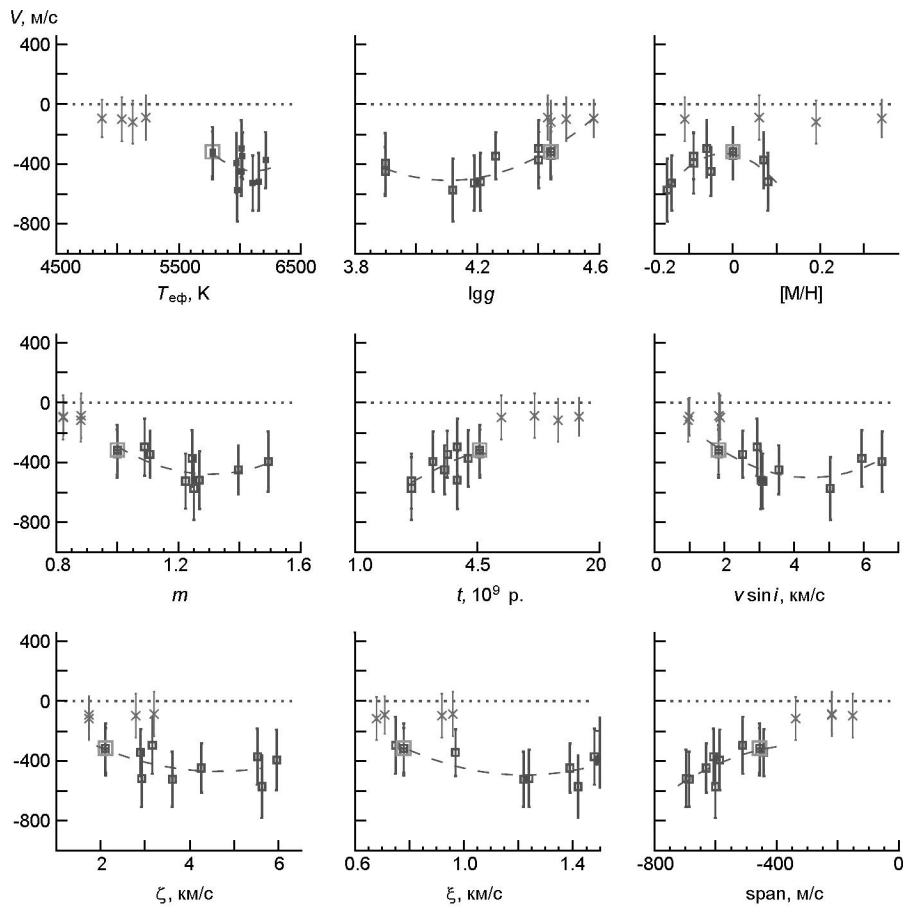


Рис. 7. Середня конвективна швидкість зірок, отримана з середнього значення зміщень всіх ліній, в залежності від ефективної температури, гравітації на поверхні, металічності, маси, віку, проєкції швидкості обертання на промінь зору, макро- і мікротурбулентних швидкостей, розмаху середнього бісектора ліній (чорні квадратики — для групи гарячих зірок, косі хрестики — для більш холодних зірок, великий сірий хрестик — для Сонця; штрихова лінія — апроксимаційна крива для гарячої групи зірок)

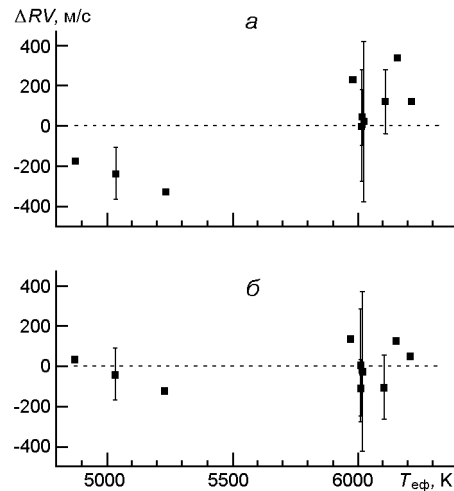
Більш глибоке розуміння характеру висотних залежностей конвективних швидкостей дають нам результати вивчення грануляції у спокійних областях Сонця з високим просторовим розділенням (~ 0.5). У ряді робіт [6, 19, 57] було показано, що інверсія температури в гранулах і міжгранулах відбувається на висотах 200...300 км і вище. Якраз в цьому шарі отримані нами висотні залежності зміщень відхиляються від лінійної. Згідно з даними [6] картина процесів грануляції, що відбуваються у фотосфері, є такою. Речовина центральних частин гранул стає холоднішою на цих висотах і продовжує рухатися вгору. Це пов'язано з швидким адіабатичним розширенням і радіаційним охолодженням висхідного потоку, розігрівом за рахунок стиснення падаючого газу і чутливістю коефіцієнта поглинання негативного іона водню до зміни температури. Висота інверсії сильно залежить від температурного контрасту і швидкості в гранулах і міжгранулах на рівні континууму. Що вони більші, то вище відбувається інверсія.

