

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ П.К.Штернберга

На правах рукописи
УДК 524.3

Рябчикова Татьяна Александровна

ХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА АТМОСФЕР МАГНИТНЫХ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

Специальность 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте Астрономии Российской Академии наук.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Гринин Владимир Петрович
заведующий лабораторией звездообразования
Главной Астрономической обсерватории РАН
(Пулково)

доктор физико-математических наук,
профессор, академик АН Республики Татарстан
Сахибуллин Наиль Абдуллович
заведующий кафедрой астрономии и космической
геодезии Казанского (Приволжского) Федераль-
ного Университета

доктор физико-математических наук,
Утробин Виктор Павлович
ведущий научный сотрудник Федерального госу-
дарственного бюджетного учреждения "Государ-
ственный Научный Центр Российской Федера-
ции Институт Теоретической и Эксперименталь-
ной Физики"

Ведущая организация: Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Защита состоится 15 мая 2014 г. в 14 ч. 00 мин на заседании Диссертацион-
ного Совета Д501.001.86 при Московском государственного университета имени
М.В.Ломоносова. Адрес: 119992, г. Москва, Университетский проспект, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского госу-
дарственного университета имени М.В.Ломоносова (119991, г. Москва, Ломо-
носовский проспект, 27, Фундаментальная библиотека)

Автореферат разослан 12 февраля 2014 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
доктор физико-математических наук



С.О. Алексеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Химически пекулярные звезды (CP stars) являются звездами верхней части Главной Последовательности (ГП), которые имеют в спектрах аномально сильные линии некоторых химических элементов (He, Hg, Mn, Si, Cr, Sr, Eu). Такие особенности в спектрах этих звезд были замечены еще в конце XIX века при работе с классификацией звезд по Гарвардским пластинкам и были отмечены буквой 'P'. Все CP звезды разделяются на две большие группы: магнитные (Vp-Ap или в более общем виде Ap) и немагнитные (HgMn и Am звезды). В атмосферах HgMn и Am (звезды с усиленными линиями металлов) глобальных магнитных полей не зарегистрировано. На диаграмме Герцшпрунга-Рассела (ГР) все CP звезды расположены в полосе ГП в интервале температур примерно от 17000 до 6000 К, причем самыми горячими являются He-strong звезды, а самыми холодными – SrCrEu, Am и Sr- звезды. По кинематическим характеристикам CP звезды принадлежат тонкому диску Галактики с возрастом около 109 лет. Магнитные звезды (Ap/Vp) - это подкласс CP звезд ГП, в атмосферах которых зарегистрировано крупномасштабное магнитное поле. В первом приближении геометрия магнитного поля может быть представлена магнитным диполем или комбинацией диполь + квадруполь. Как и другие CP звезды магнитные звезды имеют в спектрах аномально усиленные или ослабленные (например, линии He I) линии некоторых химических элементов. Магнитные звезды расположены в центральной части ГП в диапазоне спектральных классов B5 - F5 (4 - 1.5 масс Солнца; 15000 - 6500 К по эффективной температуре). Диапазон измеренных магнитных полей в магнитных звездах очень велик и составляет 90 - 20000 гаусс для продольного поля и 1250 - 34000 гаусс для поверхностного поля. У подавляющего числа магнитных звезд напряженность поля периодически меняется, причем эти изменения сопровождаются, как правило, изменением с тем же периодом интенсивности линий аномальных элементов в

фазе или в противофазе с магнитным полем. Переменность магнитного поля и интенсивности линий объясняются в рамках модели наклонного ротатора, согласно которой ось магнитного поля наклонена под произвольным углом к оси вращения звезды, а неоднородное распределение химических элементов по поверхности определяется магнитной геометрией. При вращении такой звезды наблюдатель видит разные проекции дипольного поля и связанных с ним неоднородностей химического состава. Предполагается, что пятнистая структура поверхности магнитных пекулярных звезд связана с магнитным полем (см., например, Lüftinger et al., 2010).

Ввиду того, что по общим характеристикам – температуре, массе, светимости, профилям водородных линий, Ар звезды не отличаются от нормальных звезд ГП, предполагается, что наблюдаемые аномалии химического состава Ар звезд относятся не ко всей звезде, а только к самым поверхностным слоям – звездной атмосфере, которая составляет $\sim 4 \times 10^{-4}$ радиуса звезды. Для объяснения химии Ар звезд Michaud (1970) рассмотрел процесс создания химических аномалий в звездных атмосферах, устойчивых по отношению к турбулентным движениям, в котором происходит диффузия элемента под совокупным действием гравитационного осаждения и радиационного ускорения. В зависимости от преобладания одного из процессов химический элемент может 'тонуть' вглубь со дна конвективной зоны (наилучший пример – гелий) или всплывать и накапливаться в атмосфере. Конвективная зона (например, зона HII), выполняет роль резервуара, обеспечивающего накопление элемента в верхних радиационных слоях атмосферы. Michaud et al. (1976) рассчитали диффузию химических элементов в оболочках звезд с массами от одной до пяти солнечных масс. Под оболочками здесь подразумеваются слои от фотосферы и глубже. Эти первые приблизительные расчеты показали, что некоторые элементы, Mg, Ca, должны иметь дефицит содержания в звездах с $1.2 - 2.0 M_{\odot}$, тогда как элементы железного пика должны наблюдаться в избытке, начиная с массы $1.4 M_{\odot}$, что соответствует эффективной температуре 6500 K. Интересно, что само железо должно наблюдаться в дефиците вплоть до $T_{\text{eff}}=9000$ K. Чтобы правильно рассчитать

конечное распределение по глубине в атмосфере звезды необходимо учитывать детальную структуру атомов каждого элемента в первых стадиях ионизации и решать уравнение переноса для большого количества частот. Такие расчеты были проведены Бабелем (Babel, 1992) для элементов Ca, Ti, Cr, Mn, Sr для температуры 8500 K, и впервые было показано, что в атмосфере звезды диффузия приводит к резким градиентам в распределении содержания элементов. В первом приближении это распределение можно представить ступенчатой функцией со скачком на глубине верхней границы конвективной зоны HII, которая по критерию Шварцшильда соответствует $\log \tau_{5000} \sim -0.6$. Точность спектральных наблюдений того времени не позволила детально исследовать химическое строение атмосфер Ap звезд, чтобы подтвердить или опровергнуть теорию диффузионного разделения элементов. Необходимость детального исследования строения атмосфер Ap звезд стало особенно важным после открытия нерадиальных пульсаций Ap звезд (Kurtz, 1978). Пульсации были открыты по фотометрическим наблюдениям, но затем были подтверждены по изменению лучевых скоростей (RV) линий (Kanaan & Hatzes, 1998; Malahushenko et al., 1998). Исследование отдельных линий показало, что переменность RV имеет избирательный характер (Саванов и др., 1999; Kochukhov & Ryabchikova, 2001), что безусловно отражает особенности химического строения атмосфер пульсирующих Ap (roAp - rapidly oscillating Ap) звезд.

