

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Андрієвський Сергій Михайлович

УДК 524.4; 524.33; 524.352

**Аномалії хімічного складу
зір помірних мас**

Спеціальність 01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі астрономії Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук

Пілюгін Леонід Степанович, Головна Астрономічна обсерваторія НАН України; провідний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук

Любимков Леонід Сергійович, Кримська Астрофізична обсерваторія Міністерства освіти і науки України; провідний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, професор

Леушин Валерій Володимирович, Спеціальна Астрофізична обсерваторія АН Росії, Московський відділ, Росія; завідувач відділом.

Провідна установа:

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету ім. Івана Франка Міністерства освіти і науки України, м. Львів.

Захист відбудеться “**28**” **листопада** 2002 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д.26.208.01 з присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: 03680, Київ, ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27. (Початок засідань о 10 год.).

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці ГАО НАН України за адресою: 03680, Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий 25 жовтня 2002 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

Васильєва І. Е.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнє десятиліття ознаменувалося істотним прогресом в області спостережної астрофізики і методів чисельного моделювання переносу випромінювання в зоряних атмосферах. З одного боку, принципово нові приймачі випромінювання зробили можливим одержання спектрів високого розрізнення з великим відношенням сигнал/шум для слабких об'єктів, з іншого боку, з'явилася можливість проводити дослідження фізичних і хімічних характеристик зір з використанням удосконалених комп'ютерних кодів і реалістичних моделей зоряних атмосфер як у наближенні локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР), так і при відмові від неї (далі позначимо такий підхід, як не-ЛТР). У сукупності ці два зазначені фактори стали гарантіями одержання спостережних і теоретичних результатів високої надійності.

До кінця XX століття в ряді випадків виникла нагальна потреба критичного перегляду виконаних раніше робіт в області хімічного складу зір. Практичне значення такого перегляду не викликає сумнівів, тому що отримані в результаті цього висновки мають безпосереднє відношення до теорії зоряної еволюції, а також теорії еволюції зоряних систем. Основні принципи стандартної теорії еволюції поодиноких зір, сформульовані ще в 60-і роки минулого століття, у цілому одержали блискуче підтвердження з боку спостережної астрофізики. Однак детальне дослідження зовнішніх проявів, що супроводжують зоряну еволюцію, безсумнівно, є актуальним, тому що дозволяє в окремих випадках скорегувати стандартний сценарій і зробити критичний вибір між гіпотезами, котрі пояснюють феномени, що спостерігаються. Особливе значення й актуальність має дослідження фізико-хімічних характеристик зір помірних мас. Як уже було відзначено, такі зорі головної послідовності (ГП) показують широкий спектр хімічних аномалій, що пов'язано зі специфічними фізичними умовами в їхніх атмосферах. В окремих випадках аномалії, що спостерігаються, усе ще залишаються без пояснення, а еволюційний статус зір, які демонструють їх, – нез'ясованим.

Безумовно, актуальним є визначення хімічного складу зір-надгігантів і цефеїд, зокрема. Незважаючи на те, що ці об'єкти не мають яскраво вираженої хімічної пекулярності (як, наприклад, зорі ГП), і процеси формування їхнього поверхневого складу сьогодні в цілому ясні, роль цих зір у пізнанні закономірностей галактичної хемодинаміки важко переоцінити. Саме завдяки результатам дослідження хімічного складу, отриманим для цих зір в останні роки, з'явилася можливість створення реалістичної моделі Галактики, що коректно враховує такі її морфологічні і динамічні характеристики, як центральна міжспіральна перемичка, радіальні газові потоки в диску, а також їх вплив на хімічну гомогенізацію газової складової міжзоряного середовища. Володіючи інформацією з радіального розподілу хімічних елементів у диску Галактики, заснованою на спектроскопічному дослідженні статистично значимої сукупності досить молодих надгігантів, можна краще зрозуміти хімічну еволюцію всієї Галактики в цілому, сонячної околиці, зокрема, і нарешті, особливості хімічного складу самого Сонця та його планетної системи.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Різні розділи представленої до захисту докторської дисертації виконані:

1. На кафедрі астрономії й у НДІ “Астрономічна обсерваторія” Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова в рамках виконання наступних держбюджетних тем:
 - “Коливальна несталість зірок у подвійних системах” (1992-1994 рр., номер держреєстрації 0194U023428, відповідальний виконавець);
 - “Chemical evolution of the early Galaxy: blue straggler phenomenon” (1994-1995, European Southern Observatory, C&EE Programme, науковий керівник);
 - “Дослідження фізичних особливостей зірок на окремих, унікальних етапах розвитку” (1995-1997 рр., номер держреєстрації 0195U023595, науковий керівник);

– “Дослідження пульсуючих надгігантів” (1998-2000 рр., номер держреєстрації 0198U002682, науковий керівник);

– “Вивчення фізико-хімічних властивостей пульсуючих зірок та дослідження структури й еволюції Галактики” (2001-2003 рр., номер держреєстрації 0101U001418, науковий керівник).

2. У Департаменті Фізики зір і галактик обсерваторії Парижа і Медона (Франція), відділі Фізики зір Інституту Астрофізики Потсдама (Німеччина) і Інституті Астрономії і Геофізики Сан-Паулу (Бразилія) у різні періоди з 1993 по 2002 рік.

Мета і задачі дослідження. Основна мета дисертаційної роботи складалася в рішенні ряду проблем зоряної і Галактичної астрономії шляхом аналізу фізико-хімічних характеристик зір помірної маси. Ці характеристики були визначені на основі великого високоякісного спектрального матеріалу. У першу чергу, до таких проблем ми віднесли наступні:

1. Проблема зір типу I Boo. Основна задача, що ми перед собою поставили, полягала у визначенні хімічного складу великої групи зір цього типу, моделюванні процесів, що відбуваються в їхніх оболонках з метою пояснення феномена, що спостерігається, а також пошуку механізмів утворення зір типу I Boo.

2. Проблема блакитних страглерів. Основною задачею був аналіз розходжень між характеристиками цих унікальних об'єктів і звичайних зір подібних спектральних класів. Визначення таких розходжень могло б послужити основою для вибору правильної гіпотези, що пояснює появу блакитних страглерів.

3. Проблема малоамплітудних цефеїд (s-цефеїд) і незмінних надгігантів у смузі нестабільності. І ті, і інші характеризуються низьким рівнем пульсаційної активності, причина якого не з'ясована. Як першочергову ми формулювали задачу по перевірці гіпотези про те, що s-цефеїди вперше перетинають смугу нестабільності, а, отже, мають знижений вміст гелію – основного елемента, відповідального за рівень пульсаційної активності.

4. Проблема радіального розподілу металів у диску нашої Галактики. Наявні в літературі дані з цього питання дають неповну, а часом і помилкову картину розподілу хімічних елементів у диску, що, у свою чергу, утрудняє розробку реалістичної моделі хімічної еволюції Галактики, що використовує градієнт металевості як один з найважливіших вхідних параметрів теорії. Основною задачею, що була поставлена в дисертаційній роботі, було визначення хімічного складу для великої групи пульсуючих надгігантів з наступним використанням отриманих результатів для визначення радіальних розподілів вмістів різних хімічних елементів. Була також зроблена спроба знайти зв'язок між характеристиками отриманих розподілів і деякими морфологічними особливостями нашої зоряної системи.

5. Проблема “субсонячної” металевості атмосфер В зір, яка полягає в явній невідповідності хімічного складу молодих В зір з околиці Сонця і самого Сонця. Характер невідповідності неможливо інтерпретувати в рамках стандартних моделей еволюції Галактики. Проблема має, у деякій мірі, філософський відтінок, тому що торкається питання про особливе положення Сонця, як “надметалевої” зорі, яка, у свою чергу, має планетну систему. У дисертаційній роботі була поставлена задача критичного розгляду цієї проблеми.

Наукова новизна отриманих результатів. У представленій роботі були вирішені наступні задачі:

1. Створено базу даних, що містить спектри високого розрізнення для таких об'єктів, як: блакитні страглери, зорі типу I Boo, В зорі ГП ранніх спектральних класів, цефеїди і незмінні надгіганти. Число спектрів, цілком підготовлених для кількісного аналізу (екстракція спектральних порядків, визначення рівня континуума й ототожнення спектральних ліній), досягає 1000. Результати, представлені в дисертаційній роботі, засновані на аналізі приблизно третини всіх наявних у нашому розпорядженні спектрів. За

своїм обсягом спектральна база даних, зібрана нами протягом 10 років, не має світових аналогів.

2. Проведено дослідження фізико-хімічних характеристик групи хімічно пекулярних зір типу I Boo. Отримані найбільш повні на сьогоднішній день спостережні дані з хімічних аномалій, властивих цим об'єктам. Фізико-хімічні характеристики більшості досліджених зір цього типу визначені вперше.

3. Уперше побудована чисельна модель взаємодії газу і пилу в оболонках зір типу I Boo і запропонований новий механізм утворення таких зір.

4. Виконано обширне спектроскопічне дослідження блакитних страглерів і нормальних зір, розташованих у полі шести розсіяних зоряних скупчень, з метою пошуку розходжень у властивостях цих об'єктів і нормальних зір ГП (для більшості з 27 досліджених за цією програмою зір фізико-хімічні характеристики були визначені вперше).

5. Уперше надійно встановлено, що блакитні страглери обертаються повільніше нормальних зір подібних спектральних класів, що свідчить на користь гіпотези про злиття компонентів тісних подвійних зоряних систем як причини появи феномена блакитних страглерів.

6. Виконано спектроскопічне дослідження 19 страглерів галактичного поля, які за своїми характеристиками близькі до зір типу I Boo і можуть розглядатися як продовження останніх у низькотемпературну область. Серед цієї сукупності зір, що раніше спектроскопічно не досліджувалися, виявлений один об'єкт (HD 35863) з аномально високим вмістом літію в атмосфері.

7. Запропоновано удосконалений метод спектроскопічного аналізу для зір надгігантів у наближенні ЛТР. Метод апробований на спектральному матеріалі, отриманому для добре вивченої галактичної цефеїди d Cep, а також для семи яскравих надгігантів з Великої Магелланової Хмари.

8. У рамках виконання програми з дослідження хімічного складу атмосфер надгігантів помірних мас встановлений еволюційний статус малоамплітудних s-цефеїд (15 досліджених зір) і показано, що вони не вперше перетинають смугу нестабільності.

