

ОБЗОРЫ

ЛИТИЙ В ХИМИЧЕСКИ - ПЕКУЛЯРНЫХ
СР-ЗВЕЗДАХ С МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИН.С.ПОЛОСУХИНА¹, А.В.ШАВРИНА²

Поступила 3 апреля 2007

Принята к печати 6 июня 2007

Проблема лития в химически-пекулярных Ар-СР-звездах многие годы была предметом многочисленных дебатов. Основная причина такого положения - дефицит спектральных наблюдений в области резонансного дублета Li I 6708 Å для Ар-звезд. В 1996г. начала Международная Кооперация по Проекту "Lithium in cool CP-stars with magnetic fields". Используя систематические наблюдения СР-звезд в участках спектра линий 6708 Å и 6103 Å, полученные на ЗТШ (КрАО), CAT (ESO), Feros (ESO) и 74" телескопе Обсерватории Маунт Стромло (Австралия), проведен анализ спектров нескольких СР-звезд, различающихся поведением линии лития 6708 Å с фазой вращения звезды. Мониторинги спектров осциллирующих СР-звезд (I группа) HD 83368, HD 60435 и HD 3980, для которых наблюдаются значительные доплеровские сдвиги линии Li I 6708 Å, привели к открытию "литиевых пятен" на поверхности этих звезд, положение которых связано со структурой магнитного поля звезды. Моделирование поверхности этих звезд, с помощью специальной программы "ROTATE", используя профили линии Li I 6708 Å, позволило оценить размеры пятен, положение их на поверхности звезды и содержание лития в этих пятнах. Детальный анализ и моделирование спектров медленно вращающихся осциллирующих СР-звезд с сильной и непременной линией лития 6708 Å, учитывая блендирование линиями редкоземельных элементов, показали высокое содержание лития, причем содержание, определенное по линии лития 6103 Å для всех звезд выше, чем содержание, определенное по линии 6708 Å. Это может быть свидетельством вертикальной стратификации лития в атмосфере СР-звезды с аномальным изотопным составом (${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.2 - 0.5$). Среди этих звезд - особое положение занимает уникальная звезда HD 101065 - ультрамедленный ротатор ($v \sin i \approx 1.5$ км/с), видимый с полюса и с самыми сильными осцилляциями, которые вызывают пульсационное уширение линий в спектре. Содержание лития в атмосфере HD 101065 $\log N(\text{Li}) = 3.1$ в шкале $\log N(\text{H}) = 12.0$, а изотопное отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \approx 0.3$. Высокие оценки отношения ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ могут быть объяснены производством лития в реакциях скалывания и сохранением поверхностных ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ сильным магнитным полем в верхних слоях атмосферы вблизи магнитных полюсов.

Ключевые слова: *химически-пекулярные СР-звезды: литиевые пятна*

1. *Введение.* Литий - это один из немногих элементов, возникших в результате Большого Взрыва. После водорода и гелия он один из наиболее обильных первоначальных элементов Вселенной. Вместе с тем, он и один из легко разрушаемых элементов: при температуре около 2 млн. град., характерной для звездных недр, происходит его термоядерное горение. За счет конвекции и других механизмов перемешивания, обедненное литием вещество выносится в атмосферу

звезды, и поэтому атмосферы молодых звезд обычно имеют более высокое содержание этого элемента, чем старые звезды [1,2]. В результате, большая часть проэволюционировавших звезд, поздние гиганты, имеют относительный дефицит лития. Но среди проэволюционировавших звезд есть и звезды с аномально высоким содержанием лития, а разброс содержания этого элемента достигает 6 порядков величины. Сам факт высокого содержания лития у немолодых звезд и широкий диапазон этого избыточного содержания у физически подобных звезд является одной из интригующих загадок [3].

Повышенное содержание лития может быть обусловлено физическими процессами, препятствующими перемешиванию звездного вещества и сохранению в атмосфере его первоначально высокого содержания, скажем, подавлением конвекции магнитными полями. Альтернативой могут быть реальные процессы возникновения лития в звездных атмосферах, например, в реакциях скалывания, при которых ускоренные в магнитных полях протоны и альфа-частицы разрушают более тяжелые атомы С, N и O и в результате этих реакций продуцируется литий. То обстоятельство, что среди богатых литием проэволюционировавших звезд есть и такие, у которых содержание этого элемента превышает содержание лития даже у самых молодых звезд типа Т Тельца [4-6] означает, что одного механизма сохранения в звездной атмосфере исходного высокого содержания этого элемента недостаточно, и действительно необходим процесс его реального дополнительного продуцирования.

Валлерстейн [4], Ламберт и Сойер [5] высказали предположение, что обогащенные литием гиганты в ходе эволюции проходили стадию химически-пекулярных CP-звезд с сильными магнитными полями и высоким содержанием лития. Это обстоятельство стимулировало интерес к изучению лития в этих звездах. Существует другое мнение - наоборот, пекулярные CP-звезды прошли стадию красного гиганта и находятся на пути эволюции к белым карликам. Для объяснения аномалий содержаний элементов в атмосферах обеих групп звезд, CP-звезд и белых карликов, привлекается теория диффузии.

Среди множества типов переменных звезд выделяется большая группа химически-пекулярных звезд спектральных классов B8-F0, так называемых Ap-CP, в спектрах которых наблюдаются аномальные интенсивности линий многих химических элементов. На диаграмме Герцшпрунга-Рессела эти звезды располагаются довольно компактной группой в верхней части Главной последовательности. У некоторых Ap-CP-звезд обнаружены переменные магнитные поля, достигающие 30 кГс [7]. Спектры большинства магнитно-переменных звезд столь

необычны, столь богаты линиями, которых нет в спектрах нормальных звезд того же спектрального класса, что астрономы постоянно сталкиваются с трудностями отождествления. Даже хорошо изученные магнитно-переменные Ар-CP-звезды имеют в спектре около трети неотожествленных линий. Большинство этих звезд отличаются наличием в своих спектрах линий элементов, соответствующих более низкой температуре, чем та, которая приписана данной звезде по фотометрическим и спектральным характеристикам.

Исследование химического состава атмосфер магнитных Ар-CP-звезд осложнено рядом проблем. Применение метода доплеровского картирования поверхности к некоторым Ар-CP-звездам дало возможность обнаружить неоднородности распределения ряда химических элементов, которые связаны со структурой магнитного поля [8], поэтому усредненный по поверхности звезды химический состав не отражает истинную картину атмосфер этих звезд. Реальный физический смысл имеет локальный химический состав отдельных участков поверхности звезды. Наблюдаемая переменность профилей линий отдельных химических элементов с фазой вращения звезды открывает возможность исследования их локального содержания, принимая во внимание "пятнистое" распределение элементов, в особенности редкоземельных REE, по поверхности Ар-CP-звезды [9,10]. Наиболее детальный обзор проблем Ар-CP-звезд можно найти в работе Куртца и Мартинеза [11].

Детальное исследование спектров CP-звезд - анализ состава и распределения химических элементов на их поверхности - требуют скрупулезного рассмотрения всех процессов, которые могут внести вклад в уширение наблюдаемых спектральных линий. В случае магнитных CP-звезд особого внимания заслуживает магнитное уширение спектральных линий вследствие эффекта Зеемана или Пашена-Бак (для сильных магнитных полей) [12].

Некоторые из этих звезд - гоАр-звезды - характеризуются нерадиальными пульсациями на временной шкале от нескольких до 15-18 мин [13].

Среди множества химических элементов в атмосферах гоАр-CP-звезд особенно интересен литий. В большинстве работ, связанных с наблюдениями лития, используется линия резонансного дублета Li I 6708 Å и, очень редко, линия Li I 6103 Å, которая довольно слаба и находится в крыле сильной линии Fe II.

Надо заметить, что наблюдать линии нейтрального лития непросто, ибо потенциал ионизации нейтрального лития 5.39 эВ, так что его можно наблюдать только в наиболее холодных атмосферах Ар-CP-

звезд. Кроме того, линия резонансного дублета $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ имеет изотопное расщепление 0.16 \AA и принадлежит смеси изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Для большинства звезд отношение $R = {}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ мало (< 0.10) [2].

Из-за недостатка наблюдений CP-звезд в спектральной области линии $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ существовало убеждение в том, что литий не может наблюдаться в этих звездах из-за слишком высокой температуры, однако отрывочные наблюдения этой линии лития в Ar-CP-звездах показывали противоречивые результаты. Даже идентификация линии 6708 \AA как линии резонансного дублета Li I долгое время была сомнительной. История этой проблемы может быть проиллюстрирована на примере $\beta \text{ CrV}$, наиболее изученной типичной CP-звезды. Первые попытки поиска линии $\text{Li I } 6708$ в спектре $\beta \text{ CrV}$ были предприняты Хак и др. [14], а переменность линии была заподозрена Валлерштейном и др. [15]. Затем Валлерштейн и Мерчант [16] обнаружили, что эта линия $\text{Li } 6708 \text{ \AA}$ смещена в красную сторону от предполагаемого положения в спектре $\beta \text{ CrV}$, а также в некоторых других CP-звездах.

Интенсивные систематические наблюдения лития в Ar-CP-звездах в Крымской астрофизической обсерватории на 2.6-м телескопе им. Г.А.Шайна были начаты в 1974г. Полосухиной [17-19] и они подтвердили результаты наблюдений Фараджиана и Хак [14] и Валлерштейна и др. [15,16], и впервые продемонстрировали переменность линии $\text{Li } 6708 \text{ \AA}$ с фазой вращения в спектре классической Ar-CP-звезды $\beta \text{ CrV}$. В 1994г. на съезде МАС в Гааге были представлены результаты выполненных в КрАО наблюдений и анализа дублета $\text{Li } 6708 \text{ \AA}$ в спектрах $\beta \text{ CrV}$ и $\gamma \text{ Equ}$, [20]. Более поздние результаты наблюдений $\beta \text{ CrV}$ были даны в работе Хак и др. [21]. В обзоре Фараджианы и др. [22] были собраны отдельные противоречивые результаты наблюдений $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ для 39 Ar-CP-звезд. Этот обзор продемонстрировал пеструю картину и показал большой разброс в содержании лития у CP-звезд с подобными параметрами атмосферы, но без какой-либо интерпретации. В данном обзоре очевиден недостаток наблюдений для большинства звезд и этот факт не позволил надежно детектировать переменность линии $\text{Li } 6708 \text{ \AA}$.

Обилие индивидуальных особенностей у этих звезд - высокое содержание тяжелых и, особенно, редкоземельных элементов (REE), таких как: Eu, Gd, Ce, Pr, Nd, магнитные поля и сложная структура распределения элементов по поверхности - осложняют определение содержания лития.

Увеличение объема спектральных наблюдений в области линий $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$, 6103 \AA - необходимое условие для решения проблемы лития в CP-звездах. С появлением новых технических возможностей

наблюдения линий лития в спектрах звезд, интерес к проблеме лития заметно вырос. Эшелле-спектрографы высокого разрешения, ПЗС камеры с высоким отношением сигнала к шуму, современные методы анализа спектрального материала (метод моделей атмосфер и метод синтетического спектра), использование уточненных атомных данных, особенно для редкоземельных элементов, дают возможность детально изучить спектр вблизи линий лития и тем самым приблизиться к разгадке этой проблемы.

