

На правах рукописи



Судник Наталья Павловна

**Быстрая спектральная переменность и  
магнитные поля звёзд ранних спектральных  
классов**

01.03.02 - астрофизика и звёздная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук

**Холтыгин Александр Фёдорович**

**Официальные оппоненты:**

**Погодин Михаил Александрович**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,

главный научный сотрудник

**Самусь Николай Николаевич**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Учреждение науки Институт астрономии РАН,

ведущий научный сотрудник

**Ведущая организация:**

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга МГУ

Защита диссертации состоится 11 декабря 2012 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д. 212.232.15 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан 29.10. 2012 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Орлов Виктор Владимирович

## Введение

Данная диссертация посвящена поиску, анализу и интерпретации наблюдаемой переменности профилей линий в спектрах массивных звёзд ранних спектральных классов.

Переменность профилей линий в спектрах горячих звёзд была замечена ещё в 50-х годах XX века. Активное исследование этого явления началось в 70-х годах прошлого века. Об изменении формы, интенсивности, эквивалентной ширины линий, появлении отдельных деталей (горбов и впадин) и их движении вдоль профиля в линиях H I, He I, He II и других ионов говорилось во многих работах.

Наиболее ярким проявлением переменности профилей линий является появление в профилях резонансных и субординатных УФ-линий NIV, SiIV и других ионов переменных абсорбционных деталей, называемых дискретными абсорбционными компонентами (ДАК). Формирование и эволюция ДАК представляет собой циклический процесс, причем длина цикла остаётся практически постоянной на протяжении всего периода наблюдений. Появление ДАК обычно связывается с формированием крупномасштабных структур в атмосферах звёзд в областях коротации звезды и звёздного ветра. С этими же структурами связывается и переменность профилей линий H I и He I в видимой области спектра O-звёзд.

Переменность профилей линий, обнаруживаемая по спектральным наблюдениям горячих звёзд в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах считается свидетельством о присутствии в атмосферах этих звёзд структур разных размеров и плотностей с временами жизни от долей часа до нескольких дней. Формирование таких структур связывается с нерадиальными пульсациями, радиативной неустойчивостью звёздного ветра, вращением звёзд, образованием околзвёздных дисков и струй вещества, с наличием у

них магнитного поля.

С формированием мелкомасштабных структур связывается стохастическая (нерегулярная) переменность. Тогда как регулярные или квазирегулярные изменения профилей линий с периодами от нескольких часов до недель связываются с образованием крупномасштабных структур в звёздном ветре.

В отличие от звёзд спектрального класса В, амплитуда вариаций профилей линий в спектрах звёзд спектрального класса О и ранних подклассов спектрального класса В (подтипов В0–В3) относительно мала (1–3 %). Поэтому здесь скорее следует говорить о микропеременности профилей линий в спектрах этих звёзд.

Данная работа посвящена исследованию переменности профилей линий в спектрах массивных звёзд ранних спектральных классов в оптическом диапазоне. Понимание природы этой переменности позволит судить о физических процессах в расширяющихся атмосферах этих звёзд и о механизмах структурообразования в звёздном ветре.

Анализ этих механизмов важен как для понимания природы самих этих объектов, так и для решения более широкого круга задач, связанных с формированием сложной структуры межзвёздной и межгалактической среды, оболочек сверхновых звёзд, областей около активных галактических ядер и других объектов.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Одной из наиболее важных проблем звёздной астрофизики является изучение спектральной переменности звёзд. Особый интерес в этой связи представляют горячие звёзды ранних спектральных классов, профили линий в спектрах которых переменны на временах от нескольких часов до десятков суток.

В последние годы благодаря росту чувствительности приборов, расширению международной кооперации и проведению регулярных наблюдений во всех доступных диапазонах наблюдается значительный прогресс в детектировании и объяснении наблюдаемой переменности профилей линий в спектрах горячих массивных звёзд.

Спектральные наблюдения горячих звёзд в ультрафиолетовом, видимом и рентгеновском диапазонах свидетельствуют о присутствии в атмосферах этих звёзд структур разных размеров и плотностей с временами жизни от долей часа до нескольких дней. За последние 20 лет были предложены различные механизмы, объясняющие наблюдаемую переменность профилей линий и образование структур в атмосферах этих звёзд. Формирование таких структур связывается с нерадиальными пульсациями, переменностью ветра, вращением звёзд, образованием околосвёздных дисков и струй вещества, а также наличием у звезды магнитного поля.

