

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.06.065>

УДК 524.3

В. А. Шемінова

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

Асиметрія ліній у спектрах Сонця і зірок сонячного типу

Ми проаналізували асиметрію ліній Fe I і Fe II у спектрах сонячного потоку, використовуючи дані трьох атласів FTS і атласу HARPS, а також у спектрах 13 зірок, використовуючи дані спостережень на спектрографі HARPS. Для зменшення шумів спостережень індивідуальні бісектори ліній для кожної зірки були усереднені. Середні бісектори у спектрах зірок мають форму більш-менш схожу на добре відому для Сонця форму літери «С». У зірках зі швидкістю обертання понад 5 км/с форма бісекторів більше нагадує символ «сleih» (/). Кривизна і розмах бісекторів збільшуються з температурою зірки. Наші результати підтверджують відомі факти про сильний вплив швидкості обертання на розмах і форму бісекторів. За розмахом середнього бісектора, який показує найбільшу різницю між швидкостями холодних конвективних потоків речовини, що опускаються, і гарячих потоків, що піднімаються, було визначено середню конвективну швидкість. Вона дорівнює 420 м/с для Сонця як зірки. Для інших зірок вона змінюється від 150 до 700 м/с зі збільшенням ефективної температури від 4800 до 6200 К відповідно. Для зірок з більшою гравітацією на поверхні і з більшим вмістом металів середня конвективна швидкість менша. Також вона зменшується з віком зірки і корелює зі швидкістю мікро- і макротурбулентних рухів. Результати аналізу сонячного потоку показали, що абсолютні шкали довжин хвиль у використаних атласах збігаються з точністю близько 10 м/с, крім FTS-атласу Хінклі та ін., шкала якого має зсув, залежний від довжини хвилі. У діапазоні від $\lambda = 450$ до 650 нм цей зсув змінюється від 100 до 330 м/с відповідно, і в середньому дорівнює 240 м/с. Отримані середні бісектори зірок містять інформацію про

поля конвективних швидкостей і можуть бути корисними для гідродинамічного моделювання зоряних атмосфер з метою дослідження характерних особливостей поверхневої конвекції.

Ключові слова: зірки сонячного типу, профілі ліній, асиметрія, поле швидкостей, грануляція.

ВСТУП

Асиметрія ліній поглинання в зіркових спектрах може виникати внаслідок наявності різних утворень на поверхні — темних плям, яскравих точок, яскравих площадок, а також через блендування ліній, коливання, пульсації і грануляцію. Основною причиною асиметрії в зірках сонячного типу, як показано в роботі [14], є грануляція. Вона безпосередньо спостерігається на зображеннях сонячної поверхні у вигляді грануляційної картини. Для зірок головної послідовності пряме спостереження грануляції неможливе, але ознаки зіркової грануляції можна вивчати шляхом аналізу асиметрії профілів ліній поглинання. Вивчаючи асиметрію профілів, ми можемо отримати відомості про характеристики поверхневої конвекції в зірках. Однак спостереження спектральних ліній в зірках у порівнянні з Сонцем мають ряд обмежень. По-перше, ми спостерігаємо інтегральний по диску потік, що призводить до ослаблення доплерівських зсувів. По-друге, не можна виміряти абсолютні зсуви ліній через відсутність даних про точні радіальні швидкості багатьох зірок. По-третє, обертання зірок впливає на форму профілів ліній і змінює асиметрію. По-четверте, спектральні лінії стають слабкішими в зоряних спектрах з низьким розділенням, і спотворення профілів збільшуються. Про це слід пам'ятати при вивченні асиметрії ліній в зірках.

Поява грануляції на зоряній поверхні викликана конвекцією у поверхневих шарах, яка створює широкі висхідні потоки гарячої речовини, так звані гранули, і холодні спадні потоки, або міжгранули. Гранули вносять «синій» внесок у спектральну лінію внаслідок підйому речовини. Вузькі через меншу площу, холодні міжгранули вносять «червоний» внесок через швидкість опускання речовини. Сумарний ефект всіх вкладів, інтегрованих по поверхні зірки, створює асиметричні профілі ліній [14]. Фотосферні швидкості, які безпосередньо викликаються конвекцією і впливають на асиметрію ліній, називають конвективними, або грануляційними швидкостями. Згідно з даними [22] середня швидкість розподілу грануляційних швидкостей визначає середню швидкість підйому гранул $V = V_{col} + V_{hot}$, де V_{col} і V_{hot} — швидкості холодної і гарячої речовини відповідно, а дисперсією цього розподілу є так звана макротурбулентна швидкість V_{mac} . Просте моделювання показало, що середня швидкість грануляції впливає на асиметрію, а дисперсія швидкостей на ширину лінії і завжди $V < V_{mac}$. Як зазначено в роботі [18], асиметрія контролюється трьома парамет-

рами: 1) середня швидкість гранул і міжгранул; 2) контраст яскравості між гранулами і міжгранулами; 3) відношення площі зоряного диска, зайнятої гранулами, до площі диска, зайнятої міжгранулами. Для зірки параметри 2) і 3) об'єднуються в контраст потоку $(F_{hot} - F_{col}) / (F_{hot} + F_{col})$, де F_{hot} — потік, що випромінюється усіма гранулами, а F_{col} — потік, що випромінюється усіма міжгранулами на зоряному диску. Що вищий ступінь кореляції між швидкістю і температурою у гранулах і міжгранулах, то сильніша асиметрія спостережуваної лінії. Швидкість обертання $v \sin i$ теж впливає на асиметрію, коли вона перевищує V_{mac} . Згідно з даними [38] меншою мірою на асиметрію впливають вміст хімічних елементів і активність зірок; причому остання зменшує асиметрію ліній.

Асиметрія профілів кількісно характеризується бісектором, який показує залежність між конвективними зсувами і відносним потоком випромінювання в кожній точці профілю лінії. Найбільш повну картину конвективних зсувів видно у сильних лініях. Це пов'язано з істотною відмінністю фізичних умов на різних ефективних глибинах формування кожної ділянки лінії, де вимірюється бісектор. Ранні дослідження сонячного спектру [7, 14, 29, 32] встановили, що бісектор має типову форму, схожу на літеру «С». Верхня частина профілю поблизу континууму має невелике синє зміщення через значний вклад випромінювання від міжгранул у глибоких шарах фотосфери. Найбільший синій зсув відбувається ближче до середини профілю внаслідок переважної частки випромінювання від гарячих гранул. Ядро сильної лінії має значно менший синій зсув, тому що контраст випромінювання між гранулами і міжгранулами зменшується у верхніх фотосферних шарах формування ядра. Асиметрія профілю лінії змінюється в залежності від глибини лінії і атомних параметрів, таких як хімічний склад, потенціал збудження та іонізації, довжина хвилі, сили осциляторів, тобто від параметрів, що визначають ефективну глибину формування лінії в атмосфері.

Зоряні бісектори як за формою, так і за величиною синього розмаху, показують значну залежність від ефективної температури, класу світності та величини гравітації. Згідно з результатами досліджень зоряних спектрів [3, 11—13, 18, 19, 21, 22, 39] не у всіх холодних FGK зірках головної послідовності бісектор показує форму «С», часто ця форма злегка спотворена, а іноді видно тільки верхню частину літери «С». Відмінності форм бісекторів для різних зірок залежать від сили грануляції і структури атмосфери. Розмах або зсув найбільш синьої точки бісектора, який характеризує середню грануляційну швидкість зірки, теж зменшується від F- до K-зірок. Для гігантів розмах більший, ніж для карликів. Що яскравіша зірка (або більша світність, або менша гравітація), то менша висота найбільш синьої точки бісектора і все вище в атмосферу проникає грануляція. У спектрах зірок з дуже низьким вмістом металів виявлено значно більшу асиметрію ліній і більший діапазон швидкостей, ніж для зірок того ж класу з сонячним вмістом

металів [3]. Цей факт інтерпретується як ознака низького вмісту металу (низької непрозорості) в конвективних атмосферах. Є ще одна особливість асиметрії: при переміщенні уздовж головної послідовності у бік вищих високих температур у зоні F0 бісектори ліній змінюють свій нахил у протилежний бік. Ця межа, що розділяє два режими, називається межею грануляції [21, 23]. Вважається, що в гарячих F0V-зірках конвекція якісно відрізняється: гранули мають малий розмір і швидко піднімаються вгору, а міжгранули мають великий розмір і повільно опускаються вниз.

Для кращого розуміння зоряної грануляції і її впливу на спостережувані спектри виконується гідродинамічне моделювання сонячної і зоряних атмосфер, в якому враховуються атмосферні неоднорідності, пов'язані з явищем грануляції. У перших роботах з моделювання грануляції [5, 6, 15] було передбачено, що потік енергії через атмосферу є найважливішим параметром, який впливає на величину синіх зсувів, а значить і на розмах бісектора. Кореляція між температурою, швидкістю і густиною слабкіша для холодних карликів, ніж для гарячих зірок. Наступні роботи з моделювання конвективних оболонок зірок [1, 4, 9, 38] підтвердили і пояснили багато особливостей бісекторів. Незважаючи на великий прогрес у моделюванні, теоретичні розрахунки виконано тільки для деяких FGK-зірок з використанням обмеженого набору спектральних характеристик і звірено з обмеженим набором спостережень. Необхідно дослідити більше зірок, як гарячих, так і холодних. Необхідна ретельна перевірка моделей на високоякісних спектрах. Особливо важливою є перевірка моделей на збіг з бісекторами багатьох спостережуваних ліній. Це необхідно зробити, перш ніж можна буде гарантувати, що передбачені моделями властивості грануляції повністю заслуговують довіри. Тому отримання нових даних про асиметрію спостережуваних ліній і про їхні бісектори для зірок з різними характеристиками залишається актуальним завданням у фізиці зоряних атмосфер. Для вирішення цього завдання потрібні високоякісні зоряні спектри і ретельний відбір ліній поглинання, щоб зменшити похибки бісекторів.