Крім інверсії температури, відбувається інверсія швидкостей. Близько 12 % гранул і міжгранул змінюють напрямок руху на протилежний в середній фотосфері, а вище 500 км це відбувається у більшій частині грануляційної картини. Незважаючи на інверсію температури і швидкості, понад 40 % грануляційної структури зберігається у вигляді колонок до висоти 650 км і вище [40, 62]. Тільки великі гранули з діаметром понад 1500 км досягають висот 650...700 км. Хоча тут грануляційна структура ще наявна, але вона значно відрізняється від картини грануляції, видимої в крилах лінії Mg I 517.2 нм [62]. Ці факти підтверджуються отриманими нами червоними зсувами дуже сильних ліній на висотах, більших від 600 км.

Відмітимо, що ядро дуже сильної лінії Mg I 517.2 нм формується приблизно на висоті 700 км. Слід підкреслити, що червоні зміщення були передбачені в роботах з чисельного тривимірного моделювання конвекції у приповерхневих шарах зірок [3, 59]. Згідно з результатами моделювання грануляція на поверхні зірок проявляється в області проникної конвекції, тобто в області викидів гарячої речовини з підфотосферних шарів. Внаслідок сил плавучості речовина, котра піднімалась в гранулах, рухається вгору за інерцією і сповільнюється з висотою, доки не витратить свою енергію. Потім відбувається зміна напрямку цього руху на протилежний, і речовина починає опускатися вниз по більш холодних міжгранульних проміжках. Область, де відбувається перебудова грануляційної картини називають областю зворотної грануляції. Зміна напрямку грануляційних швидкостей викликає червоні зсуви дуже сильних ліній, ядра яких формуються в області зворотної грануляції на висотах вище 600 км. Згідно з результатами моделювання [59] в атмосфері K-карлика червоні зміщення досягають 100 м/с для ліній Fe I, тоді як максимальні блакитні зміщення становлять приблизно -200 м/с. Згідно з нашими результатами найбільші червоні зсуви показують сильні лінії Mg I у всіх зірках сонячного типу. Що вищою є ефективна температура, то більшим буде червоний зсув. Для холодних зірок червоний зсув найсильнішої лінії Mg I дорівнює 100 м/с, для Сонця — 160 м/с, а для гарячих зірок він досягає 300 м/с. Звідси випливає, що сильні лінії Mg I не можна використовувати як репери для побудови абсолютної шкали зміщень в зірках.

Променеві швидкості аналізованих зірок. Як побічний результат даного аналізу, були отримані променеві швидкості RV зірок. Вони представлені в табл. 2, а різниці між ними і даними з бази SIMBAD RV_{SIM} показано на рис. 8а в залежності від ефективної температури. Для зірок HD 102361 та HD 42936 були виявлені великі відхилення променевих швидкостей: -21050 і 1775 м/с відповідно. Причина цих відхилень невідома. Для інших десяти зірок різниця не перевищує 340 м/с. Як видно з рис. 8а, отримані різниці негативні для холодних зірок і позитивні для гарячих зірок. Це наштовхує на думку, що можливою причиною цих відхилень є неврахована залежність конвективної швидкості зірок від температури в даних SIMBAD, тобто, для всіх

