

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи

Павловский Сергей Евгеньевич

**Фотометрическое и спектроскопическое исследование структурных
особенностей газовых оболочек некоторых Ae/Be звезд Хербига**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия
(физико-математические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Погодин Михаил Александрович

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УНИКАЛЬНОЙ Ве ЗВЕЗДЫ ХЕРБИГА HD52721	20
1.1. Предварительная информация об объекте.....	20
1.2. Переобработка майданакских фотометрических данных	24
1.3. Фотометрические наблюдения HD52721 на Кисловодской горной станции ГАО РАН	28
1.4. Выводы из Главы 1.....	37
ГЛАВА 2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ HD52721	39
2.1. Спектроскопия высокого разрешения.....	39
2.2. Атмосферные линии.....	41
2.3. Параметры компонентов системы.....	48
2.4. Околосветовые линии	49
2.5. Выводы из Главы 2.....	57
ГЛАВА 3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ Ae/Ве ЗВЕЗДЫ ХЕРБИГА HD37806	59
3.1. Предварительная информация об объекте.....	59
3.2. Наблюдения	61
3.3. Профили околосветовых линий.....	63
3.4. Особенности переменности спектральных линий на временном масштабе от дней до месяцев	71
3.5. Обсуждение результатов наблюдений	81
3.6. Свидетельства наличия магнитосферы у HD37806.....	87
3.7. Выводы из Главы 3.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
ЛИТЕРАТУРА.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ	104

Введение

В 1960 г. Дж. Хербиг [1] выделил группу звезд спектрального класса А – В с эмиссионными линиями, которых он считал наиболее вероятными кандидатами в молодые звезды промежуточных масс (2 – 10 масс Солнца) на стадии эволюции до Главной Последовательности (ГП). Их отличительными свойствами было наличие в спектре ярких эмиссионных линий, расположение в районах звездообразования и ассоциация с туманностями. Существование подобных объектов предсказывала теория звездообразования.

Согласно этой теории, на наиболее ранней стадии эволюции молодая звезда полностью погружена в газопылевой кокон и видна только в дальнем инфракрасном (ИК) и субмиллиметровом диапазонах спектра. Это так называемая стадия протозвезды (Ларсон [2], Стайлер и др. [3], Палла и Стайлер [4]). Постепенно вещество кокona оседает на звёздное ядро, и объект становится оптически видимым. Остатки кокona концентрируются в плоскости вращения в виде околозвездного диска, из которого продолжается аккреция на звезду.

Фаза эволюции от «линии рождения» до выхода на ГП, когда в недрах звезды начинается термоядерное горение водорода, называется эволюционной стадией до Главной Последовательности (PMS-стадией). Звезды разной массы проходят эту стадию по-разному (Палла и Стайлер [5,6]). У звезд малой массы ($M < 2M_{\text{Солнца}}$) этот путь продолжается десятки миллионов лет, при этом звезда уменьшается в размерах, а ее поверхностная температура практически не меняется (эволюционные треки Хайаши [7]). Такие объекты в настоящее время отождествляются с маломассивными звездами типа Т Tauri (Джой [8]) поздних спектральных классов F–M. У объектов промежуточных масс, с которыми отождествляются Ae/Be звезды Хербига, эволюционные треки более сложные. Перед выходом на ГП у сжимающейся звезды растет температура, а сама продолжительность PMS стадии составляет несколько миллионов лет.

Примечательно, что более поздние Ae звезды Хербига с массами менее 3 масс Солнца появляются в начале PMS эволюционной стадии как звезды типа T Tauri и имеют спектральные классы G–K. И, наконец, звезды больших масс ($M > 8$ масс Солнца) «вылупляются» из кокона, уже находясь на ГП. В отличие от эволюции самой звезды, эволюция околозвездного диска, заканчивающаяся его фрагментацией и образованием планетных систем, зависит от массы объекта в меньшей степени. Поэтому маломассивные звезды достигают ГП, уже лишившись дисков, а у молодых звезд больших масс диски еще присутствуют даже на ГП.