Все это обсуждалось на совещании в Словакии в 1996г., и результаты исследований, полученные в КрАО [17-20], Фараджианой и др. [22], Хак и др. [21], легли в основу Международного Проекта "Lithium in cool CP-stars with magnetic fields".

Основная цель Проекта состоит в том, чтобы, используя систематические спектральные наблюдения Ар-CP-звезд на разных фазах вращения в спектральной области линий Li 6708 Å и 6103 Å, полученные на ЗТШ и других телескопах мира, попытаться создать базу данных, достаточную для исследования физических причин аномального содержания лития в атмосферах этих звезд.

Новая серия наблюдений 12 Ар-CP-звезд в рамках Международного

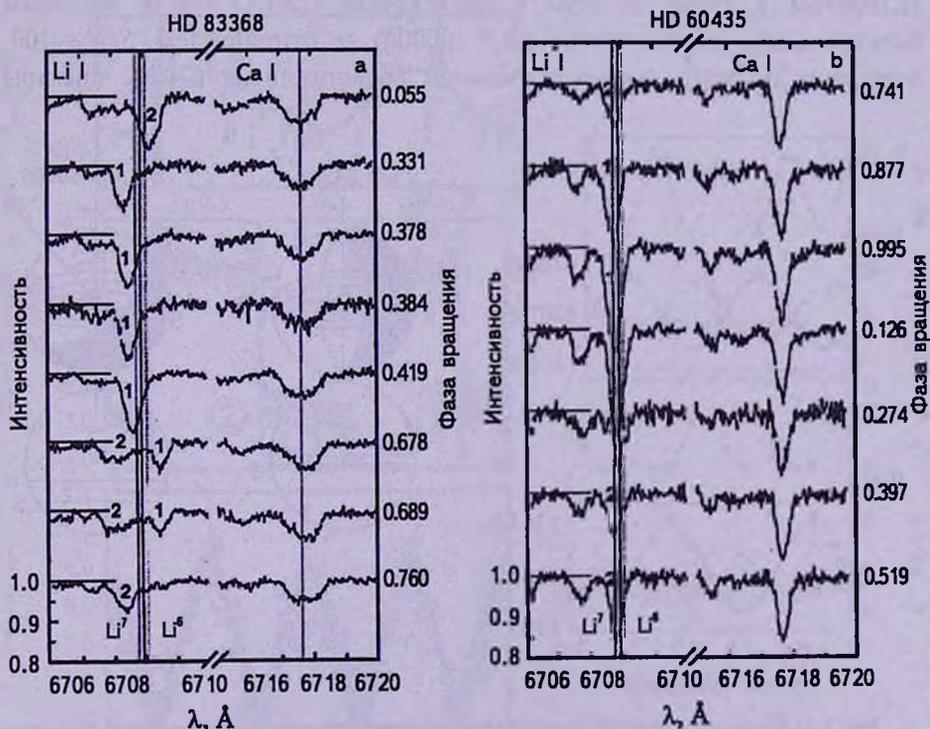


Рис.1. Оригинальные спектры вблизи линии Li I 6708 Å, нормированные к континууму для осциллирующих гАр-звезд HD 83368, HD 60465 для различных фаз вращения (фазы указаны с правой стороны рисунка) [23,24].

Проекта, выполненная П.Нортом в 1996г., продемонстрировала anomalously высокое содержание лития в ряде Ар-СР-звезд и разное поведение резонансного дублета лития $\lambda 6708$ в спектрах этих звезд с фазой вращения [23,24].

Это позволило разделить эти 12 звезд на 4 группы:

I группа - звезды HD 83368 и HD 60435. Линия Li I 6708 Å показывает правильные и значительные изменения лучевой скорости и эквивалентной ширины с фазой вращения [23,24].

II группа - HD 134214, HD 166473, 33 Lib. Отсутствует переменность спектра - линия Li I 6708 сильная и постоянная [24].

III группа - HD 188041 и β CrV. Линия Li 6708 Å - сильная, со сложным характером переменности [24].

IV группа содержит СР-звезды, в спектрах которых линия Li 6708 Å не обнаружена вообще.

2. Первая часть Проекта - анализ спектров гоАр-звезд HD 83368 и HD 60435 со значительными доплеровскими сдвигами линии Li 6708 Å. (I группа).

2.1. Наблюдения. Серия тестовых наблюдений СР-звезд, полученная П.Нортом в 1996г. в ESO с телескопом CAT 1.4-м с высоким спектральным разрешением ($R = 100000$) и отношением $S/N = 100$, позволила получить для спектральной области лития 6708 Å спектры

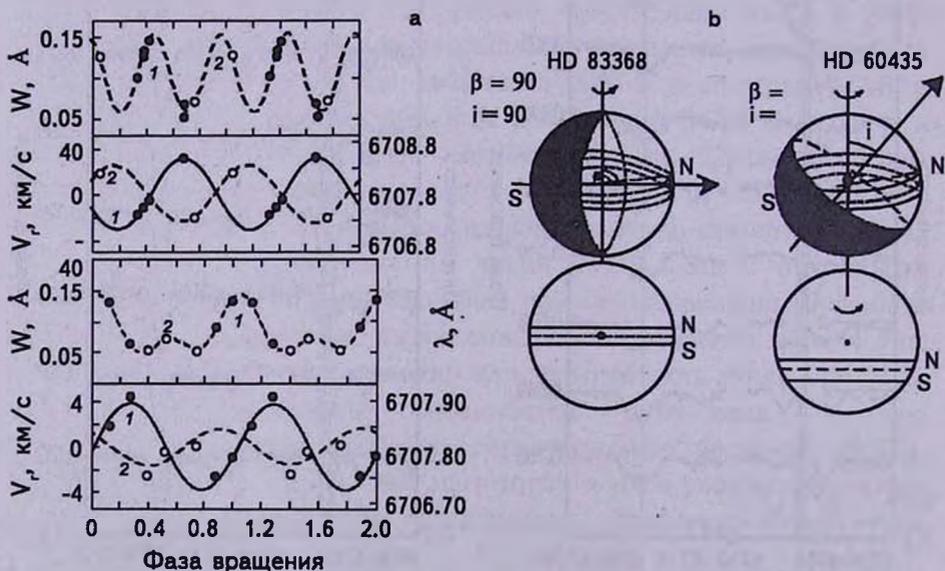


Рис.2. а) Изменения лучевой скорости и интенсивности линии лития с фазой вращения для звезд HD 83368, HD 60435, б) индивидуальные модели наклонного ротатора для указанных звезд с траекториями пятен на поверхности звезд. N - положение положительного, S - отрицательного полюсов магнитного поля [24].

СР-звезд высокого качества.

Наиболее важным и интересным результатом этой серии наблюдений (рис.1) является открытие уникальной переменности профиля линии лития 6708 Å с фазой вращения для осциллирующих звезд гоАр HD 83368 и HD 60435 (I группа звезд с доплеровскими сдвигами линии Li I 6708 Å, достигающими 0.7 Å для HD 83368 [23]). Анализ наблюдений

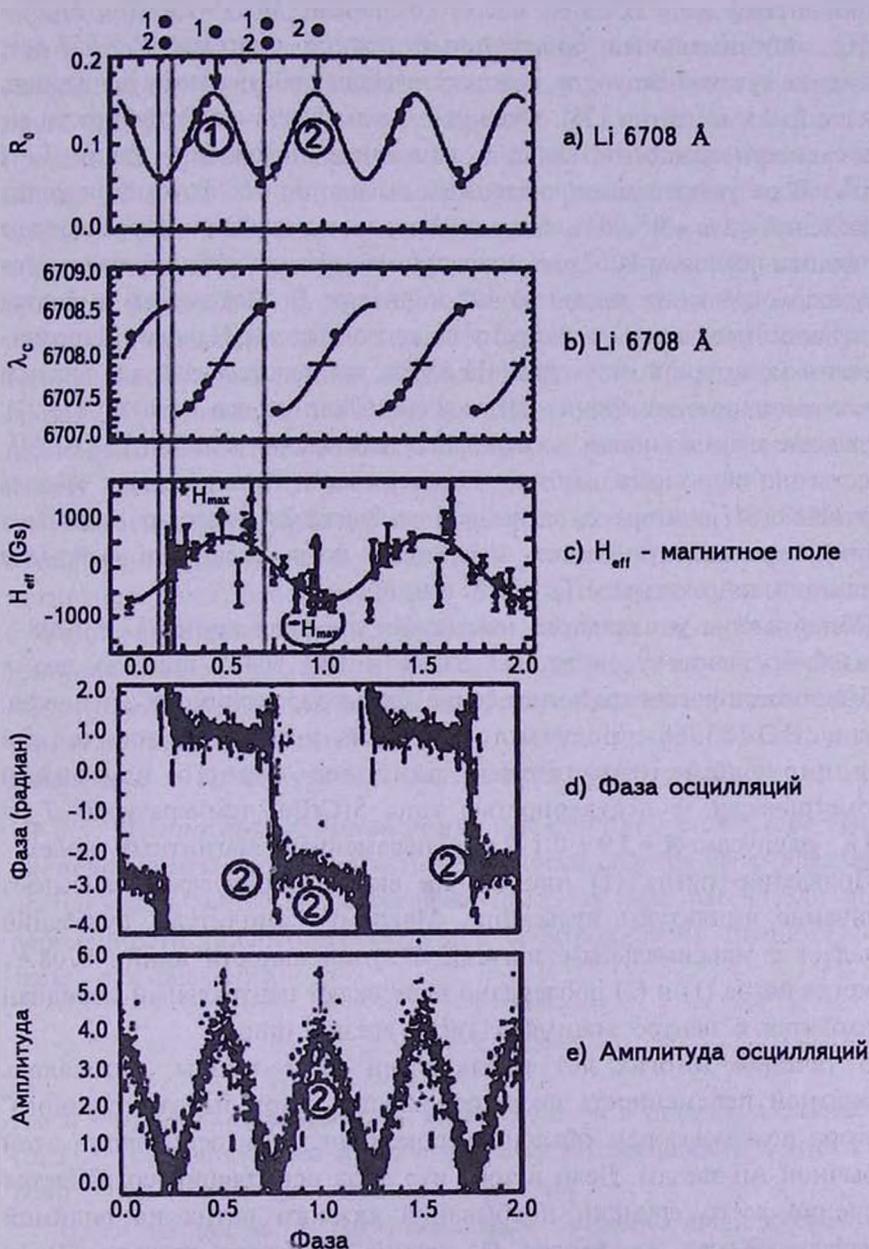


Рис.3. Вариации физических параметров звезды HD 83368 с фазой вращения [24,12].

показал, что такой значительный доплеровский сдвиг (рис.2а) линии лития является результатом вращательной модуляции "запятненной" литием поверхности звезды.

