

На правах рукописи



Душин Вячеслав Вячеславович

Спектральная переменность, структура атмосфер и рентгеновское излучение ОВ-звезд

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: Холтыгин Александр Федорович
д. ф.-м. н.

Официальные оппоненты: Бычков Константин Вениаминович
д. ф.-м. н.,
ГАИШ МГУ,
вед. науч. сотр.

Погодин Михаил Александрович
д. ф.-м. н.,
ст. науч. сотр.,
ГАО РАН,
гл. науч. сотр.

Ведущая организация: САО РАН

Защита состоится 8 декабря 2015 г. в 15 часов 30 минут 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 Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/590.html>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

к. ф.-м. н.



Миланова Ю.В.

Введение

Данная диссертация посвящена обнаружению и интерпретации переменности профилей линий в спектрах массивных звезд ранних спектральных классов (ОВА), поиску их магнитного поля и изучению влияния нестационарных процессов на отношение интенсивностей запрещенных и интеркомбинационных линий $R = f/i$.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Одной из наиболее важных проблем звездной астрофизики является изучение спектральной переменности звезд, особый интерес в этой связи представляют звезды ранних спектральных классов, профили линий в спектрах которых переменны на шкалах времени от нескольких суток до часов. Спектральные наблюдения горячих звезд в различных диапазонах: рентгеновском, УФ-, видимом — свидетельствуют о присутствии в атмосферах звезд структур различных размеров и плотностей [1–7] и [40]. Формирование этих структур объясняется вращением, нерадиальными пульсациями, образованием околос звездных дисков, струй и т. д. На образование крупномасштабных структур может оказывать влияние магнитное поле звезд [8–11].

Наличие магнитного поля у ОВА-звезд может служить одной из причин их сильного рентгеновского излучения. В рамках модели магнитно удерживаемой ударной волны (Magnetically confined wind-shock model, MCWS) потоки вещества звездного ветра направляются вдоль магнитных силовых линий к магнитному экватору, где сталкиваются, порождая стоячую ударную волну. При этом за ударной волной образуется протяженная горячая разреженная область, излучающая в рентгене, и тонкий плотный околос звездный диск в области магнитного экватора [8, 9].

Локальные магнитные поля, генерируемые в субповерхностных конвективных зонах, также способны привести к возмущению структуры звездного ветра [10, 11] и, как следствие, вызвать оптические микровспышки и рентгеновское излучение. У многих массивных ОВА-звезд обнаружено излучение в рентгеновском диапазоне, связанное с образованием областей горячей плазмы в ветрах этих звезд и с формированием локальных магнитных полей.

Также актуальной проблемой является исследование плотности звездных атмосфер. Рентгеновские наблюдения ОВ-звезд показали, что отношения интенсивностей $R = f/i$ в их спектрах для различных гелиеподобных ионов существенно меньше, чем теоретические отношения для стационарной плазмы в атмосферах ОВ-звезд (см., например, работы [12–14] и др.). Для объяснения малости отношения R для ОВ-звезд предложен ряд гипотез: воз-

можно, рентгеновское излучение образуется в более плотных структурах в атмосфере [15], возможно, на интенсивность линий диагностики влияет ультрафиолетовое излучение [12].

Гипотеза, рассмотренная в рамках данной работы, связывает аномально низкие соотношения R с нестационарными процессами в атмосферах звезд ранних спектральных классов. При регулярном прохождении по атмосфере ОВ-звезд ударных волн плазма регулярно нагревается до высоких температур 10^6 – 10^8 К [12, 16]. При быстрой смене процессов нагрева и охлаждения плазмы в звездных атмосферах, процесс заселения уровней становится существенно нестационарным и населенность уровней может сильно зависеть от времени. Это означает то, что условия в плазме звездного ветра могут быть существенно нестационарными. Данный факт может отразиться на мгновенных и средних (за время накопления сигнала) интенсивностях линий, а значит, и на диагностике плазмы из анализа отношения R .

Степень разработанности

Исследовательская часть работы состоит из трех основных частей: поиск магнитного поля, поиск микропеременностей профилей линий, поиск причин аномально низких отношений f/i для рентгеновских линий в спектрах ОВ-звезд.

Исследования по первым двум пунктам проводятся довольно долго.