Начиная с 1960 г., появилось большое количество работ, посвященных наблюдательному исследованию Ae/Be звезд Хербига. Среди первых каталогов этих объектов можно упомянуть работы Финкенцеллера и Мундта [9] и Тэ и др. [10]. За последние годы изменился и основной набор отличительных признаков этого класса объектов. Оказалось, что их ассоциация с туманностями не является обязательной. Была выделена группа так называемых изолированных Ae/Be звезд Хербига (см. Воцинников и др. [11], Гринин и др. [12,13]).

Их образования связывают, в частности, с существованием одиночных молекулярных микроконденсаций, которые могли бы стать локальными районами звездообразования (см., например, работы Переса и Грэди [14], Тести и др. [15], Хилленбранд [16]).

В настоящее время главным отличительным признаком всех типов молодых PMS объектов, в том числе и Ae/Be звезд Хербига, считается избыток излучения в дальней ИК и субмиллиметровой области спектра ($\lambda \geq 10$ мкм), связанный с тепловым излучением холодной пыли в периферийных областях реликтового околозвездного диска. Вблизи звезды пыль сублимирует, и диск становится чисто газовым. Именно в нем и формируются эмиссионные спектральные линии.

Актуальность изучения Ae/Be звезд Хербига обусловлена тем, что эти объекты находятся на одной из наиболее активных стадий эволюции, когда за сравнительно непродолжительное время у звезды происходят кардинальные изменения внутреннего строения и характера ее взаимодействия с околозвездной оболочкой. На разных этапах этого взаимодействия структурные особенности

околозвездного газа претерпевают изменения. Помимо аккреции на звезду из экваториального диска, у Ae/Be звезд Хербига наблюдается и обратный процесс оттока вещества в сторону от звезды (ветер). Баланс между процессами аккреции и истечения вблизи поверхности звезды окончательно не исследован, он может изменяться во времени и от объекта к объекту. При этом он теснейшим образом связан с магнитным полем звезды, определяющим структуру и кинематику газовых потоков в области взаимодействия звезды с ее оболочкой. Все эти процессы должны оказывать влияние на характер последующей фрагментации околозвездных дисков и образования планетных систем, подобных нашей Солнечной системе.

Поэтому исследование структурных и кинематических особенностей околозвездного газа в оболочках избранных Ae/Be звезд Хербига дает возможность получить новую информацию о характере взаимодействия звезды и ее оболочки на стадии эволюции этих объектов в сторону ГП.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию пространственной структуры и химического состава пылевых аккреционных дисков на больших расстояниях от звезды. Одним из используемых методов является анализ спектрального распределения энергии излучения (SED) в диапазонах от 1 мкм до радиодиапазона, наблюдаемого в широких фотометрических полосах, а также исследования тонкой структуры линий и полос различных молекул (например, сложной молекулы ПАУ (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)) с использованием спектрографов для ближнего и среднего инфракрасных диапазонов (NIR и Mid-IR), таких, как Spitzer/IRS, ISO/SWS, ISO/ISOPHOT-SL и др. Их спектральное разрешение достигает, как правило, $R \sim 10^2 - 10^3$. Достаточно полные обзоры такой аппаратуры можно встретить в работах Антонеллини и др. [17] и Сеок и Ли [18].

Второй очень часто применяемый метод исследования удаленных пылевых дисков Ae/Be звезд Хербига, начатый еще в конце XX-го столетия – это построение пространственных изображений объектов на избранных спектральных интервалах. Для этого применяются различные интерферометры, настроенные на

определенную спектральную полосу. Среди них можно отметить интерферометр в Атакаме для суб-и-миллиметрового диапазона ALMA, интерферометры для видимого и ИК диапазонов на VLTI (CHARA и др.) – см. обзор Белтрана и де Вита [19], PIONER/VLTI (Лазарев и др. [20]), AMBER/VLTI (Хоун и др. [21]) и GRAVITY/VLTI (Дэвис и др. [22], Перро и др. [23]).

