

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

ІВАНЮК Олексій Михайлович

УДК 524.3-36:524.314.7/.316.2/.4

**ХІМІЧНИЙ СКЛАД ТА ВЛАСТИВОСТІ F-, G-, K-ЗІР —
КАНДИДАТІВ НА НАЯВНІСТЬ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ**

01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія
10 — природничі науки, 104 — фізика та астрономія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2024

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Павленко Яків Володимирович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН
України, завідувач відділу фізики субзоряних і
планетних систем.

Офіційні опоненти: докторка фізико-математичних наук, старша наукова співробітниця
Мішеніна Тамара Василівна,
НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського
національного університету імені І.І. Мечникова
МОН України, завідувачка відділу фізики зір
та галактик;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Мелех Богдан Ярославович,
Львівський національний університет імені
Івана Франка МОН України, завідувач кафедри
астрофізики.

Захист відбудеться «26» лютого 2024 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 ГАО НАН України за адресою: 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Початок засідання об 11 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий «26» січня 2024 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидатка фізико-математичних наук

І. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Хімічний склад зірок зі спектральними класами, близькими до сонячного, є основою нашого розуміння зореутворення та зоряної еволюції. Едвардсон та ін. [36] написали класичну роботу про дослідження хімічної еволюції Галактичного диска, визначивши вмісти деяких хімічних елементів для добірки зі 189 близьких F та G карликів. Вони виявили цікаві залежності, зокрема зв'язок віку та вмісту барію, який вони пояснили ефективним синтезом s-елементів у маломасивних зорях асимптотичного відгалуження гігантів, які збагачують міжзоряне середовище ще довгий час після утворення інших зір, що й зумовлює різний вміст для зірок різного віку. Також вони підтвердили, що зорі із низькою металічністю ($[\text{Fe}/\text{H}] < 0,4 \text{ dex}$) мають відносний надлишок α -елементів. А оскільки $[\alpha/\text{Fe}]$ для цих зірок – це градієнт, який спадає зі збільшенням галактоцентричної відстані їхніх орбіт, то, ймовірно, що зореутворення почалося та було більш активним у внутрішніх частинах Галактичного диска.

З часу цієї роботи опрацьовані різні добірки, також і спільнотою дослідників позасонячних планет (наприклад, [51]). У цих статтях порівнювались розподіли вмісту елементів для зір із відкритими планетами та без них і теж були знайдені цікаві залежності. Окрім добре підтвердженого зв'язку між ймовірністю відкриття планет-гігантів та металічністю зір [39], ці роботи також показують, що зорі із відкритими планетами більш збагачені й іншими елементами (наприклад, Si та Ni), принаймні для популяції газових гігантів. Надлишки вмісту можна пояснити як необхідну умову акреційного сценарію формування планет, де чим більше речовини у диску, тим більша ймовірність формування планет [44].

Загалом, відносні вмісти різних елементів у атмосферах зір змінюються з часом завдяки процесам нуклеосинтезу в Галактиці. Ці процеси все ще мало вивчені, але виконання високоякісних досліджень однорідних зоряних вибірок допомагають виокремити ті тонкі процеси, які відбуваються під час формування планетних систем та розробити якісні моделі синтезу зоряного населення, які дають змогу моделювати розподіл хімічного складу й розподіл спектральних класів зірок у масштабах Галактики.

Упродовж останніх років опубліковані серії робіт із дослідженнями великих добірок зоряних спектрів [23, 28, 32, 40, 51], їхня поява переважно зумовлена доступністю спектроскопічних даних високої роздільної здатності зі спостережних кампаній, присвячених пошуку планет, та завдяки дедалі більшому розповсюдженню програмного забезпечення, яке дає змогу автоматизувати обробку спектрів сотень зірок.

У дисертації розглянуто застосування подібного методу, проте його особливістю є пряме зіставлення теоретичних та спостережних профілів окремих спектральних ліній, а не вимірювання їхніх еквівалентних ширин, як це реалізовано у більшості робіт, що допомагає краще виокремити вплив на профіль лінії зміни вмісту елемента від зміни умовної мікротурбулентної швидкості.

Окремо досліджено практичний вплив похибок, які зумовлені такими чинниками, як особливості спостережних спектрів у околах досліджуваних ліній, взаємозалежність змінних у ланцюжку розрахунків і вплив зовнішніх чинників, як-от списки атомних ліній.

Важливою складовою дослідження зірок є зв'язки їхніх властивостей і хімічного складу з властивостями субзоряних об'єктів і планет поруч, які висвітлено у дисертації на прикладі обговорення впливу співвідношень вмістів різних хімічних елементів у атмосфері зорі на формування різних молекул у протопланетних дисках та мінералів і порід у надрах кам'янистих планет.

Зв'язок властивостей і хімічного складу зір із властивостями субзоряних об'єктів і планет поруч також розглянуто на прикладі дослідження спектрів молодій зорі зі швидким обертанням, яка тільки виходить на головну послідовність і є головною компонентою подвійної системи з субзоряним об'єктом, і яка також імовірно належить до еволюційно спорідненої рухомої групи зір бети Живописця.

Такий же зв'язок розглянуто на прикладі дослідження спектрів тьмяної віддаленої зорі з надзвичайно рідкісним короткоперіодичним гарячим Юпітером на спадній орбіті, зміна періоду якої дає змогу визначити властивості конвективної оболонки зорі, що важливо для розробки більш достеменних моделей внутрішньої структури зір.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Робота виконана в рамках гранту «Кам'янисті планети довкола холодних зір» (Rocky Planets Around Cool Stars,

RoPACS) сьомої рамкової дослідницької програми ЄС імені Марі Кюрі (EU FP7 Marie Curie Research Programme) та науково-дослідних тем відділу фізики зір та галактик та відділу фізики субзоряних та планетних систем Головної астрономічної обсерваторії НАН України, в яких автор брав участь як виконавець: від. тема 273. № держ. реєстр. 0109U008358. «Особливості хімічного складу атмосфер зір на різних стадіях еволюції та фізика ультрахолодних карликів Галактики». 2010–2014 рр. Від. тема 348. № держ. реєстр. 0114U006632. «Спектроскопічні дослідження зір пізніх спектральних класів та ультрахолодних карликів». 2015–2019 рр. Від. тема 407. № держ. реєстр. 0118U002408. «Комплексні дослідження фізичних властивостей планетних систем та ультрахолодних карликів». 2018–2023 рр.

Мета і завдання дослідження. Метою є різнобічне дослідження зв'язків властивостей і хімічного складу зір із властивостями відкритих поруч планет, а також вдосконалення методів, які використано для визначення властивостей і хімічного складу зір. Задля її досягнення сформульовано такий перелік завдань:

Визначення властивостей й хімічного складу добірки зір із високою металічністю і близькими до сонячного спектральними класами зі спостережної програми пошуку позасонячних планет, визначення загального розподілу співвідношень вмістів хімічних елементів із металічністю, пошук відмінностей між властивостями й хімічним складом зірок із відкритими планетами та без них, дослідження вірогідності й достеменності результатів, метааналіз результатів досліджень великих зоряних добірок інших авторів й обґрунтування причин розбіжностей.

Визначення властивостей й хімічного складу молоді зорі зі швидким обертанням PZ Tel A, яка ще не вийшла на головну послідовність і яка, ймовірно, належить до рухомої групи зір β Живописця, порівняння оцінок її віку з різних еволюційних моделей, обґрунтування причин розбіжностей і визначення властивостей субзоряного об'єкта поруч. Визначення властивостей й хімічного складу тьмяної віддаленої зорі WTS-2 із відкритим поруч гарячим Юпітером WTS-2 b на спадній короткоперіодичній орбіті.

Об'єкт дослідження. Добірка зі ста семи спектрів високої роздільної здатності зір із високою металічністю із Калан-Гертфордшир-

ської програми пошуку позасонячних планет, спектри високої роздільності зорі зі швидким обертанням PZ Tel A у подвійній системі з субзоряним об'єктом, яка, ймовірно, належить до рухомого скупчення β Живописця, спектри високої й середньої роздільної здатності з низьким співвідношенням сигналу й шуму тьмяної віддаленої зорі WTS-2 із відкритим поруч газовим гігантом із надзвичайно коротким періодом обертання.