9. Для 14 досліджених нами незмінних надгігантів, що знаходяться в межах смуги нестабільності, визначені параметри атмосфер і хімічний склад. На підставі отриманих результатів зроблений висновок про те, що за своїми хімічними характеристиками незмінні надгіганти не відрізняються від малоамплітудних цефеїд, які за рівнем пульсаційної активності найбільш близькі до них. Для визначення точного положення незмінних надгігантів на еволюційній діаграмі запропонований новий метод оцінки абсолютної зоряної величини – однієї з найважливіших і важковизначаємих характеристик. Метод заснований на калібрувальних співвідношеннях між абсолютною зоряною величиною й еквівалентною шириною деяких ліній іонізованого барію.

10. В результаті аналізу надлишків вмісту атмосферного натрію у 48 галактичних надгігантів і яскравих гігантів визначені кількісні характеристики залежності $[Na/Fe]$ від прискорення сили тяжіння. Показано, що спостерігаємий надлишок натрію у зір з низьким значенням $\log g$, як правило, не перевищує 0.25 dex.

11. Спектроскопічне дослідження групи 11 бімодальних цефеїд дозволило знайти залежність між такою пульсаційною характеристикою як величина відношення періодів (P_1/P_0) і металевістю атмосфер.

12. Виявлені кілька унікальних об'єктів серед жовтих надгігантів: SV Vul – цефеїда, яка вперше перетинає смугу нестабільності, EV Sct – спектрально-подвійна цефеїда.

13. На основі аналізу хімічного складу атмосфер 99 галактичних цефеїд (що складає близько 15% усіх відомих цефеїд нашої Галактики) вперше побудовані радіальні розподіли вмістів 25 хімічних елементів у галактичному диску для галактоцентричних відстаней 4-15 кпк.

14. Виявлено, що розподіл металевості в диску Галактики в цьому діапазоні відбиває

існування трьох областей, що характеризуються різними значеннями градієнта.

15. Розглянуто вплив радіальних газових потоків на хімічну гомогенізацію в диску Галактики, і показано, що міжзоряна складова диска збагачується легкими елементами й елементами групи заліза, а також важкими елементами з різними характерними часами.

16. Виконані дослідження хімічного складу гарячих В зір ГП, що знаходяться в полі Галактики, а також у розсіяних скупченнях і асоціаціях (31 об'єкт) з використанням не-ЛТР підходу.

17. На прикладі розсіяного скупчення М 25, що містить як гарячі В зорі ГП, так і генетично зв'язані з ними жовті надгіганти, показано, що відмінність хімічного складу цих зір, що сформувалися з однієї і тієї ж газової матерії, можна пояснити тільки в рамках гіпотези атомарної дифузії в атмосферах В зір. Виявлено три нові зорі цього скупчення з емісією в лінії H_α , що раніше не були класифіковані як Ве зорі.

18. Зроблено висновок про те, що хімічний склад атмосфер В зір не відбиває коректно хімічний склад міжзоряного середовища, з якого вони сформувалися, отже, гіпотеза про “надметалевість” нашого Сонця, заснована на зіставленні його хімічного складу з хімічним складом В зір з найближчої околиці, не має під собою досить міцних підстав.

Для більшої частини досліджених у даній роботі зір (більш 270) детальні фізико-хімічні характеристики були визначені вперше.

Практичне значення отриманих результатів. Сформовано велику базу даних, що містить спектри високого розрізнення таких об'єктів, як цефеїди (а також незмінні надгіганти), блакитні страглери, зорі типу I Boo, гарячі В зорі ГП. База даних цілком підготовлена для використання фахівцями, які працюють в області спектроскопії.

Створено каталог сил осциляторів для 565 ліній 31 атома й іона 27 хімічних елементів, який може застосовуватися для кількісного аналізу зоряних спектрів в області 5627–7840 ЕЕ.

Удосконалено стандартний метод спектроскопічного аналізу. Запропонована модифікація дозволяє одержувати для зір-надгігантів фізично більш реалістичні результати.

Визначено параметри атмосфер і хімічний склад великої кількості зір помірної маси, які належать до різних типів. Для більшості досліджених зір інформація з деяких фізичних і хімічних характеристик отримана вперше.

Розподіл вмістів великої кількості хімічних елементів у диску Галактики на великому інтервалі галактоцентричних відстаней, отриманий з використанням статистично значимої кількості об'єктів, найближчим часом знайде своє застосування при конструюванні реалістичних моделей галактичної хімічної еволюції, яка враховує такі структурні особливості нашої зоряної системи, як радіальні газові потоки в диску і центральна міжспіральна перемичка, яка безпосередньо впливає на хімічну гомогенізацію речовини міжзоряного середовища.

Особистий внесок дисертанта. Автором особисто були ініційовані наступні роботи:

- збір високоякісного спектрального матеріалу, що стосується деяких типів помірно масивних зір. Автор брав безпосередню участь в одержанні спектрального матеріалу на 6-м телескопі Спеціальної астрофізичної обсерваторії Російської Академії наук (у різні періоди з 1990 по 1994 р.), 1.52-м телескопі Обсерваторії Верхнього Провансу, Франція (у 1994, 1998 і 1999 р.), 1.52-м телескопі Південної Європейської обсерваторії, Чилі (у 2001 р.). Частина матеріалу була передана автору для роботи закордонними колегами. Так, спектри були передані від R. E. Luck (США), В. Г. Клочкові (Росія), В. Є. Панчука (Росія), E. Paunzen (Австрія), A. Fry (США), B. Carneу (США), G. Mathys (Чилі), D. Bersier (США);
- широкомасштабне спектроскопічне дослідження зір типу I Boo, блакитних страглерів, а також не-ЛТР аналіз гарячих В зір ГП, засновані на аналізі найбагатшого спектрального матеріалу, що не має світових аналогів;
- безпрецедентне спектроскопічне дослідження великої вибірки галактичних класичних

цефеїд з метою одержання найбільш достовірних даних з розподілу металевості в диску Галактики.

Частина спектрального матеріалу була оброблена особисто автором, їм також виконана значна частина розрахунків у наближенні ЛТР.

Автору дисертаційної роботи належать наступні ідеї (у хронологічному порядку):

1. Застосувати спектроскопічні критерії для вирішення питання про еволюційний статус s-цефеїд.
 2. Ув'язати факт тонкого настроювання рівня пульсаційної активності бімодальних цефеїд з рівнем металевості їхніх атмосфер.
 3. Знайти зв'язок між хімічно пекулярними зорями типу I Boo і тісними подвійними системами типу W UMa з метою вирішення проблеми походження зір типу I Boo. Розв'язати задачу про розділення газу та пилу в оболонках зір цього типу.
 4. Застосувати новий спектроскопічний індикатор світності для зір- надгігантів.
 5. Провести обширні не-ЛТР дослідження гарячих В зір і наступний порівняльний аналіз хімічного складу цих зір і генетично зв'язаних з ними жовтих надгігантів для вирішення проблеми “субсонячного” вмісту елементів, які характерні для атмосфер В зір.
 6. Дослідити залежність надлишку атмосферного вмісту натрію від характеристик зір- надгігантів з використанням однорідного спектрального матеріалу.
 7. Одержати найбільш надійні на сьогоднішній день дані з розподілу вмістів різних хімічних елементів (у тому числі і важких) у галактичному диску для великого інтервалу галактоцентричних відстаней, ґрунтуючись на спектроскопічному аналізі пульсуючих зір- надгігантів, що надають унікальну можливість точної оцінки галактичних відстаней. Дослідити вплив центральної галактичної перемички на гомогенізацію речовини диска Галактики. Врахувати роль радіальних газових потоків при формуванні розподілів вмістів легких і важких хімічних елементів, що характеризуються різною величиною градієнта.
- Автору належить постановка задачі в кожній із робіт, згаданих в дисертації. Ним отримана частина спостережного матеріалу. Обробка спостережень, розрахунки та інтерпретація виконані сумісно з співавторами.

Текст всіх опублікованих робіт, що мають відношення до дисертації, був написаний автором, з наступними невеликими додаваннями з боку співавторів.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати були представлені на:

- міжнародній конференції “Mechanisms of chromospheric and coronal heating”, м. Гейдельберг (Німеччина), 1990 р.;
- колоквіумі МАС (Міжнародний Астрономічний Союз) № 135 “New perspectives on stellar pulsation and pulsating variable stars”, Вікторія (Канада), 1992 р.;
- астрофізичному семінарі Департаменту фізики зір і галактик – DASGAL, Обсерваторія Парижа-Медона (Франція), 1994 р.;
- колоквіумі МАС № 155 “Astrophysical applications of stellar pulsation”, м. Кейптаун (ПАР), 1995 р.;
- міжнародній конференції “Contemporary problems of Astronomy”, м. Одеса (Україна), 1996 р.;
- колоквіумі МАС “Chemically peculiar stars”, Інститут Астрономії Віденського університету, м. Відень (Австрія), 1997 р.;
- колоквіумі МАС № 175 “The Be phenomenon in early-type stars”, м. Аліканте (Іспанія), 1999 р.;
- 35-ому міжнародному астрофізичному колоквіумі “The galactic halo: from globular cluster to field stars”, м. Льєж (Бельгія), 1999 р.;
- літній Міжнародній Школі студентів-астрономів, м. Одеса, 2000 р.;
- семінарі відділу астрофізики Інституту астрономії м. Потсдам (Німеччина), 1998 р. і 1999

р.;

- міжнародній конференції UKRASTRO-2000, м. Київ (Україна), 2000 р.;
- міжнародній конференції “Astronomy 2000”, м. Одеса (Україна), 2000 р.;
- XXVII З'їзді Бразильського Астрономічного товариства, м. Агуас-де-Сан-Педру (Бразилія), 2001 р.;
- астрофізичному семінарі Національного Інституту космічних досліджень, м. Сан-Жозе-дос-Кампус (Бразилія), 2001 р.;
- астрофізичному семінарі Національної Обсерваторії, м. Ріо-де-Жанейро (Бразилія), 2001 р.;
- астрофізичному семінарі Інституту Астрономії і Геофізики Університету м. Сан-Паулу (Бразилія), 2001 р.;
- міжнародній конференції “Selected tasks of the contemporary astronomy”, м. Львів (Україна),

2002 р.;

- астрофізичному семінарі Головної Астрономічної обсерваторії України, м. Київ (Україна), 2002 р.;
- астрофізичному семінарі Південної Європейської Обсерваторії, м. Гархінг (Німеччина), 2002 р.;
- астрофізичному семінарі Кримської Астрофізичної Обсерваторії, Крим (Україна), 2002 р.;
- семінарах Астрономічної обсерваторії Одеського національного університету.