При использовании последних приборов удавалось достичь пространственного разрешения на уровне менее 1 миллиардсекунды, что позволило диагностировать не только дальний пылевой диск, но и более близкие окрестности звезды на расстоянии менее 1 а.е., где диск уже становится чисто газовым. Благодаря современной интерферометрии было получено много данных о достаточно сложной пространственной структуре околозвездной пыли, содержащей арки, спирали, кольца, уплотнения и разрывы в распределении вещества. На расстояниях, более близких к звезде, стало возможным разрешать очаги планетообразования и области локальных возмущений (perturbations) в газовом диске. На основе полученных данных были сделаны попытки классифицировать морфологические особенности околозвездных дисков у объектов различных типов и обнаружить эволюционные эффекты (см. Мену и др. [24]).

Представления о структуре газовой оболочки, окружающей Ae/Be звезды Хербига, существенно изменялись в течение нескольких десятилетий исследования этих объектов. Профили эмиссионных линий в их спектрах выглядят достаточно разнообразно. Наиболее яркая линия H α может иметь или двойной эмиссионный профиль, типичный для вращающихся газовых дисков, или профили типа P Cyg, свидетельствующий о присутствии плотного ветра на луче зрения, или просто одиночный эмиссионный профиль. Еще в 90-е года прошлого столетия предлагались модели сферически симметричного ветра, истекающего с поверхности звезды (Страфелла и др. [25]), а наличие газовых дисков у объектов с P Cyg – профилями линий даже не рассматривалось.

В 1996г. Гринин и Ростопчина [26] опубликовали результаты своего исследования корреляции амплитуды фотометрической переменности и

поляриметрической активности большой выборки Ae/Be звезд Хербига с типом их профиля линии H α . Они показали, что наибольшая активность наблюдается у объектов с двойными эмиссионными профилями, многих из которых тогда относили к переменным типа UX Ori (уксорам). Было высказано предположение, что уксоры – это подгруппа Ae/Be звезд Хербига, ориентированных к наблюдателю «с ребра». Отсюда был сделан вывод, что газовая оболочка Ae/Be звезд Хербига состоит из экваториального аккреционного диска – внутренней части протяженного реликтового газопылевого диска, и ветра на более высоких широтах. И все различия в наблюдаемых типах профиля H α зависят исключительно от наклона диска к лучу зрения. Это заключение было подтверждено последующими наблюдениями.

Таким образом, было установлено единство общей структуры газовых оболочек всех PMS объектов различных масс: Ae/Be звезд Хербига и классических звезд типа T Tauri с развитыми околовзвездными дисками (CTTS-звезд). Для CTTS уже тогда была общепризнанная модель так называемой магнитосферной аккреции (МА-модель). Согласно этой модели, аккреционный диск взаимодействует с магнитным полем звезды, которое останавливает аккреционный поток в сторону звезды и разрушает структуру диска вблизи его внутренней границы. При этом и конфигурация магнитного поля, поджимаемая диском в экваториальной области, видоизменяется. Она представляет собой уже искаженный диполь. В результате аккреция вещества на звезду происходит уже не в экваториальной плоскости, а вдоль замкнутых силовых линий поля в область высоких широт. Часть аккрецируемого вещества уносится от звезды вдоль открытых силовых линий под действием механизма магнитной центрифуги. Под магнитосферой в данном случае понимают область вблизи звезды с границей, где происходит остановка и разрушение диска. Предполагается, что на границе магнитосферы плотность магнитной энергии и кинетической энергии газа выравнивается. Понятно, что радиус магнитосферы должен зависеть от величины магнитного поля звезды, а также от темпа аккреции на звезду. Для CTTS этот радиус составляет около 5–10 радиусов звезды при напряженности магнитных

полей порядка нескольких килогауссов (Гуллбринг и др. [27], Гуэнтер и др. [28]). Различные версии МА-моделей для Т Tauri – звезд описаны в ряде работ 90-х годов: Камензинд [29], Кёнигл [30], Колье и Кэмпбэлл [31], Шу и др. [32] и другие.