Предмет дослідження. Фундаментальні властивості зір, як-от ефективна температура, поверхневе прискорення сили тяжіння, мікротурбулентна швидкість, швидкість обертання, загальна металічність, вмісти й співвідношення різних хімічних елементів у їхніх атмосферах, загальний розподіл зір за їхнім хімічним складом у Галактиці, вірогідність і достеменність оцінок цих величин, вірогідність сучасних еволюційних моделей зір, субзоряних об'єктів і планет, зв'язки властивостей і хімічного складу зір із властивостями субзоряних об'єктів і планет поруч.

Методи дослідження. Методи обробки спостережних спектрів, метод зіставлення синтетичних і спостережних спектрів для визначення властивостей та хімічного складу зір, статистичні методи, методи роботи з даними та методи програмування.

Наукова новизна одержаних результатів. Одержано однорідні характеристики великої добірки зір, більшість з яких раніше не досліджувалися. Ці дані використано для визначення властивостей десяти відкритих у цих системах позасонячних планет.

Визначено причини відмінностей між результатами, одержаними різними методами й авторами, що дало змогу оцінити надійність встановлених раніше співвідношень вмістів різних хімічних елементів та фундаментальних властивостей зір. Зокрема йдеться про особливості розподілу вмісту літію в залежності від ефективної температури та швидкості обертання.

Отримано нові оцінки властивостей та віку системи PZ Tel, маси її холодного компаньйона та характеристик зорі WTS-2, що дало змогу визначити параметри короткоперіодичного газового гіганта поруч. Описано причини розбіжностей між різними еволюційними моделями і запропоновано способи їх вдосконалення.

Практичне значення одержаних результатів. Застосовано новітній автоматизований метод зіставлення профілів ліній синтетичних і спостережних спектрів, який дає змогу ефективно опрацьовувати великий обсяг спостережного матеріалу. Водночас розуміння похибок дає нагоду звести до мінімуму їхній вплив на результати ще на ранніх етапах роботи з великими добірками спектрів.

Загальна картина розподілу вмістів хімічних елементів із металічністю від різних авторів дає змогу оцінити надійність визначення вмісту кожного елемента, що спрощує виявлення тонких особливостей хімічної еволюції зірок, які належать до різних кінематичних груп та типів зоряного населення Галактики. Це особливо актуально з огляду на появу каталогу космічної місії *Gaia* із фотометричними характеристиками понад мільярда зір, що сприятиме появі нових великих спостережних кампаній.

Властивості зорі PZ Tel A дають змогу надійно визначити хімічний склад її холодного компаньйона, дослідити хімічну еволюцію рухомого скупчення, до якого вони можуть належати, а також уточнити моделі вигорання літію для зірок зі значними обертанням й активністю та пов'язані з цим еволюційні моделі.

Властивості зорі WTS-2 накладають обмеження на параметри орбіти та масу планети, відкритої поруч. Завдяки її надзвичайно короткому періоду обертання, ця система є чудовим об'єктом для уточнення моделей припливної взаємодії й структури конвективної оболонки зорі. Оскільки відкрита планета також є одним із найбільш гарячих газових гігантів, з-поміж нині відкритих, є змога дослідити структуру й склад її атмосфери із її транзитних спектрів.

Застосований метод і досвід його практичного використання можуть бути основою для навчання студентів, аспірантів, а також налагодженим інструментом для швидкої обробки великих добірок зоряних спектрів, що сприяє розвитку галузі зоряної астрофізики в Україні на рівні світових стандартів.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень. Використаний метод і всі обрані лінії для зіставлення зі спостережними спектрами зірок відтворюють властивості й хімічний склад добре вивчених Сонця й Арктура у їхніх спектрах. Для врахування індивідуальних особливостей зірок, спостережний інтегрований спектр Сонця змінювався відповідно до роздільної здатності, профі-

лів обертання й рівня шуму зоряних спектрів. Додатково здійснено дослідження результатів на стійкість відносно зміни вхідних параметрів, всебічне дослідження похибок і метааналіз із роботами інших наукових груп. Для оцінок віку використано різні еволюційні моделі, й у разі розбіжностей, їхні причини вичерпно описано. Для визначення властивостей зорі WTS-2 використано кілька незалежних методів, завдяки яким отримано збіжні результати. Усі результати опубліковані у міжнародних рецензованих фахових виданнях та астрономічних базах даних. Усі результати надано з інформацією, яка необхідна для їхнього відтворення.

Особистий внесок здобувача. У роботах [1–5, 7] автор адаптував спостережні спектри, уклав списки досліджуваних ліній, визначив властивості й хімічний склад зірок, дослідив результати на стійкість та описав причини відмінностей з іншими методами та роботами, налагодив методіку для дослідження спектрів зірок із високою швидкістю обертання й зашумленими й спотвореними спектрами у роботах [1, 3]. У роботі [3] автор додатково визначив ефективну температуру та вік зорі із ізохрон та вмісту літію для наближення ЛТР, у роботах [8, 9] визначив вміст літію для наближення ЛТР, а також світність, маси та вік зірок. Автор написав основний текст статті [2] й окремі розділи статей [1, 3], уклав електронний каталог [11] та доповнив [10, 12]. Проміжні результати роботи [2] використав у [6, 8, 9, 33, 48], а також у матеріалах конференцій [13–16]. У методі зіставлення спостережних і синтетичних спектрів реалізував механізм впорядкування вхідних та вихідних даних та запропонував ідеї для автоматизації визначення поверхневого прискорення сили тяжіння та мікротурбулентної швидкості.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дослідження доповідалися на наукових конференціях різного рівня, а також на астрофізичному семінарі Головної астрономічної обсерваторії НАН України:

- XVIII Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, April 25–30, 2011;
- RoPACS Workshop, Institute of Astronomy, Cambridge, United Kingdom, July 4–8, 2011;

- RoPACS Workshop, Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, April 16–20, 2012;
- Astrophysical seminar, Institute of Astronomy, Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland, June 14, 2012;
- RoPACS Workshop, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Munich, Germany, November 12–16, 2012;
- XX Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, April 22–27, 2013;
- ESO Workshop: A revolution in stellar physics with Gaia and large surveys, University Library, Warsaw, Poland, September 3–7, 2018;
- ESO Workshop: The Galactic Bulge at the crossroads, Pucón, Chile, December 9–14, 2018;
- ESO, INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri and UniGE Joint Conference: Spectral Fidelity, Florence, Italy, September 4–8, 2023.

Публікації. Результати дисертації представлені загалом у 22 роботах: основні результати опубліковані у 3 статтях у міжнародних рецензованих фахових виданнях [1–3], додаткові результати опубліковані в інших 6 статтях у міжнародних рецензованих фахових виданнях [4–9], загалом із яких 8 належить до рейтингів Web of Science та Scopus, укладено 3 електронні каталоги властивостей і хімічного складу зірок [10–12], ще 4 публікації у матеріалах міжнародних конференцій [13–16] та 6 у збірниках тез міжнародних конференцій [17–22], а також у відкритому доступі на web-сторінках конференцій ESO Workshop, які відбулися у 2018-му році, доступні копії стендової та секційної доповідей [14, 15].

Структура та обсяг дисертації. Анотація, вступ, три розділи, обговорення, висновки, бібліографія та додатки, 157 сторінок тексту, 21 рисунок, 11 таблиць, 228 посилань у бібліографії, 2 додатки зі списком публікацій автора за темою дисертації, відомостями про апробацію результатів дисертації та додатковими табличками і рисунками.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету й основні задачі, описано методи, які необхідні для розв'язання поставлених завдань, а також вказано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, відзначено особистий внесок здобувача та рівень апробації результатів.

Розділ 1. Калан-Гертфордширська програма пошуку позасонячних планет і метааналіз вірогідності й достеменності методів досліджень. Суть програми полягає у пошуку яскравих проходжень планет по дисках зір у південній півкулі неба методом високоточних вимірювань променевих швидкостей [16]. Для цього проведено спостереження добірки яскравих ($m_v=7,5-9,5$) неактивних ($\log R'_{\text{HK}} \leq -4,5$ dex) зір головної послідовності ($B - V=0,5-0,9$) з високою металічністю ($[\text{Fe}/\text{H}] \geq 0,1$ dex) на інструменті HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) 3,6-метрового телескопа обсерваторії Ла-Сілья в Чилі.