Переменность в профилях линий в оптическом диапазоне была обнаружена еще в 50-х годах XX века в работах [17, 18], также переменность профилей H β , HeI, HeII была обнаружена в работах [19–22], впоследствии она была обнаружена и в других диапазонах: ИК- [23], УФ- [24–26] и рентгеновском [27–29].

Для ОВ-звезд также были проведены оценки величин магнитных полей: их напряженности имеют очень большой разброс: от < 100 Гс [30] до 20 кГс [31]. Данная работа является продолжением серии работ по поиску магнитного поля [32–34].

Последняя же часть является наименее исследованной: рентгеновские наблюдения ОВ-звезд показали, что отношения интенсивностей $R = f/i$ в их спектрах для различных гелиеподобных ионов существенно меньше, чем теоретические отношения для стационарной плазмы в атмосферах ОВ-звезд (см., например, работы [12–14] и др.). Были предложены несколько гипотез, объясняющих данное явление, но его природа пока не была до конца объяснена.

В данной работе мы предложили еще одну гипотезу, объясняющую аномально низкие отношения R (см. предыдущий пункт).

Цели диссертационной работы. Основной целью диссертационной работы является анализ микропеременности линий и измерение магнитного поля в звездах ранних спектральных классов. Важной целью работы является

ся исследование свечения горячей плазмы низкой плотности при нестационарном заселении уровней атомов и ионов, а также проверка гипотезы о влиянии нестационарного заселения уровней в плазме на отношение интенсивностей линий в спектрах этих звезд.

Научная новизна. В рамках данной работы были впервые применены методы вейвлет-анализа при анализе характерных размеров структур в атмосферах звезд, в результате чего получены свидетельства присутствия в атмосфере звезды ζ Ori Aa средне- и крупномасштабных структур. Обнаружены новые переменные компоненты в спектрах ζ Ori Aa и ε Per A. Дана верхняя оценка величины продольного компонента магнитного поля ε Per A. Также впервые было проведено исследование влияния нестационарного заселения уровней на интенсивность рентгеновских линий в спектрах OB-звезд.

Практическая и теоретическая значимость. Полученные результаты по поиску быстрой переменности в ε Per A и ζ Ori Aa могут быть использованы для построения моделей звезд подобных спектральных классов и классов светимостей. Результаты по измерению магнитного поля в тех же звездах были использованы при составлении базы данных магнитных полей звезд. Разработанные автором диссертации программы поиска магнитного поля с помощью алгоритма LSD могут быть использованы для анализа поляриметрических наблюдений магнитных звезд.

Разработанная методика исследования влияния нестационарного заселения уровней в различных ионах и код, написанный для этого, могут быть использованы в дальнейших исследованиях влияния нестационарных процессов в атмосферах горячих звезд, газовых туманностей, межзвездной и межгалактической среды на их спектры.

Методы исследования. Для исследования быстрой переменности профилей линий применялись методы Фурье- и вейвлет-анализа, для оценки величины напряженности продольного магнитного поля применялся метод LSD [35] и МДМ [36, 37] (см. подробнее в содержании работы). Моделирование интенсивностей линий проводилось численными методами, на основе кода APES [38].

Результаты и положения, выносимые на защиту

- Обнаружение короткопериодических вариаций профилей линий в звезде ζ Ori Aa с периодами от 1 до 3 часов, возможно, связанных с нерадиальными пульсациями.
- Обнаружение короткопериодических вариаций профилей линий в звезде ε Per A с частотами 3.8–13 сут.⁻¹, также, возможно, связанных с нерадиальными пульсациями.
- Обнаружение крупно- и среднемасштабных переменных компонентов вариаций профилей линий в спектре звезды ε Per A, возможно, связан-

ных с нерадиальными пульсациями и вращательной модуляцией профилей. Масштабы неоднородностей составляют $s = 50\text{--}70$ км/с и $s = 10\text{--}15$ км/с соответственно.

- Оценка верхнего предела величины эффективного магнитного поля звезды ε Per A: $\langle \vec{B}_l \rangle = 200 \pm 100$ Гс.
- Обнаружение значительного влияния нестационарного заселения уровней на мгновенное (до почти трех порядков) и среднее (до 20%) отношение интенсивностей линий $R = f/i$, а также на оценку n_e по среднему отношению $R = f/i$ (до почти двух порядков).