Цели и задачи диссертационной работы

Основной задачей диссертации является детальное исследование химической структуры атмосфер магнитных пекулярных звезд и построение модели, адекватно объясняющей наблюдаемые спектральные особенности этих звезд: профили спектральных линий, аномалии химического состава, распределение энергии в спектрах, пульсационные характеристики спектральных линий. Такое исследование, основанное на современной спектроскопии высокого разрешения, возможно только при наличии соответствующих по точности данных по атомным параметрам спектральных линий. Поэтому, сбор, классификация, критический анализ данных и создание на этой основе базы данных атомных параметров спектральных линий VALD, являются существенной частью диссертации.

Научная новизна работы

В ходе выполнения диссертации впервые было получено несколько важных результатов:

- Предложена новая классификация уровней энергии двукратно-ионизованного атома Nd, что позволило существенно увеличить количество линий этого важного для анализа спектров Ar и roAr звезд элемента.
- Получены эмпирические вероятности переходов линий Ga II, включенные в базу данных VALD.
- Получено наблюдательное подтверждение диффузионного разделения элементов в атмосферах Ar звезд как по анализу усредненного содержания элементов, так и по анализу профилей индивидуальных линий (стратификация химических элементов в атмосфере).
- Обнаружена и исследована температурная зависимость наблюдаемой аномалии редкоземельных элементов (REE-аномалия), определяющая эмпирическое положение верхней границы полосы неустойчивости пульсирующих Ar (roAr) звезд. REE-аномалия есть разность меж-

ду содержаниями редкоземельных элементов, полученных отдельно по линиям первых и вторых ионов.

- Для Ar звезд предложено объяснение наблюдаемых аномалий профилей линий инфракрасного триплета Ca II как результат дифференциального разделения изотопов Ca в атмосфере, вызванного, вероятно, совместным действием радиационной диффузии и светоиндуцированного дрейфа.
- Предложена модель распределения редкоземельных элементов в виде слоя высокой концентрации в верхних слоях атмосферы звезды выше $\lg \tau_{5000} = -3$, объясняющая наблюдаемые REE-аномалии. Такое распределение подтверждается расчетами при учете отклонения от термодинамического равновесия.
- Построена модель распределения химических элементов в атмосфере γ Ar звезд, объясняющая наблюдаемые характеристики пульсационной волны.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Создание информативной части Венской базы атомных параметров спектральных линий VALD.
2. Отождествление и классификация линий Nd III в спектрах Ar-звезд и определение сил осцилляторов линий Ga II.
3. Исследование температурной зависимости содержаний Fe и Cr в атмосферах магнитных пекулярных звезд и объяснение этой зависимости в рамках диффузионной теории.
4. Результаты комплексного исследования PrNd-аномалий в Ar и γ Ar звездах; предсказание и обнаружение пульсаций в атмосферах звезд по наблюдаемым PrNd-аномалиям.

5. Обнаружение резких высотных градиентов в содержаниях элементов от Si до Zr со значительными концентрациями этих элементов в глубоких слоях атмосферы; исследование стратификации Ca в Ar-Vr звездах и модель стратификационного разделения изотопов Ca в их атмосферах.
6. Эффективный тест, основанный на неравновесной ионизации, для проверки нашей гипотезы формирования линий редкоземельных элементов Pr и Nd во внешних слоях атмосферы.
7. Определение пульсационных характеристик индивидуальных линий в атмосфере γ Ar звезды HD 24712 и модель распространения пульсационной волны.

Научная и практическая ценность работы

Научная и практическая значимость исследований определяется тем, что все основные результаты используются в научных и прикладных работах как в нашей стране, так и за рубежом. Особенно это относится к базе данных VALD, которой регулярно пользуются более 1700 спектроскопистов из 52 стран. В некоторых университетах США VALD включен в программу практических занятий по спектральному анализу. Протестированы различные программы детального анализа звездных атмосфер, такие как LLmodels, SYNTH3 WIDTHmf, BINMAG ddaFIT, необходимые для исследования спектров звезд с высоким спектральным разрешением, получаемых с современными спектральными приборами. Методы стратификационного анализа активно используются в ряде астрономических учреждений России, например, в CAO РАН (Семенко и др., 2008a,b; Титаренко и др., 2012). Результаты анализа стратификации химических элементов в атмосферах Ar звезд, проведенного на основе спектров высокого разрешения с использованием самых современных методов спектрального анализа, являются необходимым элементом как для развития и усовершенствования теоретических расчетов, так и для улучшения методов анализа наблюдений.

Модель слоистой структуры атмосфер Ap звезд с концентрацией элементов группы железа и редкоземельных элементов в разных слоях атмосферы звезды, впервые предложенная нами в 2002 и детально разработанная в настоящей диссертации, является основной моделью при экспериментальных и теоретических исследованиях пульсаций в атмосферах roAp звезд.

Общая цитируемость представленных к защите работ превышает 1000.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Shulyak D., Ryabchikova T., and Kochukhov, O. "Fundamental parameters of bright Ap stars from wide-range energy distributions and advanced atmospheric models". *Astron. Astrophys.* **551**, A14, 10 pp. (2013)
2. Alentiev, D., Kochukhov, O., Ryabchikova, T., Cunha, M., Tsymbal, V., Weiss, W. "Discovery of the longest period rapidly oscillating Ap star HD 177765". *MNRAS* **421**, L82-L86 (2012)
3. Fossati L., Ryabchikova T., Shulyak D. V., Haswell C. A., Elmasli A., Pandey C. P., Barnes T. G., and Zwintz K. "The accuracy of stellar atmospheric parameter determinations: a case study with HD 32115 and HD 37594". *MNRAS* **417**, 495-507 (2011)
4. Ryabchikova T., Leblanc F., and Shulyak, D. "Modelling the Atmospheres of Peculiar Magnetic Stars". In *Magnetic Stars*, Proc. Int. Conf, eds. I.I Romanuyk and D.O.Kudryavtsev, 69-80 (2011)
5. Shulyak D., Ryabchikova T., Kildiyarova R., and Kochukhov O. "Realistic model atmosphere and revised abundances of the coolest Ap star HD 101065". *Astron. Astrophys.* **520**, A88, 12 pp. (2010)
6. Saio H., Ryabchikova T., and Sachkov M. "Pulsations in the atmosphere of the roAp star HD24712 - II. Theoretical models". *MNRAS* **403**, 1729-1738 (2010)