Це важливо, оскільки спостереження яскравих планет із коротким періодом обертання дають змогу порівнювати хімічний склад їхніх атмосфер, добовий розподіл температур та виявляти поляризацію світла. Ці завдання потребують створення бази даних таких планет, що особливо актуально для південної півкулі, де поки не відкрито справді яскравих проходжень та де велике число потужних інструментів, придатних для більш детальних досліджень. Дослідження зорі з такою планетою детально описані в третьому розділі.

Об'єкти для добірки вибиралися так, аби не перетинатися з іншими програмами, тому більшість із них не досліджувалися раніше. Також їхні галактоцентричні швидкості вказують на те, що вони належать до населення тонкого диска Галактики [2], як показано на Рис. 1.

Однією зі складових цієї роботи є пошук можливих відмінностей у хімічному складі між зорями із відкритими планетами та без них та налагодження методу автоматизованого визначення властивостей і хімічного складу зоряних атмосфер із їхніх спектрів [48]. Наразі для 107 зір відкрито лише 10 планет – і для них не виявлено суттєвих розбіжностей у хімічному складі із рештою зірок [6]. Тому основним завданням стало виявлення слабкостей методу, пошук найбільш значущих причин похибок, дослідження загального розподілу вмістів

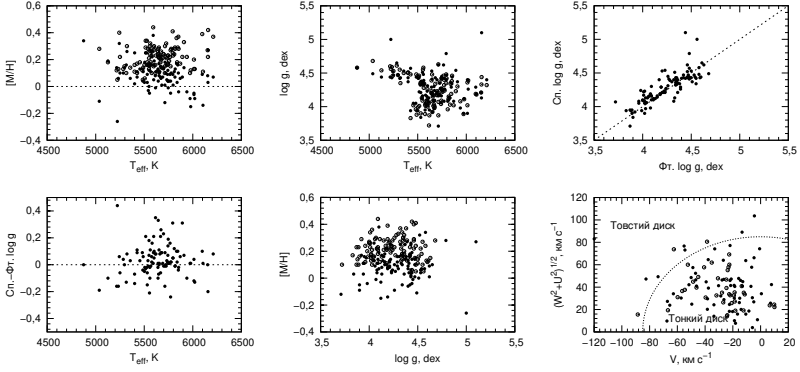


Рис. 1: Загальні властивості добірки зір. Значення поверхневого прискорення сили тяжіння, які отримані зі спектрів [2], показані заповненими кружечками; із фотометричних показників кольору [40] – порожніми. Середні похибки для значень T_{eff} , $\log g$ та $[M/H]$ – ± 50 K, $\pm 0,2$ dex та $\pm 0,1$ dex відповідно. Праворуч внизу показано діаграму Тумре для 67 зірок добірки з використанням даних про галактичні швидкості із роботи [47] (заповнені кружальця) і для залишку із 40 зірок – із [41] (порожні кружальця). Межу між тонким та товстим дисками Галактики позначено згідно з роботою [38].

хімічних елементів із металічністю, а також порівняння із добірками інших авторів.

Для оцінки хімічного складу атмосфер використано метод синтетичних спектрів. В його основі – зведення до мінімуму відмінностей між профілями ліній спостережних та теоретичних спектрів. Одна з його переваг перед класичним методом еквівалентних ширин – здатність краще виокремлювати вплив на профіль лінії мікротурбулентної швидкості від вмісту елемента. Це важливо при роботі з одновимірними моделями атмосфер, де необхідно вводити цей параметр. Програмне забезпечення складається із кількох модулів: SAM12 для розрахунку моделей зоряних атмосфер, WITA6 для створення синтетичних спектрів та ABEL8 для зіставлення зі спостережними спектрами.

Для укладання списків ліній хімічних елементів використано сонячний спектр. Обрано переважно незатінені лінії, які добре описують сонячний вміст, з $\lambda > 5000 \text{ \AA}$ та $F_\lambda/F_c = 0,2-0,7$ для обмеження впливу невизначеності рівня континууму в синій частині спектра, а також шуму та НЛТР-ефектів в ядрах сильних ліній. Значення потенціалів збудження нижнього рівня, сил осциляторів та констант затухання взято із віденської бази даних атомних ліній (Vienna Atomic Line Database, VALD) [43]. Діапазони довжин хвиль для кожної лінії, в яких здійснювалося зіставлення зі спостережними спектрами, доступні в роботі [2] та електронному каталозі [11].

Для початкових розрахунків моделей атмосфер використано фотометричні значення ефективних температур (T_{eff}), поверхневого прискорення сили тяжіння ($\log g$) та металічності ($[M/H]$) [40]. Оцінка хімічного складу потребує кількох ітерацій розрахунків. Після визначення вмісту Fe I, здійснюється оцінка параметра мікротурбулентної швидкості (v_m), для якої справжніми є ті значення, для яких лінії Fe I різної інтенсивності показують однаковий вміст. Її діапазон лежить в межах $0,0-2,6 \text{ км с}^{-1}$ із кроком $0,2 \text{ км с}^{-1}$. Для знайденого значення v_m визначається вміст Fe II, і, відповідно до умови іонізаційної рівноваги, якщо він не збігається із вмістом Fe I, – змінюється значення $\log g$ на ту ж величину та відбувається перерахунок. Достатньо 3–5 циклів перерахунків, щоб отримати узгоджені результати.

Обертання зорі ($v \sin i$) визначається через згортку профілів ліній нейтрального феруму з профілем Фойгта для діапазону $0-10 \text{ км с}^{-1}$ із кроком 1 км с^{-1} . Згодом для фіксованих v_m та $\log g$ визначаються вмісти решти елементів, але $v \sin i$ залишається змінним параметром і надалі, для кращого опису профілів ліній. Інструментальне розширення профілів ліній відповідає ефективній роздільній здатності $R \sim 70\,000$, що узгоджується із сонячним значенням поля макротурбулентних швидкостей 2 км с^{-1} .

Усі параметри, які визначаються зі спектра, спираються на його якість в околі вибраних для дослідження ліній. Окрім того, ці параметри тісно пов'язані між собою в ланцюжку розрахунків, тож використано один фіксований незалежний параметр – фотометричну ефективну температуру.

У порівнянні зі старою версією методу, який застосовувався на ранніх етапах роботи з цією добіркою спектрів, вдалося скоротити

час повного аналізу із двох тижнів до десяти годин. Для розрахунків використано академічну GRID-мережу.

Результати з усіх добірок зведені до абсолютних величин та показані у сонячній шкалі вмістів із роботи [24]. Це дало змогу оцінити загальну точність визначення вмістів різних елементів із розкиду між різними добірками [23, 27, 28, 30, 32, 36, 37, 51]. Оскільки в абсолютних величинах розкид значний, оцінюються лише відносні залежності вмісту й металічності.

У всіх добірках показано надлишок та поступове спадання вмісту α -елементів для металодефіцитних зір в діапазоні від $-0,4$ до $-0,2$ dex, дивіться Рис. 2. Така поведінка змінюється для високих металічностей від $0,0$ до $0,4$ dex, але чітке зростання з-поміж α -елементів показує тільки Na, а також Mn, Ni, Cu та Zn. Непевне зростання видно для Al. Вміст Ca продовжує спадати і для високих металічностей, а вміст решти елементів не змінюється – Mg, Si, Ti та Cr. Пов'язані з цими результатами особливості синтезу різних елементів у різні епохи хімічної еволюції Галактики обговорюються у тексті дисертації.

Вміст Li виявився дуже різноманітним для зір досліджуваної вибірки – від $0,0$ до $3,0$ dex. Це дало змогу виокремити залежності його вмісту з T_{eff} , $v \sin i$ та $\log g$ у роботі [8].

Для Калан-Гертфордширської добірки отримано нормальний розподіл швидкостей обертання із максимумом 3 км с^{-1} . Зорі з невеликими значеннями $\log g$ із вищою імовірністю мають вищу швидкість обертання, що добре узгоджується з теорією та може вказувати на їхній вік. Нормальний розподіл із максимумом $1,2 \text{ км с}^{-1}$ отримано і для мікротурбулентних швидкостей. Він виявився вужчим у порівнянні з добірками інших авторів, незалежно від числа зірок у них.