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях, семинарах и симпозиумах:

- Конференция «Магнитные звезды», САО РАН, п. Нижний Архыз, Россия, 27 августа – 1 сентября 2010 г.
- Студенческая конференция «Science and Progress», СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, 15–19 ноября 2010 г.
- Конференция «JENAM 2011. European Week of Astronomy and Space Science», Санкт-Петербург, Россия, 4–8 июля 2011 г.
- Семинар «AtomDB Work week and Workshop — 2012», CfA, Cambridge, MA, США, 6–10 августа 2012 г.
- Молодежная астрономическая конференция «Наблюдаемые проявления эволюции звезд», САО РАН, п. Нижний Архыз, Россия, 15–19 октября 2012 г.
- Симпозиум IAU «Magnetic Fields Throughout Stellar Evolution», Biarritz, Франция, 25–30 августа 2013 г.
- Конференция «Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars», Москва, Россия, 3–7 июля 2013 г.
- Конференция «Magnetism and Variability in O stars», Amsterdam, Нидерланды, 17–19 сентября 2014 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в восьми работах, из них три статьи — в рецензируемых журналах, три статьи опубликованы в сборнике трудов конференций и две — в сборниках тезисов докладов, остальные материалы опубликованы онлайн. Основные материалы диссертации опубликованы в работах [34, 40, 42], где соискатель был основным соавтором, и в [43–45], где он был одним из соавторов, а также тезисах и материалах конференций: [46, 47].

Личный вклад автора. Обработка результатов, представленных в статьях [34, 40, 44], и написание кода LSD в статье [40] было сделано автором. В статье [42] модификация программы APES и дополнительный код в среде Mathematica также был сделан автором. Часть результатов по статистике магнитных полей, представленные в статьях [43, 45] получены автором. Результаты представленные в докладах на конференциях [46, 47] также получены автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из четырех глав, двух приложений, 15 таблиц, 75 рисунков, 145 страниц, вступления и заключения. Список цитируемой литературы состоит из 159 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** приводится исторический обзор исследования переменности профилей линий в спектрах массивных OB-звезд и измерения магнитного поля у этих типов звезд. Приводится обзор рентгеновских наблюдений OB-звезд, а также объясняется возможная связь между наличием у звезд магнитного поля и нестационарным заселением уровней, и как это может влиять на отношение интенсивностей линий. Обосновывается актуальность работы, описывается разработанность темы, описываются основные цели и задачи диссертации, научная новизна, практическая и теоретическая значимость и методы исследования. Также в этом разделе диссертации сформулированы результаты, выносимые на защиту, приводится список конференций и работ, где были представлены результаты данного исследования, указан личный вклад автора.

В **главе 1** описаны различные способы исследования переменности профилей линий: TVS — temporal variance spectrum analysis (анализ временной переменности спектра) и smTVS — smooth TVS (сглаженный TVS), Фурье-анализ, вейвлет-анализ, а также методы поиска магнитного поля: LSD — least squares deconvolution (обращение свертки наименьших квадратов), PCA — principal component analysis (анализ главных компонент).

В **главе 2** представлены результаты спектрополяриметрических наблюдений сверхгиганта ζ Ori Aa на 6-м телескопе БТА. Обнаружены регулярные вариации профилей линий в спектре звезды с периодом 1–3 часа. Положение звезды ζ Ori Aa на пульсационной диаграмме показано на Рисунке 1. Указывается на их возможную связь с нерадиальными фотосферными пульсациями. Приводятся результаты поиска возможного слабого магнитного поля у ζ Ori Aa. Наблюдения не подтвердили наличие магнитного поля у звезды.

Результаты второй главы опубликованы в работе [34].

В **главе 3** представлены результаты спектрополяриметрических наблюдений высокого разрешения ($R = 60\,000$) субгиганта ϵ Per A спектрального

подтипа В0.5. Обнаружены регулярные компоненты вариаций профилей линий с частотами 3.82–12.99 сут.⁻¹. Положение звезды ϵ Per A на пульсационной диаграмме показано на Рисунке 1.

Показана возможная связь между нерадиальными пульсациями звезды и найденными регулярными вариациями профилей. Выполнен вейвлет-анализ разностных профилей линий в спектре ϵ Per A. Обнаружены два максимума амплитуды вейвлет-спектра: на масштабах 10–20 км/с и 50–60 км/с. Предполагается, что первый максимум соответствует амплитуде флуктуаций поля скоростей крупномасштабных движений в нерадиально пульсирующей фотосфере звезды, тогда как второй связан с вариацией полуширины профилей линий в спектре звезды. Получен верхний предел эффективного магнитного поля звезды.