Тем не менее множество вопросов остаются нерешёнными. В рамках предложенных моделей не всегда удаётся объяснить наблюдаемую переменность профилей. Природа, вызывающих её физических процессов, также остаётся не вполне ясной. По-прежнему остаются не до конца понятными происхождение и поведение дискретных абсорбционных компонент профилей резонансных линий в УФ спектрах звёзд, природа вариаций профилей линий в оптическом (например, линии  $H_{\alpha}$ ) и рентгеновском диапазонах, связь между переменностью профилей линий в различных диапазонах спектра.

Ряд нерешённых вопросов связан с магнитными полями горячих звёзд. Остаётся неизвестным, все ли массивные ОВ-звёзды обладают магнитным полем, какие общие черты присущи звёздам с магнитным полем, какова конфигурация магнитного поля на поверхности звезды и как величина и структура магнитного поля связаны с наблюдаемой переменностью звёзд. До сих пор не до конца понятны механизм происхождения магнитного поля горячих звёзд

и роль магнитного поля в эволюции звезды.

Безусловно, для подтверждения и дальнейшего развития теоретических моделей необходима надёжная наблюдательная основа. Детальный анализ наблюдательных данных, разработка и улучшение методов изучения и моделирования профилей линий позволят лучше понять физические процессы, приводящие к переменности профилей. Именно эти вопросы рассматриваются в настоящей диссертационной работе, что свидетельствует об актуальности её темы.

### **Цели диссертационной работы**

Основной целью настоящей работы является детектирование и анализ микропеременности профилей линий в спектрах массивных звёзд ранних спектральных классов.

Для достижения целей диссертационной работы решались следующие задачи:

- Разработка методов анализа профилей линий и выделения регулярных компонент вариаций профилей.
- Анализ наблюдений программных звёзд, выполненных на БТА, САО (Россия) и 1.8-м телескопе Бохьюсанской астрофизической обсерватории (Корея).
- Поиск магнитных полей программных звёзд.
- Построение модели циклической переменности профилей линий в оптическом и УФ диапазонах в спектрах звёзд ранних спектральных классов и расчет профилей линий в данной модели.

## Научная новизна

В диссертации предложен метод определения мод нерадиальных пульсаций на основании анализа метода сглаженного спектра временных вариаций профилей (smTVS) линий на коротких временных интервалах. Разработан новый метод анализа профилей линий, основанный на применении метода smTVS отдельно к лево- и правополяризованным компонентам профиля линии.

Предложен новый метод поиска магнитного поля звёзд с широкими линиями в спектре, базирующийся на применении вейвлет-преобразования к формуле, связывающей величину параметра Стокса  $V$  для линии с производной от интегрального профиля линии. Выполнен статистический анализ магнитных полей звёзд спектрального класса O.

Впервые обнаружены вариации профилей линий в спектре звезды  $\lambda$  Сер с частотами от 2.2 до  $6.9 d^{-1}$ , связанные с нерадиальными пульсациями звезды.

Предложена новая модель, объясняющая циклическую переменность профилей линий в оптическом и УФ диапазонах присутствием нескольких неоднородностей (облаков) вблизи фотосферы звезды. В рамках этой же модели возможно также формирование дискретных абсорбционных компонент профилей линий в спектрах горячих массивных звёзд. Выполнена интерпретация вариаций профилей линий в спектре звезды  $\lambda$  Сер в рамках предложенной модели.

## Научная и практическая значимость

Разработанный в диссертации метод анализа вариаций поляризованных компонентов профилей линий может быть использован для поиска слабой переменности профилей линий в спектрах звёзд, а также для диагностики магнитного поля звезды. Предложенный метод определения мод нерадиальных пульсаций на основании анализа smTVS спектров вариаций профилей линий применим к широкому кругу звёзд разных спектральных классов.

Представленный в диссертации метод поиска магнитного поля звёзд с широкими линиями в спектре может быть применен к анализу поляризационных спектров широкого круга объектов.

Результаты поиска быстрой переменности профилей линий в спектрах звёзд  $\lambda$  Ser,  $\lambda$  Ori A и  $\zeta$  Ori A могут быть использованы для построения моделей звёзд подобных спектральных классов и классов светимостей.