Обсяг і структура дисертації. Робота складається зі вступу, 6 глав, висновку, списку цитуємої літератури, що включає 339 найменувань і додатка. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 316 сторінок, 84 ілюстрації і 72 таблиці.

Основний зміст роботи

У **Вступі** дана загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, визначені основні цілі і задачі дослідження, позначені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, зазначений особистий внесок дисертанта, а також рівень апробації результатів, подано список публікацій, що стосується представленої дисертаційної роботи.

Перша Глава дисертаційної роботи містить опис основних методів визначення характеристик зоряних атмосфер та їхнього хімічного складу. У **розділі 1.1** перелічені загальні положення, застосовувані в аналізі зоряних спектрів. Опису стандартного методу ЛТР аналізу присвячений **розділ 1.2**. Перелічені основні чисельні коди, що використовувалися для визначення вмістів хімічних елементів в атмосферах досліджуваних зір (WIDTH9, SYNSPEC, STARSP). Всі етапи стандартного методу розглянуті на прикладі добре дослідженої класичної цефеїди d Cep. Відзначено недоліки, властиві традиційному підходу. Показано, що у випадку зір-надгігантів спектральних класів F-G проблема виникає при використанні ліній нейтрального заліза з метою визначення мікротурбулентної швидкості. Раніше було показано, що відхилення від термодинамічної рівноваги в зоряних атмосферах помітно позначається на спектрі нейтрального заліза і приводить до помилки у визначенні вмісту заліза, що досягає 0.6 dex, якщо використовуються лінії з еквівалентною шириною понад 200 mE. Для слабких ліній (50 mE) похибка досягає 0.1-0.2 dex. У той же час лінії іонізованого заліза практично вільні від цього недоліку. Стан Fe II є домінуючим в атмосферах F-G надгігантів. Надіонізація іонізованого заліза несуттєва при температурах, що панують у верхніх шарах цих зір, а надіонізація нейтрального заліза є вкрай ймовірною. Якщо поправки до вмісту заліза, обумовлені відхиленням від ЛТР, прогресивно збільшуються зі збільшенням еквівалентної ширини ліній цього елемента, тоді можна чекати, що вміст, визначений з аналізу сильних ліній, буде невірним. Оскільки стандартний

метод, що використовує лінії Fe I для визначення параметра V_t , припускає, що слабкі і сильні лінії нейтрального заліза повинні відтворювати однаковий вміст заліза, єдиним виходом для усунення розходжень у вмісті за сильними та слабкими лініями буде зниження прийнятого значення мікротурбулентної швидкості. Як наслідок цього, некоректно буде визначений параметр $\log g$, а, отже, і вміст хімічних елементів. У свій час проблема аномально низьких значень $\log g$ у надгігантів обговорювалася в літературі. Для подолання зазначених труднощів був запропонований модифікований метод спектроскопічного аналізу, у якому параметр V_t визначається з використанням ліній іонізованого заліза (**розділ 1.3**). Отримане при такому підході значення мікротурбулентної швидкості перевищує те, яке впливає зі стандартного аналізу. Для великих значень V_t середній вміст заліза за лініями Fe II буде меншим, а, отже, іонізаційний баланс буде досягатися при більших значеннях $\log g$. Удосконалений метод був протестований з використанням мультифазових спектральних спостережень цефеїди d Ser і дев'яти яскравих F надгігантів з Великої Магелланової Хмари (**розділи 1.4 і 1.5**). У результаті було встановлено, що застосування модифікованого методу дає середнє значення і межі варіації величини прискорення вільного падіння на поверхні d Ser, які знаходяться у згоді з незалежними оцінками цієї величини, заснованими на прецизійних вимірах променевої швидкості зорі та її радіуса. Показано, що знайдені в рамках удосконаленої методики величини вмістів легких елементів в атмосфері d Ser добре погоджуються з теоретично очікуваними на поверхні зорі подібної маси (6 $M_{\odot}$) після еволюційної стадії першого широкомасштабного перемішування. Застосування зазначеної методики для аналізу 9 яскравих надгігантів з Великої Магелланової Хмари дозволило одержати реалістичні значення мас і прискорень вільного падіння для цих зір, що є свідченням правильності зроблених припущень. У **розділі 1.6** даний опис додаткових деталей спектроскопічного аналізу. Особлива увага приділена системі сил осциляторів (**розділ 1.6.1**). З використанням атласу спектра Сонця визначені “сонячні” сили осциляторів у діапазоні від 5627 Е до 7840 Е. Створений каталог нараховує 565 значень $\log gf$ для ліній 31 атома й іона 27 хімічних елементів і може бути використаний для кількісного аналізу високодисперсійних спектрів F-G зір. Деякі зауваження до техніки визначення ефективної температури (зокрема для гарячих зір) дані в **розділі 1.6.2**. **Розділ 1.7** присвячений не-ЛТР аналізу зоряних спектрів. Наведено необхідний формалізм, що використовувався для рішення задачі про перенос випромінювання при відмові від ЛТР. **Глава 2** підсумовує результати досліджень хімічно пекулярних зір типу I Boo. Зміст **розділу 2.1** дає загальні відомості про ці зорі. В даний час до зір типу I Boo відносять об'єкти з наступними характеристиками:

- вмісти вуглецю, азоту, кисню і сірки в атмосфері є нормальними (тобто близькими до сонячного);
- такі елементи, як Mg, Ca, Ti, Cr, Fe і ін. показують сильний дефіцит;
- швидкості обертання, що спостерігаються, досягають приблизно 150 км/с;
- на тлі деяких резонансних ліній зоряної атмосфери, розширених обертанням, спостерігаються вузькі абсорбційні лінії, що формуються в протяжних, скоріш за все, навколозоряних оболонках;
- наявність інфрачервоного надлишку випромінювання, що свідчить про існування в навколозоряній оболонці пилової компоненти.

Більш докладно аномалії хімічного складу зір типу I Boo розглядаються в **розділі 2.2**.

Відповідно до результатів спектроскопічних досліджень останніх років значно розширений список зір, які належать до цього типу. У **розділі 2.3** даний опис зорі VW Ari A, що входить до складу подвійної системи. Показано, що між компонентами існує помітне розходження в рівні металевості атмосфер. Застосування спектроскопічних критеріїв дозволяє

класифікувати зорю VW Aгі А як об'єкт, що належить до групи хімічно пекулярних зір типу I Boo.

У **розділі 2.4** проаналізовані можливі причини появи феномена зір типу I Boo. Відповідно до загальноприйнятої на сьогоднішній день гіпотези, зоря типу I Boo – це об'єкт, що має (чи мав у минулому) навколосоряну оболонку. Речовина оболонки акреціюється зорею, однак акреція зачіпає переважно газову складову оболонки, у той час як пилинки, здатні утворюватися в оболонці на деякій віддаленні від поверхні досить гарячої зорі, залишають її, дрейфуючи до границь під дією сили радіативного тиску. Пилінки формуються з тугоплавких елементів, що мають високу температуру конденсації (Ca, Ti, Fe і т. д.). Газова фаза складається з елементів з низькою температурою конденсації, таких як вуглець, азот, кисень, сірка і, природно, водень і гелій. У результаті акреції на поверхні зорі формується шар, що містить нормальну кількість CNO-елементів і помітно знижений вміст тих елементів, що витрачалися на формування пилинок в оболонці. Довгий час принципово важлива деталь такої гіпотези, а саме, можливість успішного поділу газової фази і пилової компоненти в оболонці, що, власне кажучи, і здатне пояснити обговорюваний феномен, залишалася усього лише декларованою.

Розділ 2.5 присвячений розгляду моделі оболонки зорі типу I Boo і рішенням задачі про поділ газу і пилу в ній. У **розділі 2.5.1** даний опис акреційної зони. На основі характеристик вузьких абсорбційних ліній оболонкового походження, спостерігаємих у спектрах деяких зір цього типу, зроблена груба оцінка протяжності самої оболонки. У **розділі 2.5.2**

обговорюється характер розподілу щільності в оболонці, а в **розділі 2.5.3** – температурний розподіл в акреційній зоні. Показано, що для оцінки температури, яка панує в оболонці зорі, можна знехтувати нагріванням газу, викликаним дисипацією акустичних хвиль, генеруємих у конвективній зоні. Таке припущення здається виправданим для зір спектрального класу А з ефективною температурою, що перевищує 8000 К, оскільки такі зорі не мають сильно розвиненої конвективної зони, яка здатна генерувати акустичний шум помітної потужності. Оцінка швидкості газової складової оболонки наведена в **розділі 2.5.4**. Радіативне прискорення пилинок докладно розглянуто в **розділі 2.5.5**. Без динамічного гальмування пилові частинки будуть прискорюватися за рахунок радіативного тиску на їхню поверхню з боку поля випромінювання зорі, однак у реальній ситуації пилінки, рухаючись в газовому оточенні, зазнають динамічного тертя. Відповідний характерний час гальмування визначений для двох різних граничних випадків:

- взаємодія між зарядженими частинками,
- взаємодія між нейтральними частинками.

Приймаючи до уваги, що можливий негативний заряд пилових частинок може бути істотно мінімізований фотоелектронною емісією, і газ в оболонці зорі типу I Boo навряд чи може бути значно іонізований, розгляд задачі проведений для випадку взаємодії нейтральних частинок. Деякі модельні обмеження і результати моделювання розглянуті в **розділах 2.5.6 і 2.6**. У результаті чисельного аналізу акреційної моделі зроблені наступні висновки:

- для усіх вивчених профілів розподілу щільності оболонки пилові частинки виявляються не “жорстко” зв'язаними з газовим середовищем у тих областях, де температура падає до значень, що підходять для формування самих пилових частинок з тугоплавких металів (Mg, Ca, Ti, Fe і ін.);
- утворення дуже дрібних пилових частинок (з радіусом $a_{gr} < 10^{-6}$ см) здається найбільш ймовірним за термодинамічних умовах, прийнятих у спрощеній моделі;
- істотна зміна поверхневого хімічного складу очікується у випадку більш слабкої залежності густини речовини оболонки від відстані.