Результаты третьей главы опубликованы в работе [40].

В **главе 4** представлены результаты моделирования нестационарных процессов заселения уровней высокоионизованных атомов в расширяющихся атмосферах звезд ранних спектральных классов. Исследовано влияние этих процессов на отношение $R = f/i$ интенсивностей запрещенных и интеркомбинационных линий гелиеподобных ионов (CV, NVI, OVII и др.) в рентгеновской области спектра. Показано, что при учете нестационарности заселения уровней, мгновенное отношение R_m может меняться на коротких временных шкалах (доли секунд) на почти три порядка относительно стационарного значения в равновесной плазме (см. Рисунок 2). В то же время усредненное по длительным интервалам времени (минуты и часы) отношение R_a может измениться на 20%, что приводит к переоценке значения электронной концентрации на 1–2 порядка.

Результаты четвертой главы опубликованы в работе [42].

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации: обнаружена переменность профилей линий в спектре звезды ζ Ori Aa с периодами от одного до трех часов, обнаружены регулярные короткопериодические вариации профилей линий в спектре ϵ Per A с частотами 3.8–13 сут.⁻¹, получена оценка верхней границы магнитного поля для ϵ Per A: $\langle \vec{B}_l \rangle = 210 \pm 100$ Гс, с помощью вейвлет-анализа обнаружено наличие средне- ($s = 10$ –15 км/с) и крупномасштабных деталей ($s = 50$ –70 км/с) в переменном спектре звезды.

Доказано влияние нестационарных процессов на мгновенное отношение R_m запрещенных и интеркомбинационных линий: уменьшение R_m до почти 3-х порядков величины на шкалах времени в доли секунд, и на среднее R_a за период наблюдения — до 20%. Последнее может вести к переоценке электронной концентрации плазмы в области излучения рентгеновских линий n_e до 2-х порядков.

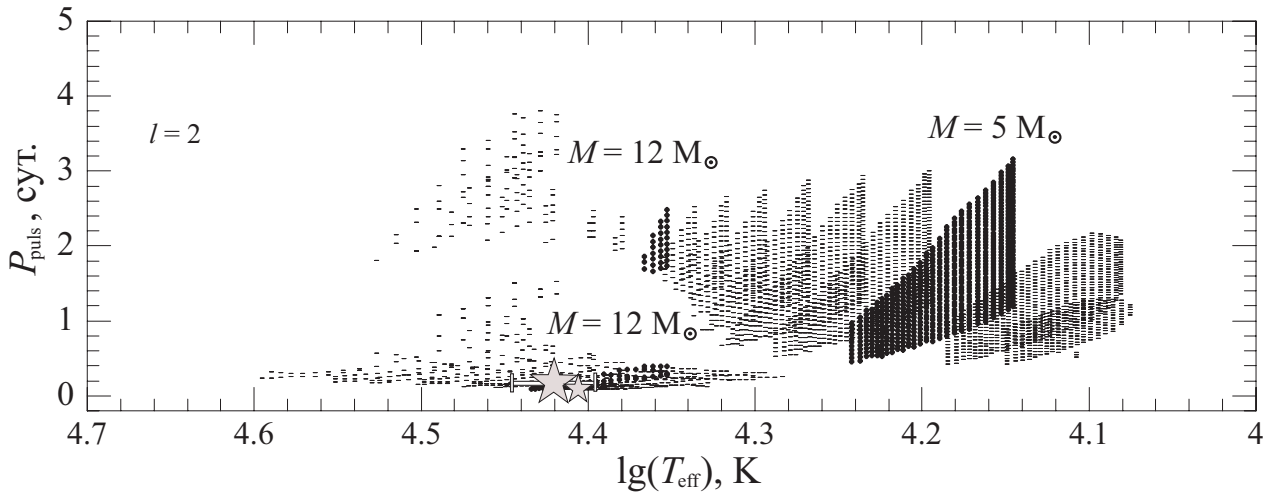


Рис. 1. Периоды пульсаций в квадрупольной моде $l = 2$ для звезд типа β Сер и медленно пульсирующих SPB-звезд в интервале эффективных температур $T = 10^4 - 5 \cdot 10^4$ К (жирные точки и пунктир показывают зону пульсационной неустойчивости, согласно [39]). Звездочками указано положение ζ Ori Aa и ϵ Per A на этой диаграмме. Бар ошибок определения эффективной температуры показан для ϵ Per A