2.2. *Феноменологическая картина переменности "пятнистой" осциллирующей гoAr-звезды HD 83368.* HD 83368 - двойная система с разностью в яркости компонент, $\Delta m = 2^m.78$. Расстояние между компонентами $\Delta r = 217$ а.е., массы компонент $M(A) = 2.0 M_{\odot}$, $M(B) = 0.9 M_{\odot}$. Минимальный орбитальный период системы $P = 657$ лет, изменение лучевой скорости, соответствующее орбитальному движению, меньше 0.01 км/с в год [25]. Очевидно, что эффект двойственности не может внести заметный вклад в изменение положения линии Li I 6708 Å. В результате многочисленных высокоточных фотометрических наблюдений ($\Delta m \approx 0^m.001$), были обнаружены осцилляции блеска звезды с основным периодом 11.67 мин, причем амплитуда осцилляций изменяется с периодом вращения звезды до 10^m в фильтре В. Максимумы амплитуд осцилляций приходятся на экстремумы кривой блеска. Наряду с фотометрическим мониторингом звезды HD 83368, мы использовали для анализа немногочисленные измерения эффективного магнитного поля H_{eff} [26,27]. Добавление к этим данным спектральных наблюдений в линии Li I 6708 Å существенно проясняет картину переменности. Предложенная модель "запятненного" ротатора с пятнами 1 и 2 (рис.2а), хорошо описывает картину переменности блеска, магнитного поля, спектра и феномена осцилляций гoAr-звезды HD 83368 (рис.3).

Обнаружение уникального изменения профиля линий Li I 6708 Å с фазой вращения у звезд HD 83368 и HD 60435 привело нас к необходимости рассмотреть поведение других характеристик этих звезд. Звезда HD 83368 представляет собой пример классической осциллирующей гoAr-звезды, наиболее хорошо изученной фотометрически, с пекулярностью типа SrCrEu, температурой $T_{eff} = 7750$ К, радиусом $R = 2.9 \pm 0.1 R_{\odot}$ и переменным магнитным полем.

Появление пятна (1) или (2) на видимой полусфере вызывает увеличение амплитуды пульсаций. Максимум амплитуды пульсаций совпадает с максимальным значением интенсивности линии 6708 Å, т.е. когда пятна (1) и (2) поочередно пересекают центральный меридиан и находятся в центре видимого диска звезды (рис.3).

В течение многих лет наблюдений этой звезды, оставалась непонятной переменность фазы осцилляции. Модель "запятненного" ротатора позволила нам объяснить поведение фазы осцилляции этой необычной Ar-звезды. Дело в том, что фаза осцилляций сохраняется в течение всего времени пребывания каждого пятна на видимой полусфере. Когда же первое (1) пятно сменяется вторым (2) и,

наоборот, происходит скачкообразное смещение фазы, так называемый "π"-скачок. Это изменение фазы на "π" радиан происходит на фазах вращения 0.20-0.30 и 0.70-0.80 довольно быстро (менее 0.10 фазы). В указанные фазы мы наблюдаем оба пятна на краях диска звезды. Как показывают наблюдения [28], в эти короткие моменты (очень редкие ночи) практически отсутствуют осцилляции. Это явление, по-видимому, можно объяснить тем, что на видимой полусфере в течение очень короткого времени можно наблюдать две области (оба пятна), каждая из которых показывает осцилляции, отличающиеся друг от друга по фазе на "π" радиан. Именно в эти фазы смены пятен происходит гашение осцилляции, а в спектре мы наблюдаем расщепление линии Li I 6708 Å на две ослабленные компоненты, максимально смещенные от центрального положения линии в обе стороны. Следует обратить внимание, на то, что эквивалентная ширина W_λ линии Li I 6708 Å в фазах 0.0 и 0.5 достигает своего максимума, и в этих же фазах наблюдаются максимальные значения блеска и магнитного поля (рис.3). Периодические изменения лучевых скоростей V_r и эквивалентных ширин W_λ линии Li I 6708 Å для HD 83368 соответствуют модели наклонного магнитного ротатора с углом наклона оси вращения звезды к лучу зрения $i = 90^\circ$ и к оси магнитного диполя $\beta = 90^\circ$.

Важнейшим результатом исследования для звезды HD 83368 было обнаружение синхронных изменений положения "литиевых" пятен магнитного поля, блеска звезды, а также амплитуды и фазы пульсации с фазой вращения звезды. Феномен переменности был объяснен индивидуальной моделью "запятненного" ротатора с дипольным магнитным полем и литиевыми пятнами на магнитных полюсах. Этот феномен дает указание на связь между локальной структурой атмосферы и конфигурацией магнитного поля (рис.3).

2.3. Метод выделения переменных деталей в спектре (метод дисперсограмм). Для оценки переменности спектра было предложено использовать метод дисперсограмм (см.[24]). Мы рассчитали спектр переменности (дисперсограмму) для спектров обеих групп гоAr-CP-звезд, как значение

$$\sigma_{obs} = \frac{1}{I_{mean}} \sqrt{\frac{\sum (I_i - I_{mean})^2}{n-1}}$$

где I_i - значение интенсивности спектра звезды в отдельных длинах волн (i), I_{mean} - соответственно среднее значение интенсивности в этих длинах волн, n - число наблюдаемых спектров.

Ниже на рис.4а, б мы показываем примеры дисперсограмм для звезды HD 83368 с переменной линией лития и HD 134214 с

постоянной линией лития. Они отчетливо показали разницу в переменности спектра между двумя группами (I и II группы) гоАр - CP-звезд в указанном спектральном интервале:

очевидность спектральной переменности для звезды HD 83368. I группа (рис.4а);

отсутствие переменности спектра HD 134214. II группа (рис.4б).

Кроме выделения переменных деталей спектра дисперсограммы, открыли новый дополнительный путь решения проблемы идентификации линии лития в CP-звездах, а также линий REE элементов, которые многочисленны и переменны в этом спектральном интервале. Дисперсограммы отчетливо продемонстрировали, что амплитуда изменений интенсивности линии Li 6708 Å существенно больше, чем амплитуда изменения интенсивности REE (Nd III, Pr III, Nd II, Ce II...) для звезд I группы (HD 83368, HD 60435). Кроме того, изменения в линиях REE синхронны между собой, но максимумы их интенсивностей сдвинуты по фазе от максимумов линии лития. Этот метод анализа переменности спектра явился дополнительным свидетельством принадлежности бленды

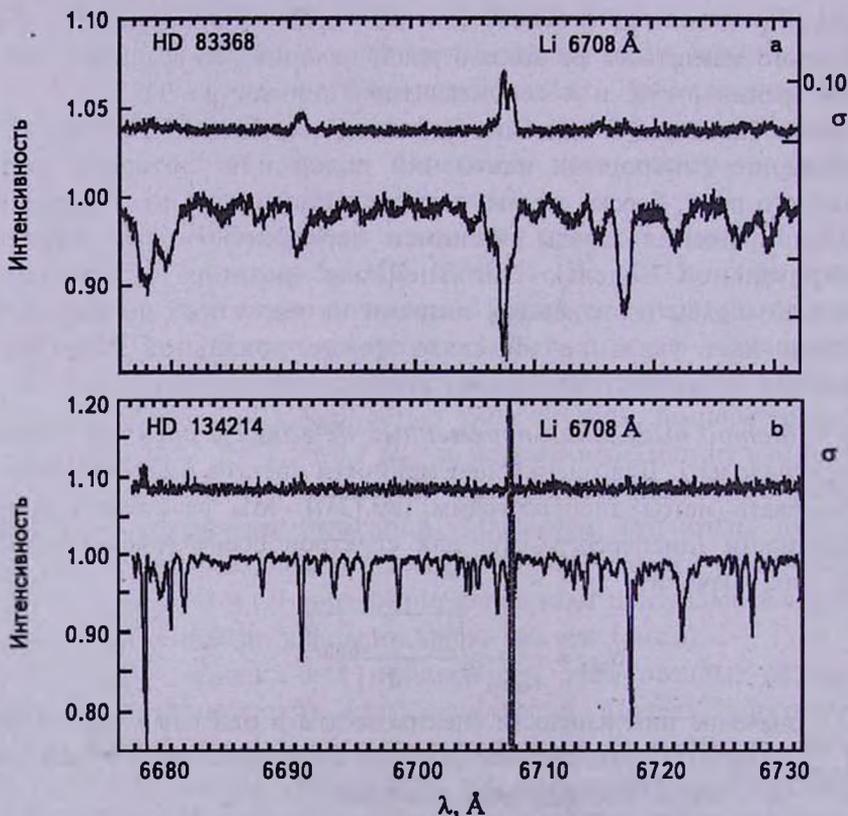


Рис.4а. Дисперсограмма для "пятнистой" CP-звезды HD 83368 (I группа) [24]. б) Дисперсограмма для осциллирующей CP-звезды HD 134214 (группа II "без пятен") [24].

6708 Å линии лития, имеющей двухкомпонентную структуру, вследствие пятнистого (2 пятна) распределения лития на поверхности HD 83368.

2.4. *Модельные расчеты.* Открытие "литиевых пятен" у гоАр-звезд требовало детального количественного анализа спектров звезд HD 83368 и HD 60435. Реальный физический смысл имеет локальный химический состав отдельных участков поверхности "пятнистой" звезды, и наблюдаемая переменность профиля линии Li I 6708 Å с фазой вращения (вследствие доплеровского смещения) открывает возможность исследовать локальное содержание этого элемента.

Спектры гоАр-звезд HD 83368 и HD 60435 демонстрируют тот случай, когда линия Li I 6708 Å является самой выразительной переменной деталью. Наблюдаемая очевидная модуляция профиля линии Li I 6708 Å вращением звезды позволила использовать метод прямого моделирования спектра для расчета местоположения и размеров "литиевых" пятен и содержания лития (как первое приближение).

Количественный анализ спектров выполнялся методом синтетического спектра с помощью программ В.В.Цымбала STARSР и ROTATE, которые использовались для расчета профилей спектральных линий, формирующихся во всей фотосфере и в отдельных пятнах вращающейся звезды. Постановка задачи и метод ее решения по программе ROTATE подробно описаны в работе [12]. Были использованы модели атмосфер и списки линий с атомными данными из CDROM -13, CDROM- 23 [29], VALD-2 [30].

Параметры моделей атмосфер для анализа $T_{\text{эф}}$, $\log g$ и $v \sin i$ были взяты из работ [23,24]:

HD 83368 $T_{\text{эф}} = 7750$ К, $\log g = 4.0$, $v \sin i = 34$ км/с, $[M/H] = 0.0$,

HD 60435 $T_{\text{эф}} = 8250$ К, $\log g = 4.5$, $v \sin i = 11$ км/с, $[M/H] = 0.0$.

Имеющееся изначально количество спектров этих звезд для разных фаз вращения было недостаточно для решения обратной задачи определения физических параметров, описывающих условия образования спектральных линий. Поэтому, в качестве первого приближения был выбран метод прямого моделирования профилей спектральных линий для вращающейся звезды. Параметрами задачи при определении содержания лития в пятне являлись: i - угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения; v_e - экваториальная скорость вращения звезды; N_p - количество пятен; l_p , φ_p , R_p - координаты и размеры каждого пятна; ϵ_p - содержание лития в каждом пятне.

Анализ показывает, что оптимальное согласие между теоретическими и наблюдаемыми профилями на всех фазах достигается только при определенных значениях параметров задачи. Количество "литиевых

пятен" (два пятна) определяется из простого рассмотрения кривых лучевых скоростей для линии Li I 6708 Å.

Остальные параметры получены из условия лучшего совпадения наблюдаемых и теоретических профилей линии лития на всех фазах вращения.

Результирующие параметры "литиевых пятен" для обеих звезд таковы:

Для HD 83368 угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 90^\circ$, $v_e = 35$ км/с, и при содержании лития в фотосфере $\log \epsilon_{ph}(\text{Li}) = 1.8$.