Метою даного дослідження є вимірювання бісекторів ліній у спектрах зірок сонячного типу з різними характеристиками і вивчення змін їхньої форми зі зміною параметрів зірок. Інакше кажучи, цю роботу присвячено дослідженню другої ознаки зоряної грануляції, тобто асиметрії ліній. Першою ознакою грануляції називають розширення профілів ліній макротурбулентними рухами, а третьою ознакою грануляції називають синій зсув ліній через домінуючі вклади гарячих гранул. Добре всім відомий параметр класичної макротурбулентності показує, яка сила грануляції у тій чи іншій зірці. У нашій попередній роботі [42] ми вже досліджували першу ознаку грануляції в зірках, які аналізуються тут. Це дає нам можливість виконати порівняння конвективних та макротурбулентних швидкостей і підтвердити сучасні уявлення про процеси грануляції та їхній вплив на спектральні лінії.

ПОЧАТКОВІ ДАНІ І МЕТОДИ

Дані спостережень. У таблиці приведено значення основних параметрів для зірок, спектри яких ми будемо аналізувати. Ці зірки належать до вибірки Калан-Гартфордширського пошуку екзопланет (Calan-Hertfordshire Extrasolar Planet Search, CHEPS). Основні характеристики зірок, такі як ефективна температура T_{ef} , прискорення вільного падіння на поверхні $\lg g$, металічність $[\text{Fe}/\text{H}]$ були взяті з роботи [27], дані про масу M і вік зірок — з роботи [36], а дані про макротурбулентну швидкість V_{mac} зірки та швидкість її обертання $v \sin i$ — з роботи [42]. Спектральні типи відповідають даним з бази SIMBAD (<http://cdsportal.u-strasbg.fr>). Всі зірки є поодинокими і неактивними ($\lg R_{\text{HK}} = 4.5$ dex). Діапазон T_{ef} невеликий: від 4800 до 6200 К. Деякі зірки злегка збагачені металами ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.06 \dots 0.34$), а інші мають невеликий дефіцит металів ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.05 \dots 0.15$).

Спектри зірок було отримано за допомогою спектрографа HARPS (High-Accuracy Radial Velocity Planetary Searcher) в Ла-Сілла (Чилі) [28]. Відношення сигнал/шум перевищувало 100. Спектральне розділення $R = 120000$ є для даного завдання невисоким. Однак згідно з даними [19] цього вже достатньо, оскільки номінальна спектральна роздільна здатність повинна бути не меншою за 100 000.

Список спектральних ліній. Візуальний вибір ліній виконувався за допомогою графічного сонячного атласу [44] з високим розділенням $R = 700\,000$. Щоб зменшити невизначеності через шуми, бісектори вимірювалися в діапазоні $F/F_c = 0.1 \dots 0.95$ (тут F і F_c — потоки випромінювання в лінії і в континуумі відповідно). Вибрані лінії лежали в інтервалі довжин хвиль від 450 до 650 нм. Кількість ліній була

Значення параметрів досліджуваних зірок (n — кількість використовуваних ліній, V — отримана нами тут середня конвективна швидкість у Mg-шкалі)

HD	Тип	T_{ef} , К	$\lg g$	$[\text{M}/\text{H}]$	M/M_{\odot}	Вік, млрд років	V_{mac} , км/с	$v \sin i$, км/с	n	V , м/с
189627	F7 V	6210	4.40	0.07	1.244	4.0	5.52	5.93	31	−606
92003	G3/5 V	6158	5.10	0.27	1.087	7.2	2.20	2.09	37	−573
93849	G0/1 V	6153	4.21	0.08	1.268	3.5	2.92	3.05	41	−696
158469	F8/G2 V	6105	4.19	−0.14	1.223	2.0	3.61	3.10	44	−686
127423	G0 V	6020	4.26	−0.09	1.107	3.1	2.90	2.53	34	−442
6790	G0 V	6012	4.40	−0.06	1.089	3.5	3.16	2.94	32	−511
102196	G2 V	6012	3.90	−0.05	1.395	3.0	4.26	3.56	36	−630
102361	F8 V	5978	4.12	−0.15	1.250	2.0	5.62	5.03	47	−600
147873	G1 V	5972	3.90	−0.09	1.493	2.6	5.95	6.51	34	−586
Sun	G2 V	5777	4.44	0.00	1.000	4.6	2.11	1.84	61	−456
38459	K1 IV-V	5233	4.43	0.06	0.882	9.0	3.20	1.85	37	−220
42936	K0 IV-V	5126	4.44	0.19	0.881	12.0	1.74	0.97	26	−338
221575	K2 V	5037	4.49	−0.11	0.823	6.0	2.79	1.89	36	−152
128356	K2.5 IV	4875	4.58	0.34	0.824	15.5	1.74	1.01	19	−220

різною для різних зірок, оскільки зі зменшенням T_{ef} з'являються нові бленди у профілях ліній. Наявність малопомітних бленд у профілях перевірялася шляхом аналізу бісекторів і порівняння з середнім бісектором. У результаті такого відбору остаточні списки ліній для різних зірок в основному відрізнялися в діапазоні дуже слабких і сильних ліній. Кількість n ліній наводиться у таблиці.

Визначення центральної довжини хвилі лінії. Точно виміряти довжину хвилі лінії у спектрі зірки можна лише для симетричного профілю. Проте зоряні спектральні лінії завжди асиметричні і спотворені блендами і шумами, що не дозволяє точно і однозначно її обчислити. Відомі різні процедури вимірювання довжини хвилі лінії [25], деталі яких впливають на її точність. У більшості випадків довжину хвилі лінії визначають шляхом підгонки поліномів 2—4-го порядку по ряду точок, найближчих до мінімуму. Ми вибрали, на наш погляд, більш стійкий до похибок метод з використанням центра ваги ядра лінії [10]. На точність цього методу не впливає те, сильна чи слабка, широка чи вузька в ядрі лінія, а впливає в основному крок інтерполяції профілю. У нашому випадку він дорівнював 0.1 пм.

Обчислення конвективних зсувів ліній. Для зірок важко визначити конвективні зсуви ліній, оскільки реальна радіальна швидкість руху зоряного центра має відома недостатньо точно для багатьох зірок. Щоб виключити вплив радіальної швидкості, встановлюють нуль-пункт зсувів за допомогою абсолютних сонячних зсувів, як це зроблено в роботі [20], або приймають довільну нульову точку, використовуючи зсуви довжин хвиль ядер найсильніших ліній. У роботі [32] для визначення конвективних зсувів ліній, що спостерігаються у магнітних утвореннях на поверхні Сонця, було використано сильну лінію $\text{Mg I } b_2$ 517.27 нм (далі — «лінія Mg»), на основі припущення, що ядро цієї лінії утворюється високо в атмосфері, де контраст яскравості практично зникає, і її конвективний зсув буде майже нульовим. Ця лінія використовувалася також в роботі [10] поряд із застосуванням групи сильних ліній заліза для визначення нуль-пункту зсувів спостережуваних ліній у магнітних утвореннях. У дослідженні К-карликів [39] теж використовувались зсуви ядер найсильніших ліній заліза на підставі припущення, що вони нульові, виходячи з результатів [2], отриманих для сонячного спектру.

В даному дослідженні ми використали лінію Mg. Це дозволило нам позбутися доплерівських зсувів внаслідок радіального руху зірки відносно спостерігача на Землі, гравітаційного зсуву та інших зсувів, якщо вони не були враховані під час калібрування спостережень, а також від помилок методу вимірювань центральної довжини хвилі. Такий нуль-пункт шкали зсувів буде містити похибку, яка дорівнює власному конвективному зсуву лінії Mg. Надалі таку шкалу для зоряних спектрів будемо називати Mg-шкалою. У цій шкалі конвективний зсув спектральної лінії легко обчислюється відносно лабораторної довжини хвилі в одиницях швидкості за допомогою формули

$$V = \lambda(\lambda_{obs} / \lambda_{lab}) / \lambda(\lambda_{obs}^{Mg} / \lambda_{lab}^{Mg}) / \lambda_{lab}^{Mg}.$$

Тут λ_{obs} — виміряна центральна довжина хвилі спостережуваної лінії у спектрі зірки, λ_{lab} — лабораторна довжина хвилі. Верхній індекс вказує на лінію Mg. Ми застосували цю формулу для всіх зірок і перевірили її, використовуючи спектр Сонця.