Рис. 8. Різниця променевих швидкостей зірок між отриманими в даному аналізі значеннями RV і значеннями RV_{SIM} в залежності від ефективної температури: *a* — для оригінальних даних з бази SIMBAD, *б* — для даних з бази SIMBAD, скоригованих за конвективні швидкості, отримані в даному аналізі



зірок сонячного типу враховувалася однакова конвективна швидкість -300 м/с, отримана для Сонця. Щоб це перевірити, ми ввели в RV_{SIM} наші конвективні швидкості V :

$$RV_{SIM}^{cor} = RV_{SIM} - 300 - V_{con}$$

Різниця між нашими значеннями RV і скоригованими значеннями SIMBAD RV_{SIM}^{cor} показано на рис. 8б. Як видно, тепер отримані різниці не залежать від температури і не перевищують 125 м/с, а їхня середня абсолютна різниця дорівнює 75 м/с, що не виходить за межі похибок даного аналізу. Звідси випливає, що: 1) не можна нехтувати залежністю конвективної швидкості зірок від ефективної температури при визначенні променевої швидкості спектроскопічними методами і 2) виведені нами променеві швидкості зірок є більш точними, ніж дані SIMBAD. Їхня похибка не перевищує середніх квадратичних помилок конвективних швидкостей, представлених у табл. 2.

ВИСНОВКИ

Для невеликої вибірки FGK-карликів з ефективними температурами в діапазоні $6200 \dots 4900$ К ми виміряли зміщення ліній заліза у спектрах з розділенням $R \approx 120\,000$, відношенням сигнал-шум $S/N > 100$ і спектральним охопленням від 410 до 680 нм. Кількість використаних для аналізу ліній становила від 158 до 476 для різних зірок. Для визначення конвективних зміщень були побудовані абсолютні шкали на основі графіків конвективних зміщень ліній у спектрі сонячного потоку в залежності від оптичної глибини у припущенні, що нульовий зсув ліній у спектрах Сонця і зірок сонячного типу відбувається на одній і тій же оптичній глибині. Оскільки для зірок, гарячіших від Сонця, зі швидкістю обертання понад 5 км/с, нульові зміщення ліній заліза не спостерігаються, ми додали у списки ліній кілька дуже сильних ліній Ca I і Mg I, які формуються в нижній хромосфері і показують нульові і

червоні зсуви. Це дозволило розширити діапазон зміщень спостережуваних ліній і більш впевнено визначити нуль-пункт шкали зміщень.

Отримані нами результати підтвердили типові властивості грануляції в зірках сонячного типу. Нахил залежностей конвективних зміщень збільшується для гарячіших зірок. Слабкі лінії, які утворюються у глибоких областях фотосфери, показують блакитні зміщення від -700 м/с для найгарячіших зірок до -250 м/с для найхолодніших зірок нашої вибірки. Сильні лінії Fe I і Ca I показують нульові зміщення у спектрах Сонця і у холодних зірках, а дуже сильні лінії Mg I показують червоні зміщення у всіх зірках. Червоні зміщення збільшуються з температурою зірки і досягають максимальних значень близько 340 м/с для найгарячіших зірок. Середній по всіх лініях конвективний зсув збільшується від -100 до -560 м/с зі збільшенням ефективної температури від 5000 до 6000 К і зі зменшенням металічності, гравітації на поверхні і віку зірки. Середній конвективний зсув корелює зі швидкістю обертання зірки, а також з мікро- і макротурбулентною швидкістю і асиметрією ліній. Ці всі властивості узгоджуються з тим, що температура в основному визначає силу грануляції в зірках. Що вона більша, то більшими є їхні грануляційні швидкості та градієнт.

Виведені променеві швидкості, за винятком двох зірок HD 102361 і HD 42936, задовільно узгоджуються з даними SIMBAD, якщо останні скоригувати за величину конвективних швидкостей, що залежать від ефективної температури зірки. Причина великої різниці для HD 102361 (-21050 м/с) і HD 42936 (1775 м/с) невідома. Це питання поки залишається відкритим і потребує подальшого вивчення. Похибка отриманих нами променевих швидкостей не перевищують середньої квадратичної помилки по бінах для виведених конвективних швидкостей в зірках, яка дорівнює 141 м/с для холодних зірок і 181 м/с для гарячих зірок.