Дослідження результатів на стійкість та спільних із іншими добірками зір не показує значних відхилень вмісту від зміни T_{eff} в межах $\pm 100 \text{ K}$, проте можна простежити незначну спадну залежність вмісту від температури для більшості елементів. Залежності вмісту з $\log g$ не виявлено. Незначні зміни мікротурбулентної швидкості ($\pm 0,2 \text{ км с}^{-1}$) та обертання ($\pm 1 \text{ км с}^{-1}$) теж суттєво не спотворюють результат. До того ж такі похибки індивідуальні для різних зір добірки. Найбільший вплив на оцінку вмістів зумовлює зміна списків атомних ліній. Ті самі лінії у спектрі, при переході з VALD-2 до VALD-3, показують

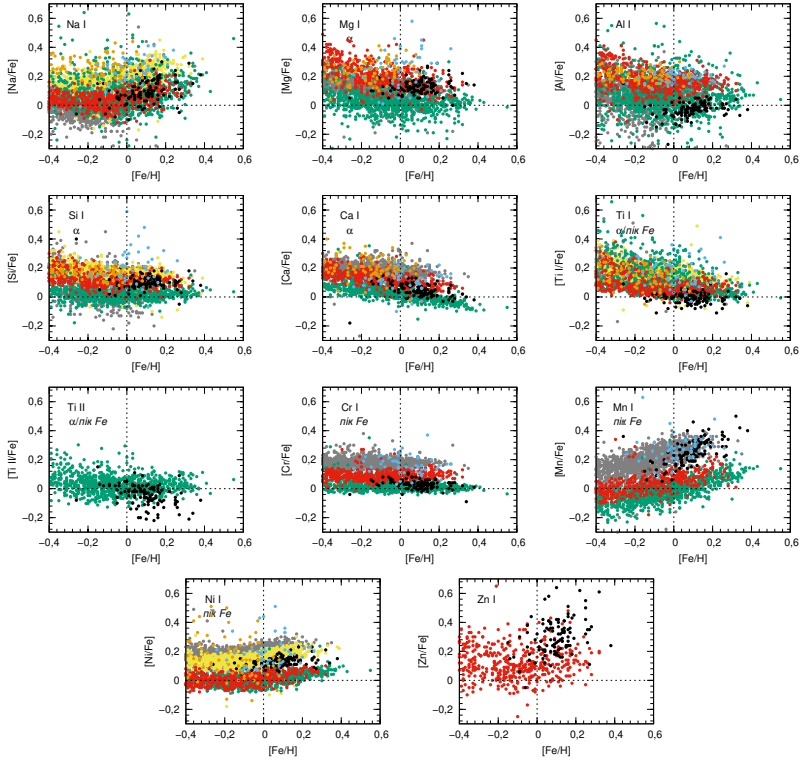


Рис. 2: Порівняння надлишку вмістів елементів відносно феруму із загальною металічністю у добірках: [36], яка позначена помаранчевими, [37] – блакитними, [51] – жовтими, [23] – зеленими, [28] ([27] для розподілу Mn) – червоними, [32] – сірими, та для цієї роботи – чорними кружальцями. Опорні шкали сонячних вмістів кожної роботи перетворено в абсолютні величини та показано у шкалі з роботи [24].

систематично вищий на 0,1 dex вміст для Si I, Ti II та Fe II та менший на 0,1 dex – для Cr. Через невелике число ліній більшості хімічних елементів суттєвий вплив на остаточний результат має якість рівня континууму в околі ліній у спектрі, які використано для дослідження.

Щоб вичерпно пояснити тонші відмінності між різними добірками, проаналізовано 10 спільних зір із роботою [28] та інтегрований спектр Сонця з використанням ліній у спектрі, сил осциляторів, потенціалів збудження нижнього рівня та температур із роботи [28] для відтворення їхніх результатів. Проте розбіжності виявилися більшими, аніж з використанням власних даних. При спробі відтворити еквівалентні ширини із роботи [28] для їхньої добірки ліній у сонячному спектрі, виявлено, що одна з причин розбіжностей полягає у коригувальному факторі коефіцієнтів розширення ван дер Ваальса. А повністю відтворити вміст вдалося тільки для ліній із однаковим рівнем континууму.

На прикладі роботи із добіркою зоряних спектрів із Калан-Гертфордширської програми пошуку позасонячних планет, одержано налагоджену процедуру для швидкого і надійного дослідження великих обсягів зоряних спектрів і, на прикладі метааналізу добірок інших авторів і спільних із ними зір, отримано уявлення про вірогідність і достеменність результатів, яких можна досягнути за умови прискіплого добору ліній у спостережних спектрах та параметрів атомних переходів для них. Окремим результатом є хімічний склад і властивості 107 зір, які раніше не досліджувалися [2]. Ці результати використано для визначення властивостей 10 планет [6], відкритих поруч.

Розділ 2. Молода зоря зі швидким обертанням PZ Tel A у подвійній системі із субзоряним об'єктом. Із відкриттям нових яскравих короткоперіодичних планет та з появою телескопів, здатних виокремити спектри їхніх атмосфер, спектри коричневих карликів у подвійних системах, або спектри холодних зір, які часто стають об'єктами пошуку кам'янистих планет, зростає потреба у дослідженні спектрів холодних об'єктів. Для подвійних систем, першим кроком є визначення характеристик материнської зорі, щоб мати задану інформацію, як-от металічність, для дослідження спектра її холодного супутника.

Однією із таких зоряних систем є PZ Телескопа. Завдяки тому, що це подвійна система із субзоряним об'єктом та зорею, яка тільки виходить на головну послідовність, її можна використати для уточнення параметрів сучасних еволюційних моделей, позаяк для зір, які вже вийшли на головну послідовність, визначити вік набагато складніше,

бо впродовж цього періоду еволюції їхні спостережні властивості майже не змінюються. З-поміж різних способів оцінки віку, як-от через рівень хромосферної активності чи з ізохрон, це також можна зробити з моделей вигорання Li. Для PZ Tel A, вік та металічність також дають змогу перевірити, чи належить вона до рухомої групи зір бети Живописця (β Pictoris Moving Group, BPMG).

Особливістю системи є рання оцінка маси холодного компаньйона, яка становить $36 M_J$ (мас Юпітера) [29], що розмиває його статус між масивним газовим гігантом та коричневим карликом, позаяк цей статус визначається масою в межах $25\text{--}45 M_J$. Це також робить його цікавим об'єктом для дослідження сценаріїв формування планет за акреційним сценарієм. Іншою особливістю PZ Tel є диск із матеріалу, що залишився після її формування, з масою $0,3 M_\oplus$ (маси Місяця) [49], який розташований між 35 та 165 а.о., водночас холодний компаньйон перебуває на відстані 16 а.о. від зорі. Зірка з масою PZ Tel A може мати матеріалу для формування планет масою $\sim 240 M_\oplus$ (мас Землі), чого цілком достатньо для утворення PZ Tel B, що також може свідчити про його планетарне походження.

Спектр PZ Tel A із роздільною здатністю $R \sim 48\,000$ отримано на інструменті FEROS (Fibre-fed Extended Range Optical Spectrograph) 2,2-метрового телескопа MPG/ESO обсерваторії Ла-Сілья, Чилі. Оскільки це зоря зі значною $v \sin i$, для добору придатних для дослідження ліній у спектрі використано сонячний спектр, згорнутий із профілем обертання для швидкості 70 км с^{-1} . Перевірено, чи відтворюють обрані лінії сонячний вміст та чи не впливають лінії інших елементів на якість зіставлення спектрів поблизу крил обраних ліній. Після чого ці лінії використано для дослідження спектра PZ Tel A.

Із такою $v \sin i$ найбільшою проблемою є зіставний вплив на профіль лінії пов'язаних у ланцюжку розрахунків параметрів v_m , $v \sin i$ та $\log N(\text{Fe})$, що зумовлює появу хибної множини розв'язків, або великого числа комбінацій, які однаково добре описують спостережний спектр. Водночас виявлено обмежену чутливість до змін T_{eff} та $\log g$, тому ефективну температуру зафіксовано на 5338 K відповідно до її показників кольору, як-от $B - V = 0,78$, та $\log g$ на 4,5 dex. У зорях зі спектральними класами, близькими до PZ Tel A, розкид v_m перебуває в межах $1,0\text{--}1,5 \text{ км с}^{-1}$. Оскільки обертання пригнічує конвективні рухи, для v_m обрано нижню межу $1,0 \text{ км с}^{-1}$.