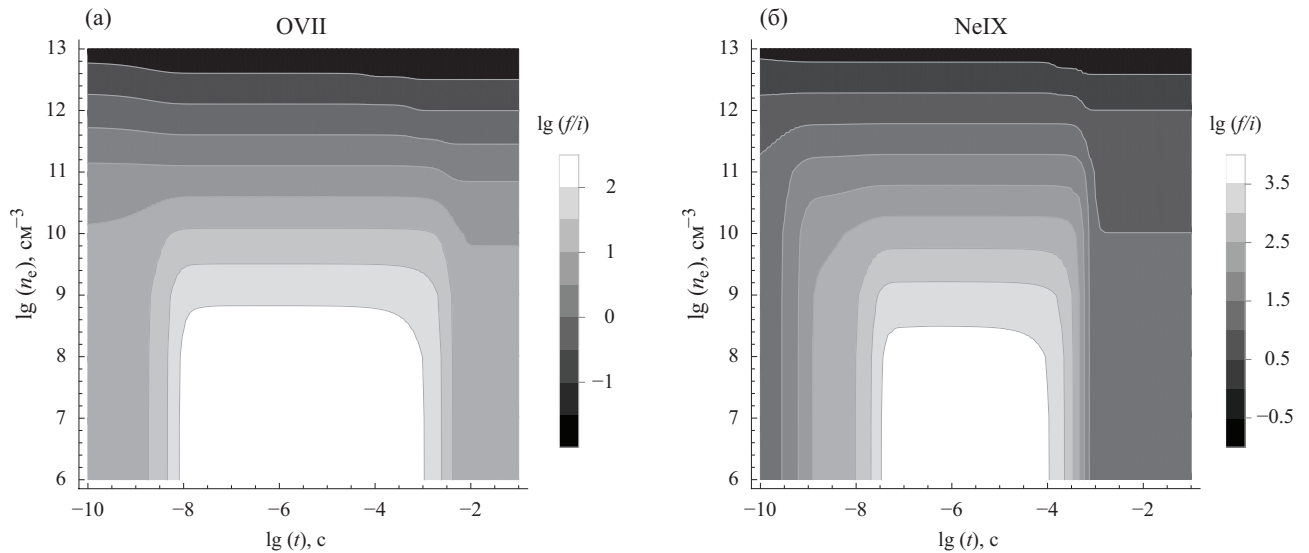


Рис. 2. Зависимость отношения R_m от времени и электронной концентрации для различных ионов в модели быстрого охлаждения плазмы. В момент $t = 0$ плазма мгновенно охлаждается от $T_e = 10^7$ К до $T_e = 10^6$ К; далее температура остается постоянной

Цитированная литература

1. Kaper L., Henrichs H. F., Nichols J. S. et al. Long- and short-term variability in O-star winds. I. Time series of UV spectra for 10 bright O stars. // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1996. Vol. 116. P. 257–287.
2. Kaper L., Henrichs H. F., Nichols J. S., Telting J. H. Long- and short-term variability in O-star winds. II. Quantitative analysis of DAC behaviour // *Astronomy and Astrophysics*. 1999. Vol. 344. P. 231–262.
3. Kaper L., Henrichs H. F., Fullerton A. W. et al. Coordinated ultraviolet and H α spectroscopy of bright O-type stars. // *Astronomy and Astrophysics*. 1997. Vol. 327. P. 281–298.
4. Kaufer A., Stahl O., Wolf B. et al. Long-term spectroscopic monitoring of BA-type supergiants. I. H α line-profile variability. // *Astronomy and Astrophysics*. 1996. Vol. 305. P. 887–901.
5. Lépine S., Moffat A. F. J., Henriksen R. N. Wind Inhomogeneities in Wolf-Rayet Stars. I. Search for Scaling Laws Using Wavelet Transforms // *The Astrophysical Journal*. 1996. Vol. 466. P. 392–403.
6. de Jong J. A., Henrichs H. F., Schrijvers C. et al. Non-radial pulsations in the O stars XI Persei and lambda Cephei // *Astronomy and Astrophysics*. 1999. Vol. 345. P. 172–180.
7. de Jong J. A., Henrichs H. F., Kaper L. et al. A search for the cause of cyclical wind variability in O stars // *Astronomy and Astrophysics*. 2001. Vol. 368, no. 2. P. 601–621.
8. Babel J., Montmerle T. On the Periodic X-Ray Emission from θ^1 Orionis C // *The Astrophysical Journal*. 1997. Vol. 485, no. 1. P. L29–L32.
9. Babel J., Montmerle T. X-ray emission from Ap-Bp stars: a magnetically confined wind-shock model for IQ Aur. // *Astronomy and Astrophysics*. 1997. Vol. 323. P. 121–138.
10. Cantiello M., Braithwaite J. Magnetic spots on hot massive stars // *Astronomy and Astrophysics*. 2011. Vol. 534. P. A140.
11. Cantiello M., Langer N., Brott I. et al. Sub-surface convection zones in hot massive stars and their observable consequences // *Astronomy and Astrophysics*. 2009. Vol. 499, no. 1. P. 279–290.