Применимость МА сценария к объектам промежуточных масс и более ранних спектральных классов не столь очевидна. Для эффективности такого сценария требуется достаточно сильное магнитное поле звезды, которым обладают ТTauri-звезды, имеющие поздний спектральный класс. Считается, что в атмосферах Ae/Be звезд Хербига нет конвективных зон, что исключает действие классического динамо-механизма генерации сильных крупномасштабных магнитных полей, способных трансформировать аккреционный поток из диска. Однако, недавние расчеты Кантиэлло и др. [33] показывают возможность существования подфотосферных конвективных зон и у объектов больших масс.

За последние 15 лет было опубликовано много работ, посвященных прямым измерениям магнитных полей у ряда Ae/Be звезд Хербига с использованием спектрополяриметрического метода, основанного на регистрации и анализе зеемановского расщепления атмосферных линий (Хубриг и др. [34–37], Вэйд и др. [38,39], Алесян и др. [40–42]). Были обнаружены магнитные поля порядка 10^2 Гс (то есть на порядок слабее, чем у ТTauri звезд) у многих объектов. Как правило, у всех таких объектов наблюдается небольшая проекционная скорость вращения $V \sin i$. Вполне возможно, что здесь присутствует селекционный эффект, и подобные магнитные поля имеют все Ae/Be звезды Хербига, только их трудно обнаружить при больших величинах проекционной скорости вращения, замывающей Зееман-эффект.

Недавно Каули и Джонс-Крулл [43] проанализировали структуру профилей линии HeI 10830 у большой выборки Ae/Be звезд Хербига различных спектральных классов (более 50 объектов). Они пришли к выводу, что у ранних Be звезд МА аккреция, скорее всего, отсутствует, а у более поздних Be и Ae звезд можно встретить ее признаки, но с существенно меньшими радиусами магнитосферы (~ 2 радиусов звезды). Этот вывод требует дальнейшей проверки.

Следует отметить, что в ряде работ, посвященных феноменологическому моделированию профилей эмиссионных линий у ряда Ae звезд с использованием модели дискового ветра, наилучшее согласие с наблюдениями было достигнуто при предположении, что ускорение ветра начинается от границы некоторой гипотетической магнитосферы с радиусом порядка 2-х звездных радиусов, магнитное поле которой и было причиной ускорения ветра (Тамбовцева и др. [44], Гринин и др. [45]).

В целом, можно сказать, что в применении к Ae/Be звездам Хербига, предлагались различные сценарии взаимодействия аккреционного диска со звездой. Среди вариантов характера аккреционного процесса назывались:

- а) дисковая аккреция на звезду при отсутствии магнитосферы;
- б) дисковая аккреция на звезду через магнитосферу;
- в) быстрая аккреция на больших широтах при слабом магнитном поле звезды, как результат перераспределения углового момента в дисковом ветре в стороне от плоскости диска (3-х мерная МГД модель Такасао и др. [46]), Предлагаемые модели ветра также отличались многообразием.

Это:

- а) истечение газа из области непосредственного контакта диска с магнитосферой (первые модели Камензинда [29], Шу и др. [32], и последние работы Романовой и др. [47]);
- б) модели ветра с поверхности диска (Тамбовцева и Гринин [48], Гринин и Тамбовцева [49]) и обзоры предыдущих работ, приведенные в этих статьях;
- в) модели околополярного биконического ветра (Ермолаева и др. [50]).