Отже, наші результати свідчать про те, що середні конвективні швидкості в зірках сонячного типу можуть становити від -300 до -560 м/с в FG-зірках з ефективною температурою $6000...6200$ К і від -90 до -120 м/с в зірках з температурою $4900...5200$ К. У зв'язку з цим у вимірах абсолютних променевих швидкостей необхідно враховувати індивідуальні конвективні швидкості зірки. Для точніших вимірювань конвективних швидкостей і глибшого розуміння зв'язку грануляції з іншими зоряними явищами, а також розуміння впливу поверхневої конвекції на структуру і еволюцію зірок необхідно виміряти і дослідити зміщення ліній для більшого числа зоряних спектрів з вищою якістю.

Автор щиро вдячний Я. Павленку і О. Іванюку за надані спостережні спектри зірок і обговорення результатів.

REFERENCES

1. Allende Prieto C., Garcia Lopez R. J. (1998) Fe I line shifts in the optical spectrum of the Sun. *Astron. and Astrophys.* 129. 129—364.

2. Allende Prieto C., Lambert D. L., Tull R. G. (2002) Convective wavelength shifts in the spectra of late-type stars. *Astrophys. J.* 566. L93—L96.
3. Allende Prieto C., Koesterke L., Ludwig H.-G., et al. (2013) Convective line shifts for the Gaia RVS from the CIFIST 3D model atmosphere grid. *Astron. and Astrophys.* 550, id. A103, 13.
4. Asplund M., Nordlund A., Trampedach R., et al. (2000) Line formation in solar granulation. I. Fe line shapes, shifts and asymmetries. *Astron. and Astrophys.* 359. 729—742.
5. Balthasar H. (1984) Asymmetries and wavelengths of solar spectral lines and the solar rotation determined from Fourier-transform spectra. *Solar Phys.* 93. 219—241.
6. Baran O. A., Stodilka M. I. (2015) Convection structure in the solar photosphere at granulation and mesogranulation scales. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 31. 65—72.
7. Beeck B., Cameron R. H., Reiners A., et al. (2013) Three-dimensional simulations of near-surface convection in main-sequence stars. II. Properties of granulation and spectral lines. *Astron. and Astrophys.* 558, id. A49, 18.
8. Brandt P. N., Gadun A. S., Sheminova V. A. (1997) Absolute shifts of Fe I and Fe II lines in solar active regions (disk center). *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 13(5). 65—74.
9. Brandt P. N., Solanki S. K. (1990) Solar line asymmetries and the magnetic filling factor. *Astron. and Astrophys.* 231. 221—234.
10. Chiavassa A. (2017) *Measuring granulation during planet transits*. CHEOPS Fifth Science Workshop, held 24-26 July, 2017 in Schloss Seggau, Austria. URL: <http://geco.oew.ac.at/cheops-workshop-05.html>, id. 15.
11. Dravins D. (1987) Stellar granulation. II. Stellar photospheric line asymmetries. *Astron. and Astrophys.* 172. 211—224.
12. Dravins D. (1989) *Stellar Granulation*. Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, CA, 1990. 27.
13. Dravins D. (1990) *Observing, modeling, and understanding stellar granulation*. Solar photosphere: structure, convection, and magnetic fields: Proc. 138th Symp. IAU, (May 15-20 1989, Kiev). Ed. Jan Olof Stenflo. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. 397—415.
14. Dravins D. (1999) *Stellar surface convection, line asymmetries, and wavelength shifts*. ASP Conf. Ser. N185, IAU Colloquium 170. Eds J. B. Hearnshaw, C. D. Scarfe. ISBN: 1-58381-011-0 (1999). 268—277.
15. Dravins D. (2008) «Ultimate» information content in solar and stellar spectra. Photospheric line asymmetries and wavelength shifts. *Astron. and Astrophys.* 492. 199—213.
16. Dravins D., Lindegren L., Nordlund A. (1981) Solar granulation — Influence of convection on spectral line asymmetries and wavelength shifts. *Astron. and Astrophys.* 96. 345—364.
17. Dravins D., Lindegren L., Ludwig H.-G. Madsen S. (2005) *Wavelength shifts in solar-type spectra*. Proc. 13th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun (5-9 July, 2004, Hamburg, Germany). Eds F. Favata, G. A. J. Hussain, B. Battrock. ESA SP-560, 113—119.
18. Fuhr J. R., Wiese W. L. (2006) A critical compilation of atomic transition probabilities for neutral and singly ionized iron. *J. Phys. and Chem. Ref. Data.* 35. 1669—1809.
19. Espagnet O., Muller R., Roudier, T., et al. (1995) Penetration of the solar granulation into the photosphere: height dependence of intensity and velocity fluctuations. *Astron. and Astrophys. Suppl.* 109. 79—108.
20. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., et al. (2018) Release 2. Summary of the contents and survey properties. *Astron. and Astrophys.* 616. id. A1, 22.
21. Gadun A. S., Sheminova V. A. (1988) *SPANSAT: the Program for LTE calculations of absorption line profiles in stellar atmospheres*. Kiev, 37. —(Preprint of the Institute