Лабораторні довжини хвиль. Для вимірювання конвективних зсувів ми використали результати лабораторних досліджень довжин хвиль [34]. У даний час каталог лабораторних довжин хвиль [34] містить повний список ліній заліза та є одним з найточніших. Всі довжини хвиль розділено на чотири категорії в залежності від їхніх похибок (від 0.04 до 1 пм і більше). Більшість ліній мають похибки нижче 0.5 пм, а близько половини ліній — нижче 0.1 пм (або 60 м/с для довжини хвилі 500.0 нм). Для слабших ліній ($F/F_c > 0.7$) похибка лабораторних довжин хвиль приблизно в 2.5 більша, ніж для сильних ліній.

Побудова бісекторів. Щоб отримати бісектор, ми перш за все інтерполюємо профіль лінії за допомогою кубічного сплайна з кроком 0.1 пм. Потім обчислюємо середини горизонтальних відрізків, проведених від вимірюваної точки на синьому крилі профілю лінії до інтерполюваної точки на червоному крилі. З'єднавши отриманий ряд серединних точок, ми отримуємо криву, яка є бісектором лінії. На графіках бісекторів ординатою є нормалізований до континууму потік випромінювання F/F_c , а абсцисою — перетворені в одиниці швидкості довгохвильові зсуви вимірюваних точок профілю, обчислені за вищенаведеною формулою.

Оскільки у спектрах при переході до більш холодних зірок з'являються все нові бленди, лінії стають більш зашумленими, а їхні бісектори більш спотвореними, і кількість чистих від бленд ліній зменшується. З цієї причини не можна отримати надійні результати, аналізуючи індивідуальні бісектори у спектрах багатьох зірок. Є практика позбавлятися будь-яких шумів шляхом усереднення бісекторів. Наприклад, в роботах [3, 13] було показано, що при усередненні бісекторів можна отримати статистично надійний результат, вилучаючи точки, які різко відхиляються від середнього бісектора. Ми теж застосували такий метод. Всі різкі викиди вважали помилковими і виключали їх з усереднення, або відрізали верхню і нижню частини бісектора, якщо там був великий викид. У таких випадках можливе внесення певної суб'єктивності, тому ми робили це обережно. Середній бісектор розраховувався як середнє арифметичне положень тих бісекторів, які вносять вклад на кожній глибині поглинання з кроком 1 % від інтенсивності континууму. Для кожної зірки ми усереднювали індивідуальні бісектори у Mg-шкалі і потім згладжували середній бісектор.

БІСЕКТОРИ ЛІНІЙ У СПЕКТРІ СОНЯЧНОГО ПОТОКУ

Індивідуальні та середні бісектори. Ми виконали аналіз бісекторів сонячних ліній, щоб додати Сонце в нашу вибірку зірок сонячного типу і переконатися в достовірності отриманих результатів. З цією метою був використаний сонячний атлас [33], який представляє відбитий Місяцем спектр сонячного потоку, отриманий на HARPS в 2010 р. з роздільною здатністю $R = 120\,000$ у спектральному діапазоні від $\lambda = 380$ до $\lambda = 690$ нм і з невеликим проміжком у діапазоні $\lambda = 530...539$ нм. Ми позначимо цей атлас як HARPS. Для калібрування цього атласу був застосований ідеальний калібратор з рядом лазерних частот LFC (Laser Frequency Comb). Автори цього атласу стверджують, що приведені довжини хвиль є найбільш точним з усіх можливих у даний час і не вимагають будь-якої іншої корекції. Атлас HARPS будемо використовувати для порівняння з результатами аналізу зоряних спектрів, отриманих з таким же спектральним розділенням.

Додатково були використані ще три атласи сонячного потоку з високим розділенням, отримані на FTS (Fourier-Transform Spectrometers). FTS -атлас HINKL [26] надає зручний доступ до атласу KURUCZ [31] з розділенням $R = 340\,500$, $521\,360$ і $522\,900$ для діапазонів довжин хвиль $\lambda = 401.9...473.8$, $473.8...576.5$, $576.5...753.9$ нм відповідно. FTS-атлас NECKL [35] надає високоякісний спектр ($R = 400\,000$) для центра диска і усереднений спектр по всьому диску. FTS-атлас IAG [40] має дуже високе спектральне розділення $R = 1\,000\,000$ і точну шкалу довжин хвиль. Її систематичне відхилення від шкали HARPS становить ± 5 м/с, і вона не має значного тренду в діапазоні $\lambda = 480...580$ нм. Надалі атлас IAG ми будемо використовувати як еталон для порівняння з іншими атласами сонячного спектру.

Ми отримали бісектори для 61 лінії. Всі бісектори цих ліній, а також середній бісектор показано на рис. 1 в абсолютних шкалах, властивих кожному атласу. Як видно, діапазон синіх зсувів однаковий для атласів IAG, NECKL, тоді як для HARPS він вужчий, а для атласу HINKL він істотно розширений і зміщений у синю частину спектру. Рис. 2а демонструє середні бісектори чотирьох атласів в абсолютних шкалах. За розмахом середнього бісектора було визначено середню конвективну швидкість: 418 і 423 м/с для NECKL і IAG відповідно. Для атласу HARPS вона трохи менша (395 м/с) внаслідок нижчого спектрального розділення. Ослаблений після відбивання від Місяця сонячний спектр з нижчим розділенням показує більш згладжені профілі ліній з менш вираженою асиметрією. Слід зазначити, що в атласі HARPS сонячний потік випромінювання не нормувався до континууму, тому ми використовували локальний континуум для кожної окремої лінії. Це частково може вплинути на форму бісектора поблизу континууму. Для атласу HINKL розмах бісектора виявився найбільшим, тому середня конвективна швидкість вийшла великою (-636 м/с). Форма цього бісектора також відрізняється від IAG. У

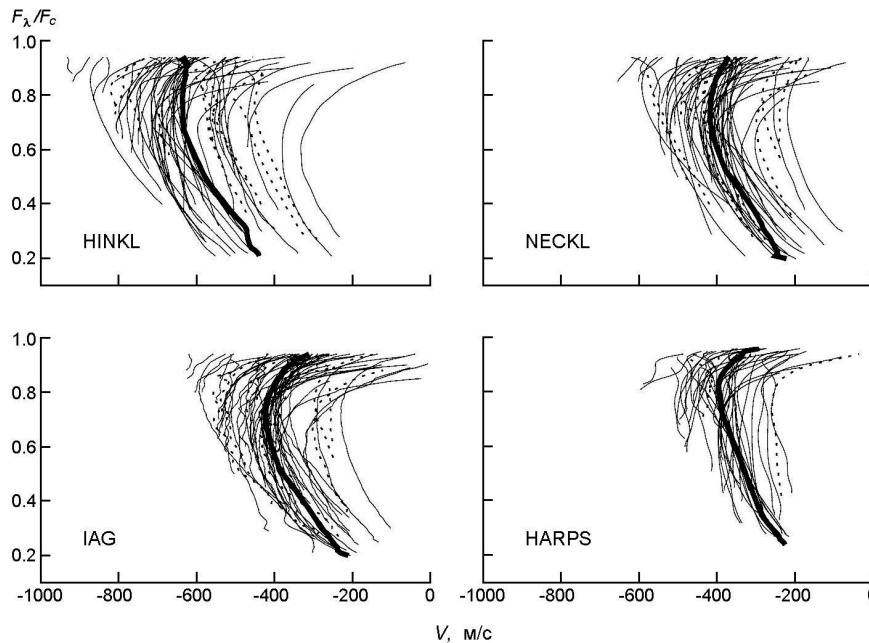


Рис. 1. Індивідуальні і середні бісектори ліній заліза, виміряні в абсолютній шкалі довжин хвиль чотирьох спектральних атласів сонячного потоку HINKL, NECKL, IAG, HARPS: тонкі лінії — бісектори ліній Fe I, пунктири — ліній Fe II, жирні лінії — середні бісектори

верхній частині бісектора вигин менший внаслідок збільшених синіх зсувів найслабших ліній з довжиною хвилі більш ніж 600 нм. За результатами порівняння ми прийшли до висновку, що шкали довжин хвиль в атласах IAG, NECKL, HARPS практично збігаються у межах помилок аналізу і є досить точними. Виміряна за даними цих атласів середня конвективна швидкість у фотосфері Сонця як зірки дорівнює близько 420 м/с. В атласі HINKL, мабуть, є проблема зі шкалою довжин хвиль, яку ми розглянемо нижче.