Разработанная модель циклических вариаций профилей линий в спектрах звёзд с локальными флуктуациями магнитного поля может быть использована для анализа магнитной активности звёзд различных спектральных классов, а также для определения периода вращения и наклона оси вращения исследуемой звезды.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. International Student Conference «Science and Progress», Санкт-Петербург, Россия, 15–19 ноября 2010 г.
2. 18th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Киев, Украина, 2–7 мая 2011 г.
3. «Stellar Polarimetry: From Birth to Death», Мэдисон, США, 27–30 июня 2011 г.
4. JENAM 2011. European Week of Astronomy and Space Science, Санкт-Петербург, Россия, 4–8 июля 2011 г.
5. 20th Stellar Pulsations Conference Series «Impact of New Instrumentation and New Insights in Stellar Pulsations», Гранада, Испания, 4–9 сентября 2011 г.

6. MiMeS 6 Workshop, Саклэй, Париж, Франция, 21–25 мая 2012 г.

7. IAU XXVIII General Assembly, Пекин, Китай, 20–31 августа 2012 г.

## Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы (193 наименования) и одного приложения. Общий объем диссертации — 153 страницы, из них 5 страниц приложений. Работа содержит 51 рисунок и 6 таблиц.

Во **Введении** приводится исторический обзор исследования переменности профилей линий в спектрах массивных ОВ-звёзд. Описываются основные характеристики наблюдаемой переменности и вызывающие её механизмы. Обосновывается актуальность работы, описываются основные цели и задачи диссертации, научная новизна, научная и практическая ценность исследования. Также в этой части сформулированы результаты, выносимые на защиту, приводится список конференций и работ, где были представлены результаты данного исследования, указан личный вклад автора.

В **Главе 1** описываются методы детектирования и анализа переменности профилей линий в спектрах горячих массивных звёзд. Пункт 1.1 посвящён методам TVS и smTVS, пункт 1.2 — методам Фурье-анализа, пункт 1.3 — методам вейвлет-анализа. В пункте 1.4 приведены выводы.

Применение метода smTVS для поиска микропеременности профилей линий описано в **Главе 2**. В пункте 2.1 приводятся основные сведения о выполненных наблюдениях и последующей обработке спектров программных звёзд. Основные сведения о программных звёздах и smTVS анализ переменности профилей линий в их спектрах даны в пункте 2.2. Выявлена слабая переменность профилей линий ионов Si, C, O, N в спектрах программных

звёзд. Также показано, что smTVS метод позволяет уверенно детектировать переменность малой амплитуды ( $\ll 1\%$  в единицах континуума) профилей линий в спектрах звёзд. Он может быть использован при малом числе полученных спектров и неравномерной временной сетке с большими пропусками.

Пункт 2.3 посвящён исследованию переменности циркулярно поляризованных компонентов профилей линий. Делается вывод о том, что для звёзд ранних спектральных классов smTVS<sub>L</sub> и smTVS<sub>R</sub> спектры могут существенно различаться, что может быть косвенным свидетельством наличия у исследуемой звезды магнитного поля.

В пункте 2.4 описано использование метода smTVS для анализа вариаций профилей линий, вызванных нерадиальными фотосферными пульсациями исследуемой звезды. Показано, что анализ TVS и smTVS спектров вариаций профилей линий нерадиально пульсирующих звёзд может быть использован для оценки моды пульсаций  $l$ .

Пункт 2.5 — выводы.

В **Главе 3** приводятся основные характеристики магнитных полей OB-звёзд (пункт 3.2) и методы их обнаружения (пункт 3.1). В пункте 3.3 представлены результаты статистического анализа магнитных полей звёзд спектрального класса O. Отличия O-звёзд, обладающих поверхностным магнитным полем, от всех остальных O-звёзд оказались незначительными. В пункте 3.4 приведены выводы.

**Глава 4** посвящена исследованию переменности профилей линий в спектре звезды  $\lambda$ Сер. В пункте 4.1 даны основные сведения о звезде. В пункте 4.2 анализируются наблюдательные данные, используя методы описанные в главах 1 и 2. Обсуждаются полученные результаты. Показано, что все исследуемые линии имеют переменные профили. Амплитуда переменности составляет 2–3% от уровня интенсивности континуума. Делается вывод о связи обнаруженных регулярных компонентов с НРП и вращательной модуляцией

профилей линий. В пункте 4.3 описаны измерения магнитного поля  $\lambda$  Сер и полученные результаты. Пункт 4.4 — выводы.

В **Главе 5** представлена кинематическая модель, качественно объясняющая циклическую переменность профилей линий в оптическом диапазоне спектра и коррелирующую с ней переменность профилей линий в УФ диапазоне. В пункте 5.1 изложены аргументы в пользу использования данной модели для объяснения наблюдаемой переменности профилей линий и представлен алгоритм модели. Показано, что данная модель может быть использована для определения периода вращения и наклона оси вращения звезды.