Критерием реалистичности всех этих сценариев должны стать результаты сравнения модельных расчетов с наблюдаемыми явлениями. Так, в работе Гринина и Тамбовцевой [49] отмечалось, что результаты, полученные Бассиотти и др. [51] и Феррейрой и др. [52], свидетельствуют в пользу того, что ветер истекает именно с поверхности самого диска, а не из района его контакта с предполагаемой магнитосферой звезды. Свидетельством существования быстрой аккреции на звезду через магнитосферу, или в результате механизма,

предложенного Такасао и др. [46], может служить большая ширина красной абсорбционной компоненты профиля линии гелия на $5876 \text{ \AA}$, наблюдающаяся у многих Ae/Be звезд Хербига до $+300\text{-}400 \text{ км/с}$. Но наиболее надежным признаком именно МА сценария является цикличность изменения параметров линий, формирующихся в районе взаимодействия звезды с диском, с периодами, равными периоду вращения звезды Prot , или $\text{Prot}/2$ при такой ориентации магнитной оси, когда за один период вращения поочередно появляются оба магнитных полюса (Шёллер и др. [53]).

Практика показала, что одним из наиболее эффективных методов исследования Ae/Be звезд Хербига являются многолетние спектроскопические мониторинги, по возможности, сопровождаемые параллельными фотометрическими и поляриметрическими наблюдениями. Они позволяют исследовать процессы в широком диапазоне характерных времен: от часов и дней до месяцев и лет. Начиная с 90-х годов прошлого столетия в рамках Пулковской программы исследования Ae/Be звезд Хербига была опубликована серия статей с результатами спектральных наблюдений большой подгруппы этих объектов класса A с признаками плотного ветра на луче зрения. В список этих публикаций вошли работы: Погодин [54], Бескровная и др. [55-57], Бескровная и Погодин [58], Погодин и др. [59]. В результате этих исследований было установлено, что:

- а) зона ветра со временем может менять свое широтное распределение и
- б) ветер имеет азимутально неоднородную струеобразную структуру. Последний вывод [59] подтверждал результаты модельных расчетов, упомянутых в работе Тамбовцевой и Гринина [48].

Подобная стратегия была продолжена в работах Козловой и др. [60-63]. Авторами была подтверждена кинематическая стратификация ветра у Ae звезд Хербига, что может быть отражением его широтной стратификации. Ими было также отмечено, что переменность профиля $\text{H}\alpha$ на временном масштабе порядка лет может быть следствием существования второго компонента вблизи исследуемой звезды или наличия в ее оболочке очагов планетообразования.

Особое место в исследовании Ae/Be звезд Хербига занимает комплексное изучение подгруппы этих объектов с малым наклоном диска к лучу зрения – переменных типа UX Ori (уксоров). Такая ориентация позволяет диагностировать локальные околозвездные неоднородности, движущиеся в плоскости диска и эпизодически пересекающие луч зрения. Целый цикл работ исследователей из группы Гринина посвящен исследованию этих образований на основе спектральных, фотометрических и поляриметрических наблюдений. Начало этой программы восходит еще к 80-м годам прошлого столетия (уже упомянутые публикации [11-13]), а ссылки на последующие работы можно встретить в последующих работах Сорелли и др. [64], Козловой и др. [65], Ростопчиной и др. [66] и Гринина и др. [67].

Двойственность, или даже наличие нескольких компонентов, образующих кратную систему – явление нередкое среди молодых звезд, особенно для их горячей подгруппы – Be звезд Хербига. В своей эволюции эти массивные объекты или уже вышли на ГП, или подошли к ней вплотную. Понятно, что и характер взаимодействия звезда-оболочка будет особым, если объект является кратной системой. В рамках уже упомянутой Пулковской программы исследования подобных объектов проводились для трех наиболее известных и ярких звезд Хербига классов B3 – B0: HD200775 (B2-B3), HD53367 (B0) и HD52721 (B2). Двойственность первых двух из этих объектов была доказана в работах Погодина и др. [68-70]. Более детально двойная система HD200775 (A+B) была позднее исследована Алесян и др. [40]. Выяснилось, что она состоит из двух звезд класса B и имеет орбитальный период $P = 1345$ дней. Орбита системы является эксцентричной ($e \sim 0.3$), и во время периастра эмиссия системы в линии H α усиливается вдвое. При этом удалось установить, что газовой оболочкой обладает только один из компонентов системы, но зато у второго компонента обнаружено сильное магнитное поле с $B \sim 1$ кГс. Учитывая, что оба компонента имеют еще и разные покраснения A_V и разные величины $V \sin i$, в [40] было сделано предположение, что компоненты системы образовались не одновременно, а сама система возникла путем взаимного гравитационного захвата 2-х звезд на разных