У **розділі 2.7** розглянуте питання про походження зір типу I Boo. Новий механізм, здатний

пояснити такий феномен, обговорюється в **розділі 2.7.1**. Передбачається, що формування поодинокі зорі з масою, характерною для об'єктів типу I Воо, і яка достатньо швидко обертається, а також має оболонку, може відбутися в результаті злиття компонентів тісних подвійних систем. Найбільш придатними системами є об'єкти типу W UMa – контактні подвійні, які складаються з компонентів, що знаходяться на стадії головної послідовності. Компоненти систем типу W UMa можуть у процесі еволюції ефективно наближатися один до одного завдяки втраті моменту обертання, викликаній магнітним зоряним вітром і гравітаційним випромінюванням, за характерний час порядку $(100-200) \cdot 10^6$ років. Після успішного злиття компонентів результуюча поодинока зоря еволюціонує в шкалі часу ядерної еволюції. Для прийнятих характерних часів еволюції систем типу W UMa і зір типу I Воо виконана оцінка відносного числа цих зір, яка знаходиться в добрій згоді з величиною, що спостерігається. У **розділі 2.7.2**, у рамках запропонованого сценарію, розглядається процес утворення оболонки, існування якої є необхідною умовою формування хімічних аномалій у зір цього типу пекулярності.

Глава 3 присвячена проблемі блакитних страглерів. У **розділі 3.1** розглядається сутність проблеми. Положення блакитних страглерів на еволюційній діаграмі розсіяних скупчень (ліворуч і вище точки повороту) важко інтерпретувати без прийняття спеціальних припущень про природу таких об'єктів, залишаючись тільки в рамках стандартної теорії зоряної еволюції. Розглянуто основні гіпотези, запропоновані в даний час для пояснення феномена, що спостерігається. Відзначено, що вибір тієї чи іншої гіпотези, здатної пояснити феномен блакитних страглерів, ускладнюється відсутністю необхідної кількості спостережних даних. Кількість досліджених (спектроскопічно і фотометрично) блакитних страглерів невелика, що робить практично неможливим виконання порівняльного аналізу властивостей страглерів як для одного окремо взятого скупчення, так і для страглерів з різних скупчень.

У **розділі 3.2** представлені результати визначення фізико-хімічних характеристик блакитних страглерів і нормальних зір головної послідовності з розсіяних зоряних скупчень NGC 2632, NGC 3496, NGC 6475, NGC 6633, IC 2602 і NGC 7789. Для блакитних страглерів скупчення NGC 2632 отримані наступні результати. Три зорі програми HD 73618, HD 73666 і HD 73819 мають схожі вмісти елементів в атмосферах. Вони показують близькі до сонячного вмісти натрію, кальцію і заліза, а також помірний дефіцит вуглецю, кисню і кремнію. Слід зазначити, що HD 73618 і HD 73666 мають помітний надлишок барію. Вміст гелію, який можна оцінити тільки для найгарячішої зорі скупчення HD 73666, є нормальним. Зоря HD 73210 відрізняється від інших блакитних страглерів помітним дефіцитом практично всіх досліджених елементів. Вмісти елементів в атмосферах HD 73618 і HD 73666 є типовими для хімічно пекулярних зір типу Am. Усі зорі мають невеликі значення проекції швидкості обертання, що також типово для Am зір.

Для зір, класифікованих як блакитні страглери скупчень NGC 3496, NGC 6475, NGC 6633 і NGC 7789 критично розглянуте питання про їхню приналежність до зазначених вище скупчень. У результаті для деяких зір, що вважалися раніше блакитними страглерами, членство в скупченнях не підтверджене. Серед досліджених зір виявлені два нових об'єкти з дефіцитом гелію – це блакитний страглер HD 169959 (NGC 6633) і зоря головної послідовності HD 92385 (IC 2602). Блакитний страглер HD 162374 (NGC 6475) також є зорею з аномально слабкою лінією гелію 4471 Е (про що раніше повідомлялося в літературі без відповідної кількісної оцінки вмісту He). В результаті аналізу спектра HD 162374 показано, що атмосферний вміст гелію у цієї зорі в 25 разів нижчий сонячного. Усі досліджені зорі (блакитні страглери і нормальні зорі головної послідовності) показують дефіцит вуглецю. Виявлено, що серед а-елементів кремній демонструє досить цікаву

поведінку. В атмосферах тих зір, де гелій має нормальний вміст, кремній знаходиться в дефіциті; і навпроти, коли кремній показує надлишок, гелій – у дефіциті. Вмісти більш важких елементів не показують значних аномалій як у блакитних страглерів, так і у нормальних зір головної послідовності. Усі досліджені блакитні страглери скупчення NGC 7789, котрі є його фізичними членами, показують сильний дефіцит магнію, аналогічний тому, що спостерігається в хімічно пекулярних Mg-weak зір. Вміст таких елементів, як Ti і Fe в атмосферах блакитних страглерів з NGC 7789 помітно не відрізняється від вмістів цих елементів в атмосферах нормальних гігантів з цього ж скупчення. З результатів спектроскопічного аналізу різних зір зі скупчень NGC 2632, NGC 3496, NGC 6475, NGC 6633, IC 2602 і NGC 7789 можна зробити такий висновок: аномалії хімічного складу блакитних страглерів в однаковій мірі властиві також і зорям головної послідовності. Іншими словами, не існує специфічних аномалій хімічного складу блакитних страглерів, які б однозначно відрізняли їх від звичайних зір A і пізніх B зір головної послідовності, серед яких велику частину складають хімічно пекулярні об'єкти. Феномен блакитних страглерів не є наслідком специфічних хімічних аномалій і не супроводжується їхньою появою. У досить стабільних атмосферах цих зір діють механізми, аналогічні тим, що формують аномалії поверхневого хімічного складу інших A-B зір (наприклад, радіативна дифузія атомів і іонів). Ключем до рішення проблеми блакитних страглерів може бути спостерігаєма в них досить низька швидкість осьового обертання, що в значній мірі повинно сприяти формуванню аномалій хімічного складу на поверхні. Усі досліджені блакитні страглери мають значення $v \sin i$ істотно менші, ніж ті, що характерні для звичайних зір головної послідовності. Повільне осьове обертання свідчить на користь гіпотези, що пояснює утворення блакитного страглера в результаті злиття компонентів тісної подвійної системи з наступним гальмуванням обертання проміжної зоряної конфігурації за рахунок магнітного зоряного вітру.

У **розділі 3.3** даний опис результатів дослідження так званих страглерів галактичного поля. Визначені їхні фізико-хімічні і кінематичні характеристики. Показано, що атмосфери цих зір I типу населення, які належать до спектрального класу F, мають помірний дефіцит заліза і деяких інших елементів. Поряд з цією властивістю в деяких з них спостерігається близький до нормального вміст вуглецю і кисню. За цією ознакою, зокрема, вони нагадують хімічно пекулярні зорі типу I Wo.

і можуть бути певним чином їхніми низькотемпературними аналогами. При цьому рівень аномалій хімічного складу у страглерів галактичного поля менш виражений.

У **розділі 3.4** представлені результати чисельного моделювання структури й еволюції поодинокі зорі з метою перевірки однієї з гіпотез, яка інтерпретує феномен блакитних страглерів як результат дії нетеплового фактора, що зменшує градієнт гідростатичного тиску в надрах зорі (при збереженні гідростатичної рівноваги) і тим самим уповільнює вигорання водневого палива у ядрі, що неминуче повинно спричинити більш тривале, у порівнянні з іншими зорями, перебування її на головній послідовності. У **розділах 3.4.1 і 3.4.2** дана постановка задачі й описаний метод рішення. Саме ж еволюція з нетепловим фактором описана в **розділі 3.5**. Показано, що наявність нетеплового фактора в зоряному ядрі може, у принципі, приводити до появи блакитного страглера, положення якого на еволюційній діаграмі зоряного скупчення буде знаходитися в безпосередній близькості від точки повороту головної послідовності до гілки гігантів.

Четверта глава присвячена дослідженню хімічного складу й еволюційних особливостей цефеїд і незмінних надгігантів спектральних класів F-G. У **розділі 4.1** розглянуті фізико-хімічні характеристики й еволюційний статус малоамплітудних s-цефеїд, котрі, на думку ряду фахівців, вважалися зорями, які вперше перетинають смугу нестабільності. Досить низький рівень пульсаційної активності (малі амплітуди пульсації) s-цефеїд погоджувався зі

зниженим вмістом гелію в порівнянні з нормальними класичними цефеїдами, як і повинно бути у зір, що ще не пройшли стадію великомасштабного перемішування, у результаті чого оболонка може бути збагачена синтезованим гелієм. Оскільки пряме визначення вмісту гелію в атмосферах F-G надгігантів неможливе, запропонований інший критерій, що дозволяє відповісти на запитання про те, пройшла зоря стадію перемішування чи ні. Придатним спектроскопічним критерієм може служити спостерігаємий атмосферний вміст вуглецю і азоту (**розділ 4.1.1**). Ядра CNO елементів беруть участь у неповному CNO циклі горіння водню, де в зоні протікання відповідних реакцій створюються рівноважні концентрації CNO елементів: надлишкове число ядер азоту, дефіцит ядер вуглецю і практично незмінна концентрація ядер кисню. Після перемішування у фазі червоного гіганта перероблена в неповному CNO циклі речовина потрапляє в атмосферу зорі, змінюючи при цьому поверхневий склад. Безсумнівною ознакою того, що зоря уже встигла зазнати перемішування у фазі червоного гіганта і вже не вперше перетинає смугу нестабільності, повинний бути дефіцит вуглецю в її атмосфері, що спостерігається поряд з відповідним надлишком азоту. Для всіх досліджених s-цефеїд отримане наступне. Показано, що вони мають атмосферний вміст вуглецю, подібний до того, який характерний для звичайних класичних цефеїд, що вже не вперше перетинають межі смуги нестабільності. На основі застосування спектроскопічного критерію визначений еволюційний статус s-цефеїд, а саме, зроблений висновок про те, що вони перетинають смугу нестабільності не в перший раз.

У **розділі 4.2** обговорюється проблема присутності незмінних надгігантів у смузі нестабільності цефеїд, що дотепер залишається однією з невирішених проблем астрофізики. Маючи температури і світності, подібні до таких у цефеїд, вони не пульсують (чи пульсують з амплітудою меншою, ніж можна виявити). Для коректного розташування досліджених надгігантів на діаграмі Герцшпрунга-Рессела спеціально розроблений новий метод оцінки абсолютної величини надгігантів, що заснований на калібрувальних співвідношеннях між абсолютною зоряною величиною малоамплітудних цефеїд (завдяки низькому рівню своєї пульсаційної активності вони найбільш близькі до незмінних надгігантів) і еквівалентною шириною ліній іонізованого барію. Показано, що вивчені надгіганти дійсно знаходяться в межах смуги нестабільності.