12. Waldron W. L., Cassinelli J. P. Chandra Discovers a Very High Density X-Ray Plasma on the O Star ζ Orionis // *The Astrophysical Journal*. 2001. Vol. 548, no. 1. P. L45–L48.
13. Kahn S. M., Leutenegger M. A., Cottam J. et al. High resolution X-ray spectroscopy of zeta Puppis with the XMM-Newton reflection grating spectrometer // *Astronomy and Astrophysics*. 2001. Vol. 365, no. 1. P. L312–L317.
14. Schulz N. S., Canizares C., Huenemoerder D., Tibbets K. X-Ray Modeling of Very Young Early-Type Stars in the Orion Trapezium: Signatures of Magnetically Confined Plasmas and Evolutionary Implications // *The Astrophysical Journal*. 2003. Vol. 595, no. 1. P. 365–383.
15. Александрова О. В., Бычков К. В. Возможная роль облачной структуры ветра в рентгеновском излучении двойной системы HD 193793 // *Астрономический журнал*. 2000. Т. 77, № 12. С. 883.
16. Schulz N. S., Testa P., Huenemoerder D. P. et al. X-Ray Variability in the Young Massive Triple θ^2 Orionis A // *The Astrophysical Journal*. 2006. Vol. 653, no. 1. P. 636–646.
17. Levee R. D. Variations in the Spectrum of Sigma Scorpii. // *The Astrophysical Journal*. 1952. Vol. 115. P. 402–417.
18. Underhill A. B. The hydrogen lines of 9 Sagittae, O7f. // *The Astronomical Journal*. 1959. Vol. 64. P. 347.
19. Brucato R. J. Time variations in the emission lines of Of stars. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1971. Vol. 153. P. 435–452.
20. Conti P. S., Leep E. M. Spectroscopic observations of O-type stars.V. The hydrogen lines and lambda 4686 HeII. // *The Astrophysical Journal*. 1974. Vol. 193. P. 113–124.
21. Smith M. A. Nonradial pulsations in early to mid-B stars // *The Astrophysical Journal*. 1977. Vol. 215. P. 574–583.
22. Buta R. J., Smith M. A. The light variations of nonradial pulsators – Theory and application to the line profile variable 53 Persei // *The Astrophysical Journal*. 1979. Vol. 232-235. P. 213.
23. Kaufl H. U. Infrared Observations of Atomic Hydrogen Lines in Zeta-Puppis // *Astronomy and Astrophysics*. 1993. Vol. 272. P. 452–454.