7. Ryabchikova T., Fossati L., and Shulyak D. "Improved fundamental parameters and LTE abundances of the CoRoT solar-type pulsator HD 49933". *Astron. Astrophys.* **506**, 203-211 (2009)
8. Fossati L., Ryabchikova T., Bagnulo S., Alecian E., Grunhut J., Kochukhov O., and Wade G. "The chemical abundance analysis of normal early A- and late B-type stars". *Astron. Astrophys.* **503**, 945-962 (2009)
9. Shulyak D., Ryabchikova T., Mashonkina L., and Kochukhov O. "Model atmospheres of chemically peculiar stars. Self-consistent empirical stratified model of HD 24712". *Astron. Astrophys.* **499**, 879-890 (2009)
10. Kochukhov O., Shulyak D., and Ryabchikova T. "A self-consistent empirical model atmosphere, abundance and stratification analysis of the benchmark roAp star α Circini". *Astron. Astrophys.* **499**, 851-863 (2009)
11. Mashonkina L., Ryabchikova T., Ryabtsev A., and Kildiyarova R. "Non-LTE line formation for Pr II and Pr III in A and Ap stars". *Astron. Astrophys.* **495**, 297-311 (2009)
12. Kochukhov, O. Bagnulo S., Lo Curto G., and Ryabchikova T. "Discovery of very low amplitude 9-minute multiperiodic pulsations in the magnetic Ap star HD 75445". *Astron. Astrophys.* **493**, L45-L48 (2009)
13. Ryabchikova T. "Abundance structure of the atmospheres of magnetic CP stars". *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **38**, 257-266. (2008)
14. Ryabchikova T., Kochukhov O., and Bagnulo S. "Isotopic anomaly and stratification of Ca in magnetic Ap stars". *Astron. Astrophys.* **480**, 811-823 (2008)
15. Kochukhov O., Ryabchikova T., Bagnulo S., and Lo Curto G. "The discovery of high-amplitude, 10.9-minute oscillations in the cool magnetic Ap star HD 115226". *Astron. Astrophys.* **479**, L29-L32 (2008)
16. Ryabchikova, T. Kildiyarova, R., Piskunov, N., Heiter, U., Fossati, L., & Weiss, W. W. "A comparative analysis of the laboratory and theoretical

- transition probabilities of the Fe-peak elements for a new release of VALD". J. Phys. Conf. Ser. **130**, id.012017, 7 pp. (2008)
17. Ryabchikova T., Sachkov M., Weiss W. W., Kallinger T., Kochukhov O., Bagnulo S., Ilyin I., Landstreet J. D., Leone F., Lo Curto G., Lüftinger T., Lyashko D., and Magazzù A. "Pulsation in the atmosphere of the roAp star HD 24712. I. Spectroscopic observations and radial velocity measurements". Astron. Astrophys. **462**, 1103-1112 (2007)
 18. Kochukhov O., Tsymbal V., Ryabchikova T., Makaganyk V. and Bagnulo S. "Chemical stratification in the atmosphere of Ap star HD 133792". Astron. Astrophys. **460**, 831-842 (2006)
 19. Ryabchikova T., Ryabtsev A., Kochukhov O., and Bagnulo S. "Rare-earth elements in the atmosphere of the magnetic chemically peculiar star HD 144897. New classification of the Nd III spectrum". Astron. Astrophys. **456**, 329-338 (2006)
 20. Ryabchikova T., Kochukhov, O., Kudryavtsev, D., Romanyuk, I., Semenko, E., Bagnulo, S., Lo Curto, G., North, P., and Sachkov, M. "HD 178892 - a cool Ap star with extremely strong magnetic field" 2006, Astron. Astrophys. **445**, L47-L50 (2006)
 21. Mashonkina L., Ryabchikova T., and Ryabtsev A. "NLTE ionization equilibrium of Nd II and Nd III in cool A and Ap stars". Astron. Astrophys. **441**, 309-318 (2005)
 22. Ryabchikova T., Leone F., and Kochukhov O. "Abundances and chemical stratification analysis in the atmosphere of Cr-type Ap star HD 204411". Astron. Astrophys. **438**, 973-985 (2005)
 23. Рябчикова Т. А. "Температурное поведение содержания химических элементов в атмосферах магнитных пекулярных звезд". Письма в Астрон. ж. **31**, 437-446 (2005)

24. Глаголевский Ю. В., Рябчикова Т. А., Чунтонов Г. А. "Магнитное поле и химический состав пекулярной звезды HD 10221". Письма в Астрон. ж. **31**, 363-371 (2005)
25. Shulyak D., Tsymbal V., Ryabchikova T., Stütz C., and Weiss W. W. "Line-by-line opacity stellar model atmospheres". Astron. Astrophys. **428**, 993-1000 (2004)
26. Ryabchikova T., Nesvacil N., Weiss W. W., Kochukhov O., and Stütz C. "The spectroscopic signature of roAp stars". Astron. Astrophys. **423**, 705-715 (2004)
27. Ryabchikova T., Wade G. A., and LeBlanc F. "Observational Evidence for the Stratification of Chemical Abundances in Stellar Atmospheres". In *Proc. IAU Symposium 210*, eds. Piskunov, N., Weiss, W. W., and Gray, D. F., pp.301-312 (2003)
28. Ryabchikova T., Piskunov N., Kochukhov O., Tsymbal V., Mittermayer P., and Weiss W. W. "Abundance stratification and pulsation in the atmosphere of the roAp star γ Equulei". Astron. Astrophys. **384**, 545-553 (2002)
29. Kochukhov O., and Ryabchikova T. "Time-resolved spectroscopy of the roAp star γ Equ". Astron. Astrophys. **374**, 615-628 (2001)
30. Рябчикова Т. А., Саванов И. С., Маланушенко В. П., Кудрявцев Д. О. "Исследование редкоземельных элементов в атмосферах химически пекулярных звезд. Линии Pr III и Nd III". Астрон. ж. **78**, 444-451 (2001)
31. Cowley C. R., Ryabchikova T., Kupka F., Bord D. J., Mathys G., and Bidelman W. P. "Abundances in Przybylski's star". MNRAS **317**, 299-309 (2000)
32. Ryabchikova T. A., Savanov I. S., Hatzes A. P., Weiss W. W., and Handler G. "Abundance analyses of roAp stars. VI. 10 Aql and HD 122970". Astron. Astrophys. **357**, 981-987 (2000)

33. Gelbmann M., Ryabchikova T., Weiss W. W., Piskunov N., Kupka F., and Mathys G. "Abundance analysis of roAp stars. V. HD 166473". *Astron. Astrophys.* **356**, 200-208 (2000)
34. Саванов И. С., Маланушенко В. П., and Рябчикова Т. А. "Изменения лучевых скоростей в пульсирующих Ap звездах. Линии Pr III и Nd III в спектре γ Equ". *Письма в Астрон. ж.* **25**, 916-923 (1999)
35. Ryabchikova T. A., Piskunov N. E., Stempels H. C., Kupka F., and Weiss W. W. "The Vienna Atomic Line Data Base - a Status Report". *Physica Scripta* **T83**, 162-173 (1999)
36. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., Stempels H. C., and Weiss W. W. "VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base". *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119-133 (1999)
37. Ryabchikova T., Piskunov N., Savanov I., Kupka F., and Malanushenko V. "Eu III identification and Eu abundance in CP stars". *Astron. Astrophys.* **343**, 229-236 (1999)
38. Ryabchikova T. A., Landstreet J. D., Gelbmann M. J., Bolgova G. T., Tsymbal V. V., and Weiss W. W. "Abundance analysis of roAp stars. IV. HD24712". *Astron. Astrophys.* **327**, 1137-1146 (1997)
39. Ryabchikova T. A., Adelman S. J., Weiss W. W., and Kuschnig R. "Abundance analysis of roAp stars. III. γ Equulei". *Astron. Astrophys.* **322**, 234-241 (1997)
40. Саванов И. С., Рябчикова Т. А., Давыдова Е. С. "Исследование атмосфер SrCrEu звезд 17 Com A и 21 Com скопления Волосы Вероники". *Письма в Астрон. ж.* **22**, 910-916 (1996)
41. Kupka F., Ryabchikova T. A., Weiss W. W., Kuschnig R., Rogl J., and Mathys G. "Abundance analysis of roAp stars. I. α Circini. *Astron. Astrophys.* **308**, 886-894 (1996)

42. Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., Weiss W. W., and Jeffery C. S. "VALD: The Vienna Atomic Line Data Base". *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 525-535 (1995)
43. Рябчикова Т. А., Смирнов Ю. М. "Силы осцилляторов линий Ga II в видимой области спектра и содержание галлия в атмосфере HgMn звезды κ Cancri". *Астрон. ж.* 71, 83-87 (1994)

Личный вклад автора в совместные работы

Личный вклад автора диссертации состоит в создании и поддержке информационной части базы данных VALD, широко используемой астроспектроскопистами во всем мире. Диссертант участвовала в тестировании всех программ для анализа спектров звезд, использованных в диссертации. Во всех публикациях, выполненных в соавторстве, анализ химического состава и проведенный комплексный стратификационный анализ атмосфер Ar звезд выполнен лично диссертантом. Идея концентрации редкоземельных элементов в верхних слоях атмосфер roAr звезд принадлежит соискателю и подтверждена неЛТР-расчетами, для которых соискателем был предоставлен наблюдательный материал и данные об атомных параметрах линий (11, 21). На основании стратификационного исследования атмосфер диссертантом была предложена модель распространения пульсационной волны в слоистой атмосфере магнитных пекулярных звезд, которая объясняет наблюдаемые пульсационные характеристики подавляющего большинства roAr звезд. В теоретическом моделировании пульсаций в HD 24712 (6) выбор модели был основан на распределении наблюдаемых пульсационных характеристик в атмосфере этой звезды, полученном диссертантом.

Апробация результатов

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, достаточно обоснованы в диссертации и положенных в ее основу публикациях. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

1. астрофизические семинары Института астрономии РАН
2. астрофизические семинары Института астрономии Венского Университета
3. астрофизические семинары в Индийском институте астрофизики (Бангалор) и Aryabhata Research Institute of Observational Sciences (Найнитал)
4. международная конференция "M.A.S.S.; Model Atmospheres and Spectrum Synthesis" 5th Vienna workshop, 1996, Вена, Австрия
5. международная конференция "Stellar Magnetic Fields", 13-18 мая 1996, CAO РАН, Нижний Архыз, РФ
6. коллоквиум "International Cooperation in Dissemination of the Astronomical Data", 2 - 9 июля 1996, С-Петербург, РФ
7. 6-й международный коллоквиум "Atomic Spectra and Oscillator Strengths" (ASOS 6), 9 - 13 августа 1998, Виктория, Канада (приглашенный доклад)
8. международная конференция "Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars", 23-27 сентября 1999, CAO РАН, Нижний Архыз, РФ
9. XII National Conference of Yugoslav Astronomers and International Workshop on the Development of Astronomical Databases, 19-21 ноября 1999, Белград, Югославия
10. международная конференция "Magnetic Fields in O, B and A Stars: Origin and Connection to Pulsation, Rotation and Mass Loss", 27 ноября - 1 декабря 2002, Ммабато, ЮАР (приглашенный доклад)
11. симпозиум MAC No.210 "Modelling of Stellar Atmospheres", 17-21 июля 2002, Уппсала, Швеция (приглашенный доклад)

12. "IV Serbian Conference on Spectral Line Shapes", 10-15 октября 2003, Аранделовач, Сербия (приглашенный доклад)
13. симпозиум MAC No. 224 "The A-Star Puzzle", 8-13 июля 2004, Попрад, Словакия (приглашенный доклад)
14. международная конференция "Element Stratification in Stars: 40 Years of Atomic Diffusion", 6 - 10 июня 2005, Герс, Франция (приглашенный доклад)
15. международная конференция "Physics of Magnetic Stars", 28-31 августа 2006, CAO РАН, Нижний Архыз, РФ (приглашенный доклад)
16. Vienna Workshop on the Future of Asteroseismology, 20 - 22 сентября 2006, Вена, Австрия
17. CP#AP Workshop of the European Working Group on CP Stars, 10-14 сентября 2007, Вена, Австрия (приглашенный доклад)
18. 9-й международный коллоквиум "Atomic Spectra and Oscillator Strengths" (ASOS 9), 7-10 августа 2007, Лунд, Швеция
19. всероссийская конференция "Ультрафиолетовая Вселенная-2008", 19 - 20 мая 2008, Москва, РФ (приглашенный доклад)
20. XIX конференция по Фундаментальной Атомной Спектроскопии, 22-29 июня 2009, Архангельск-Соловки, 2009
21. объединенная дискуссия JD4 "Progress in Understanding of the Physics of Ap and Related Stars" в рамках Генеральной Ассамблеи MAC, 3-14 августа 2009, Рио де Жанейро, Бразилия (приглашенный доклад)
22. международная конференция "Ультрафиолетовая Вселенная-2010", 31 мая - 4 июня 2010, Санкт-Петербург, РФ (приглашенный доклад)
23. международная конференция "Magnetic Stars", 27 августа - 1 сентября 2010, CAO РАН, Нижний Архыз, РФ (приглашенный доклад)

24. совещание рабочей группы "Звездные атмосферы", 7-10 октября 2010, Казань, РФ (устный доклад)
25. Interdisciplinary Workshop on Plasma Physics, 6-7 мая 2011, Мадрид, Испания (приглашенный доклад)
26. 41-я ежегодная студенческая научная конференция "Физика Космоса", Уральский Федеральный университет, 2012 (приглашенный доклад)
27. совещание рабочей группы "Звездные атмосферы", 11-14 июня 2012, КрАО, Крым, Украина (устный доклад)
28. международная конференция "Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars", 3-7 июня 2013, Москва, РФ (приглашенный доклад)
29. 11-й международный коллоквиум "Atomic Spectra and Oscillator Strengths" (ASOS 11), 5-9 августа 2013, Монс, Бельгия (приглашенный доклад)

Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, трех приложений, Заключения и списка литературы. Объем работы составляет 190 страниц и содержит 61 рисунок и 21 таблицу. Список цитируемой литературы включает 209 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткий основных характеристик химически пекулярных звезд. Показана актуальность работы, сделана постановка задачи и представлены основные характеристики диссертации.

Первая глава посвящена описанию Венской базы атомных параметров спектральных линий VALD, одним из разработчиков которой является автор диссертации. На этих данных базируется практически вся современная астроспектроскопия. Показано, какие параметры линий и с какой точностью необходимо иметь для адекватного анализа атмосфер химически пекулярных магнитных звезд. Дано описание основных программ анализа звездных атмосфер, использующих данные из базы VALD: расчет моделей атмосфер с учетом индивидуального химического состава и стратификации элементов; определение химического состава по эквивалентным ширинам линий; расчет синтетического спектра в атмосферах немагнитных и магнитных звезд; анализ химической стратификации. Показана роль магнитных пекулярных звезд как природных лабораторий для уточнения расчетных и измеренных экспериментально параметров спектральных линий тяжелых элементов: Ga, редкоземельных элементов La–Lu (REE). Представлены результаты классификации спектра Nd III и определения сил осцилляторов линий Nd III и Ga II, включенных в VALD.