Для вказаних параметрів та для швидкостей обертання від 60 до 80 км с^{-1} вміст Fe I змінюється від $-4,41$ до $-4,31 \text{ dex}$, що умовно збігається із сонячним вмістом. Навіть із врахуванням неточностей інших змінних у досить широких межах, похибка оцінки вмісту не має перевищувати $\pm 0,2 \text{ dex}$: $\pm 0,1 \text{ dex}$ зумовлює зміна v_m від $0,5$ до $2,0 \text{ км с}^{-1}$ і $\pm 0,15 \text{ dex}$ зміна T_{eff} від 4938 до 5538 K . Також, із врахуванням похибки рівня континууму, нижня межа вмісту Li для швидкості обертання 70 км с^{-1} становить $3,1 \text{ dex}$ у шкалі з $\log N(\text{H})=12$.

Характеристики, отримані з різних еволюційних моделей, добре узгоджуються між собою і вказують на вік ~ 22 млн років, масу $\sim 1,1 M_{\odot}$ (маси Сонця) та радіус $\sim 1,2 R_{\odot}$ для вибраної ефективної температури та поверхневого прискорення сили тяжіння. Вік із індексів хромосферної активності ($\log R'_{\text{HK}} = -4,16$ та $-4,07 \text{ dex}$) для двох спостережних епох, у 2007 та 2010 роках, становить 17 та 40 млн років, відповідно, та для середнього значення $\log R'_{\text{HK}} = -4,12 \text{ dex}$ – 26 млн років. Натомість вік із моделей вигорання Li для зорі з масою $1,15 M_{\odot}$, виявився значно нижчим – лише 7 млн років, позаяк більшість таких моделей не враховують високу швидкість обертання, що значно посилює магнітні поля, які зумовлюють уповільнення конвективних рухів та диференційного обертання, що може уповільнити темп вигорання Li [3]. У нових моделях [34] вводять два параметри для врахування обертання й активності: частку поверхні зорі, вкритої плямами, та зміну ефективної довжини перемішування (ефективність конвективного переносу енергії). Модель із меншим параметром довжини перемішування показує суттєво нижчий темп вигорання Li, а отже і вищий очікуваний вік зорі.

Таким чином, вік PZ Tel A із еволюційних моделей становить 24 ± 3 млн років, що значно вище за вік зірок рухомої групи β Живописця, який становить 12^{+8}_{-4} млн років [3], що може свідчити або про те, що PZ Tel A не належить до неї, або про недооцінений вік скупчення з огляду на величину похибки. В іншій роботі описано відкриття трьох М-карликів, які належать до BPMG, і, за оцінкою авторів, їхній вік в околі 22 ± 10 млн років [26]. Також для двох зір скупчення визначено діаметри за допомогою методів інтерферометрії, автори виявили, що еволюційні моделі переоцінюють маси та вік внаслідок ефектів гравітаційного потемніння [50] (як наслідок значної швидкості обертання), що також може бути причиною розбіжностей.

Оцінки металічності PZ Tel A також різняться між різними роботами від $-0,5$ до $+0,16$ dex. Деякі результати отримані фотометричними методами, що вказує на складність визначення металічності з показників кольору, зокрема для молодих змінних зір. Також пояснити відмінності можна вибором ліній у спектрі, оскільки більшість із відкинутих ліній Fe у спектрі Сонця з обертанням показують занижений вміст. Металічність може бути ще одним індикатором спорідненості зірок у скупченні, проте однорідні спектроскопічні оцінки для зірок BPMG наразі відсутні.

Для одержаних оцінок віку PZ Tel A вкупі з показниками кольору $J - H$ для PZ Tel B та еволюційних моделей субзоряних об'єктів, оцінка маси холодного компаньйона становить $62 \pm 9 M_{\text{J}}$, що значно вище верхньої межі мас для газових гігантів, тобто більш імовірно, що PZ Tel B є коричневим карликом. Водночас схожі показники кольору для коричневих карликів та для об'єктів із планетарними масами вказують на те, що їхній розвиток мусить бути подібним [3].

У рамках дослідження зорі PZ Tel A, налагоджено методику роботи зі спектрами зір із високою швидкістю обертання, визначено фундаментальні властивості зорі з використанням умови іонізаційної рівноваги, її металічність, вміст Li із використанням згорнутого із профілем обертанням інтегрованим спектром Сонця; на прикладі роботи зі спектрами показано вплив похибок, описаних у першому розділі; отримано незалежні оцінки віку та маси з еволюційних моделей, які добре узгоджуються, за винятком моделей вигорання Li, проте ці розбіжності добре обґрунтовані.

Розділ 3. Тьмяна віддалена зоря WTS-2 із короткоперіодичним гарячим Юпітером на спадній орбіті. Ця зоря є схожою на об'єкти, пошук яких здійснювався у Калан-Гертфордширській програмі пошуку планет, описаній у першому розділі, але її особливістю є надзвичайно короткий період обертання (1,02 дні) відкритого поруч ($a=0,01855$ а.о.) гарячого Юпітера ($T_{\text{P}}=2000$ К, $M_{\text{P}}=1,12 M_{\text{J}}$, $R_{\text{P}}=1,36 R_{\text{J}}$), що є однією з фундаментальних властивостей планетних систем, яка може вказувати на процеси їхнього формування, механізми міграції та розвиток.

Більшість із близьких до своїх зір гарячих Юпітерів мають період обертання 3–4 дні. Натомість газових гігантів із періодом менше двох діб на час написання роботи відкрито лише чотири [1]. Найбільш

імовірним поясненням є швидке руйнування планети припливними силами, щойно вона опиняється достатньо близько до своєї зірки. Власне, нетривале перебування на цьому перехідному етапі еволюції і робить їх рідкісними об'єктами для спостережень, цінними для уточнення впливу припливних сил на еволюцію орбіт газових гігантів для зір із різною внутрішньою структурою. Наприклад, через визначення фактора припливної взаємодії Q'_* зі зміни часу проходження планети по диску зорі, можна з'ясувати, наскільки ефективно конвективна оболонка зорі здатна розсіювати припливні збурення, та час життя планети [46].

Також одним із наслідків невеликої відстані між зорею та планетою є значна частка енергії, яку поглинає її атмосфера. Цієї енергії достатньо для того, щоб частинки у атмосфері планети перебували у стані газу і, поглинаючи випромінювання зорі, формували стратосферу, бо за більш прохолодних умов, ці частинки перетворилися б на конденсат [35]. Також у разі високої активності зорі, інверсійний шар не міг би формуватися через вплив жорсткого ультрафіолетового випромінювання [42]. Поєднання незначної маси зорі та високої яскравості планети сприяє більш глибокому спаданню потоку на кривій блиску під час затемнення планети зорею у порівнянні з іншими подібними системами, що дасть змогу краще дослідити температурну структуру атмосфери планети.

Це друга планета, відкрита в рамках фотометричного огляду WTS (Wide-Field Camera Transit Survey), із використанням 3,8-метрового телескопа UKIRT (United Kingdom Infrared Telescope) обсерваторії Мавна-Кея, Гаваї [1]. Для пошуку планет обрано інфрачервоний діапазон, позаяк він менш чутливий до зоряних плям, що дає змогу отримати більш чіткі криві блиску, зокрема і для холодних М-карликів. У системі WTS-2 також присутній М-карлик на відстані ~ 600 а.о., проте його внесок у загальний потік у видимому діапазоні менше десяти відсотків, тому він не спотворює дослідження спостережних спектрів зорі в оптичному діапазоні.