24. Underhill A. B. Circumstellar lines in the spectrum of Eta Canis Majoris // The Astrophysical Journal. 1975. Vol. 199. P. 691–693.
25. Morton D. C. P Cygni profiles in zeta Ophiuchi and zeta Puppis // The Astrophysical Journal. 1976. Vol. 203. P. 386–398.
26. Snow T. P. J., Morton D. C. Copernicus ultraviolet observations of mass-loss effects in O and B stars // The Astrophysical Journal Supplement Series. 1976. Vol. 32. P. 429–465.
27. Harnden F. R. J., Branduardi G., Gorenstein P. et al. Discovery of an X-ray star association in VI Cygni /Cyg OB2/ // The Astrophysical Journal. 1979. Vol. 234. P. L51–L54.
28. Seward F. D., Forman W. R., Giacconi R. et al. X-rays from Eta Carinae and the surrounding nebula // The Astrophysical Journal. 1979. Vol. 234. P. L55–L58.
29. Ku W. H. M., Chanan G. A. Einstein observations of the Orion Nebula // The Astrophysical Journal. 1979. Vol. 234. P. L59–L63.
30. Bouret J.-C., Donati J.-F., Martins F. et al. The weak magnetic field of the O9.7 supergiant ζ Orionis A // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2008. Vol. 389, no. 1. P. 75–85.
31. Wade G. A., Apellániz J. M., Martins F. et al. NGC 1624-2: a slowly rotating, X-ray luminous Of?p star with an extraordinarily strong magnetic field // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2012. Vol. 425, no. 2. P. 1278–1293.
32. Холтыгин А. Ф., Фабрика С. Н., Драке Н. А. и др. Статистика магнитных полей OB-звезд // Письма в астрономический журнал. 2010. Т. 36, № 5. С. 389–400.
33. Холтыгин А. Ф., Фабрика С. Н., Драке Н. А. и др. Эволюция магнитного поля OBA-звезд // Кинематика и физика небесных тел. 2010. Т. 26, № 4. С. 52–70.
34. Душин В. В., Холтыгин А. Ф., Чунтонов Г. А. Микропеременность профилей спектральных линий и магнитные поля звезд ранних спектральных классов: ζ Ori A // Астрофизический бюллетень. 2012. Т. 67, № 1. С. 71–77.

35. Donati J.-F., Semel M., Carter B. D. et al. Spectropolarimetric observations of active stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1997. Vol. 291. P. 658–682.
36. Холтыгин А. Ф., Судник Н. П., Бурлакова Т. Е., Валявин Г. Г. Микропеременность профилей линий в спектрах OB-звезд: сверхгигант λ Cep (O6If(n)) // *Астрономический журнал*. 2011. Т. 88, № 12. С. 1197–1207.
37. Kholtygin A. F. Modified methods of stellar magnetic field measurements // *Astronomische Nachrichten*. 2014. Vol. 335, no. 10. P. 1049–1059.
38. Smith R. K., Brickhouse N. S., Liedahl D. A., Raymond J. C. Collisional Plasma Models with APEC/APED: Emission-Line Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions // *The Astrophysical Journal*. 2001. Vol. 556, no. 2. P. L91–L95.
39. Pamyatnykh A. A. Pulsation Instability Domains in the Upper Main Sequence // *Acta Astronomica*. 1999. Vol. 49. P. 119–148.

Список публикаций

40. Душин В. В., Холтыгин А. Ф., Чунтонов Г. А., Кудрявцев Д. О. Быстрая спектральная переменность ε Per A // *Астрофизический бюллетень*. 2013. Т. 68, № 2. С. 195–206.
41. Душин В. В., Холтыгин А. Ф., Чунтонов Г. А. Микропеременность профилей спектральных линий и магнитные поля звезд ранних спектральных классов: ζ Ori A // *Астрофизический бюллетень*. 2012. Т. 67, № 1. С. 71–77.
42. Душин В. В., Холтыгин А. Ф. Нестационарные процессы в атмосферах звезд ранних спектральных классов: влияние на отношение интенсивностей запрещенных и интеркомбинационных линий (f/i) // *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92, № 7. С. 578–586.
43. Kholtygin A. F., Hubrig S., Drake N. A., Sudnik, N. P., Dushin, V. V. Magnetic fields of OB stars // *Proc. IAU*. 2014. Vol. 9, no. S302. P. 270–271.
44. Kholtygin A. F., Chountonov G. A., Dushin V. V. Line Profile Variability and a Possible Magnetic Field in the Spectra of Supergiant ζ Ori Aa // *Proc. of conf. «Magnetic Stars» SAO RAS, August 27–September 1, 2010*. 2011. P. 355–360.

45. Kholtygin A. F., Hubrig S., Drake N. A., Sudnik, N. P., Dushin, V. V. Statistics of magnetic fields on OBA stars // Proc. of conf. «Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars». 2014. P. 403–408.
46. Dushin V. V., Kholtygin A. F. Science and Progress 2010. Conference Abstracts. СПбГУ, 2010. P. 43.
47. Dushin V. V., Chountonov G. A., Kholtygin A. F. JENAM-2011. Book of abstracts. ГАО РАН, 2011. P. 76.