Во **Второй главе** представлены детали наблюдений и обработки спектров 28 магнитных пекулярных (Ap) звезд и 5 нормальных звезд сравнения, для которых исследовался химический состав. Дано описание определения основных параметров атмосферы: эффективной температуры T_{eff} , ускорения силы тяжести $\log g$, проекции скорости вращения $v_e \sin i$, усредненного

по поверхности звезды модуля вектора магнитного поля $\langle B \rangle$. Проведен анализ ошибок определения параметров, а также ошибок определения содержаний элементов при различных аппроксимациях эффекта магнитного поля на интенсивность спектральных линий. По найденным параметрам для каждой звезды вычислялась модель атмосферы и определялся ее химический состав в предположении химически однородной атмосферы. Из литературы были выбраны данные по химическому составу еще для 50 нормальных и 24 Ap звезд в интервале эффективных температур 6000 – 15000 К. Критерием отбора служила однородность методики определения химического состава, а также небольшая скорость вращения $v_e \sin i \leq 50 \text{ км с}^{-1}$. Проведен анализ совокупности результатов определения содержания элементов Si, Ca, Cr, Fe в атмосферах пекулярных и нормальных звезд в широком диапазоне эффективных температур. Выборка именно этих элементов определялась тем фактом, что их линии наблюдаются в спектрах всех звезд программы. Кроме того, для этих элементов проведены наиболее детальные расчеты диффузионного процесса, благодаря хорошим атомным данным для нескольких стадий ионизации, что очень важно для сравнения результатов наблюдений с предсказаниями теории диффузии. Из редкоземельных элементов были детально проанализированы Pr и Nd, поскольку линии этих элементов являются индикаторами пульсаций в атмосферах холодной части Ap звезд, которые получили название roAp (rapidly oscillating) звезды. 20 из 28 исследованных в диссертации звезд являются roAp звездами. Для Ap звезд обнаружена сильная корреляция содержания элементов Cr и Fe с температурой. В интервале 6400–9500 К содержание Cr растёт от солнечных значений до избытков на 3 порядка ($[\text{Cr}/\text{H}] = +3$); с дальнейшим ростом температуры содержание падает до величин $[\text{Cr}/\text{H}] \sim +1$. Содержание Fe начинается с дефицита приблизительно на порядок при $T_{\text{eff}} = 6400 \text{ К}$ и растёт до значений $[\text{Fe}/\text{H}] \sim +1.5$ при $T_{\text{eff}} = 9500 \text{ К}$. С дальнейшим ростом температуры содержание Fe остаётся почти на постоянном уровне, но разброс увеличивается (Рис. 1). Наблюдаемые аномалии Cr и Fe и их тенденция с ростом температуры до 9500 К хорошо согласуется с предсказаниями теории диф-

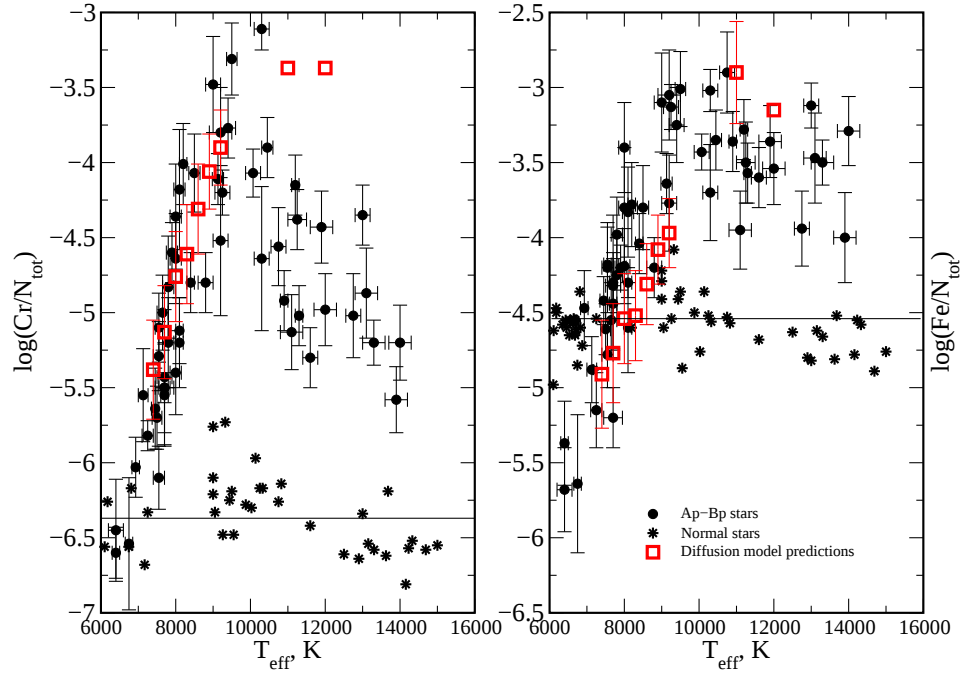


Рис. 1. Распределение содержаний Cr (левая панель) и Fe (правая панель) с температурой в звездах ГП спектрального класса A и B. Ap звезды обозначены черными сплошными кружками, нормальные звезды – звездочками. Красные открытые квадраты показывают усредненное содержание элемента в теоретических самосогласованных диффузионных моделях звездных атмосфер.

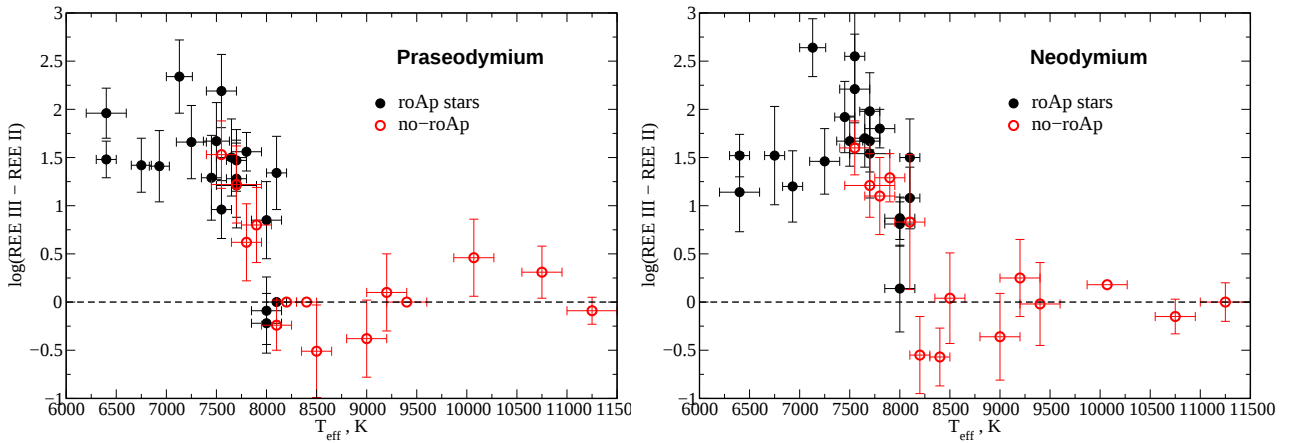


Рис. 2. Наблюдаемые аномалии Pr (левая панель) и Nd (правая панель). roAp обозначены черными заполненными кружками, непulsирующие звезды - красными открытыми кружками.