Пятно 1: $l_1 = 173^\circ \pm 6^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ \pm 6^\circ$, $R_1 = 33^\circ \pm 6^\circ$, $\log \epsilon_1(\text{Li}) = 3.6 \pm 0.2$.

Пятно 2: $l_2 = 337^\circ \pm 6^\circ$, $\varphi_2 = 0^\circ \pm 6^\circ$, $R_2 = 35^\circ \pm 6^\circ$, $\log \epsilon_2(\text{Li}) = 3.5 \pm 0.2$.

Для HD 60435 угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 47^\circ$ (133°), $v_e = 15$ км/с, и при содержании лития в фотосфере $\log \epsilon_{ph}(\text{Li}) = 1.8$.

Пятно 1: $l_1 = 11^\circ \pm 6^\circ$, $\varphi_1 = -15^\circ \pm 6^\circ$, $R_1 = 44^\circ \pm 3^\circ$, $\log \epsilon_1(\text{Li}) = 3.8 \pm 0.2$.

Пятно 2: $l_2 = 205^\circ \pm 10^\circ$, $\varphi_2 = 15^\circ \pm 6^\circ$, $R_2 = 40^\circ \pm 7^\circ$,

$\log \epsilon_2(\text{Li}) = 2.7 \pm 0.2$.

Программа ROTATE расчета синтетического спектра запятненной поверхности вращающейся звезды дала возможность получить параметры литиевых пятен: положение l , φ , размер R и содержание лития в пятне, $\log \epsilon(\text{Li})$. Лучшее согласие между рассчитанным и наблюдаемым

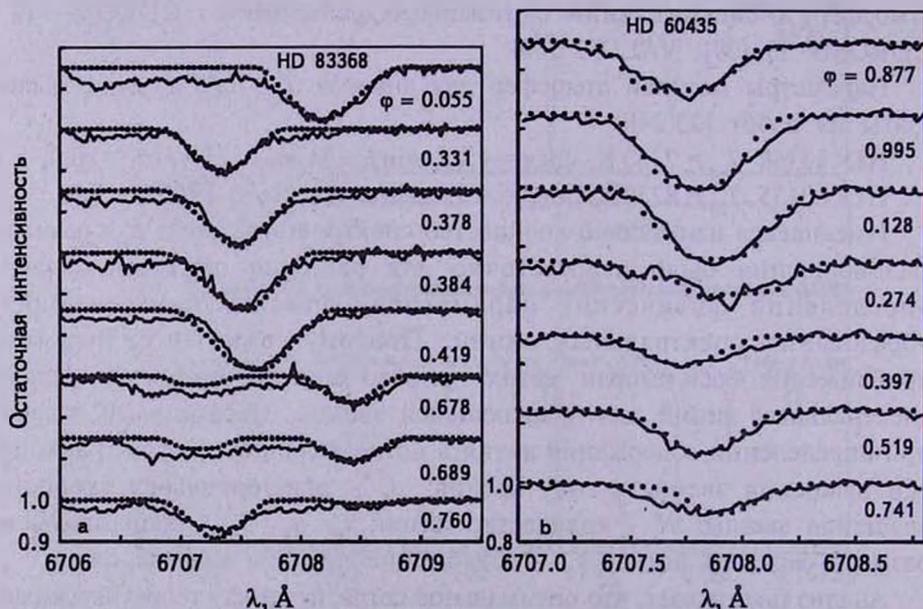
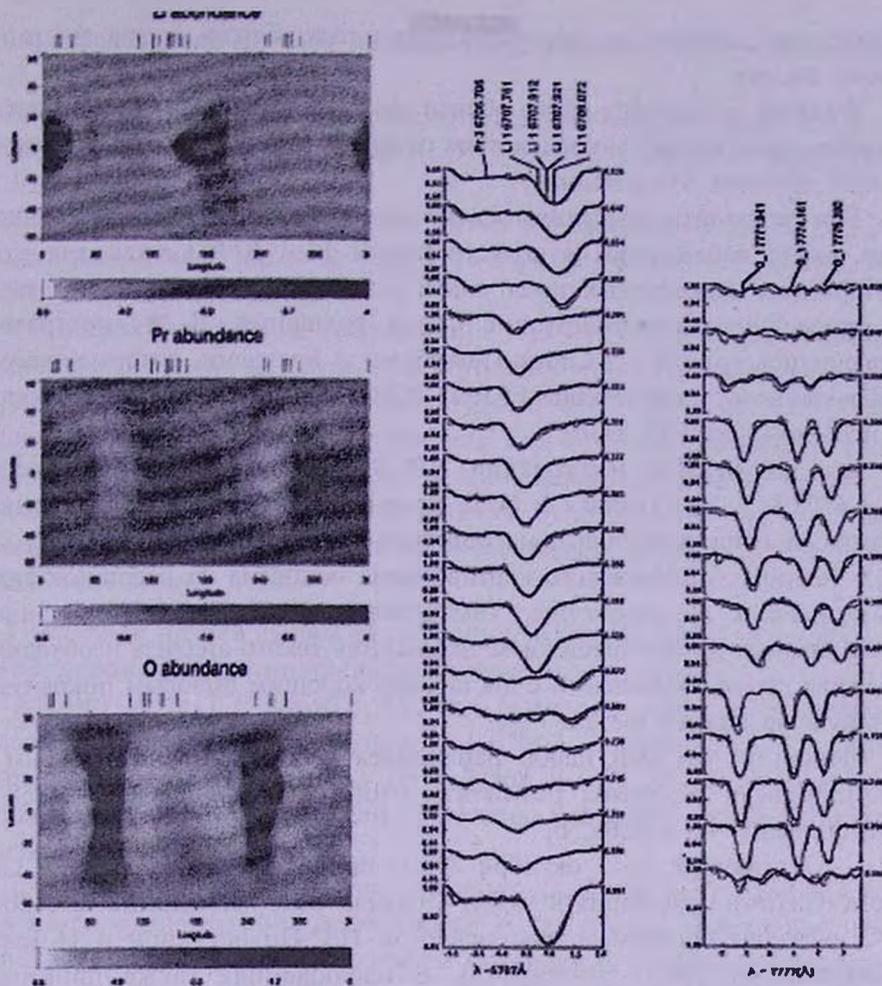
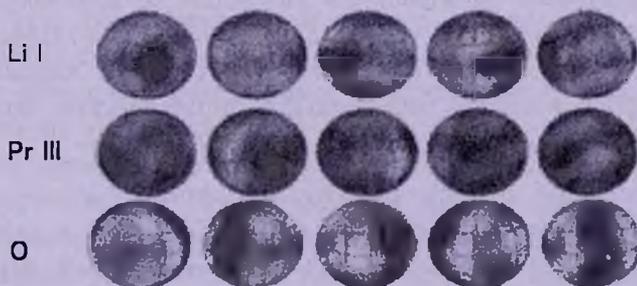


Рис.5. Результат моделирования - наблюдаемые и вычисленные профили линии 6708 Å Li I для разных фаз (фазы указаны в правой части рисунка), а) для звезды HD 83368, б) для звезды HD 60435 [12].



a



b

Рис.6а. Вариации профиля Li I + Pr III и триплета кислорода O с фазой вращения и карты поверхности звезды HD 83368 в прямоугольной системе координат для Li I, Pr III и для сравнения триплета кислорода O (7771 Å) [32]. б) Сферическая модель поверхности звезды HD 83368 с "литиевыми пятнами" и пятнами Pr III и кольцевой структурой для кислорода O [32].

профилями достигается для положения пятна вблизи центра видимого диска звезды.

В случае положения пятна вблизи лимба получить хорошее согласие с наблюдениями трудно вследствие слабости линии лития и блендирования другими элементами.

Эти результаты исследования лития в СР-звездах явились толчком для новых наблюдений в области линии $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$, как для этих интересных исследуемых звезд, так и для новых наблюдений СР-звезд и проведения мониторингов с фазой вращения. В эту программу включились коллеги из Санкт-Петербурга и Бразилии, которые своими наблюдениями на телескопе FEROS (ESO) внесли существенный вклад в исследование HD 83368.

Все полученные наблюдения HD 83368 в спектральной области $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ и $\text{Pr III } 6706.7 \text{ \AA}$ были проанализированы, используя пакет программ Пискунова для доплеровского картирования (INVERS12, см. [3]). Техника доплеровского картирования основана на восстановлении изображения (температуры, химсостава) по модуляции профилей спектральных линий вращением звезды. Для такого анализа необходима большая серия наблюдений с достаточно хорошим фазовым покрытием периода вращения звезды.

Используя полный набор наблюдательных данных, Кочуховым и др. [32] были получены результаты этого анализа для HD 83368 и представлены на рис.6а, б.

С 17 сентября по 3 октября 2001г. проводились наблюдения СР-звезд Южного полушария в Маунт Стромло Обсерватории на телескопе 74", согласно программе, составленной Н.С.Полосухиной и Н.Драке (Университет Санкт-Петербурга). В наблюдениях также принимал участие П.Вуд (Маунт Стромло, Австралия). Для 10 звезд получено более 100 спектров в спектральном диапазоне от 6500-8000 \AA . Проведены мониторинги для двух СР-звезд -HD 3980 и HD 15144. Обнаружены несколько малоизученных СР-звезд с сильной линией лития, а звезда HD 3980 показала значительные доплеровские сдвиги линии лития 6708 \AA , подобно звезде HD 83368 [23,12,32].

2.5. Выводы по первой части Проекта.

- Основные результаты наблюдений СР-звезд в спектральной области линии $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$: Обнаружение уникальной переменности профиля линии $\text{Li } 6708 \text{ \AA}$ с фазой вращения для СР-звезд (I группа) с сильными доплеровскими сдвигами линии лития 6708 \AA (рис.1), вследствие вращательной модуляции поверхности звезды с "литиевыми" пятнами (рис.2а, б).

- Оказалось, что содержание лития в пятнах звезд HD 83368 и HD

60435, определенное методом прямого моделирования [12], существенно выше, чем в фотосфере:

Для HD 83368 при содержании лития в фотосфере $\log_{\epsilon_{ph}}(\text{Li}) = 1.8$, содержание лития в пятне 1: $\log_{\epsilon_1}(\text{Li}) = 3.6 \pm 0.2$; в пятне 2: $\log_{\epsilon_2}(\text{Li}) = 3.5 \pm 0.2$.

Для HD 60435 при содержании лития в фотосфере $\log_{\epsilon_{ph}}(\text{Li}) = 1.8$, содержание лития в пятне 1: $\log_{\epsilon_1}(\text{Li}) = 3.8 \pm 0.2$; в пятне 2: $\log_{\epsilon_2}(\text{Li}) = 2.7 \pm 0.2$.

- Важным результатом исследования HD 83368 было обнаружение синхронных изменений положения "литиевых" пятен, магнитного поля (H_{ϕ}), блеска звезды, а также амплитуды и фазы пульсации с фазой вращения звезды. Феномен переменности был объяснен индивидуальной моделью "запятненного" ротатора с дипольным магнитным полем и литиевыми пятнами на магнитных полюсах. Этот феномен дает указание на связь между локальной структурой атмосферы в литии и конфигурацией магнитного поля.