- for Theoretical Physics of Academy of Sciences of USSR, ITF-88-87P).
22. Gray D. F. (1982) Observations of spectral line asymmetries and convective velocities in F, G, and K stars. *Astrophys. J.* 255. 200—209.
 23. Gray D. F., Toner C. G. (1986) The remarkable spectral line asymmetries of F and G Ib supergiant stars. *Astrophys. J.* 98. 499—503.
 24. Gray D. F. (2009) The third signature of stellar granulation. *Astrophys. J.* 697. 1032—1043.
 25. Gray D. F. (2010) Empirical decoding of the shapes of spectral-line bisectors. *Astrophys. J.* 710. 1003—1008.
 26. Gray D. F. (2010) An explanation of reversed spectral-line bisectors. *Astrophys. J.* 721. 670—674.
 27. Gray D. F. (2018) A solar-flux line-broadening analysis. *Astrophys. J.* 857. Id. 139. 8.
 28. Gray D. F., Baliunas S. L., Lockwood G. W., Skiff, B. A. (1992) The activity cycle of sigma Draconis. *Astrophys. J.* 400. 681—691.
 29. Gray D. F., Baliunas S. L., Lockwood G. W., Skiff B. A. (1996) Magnetic, photometric, temperature, and granulation variations of XI Bootis A 1984—1993. *Astrophys. J.* 465. 945—950.
 30. Gray D. F., Pugh T. (2012) The third signature of granulation in bright-giant and supergiant stars. *Astrophys. J.* 143. id. 92, 7.
 31. Gurtovenko E. A., Sheminova V. A. (2015) *Formation depths of Fraunhofer lines*. Eprint arXiv:1505.00975. 25.
 32. Gurtovenko E., Ratnikova V., de Jager C. (1974) On the average optical depth of formation of weak Fraunhofer lines. *Solar Phys.* 37. 43—52.
 33. Gustafsson B., Edvardsson B., Eriksson K., Jorgensen U. G., Nordlund A., Plez B. (2008) A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. I. Methods and general properties. *Astron. and Astrophys.* 486. 951—970.
 34. Gullberg D., Lindegren L. (2002) Determination of accurate stellar radial-velocity measures. *Astron. and Astrophys.* 390. 383—395.
 35. Hamilton D., Lester J. B. (1999) A technique for the study of stellar convection: The visible solar flux spectrum. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 111. 1132—1143.
 36. Hinkle K., Wallace L. (2005) *The spectrum of Arcturus from the infrared through the ultraviolet*. Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. 336. Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, eds. T. G. Barnes, F. N. Bash. 321.
 - Hinkle K., Wallace L. (2005) The spectrum of Arcturus from the infrared through the ultraviolet. in Astronomical Society of the Pacific Conference. Series. 336. Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, eds T. G. Barnes, F. N. Bash. 321 p.
 37. Ivanyuk O. M., Jenkins J. S., Pavlenko Ya. V., Jones H. R. A., Pinfield D. J. (2017) The metal-rich abundance pattern — spectroscopic properties and abundances for 107 main-sequence stars. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 468. 4151—4169.
 38. Jenkins J. S., Jones H. R. A., Gozdziewski K. (2009) 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.* 398. 911—917.
 39. Keil S. L. (1980) The structure of solar granulation. I — Observations of the spatial and temporal behavior of vertical motions. II — Models of vertical motion. *Astrophys. J.* 237. 1024—1042.
 40. Kostik R., Khomenko E., Shchukina N. G. (2009) Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 Å line. *Astron. and Astrophys.* 506. 1405—1414.
 41. Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., et al. (1984) *Solar flux atlas from 296 to 1300 nm*. National Solar Observatory Atlas, Sunspot, New Mexico: National Solar Observatory.
 42. Landstreet J. D. (1998) Detection of atmospheric velocity fields in A-type stars. *Mon.*