У **розділі 4.2.1** проведений порівняльний аналіз хімічного складу незмінних надгігантів і малоамплітудних цефеїд. Ніяких істотних відмінностей у вмісті вуглецю і кисню в s-цефеїдах і незмінних надгігантах не виявлено. Це є свідченням того, що обидві групи зір знаходяться на тій самій еволюційній стадії. Оскільки s-цефеїди уже пройшли стадію червоного надгіганта і перетинають смугу нестабільності не в перший раз, аналогічний висновок можна зробити і для вивчених незмінних надгігантів, котрі знаходяться в межах смуги нестабільності, а саме: ці об'єкти уже пройшли першу фазу горіння гелію в ядрі. Зменшення пульсаційної активності цих зір може бути пов'язане з існуванням сильно неадіабатичного режиму в їхніх атмосферах. Наприклад, наявність гарячої хромосфери чи корони може приводити до ефективної трансформації стоячих хвиль (зоряні пульсації) у біжучі.

Розділ 4.3 присвячений дослідженню надлишків атмосферного вмісту натрію в незмінних надгігантах і яскравих гігантах. Основний результат дослідження рівня збагачення натрієм атмосфер надгігантів такий: установлена залежність між вмістом натрію та прискоренням сили тяжіння, відповідно до якої для зір, що мають прискорення сили тяжіння на поверхні порядку $1000 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, надлишок натрію не спостерігається. Для зір із меншими значеннями $\log g$ характерний лише невеликий надлишок натрію (у межах 0.25 dex).

У **розділі 4.4** розглянуті бімодальні цефеїди – нечисленна група зір, у яких блиск і

променева швидкість модулюються. Причина модуляції – одночасне збудження і взаємодія двох пульсаційних мод (у більшості зір – фундаментальної моди і першого обертоу). Відношення періоду першого обертоу до фундаментального періоду для галактичних бімодальних цефеїд $P_1/P_0 \approx 0.71$. Показано, що існує тонке настроювання значення цього відношення залежно від металевості атмосфери (іншими словами, від непрозорості зоряної речовини). Якісно залежність виявляється такою: із збільшенням вмісту металів відношення P_1/P_0 стає меншим.

Деякі унікальні об'єкти Галактики розглянуті в **розділі 4.5**. Зокрема, **розділ 4.5.1** присвячений галактичній цефеїді з найкоротшим періодом – V473 Lyr, яка демонструє змінність амплітуди змінювання блиску і променевої швидкості з періодом біля 3 років, причина якої невідома. Відповідно до результатів дослідження хімічного складу ця зоря не виявляє ніяких істотних аномалій хімічного складу в порівнянні з іншими представниками з числа класичних цефеїд. Завдяки надійному визначенню фундаментальних характеристик V473 Lyr встановлено її положення в межах смуги нестабільності. V473 Lyr знаходиться поблизу червоної межі смуги. З великою ймовірністю положення цієї зорі асоціюється з критичною частиною еволюційного треку – стадією закінчення горіння гелію в ядрі. Таке екстремальне положення V473 Lyr може виявлятися у виді деякої вікової нестійкості і в результаті призводити до модуляції амплітуди. Аналогічні прояви серед інших цефеїд не спостерігаються, мабуть, через коротку тривалість подібного еволюційного етапу.

У **розділі 4.5.2** містяться результати дослідження літєвого надгіганта HD 172365.

Виявлення зір більш яскравих, ніж гіганти, які мають вміст Li порядку 3 dex, варто вважати винятковою подією. Значення $\log \epsilon(\text{Li}) = 2.9$, отримане для надгіганта HD 172365, свідчить, що в даному випадку ми дійсно маємо справу з аномальним об'єктом Галактики. Такий високий вміст літію в атмосфері надгіганта є наслідком або невідомих нам процесів утворення літію і транспортування його до поверхні, або повною відсутністю перемішування, що сприяє зберіганню первинного вмісту літію в зоряній атмосфері. Вміст заліза в атмосфері HD 172365 близький до сонячного, як і слід очікувати для надгігантів I типу населення. Більшість інших досліджуваних елементів також не показує істотних аномалій. Особливої уваги заслуговує вуглець. Цей елемент демонструє сонячний вміст в атмосфері HD 172365, що не характерно для переважної більшості надгігантів, котрі вже зазнали великомасштабних перемішувань. Ще дві відмінні риси HD 172365 – занадто високе для надгіганта значення проекції швидкості обертання і положення зорі на діаграмі Герцшпрунга-Рессела розсіяного скупчення IC 4756, членом котрого HD 172365 є.

Відповідно до виконаної оцінки, маса цієї зорі перевищує маси зір поблизу точки повороту скупчення IC 4756. Можливо, що HD 172365 є блакитним страглером, який нещодавно покинув головну послідовність і ще не досяг області червоних гігантів. Розглянуто гіпотезу, відповідно до якої HD 172365 не є продуктом звичайної еволюції поодинокі зорі головної послідовності, а являє собою результат злиття компонентів подвійної зоряної системи.

У **розділі 4.5.3** обговорюється цефеїда EV Sct, для якої встановлена подвійність. Показано, що другий компонент має ефективну температуру дуже близьку до T_{eff} самої цефеїди, а лінії компоненти незначно слабкіші за лінії цефеїди (тобто різниця в світностях не занадто велика). Не виключено, що невідомий супутник EV Sct може так само, як і сама цефеїда, знаходитися в смузі нестабільності.

Результати дослідження унікальної цефеїди SV Vul, що, як показано, уперше перетинає смугу нестабільності цефеїд, складають зміст **розділу 4.5.4**. Спостерігаємий вміст вуглецю в SV Vul свідчить про те, що ця зоря ще не побувала в стадії червоного надгіганта. Якщо у звичайних цефеїд вміст натрію збільшений як наслідок виносу на поверхню продуктів реакцій Ne-Na циклу, вміст цього елемента в атмосфері SV Vul виявляється нормальним.

Глава 5 присвячена деяким аспектам хімічної еволюції диска нашої Галактики. Результати, подані в цій Главі, отримані на основі аналізу 260 високодисперсійних спектрів, отриманих для 99 галактичних цефеїд. **Розділ 5.1** дає загальні уявлення про теперішню ситуацію в області дослідження характеристик радіального розподілу вмісту різноманітних хімічних елементів у диску Галактики. До теперішнього часу не було досить переконливого аргументу на користь (або проти) існування градієнта металевості в галактичному диску. Для детального дослідження і рішення цієї проблеми обґрунтована необхідність використання цефеїд. У порівнянні з іншими об'єктами, що постачають нас інформацією про розподіл металевості в диску, цефеїди мають деякі важливі переваги. Вони є основними об'єктами для калібрування галактичних відстаней і дозволяють одержати необхідні оцінки галактоцентричних відстаней із високою точністю. Цефеїди – зорі високої світності, що уможлиблює їхнє використання для досліджень розподілу металевості і структурних особливостей Галактики на значних відстанях від Сонця. На відміну від В зір, планетарних туманностей і областей Н II, для яких можна визначити вміст тільки легких елементів (таких як вуглець, азот, кисень і деякі інші), вмісти істотно більшого числа хімічних елементів можуть бути отримані з аналізу спектрів цефеїд. Це особливо важливо в тому випадку, якщо ставиться задача з дослідження радіального розподілу елементів групи заліза та більш важких елементів.

Металевість диска в околиці Сонця (діапазон галактоцентричних відстаней 6-10 кпк) розглянута в **розділі 5.2**. Показано, що більшість із 25 досліджуваних хімічних елементів (від вуглецю до елементів групи заліза) призводять до невеликих значень градієнта металевості від $-0.02 \text{ dex кпк}^{-1}$ до $-0.06 \text{ dex кпк}^{-1}$, при характерному значенні $-0.03 \text{ dex кпк}^{-1}$. Вмісти більш важких елементів у межах похибок не показують явної залежності від галактоцентричної відстані. Для пояснення такого характеру розподілу металевості залучається припущення про ефективний вплив радіальних потоків речовини в диску на процес гомогенізації міжзоряного середовища. Серед можливих причин, що змушують газ рухатися в радіальному напрямку, слід вказати гравітаційну взаємодію між газом диска і спіральними хвилями, а також між газом і центральною перемичкою, що обертається. Ефективність взаємодії зі спіральними хвилями залежить від кутової швидкості обертання диска і кутової швидкості обертання спірального візерунка. В області галактичного коротаційного резонансу, що знаходиться поблизу сонячної галактичної орбіти, відбувається формування двох протилежно спрямованих радіальних потоків: усередині кола коротації радіальний потік буде мати негативне значення швидкості (напрямок руху до центру Галактики), а поза колом коротації напрямок потоку буде протилежним. Спільна дія протилежно спрямованих потоків повинна виявлятися у вигляді своєрідного “чистящого” ефекту в околиці Сонця, який вирівнює розподіл металевості в цій області галактичного диска та зменшує значення градієнта.

До теперішнього часу накопичена велика кількість свідчень того, що перемички спіральних галактик суттєво впливають на хімічну еволюцію їхніх дисків. Ця структурна частина спроможна забезпечити істотну гомогенізацію міжзоряної речовини диска, у той час, як подібна гомогенізація не спостерігається у галактик без перемички. Прямі свідчення існування перемички в нашій Галактиці були отримані в ряді космічних спостережних експериментів. Знання просторових характеристик перемички дає можливість оцінити час, необхідний їй для встановлення розподілу металевості зі значенням градієнта, що спостерігається в теперішню епоху (іншими словами, встановити вік перемички).

Відповідно до такої оцінки, вік галактичної перемички не перевищує 10^9 років.

Ще один механізм, що може викликати згладжування розподілу металевості диска в околиці Сонця, повинний також діяти в області коротації. Тут газ, що перетинає спіральну хвилю,

знає лише незначного стиснення (відносна швидкість близька до нуля), що неминуче повинно призвести до зниження темпу зореутворення. На галактоцентричній відстані, що дорівнює радіусу коротації, повинно спостерігатися зниження ступеня збагачення газу міжзоряного середовища елементами, синтезованими надновими другого типу SNe II. В принципі, цей механізм може викликати не тільки згладжування розподілу, але навіть локальний мінімум металевості в околиці Сонця.