Для незалежних оцінок параметрів WTS-2, окрім багатохвильової широкосмугової фотометрії на різних інструментах, також отримано кілька спектрів різної роздільної здатності, зокрема на інструментах TWIN (Cassegrain Twin Spectrograph) 3,5-метрового телескопа обсерваторії Калар-Альто у південній Іспанії ($R \sim 8000$, $\lambda 6200\text{--}6950 \text{ \AA}$),

SNR $\sim$ 25) для визначення властивостей та хімічного складу та на HRS/HET (High Resolution Spectrograph, Hobby-Eberly Telescope) 9,2-метрового телескопа обсерваторії МакДональд у Техасі (R $\sim$ 60 000, λ 4400–6280 Å, SNR $\sim$ 15) для визначення параметрів орбіти WTS-2 b із коливань променевих швидкостей.

Оскільки WTS-2 є дуже тьмяною зорею ($m_v=15,9$ mag), під час виокремлення спектра неба зі спостережного спектру HET, спотворено пропорції профілів ліній у спектрі, що зробило їх непридатними для дослідження хімічного складу. Але оскільки співвідношення глибини між слабкими та сильними лініями збереглося (лінії різних інтенсивностей показували однаковий, але занижений вміст), це дало змогу використати його для уточнення T_{eff} та $\log g$, зі значеннями 5000 K та 4,5 dex відповідно, із умови іонізаційної рівноваги. Такі ж оцінки отримано незалежно з фотометричних показників кольору у різних смугах пропускання й із розподілу випромінювання у спектрі.

Зміна ефективної температури в межах ± 100 K зумовлює зміну поверхневого гравітаційного прискорення на 0,25 dex, проте майже не впливає на оцінку металічності, визначеної із двох спектрів TWIN. Металічність збігається зі сонячним значенням $\log N(\text{Fe})=-4,4$ dex в межах $\pm 0,2$ dex. Отримані температура та металічність також добре узгоджуються із результатами синтетичної фотометрії [1]. Мікротурбулентна швидкість зафіксована на $0,75 \text{ км с}^{-1}$ із врахуванням можливої похибки $\pm 0,50 \text{ км с}^{-1}$. Оцінка швидкості обертання становить $2,2 \text{ км с}^{-1}$ із точністю $\pm 1,0 \text{ км с}^{-1}$. Через низьке відношення сигналу до шуму та невелику роздільну здатність, отримано тільки верхню межу вмісту Li – 1,8 dex.

Зі співвідношення ефективної температури WTS-2 та її густини, визначеної із кривої блиску під час проходження планети, зроблено оцінку нижньої межі її віку >600 млн років та маси $0,82 M_{\odot}$ згідно з еволюційними моделями, описаними в роботі [31]. Верхня межа періоду обертання WTS-2 також вказує на вік ≥ 600 млн років згідно з рівняннями з роботи [45], як і вміст Li. Водночас відсутність емісії в лінії H_{α} вказує на те, що це має бути молода зоря.

Фізичні й орбітальні параметри планети визначені з кривих блиску, отриманих на різних інструментах, й коливань променевих швидкостей зі спектра HET. Згідно з нинішніми оцінками фактора припливної взаємодії Q'_* , час життя WTS-2 b становитиме ~ 40 млн років

із очікуваною зміною часу проходження планети по диску зорі – 17 секунд за 15 років [1]. Уточнений зі спостережень час проходження планети дасть змогу накласти обмеження на величину фактора Q'_* , який залежить від в'язкості конвективної оболонки зорі [25].

Попри високий рівень шуму та спотворення профілів ліній поглинання у спектрах тьмяної віддаленої зорі WTS-2, їй вдалося використати для визначення її фундаментальних властивостей і хімічного складу, які добре узгоджуються з результатами, отриманими незалежно, що свідчить про високу вірогідність і достеменність методів роботи зі спектрами. Одержані результати дали змогу визначити параметри відкритої поруч планети та особливості її припливної взаємодії із конвективною оболонкою материнської зорі.

ВИСНОВКИ

1. Визначено властивості й хімічний склад добірки зі 107 зірок із Калан-Гертфордширської програми пошуку позасонячних планет. Що є новим результатом, оскільки переважна більшість цих зір раніше не досліджувалася. Поруч із цими зорями нині відкрито десять планет, для визначення властивостей яких використано результати дослідження цих зір. Але наразі не знайдено відмінностей властивостей і хімічного складу зір із відкритими поруч планетами та без них.
2. Проведено метааналіз вірогідності й достеменності сучасних методів визначення властивостей і хімічного складу зір із їхніх спостережних спектрів. Показано систематичні розбіжності між роботами різних наукових груп і описано найбільш імовірні причини цих розбіжностей на прикладі дослідження спільних зір.
3. Показано практичний вплив похибок на стійкість результатів дослідження великих добірок зірок, які зумовлені такими чинниками, як особливості спостережних спектрів у околах досліджуваних ліній, взаємозалежність змінних у ланцюжку розрахунків і вплив зовнішніх чинників, як-от списки атомних ліній. Надано практичні рекомендації для обмеження їхнього впливу на результати. Рекомендації стосуються однорідності спостережних спектрів в околах досліджуваних ліній для змен-

шення розкиду результатів між зорями добірки, рівномірного розподілу ліній феруму за потенціалами збудження нижнього рівня для стійкості дотримання умови іонізаційної рівноваги і калібрування методу відносно спектра Сонця.

4. Визначено властивості й металічність молодій зорі зі швидким обертанням PZ Telescopii A, яка тільки виходить на головну послідовність і перебуває у подвійній системі із субзоряним об'єктом і яка, ймовірно, належить до еволюційно спорідненої рухомої групи зір бети Живописця. Отримано дані щодо її віку із еволюційних ізохрон та моделей вигорання літію. Результати дослідження спектрів цієї зорі використано для оцінки маси субзоряного об'єкта поруч і опису нових еволюційних моделей вигорання літію, які враховують активність зорі і її швидкість обертання. На прикладі дослідження спектрів цієї зорі показано чутливість результатів до похибок, описаних у першому розділі.
5. Визначено властивості, металічність і вміст літію тьмяної віддаленої зорі WTS-2 із відкритим поруч короткоперіодичним гарячим Юпітером на спадній орбіті. Ці результати стали підґрунтям для визначення параметрів конвективної оболонки зорі та її впливу на зміну періоду обертання планети поруч та її маси. Описано особливості роботи з її зашумленими й спотвореними спектрами високої й середньої роздільних здатностей.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Міжнародні рецензовані фахові видання

- [1] Birkby, J. L., Cappetta, M., Cruz, P., Koppenhoefer, J., **Ivanyuk, O.**, Mustill, A. J., Hodgkin, S. T., Pinfield, D. J., Sipőcz, B., Kovács, G., Saglia, R., Pavlenko, Y., Barrado, D., Bayo, A., Campbell, D., Catalan, S., Fossati, L., Gálvez-Ortiz, M.-C., Kenworthy, M., Lillo-Box, J., Martín, E. L., Mislis, D., de Mooij, E. J. W., Nefs, S. V., Snellen, I. A. G., Stoev, H., Zendejas, J., del Burgo, C., Barnes, J., Goulding, N., Haswell, C. A., Kuznetsov, M., Lodieu, N., Murgas,