фузионного разделения элементов под совместным действием радиационного ускорения и гравитационного осаждения, впервые предложенного Мишо (Michaud, 1970) для объяснения аномалий химического состава пекулярных звезд (открытые квадраты на Рис. 1). Однако, при более высоких температурах максимальное равновесное содержание Cr, которое способна поддерживать диффузия, гораздо выше, чем наблюдаемые аномалии. Наблюдаемое содержание Cr начинает уменьшаться с дальнейшим ростом температуры, тогда как в диффузионных моделях оно остается постоянным; эта величина определяется граничными условиями на максимум и минимум содержания при расчетах. Такие же проблемы возникают и у других элементов железного пика, солнечное обилие которых на 2–4 порядка ниже, чем содержание железа.

Исследование редкоземельных элементов (REE) показало, что у холодных звезд, относящихся к группе пульсирующих магнитных пекулярных звезд (roAp), наблюдается большое различие в содержаниях, определенных отдельно по линиям первых и вторых ионов (REE-аномалии). Это различие составляет 1.5 - 2 порядка и не может быть объяснено ошибками в определении параметров атмосферы. Подробно REE-аномалии были исследованы для элементов Pr и Nd, и было показано, что PrNd-аномалии отличают группу roAp от неппульсирующих Ap звезд, у которых аномалии, если и наблюдаются, то не превышают одного порядка (Рис. 2). По наблюдаемым PrNd-аномалиям предсказаны пульсации в атмосферах нескольких звезд, найденные впоследствии по спектральным наблюдениям у одной из них, HD 75445.

В **Третьей главе** представлены результаты анализа распределений химических элементов Si, Ca, Cr, Fe, Pr, Nd по глубине атмосферы по наблюдаемым профилям спектральных линий для выборки Ap-звезд в диапазоне эффективных температур 7200 –12000 К. Исследования проводились, в основном, по программе **ddaFIT**, в которой распределение элемента по глубине аппроксимируется ступенчатой функцией и в качестве решения получают 4 параметра: содержание элемента в верхних слоях атмосферы,

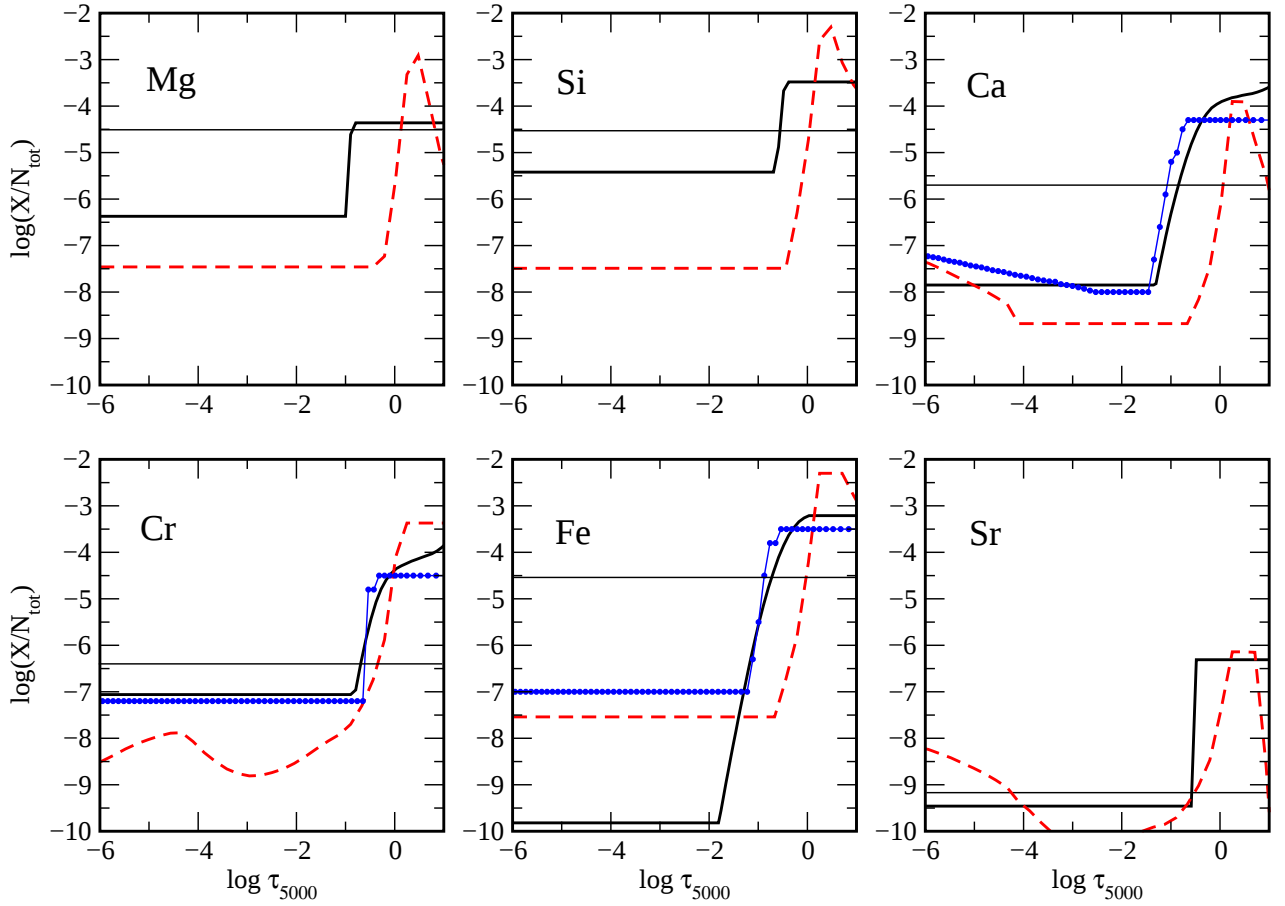


Рис. 3. Распределение химических элементов Mg, Si, Ca, Cr, Fe, Sr в атмосфере γ Equ (черная сплошная линия). Синими точками показано распределение, полученное методом проб и ошибок. Красная штриховая линия показывает теоретическое распределение, полученное в ходе самосогласованных диффузионных расчетов с параметрами $T_{\text{eff}}=7550$ K, $\log g=4.0$.