3. Вторая часть Проекта: Количественный анализ спектра и моделирование атмосферы медленно вращающихся CP-звезд (II группа γ Ar-CP-звезд). Как уже было показано в предыдущем разделе, вариации профиля линии Li I 6708 Å в зависимости от фазы вращения для двух γ Ar-звезд (HD 83368 и HD 60435) с довольно высокой величиной $v_e \sin i$ были объяснены наличием литиевых пятен вблизи магнитных полюсов.

Другая группа γ Ar-CP-звезд с узкими линиями в их спектрах не показывает вращательной переменности линии лития. Эти звезды, как и звезды I группы, характеризуются большим избытком содержания REE и сильными магнитными полями. Величина поверхностного магнитного поля для них составляет 2-7 кГс. Узкие линии в спектрах выбранных звезд обусловлены небольшими величинами $v_e \sin i$. Для звезд с большими периодами вращения, как γ Equ и 33 Lib ($P > 70$ лет), узкие линии объясняются медленным вращением (величина v_e близка к нулю), в то время как для звезд с короткими периодами вращения ($v_e \gg 0$) они являются результатом небольшой величины $\sin i$, т.е. незначительного наклона оси вращения к лучу зрения. Поэтому эти звезды наблюдаются с полюса, и наблюдатель видит всегда только одну полусферу звезды. В этом случае спектр звезды в значительной мере постоянен и уширение линий определяется амплитудой скорости пульсаций. Заметим, что уширение спектральных линий вследствие вращения не всегда отличается от уширения вследствие быстрых осцилляций. Оба эффекта являются результатом доплеровских смещений и моделируются вращательным профилем с параметром $v_e \sin i$.

3.1. *Наблюдения CP-звезд (II группа).* Важная серия наблюдений, полученная в ESO и КрАО (1996-2001гг.) для осциллирующих гоАр-звезд: 33 Lib, γ Equ, HD 101065, HD 134214, HD 166473, продемонстрировала постоянство сильной линии лития 6708 Å в спектрах этих звезд (II группа гоАр-звезд, пример - 33 Lib, наблюдения ЗТШ КрАО и CAT ESO) (рис.7).

Спектры звезд HD 101065, HD 134214, HD 137949 и HD 166473 с разрешением $R=100000$ были получены П.Нортом 8-14 марта 1996г. на 1.4-м телескопе CAT и Кудэ-спектрометре CES в обсерватории Ла Силла. Детектором служила матрица ESO CCD N34 с 2048 пикселями вдоль дисперсии (размер пиксела составлял 15 мкм x 15 мкм), которая обеспечивала разрешающую силу $R=100000$; спектральные области охватывали 58.2 Å с центральной длиной волны 6705, 6645 и 6150 Å. Для анализа были использованы обе линии лития - резонансный дублет лития LiI 6708 Å и субординатная линия Li I 6103 Å (рис.8).

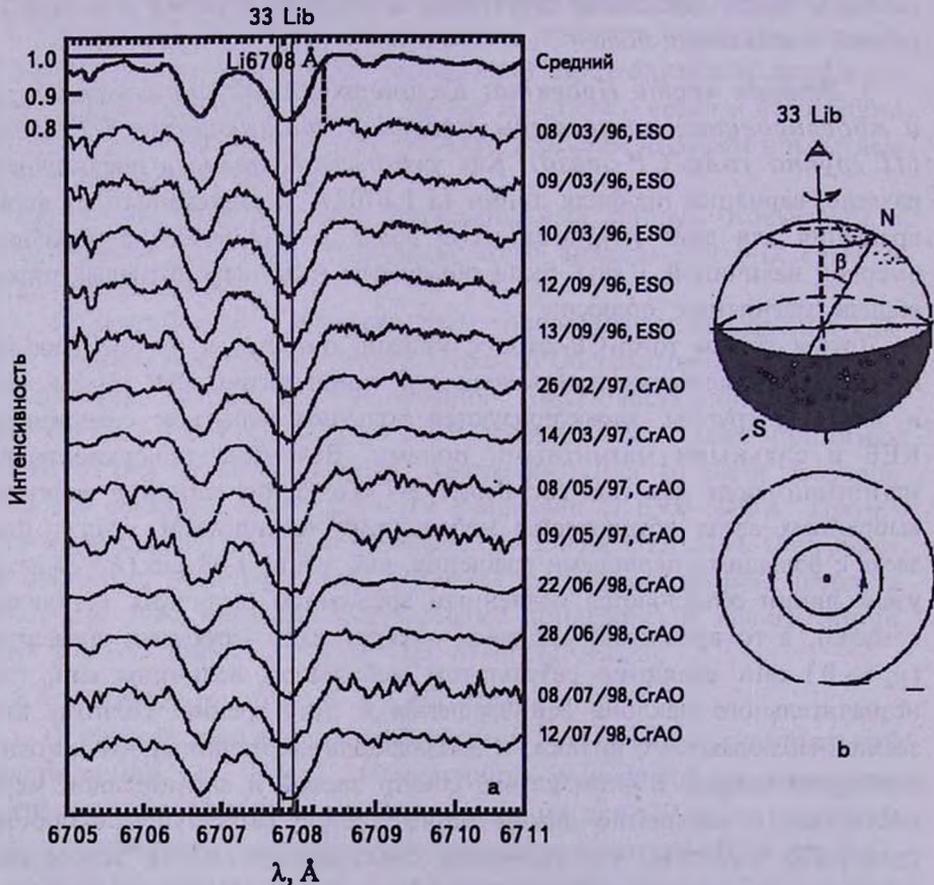


Рис.7. Спектры звезды 33 Lib, полученные в КрАО (ЗТШ) и ESO (CAT) демонстрируют постоянство линии лития 6708 Å. Модель наклонного ротатора для этой звезды показана справа [24].

3.2. HD 101065, звезда Пшибыльского, - уникальный представитель осциллирующих Ар-СР-звезд. Среди гоАр-звезд, спектры которых изобилуют индивидуальными особенностями, звезда HD 101065 - наиболее необычная и наиболее популярная [33,34]. Первый доклад Пшибыльского в 1975г. на Коллоквиуме МАС №32 с демонстрацией оригинального спектра звезды HD 101065 произвел сильное впечатление на специалистов по Ар-звездам и сразу же привлек внимание к этой звезде.

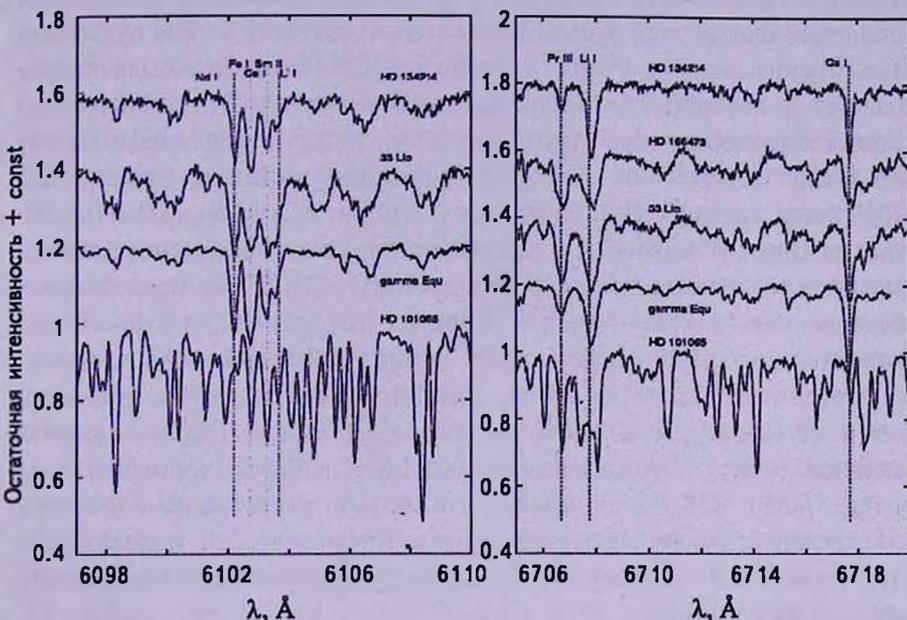


Рис.8. Оригинальные спектры анализируемых гоАр-звезд с узкими линиями HD 134214, HD 166473, HD 137919 (33 Lib), HD 201001 (γ Equ) и HD 101065 (звезда Пшибыльского) в двух областях вблизи линии лития 6103 Å (слева) и 6708 Å (справа) [52].

Спектры звезды HD 101065 были также получены в Европейской южной обсерватории П.Ниссеном в 1995г. с $R=100000$ для области линии лития 6708 Å (ESO/CAT/CES) и А. Хатцесем в марте 2004г. для области линии лития 6103 Å (ESO/3.6m/HARPS). Обработка спектров ESO была выполнена с помощью программного пакета IRAF.

Впервые отмеченное Пшибыльским отсутствие (или сильное ослабление) линий таких "нормальных" элементов, как железо и элементы железной группы, поставили серьезные ограничения на выбор подходящей модели атмосферы для анализа спектра этой звезды. Наряду со значительными отличиями спектра этой звезды от спектров других Ар-звезд, автором было отмечено и некоторое сходство:

- сильные линии поглощения, принадлежащие редкоземельным элементам (REE) в спектре HD 101065, также усилены в спектрах

типичных Ар-звезд (13 Cr β и γ Equ);

- некоторые Ар-звезды показывают сильный дефицит элементов железного пика, например, звезда HD 25354.

Пишибильским было также предсказано наличие магнитного поля у этой звезды. Поверхностные аномалии содержания химических элементов у этой звезды он объясняет стабильностью атмосферы, обусловленной сильным магнитным полем. В 1976г. Вольф и Хаген [35] открыли у этой загадочной звезды поверхностное магнитное поле порядка 2.5 кГс. Куртц и Вегнер [36] начали проводить наблюдения осцилляций блеска этой звезды в 70-е годы и открыли четкие пульсации с амплитудой порядка $0^m.013$ и периодом 12.14 мин. Это была первая Ар-звезда, у которой были обнаружены осцилляции. Данный феномен оказался характерным для других Ар-звезд, которые образовали группу гоАр-звезд. Первые попытки идентификации линий в спектре HD 101065 были сделаны Пишибильским [33,34] и Уорнером [37]. Именно в этих работах мы встречаем и первое упоминание о возможном наличии резонансного дублета лития в спектре HD 101065. В последующих исследованиях спектра Вегнер и Петфорд [38] указали, что эта звезда - наиболее холодный представитель группы гоАр-звезд. Они считали, что особенности спектра звезды являются результатом комбинации низкой температуры с избыточным содержанием редкоземельных элементов (4 dex). Отождествление линий в работах Уорнера [37] и Вегнера и др. [38,39] показало, что большинство сильных линий принадлежит редкоземельным элементам. Каули и др. [40] использовали метод статистики совпадений, чтобы продемонстрировать присутствие слабых линий железа.