эволюционных стадиях. Двойной объект HD53367 [70] обладает также необычным свойством. Он демонстрирует трансформацию профилей бальмеровских линий типа: $Be \rightarrow V_{shell} \rightarrow V \rightarrow Be$, характерную для классических проэволюционировавших Be звезд, когда звезда внезапно начинает терять свою газовую оболочку, превращающуюся в удаленное кольцо (фаза V_{shell}) и потом полностью исчезающую (фаза V). Но через некоторое время оболочка появляется вновь (новая Be фаза). Объекту HD52721 посвящена первая глава настоящей диссертации, поэтому речь о нем пойдет позже. Как оказалось, он тоже является двойной системой, причем тесной и взаимодействующей, да к тому же и фотометрически затменной.

Кроме вышеперечисленных объектов стоит также упомянуть $B0e$ звезду Хербига IL СерА, оказавшейся тройной системой, включающей достаточно близкую пару B -звезд ($P_{orb} \sim$ несколько дней) и удаленный третий компонент класса $A - K$ ($P_{orb} = 3550$ дней). Результаты этого исследования описаны в работе Исмаилов и др. [71].

Как следует из обзора, эта эволюционная стадия звезд промежуточной массы еще не изучена в достаточной мере. Остается еще много нерешенных вопросов, касающихся как структурных особенностей их околозвездных оболочек, так и происходящих в них физических процессов.

Объекты, анализируемые в данной работе, и общая научная стратегия их исследований

В качестве объектов исследования были выбраны две звезды Хербига различного типа, имеющаяся информация о которых содержала много нерешенных вопросов:

1. Затменно-переменная $B2e$ звезда Хербига HD52721, у которой была заподозрена двойственность.
2. Малоисследованная изолированная $A2e-B8e$ звезда Хербига HD37806.

Настоящая диссертация является иллюстрацией применения различной стратегии исследования для каждого из двух объектов программы.

В случае HD52721, все исследования были направлены на проверку возможной двойственной природы объекта, поиск и анализ особенностей его циклической переменности с использованием фотометрического и спектрального методов. После подтверждения двойственности, дальнейшее исследование относилось уже к определению параметров компонентов системы и особенностей их орбитального движения. Программа предполагала поиск и анализ всевозможных зависимостей различных наблюдаемых параметров от фазы периодической переменности.

Для второго объекта программы HD37806 был использован метод длительного и плотного по времени спектроскопического мониторинга в широком диапазоне временного масштаба от дней до месяцев и лет, охватывающем большинство физических процессов и явлений, которые могут происходить у исследуемого объекта.

Конкретные задачи, решаемые в диссертации

Круг наших конкретных задач выглядел следующим образом:

1. Проведение программы фотометрических и спектральных наблюдений уникальной Ве звезды Хербига HD52721. Определение физической природы этого объекта на основе полученных данных наблюдений, а также с использованием уже имеющегося фотометрического материала. HD52721 демонстрирует циклическое появление минимумов блеска, повторяющихся с периодом $P \sim 0.8$ суток. Причиной такого фотометрического поведения может быть то, что:

- а) звезда является затменно-двойной системой и
- б) объект представляет собой одиночную звезду с темными пятнами на ее поверхности.

Предполагаемое исследование должно было дать ответ на этот вопрос.