в нижних слоях атмосферы, положение скачка содержания в атмосфере и ширина переходной зоны между содержаниями в верхних и нижних слоях атмосферы звезды. На Рис. 3 показано распределение нескольких элементов в атмосфере одной из исследованных звезд, γ Equ: $T_{\text{eff}}=7550$ K, $\log g=4.0$. На этом же рисунке показано сравнение распределений с теоретическими, рассчитанными по диффузионной теории. Для всех элементов скачки в содержании, полученные из наблюдений, расположены выше в атмосфере, чем скачки, полученные из теоретических расчетов. Такое различие получается практически всегда для звезд с $T_{\text{eff}} < 10000$ K, если удастся провести сравнение наблюдаемых распределений с диффузионными расчетами. Вооб-

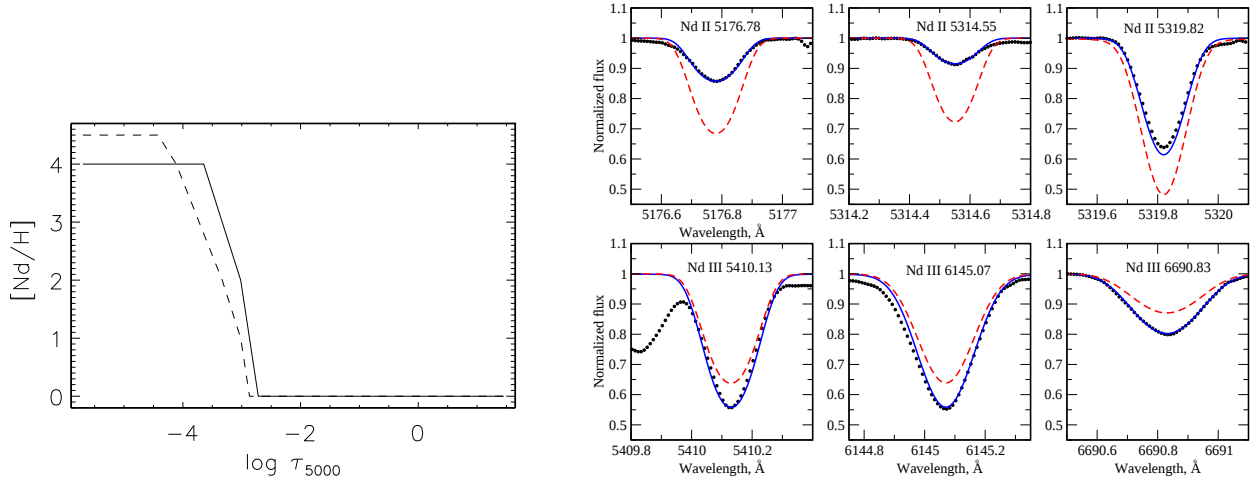


Рис. 4. Левая часть: Распределение Nd в атмосферах звезд с 7700g42 (сплошная линия) и с 7250g43 (штриховая линия).

Правая часть: Сравнение наблюдаемых (заполненные кружки) и теоретических профилей линий Nd II-III в спектре гоАр звезды HD 24712 (7250g43). Штриховыми линиями показаны расчеты со стратификацией Nd в приближении ЛТР, синей сплошной линией показаны неЛТР-расчеты.

ще говоря, скачок в содержании означает резкое изменение радиационного ускорения, что, вероятно, происходит, в зоне ионизации элемента. Сравнение наблюдений с теорией безусловно необходимый шаг как для развития и усовершенствования теоретических расчетов, так и для улучшения методов анализа наблюдений. Детальный анализ профилей спектральных линий подтверждает наличие в атмосферах магнитных пекулярных звезд градиентов содержания ряда химических элементов, в первую очередь элементов железного пика и Si, с преимущественной концентрацией в глубоких слоях вблизи фотосферы.

Проведен неЛТР- анализ образования линий Pr и Nd и показано, что в PrNd-аномалии, наблюдаемые в гоАр звездах, могут быть объяснены, если эти элементы сконцентрированы в верхних слоях атмосфер Ар-звезд (Рис. 4).

Для 23 звезд с температурами 6700 - 11500 К и магнитными полями 1 - 16.3 кГ была определена стратификация Ca в их атмосферах и исследована линия Ca II λ 8498 из инфракрасного триплета Ca II, показывающая

смещение положения ядра из-за значительного вклада тяжелого изотопа ^{48}Ca , который в стандартной солнечной смеси шести изотопов Ca с массами ядер 40, 42, 43, 44, 46, 48 составляет только 0.19 %. Получена эмпирическая модель дифференциального распределения изотопов Ca в атмосферах Ар-звезд. В результате проведенных исследований можно сделать несколько заключений:

- По спектрам звезд более высокого качества подтвержден вывод Бабеля (Babel, 1994) о стратификации Ca в атмосферах магнитных Ар звезд с $T_{\text{eff}} \leq 10\,000\text{ K}$
- Анализ профиля линии $\text{Ca II } 8498\text{ \AA}$ в совокупности с общим стратификационным анализом показал, что приводит к выводу о разделении легких и тяжелых изотопов в атмосферах Ар звезд
- Оптическая глубина границы раздела изотопов в большой степени зависит от напряженности магнитного поля: чем сильнее поле, тем выше в атмосфере расположена граница. При напряженности поля $\langle B \rangle \geq 6\text{--}7\text{ кГс}$ разделение изотопов исчезает.

Предложено объяснение изотопного разделения Ca, как результата светоиндуцированного дрейфа изотопов. Причиной дрейфа является анизотропия поля излучения в пределах профиля слабой линии примесного изотопа ^{48}Ca , расположенного в крыле сильной линии основного изотопа ^{40}Ca .

Результаты исследований, представленные в **Третьей главе**, позволяют выдвинуть следующую модель химической структуры магнитных пекулярных звезд: атмосфера носит слоистый характер (cake-like) с концентрацией разных групп элементов на разных оптических глубинах. Эта модель получила подтверждение при анализе пульсаций в гоАр звездах.

В **Четвертой главе** представлены результаты атмосферно-пульсационного моделирования гоАр звезды HD 24712. Показано, что амплитуда и фаза пульсаций зависит от элемента/иона, по линиям которого проводятся измерения. (Рис. 5).