- F., Palle, E., Solano, E., Steele, P., Tata, R. WTS-2 b: a hot Jupiter orbiting near its tidal destruction radius around a K dwarf. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **440**, 1470–1489. (2014).
- [2] **Ivanyuk, O. M.**, Jenkins, J. S., Pavlenko, Y. V., Jones, H. R. A., Pinfield, D. J. The metal-rich abundance pattern – spectroscopic properties and abundances for 107 main-sequence stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468**, 4151–4169. (2017).
- [3] Jenkins, J. S., Pavlenko, Y. V., **Ivanyuk, O.**, Gallardo, J., Jones, M. I., Day-Jones, A. C., Jones, H. R. A., Ruiz, M. T., Pinfield, D. J., Yakovina, L. Benchmark cool companions: ages and abundances for the PZ Telescopii system. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420**, 3587–3598. (2012).
- [4] Jenkins, J. S., Jones, H. R. A., Tuomi, M., Murgas, F., Hoyer, S., Jones, M. I., Barnes, J. R., Pavlenko, Y. V., **Ivanyuk, O.**, Rojo, P., Jordán, A., Day-Jones, A. C., Ruiz, M. T., Pinfield, D. J. A hot Uranus orbiting the super metal-rich star HD 77338 and the metallicity-mass connection. *Astrophys. J.* **766**, 67. (2013).
- [5] Jenkins, J. S., Tuomi, M., Brasser, R., **Ivanyuk, O.**, Murgas, F. Two super-Earths orbiting the solar analog HD 41248 on the edge of a 7:5 mean motion resonance. *Astrophys. J.* **771**, 41. (2013).
- [6] Jenkins, J. S., Jones, H. R. A., Tuomi, M., Díaz, M., Cordero, J. P., Aguayo, A., Pantoja, B., Arriagada, P., Mahu, R., Brahm, R., Rojo, P., Soto, M. G., **Ivanyuk, O.**, Becerra Yoma, N., Day-Jones, A. C., Ruiz, M. T., Pavlenko, Y. V., Barnes, J. R., Murgas, F., Pinfield, D. J., Jones, M. I., López-Morales, M., Shectman, S., Butler, R. P., Minniti, D. New planetary systems from the Calan-Hertfordshire Extrasolar Planet Search. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **466**, 443–473. (2017).
- [7] Monier, R., Khalack, V., **Ivanyuk, O.** The Abundance of Phosphorus in the HgMn Star 14 Sge. *Research Notes of the American Astronomical Society.* **5** (3), 54. (2021). DOI: 10.3847/2515-5172/abf04f.
- [8] Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., **Ivanyuk, O. M.**, Jones, H. R. A., Kaminsky, B. M., Lyubchik, Y. P., Yakovina, L. A. A detailed study of Lithium in 107 CHEPS dwarf stars. *Astron. and Astrophys.* **611**, A27. (2018).

- [9] Pavlenko, Y. V., Kaminsky, B. M., Jenkins, J. S., **Ivanyuk, O. M.**, Jones, H. R. A., Lyubchik, Y. P. Masses, oxygen, and carbon abundances in CHEPS dwarf stars. *Astron. and Astrophys.* **621**, A112. (2019).

Електронні каталоги

- [10] Birkby, J. L., Cappetta, M., Cruz, P., Koppenhoefer, J., **Ivanyuk, O.**, Mustill, A. J., Hodgkin, S. T., Pinfield, D. J., Sipocz, B., Kovacs, G., Saglia, R., Pavlenko, Y., Barrado, D., Bayo, A., Campbell, D., Catalan, S., Fossati, L., Galvez-Ortiz, M. -C., Kenworthy, M., Lillo-Box, J., Martin, E. L., Mislis, D., de Mooij, E. J. W., Nefs, S. V., Snellen, I. A. G., Stoev, H., Zendejas, J., Del Burgo, C., Barnes, J., Goulding, N., Haswell, C. A., Kuznetsov, M., Lodieu, N., Murgas, F., Palte, E., Solano, E., Steele, P., Tata, R. *VizieR Online Data Catalog: Ji light curves of WTS-2.* (2015).
- [11] **Ivanyuk, O. M.**, Jenkins, J. S., Pavlenko, Y. V., Jones, H. R. A., Pinfield, D. J. *VizieR Online Data Catalog: Spectroscopic properties for 107 stars.* (2017).
- [12] Pavlenko, Y. V., Kaminsky, B. M., Jenkins, J. S., **Ivanyuk, O. M.**, Jones, H. R. A., Lyubchik, Y. P. *VizieR Online Data Catalog: Carbon and oxygen in 107 dwarf stars.* (2018). DOI: 10.26093/cds/vizie.36210112.

Матеріали конференцій

- [13] Birkby, J. L., Cappetta, M., Cruz, P., Koppenhoefer, J., **Ivanyuk, O.**, Mustill, A., Hodgkin, S. T., Pinfield, D. J., Sipocz, B., Kovács, G., Saglia, R., Pavlenko, Y., RoPACS Collaboration. *WTS-2 b: too close for comfort?* *Europ. Phys. J. Web of Conf.* **47**. (2013), 01004.
- [14] **Ivanyuk, O.**, Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., Jones, H. R. A. *Accuracies of abundance determinations in large spectroscopic surveys. A revolution in stellar physics with Gaia and large surveys.* (2018), 50. URL: <https://indico.camk.edu.pl/event/9/session/13/contribution/50>.
- [15] **Ivanyuk, O.**, Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., Jones, H. R. A. *Accuracies of abundance determinations in large spectroscopic surveys. The*

Galactic Bulge at the Crossroads. (2018), 18. DOI: 10.5281/zenodo.2595342.

- [16] Jenkins, J. S., Jones, H. R. A., Rojo, P., Tuomi, M., Jones, M. I., Murgas, F., Barnes, J. R., Pavlenko, Y., **Ivanyuk, O.**, Jordán, A., Day-Jones, A. C., Ruiz, M.-T., Pinfield, D. J. Status of the Calan-Hertfordshire Extrasolar Planet Search. European Physical Journal Web of Conferences. 47. (2013), 05001.

Тези конференцій

- [17] **Ivanyuk, O. M.**, Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., Jones, H. R. A. Neutral iron abundance in the fast rotating star PZ Telescopii A. XVIII Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, April 25–30. (2011).
- [18] **Ivanyuk, O. M.**, Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., Jones, H. R. A. Neutral iron abundance in the fast rotating star PZ Telescopii A. RoPACS Workshop, Institute of Astronomy, Cambridge, United Kingdom, July 4–8. (2011).
- [19] **Ivanyuk, O. M.**, Pavlenko, Y. V., Birkby, J. L. WTS-2 b: spectroscopic properties of a K-type host. RoPACS Workshop, Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, April 16–20. (2012).
- [20] **Ivanyuk, O. M.**, Pavlenko, Y. V., Birkby, J. L. WTS-2 b: spectroscopic properties of a K-type host. Astrophysical seminar, Institute of Astronomy, Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland, June 14. (2012).
- [21] **Ivanyuk, O. M.**, Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., Jones, H. R. A. Spectroscopic abundance analysis of the 100 stars from the CHEPS sample. RoPACS Workshop, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Munich, Germany, November 12–16. (2012).
- [22] **Ivanyuk, O. M.**, Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., Jones, H. R. A. Spectroscopic abundance analysis of the 100 stars from the CHEPS sample. XX Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, April 22–27. (2013).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [23] Adibekyan, V. Z., Sousa, S. G., Santos, N. C., Delgado Mena, E., González Hernández, J. I., et al. Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS GTO planet search program. Galactic stellar populations and planets. *Astron. and Astrophys.* **545**, A32. (2012).
- [24] Anders, E., Grevesse, N. Abundances of the elements – meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **53**, 197–214. (1989).
- [25] Barker, A. J., Ogilvie, G. I. On internal wave breaking and tidal dissipation near the centre of a solar-type star. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **404**, 1849–1868. (2010).
- [26] Barrado y Navascués, D., Stauffer, J. R., Song, I., Caillault, J.-P. The age of β Pictoris. *Astroph. J. Lett.* **520**, L123–L126. (1999).
- [27] Battistini, C., Bensby, T. The origin and evolution of the odd-Z iron-peak elements Sc, V, Mn, and Co in the Milky Way stellar disk. *Astron. and Astrophys.* **577**, A9. (2015).
- [28] Bensby, T., Feltzing, S., Oey, M. S. Exploring the Milky Way stellar disk. A detailed elemental abundance study of 714 F and G dwarf stars in the solar neighbourhood. *Astron. and Astrophys.* **562**, A71. (2014).
- [29] Biller, B. A., Liu, M. C., Wahhaj, Z., Nielsen, E. L., Close, L. M., et al. The Gemini NICI planet-finding campaign: discovery of a close substellar companion to the young debris disk star PZ Tel. *Astroph. J. Lett.* **720**, L82–L87. (2010).
- [30] Bond, J. C., Tinney, C. G., Butler, R. P., Jones, H. R. A., Marcy, G. W., et al. The abundance distribution of stars with planets. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **370**, 163–173. (2006).
- [31] Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., Dal Cero, C., et al. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PADova and TRIeste Stellar Evolution Code. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427**, 127–145. (2012).
- [32] Brewer, J. M., Fischer, D. A., Valenti, J. A., Piskunov, N. Spectral properties of cool stars: extended abundance analysis of 1617 planet-search stars. *Astrophys. J. Suppl.* **225**, 32. (2016).
- [33] Cappelletta, M., Saglia, R. P., Birkby, J. L., Koppenhoefer, J., Pinfield, D. J., et al. The first planet detected in the WTS: an inflated hot