Похибки абсолютних шкал сонячних атласів. Ми порівняли абсолютні зсуви середніх бісекторів кожного атласу з IAG і таким чином оцінили похибки абсолютних шкал в діапазоні довжин хвиль від 450 до 650 нм. Атласи NECKL і HARPS мають похибку близько 10 м/с (рис. 2a), а в атласі HINKL похибка становить 240 м/с. Звідси випливає, що абсолютні шкали атласів IAG, NECKL і HARPS можна вважати надійними, а шкалу HINKL — ні. Аналіз зсувів індивідуальних бісекторів показав, що зміщення шкали в атласі HINKL відносно IAG залежить від довжини хвилі лінії. Рис. 3 демонструє цю залежність для атласу HINKL, тоді як атласи IAG, NECKL, HARPS показують тільки незначний тренд, який є наслідком даного підбору ліній. В атласі HINKL сині зсуви ліній з довжиною хвилі збільшуються. Що більша довжина хвилі, то більшим є зсув бісектора. Різниця між зсувами в HINKL і IAG становить близько 100, 220 і 330 м/с для $\lambda = 450, 550$ і 650 м/с відповідно. Збільшення синіх зсувів з

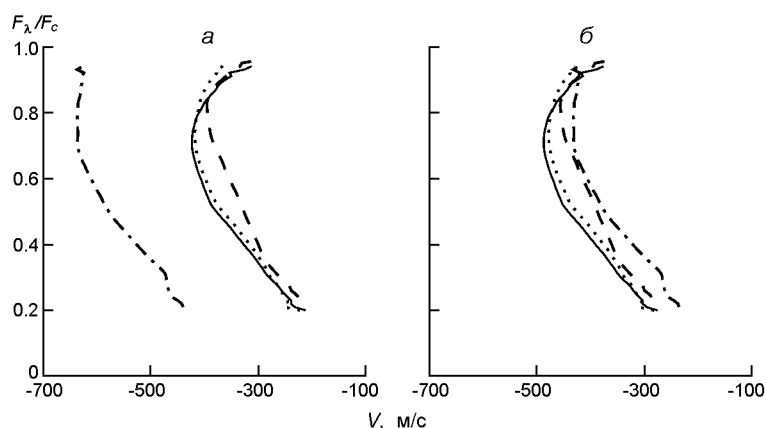


Рис. 2. Середні бісектори ліній у спектрі сонячного потоку (*a* — в абсолютній шкалі, *б* — в Mg-шкалі) за даними спостережень з чотирьох атласів: IAG (суцільна лінія); HINKL (штрих-пунктир); NECKL (пунктир) і HARPS (штрихова лінія)

довжиною хвилі не має фізичного сенсу. Якраз має бути навпаки, оскільки з довжиною хвилі збільшується непрозорість, зменшується контраст між гранулами і міжгранулами, і синій зсув повинен зменшуватися. Як було показано в роботі [25], для ліній різної сили практично немає залежності синіх зсувів від довжини хвилі. Але якщо підібрати лінії однакової сили, тоді сині зсуви цих ліній з довжиною хвилі зменшуються. При цьому слабкі лінії показують меншу залежність, ніж сильні лінії. Ми використовували лінії різної сили, тому в нашому випадку ніякої залежності від довжини хвилі не повинно бути. Звідси випливає, що в атласі HINKL, мабуть, недостатньо точне довгохвильове калібрування спектра. У роботі [20] зазначалося, що в атласі HINKL нульову точку було перевстановлено, мабуть для того, щоб вирівняти середні позиції ліній Fe I з лабораторними значеннями [34]. За наведеними даними [20] в діапазоні $\lambda = 600 \dots 630$ нм зсув між HINKL і IAG дорівнює 336 м/с. Це збігається з нашими оцінками в цьому конкретному діапазоні.

Перевірка Mg-шкали. За допомогою сонячних даних ми можемо перевірити Mg-шкалу, побудовану відносно лінії Mg. Через те що всі сонячні атласи мають абсолютні шкали, ми можемо простежити можливі похибки у Mg-шкалі. На рис. 4 показані середні бісектори в цій шкалі (штрихова лінія) і бісектори в абсолютній шкалі для кожного атласу (суцільна лінія). Бісектори в Mg-шкалі зміщені на відповідний абсолютний зсув лінії Mg в кожному атласі, величина якого залежить від точності калібрування кожного атласу. В абсолютних шкалах цей зсув дорівнює 204 м/с (HINKL), 64 м/с (IAG), 60 м/с (NECKL) і 61 м/с (HARPS). Близькі значення, отримані для трьох атласів, дозволяють зробити висновок, що у спектрі Сонця лінія Mg має невеликий червоний зсув приблизно 60 м/с. При порівнянні між собою середніх бісекторів чотирьох атласів у Mg-шкалі (рис. 2б) відмінність між

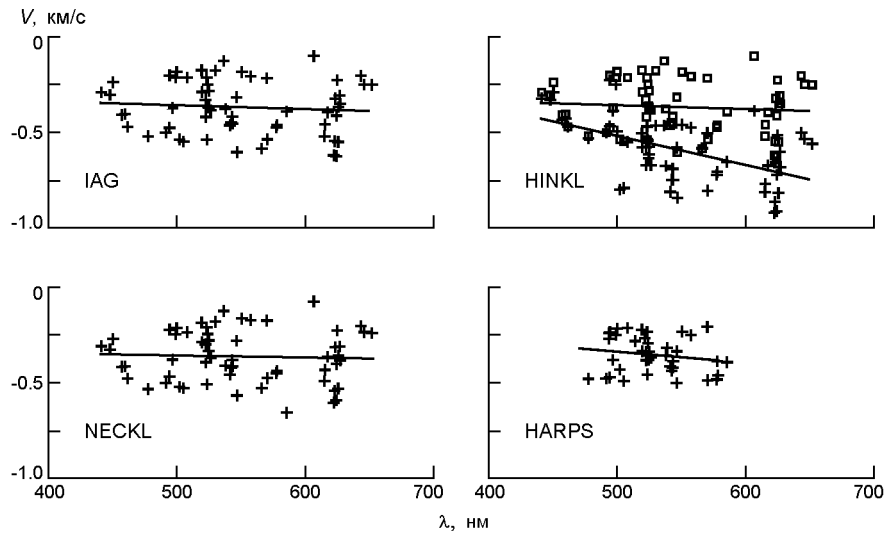


Рис. 3. Абсолютні конвективні зсуви ліній заліза у спектрі сонячного потоку за даними атласів IAG, HINKL, NECKL і HARPS в залежності від довжини хвилі (квадратиками показано зсуви ліній з атласу IAG для порівняння)

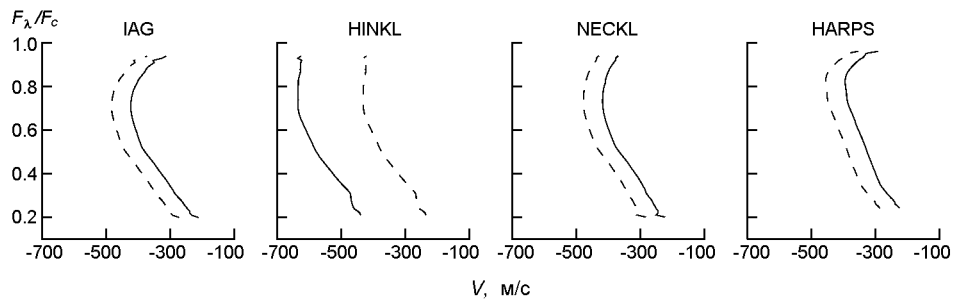


Рис. 4. Середні бісектори ліній за даними атласів IAG, HINKL, NECKL і HARPS в абсолютних шкалах (суцільні лінії) і Mg-шкалах (штрихові лінії)

HINKL і IAG істотно скорочується. Практично всі середні бісектори збігаються у межах помилок аналізу. Звідси висновок: застосування лінії Mg для побудови шкали довжин хвиль дозволяє зменшити можливі помилки центральних довжин хвиль ліній і помилки через довгохвильову дисперсію спектру, але додатково вносить помилку, що дорівнює власному зсуву ядра лінії Mg.

Цікаво відзначити, що цей власний зсув лінії Mg виявився «червоним». Взагалі ефект почервоніння зсувів дуже сильних ліній був раніше відомий як для сонячних ліній [43], так і у випадку зоряних ліній [3]. Можливо, цей невеликий червоний зсув частково викликаний проникненням конвективних потоків у шари між верхньою фотосферою і нижньою хромосферою, де цілком може спостерігатися антикореляція між варіаціями температури і швидкості. На доплерограмах, отриманих в ядрі цієї лінії, видно, що грануляційна структура ще проявляється, але вона значно відрізняється від картини грануля-

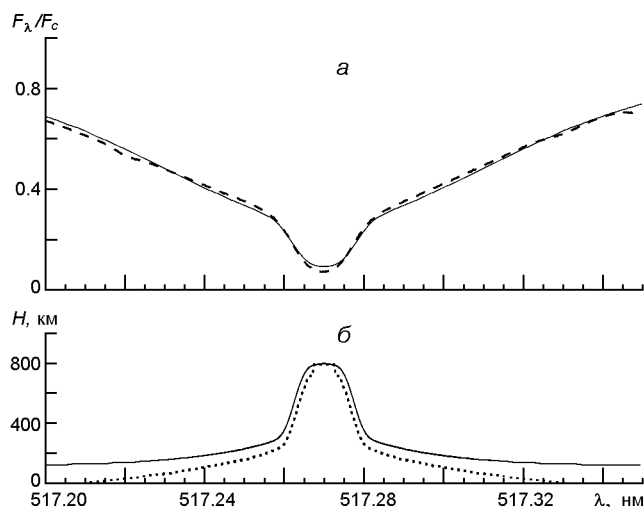


Рис. 5: *a* — профіль ядра лінії Mg за даними атласу IAG (штрихова лінія) і профіль, синтезований з використанням моделі FALC [16] (суцільна лінія); *б* — профіль ефективних висот формування, обчислений по депресійних функціях (суцільна лінія), а також профіль висот, де оптична глибина в лінії дорівнює одиниці (пунктирна лінія)