Відсутність явно вираженої залежності вмісту від галактоцентричної відстані для елементів s-процесу свідчить про те, що існує механізм, котрий ефективно переміщує міжзоряне середовище на часовому проміжку меншому, ніж час життя зір, котрі збагачують його переважно елементами s-процесу. Цей механізм спроможний “зтерти” як помітну неоднорідність у радіальному розподілі елементів s-процесу, так і неоднорідність у розподілі тих більш легких елементів, що синтезуються при спалахах SNe I (тривалість життя їхніх попередників також достатньо велика). Проте, цей механізм не в змозі цілком “зтерти” неоднорідність розподілу для легких елементів і елементів групи заліза, що синтезуються кількома поколіннями короткоживучих масивних зір (SNe II). Саме такий залишковий градієнт буде “зафіксований” достатньо молодими зорями (цефеїдами, зокрема), якщо їхній вік буде при цьому менший характерного часу перемішування міжзоряного середовища в околиці Сонця. Таким чином, спостерігаємий невеликий і негативний градієнт розподілу легких елементів і елементів групи заліза є результатом еволюції масивних зір, що збагачують міжзоряне середовище та закінчують свою еволюцію як SNe II. Вищевказаний механізм перемішування міжзоряного середовища повинний бути пов'язаний із радіальними потоками речовини в диску, що генеруються центральною перемичкою та/або спіральними хвилями.

Розділ 5.3 присвячений розгляду металевості галактичного диска в напрямку центра Галактики. Аналіз розподілу вмісту більшості досліджуваних хімічних елементів показує, що в напрямку галактичного центра відбувається помітне зростання металевості. Важкі елементи не показують істотне підвищення вмісту в напрямку центра Галактики. Критична область, де нахил розподілу точно змінює своє значення, відповідає галактоцентричній відстані приблизно 6.5 кпк. Отримані результати свідчать про те, що радіальні розподіли вмістів легких елементів і елементів групи заліза в діапазоні відстаней 4-10 кпк мають бімодальний характер: більш пологий розподіл має місце в околиці 6.5 кпк – 10 кпк (градієнт $-0.02 \text{ dex кпк}^{-1}$ для заліза), а в центральній частині диска спостерігається збільшення нахилу до $-0.14 \text{ dex кпк}^{-1}$. Певне збільшення металевості, що спостерігається в цій області, викликано “вимітанням” газу з внутрішніх областей диска до області зовнішнього ліндбладівського резонансу перемичкою, що обертається, та його накопиченням на відстані приблизно 5 кпк від центра Галактики.

Характер розподілу металевості в зовнішній частині диска Галактики розглянутий у **розділі 5.4**. Аналіз цефеїд, розташованих на великих галактоцентричних відстанях, дає всі підстави вважати, що відокремлена область знаходиться між $R_G \approx 10 \text{ кпк}$ і 13 кпк . Перехід розподілу металевості від сонячної околиці (галактоцентричні відстані до 10 кпк) в область великих галактоцентричних відстаней має східчастий характер. Для досліджуваної частини зовнішнього диска градієнт розподілу вмісту заліза досягає $-0.06 \text{ dex кпк}^{-1} \pm 0.01$. У цій області середнє значення $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.19 \text{ dex} \pm 0.08$. Положення перехідної зони припадає на $R_G \approx 10 \text{ кпк}$. За її межами, в області великих галактоцентричних відстаней, металевість спадає приблизно на 0.2 dex . Всі зорі в цій зовнішній зоні мають дефіцит заліза в порівнянні із Сонцем. Подібна картина спостерігається не тільки для заліза, але і для деяких інших елементів.

Глава 6 присвячена дослідженню аномалій хімічного складу В зір. У **розділі 6.1** викладено стислий огляд проблеми. Як випливає з результатів, отриманих в останнє десятиліття, атмосферні вмісти вуглецю, азоту і кисню у В зір, у більшості випадків, виявляються нижчими, ніж вмісти цих елементів у Сонця, вік котрого істотно перевищує характерний час життя В зір. Базуючись на цих результатах, деякі автори роблять припущення про те, що В зорі мають “нормальний” хімічний склад, у той час, як наше Сонце є, у деякому розумінні, “надметалевою” зорею. Останнім часом ця ідея трансформувалася в більш глобальну – зорі, що мають планетні системи, повинні бути “надметалевими”, іншими словами, вони мають підвищений вміст металів у порівнянні з рядовими молодими зорями сучасної Галактики. Критичний розгляд проблеми невідповідності хімічного складу молодих В зір і Сонця, що має вік 5 млрд. років, потребує попереднього одержання надійних даних з хімічного складу масивних об'єктів головної послідовності з урахуванням не-ЛТР поправок, тому що відхилення від термодинамічної рівноваги в атмосферах гарячих зір є істотним. **Розділ 6.2** містить результати не-ЛТР аналізу хімічного складу В зір. Відповідно до цих результатів, коректне урахування не-ЛТР поправок не вирішує проблему “субсонячних” вмістів елементів в атмосферах В зір. Не-ЛТР вмісти вуглецю й азоту виявляються нижчими відповідних ЛТР значень, а, отже, розходження між тими вмістами, що характерні для В зір і для Сонця, стає ще більшим. Почасті зниження поверхневого вмісту вуглецю у В зір може бути пояснено дією певного механізму великомасштабного перемішування, що переносить речовину з зоряних надр до поверхні. У результаті такого процесу перемішування газу, що пройшов через неповний CNO цикл (у якому ядра вуглецю трансформуються в ядра азоту), з атмосферним газом, відбувається зниження вмісту вуглецю і підвищення вмісту азоту. Очевидно, що аномалії поверхневого хімічного складу, які утворюються в такий спосіб, повинні посилюватися з часом (віком зорі). Застосування діаграм (N/H)-(C/H) для В зір із розсіяних скупчень і поля Галактики дає підставу вважати, що більшість досліджуваних зір головної послідовності (скажімо, із $\log g > 3.75$) не показує ознак виносу речовини, переробленої в неповному CNO циклі, на поверхню. Практично для всіх зір вмісти C і N є “субсонячними”. Зорі кожного з вивчених розсіяних скупчень показують достатньо великий розкид у вмістах C і N, а також кисню. Цей результат особливо важко інтерпретувати, припускаючи, що всі зорі конкретного скупчення сформувалися з достатньо однорідної газопилової хмари. Безсумнівний інтерес викликає порівняльний аналіз хімічного складу В зір і зір-надгігантів спектрального класу F-G, котрі входять до складу того самого конкретного зоряного скупчення. Цілковито обґрунтованим при цьому є припущення про те, що усі зорі з одного скупчення повинні мати подібний хімічний склад, тому що В зорі – це попередники жовтих надгігантів, а, отже, між ними не повинно існувати розходжень в атмосферних вмістах тих елементів, що не беруть участь у термоядерних реакціях, які відбуваються на еволюційному відрізку від головної послідовності до стадії червоного надгіганта. Порівняльний аналіз хімічного складу таких генетично пов'язаних зір, у той самий час перебуваючих на різних еволюційних етапах, може розглядатися як свого роду критичний тест гіпотези “субсонячної” металевості атмосфер В зір. Такий аналіз проведений на прикладі зір розсіяного скупчення M 25 (шість В зір і три жовтих надгіганта, один із яких – цефеїда U Sgr). Результати подані в **розділі 6.3** Зорі спектрального класу В із M 25 (для трьох із них була встановлена приналежність до класу Be) показують різноманітні хімічні аномалії. Наприклад, вміст гелію для двох зір сильно відрізняється від нормального. Всі зорі, для яких був визначений вміст вуглецю, показують дефіцит цього елемента. Серед В зір програми є об'єкти з нормальним вмістом кисню, а також із значним дефіцитом. Одна з досліджуваних В зір показує сильний надлишок заліза. У той же час, у межах похибок, вмісти більшості елементів в атмосфері цефеїди U Sgr і незмінних надгігантів HD 170820 і HD 170886 не відрізняються від сонячних.

Проблема “надметалевості” Сонця обговорюється в **розділі 6.4** з урахуванням усіх результатів, отриманих з аналізу В зір. Зроблено висновок про те, що аномалії хімічного складу гарячих зір диска Галактики (зокрема, “субсонячний” вміст легких елементів), вірогідніше за все, не пов'язані з хімічною еволюцією міжзоряного середовища. Іншими словами, хімічний склад атмосфер В зір не може розглядатися в якості характерного показника рівня металевості в диску сучасної Галактики. Найбільш очевидна інтерпретація таких розходжень, що спостерігаються для зір, які сформувалися з єдиної газопилової хмари, може бути заснована на припущенні, що аномалії хімічного складу В зір є чисто локальними, які не мають відношення до зорі в цілому, а тільки до невеличкої її частини – атмосфери. Найімовірніший механізм, що веде до формування поверхневих аномалій хімічного складу, – радіативна дифузія і гравітаційне осідання атомів і іонів різноманітних хімічних елементів в атмосферному шарі зорі. Цей механізм у даний час залучається для пояснення хімічних аномалій, що спостерігаються в Am зорях.

У цьому розділі також відзначається, що на галактоцентричній відстані, що дорівнює радіусу сонячної галактичної орбіти, цефеїди показують середній вміст заліза, дуже близький до сонячного. Середній вміст заліза для зір із галактоцентричними відстанями в межах $R_{GO} \pm 500$ пк складає $[Fe/H] = +0.01$ dex. Цефеїди – нащадки В зір ГП, а їхній вік може лише злегка перевищувати вік тих В зір, що у даний час ще знаходяться на головній послідовності. Тому цілком резонно думати, що цефеїди – це також молоді зорі, а їхній хімічний склад відбиває хімічний склад міжзоряного середовища в сучасну епоху. Таким чином, металевість більш молодих, ніж Сонце об'єктів, виявляється не нижчою, ніж у Сонця. Цілком очевидно, що “субсонячні” металевості В зір з околиці Сонця не є об'єктивним свідченням на користь гіпотези про надметалевість нашого Сонця. Проблема “субсонячних” вмістів ряду хімічних елементів в атмосферах В зір потребує свого вирішення на основі детального аналізу процесу атомарної дифузії, що, вірогідніше усього, і є причиною, яка призводить до спостерігаемого феномена.