Проблема эффективной температуры звезды важна при определении содержаний элементов, особенно при рассмотрении распределения редкоземельных элементов по стадиям ионизации. Профили водородных линий, в частности H α , имеют узкие ядра и широкие крылья и не могут быть использованы для определения эффективной температуры. Наличие значительного покровного эффекта, вследствие многочисленных сильных линий REE в ультрафиолетовой и синей области спектра, затрудняет корректное определение температуры из фотометрии. Теоретический расчет покровного эффекта и его влияния на модель атмосферы также затруднен неполнотой атомных данных для многочисленных линий REE в наблюдаемых трех стадиях ионизации. Определение эффективной температуры Куртцем и Вегнером [36] по наблюдениям инфракрасных водородных линий серии Пашена и по REE-спектрам показало, что эффективная температура этой звезды $T_{eff} = 7500$ K, и авторы отнесли ее к классу холодных гоАр-звезд. Из

наблюдений 6-цветной фотометрии Пшибыльский сделал заключение, что температура звезды близка к солнечной и составляет примерно 6000 К. Это разногласие было предметом многих дискуссий, и наиболее убедительным объяснением этого различия является влияние покровного эффекта. Увеличение плотности линий поглощения, особенно линий редкоземельных элементов, в ультрафиолетовой области спектра вызывает покраснение звезды (эффект обратного нагрева). Этот эффект хорошо известен и у других Ар-звезд.

Подробное отождествление линий редкоземельных элементов в спектре HD 101065 было представлено Каули и Матисом [41] в спектральном диапазоне 3900-6500 Å. В этой работе впервые указано на наличие линий дважды ионизованных редкоземельных элементов (Pr III, Nd III, Ce III), что не очень согласуется с ранее определенным низким значением температуры. Следующим этапом этого исследования была работа Каули и др. [42]. Авторы отметили, что спектральные peculiarity, подобные наблюдаемым в HD 101065, могут развиваться только в звездах с неглубокими конвективными зонами, т.е. в звездах не позднее спектрального класса F2. Одно из возможных объяснений - это то, что атмосфера может быть стабилизирована присутствием сильного магнитного поля. Каули и др. [42] выполнили детальный количественный анализ для области 3959-6652 Å, используя спектры высокого спектрального разрешения. Но в этой работе не рассматривался вопрос о содержании лития в атмосфере звезды HD 101065.

Впервые о наличии лития в спектре этой звезды упомянул Пшибыльский [33] в 1961 г., и это не осталось незамеченным. Уорнер [37] поставил специальные наблюдения этой звезды в обсерватории Радклиф (Претория), используя 74"-рефлектор для наблюдения в спектральной области 3770-6880 Å (дисперсия 6 Å/мм). Он обнаружил в области 5500-6880 Å очень сильные линии однажды ионизованных редкоземельных элементов, относительные интенсивности которых подобны лабораторным интенсивностям из таблиц [43]. Однако, как и упоминал Пшибыльский [33], линия Sm II 6707.45 Å может рассматриваться только как часть литиевой бленды, а главный вклад в эту бленду вносит резонансный дублет лития. Первая оценка содержания лития по отношению к солнечному содержанию сделана в работе Уорнера [37], ($[Li] = 2.4$) и в ней впервые сообщается о возможном присутствии 6Li .

3.3. Синтетические спектры. Спектры выбранных звезд мы исследовали детально в узких областях вблизи линий лития 6103 и 6708 Å методом построения синтетического спектра, учитывая зеемановское магнитное расщепление и блендирование линиями REE.

Дополнительное уширение, по всей видимости пульсационное, было описано вращательным профилем с параметром $v_e \sin i$ (см. табл.3).

Расчеты спектров для звезд HD 166473, γ Equ и 33 Lib были выполнены с использованием моделей атмосфер Куруца [29] с параметрами T_{eff} и $\log g$, взятыми из работ Гельбмана и др. [44] и Рябчиковой и др. [45, 46]. Для звезды HD 101065 использовалась модель, рассчитанная Я. Павленко с увеличенной непрозрачностью в линиях REE, как было описано в работе Шавриной и др. [47]. Для расчетов синтетического спектра мы применили программу Хана [48] SYNTHM, учитывающую расщепление спектральных линий в магнитном поле. Эта программа подобна известной программе Н.Е.Пискунова

Таблица 1

СПИСОК ЛИНИЙ, ВКЛЮЧЕННЫХ В РАСЧЕТЫ
СИНТЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА В ОБЛАСТИ 6705.8-6708.7 Å

Элемент	Длина волны, Å	Энергия нижнего уровня, эВ	$\log gf$	Источник
1	2	3	4	5
DyII	6705.727	2.078	-2.68	
NdII	6705.891	3.269	-2.70	
*YbII	6705.965	5.856	-3.04	DREAM
*CeII	6706.051	1.840	-0.95	DREAM
*TmII	6706.150	5.322	-1.07	DREAM
*TmII	6706.262	3.955	-2.36	DREAM
*CeII	6706.307	3.195	-2.40	DREAM
PrIII	6706.492	3.104	-1.28	
*PrIII	6706.705	0.550	-1.64	DREAM
NdII	6706.738	2.868	-2.48	
SmII	6706.789	1.586	-2.00	
SmII	6706.807	1.874	-1.78	
*TmII	6706.906	4.908	-2.47	DREAM
NdII	6706.922	3.211	-0.88	
NdII	6707.015	1.490	-1.88	
NdII	6707.033	2.222	-3.68	
*CeII	6707.121	1.255	-3.76	DREAM
DyII	6707.153	3.292	-1.27	
DyII	6707.266	2.890	-1.28	
SmII	6707.342	0.884	-2.00	
ErII	6707.418	3.482	-1.44	
NdII	6707.433	1.499	-2.17	
NdII	6707.453	2.880	-3.18	
GdII	6707.462	3.270	-1.98	
*SmII	6707.473	0.930	-1.48	VALD
*YbII	6707.603	6.651	-1.38	DREAM
SmII	6707.648	1.746	-1.27	
*NdII	6707.755	0.170	-3.55	DREAM
				Квинс [27]

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5
* ⁷ LiI	6707.756	0.000	-0.427	Смит и др. [28]
* ⁷ LiI	6707.768	0.000	-0.206	
SmII	6707.779	2.037	-2.68	Смит и др. [28]
* ⁷ LiI	6707.907	0.000	-0.931	
* ⁷ LiI	6707.908	0.000	-1.161	"
* ⁷ LiI	6707.919	0.000	-0.712	
* ⁶ LiI	6707.920	0.000	-0.478	"
* ⁷ LiI	6707.920	0.000	-0.931	
* ⁶ LiI	6707.923	0.000	-0.179	"
*NdII	6708.030	1.522	-1.13	
				DREAM
				Квине [27]
* ⁶ LiI	6708.073	0.000	-0.304	Смит и др. [28]
*CeII	6708.077	2.250	-2.50	
ErII	6708.088	3.155	-2.58	DREAM
*CeII	6708.099	0.701	-2.12	DREAM
NdII	6708.400	3.192	-2.48	
NdII	6708.458	3.536	-1.08	
NdII	6708.629	0.746	-4.58	

Таблица 2

ВКЛАД КОМПОНЕНТ, УЧИТЫВАЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ ПОГЛОЩЕНИЯ В БЛЕНДЕ LI I 6708 Å И ЛИНИЙ REE ПО ДЛИНАМ ВОЛН (В ПРОЦЕНТАХ ОТ КОНТИНУУМА)

Элемент	Длина волны Å	λ - 6707, Å															
		0.64	0.66	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94
Sm II	6707.648	19	18	13	7	2	1										
Nd II	6707.755				1	1	2	3	2	1							
⁷ Li I	6707.756	3	4	6	7	9	9	11	9	8	6	5	3	2	1	1	
⁷ Li I	6707.768	3	5	8	10	13	15	18	15	14	12	10	6	4	3	2	1
Sm II	6707.779						1	1	1	1							
⁷ Li I	6707.907								1	1	1	2	2	2	3	3	3
⁷ Li I	6707.908									1	1	1	1	1	2	2	1
⁷ Li I	6707.919						1	1	1	1	2	3	3	4	4	4	5
⁷ Li I	6707.920									1	1	2	2	2	3	3	3
⁶ Li I	6707.920								1	1	1	2	2	2	3	3	3
⁶ Li I	6707.923								1	1	2	2	3	3	4	5	4
Nd II	6708.029																3

SYNTHMAG и была тестирована в соответствии с процедурой, описанной в [49]. Для предварительных расчетов мы использовали также программы Цымбала [50] STARSF и ROTATE и в некоторых случаях программу ZEEMAN2 [49]. Упрощенная модель магнитного

поля в программе SYNTHM характеризуется радиальной (вдоль радиуса в каждой точке поверхности звезды), меридиональной и долготной компонентами поля B_r , B_m , B_l ($B_l = 0$ всегда, поскольку мы используем плоскопараллельные модели атмосфер). Эти параметры поля были определены по линиям Fe II 6147 и 6149 Å, Ca I 6102 Å, Ce II 6706.05 Å и Pr III 6706.70 Å (табл.3).

3.4. *Линии редкоземельных элементов с новыми атомными данными.* Для расчетов синтетического спектра мы использовали списки атомных линий из базы данных VALD [30]; линии редкоземельных элементов (REE) брались из базы DREAM [51]. Мы также рассчитали длины волн дополнительных линий REE, ионизованных однажды и дважды, используя уровни энергий из базы данных NIST (National Institute of Standards and Technologies), и оценили их астрофизические величины gf по спектру HD 101065 (звезда Пшибыльского), используя содержания элементов из [42]. Кроме того, для важных при определении содержания лития блендирующих линий (табл.1, 2) Р.Квине специально рассчитал теоретические величины gf для некоторых REE линий [47].

3.5. *Результаты анализа спектров α Ap-CP-звезд (II группа).* Наши результаты определения содержания лития и изотопного отношения ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ представлены в табл.3, в которой для каждой исследованной звезды приведены параметры используемой модели

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ И
ИЗОТОПНОГО ОТНОШЕНИЯ ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ В МЕДЛЕННО
ВРАЩАЮЩИХСЯ CP-ЗВЕЗДАХ

Спектральные линии	HD 101065	HD 134214	HD 137949	HD 166473	HD 201601
$T_{\text{eff}}/\log g/[m]$					
	6600/4.2/0	7500/4.0/0	7750/4.5/0	7750/4.0/0	7750/4.0/0
$\log \epsilon(\text{Li})$					
Li I 6708 Å	3.1	3.9	4.1	3.6	3.8
Li I 6103 Å	3.5	4.1	4.4	4.0	4.0
${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$					
Li I 6708 Å	0.4:	0.3:	0.2:	0.4:	0.5:
$B_r/B_m/B_l$, кГс					
Fe II 6 149 Å	-	-2.9/- 1.7/0	4.1/4.1/0	4.8/4.9/0	3.5/2.6/0.8
Pr III 6706.7 Å	0/2.3/0	-2.3/- 1.9/0	2.0/5.0/0	3.0/5.5/0	2.7/3.5/0
Ca I 6102.7 Å	0/2.4/0	-1.7/-2.8/0	3.0/4.0/0	-	0/4.0/0
$v_{\text{rot}} \sin i$, км/с					
Fe II 6149 Å	-	3.0	2.5	3.0	0.5
Pr III 6706.7 Å	3.5	2.0	4.0	5.0	2.5