2. Проведение многолетнего спектроскопического мониторинга звезды Хербига HD37806 (A2 – B8). Ранее, детальные спектральные наблюдения этого объекта не проводились.

Предполагалось:

- а) провести исследование некоторых линий оболочки таких, как H α , H β , HeI 5876 и др., в спектрах объекта на временном масштабе от дней до лет и
- б) исследовать структурные особенности его околозвездной оболочки в сравнении с подобными свойствами околозвездной среды у других подобных объектов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, двух глав, Заключение, списка литературы и Приложения. Общий объем диссертации составляет 109 страниц текста, из них 32 рисунка и 6 таблиц, 4 из которых даны в Приложении. Список литературы содержит 115 наименований.

Научная новизна

1. Впервые, на основании анализа прежних фотометрических данных и собственной фотометрической и спектроскопической программы исследования уникальной Be звезды Хербига HD52721, было однозначно показано, что объект представляет собой тесную контактную двойную систему, состоящую из двух звезд класса B2 с близкими параметрами атмосферы и с орбитальным периодом $P = 1.610^d$.

2. Были впервые обнаружены структурные особенности околозвездной среды HD52721, включающие:

- а) наличие азимутальной неоднородности на внутренней оболочке, сконцентрированной около менее яркого компонента и вращающейся с периодом, равным орбитальному периоду системы;

б) появление в отдельные даты локального плотного истечения из внешней оболочки системы в сторону самой системы, существование которого предсказывает теория;

в) подтверждение появления дополнительных увеличений блеска на фазах фотометрического максимума, которые могут быть связаны с эффектом отражения в тесной двойной системе или с обменом масс между компонентами через внутреннюю точку Лагранжа.

3. За десять лет наблюдений был **впервые** получен богатый спектроскопический материал (277 спектров высокого разрешения в течение 51 наблюдательной ночи с 2009 по 2019 г.) для Ae/Be звезды Хербига HD37806, спектральные исследования которой проводились ранее только эпизодически.

4. На основе анализа полученных спектроскопических данных было **впервые** показано, что наблюдаемая переменность профилей различных линий в спектре HD37806 может быть связана с:

- а) широтным перераспределением газа в зоне ветра;
- б) движением азимутальных неоднородностей истекающего вещества;

5. Были **впервые** обнаружены эпизодические усиления темпа аккреции из диска на звезду на временном масштабе в нескольких дней. Величина скорости аккрецируемого газа до +400 км/с, наблюдаемая во время этих эпизодов, позволяет предположить, что аккреция у HD37806 носит магнитосферный характер.

Научная и практическая значимость

1. Опыт комплексного исследования кандидатов в двойные системы, примененный в нашей работе к уникальной Be звезде Хербига HD52721, может быть также использован для изучения других объектов похожего типа. Сочетание фотометрии и спектроскопии существенно увеличивает объем информации, который может быть получен при исследовании подобных объектов.

2. Наше фотометрическое исследование HD52721 показало, что в разные сезоны наблюдений на кривой блеска помимо основных двух минимумов эпизодически появлялись дополнительные локальные детали на различных фазах орбитального периода. Продолжение фотометрической программы для этого объекта позволило бы набрать больше материала об этих образованиях, провести их классификацию и, в итоге, прояснить их природу.

3. Большой спектроскопический материал, полученный в течение 10 лет для Ae/Be звезды Хербига HD37806 (около 300 спектров высокого разрешения) может быть использован для дальнейшего более детального исследования структурных особенностей окколзвездной среды этих объектов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях

[A1] Погодин М.А., Бескровная Н.Г., Гусева И.С., **Павловский С.Е.**, Русомаров Н. HD52721 – тесная двойная система среди Ae/Be звезд Хербига // *Астрофизика*. – 2011. – Т. 54. – Вып. 2. – С. 243 – 261.