ції, видимої в крилах цієї лінії [41]. Згідно з даними [8, 30] структура грануляції зберігається до висот близько 500...700 км, при цьому її характеристики змінюються з висотою. У гранулах і міжгранулах майже завжди відбувається інверсія температури в середньому на висотах 200...300 км, тоді як інверсія вертикальних швидкостей відбувається у більшості випадків на висотах не нижче 500 км. На висотах близько 700 км ще спостерігається 20 % грануляційних структур. Якраз на цих висотах між верхньою фотосферою і нижньою хромосферою має формуватися ядро лінії Mg. Згідно з даними [37] висота формування ядра цієї лінії, розрахована для центра сонячного диска, дорівнює близько 600 км. Максимальна чутливість до змін температури проявляється на висоті близько 550 км, а до змін вертикальної швидкості — на висоті близько 800 км. Ми обчислили висоту формування ядра лінії Mg у спектрі сонячного потоку за програмою SPANSAT [17] з використанням депресійних функцій вкладки [24]. На рис. 5 представлено спостережуваний і обчислений профілі ядра лінії Mg і профілі ефективних висот. Як видно, в діапазоні $F/F_c = 0.1 \dots 0.2$ ядро формується на висотах 600...800 км, тобто в області, де грануляційні структури ослаблені, але ще помітні на доплерограмах. Можна припустити, що змінена структура грануляції в нижній хромосфері є однією з причин ефекту почервоніння зсувів ядер сильних ліній. Можливо, що червоні вклади в лінію від гарячих потоків, що рухаються вниз, злегка переважають над синіми вкладами від холодних потоків, що піднімаються вгору, і зсув ядра чутливої до швидкостей лінії Mg може бути червоним.

БІСЕКТОРИ ЛІНІЙ В ЗІРКОВИХ СПЕКТРАХ

Шуми і похибки бісекторів. Майже всі індивідуальні бісектори у спектрах досліджуваних зірок більшою чи меншою мірою спотворені шумами. Відзначимо, що невелику звивистість бісекторів видно навіть при дуже високому розділенні в IAG-атласі сонячного потоку (рис. 1). Звивистий характер проявляється ще більше в зірках з $v_{\text{sin}i} \geq 3$ км/с. У принципі випромінювання у будь-якій заданій точці профілю лінії відбувається з широкого діапазону глибин фотосфери і повного диска. Це має призводити до усереднення і згладження всіх можливих коливань і до більш гладкої форми бісекторів. Натомість ми бачимо великі шуми спостережень у профілях ліній і їхніх бісекторах, і це не дозволяє отримати надійні результати для окремих індивідуальних бісекторів. Невеликий шум обертально розширених профілів призводить до ще більших похибок у бісекторах. До того ж, якщо виходити з факту, що в зірках з $v_{\text{sin}i} > 5$ км/с хвилястий характер більше виражений, то можна припустити, що причиною звивистості може ще бути перерозподіл доплерівських зсувів, викликаних обертанням, поблизу лімба, як це зазначено в роботі [22]. У зірках холодніших, які повільно обертаються, також спостерігається хаотичний вигляд бісекторів. Окрім шумів є невизначеність з блендами, що також вносить додатковий розкид і позначається на надійності отриманих результатів. Усереднення бісектрів дозволяє вилучити шуми, і тому всі результати аналізу зоряних спектрів були отримані на основі середніх бісекторів.

Для зірок ми будемо розглядати всі бісектори на Mg-шкалі. Це означає, що їхні положення вже були виправлені за гравітаційне зміщення і радіальну швидкість зірки і відповідають конвективному зсуву ядра лінії з похибкою, рівною конвективному зсуву лінії Mg в даній зірці. Величина цього конвективного зсуву нам не відома, але очікується, що вона повинна бути невеликою у межах точності даного аналізу для зірок сонячного типу.

Бісектори ліній у спектрі зірки HD 102361 F8 V. Наш попередній аналіз індивідуальних бісекторів показав дуже широкий діапазон бісекторів у спектрі зірки HD 102361, що різко відрізняється від інших зірок. До того ж величина зсувів залежить від довжини хвилі лінії (рис. 6a). Сині зсуви досягають 2000 м/с в діапазоні $\lambda = 538 \dots 643$ нм, а червоні — майже 500 м/с в діапазоні $\lambda = 441 \dots 460$ нм, тобто зсуви ліній стають «синішими» зі збільшенням довжини хвилі. Це добре видно на рис. 7, який показує залежність зсувів індивідуальних ліній від довжини хвилі. Ця залежність нагадує виявлену в атласі HINKL довгохвильову дисперсію. У зв'язку з цим ми ввели дисперсійну поправку в шкалу довжин хвиль для цієї зірки. Рис. 7 показує виправлені зсуви ліній, а рис. 6б показує положення бісекторів цих ліній у виправленій шкалі зсувів для зірки HD 102361.

Зміни бісекторів з температурою зірки. На рис. 8 бісектори ліній всіх зірок і Сонця як зірки (атлас HARPS) показано у порядку змен-

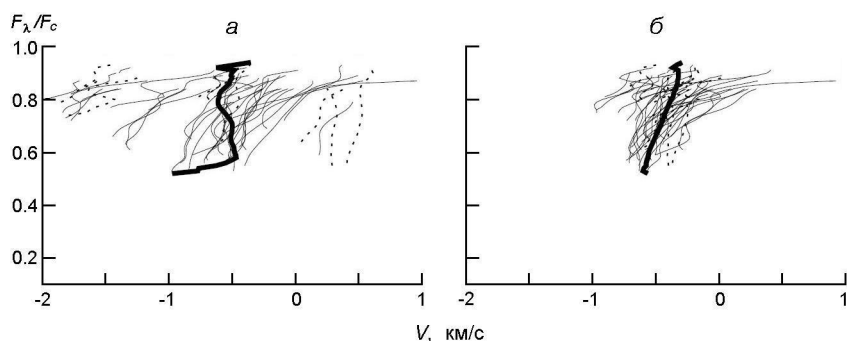


Рис. 6. Індивідуальні бісектори ліній Fe I (тонкі суцільні лінії) і Fe II (пунктирні лінії) і середній бісектор (жирні суцільні лінії) для зірки HD 102361 (а) і ті ж самі бісектори з урахуванням довгохвильової дисперсії в Mg-шкалі (б)

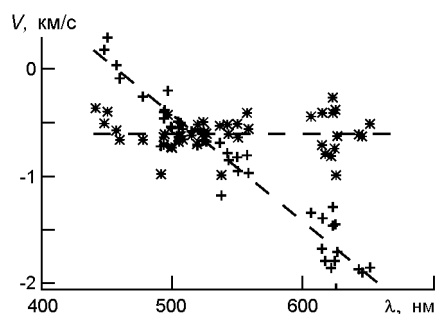


Рис. 7. Конвективні зсуви ліній у спектрі зірки HD 102361 в залежності від довжини хвилі (хрестики) та зсуви цих же ліній з урахуванням довгохвильової дисперсії в Mg-шкалі (зірочки)

шення ефективної температури зліва направо і зверху вниз в одному і тому ж масштабі. Ми не бачимо суттєвих відмінностей бісекторів ліній Fe I і Fe II, хоча відомо, що для Сонця бісектори сильних ліній Fe II мають більш виражену форму «С», ніж бісектори Fe I ліній однакової сили. Мабуть, це є наслідком нижчого розділення, вищих шумів і малої кількості ліній Fe II. Якщо розглядати бісектор сильної лінії від верху поблизу континууму до низу поблизу ядра, то можна отримати уявлення про зміну сумарної швидкості висхідних і низхідних потоків від низу до верху у фотосфері конкретної зірки. Будь-яка точка на бісекторі відображає середню швидкість конвективних потоків на фотосферних висотах, з яких виходить випромінювання у відповідній точці профілю лінії. Щоб точніше прив'язати цю швидкість до висоти, необхідно розрахувати профіль висот формування лінії. Проте навіть один бісектор може надати багато інформації.

На рис. 8 видно, що в цілому індивідуальні бісектори найслабших ліній найбільш зміщені до синього краю на шкалі зсувів, оскільки ці лінії формуються у глибоких шарах, де конвективні швидкості гранул, що піднімаються, досить великі. Сильні лінії менше зміщені, тому що їхні ядра формуються у високих шарах фотосфери, де грануляція значно ослаблена. Розміщення на шкалі зсувів бісекторів від найслабших до найсильніших ліній показує певний діапазон конвективних швидкостей, притаманних конкретній зірці. Ширина цього діапазону збільшується з ефективною температурою та зі зменшенням поверх-