атмосферы T_{eff} , $\log g$, $[m]$, содержание лития $\log N(\text{Li})$, определенное по обеим линиям $\text{Li I } 6708$ и 6103 \AA (дана величина $\log N(\text{Li})/N(\text{H})$ с ошибкой 0.1 dex), изотопное отношение, определенное по линии 6708 \AA , параметры магнитного поля и величина $v \sin i$. Параметры магнитного поля и величина $v \sin i$ находились из совмещения профилей линий $\text{Fe II } 6149 \text{ \AA}$, $\text{Pr III } 6706.7 \text{ \AA}$, $\text{Ce II } 6706.05 \text{ \AA}$ и $\text{Ca I } 6102.7 \text{ \AA}$ (в таблице указаны результаты для некоторых линий). Для звезды Пшибыльского HD 101065, в спектре которой линии железа слабы, а доминируют линии REE, особенно Ce II , параметры магнитного поля определялись только по линиям Pr III и Ce II . Сравнение наблюдаемого спектра с

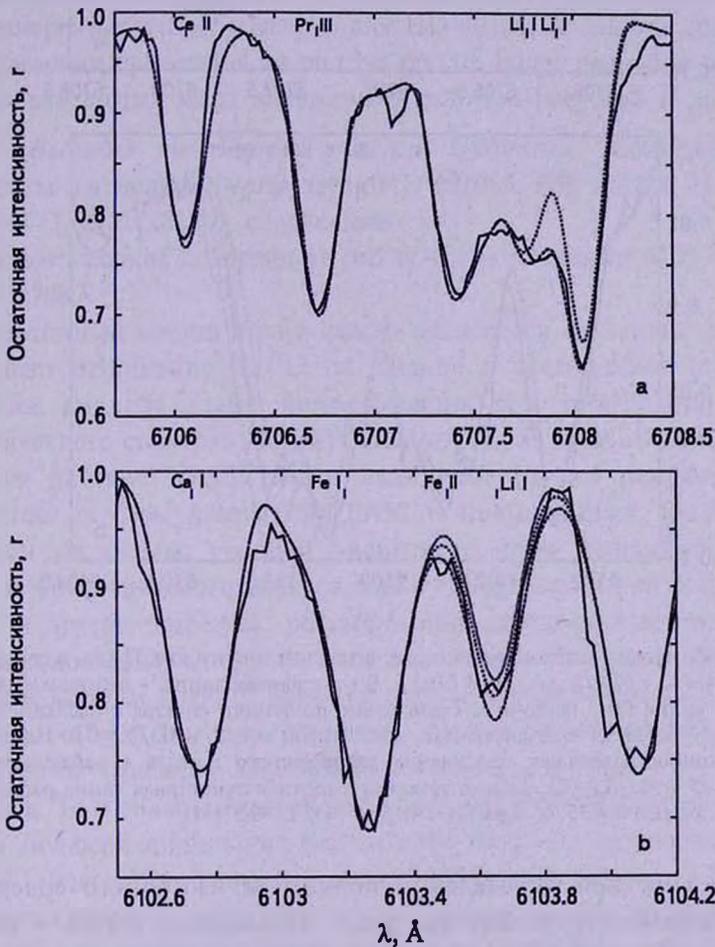


Рис.9. Сравнение наблюдаемого и рассчитанного спектра для HD 101065 в областях линий $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ (а) и 6103 \AA (б). Сплошная линия - наблюдаемый спектр; штриховая линия - наилучшее совмещение рассчитанного спектра с наблюдаемым при $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.10$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.4$, верхняя пунктирная линия - только ${}^7\text{Li}$ (на рисунке а); б - наблюдаемый (сплошная линия) и рассчитанные спектры для $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.35 \pm 0.2$ пунктирные (верхняя пунктирная линия для $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.35$, средняя пунктирная линия для $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.55$ и нижняя штриховая линия для $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.75$) [52].

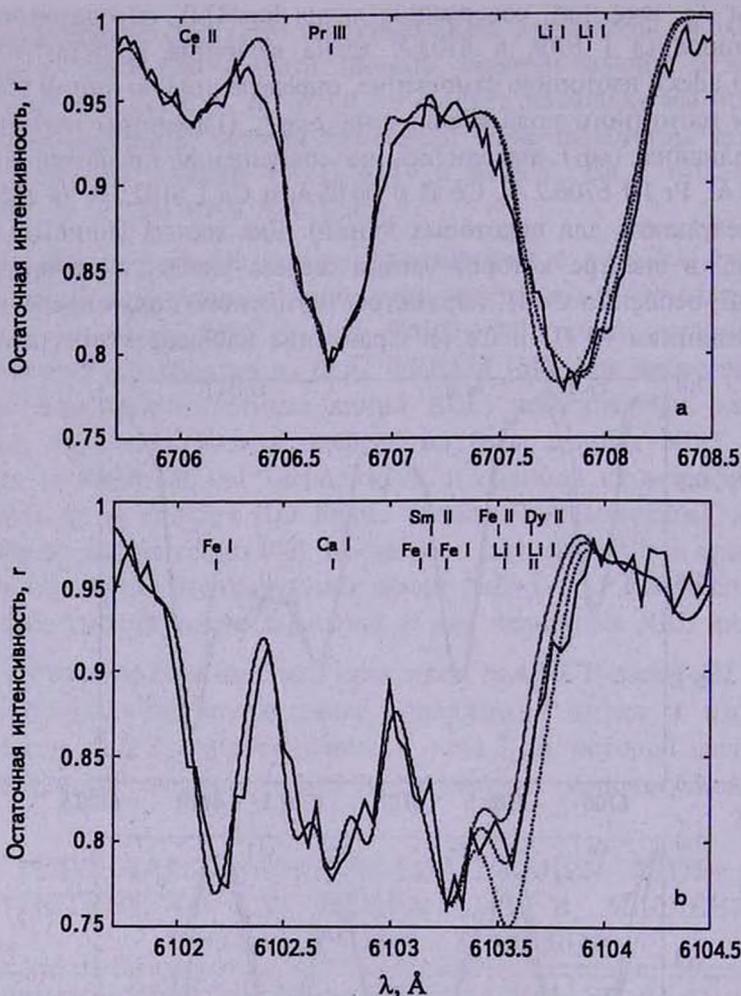


Рис.10. Сравнение наблюдаемого и рассчитанного спектра для 33 Lib в спектральной области линии Li I 6708 Å (а) и Li I 6103 Å (б). Сплошная линия - наблюдаемый спектр; пунктирная линия (а) - наилучшее совмещение расчетного спектра с наблюдаемым при $\log g(\text{Li}) = 4.10$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}=0.2$, штриховая для $\log g(\text{Li}) = 4.17$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}=0.0$. На рисунке б штриховая линия наилучшее совмещение рассчитанного спектра с наблюдаемым при $\log g(\text{Li}) = 4.45$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}=0.2$, верхняя точечная и нижняя пунктирная линии рассчитанный спектр для $\log g(\text{Li}) = 4.75$ и $\log g(\text{Li}) = 4.15$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}=0.2$ [52].

теоретическим, при определении полного и изотопного содержания лития, продемонстрировано на рис.9. Положение линий - главных вкладчиков в поглощение, отмечено на рис.9 и рис.10 сверху над спектрами и в табл.2 для HD 101065.

Параметры магнитного поля, определенные по линии Ca I 6102.7 Å, были использованы для построения синтетического спектра в области линии лития 6103 Å; параметры, определенные по линии Pr III 6707.6 Å

- в области линии лития 6708 Å. Отметим, что для звезды HD 166473 с самым большим поверхностным полем мы получили различные величины параметров магнитного поля. Профиль линии Pг III описывается параметрами $\{B_r, B_m, B_l\} = \{3000, 5500, 0\}$ Гс, в то время как профиль линии лития требует соответствующих величин $\{4000, 9000, 0\}$ Гс. Линии Fe II 6147 и 6149 Å описываются наилучшим образом параметрами $\{B_r, B_m, B_l\} = \{4800, 4900, 0\}$ Гс. Такие величины согласуются с дипольной моделью магнитного поля для звезды: в области образования линий лития, вблизи полюсов поле должно иметь максимальную величину. Мы не имели спектров этой звезды для области линии лития 6103 Å.

Примеры расчетных спектров для HD 101065 и 33Lib и сравнение с наблюдаемыми приведены на рис.9 и рис.10. Более подробно результаты анализа для других звезд изложены в работе Шавриной и др. [52].

3.6. *Выводы по второй части Проекта.* Наиболее важные результаты наблюдений гоAr-звезд HD 101065, HD 134214, HD 137949, HD 166473, HD 201601 следующие:

- более высокое содержание лития (Li I) по линии 6103 Å, чем по линии 6708 Å;
- изотопный состав лития слегка отличается от звезды к звезде и превышает отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ на Солнце и космическое отношение;
- для анализа были использованы три программы расчета синтетического спектра: STARSP, ZEEMAN2, SYNTM. В список линий из базы данных VALD были включены линии редкоземельных элементов из базы данных DREAM и новые линии, рассчитанные авторами на основе уровней энергии из базы данных NIST. При расчетах синтетического спектра были учтены магнитное расщепление линий и другие эффекты, расширяющие спектральные линии;
- высокое содержание лития в атмосферах указанных выше звезд по обеим линиям лития и высокие оценки изотопического отношения $R = {}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} - (0.2-0.5)$ можно объяснить производством лития в реакциях "скалывания" (spallation reactions) и сохранением изотопов лития: как ${}^6\text{Li}$, так и ${}^7\text{Li}$ с сильным магнитным полем в верхних слоях атмосферы вблизи полюсов дипольного магнитного поля. Для уточнения наших оценок содержания лития у медленно вращающихся CP-звезд и отношения содержаний его изотопов нужны новые лабораторные и теоретические значения сил осцилляторов g_f для блендирующих REE-линий.

4. *Обсуждение результатов и заключение.* Открытие литиевых структур на поверхности холодных CP-звезд, связанных со структурой магнитного поля у этих звезд, ставит проблему звездного магнетизма более широко. Магнитные поля могут быть ответственны за создание

и поддержание неоднородности распределения химических элементов, а также температуры. Эти структуры основаны на аналогии с темными пятнами, которые ассоциируются с областями сильного магнитного поля на поверхности Солнца. Более детальное исследование лития в солнечных пятнах существенно расширит круг проблем, необходимых для разгадки проблемы лития в CP-звездах, и поможет узнать те физические процессы, которые отвечают за содержание в них лития.

Проблема интерпретации наблюдаемых величин содержания лития в звездных атмосферах является одной из загадок современной астрофизики, из-за разнообразия содержания этого элемента у звезд, близких по своим физическим параметрам.

Физическими причинами, которые тормозят перемешивание звездного вещества и конвективные движения, могут быть магнитное поле и вращение звезды. В работе Ламберта и Сойера [5] сделано предположение, что в гигантах, обогащенных литием, литий продуцируется в результате реакций "скалывания".

Для того, чтобы этот механизм работал, необходимо магнитное поле для ускорения протонов и альфа-частиц, которые, сталкиваясь с CNO ядрами, продуцируют литий. Предположение авторов [5], что эти гиганты в своем развитии проходили стадию химически-пекулярной звезды с магнитным полем и высоким содержанием лития (до 4.00 dex), стимулировало интерес к проблеме лития в магнитных CP-звездах.

Важнейшим результатом исследования лития для Ap-CP-звезд HD 83368 и HD 60435 явилось открытие контрастных "литиевых" пятен вблизи магнитных полюсов.