Висновки

Дисертаційна робота є підсумком обширного дослідження фізико-хімічних характеристик деяких типів зір помірних мас, аномалій їхнього хімічного складу і зв'язку з хімічною еволюцією диска Галактики. У роботі отримані такі результати.

- Створена база даних, що містить у собі спектральний матеріал високого розрізнення для зір типу I Boo, блакитних страглерів, незмінних жовтих надгігантів і цефеїд (мультифазні спостереження). За своїм обсягом спектральний матеріал по зазначених об'єктах, зібраний протягом десятих років, не має світових аналогів.
- Для кількісного аналізу зоряних спектрів створений каталог сил осциляторів для 565 ліній 31 атома й іона 27 хімічних елементів, який може бути використаний фахівцями для роботи в спектральному діапазоні 5627 – 7840 ЕЕ.
- Проведене дослідження фізико-хімічних характеристик хімічно пекулярних зір типу I Boo. На сьогоднішній день нами отримані найбільш надійні і повні дані з хімічного складу зір цього типу, приналежність яких до обговорюваної групи була встановлена раніше. На основі застосування спектроскопічних критеріїв зоря VW Aгі A – компонент візуальної подвійної зоряної системи – класифікована як об'єкт типу I Boo.
- Побудована чисельна модель взаємодії газу і пилу в оболонках зір типу I Boo. Показано, що в розглянутому температурному діапазоні відбувається ефективний поділ пилової і газової компонент з акрецією останньої з оболонки на поверхню зорі, що є причиною появи феномена хімічно пекулярних зір типу I Boo.
- Запропонований новий механізм утворення зір типу I Boo, що інтерпретує ці зорі, як продукт злиття взаємодіючих компонентів у тісних подвійних системах. Зорі, що

утворюються при злитті, мають досить швидке обертання й навколозоряну оболонку. Наявність останньої є необхідною умовою формування специфічних хімічних аномалій.

- Проведено обширне спектроскопічне дослідження блакитних страглерів, а також нормальних зір ГП, що входять до складу розсіяних зоряних скупчень, вивчений хімічний склад цих зір, визначені їхні фундаментальні характеристики, подано критичний розгляд питання про приналежність цих зір до вивчених скупчень. Показано, що за спостережуваними особливостями хімічного складу блакитні страглери не відрізняються від звичайних хімічно пекулярних зір спектрального класу А і пізнього В класу.
- Для перевірки гіпотези, що пояснює феномен блакитних страглерів як результат злиття компонентів подвійних систем із наступним уповільненням осьового обертання через вплив магнітного зоряного вітру, визначені проекції швидкості обертання для всіх досліджуваних зір. Показано, що блакитні страглери обертаються повільніше нормальних зір подібних спектральних класів.
- Вивчені фізико-хімічні і кінематичні характеристики так званих блакитних страглерів галактичного поля. Помірний дефіцит більшості хімічних елементів важчих за кисень в атмосферах цих зір (поряд із нормальним вмістом С і О) є свідченням на користь того, що ці хімічно пекулярні об'єкти можуть бути свого роду низькотемпературними аналогами зір типу I Boo.
- Запропонований удосконалений метод спектроскопічного аналізу для зір-надгігантів у наближенні ЛТР, що дозволяє вирішити деякі проблеми стандартного методу й одержати надійні фундаментальні характеристики зір і їхній хімічний склад.
- Запропонований новий метод оцінки абсолютної зоряної величини незмінних жовтих надгігантів, заснований на калібрувальних співвідношеннях між величиною M_V і еквівалентною шириною ліній іонізованого барію.
- Проведене велике дослідження хімічного складу атмосфер надгігантів помірних мас. Отримані такі результати:
 - встановлений еволюційний статус для групи малоамплітудних цефеїд (s-цефеїд). Показано, що малоамплітудні цефеїди є надгігантами, які пройшли еволюційний етап великомасштабного переміщення і не вперше перетинають смугу нестабільності;
 - незмінні надгіганти, що знаходяться в смузі нестабільності цефеїд, за своїми хімічними характеристиками не відрізняються від пульсуючих надгігантів, а екстремально низький рівень їхньої пульсаційної активності повинний бути пов'язаний із динамічною взаємодією між атмосферою та хромосферою;
 - за результатами аналізу надлишків вмісту атмосферного натрію в 48 галактичних надгігантів і яскравих гігантів визначені кількісні характеристики залежності $[Na/Fe]$ від прискорення сили ваги. Показано, що спостережуваний надлишок натрію у зір із низьким значенням $\log g$, як правило, не перевищує 0.25 dex;
 - проведено всебічне дослідження деяких унікальних жовтих надгігантів. Серед них – V473 Lyr, EV Sct, SV Vul і HD 172365. Виявлено, що EV Sct входить до складу подвійної зоряної системи, другий компонент котрої, мабуть, також знаходиться в межах смуги нестабільності. Виявлена цефеїда, що вперше перетинає смугу нестабільності (SV Vul). Результати детального дослідження найбільш короткоперіодичної цефеїди нашої Галактики V473 Lyr, що має яскраво виражену довгоперіодичну амплітудну модуляцію блиску, дають підстави вважати, що незвичний характер пульсаційної активності цієї зорі пов'язаний із її екстремальним положенням у смузі нестабільності класичних цефеїд. Виконано точну оцінку атмосферного вмісту літію в HD 172365. Показано, що цей надгігант має аномально високий рівень вмісту літію.
 - На основі аналізу хімічного складу атмосфер 99 галактичних цефеїд побудовані радіальні розподіли вмістів 25 хімічних елементів у галактичному диску для галактоцентричних

відстаней 4-15 кпк. Показано, що в околиці Сонця радіальні розподіли вмістів елементів групи заліза характеризуються невеликим негативним градієнтом. У напрямку галактичного центра розподіл стає більш крутим, що дозволяє розглядати його як бімодальний в області 4-10 кпк. В зовнішній області диска Галактики розподіл металевості має східчастий вид із розривом на галактоцентричній відстані 10 кпк.

– Встановлено, що вмісти хімічних елементів важчих за цирконій не показують добре вираженої залежності від галактоцентричної відстані у центральній частині диску. Для пояснення цього спостережного факту запропонована гіпотеза, що базується на припущенні про вплив радіальних газових потоків на хімічну гомогенізацію в диску Галактики, міжзоряна складова якого збагачується легкими елементами й елементами групи заліза, а також важкими елементами з різними характерними часами.

– Проведено обширне дослідження хімічного складу гарячих В зір ГП (31 об'єкт), що знаходяться в полі Галактики, а також у розсіяних скупченнях і асоціаціях. Показано, що великомасштабне перемішування не є універсальним механізмом, що діє в гарячих зорях ГП. Аномалії хімічного складу В зір, як видно, пов'язані з процесом атомарної дифузії в їхніх відносно стабільних атмосферах і тому є чисто поверхневий ефект, що не стосується зорі в цілому.

– На прикладі розсіяного скупчення М 25, що містить як гарячі В зорі ГП, так і генетично пов'язані з ними жовті надгіганти, показано, що розходження хімічного складу у цих зір, що сформувалися з однієї й тієї ж газової матерії, можна пояснити, тільки залучаючи гіпотезу атомарної дифузії в атмосферах В зір. Виявлено три нові зорі цього скупчення з емісією в лінії Н γ , що раніше не були класифіковані як Ве зорі.

– Зроблений висновок про те, що хімічний склад атмосфер В зір не відбиває коректно хімічний склад міжзоряного середовища, із якого вони сформувалися (незважаючи на те, що В зорі є молоді галактичні об'єкти). Тому гіпотеза про “надметалевість” нашого Сонця, заснована на зіставленні його хімічного складу з хімічним складом В зір із його оточення, не має під собою достатньо міцних підстав.

Для більшості зір, розглянутих у даній дисертаційній роботі, детальний хімічний склад і їхні надійні фундаментальні характеристики були визначені вперше. Надалі вони можуть бути використані фахівцями в дослідженнях хімічної еволюції зір і Галактики в цілому.

Основні результати опубліковані в роботах:

1. Андриевский С. М., Гарбузов Г. А. Линия Н α в спектре уникальной цефеиды V473 Lyr // Кинемат. Физ. Неб. Тел. – 1987. – Т. 3. – С. 94–96.
2. Андриевский С. М. Магнитное поле пульсирующих звезд // Письма в Астрон. Ж. – 1989. – Т. 15. – С. 1016–1019.
3. Andrievsky S. M. On the possible origin of I Boo stars // Astron. Astrophys. – 1997. – V. 321, – P. 838–840.
4. Andrievsky S. M. Ba II lines as Cepheid luminosity indicator. I. // Inform. Bull. Var. Stars. – 1998. – No. 4572. – P. 1–4.
5. Andrievsky S. M. Ba II lines as Cepheid luminosity indicator. II. // Astron. Nachr. – 1998. – V. 319. – P. 239–244.
6. Andrievsky S. M. Blue stragglers in open clusters. NGC 2632 // Astron. Astrophys. – 1998. – V. 334. – P. 139–145.
7. Andrievsky S. M., Bersier D., Kovtyukh V. V., Luck R. E., Maciel W. J., Lepine J. R. D., Beletsky Yu. V. Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient. II. Towards the galactic center // Astron. Astrophys. – 2002. – V. 384. – P. 140–144.
8. Andrievsky S. M., Chernyshova I. V., Ivashchenko O. V. Spectral investigation of galactic field

blue stragglers // *Astron. Astrophys.* – 1995. – V. 297. – P. 356–358.

9. Andrievsky S. M., Chernyshova I. V., Klochkova V. G., Panchuk V. E. Accurate LTE abundances for some I Boo stars // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.* – 1998. – V. 27. – P. 446–448.

10. Andrievsky S. M., Chernyshova I. V., Kovtyukh V. V. The chemical composition of field blue stragglers // *Astron. Astrophys.* – 1996. – V. 310. – P. 277–285.

11. Andrievsky S. M., Chernyshova I. V., Usenko I. A., Kovtyukh V. V., Panchuk V. E., Galazutdinov G. A. The remarkable visual binary system VW Ari. Chemical composition of components // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* – 1995. – V. 107. – P. 219–224.

12. Andrievsky S. M., Egorova I. A., Korotin S. A., Burnage R. Sodium enrichment of the stellar atmospheres. I. Non-variable supergiants and bright giants // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 389. – P. 519–523.