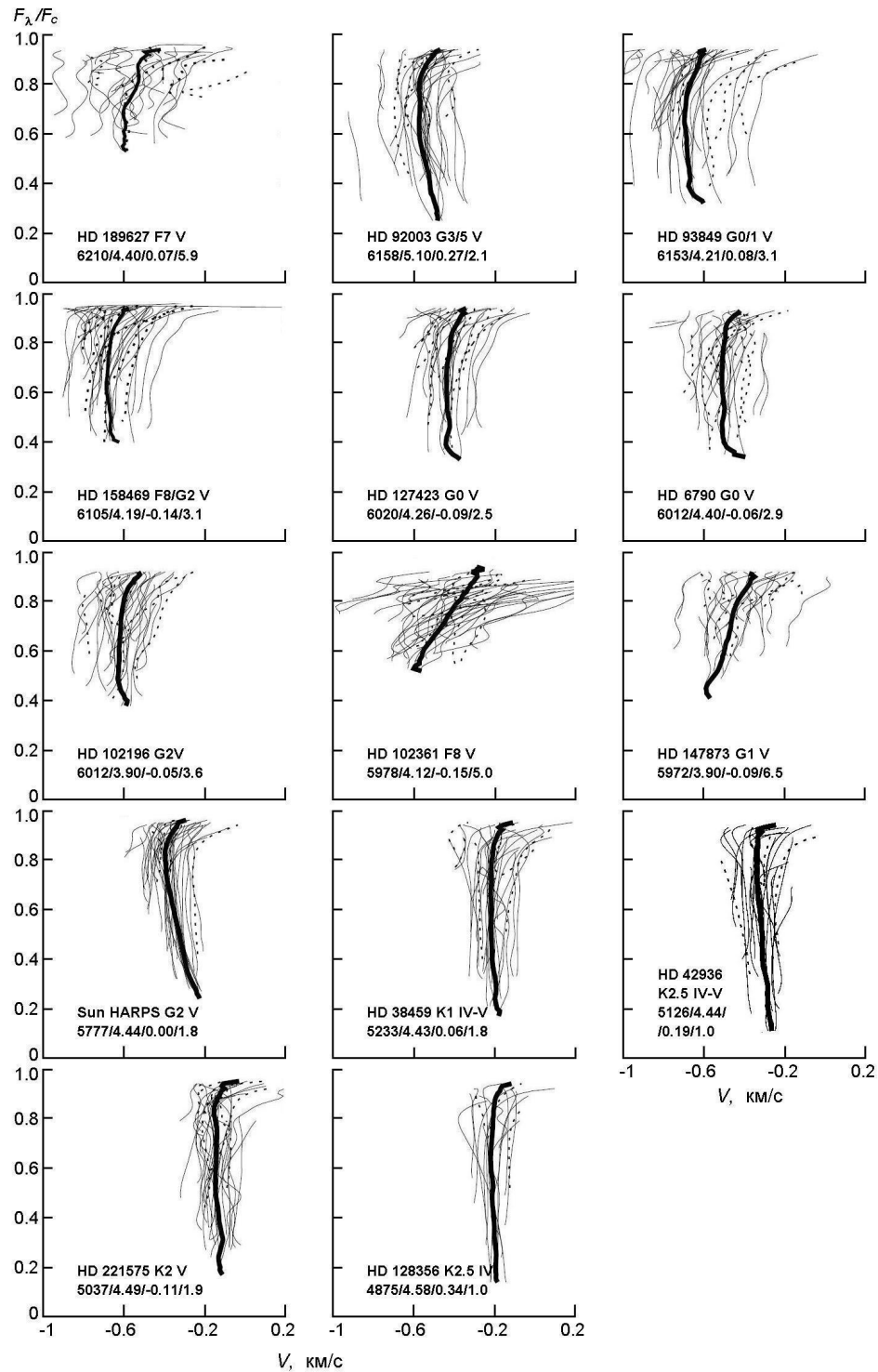


Рис. 8. Індивідуальні бісектори ліній Fe I (тонкі суцільні лінії) і Fe II (пунктирні лінії), а також усереднені бісектори (жирні суцільні лінії), представлені в Mg-шкалі для зірок сонячного типу з зазначеними основними параметрами T_{eff} , $\lg g$, $[N/H]$, $v \sin i$

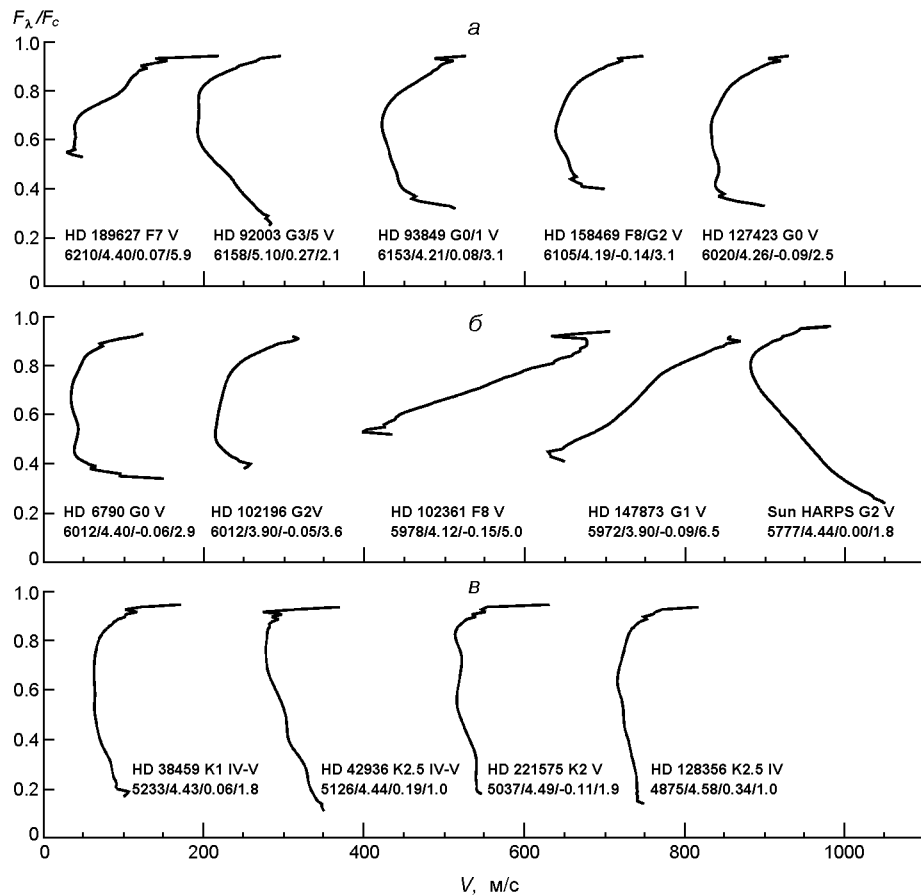


Рис. 9. Зміни форми середніх бісекторів з ефективною температурою зірки. Горизонтальне розташування бісекторів на шкалі зсувів довільне, але впорядковане по ефективній температурі. Під кожним бісектором вказані параметри зірки: $T_{\text{eff}}/\lg g/[N/H]/v \sin i$, а також тип зірки

невої гравітації і металічності. Можна сказати, що цей діапазон зсувів є однією з ознак ефективності конвекції у фотосфері зірки.

Середні бісектори, як видно на рис. 9, для більшості зірок мають форму «С», як у випадку Сонця, але з різним вигином всередині бісектора, величина якого залежить від основних параметрів зірки. Серед всіх бісекторів особливо виділяються бісектори для зірок HD 189627 F7V, HD 102361 F8V, HD 147873 G1V, що мають швидкість обертання $v \sin i \approx 5$ км/с. Форма цих трьох бісекторів схожа на сильно витягнуту верхню частину букви С або навіть більше на символ «слеш» (/). Така форма викликана дією ефектів обертання на профілі ліній. Як відомо з досліджень [22], нижня частина бісектора скорочується або стискається зі збільшенням швидкості обертання і все більше відхиляється до синього краю спектру, тому зсуви ядер ліній в таких зірках стають більш синіми.

Середні бісектори відрізняються своєю довжиною. У спектрах гарячих зірок лінії поглинання істотно слабшають у порівнянні з лініями

у спектрах холодних зірок, і їхні бісектори стають коротшими, а ядра більш зсунутими, оскільки вони формуються у глибших шарах. Як правило, що гарячіша зірка, то більша її швидкість обертання. Довжина середнього бісектора залежить не тільки від температури, але також від швидкості обертання зірки і металічності. Особливо це помітно для зірок з великими значеннями $v \sin i$, наприклад, в зірці HD 189627 середній бісектор значно коротший від інших, і зсув його нижньої частини «синіший».

Важливою характеристикою бісектора є його розмах або зсув найбільш синьої точки. З рис. 9 видно, що розмах залежить від температури. Що більша ефективна температура, то більша кривизна або розмах бісектора і все більшою стає середня конвективна швидкість. До того ж розмах залежить також від гравітації на поверхні, яка прагне послабити рух гранул, що піднімаються, і завдяки цьому розмах зменшується в зірках з більшою гравітацією. У зірках, багатих металами, зростає непрозорість фотосфери. Рухи гранул, що піднімаються, теж сповільнюються, і розмах стає меншим. Наприклад, в зірках HD 93849 і HD 158469 з близькими значеннями T_{ef} , $\lg g$ і $v \sin i$ середні бісектори відрізняються через різну металічність. У зв'язку з цим не можна очікувати чіткої залежності розмаху бісекторів від температури в нашій вибірці зірок, бо інші параметри хоча і не дуже, але все ж відрізняються від однієї зірки до іншої. Загалом можна сказати, що розмах бісектора залежить від структури атмосфери, яка визначається основними параметрами зірки.

Характерною особливістю є також висота розмаху середнього бісектора. Як видно з рис. 9а, для гарячіших зірок висота розмаху менша. Це означає, що в гарячих зірках ефективна грануляція простягається у високі шари фотосфери. У холодніших зірках (рис. 9в) висота розмаху велика, і це свідчить про те, що ефективний підйом речовини у гранулах відбувається у глибших шарах, ніж в це буває у гарячих зірках. Тобто, що вища температура, то вище в атмосферу піднімаються конвективні потоки гарячої речовини.