Синхронные изменения лития для HD 83368, магнитного поля, блеска и феномена осцилляции, были объяснены моделью наклонного ротатора с дипольным магнитным полем и "литиевыми пятнами" на магнитных полюсах.

Спектральный мониторинг для других CP-звезд, переменность спектров которых впервые обнаружена в результате наших наблюдений на телескопах ЗТШ (КраО), САТ (ЕSO), продолжает проводиться на БТА.

Новая серия наблюдений в спектральной области резонансного дублета лития 6708 Å и субординатной линии 6103 Å для медленно вращающихся CP-звезд имеет целью поиски корреляции между содержанием лития по линиям 6708 Å и 6103 Å. Полученные различия в содержании лития объясняются, по-видимому, различием потенциалов возбуждения и глубин формирования линий, вертикальной стратификацией лития в атмосфере CP-звезды.

Группа медленно вращающихся CP-звезд с сильной и непременной линией лития 6708 Å показала высокое содержание лития с аномальным

изотопным составом ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} > 0.1$. Среди этих звезд выделяется уникальная звезда HD 101065 - ультрамедленный ротатор ($v_e \sin i \approx 1.5$ км/с) с самым большим избытком редкоземельных элементов в ее атмосфере (> 4 dex) и с самыми сильными осцилляциями, которые вызывают пульсационное уширение линий в спектре. Было определено содержание лития в атмосфере этой звезды, $\log\epsilon(\text{Li}) = 3.1$ (в шкале $\log N(\text{H}) = 12.0$) и изотопное отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \approx 0.3 - 0.4$.

Пекулярный химический состав атмосферы гоAr-звезды HD 101065 с большим избытком редкоземельных элементов, возможно, свидетельствует о выносе в поверхностные слои звезды элементов r-процесса. В то же время наблюдаемое высокое содержание лития означает, что есть причины, препятствующие полному разрушению лития при процессах перемешивания. Причиной может быть магнитное поле, величина которого на поверхности звезды достигает 2300 Гс. Кроме того, наблюдаемый литий может быть произведен так называемыми реакциями "скалывания" на поверхности звезды в магнитных полярных областях звезды (где находятся литиевые пятна). В пользу этой гипотезы свидетельствует лучшее описание спектра с включением изотопа ${}^6\text{Li}$ с отношением ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.3 - 0.4$.

Интерпретация этих наблюдательных результатов лития в Ar-CP-звездах позволит понять механизм образования этих аномалий и приблизиться к разгадке природы этих звезд. Как известно, вследствие подавления конвективных движений сильными магнитными полями, атмосферы этих звезд обладают недоразвитой тонкой конвективной оболочкой. Поэтому следует ожидать, что наблюдаемая неоднородность химического состава Ar-CP-звезд обусловлена как процессами диффузии, так и особенностями структуры магнитного поля.

Создание и реализация базы наблюдательных данных в спектральной области линий лития 6708 Å и 6103 Å - важнейшая проблема для будущих статистических и теоретических исследований CP-звезд, а наши новые результаты по содержанию лития в Ar-CP-звездах и их интерпретация открывают новые перспективы в исследованиях физической природы CP-звезд и их эволюционного статуса.

¹ НИИ Крымская астрофизическая обсерватория,
Украина, e-mail: polo@crao.crimea.ua

² ГАО НАНУ, Украина, e-mail: shavrina@mao.kiev.ua

LITHIUM IN THE CHEMICALLY PECULIAR
CP-STARS WITH MAGNETIC FIELDSN.S.POLOSUKHINA¹, A.V.SHAVRINA²

The problem of lithium in chemically peculiar Ap-CP stars was many years a subject of debates. The main cause of this is a deficit of Ap-stars observations in spectral region of the resonance lithium doublet 6708 Å. Within the framework of the International Project "Lithium in cool CP-stars with magnetic fields", the cooperation of researchers of several countries was implemented since 1996 using systematic observations of CP-stars in spectral ranges of lithium lines 6708 Å and 6103 Å on telescopes ZTSH (CrAO), CAT (ESO), Feros (ESO) and 74" telescope Mount Stromlo (Australia), the analysis of some CP-stars with different lithium line behavior during rotational period was performed. Monitoring of oscillating Ap-stars HD 83368, HD 60435 and HD 3980, which show the considerable Doppler shifts of lithium line 6708 Å, lead to discover "lithium spots" on the surface of these stars. The connection of this spottiness with magnetic field structure is found also. The surface spottiness modeling of these stars with the help of special code "ROTATE" was carried out using profiles of the line 6708 Å. This code allowed us to evaluate the sizes of lithium spots, their location on the surfaces of stars, and lithium abundances in these spots. The detailed study and spectra modeling for slowly rotating roAp-stars with a strong non-variable line of lithium 6708 Å taking into account the blending of rare earth elements lines show high lithium abundance, at that time lithium abundance determined from lithium line 6103 Å is more high than from lithium line 6708. This discrepancy could be explained by the vertical stratification of lithium in the atmospheres of these stars with anomalous lithium isotopic ratios ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.2 - 0.5$. The unique roAp star HD 101065, one of these stars, is a ultraslow rotator ($v \sin i \approx 1.5$ km/s), visible from the pole, and has the most powerful oscillations, which results in pulsational broadening of spectral lines. The lithium abundance in the atmosphere of HD 101065 is 3.1 dex in the scale of $\log N(\text{H}) = 12.0$ and isotopic ratio ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ is about 0.3. High estimates of ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ ratio (0.2-0.5) can be explained by lithium production due to spallation reactions and the preservation of surface ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ by strong magnetic fields in upper levels of stellar atmosphere near magnetic poles.

Key words: *stars: chemically peculiar CP - stars: lithium spots*

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.Herbig*, *Astrophys. J.*, **140**, 702, 1964.
2. *G.Herbig*, *Astrophys. J.*, **141**, 588, 1965.
3. *F.Spite*, *Mem. Soc. Astron. It.*, **66**, 517, 1995.
4. *G.Wallerstein*, *Astrophys. J.*, **141**, 311, 1965.
5. *D.Lambert, S.Sawyer*, *Astrophys. J.*, **283**, 192, 1984.
6. *W.Bonsack, J.Greenstein*, *Astrophys. J.*, **131**, 83, 1960.
7. *H.Babcock*, *Astrophys. J.*, **108**, 105, 1997.
8. *J.Rice*, *Astron. Nachr.*, **323**, 220, 2002.
9. *V.Khokhlova*, *Astron. Nachr.*, **297**, 203, 1976.
10. *V.Khokhlova, D.Vasilchenko, V.Stepanov, V.Tsybal*, *Письма в Астрон. ж.*, **23**, 532, 1997.
11. *D.Kurtz, P.Martinez*, *Baltic Astronomy*, **9**, 253-353, 2000.
12. *A.V.Shavrina, N.S.Polosukhina, V.Tsybal, V.Khalack*, *Astron. Rep.*, **44**, 235, 2000.
13. *D.Kurtz*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **200**, 807, 1982.
14. *R.Faraggaina, M.Hack*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **75**, 376, 1963.
15. *G.Wallerstein, M.Hack*, *Observatory*, **84**, 160, 1964.
16. *G.Wallerstein, A.Merchant*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **77**, 140, 1965.
17. *N.Polosukhina*, *Izv. Krym. Astrofiz. Observ.*, **47**, 118, 1973.
18. *N.Polosukhina*, *Izv. Krym. Astrofiz. Observ.*, **50**, 57, 1974.
19. *N.Polosukhina*, *Izv. Krym. Astrofiz. Observ.*, **54**, 120, 1976.
20. *N.Polosukhina, L.Lyubimkov*, *Mem. Soc. Astron. It.*, **66**, 361, 1995.
21. *M.Hack, N.Polosukhina, V.Malanushenko, F.Castelli*, *Astron. Astrophys.*, **319**, 637, 1997.
22. *R.Faraggiana, M.Gerbaldi, F.Delmos*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **238**, 169, 1996.
23. *P.North, N.Polosukhina, V.Malanushenko, M.Hack*, *Astron. Astrophys.*, **333**, 644, 1998.
24. *N.Polosukhina, D.Kurtz, M.Hack et al.*, *Astron. Astrophys.*, **351**, 283, 1999.
25. *D.Kurtz*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **249**, 468, 1991.
26. *I.B.Thompson*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **205**, 43, 1983.
27. *G.Mathys*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **89**, 121, 1991.
28. *D.Kurtz, van F.Wyk, G.Roberts et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **287**, 69, 1997.
29. *R.Kurucz*, *CDR (1-23)*, 1994.
30. *F.Kupka, N.Piskunov, T.Ryabchikova, H.Stempels, W.W.Weiss*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **138**, 119, 1999.
31. *O.Kochukhov, N.Piskunov*, *Astron. Astrophys.*, **388**, 868, 2002.
32. *O.Kochukhov, N.Drake, N.Piskunov, de la Resa*, *Astron. Astrophys.*, **424**, 935, 2004.
33. *A.Przybylski*, *Nature*, **189**, 739, 1961.
34. *A.Przybylski*, *Nature*, **210**, 20, 1966.
35. *S.C.Wolff, W.Hagen*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **88**, 119, 1976.

36. *D.Kurtz, G.Wegner*, *Astrophys. J.*, 232, 510, 1979.
37. *B.Warner*, *Nature*, 211, 55, 1966.
38. *G.Wegner, A.D.Petford*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 168, 557, 1974.
39. *G.Wegner, D.Cummins, P.Byrne, D.Stickland*, *Astrophys. J.*, 272, 646, 1983.
40. *C.R.Cowley, A.P.Cowley, G.Aikman et al.*, *Astrophys. J.*, 216, 37, 1977.
41. *C.R.Cowley, G.Mathys*, *Astron. Astrophys.*, 339, 165, 1998.
42. *C.R.Cowley, T.Ryabchikova, F.Kupka et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 317, 299, 2000.
43. *W.F.Meggers, C.H.Corliss, B.F.Seribnez*, *Nat. Bur. Stand. Mon.*, 32, 1961.
44. *M.Gelbmann, T.Ryabchikova, W.Weiss et al.*, *Astron. Astrophys.*, 356, 200, 2000.
45. *T.A.Ryabchikova, J.D.Landstreet, M.J.Gelbmann et al.*, *Astron. Astrophys.*, 327, 1137, 1997.
46. *T.Ryabchikova, N.Piskunov, I.Savanov et al.*, *Astron. Astrophys.*, 343, 229, 1999.
47. *A.V.Shavrina, N.S.Polosukhina, Ya.V.Pavlenko et al.*, *Astron. Astrophys.*, 409, 707, 2003.
48. *S.Khan, J.Quantit*, *Spectrosc. Radiat. Transfer*, 88, 71, 2004.
49. *G.A.Wade, S.Bagnulo, O.Kochukov et al.*, *Astron. Astrophys.*, 374, 265, 2001.
50. *V.Tsymbal*, *Model Atmospheres and Spectrum Synthesis*, eds. S.J.Adelman, F.Kupka, W.W.Weiss, *ASP Conference Series*, 108, 198, 1996.
51. *E.Biemont, P.Palmeri, P.Quinet*, *D.R.E.A.M. Database on Rare Earth at Mons. Univ.*; <http://www.umh.ac.be/~astro/dream.shtml>.
52. *А.В.Шаврина, Н.С.Полосухина и др.*, *Астрон. ж.*, 83, 560, 2006.