- Notic. Roy. Astron. Soc.* 338. 1041—1056.
43. Landstreet J. D. (2006) *Observing convection in stellar atmospheres. Convection in Astrophysics*, Proc. IAU Symp. N 239. (21—25 August, 2006, Prague, Czech Republic). Eds F. Kupka, I. Roxburgh, K. Chan. 103—112.
 44. Lindegren L., Dravins D., Madsen S. (1999) *Exactly what is stellar 'radial velocity'? Precise stellar radial velocities*. ASP Conf. Ser. N185, IAU Colloquium 170. Eds J. B. Hearnshaw, C. D. Scarfe. ISBN: 1-58381-011-0 (1999). 73—76.
 45. Livingston W. C. (1983) *Magnetic fields and convection — New observations*. Solar and stellar magnetic fields: Origins and coronal effects; Proc. Symp. (August 2-6, 1982, Zurich, Switzerland), (A84-42426 20-90). Dordrecht, D. Reidel Publishing Co. 149.
 46. Molaro P., Esposito M., Monai S. (2013) A frequency comb calibrated solar atlas. *Astron. and Astrophys.* 560 id. A61, 9.
 47. Meunier N., Lagrange A.-M., Mbemba Kabuiku L., et al. (2017) Variability of stellar granulation and convective blueshift with spectral type and magnetic activity. I. K and G main sequence stars. *Astron. and Astrophys.* 597, id. A52, 14.
 48. Meunier N., Mignon L., Lagrange A.-M. (2017) Variability in stellar granulation and convective blueshift with spectral type and magnetic activity. II. From young to old main-sequence K-G-F stars. *Astron. and Astrophys.* 607. id. A124, 11.
 49. Nadeau D., Bedard J. (1989) *Line shifts in the infrared spectra of late-type stars*. Solar and Stellar Granulation, Proc. 3rd Int. Workshop Astron. Observ. Capodimonte (OAC 3) and the NATO Adv. Res. Workshop on Solar and Stellar Granulation (21-25 June, Capri, Italy). Dordrecht: Kluwer. Eds R. J. Rutten, G. Severino. NATO Adv. Sci. Inst. (ASI) Ser. C, Vol. 263. 125.
 50. Nadeau D., Maillard J.-P. (1988) Observational evidence of line shifts induced by the convective overshoot in the atmosphere of red giants. *Astrophys. J.* 327. 321—327.
 51. Nave G., Johansson S., Learner R. C. M., et al. (1994) A new multiplet table for Fe I. *Astrophys. J. Suppl.* 94. 221.
 52. Neves V., Santos N. C., Sousa S. G., Correia A. C. M., Israelian G. (2009) Chemical abundances of 451 stars from the HARPS GTO planet search program. Thin disc, thick disc, and planets. *Astron. and Astrophys.* 497. 563—581.
 53. Nidever D. L., Marcy G. W., Butler R. P., et al. (2002) Radial velocities for 889 late-type stars. *Astrophys. J. Suppl.* 141. 503—522.
 54. Pavlenko Y. V., Kaminsky B. M., Jenkins J. S., Ivanyuk O. M., Jones H. R. A., Lyubchik Y. P. (2019) Masses, Oxygen and Carbon abundances in CHEPS dwarf stars. *Astron. and Astrophys.* 621. Id. A112. 13.
 55. Pasquini L., Melo C., Chavero C., et al. (2011) Gravitational redshifts in main-sequence and giant stars. *Astron. and Astrophys.* 526, id. A127, 15.
 56. Pierce A. K., Lopresto J. C. (2000) Wavelength shifts in the solar photospheric spectrum. *Solar Phys.* 196. 41—51.
 57. Puschmann K. G., Ruiz Cobo B., Vazquez M., et al. (2005) Time series of high resolution photospheric spectra in a quiet region of the Sun. II. Analysis of the variation of physical quantities of granular structures. *Astron. and Astrophys.* 441. 1157—1169.
 58. Ramirez I., Allende Prieto C., Lambert D. L. (2008) Granulation in K-type dwarf stars. I. Spectroscopic observations. *Astron. and Astrophys.* 492. 841—855.
 59. Ramirez I., Allende Prieto C., Koesterke L., et al. (2009) Granulation in K-type dwarf stars. II. Hydrodynamic simulations and 3D spectrum synthesis. *Astron. and Astrophys.* 501. 1087—1101.
 60. Ramirez I., Collet R., Lambert D. L., et al. (2010) Granulation signatures in the spectrum of the very metal-poor red giant HD 122563. *Astrophys. J. Lett.* 725. L223—L227.
 61. Reiners A., Mrotzek N., Lemke U., et al. (2016) The IAG solar flux atlas: Accurate wavelengths and absolute convective blueshift in standard solar spectra. *Astron. and*