- Jupiter in a 3.35 d orbit around a late F star. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427**, 1877–1890. (2012).
- [34] Chabrier, G., Gallardo, J., Baraffe, I. Evolution of low-mass star and brown dwarf eclipsing binaries. *Astron. and Astroph.* **472**, L17–L20. (2007).
 - [35] Charbonneau, D., Knutson, H. A., Barman, T., Allen, L. E., Mayor, M., et al. The broadband infrared emission spectrum of the exoplanet HD 189733b. *Astroph. J.* **686**, 1341–1348. (2008).
 - [36] Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D. L., Nissen, P. E., Tomkin, J. The chemical evolution of the Galactic disk. I. Analysis and results. *Astron. and Astrophys.* **275**, 101. (1993).
 - [37] Feltzing, S., Gustafsson, B. Abundances in metal-rich stars. Detailed abundance analysis of 47 G and K dwarf stars with $[Me/H]$ 0.10 dex. *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 237–266. (1998).
 - [38] Fuhrmann, K. Nearby stars of the Galactic disk and halo. III. *Astronomische Nachrichten.* **325**, 3–80. (2004).
 - [39] Gonzalez, G. The stellar metallicity-giant planet connection. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **285**, 403–412. (1997).
 - [40] Jenkins, J. S., Jones, H. R. A., Pavlenko, Y., Pinfield, D. J., Barnes, J. R., Lyubchik, Y. Metallicities and activities of southern stars. *Astron. and Astrophys.* **485**, 571–584. (2008).
 - [41] Jenkins, J. S., Murgas, F., Rojo, P., Jones, H. R. A., Day-Jones, A. C., et al. Chromospheric activities and kinematics for solar type dwarfs and subgiants: analysis of the activity distribution and the AVR. *Astron. and Astroph.* **531**, A8. (2011).
 - [42] Knutson, H. A., Howard, A. W., Isaacson, H. A correlation between stellar activity and hot Jupiter emission spectra. *Astroph. J.* **720**, 1569–1576. (2010).
 - [43] Kupka, F., Piskunov, N., Ryabchikova, T. A., Stempels, H. C., Weiss, W. W. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base. *Astron. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119–133. (1999).
 - [44] Livio, M., Pringle, J. E. Metallicity, planetary formation and migration. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **346**, L42–L44. (2003).
 - [45] Maldonado, J., Martínez-Arnáiz, R. M., Eiroa, C., Montes, D., Montesinos, B. A spectroscopy study of nearby late-type stars, possible members of stellar kinematic groups. *Astron. Astroph.* **521**, A12. (2010).

- [46] Meibom, S., Mathieu, R. D. A robust measure of tidal circularization in coeval binary populations: the solar-type spectroscopic binary population in the open cluster M35. *Astroph. J.* **620**, 970–983. (2005).
- [47] Murgas, F., Jenkins, J. S., Rojo, P., Jones, H. R. A., Pinfield, D. J. Stellar activity as a tracer of moving groups. *Astron. and Astrophys.* **552**, A27. (2013).
- [48] Pavlenko, Y. V., Jenkins, J. S., Jones, H. R. A., Ivanyuk, O., Pinfield, D. J. Effective temperatures, rotational velocities, microturbulent velocities and abundances in the atmospheres of the Sun, HD 1835 and HD 10700. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **422**, 542–552. (2012).
- [49] Rebull, L. M., Stapelfeldt, K. R., Werner, M. W., Mannings, V. G., Chen, C., et al. Spitzer MIPS observations of stars in the β Pictoris Moving Group. *Astroph. J.* **681**, 1484–1504. (2008).
- [50] Simon, M., Schaefer, G. H. Measured diameters of two F stars in the β Pic Moving Group. *Astroph. J.* **743**, 158. (2011).
- [51] Valenti, J. A., Fischer, D. A. Spectroscopic properties of cool stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K dwarfs from Keck, Lick, and AAT planet search programs. *Astrophys. J. Suppl.* **159**, 141–166. (2005).

АНОТАЦІЯ

Іванюк О. М. Хімічний склад та властивості F-, G-, K-зір – кандидатів на наявність планетних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіо-астрономія (10 – природничі науки, 104 – фізика та астрономія). – Головна астрономічна обсерваторія НАН України; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2023.

Дисертація присвячена дослідженню F-, G-, K-зір із метою пошуку зв'язків між їхнім хімічним складом і властивостями та наявністю планет. Робота з Калан-Гертфордширською добіркою зірок дала змогу дослідити стійкість результатів обробки спектрів, здійснити метааналіз вірогідності сучасних методів досліджень та оцінити вплив похибок різного походження. Для зірок із планетами не знайдено значущих відмінностей хімічного складу та властивостей, проте їхні характеристики дали змогу дізнатися властивості планет.

Дослідження молодшої зорі зі швидким обертанням PZ Tel A, яка ще не вийшла на головну послідовність і яка є подвійною системою з субзоряним об'єктом, дало змогу оцінити її вік різними методами, дослідити зв'язок вмісту літію, віку та активності в межах сучасних еволюційних моделей, а також визначити масу субзоряного об'єкта поруч.

У рамках дослідження тьмяної віддаленої зорі WTS-2 із короткоперіодичним гарячим Юпітером налагоджено методику роботи зі спектрами низької якості, вірогідність якої підтверджено незалежними фотометричними методами. Одержані результати дали змогу визначити параметри планети та її орбіти, а також дослідити її припливну взаємодію з конвективною оболонкою материнської зорі.

Ключові слова: зорі, головна послідовність, пізні спектральні класи, коричневі карлики, субзоряні об'єкти, позасонячні планети, зоряна еволюція, зоряні атмосфери, хімічний склад, фундаментальні властивості.

ABSTRACT

Ivanyuk O. M. Chemical composition and properties of F, G, K stars – planet host candidates. — Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences in the specialty 01.03.02 – astrophysics, radio astronomy (10 — natural sciences, 104 — physics and astronomy). — Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2023.

This dissertation examines F, G, K stars with high metallicity to explore the relationships among their chemical compositions, properties, and the existence of nearby planetary systems. The challenges of this work include the tight computational interdependence between the determined quantities, the inhomogeneities, noise, and distortions in the observational spectra, the lack of precision in the reduction processes, the limitations of the existing models of stellar interiors, atmospheres and atomic data, and even more subtle details. This work demonstrates the effects of these problems and the methods to solve them.

Using the stellar spectra from the Calan-Hertfordshire Extrasolar Planet Search Programme, this work achieved the following objectives: provided homogeneous properties and abundances for a large sample of stars, including those with detected planets; investigated the stability of the results from the automated fitting procedure of the observed and synthetic spectra; conducted a fidelity and precision meta-analysis of the modern methods in stellar spectroscopy using the results of other authors and common stars; estimated the influence of uncertainties of various origins; found no differences between the chemical compositions and properties of the planet-hosting and non-planet-hosting stars; the determined stellar properties were used by the coauthors of the initial study to determine the orbital parameters and masses of the discovered planets.

The study of a young fast-rotating star PZ Tel A, which has not reached the main sequence yet and is in a binary system with a substellar companion, was also conducted. It achieved the following results: established a new method of the spectroscopic characterization of a fast-rotating stars; estimated the age of the star using several independent methods; investigated the relationship between Lithium abundance, age, and activity within the scope of modern evolutionary models; estimated the impact of uncertainties of the spectroscopically determined stellar properties; coauthors of the initial study estimated an upper mass limit of the nearby substellar companion to determine whether it is a giant planet, or a brown dwarf. To verify whether PZ Tel A is a member of the Beta Pictoris Moving Group, a further more extensive study of the chemical composition and evolutionary status of its members is needed.

Finally, the study of a faint distant star WTS-2 with a short-period hot Jupiter discovered in its vicinity was performed. This study established the methods of processing low-quality distorted observed spectra; the fidelity and precision of these methods were independently confirmed using photometric methods; obtained spectroscopic characteristics of WTS-2; and the coauthors of the initial study derived orbital parameters and properties of the planet and investigated its tidal interaction with the convective envelope of the host star.

Key words: stars, main-sequence, late-type, brown dwarfs, substellar objects, exoplanets, stellar evolution, stellar atmospheres, chemical composition, fundamental properties.