В рамках данной модели циклическая переменность профилей линий с рекуррентным периодом порядка периода вращения вызывается присутствием облаков в атмосфере звезды. Вещество облака, при его попадании на луч зрения, будет вызывать дополнительное излучение или поглощение излучения звезды в зависимости от его положения относительно наблюдателя. Существование облаков связано с наличием магнитных петель на поверхности звезды. Наличие магнитных петель (как следствие и облаков) в атмосфере звезды также может быть причиной появления ДАК. Существование магнитных петель приводит к существенной разности скоростей истечения вещества звезды в областях петель и в областях, где нет локальных магнитных полей. А это, в свою очередь, приводит к формированию крупномасштабных структур в ветре, ответственных за образование ДАК.

Результаты моделирования переменности профилей линий в спектрах звезды  $\lambda$  Сер описаны в пункте 5.2. Показано, что при конфигурации из 6 облаков, находящихся на экваторе, и начальных значениях периода вращения — 4 дня и наклона оси вращения —  $55^\circ$ , вычисленные модельные профили согласуются с наблюдаемыми на протяжении более 6 периодов вращения. Полученные в рамках данной модели значения периода вращения и наклона оси вращения равны  $P = 4.069 \pm 0.007^d$ ,  $i = 54.7 \pm 0.2^\circ$ , соответственно.

В пункте 5.3 приведены выводы.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **Приложении А** приведён спектр звезды  $\lambda$  Сер в диапазоне длин волн 3830–8260Å.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

**На защиту выносятся следующие основные результаты:**

1. Результаты использования методики построения сглаженных спектров временных вариаций профилей линий в спектрах звёзд для поиска слабых вариаций профилей линий, диагностики мод нерадиальных пульсаций и анализа поляризованных компонентов профилей линий.
2. Разработка модели магнитных петель в атмосферах OB звёзд для объяснения циклических вариаций профилей линий в их спектрах и результаты расчётов по данной модели.
3. Вывод о наличии быстрой микропеременности профилей линий в спектрах программных звёзд, связанной с нерадиальными пульсациями и вращательной модуляцией профилей линий.

#### **Публикации по теме диссертации**

Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных работах, из них 1 статья — в рецензируемом журнале, 4 статьи — в сборниках трудов конференций и 8 публикаций — в сборниках тезисов докладов конференций.

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

*Опубликованы в рецензируемых журналах:*

1. Холтыгин А. Ф., Судник Н. П., Бурлакова Т. Е., Валявин Г. Г. Микропеременность профилей линий в спектрах OB-звёзд: сверхгигант  $\lambda$  Cep (O6If(n)) // *Астрономический журнал*. 2011. Т. 88, №12. Сс. 1197–1207.

*Опубликованы в сборниках трудов конференций:*

2. Sudnik N P. Regular line profile variability in spectra of star lam Cephei // *Proceeding of the International Student Conference «Science and Progress» / Ed. by SPb.: SOLO. 2010. Pp. 63–67.*

3. Kholtygin A. F., Fabrika S. N., Sudnik N. P. Line profile micro variability and wind structure for OB stars // Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium / Ed. by C. Neiner, G. Wade, G. Meynet & G. Peters. 2011. Vol. 272. Pp.200–201.
4. Sudnik N. P. Smooth time variation spectra as a tool to study line profile variability in spectra of hot stars // Advances in Astronomy and Space Physics. 2012. Vol. 2. Pp. 5–8.
5. Sudnik N. P., Kholtygin A. F. Circular polarization observations and magnetic fields of O stars // AIP Conference Proceedings. 2012. Vol. 1429. Pp. 114–117.

#### **Личный вклад автора**

В статьях 1 и 3 создание большинства программ для анализа имеющихся наблюдательных данных и проведение вычислений принадлежат автору, вклад соавторов в постановку задачи и обсуждение одинаков; в статье 5 автору принадлежит большая часть вычислений, сбор и анализ статистических данных, вклад соавторов в постановку задачи и обсуждение одинаков.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

---

Подписано к печати 22.10.12. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Печ. л. 1,00.  
Тираж 100 экз. Заказ 5544

---

Отпечатано в Отделе оперативной полиграфии химического факультета СПбГУ  
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26  
Тел.: (812) 428-4043, 428-6919