- Astrophys.* 587, id. A65, 8.
62. Rutten R. J., Leenaarts J., Rouppe van der Voort L. H. M., et al. (2011) Quiet-Sun imaging asymmetries in Na I D1 compared with other strong Fraunhofer lines. *Astron. and Astrophys.* 531. id. A17, 16.
63. Sheminova V. A. (2020) Asymmetry of lines in the spectra of the Sun and solar-type stars. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 36(6). 291—305.
64. Sheminova V. A. (2019) Turbulence and rotation in solar-type stars. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 35. 129—42.
65. Stein R. F., Nordlund A. (1998) Simulations of solar granulation. I. General Properties. *Astrophys. J.* 499. 914—933.
66. Wallace L., Huang Y. R., Livingston W. (1988) The Sun as a star: On wavelength stability. *Astrophys. J.* 327. 399—404.
67. Wallace L. (2011) An optical and near-infrared (2958—9250 Å) solar flux atlas. *Astrophys. J. Suppl.* 195. id. 6, 8.

V. A. Sheminova

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

CONVECTIVE LINESHIFTS IN THE SPECTRA OF THE SUN AND SOLAR-TYPE STARS

We measured the Doppler lineshifts in the spectra of the Sun and stars with effective temperatures from 4800 to 6200 K and estimated the average convective (granulation) velocities. The absolute scale of the lineshifts for stars was established on the basis of the derived dependence of the shifts of solar lines on optical depth. For FGK solar-type stars we first got curves convection velocities as a function of the height in the atmosphere in a large range of heights from 150 to 700 km. These curves are similar to each other. They indicate a decrease in blue shifts with height, which means that the granulation velocities through the photosphere slow down to zero. In the lower chromosphere, red shifts of strong Mg I lines are observed, which indicate a change in the direction of granulation velocities to the opposite and confirm the effects of reversal of granulation at heights above 600 km. In cooler K stars, granulation shifts change with height on average from -150 to 100 m/s, while in hotter FG stars they change more sharply from -700 to 300 m/s. The gradient of the curves of lineshifts increases with an increase in the effective temperature, with a decrease in gravity, metallicity, and age of the star. The convective velocity of the star averaged over all analyzed heights increases from -90 to -560 m/s from colder to hotter stars. It correlates with macroturbulence, asymmetry of spectral lines, and the velocity of rotation of the star. We also obtained the radial velocities of the studied stars and compared them with the SIMBAD data. Large deviations of -21050 and 1775 m/s were found for the stars HD 102361 and HD 42936, respectively. For the rest of the stars, the deviation does not exceed 340 m/s, which is probably associated with the use of an average granulation velocity of -300 m/s in the SIMBAD data. Our analysis has shown that the average granulation velocity is not the same for solar-type stars. It is lower (higher) in colder (hotter) stars than the Sun. Therefore, in determining the radial velocities, it is necessary to take into account the individual granulation velocities of stars.

Keywords: solar-type stars, granulation, line shifts, convective velocities, radial velocities.

Стаття надійшла до редакції 16.06.2021

Після доопрацювання 06.08.2021

Прийнята до друку 16.12.2021