13. Andrievsky S. M., Garbuzov G. A. The shock wave heating mechanism of pulsating star chromospheres // *Proc. Int. Conf. Heidelberg, 5-8 June 1990*, Eds. P. Ulmschneider, E.R. Priest, R. Rosner, Springer-Verlag. – 1991. – P. 356–358.

14. Andrievsky S. M., Gorlova N. I., Klochkova V. G., Kovtyukh V. V., Panchuk V. E. The lithium-rich supergiant HD 172365 // *Astron. Nachr.* – 1999. – V. 320. – P. 35–41.

15. Andrievsky S. M., Klochkova V. G. Contemporary problems of astronomy: the chemical composition of Cepheids and related objects // *Odessa Astron. Publ.* – 1996. – V. 9. – P. 98–99.

16. Andrievsky S. M., Korotin S. A., Luck R. E., Kostynchuk L. Yu. Carbon and nitrogen abundances in early B-stars. I. NLTE calculations for a sample of stars with small v_{tini} values // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 350. – P. 598–602.

17. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V. The comparable analysis of the Cepheids and non-variable supergiants from the instability strip. I // *Astrophys. Space Sci.* – 1996. – V. 245. – P. 61–80.

18. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Bersier D., Luck R. E., Gopka V. P., Yushchenko A. V., Usenko I. A. The unique galactic Cepheid V473 Lyrae revisited // *Astron. Astrophys.* – 1998. – V. 329. – P. 599–605.

19. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Korotin S. A., Spite M., Spite F. Magellanic Clouds elemental abundances from F supergiants: revisited results from the Large Magellanic Cloud // *Astron. Astrophys.* – 2001. – V. 367. – P. 605–612.

20. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Luck R. E., Lepine J. R. D., Bersier D., Maciel W. J., Barbuy B., Klochkova V. G., Panchuk V. E., Karpischek R. U. Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient. I. The solar neighbourhood // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 381. – P. 32–50.

21. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Makarenko E. N., Usenko I. A. An investigation of the double-mode Cepheid TU Cassiopeae I. Atmospheric parameters and chemical composition // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* – 1993. – V. 265. – P. 257–260.

22. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Usenko I. A., The chemical composition of the s-Cepheids: a UMi (Polaris) and HR7308 (V473 Lyr) – unique Cepheids of the Galaxy // *Astron. Astrophys.* – 1994. – V. 281. – P. 465–470.

23. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Usenko I. A. The chemical composition of the s-Cepheids. II // *Astron. Astrophys.* – 1996. – V. 305. – P. 551–557.

24. Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Usenko I. A., Klochkova V. G., Galazutdinov G. A. Chemical composition of selected double-mode Cepheids and the P_1/P_0 – $[\text{Fe}/\text{H}]$ relation // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1994. – V. 108. – P. 433–440.

25. Andrievsky S. M., Paunzen E. Towards the solution of the I Bootis problem // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* – 2000. – V. 313. – P. 547–552.

26. Andrievsky S. M., Schoenberner D., Drilling J. S. Blue stragglers in open clusters. Part II // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 356. – P. 517–528.

27. Chernyshova I.V., Andrievsky S.M., Kovtyukh V.V., Mkrtichian D.E. Unusual A-star VW Ari // *Contrib. Astron. Obs. Skalnat Pleso.* – 1998. – V. 27. – P. 332–334.
28. Hill V., Andrievsky S. M., Spite M. Chemical evolution of the Magellanic Clouds. VI. Chemical composition of nine F supergiants from different regions of the Large Magellanic Cloud // *Astron. Astrophys.* – 1995. – V. 293. – P. 347–359.
29. Korotin S. A., Andrievsky S. M., Kostynchuk L. Yu. Nitrogen abundance in early B-stars. I. NLTE calculations for γ Pegasi // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 342. – P. 756–762.
30. Korotin S. A., Andrievsky S. M., Kostynchuk L. Yu. Carbon Abundance in Early B-Stars. I. NLTE Calculations for γ Peg // *Astrophys. Space Sci.* – 1999. – V. 260. – P. 531–539.
31. Korotin S. A., Andrievsky S. M., Luck R. E. Oxygen abundances in early B-stars // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 351. – P. 168–176.
32. Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M., Usenko I. A., Klochkova V. G. The chemical composition of the s-Cepheids. III. // *Astron. Astrophys.* – 1996. – V. 316. – P. 155–163.
33. Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M. Do we really obtain reliable elemental abundances for supergiant stars? // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 351. – P. 597–606.
34. Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M. EV Sct – a double system with two Cepheid components in NGC 6664? // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 350. – P. L55–L56.
35. Luck R. E., Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Korotin S. A., Beletsky Yu. V. Comparative abundance analysis of the hot main sequence stars and their progeny in open cluster M 25 // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 361. – P. 189–200.
36. Luck R. E., Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M. SV Vul: a first crossing Cepheid? // *Astron. Astrophys.* – 2001. – V. 373. – P. 589–596.
37. Mathys G., Andrievsky S. M., Barbuy B., Korotin S. A., Cunha K. Light element abundances in the young open clusters NGC 3293, NGC 4755 and NGC 6231: tracers of stellar evolution // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 387. – P. 890–902.
38. Paunzen E., Andrievsky S. M., Chernyshova I. V., Klochkova V. G., Panchuk, V. E., Handler G. Accurate LTE abundances of seven well established γ Boo stars // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 351 – P. 981–984.
39. Schoenberner D., Andrievsky S. M., Drilling J. Blue stragglers in open clusters. III. NGC 7789 // *Astron. Astrophys.* – 2001. – V. 366. – P. 490–497.

Анотація

Андрієвський С. М. Аномалії хімічного складу зір помірних мас. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за фахом 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2002.

Дисертація містить результати 39 наукових праць, у яких досліджуються фізико-хімічні характеристики помірно масивних зір, що знаходяться на стадії головної послідовності (спектральні класи A-B), а також на стадії надгігантів (спектральні класи F-G). Вивчено аномалії хімічного складу зір типу I Boo, блакитних страглерів, цефеїд і незмінних надгігантів, а також зв'язок цих аномалій з еволюційними особливостями помірно масивних зір. Отримані результати використовуються для дослідження хімічної еволюції диска Галактики.

Ключові слова: зоряні атмосфери, хімічний склад, хімічна еволюція Галактики.

ABSTRACT

Andrievsky S. M. The anomalies of the chemical composition of intermediate-mass stars. – Manuscript.

Thesis of a Doctor's degree by speciality 01.03.02 – Astrophysics and Radioastronomy. – Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2002.

The dissertation presents the results published in 39 papers, in which the physical and chemical characteristics of the intermediate-mass stars of the main sequence (spectral classes A-B), and supergiant stars (spectral classes F-G) were investigated. The anomalies of the chemical composition of the I Boo type stars, blue stragglers, cepheids and non-variable supergiants were considered, as well as their connection with evolutionary properties of the intermediate-mass stars. Obtained results were used with the aim to investigate the chemical evolution of galactic disc.

Key words: stellar atmospheres, chemical composition, chemical evolution of the Galaxy.

АННОТАЦИЯ

Андриевский С. М. Аномалии химического состава звезд умеренных масс. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2002.

Диссертация содержит результаты 39 научных работ, в которых исследуются физико-химические характеристики умеренно массивных звезд, находящихся на стадии главной последовательности (спектральные классы А-В), а также на стадии сверхгигантов (спектральные классы F-G). Изучены аномалии химического состава звезд типа I Boo, голубых страгглеров, цефеид и непременных сверхгигантов, а также связь этих аномалий с эволюционными особенностями умеренно массивных звезд. Полученные результаты используются для исследования химической эволюции диска Галактики.

Для количественного анализа звездных спектров создан каталог сил осцилляторов для 565 линий 31 атома и иона 27 химических элементов.

Проведено исследование физико-химических характеристик химически пекулярных звезд типа I Boo. Построена численная модель взаимодействия газа и пыли в оболочках звезд типа I Boo. Предложен новый механизм образования звезд типа I Boo, который интерпретирует эти звезды, как продукт слияния взаимодействующих компонентов в тесных двойных системах.

Проведено обширное спектроскопическое исследование голубых страгглеров, а также нормальных звезд ГП, входящих в состав рассеянных звездных скоплений, изучен химический состав этих звезд, определены их фундаментальные характеристики, дано критическое рассмотрение вопроса о принадлежности этих звезд к изученным скоплениям. Показано, что по наблюдаемым особенностям химического состава голубые страгглеры не отличаются от обычных химически пекулярных звезд спектрального класса А и позднего В класса.

Предложен усовершенствованный метод спектроскопического анализа для звезд сверхгигантов в приближении ЛТР, который позволяет решить некоторые проблемы стандартного метода и получить надежные характеристики звезд и их химический состав.

Проведено обширное исследование химического состава атмосфер сверхгигантов умеренных масс. Показано, что малоамплитудные цефеиды являются сверхгигантами, прошедшими эволюционный этап крупномасштабного перемешивания, и не впервые пересекают полосу неустойчивости. По результатам анализа избытков содержания атмосферного натрия у 48 галактических сверхгигантов и ярких гигантов определены количественные характеристики зависимости $[Na/Fe]$ от ускорения силы тяжести. Показано, что наблюдаемый избыток натрия у звезд с низким значением $\log g$, как правило, не

превышает 0.25 dex.

На основе анализа химического состава атмосфер 99 галактических цефеид построены радиальные распределения содержаний 25 химических элементов в галактическом диске для галактоцентрических расстояний 4-15 кпк. Показано, что в окрестностях Солнца радиальные распределения содержаний элементов группы железа характеризуются небольшим отрицательным градиентом. В направлении галактического центра распределение становится более крутым, что позволяет рассматривать его как бимодальное в области 4-10 кпк. Во внешней области диска Галактики распределение металличности имеет ступенчатый вид с разрывом на галактоцентрическом расстоянии 10 кпк.

Проведено обширное исследование химического состава горячих В звезд ГП (31 объект), находящихся в поле Галактики, а также в рассеянных скоплениях и ассоциациях. Показано, что крупномасштабное перемешивание не является универсальным механизмом, действующим в горячих звездах ГП. Аномалии химического состава В звезд, по всей видимости, связаны с процессом атомарной диффузии в их относительно стабильных атмосферах и являются поэтому чисто поверхностным эффектом, не затрагивающим звезду в целом.

Ключевые слова: звездные атмосферы, химический состав, химическая эволюция Галактики.