КОНВЕКТИВНІ ШВИДКОСТІ У ФОТОСФЕРІ ЗІРОК

Ми визначили зсув найбільш синьої точки на середньому бісекторі, тобто виміряли розмах бісектора, і отримали середню конвективну швидкість у фотосфері для кожної зірки. Результати приведено в таблиці та на рис. 10 в залежності від різних параметрів зірки. Найтіснішою виявилася кореляція між середньою конвективною швидкістю, або швидкістю підйому гранул, і ефективною температурою зірки. Решта залежностей, показаних на рис. 10, мають більший розкид значень, проте отримані тренди мають фізичний сенс. Ми хочемо відзначити наявність кореляції між конвективною швидкістю і параметрами мікро- і макротурбулентності. Недаремно швидкість макротурбулентності часто називають першою ознакою грануляції в атмо-

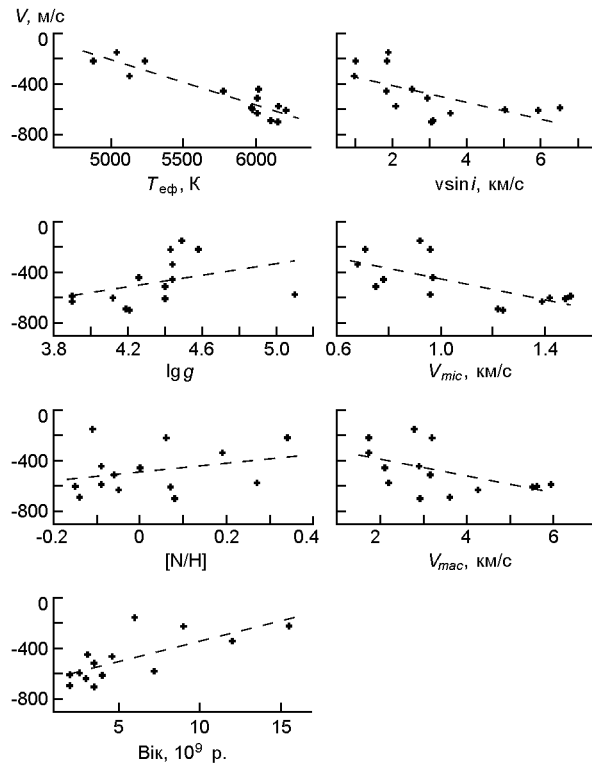


Рис. 10. Середня конвективна швидкість, отримана з величини розмаху бісекторів, в залежності від ефективної температури, прискорення вільного падіння, металічності, віку зірки, швидкостей обертання і мікро- та макротурбулентності (штрихові лінії — лінійна апроксимація)

сфері зірки. Що більша швидкість підйому гранул, то ефективнішою є грануляція, все сильнішою стає мікро- і макротурбулентність в зірках, тобто більшою стає дисперсія конвективних швидкостей. Також підтверджується вплив обертання зірки на бісектори ліній. Що більша швидкість обертання, то більша швидкість підйому гранул. Слід також відзначити кореляцію між середньою конвективною швидкістю і віком зірки. Це очевидно, що з віком ефективність грануляції повинна зменшуватися. Отже, всі представлені на рис. 10 залежності не суперечать фізиці досліджуваних процесів і підтверджують достовірність отриманих зі спостережень даних про асиметрію зірок.

ВИСНОВКИ

У даній роботі виконувався аналіз асиметрії ліній у спектрах зірок сонячного типу, отриманих на спектрографі HARPS з роздільною здатністю близько 120 000 і відношенням сигналу до шуму понад 100. Для обраних ліній були виміряні бісектори, які є ланцюгами конвективних синіх зсувів у шарах фотосфери, де формуються відповідні точки профілю спектральної лінії. Основні висновки такі.

У зірках сонячного типу бісектори дуже слабких ліній демонструють сині зсуви у найглибших шарах фотосфери, а їхня форма нагадує верхню частину літери «С». Бісектори сильних ліній несуть інформацію про конвективні швидкості майже всіх шарів фотосфери, і для більшості зірок мають форму літери «С», яка стає більше схожою на символ «сlesh» (/), якщо швидкість обертання зірки $v \sin i \approx 5$ км/с.

З ростом ефективної температури кривизна бісектора систематично збільшується. Це підтверджується чіткою залежністю величини розмаху бісектора від ефективної температури. Отримані з величини розмаху середні конвективні швидкості збільшуються від 150 до 700 м/с для зірок з ефективною температурою від 4800 до 6200 К відповідно. З підвищенням прискорення вільного падіння на поверхні та металічності конвективні швидкості стають меншими. З віком зірки конвективні швидкості зменшуються, як і слід було очікувати. Фотосферна макротурбулентна швидкість, яка є дисперсією конвективних швидкостей, прямо залежить від величини цих швидкостей.

Бісектори ліній у спектрі сонячного потоку, представленого в атласі HARPS, добре вписуються в загальну картину бісекторів зірок сонячного типу. Порівняльний аналіз бісекторів, виміряних в абсолютних шкалах чотирьох атласів сонячного потоку, показав, що шкала довжин хвиль в FTS-атласах IAG, NECKL і атласу HARPS установлена з точністю 10 м/с в діапазоні $\lambda = 450 \dots 650$ нм. Шкала довжин хвиль в атласі HINKL зміщена відносно шкали атласу IAG в середньому на 240 м/с. До того ж зміщення шкали HINKL змінюється з довжиною хвилі від 100 до 330 м/с в діапазоні 450...650 нм відповідно. У зв'язку з цим атлас HINKL небажано використовувати для визначення конвективних синіх зсувів ліній.

Наведені вище висновки підтверджують відомі факти про характер бісекторів ліній у спектрах зірок сонячного типу і показують, що в загальних рисах бісектори зоряних ліній подібні до бісекторів сонячних ліній, але зі своїми характерними рисами. Порівнюючи форму бісекторів і величину синіх зсувів ліній різної сили у спектрі зірки з сонячними даними можна одержати попередні оцінки про середню конвективну швидкість, висоту проникної конвекції, швидкість обертання та макротурбулентну швидкість у зоряній фотосфері. За величиною розмаху бісектора можна оцінити шари максимального впливу грануляції на профілі спектральних ліній і енергійність грануляції у фотосфері.

Шуми спостережень, бленди і недостатньо високе спектральне розділення спотворюють форму бісекторів. Це впливає більшою мірою на бісектори швидкообертючих зірок. Внаслідок цих причин отримані індивідуальні бісектори є недостатньо надійними, тому всі висновки були отримані на основі середніх бісекторів. Обчислені за величиною розмаху бісектора значення середніх конвективних швидкостей є тільки нижньою межею, оскільки недостатньо висока роздільна здатність зменшує цей розмах. Крім того, у шкалі зсувів від-

носно лінії Mg конвективні швидкості можуть містити зсув цієї лінії, якщо він виявився ненульовим. Значення отриманих середніх конвективних швидкостей не перевищують точність лабораторних довжин хвиль, яка в кращому випадку становить 30...60 м/с. Щоб поліпшити результати аналізу, необхідно мати точніші лабораторні довжини хвиль і спектри зірок з більш високим розділенням і відношенням сигнал/шум.

Автор щиро вдячна Я. Павленку і О. Іванюку за надані спостережні спектри зірок, а також рецензенту за важливі зауваження.

REFERENCES

1. Allende Prieto C., Asplund M., Garcia Lopez R. J., Lambert D. L. (2002) Signatures of convection in the spectrum of Procyon: Fundamental parameters and iron abundance. *Astrophys. J.* 567. 544—565.
2. Allende Prieto C., Garcia Lopez R. J. (1998) Fe I line shifts in the optical spectrum of the Sun. *Astron. Astrophys. Suppl.* 129. 41—44.
3. Allende Prieto C., Garcia Lopez R.J., Lambert D. L., Gustafsson B. (1999) Spectroscopic observations of convective patterns in the atmospheres of metal-poor stars. *Astrophys. J.* 526. 991—1000.
4. Allende Prieto C., Koesterke L., Ludwig H.-G., Freytag B., Caffau E. (2013) Convective line shifts for the GAIA RVS from the CIFIST 3D model atmosphere grid. *Astron. and Astrophys.* 550. id. A103, 13.
5. Asplund M., Nordlund A., Trampedach R., Allende Prieto C., Stein R. F. (2000) Line formation in solar granulation. I. Fe line shapes, shifts and asymmetries. *Astron. and Astrophys.* 359. 729—742.
6. Atroshchenko I. N., Gadun A. S. (1994) Three-dimensional hydrodynamic models of solar granulation and their application to a spectral analysis problem. *Astron. and Astrophys.* 291. 635—656.
7. Balthasar H. (1984) Asymmetries and wavelengths of solar spectral lines and the solar rotation determined from Fourier-transform spectra. *Solar Phys.* 93. 219—241.
8. Baran O. A., Stodilka M. I. (2015) Convection structure in the solar photosphere at granulation and mesogranulation scales. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 31(2). 65—72.
9. Beeck B., Cameron R. H., Reiners A., Schussler M. (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.
10. 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). *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 13(5). 65—74.
11. Dravins D. (1987) Stellar granulation. II. Stellar photospheric line asymmetries. *Astron. and Astrophys.* 172. 211—224.
12. Dravins D. (1999) Stellar surface convection, line asymmetries, and wavelength shifts. *ASP Conference Series, IAU Colloquium 170*. Eds. J. B. Hearnshaw and C. D. 185. 268—276.
13. Dravins D. (2008) Ultimate information content in solar and stellar spectra. Photospheric line asymmetries and wavelength shifts. *Astron. and Astrophys.* 492. 199—213.