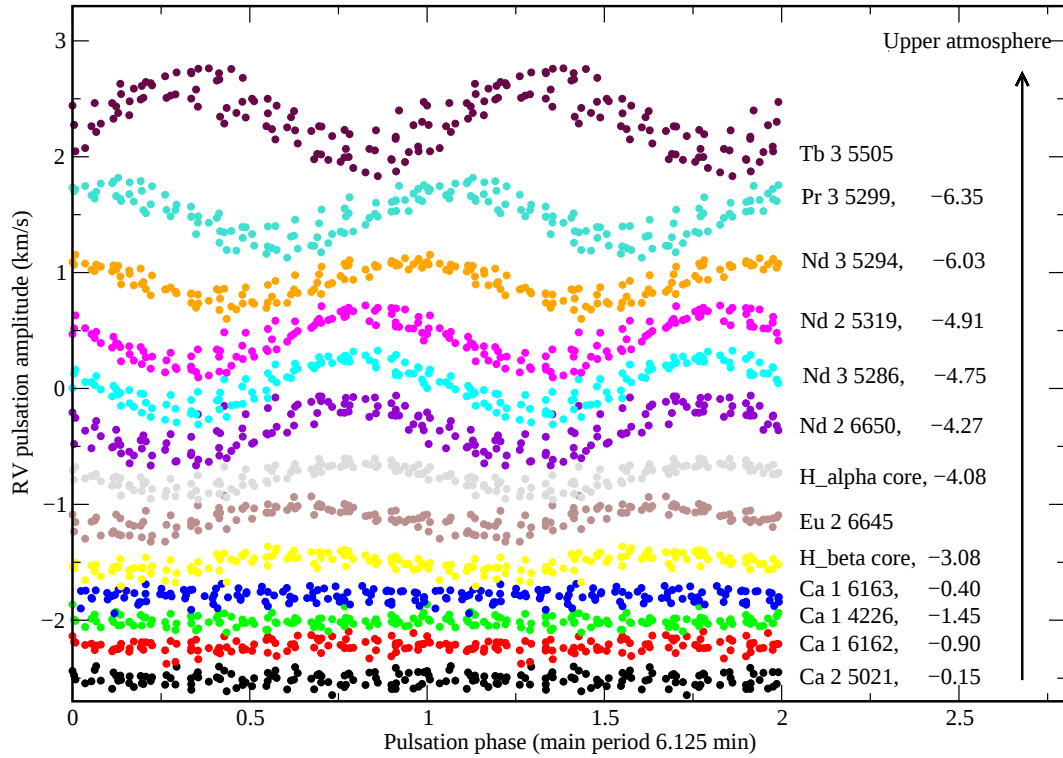


Рис. 5. Кривые лучевых скоростей отдельных линий в спектре HD 24712, полученные путем свертки с основным периодом пульсаций 6.125 мин. Справа обозначены глубины образования спектральных линий. Направление в верхние слои атмосферы обозначено стрелкой.

Проведен стратификационный анализ атмосферы HD 24712. Полученное эмпирическое распределение элементов по глубине было использовано в итерационном расчете модели атмосферы по программе LLmodels. Рассчитаны глубины образования линий в химически стратифицированной атмосфере и показано, что амплитуда и фаза пульсаций увеличивается в верхние слои атмосферы. Предложенная модель распространения пульсационной волны в слоистой атмосфере магнитных пекулярных звезд объясняет наблюдаемые пульсационные характеристики не только HD 24712, но и большинства других гоАр-звезд. Теоретическое моделирование пульсаций в атмосфере HD 24712 подтверждает полученное нами из наблюдений распространение пульсаций в виде бегущей наружу волны. Хотя представленная пульсационная модель адекватно описывает наблюдаемые пульсационные характеристики и частоты, ни одна из этих частот не возбуждается; все мо-

ды являются затухающими. Общепринятым механизмом возбуждения акустических колебаний в высоких обертонах, наблюдаемых в γ Ar звездах, является κ -механизм в зоне ионизации водорода. Очевидно, энергии этого механизма недостаточно для возбуждения сверхкритических частот в HD 24712. Такая же картина получается при моделировании некоторых других холодных пульсирующих звезд. Необходимо искать новые механизмы возбуждения пульсаций в холодных γ Ar звездах.

Заключение подводит итог всей работы и содержит выводы диссертации.

В **Приложении № 1** приведены результаты определения химического состава в атмосферах 28 Ar и 5 нормальных звезд.

Приложение № 2 содержит три таблицы. В Таблице A2.1 приведены атомные параметры спектральных линий, участвующие в стратификационном анализе атмосфер звезд программы. В Таблицах A2.2 и A2.3 даны параметры спектральных переходов Pr II/Pr III и Nd II/Nd III, используемые в неЛТР-анализе.

В **Приложении № 3** представлены результаты измерений лучевых скоростей и пульсационного анализа линий в спектре HD 24712.

В настоящее время разработаны методы анализа распределения магнитного поля и химических элементов по поверхности Ar звезд - магнитное доплеровское картирование (двумерный анализ), и методы исследования вертикальной стратификации (третье измерение). Распределение элементов по поверхности и стратификация исследуются отдельно. Для γ Ar звезды HD 24712 получен наблюдательный материал, который позволяет провести трехмерный анализ химического состава. Также планируется расширить список Ar звезд, для которых будет проведено детальное моделирование атмосферы и пульсаций с учетом стратификации химических элементов.

Литература

- Babel J. "Magnetically confined wind on the Ap star 53 Camelopardalis?". *Astron. Astrophys.* **258**, 449 (1992).
- Babel J. "Detection of calcium abundance stratification in Ap stars". *Astron. Astrophys.* **283**, 189 (1994).
- Kanaan A. and Hatzes A. P. "Pulsations and Radial Velocity Variations in Pulsating Ap Stars. I. Analysis of gamma Equulei". *Astrophys. J.* **503**, 848 (1998)
- Kochukhov O., Ryabchikova T. "Time-resolved spectroscopy of the roAp star gamma Equ". "Pulsations and Radial Velocity Variations in Pulsating Ap Stars. *Astron. Astrophys.* **374**, 615 (2001).
- Kurtz D.W. "12.15 Minute Light Variations in Przybylski's Star, HD 101065". *IBVS No.1436*, 1 (1978)
- Lüftinger T., Kochukhov O., Ryabchikova T., et al. "Magnetic Doppler imaging of the roAp star HD 24712". *Astron. Astrophys.* **509**, 71 (2010).
- Malanushenko V., Savanov I., Ryabchikova T. "Rapid radial velocity variations in roAp star gamma Equ from lines of NdIII and PrIII". *IBVS No.4650*, 1 (1998)
- Michaud G. "Diffusion Processes in Peculiar A Stars". *Astrophys. J.* **160**, 641 (1970).
- Michaud G., Charland I., Vauclair S., and Vauclair G. "Diffusion in main-sequence stars - Radiation forces, time scales, anomalies". *Astrophys. J.* **210**, 447 (1976).

- Романюк И.И., Кудрявцев Д.О. "Магнитные поля химически пекулярных звезд. 1. Каталог магнитных CP-звезд". Астрофиз. Бюлл. **63**, 148 (2008).
- Саванов И.С., Маланушенко В.П., Рябчикова Т.А. "Переменность лучевых скоростей пульсирующих Ар звезд. Линии Pr III и Nd III в спектре звезды γ Equ". Письма в Астрон. ж. **25**, 916 (1999).
- Семенко Е.А., Кудрявцев Д.О., Рябчикова Т.А. Романюк, И.И. "HD 45583 - химически пекулярная звезда с необычной кривой переменности продольного магнитного поля". Астрофиз. Бюлл. **63**, 136 (2008a).
- Семенко Е.А., Сачков М.Е. Рябчикова Т.А. Кудрявцев Д.О., Пискунов Н.Е. "Исследование химического состава и поиск нерадиальных пульсаций в атмосфере химически пекулярной звезды HD 115708". Письма в Астрон. ж. **34**, 455 (2008b).
- Титаренко А.Р., Семенко Е.А., Рябчикова Т.А. "Химический состав и стратификация химических элементов в атмосфере Ар-звезды HD 8441". Письма в Астрон. ж. **38**, 805 (2012).
- Титаренко А.Р., Рябчикова Т.А., Кочухов О.П., Семенко Е.А. "Химический состав и эволюционный статус Ар-звезды HD 138633". Письма в Астрон. ж. **39**, 390 (2013).