14. 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.
15. Dravins D., Nordlund A. (1990) Stellar granulation. V. Synthetic spectral lines in disk-integrated starlight. *Astron. and Astrophys.* 228. 203—217.
16. Fontenla J. M., Avrett E. H., Loeser R. (1993) Energy balance in the solar transition region. III. Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion. *Astrophys. J.* 406. 319—345.
17. Gadun A. S., Sheminova V. A. (1988) SPANSAT: the Program for LTE Calculations of absorption line profiles in stellar atmospheres. Preprint No. ITF-88-87P (Institute for Theoretical Physics of the Ukrainian SSR Academy of Sciences, Kyiv).
18. Gray D. F. (1982) Observations of spectral line asymmetries and convective velocities in F, G and K stars. *Astrophys. J.* 255. 200—209.
19. Gray D. F. (2005) Shapes of spectral line bisectors for cool stars. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 117. 711—720.
20. Gray D. F. (2018) Solar-flux line-broadening analysis. *Astrophys. J.* 857. Id. 139. 8.
21. Gray D.F., Nagel T. (1989) The granulation boundary in the H-R diagram. *Astrophys. J.* 341. 421—426.
22. Gray D. F., Toner C. G. (1985) Inferred properties of stellar granulation. *Astrophys. J.* 97. 543—550.
23. Gray D. F., Toner C. G. (1986) The remarkable spectral line asymmetries of F and G Ib supergiant stars. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 98. 499—503.
24. Gurtovenko E. A., Sheminova V. A. (2015) *Formation depths of Fraunhofer lines.* eprint arXiv:1505.00975
25. Hamilton D., Lester J. B. (1999) A Technique for the study of stellar convection: The visible solar flux spectrum. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 763. 1132—1143.
26. 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.
27. Ivanyuk O. M., Jenkins J. S., Pavlenko Ya. V., et al. (2017) The metal-rich abundance pattern — spectroscopic properties and abundances for 107 main-sequence stars. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 468. 4151—4169.
28. 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.
29. Kostik R. I., Orlova T. V. (1977) On the asymmetry of selected Fraunhofer lines. *Solar Phys.* 53. 353—358.
30. Kostyk R. I., Shchukina N. G. (2004) Fine structure of convective motions in the solar photosphere: Observations and theory. *Astron. Repts.* 48. 769—780.
31. Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L. (1984) *Solar flux atlas from 296 to 1300 nm.* National Solar Observatory Atlas, Sunspot, New Mexico, National Solar Observatory.
32. Livingston W. C. (1983) Magnetic fields and convection — New observations. Solar and stellar magnetic fields: Origins and coronal effects. *Proc. Symp., Zurich, Switzerland.* 149—152.
33. Molaro P., Esposito M., Monai S., Lo Curto G., et al. (2013) A frequency comb calibrated solar atlas. *Astron. and Astrophys.* 560. id. A61. 9.
34. Nave G., Johansson S., Learner R. C. M., Thorne A. P., Brault J. W. (1994) A new multiplet table for Fe I. *Astrophys. J. Suppl.* 94. 221.

35. Neckel H. (1999) Announcement spectral atlas of solar absolute disk-averaged and disk-center intensity from 3290 to 12510 Å (Brault and Neckel, 1987). *Solar Phys.* 184. 421—422.
36. 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.
37. Quintero Noda C., Uitenbroek H., Carlsson M., Orozco Suarez D., Katsukawa Y., et al. (2018) Study of the polarization produced by the Zeeman effect in the solar Mg I b lines. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 481. 5675—5686.
38. Ramirez I., Allende Prieto C., Koesterke L., Lambert D. L., Asplund M. (2009) Granulation in K-type dwarf stars. II. Hydrodynamic simulations and 3D spectrum synthesis. *Astron. and Astrophys.* 501. 1087—1101.
39. Ramirez I., Allende Prieto C., Lambert D. L. (2008) Granulation in K-type dwarf stars. I. Spectroscopic observations. *Astron. and Astrophys.* 492. 841—855.
40. Reiners A., Mrotzek N., Lemke U., Hinrichs J., Reinsch K. (2016) The IAG solar flux atlas: Accurate wavelengths and absolute convective blueshift in standard solar spectra. *Astron. and Astrophys.* 587. id. A65. 8.
41. Rutten R. J., Leenaarts J., Rouppe van der Voort L. H. M., de Wijn A. G., Carlsson M., Hansteen V. (2011) Quiet-Sun imaging asymmetries in Na I D1 compared with other strong Fraunhofer lines. *Astron. and Astrophys.* 531. id. A17. 16.
42. Sheminova V. A. (2019) Turbulence and Rotation in Solar-Type Stars. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 35. 3. 129—142.
43. Sheminova V. A., Gadun A. S. (2002) Convective shifts of iron lines in the solar photosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 18. № 1. 12—21.
44. Wallace L., Hinkle K. H., Livingston W. C., Davis S. P. (2011) An optical and near-infrared (2958—9250 Å) solar flux atlas. *Astrophys. J. Suppl.* 1. id. 6. 8.

В. А. Шеминова

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

АСИММЕТРИЯ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ СОЛНЦА И ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

Мы проанализировали асимметрию линий Fe I и Fe II в спектрах солнечного потока, используя три атласа FTS и атлас HARPS, а также в спектрах 13 звезд, используя данные наблюдений на спектрографе HARPS. Для уменьшения шумов наблюдений индивидуальные биссекторы линий для каждой звезды были усреднены. Полученные средние биссекторы в спектрах звезд имеют форму в большей или в меньшей степени похожую на хорошо известную для Солнца форму литеры «С». В звездах со скоростью вращения больше 5 км/с форма биссекторов больше напоминает знак слэш (/). Кривизна и размах биссекторов увеличиваются с температурой звезды. Наши результаты подтверждают известные факты о сильном влиянии скорости вращения на размах и форму биссекторов. По размаху среднего биссектора, который показывает наибольшую разность между скоростями холодных опускающихся и горячих поднимающихся конвективных потоков вещества была определена средняя конвективная скорость. Она равна –420 м/с для Солнца как звезды. Для звезд она увеличивается от –150 до –700 м/с с увеличением эффективной температуры от 4800 до 6200 К соответственно. Для звезд с большей гравитацией на поверхности и с большей металличностью средняя конвективная скорость уменьшается. Также она уменьшается с возрастом звезды и коррелирует со скоростью микро- и макротурбулентных движений. Результаты анализа солнечного потока показали, что абсолютные шкалы длин волн в используемых атласах совпадают с точностью около –10 м/с, кроме FTS-атласа Хинкле и др., шкала которого смещена и зависит от длины волны.

В диапазоне от 450 до 650 нм сдвиг шкалы этого атласа изменяется от -100 до -330 м/с соответственно, и в среднем равен -240 м/с. Полученные средние биссекторы звезд содержат информацию о полях конвективных скоростей и могут быть полезными для гидродинамического моделирования звездных атмосфер с целью исследования характерных особенностей поверхностной конвекции.

Ключевые слова: асимметрия линий, профили линий, звезды солнечного типа, поле скоростей, грануляция.

V. A. Sheminova

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

THE LINE ASYMMETRY IN THE SPECTRA OF THE SUN AND SOLAR-TYPE STARS

We have analysed the asymmetry of lines Fe I and Fe II in spectra of a solar flux using three FTS atlases and the HARPS atlas and also in spectra of 13 stars using observation data on the HARPS spectrograph. To reduce observation noise individual line bisectors of each star have been averaged. The obtained average bisectors in the stellar spectra are more or less similar to the shape C well known to the Sun. In stars with rotation velocities greater than 5 km/s the shape of the bisectors is more like /. The curvature and span of the bisectors increase with the temperature of the star. Our results confirm the known facts about strong influence of rotation velocity on the span and shape of bisectors. The average convective velocity was determined based on the span of the average bisector, which shows the largest difference between the velocity of cold falling and hot rising convective flows of the matter. It's equal to 420 m/s for the Sun as a star. In stars, it grows from 150 to 700 m/s with an effective temperature of 4800 to 6200 K, respectively. For stars with greater surface gravity and greater metallicity, the average convective velocity decreases. It also decreases with star age and correlates with the velocity of micro and macroturbulent movements. The results of solar flux analysis showed that absolute wavelength scales in the atlases used coincide with an accuracy of about 10 m/s, except for the FTS-atlas of Hinkle et al., whose scale is shifted and depends on the wavelength. In the range from 450 to 650 nm, the scale shift of this atlas varies from 100 to 330 m/s, respectively, and it equals on average of 240 m/s. The resulting average star bisectors contain information about the fields of convective velocities and may be useful for hydrodynamic modeling of stellar atmospheres in order to study the characteristic features of surface convection.

Keywords: line asymmetry, line profiles, solar-type stars, velocity field, granulation.

Стаття надійшла до редакції 16.06.2020

Після доопрацювання 23.07.2020

Прийнята до друку 23.07.2020