[A2] Бескровная Н.Г., Погодин М.А., Валявин Г.Г., Ихсанов Н.Р., Гусева И.С., **Павловский С.Е.**, Русомаров Н., Ежкова О.В. Ве звезда Хербига HD52721 – новые признаки двойственности // *Астрофизика*. – 2013. – Т. 56. – Вып. 1. – С. 51 – 67.

[A3] Погодин М.А., Бескровная Н.Г., Валявин Г.Г., Ихсанов Н.Р., Гусева И.С., **Павловский С.Е.**, Русомаров Н., Ежкова О.В. Фотометрическое и спектроскопическое исследование Ве звезды Хербига HD52721 первые результаты // *Известия Крымской АО*. – 2013. – Т. 109. – № 1. – С. 38 – 43.

[A4] **Павловский С.Е.**, Погодин М.А., Куприянов В.В., Горшанов Д.Л. Новое фотометрическое исследование Ae/Be звезды Хербига HD52721: признаки существования крупномасштабной азимутальной неоднородности // *Письма в Астрономический Журнал*. – 2015. – Т. 41. – № 6. – С. 317 – 327.

- [A5] Погодин М.А., **Павловский С.Е.**, Козлова О.В., Бескровная Н.Г., Алексеев И.Ю. Об особенностях спектральной переменности Ae/Be звезды Хербига HD 37806 // *Астрофизика*. – 2018. – Т. 61. – Вып. 1. – С. 15 – 30.
- [A6] Погодин М.А., Козлова О.В., **Павловский С.Е.**, Алексеев И.Ю. Быстрая спектральная переменность Ae/Be звезды Хербига HD37806 // *Астрофизика*. – 2019. – Т. 62. – Вып. 1. – С. 23 – 42.
- [A7] **Pavlovskiy S.E.**, Pogodin M.A., Beskrovnaya N.G., Kozlova O.V., Alekseev I.Yu., Valyavin G.G., Miroshnichenko A.S., Gorda S.Yu. Unusual spectroscopic behavior of the Herbig Ae/Be star HD37806 // *ASP. Conf. Ser.* – 2019. – V. 518. – P. 144 – 146.
- [A8] Pogodin M.A., Beskrovnaya N.G., **Pavlovskiy S.E.** The Pulkovo program for spectroscopy of Herbig Ae/Be stars: 33 years of observations with the 2.6-m Shajn telescope of the Crimean Observatory // in: *Graund-Based Astronomy in Russia. 21 st Century*. – 2020. – SAO RAS, N. Arkhyz, Russia. – P. 133 – 135.
- [A9] Pogodin M.A., Beskrovnaya N.G., **Pavlovskiy S.E.**, Guseva I.S., Kuprianov V.V., Gorshanov D.L., Ezhkova O.V., Ikhsanov N.R., Valyavin G.G. Photometric and spectroscopic peculiarities of the unique Herbig Be star HD52721. An eclipsing close binary system // *Az. Astron. Journal*. – 2020. – V. 15. – № 1. – P. 143 – 151.
- [A10] Obolentseva M.A., Dyachenko V.V., Pogodin M.A., Khovrichev M.Yu., **Pavlovskiy S.E.** HD52721 as a quadruple system // *Astrophys. Bull.* – 2021. – V. 76. – P. 292 – 296.

Общее число статей – **10**, из них **6** – в рецензируемых журналах

В работах [A1–A4, A9] диссертант был полностью ответственным за фотометрическую программу: от сборки телескопа и фотометра из запасных частей до наблюдений и первичной и конечной обработки данных наблюдений. В работах [A5–A8, A10] диссертант участвовал на всех этапах проведения наблюдательной программы и обработки результатов наблюдений. Во всех работах автор диссертации, наряду со всеми соавторами, участвовал в анализе полученного материала и формулировке конечных выводов исследований.

Апробация результатов диссертации.

По теме диссертации было сделано **11** докладов на **9** конференциях.

- International astronomical conference “Stars: from collapse to collapse”, Special Astrophysical Observatory RAS, October 3 – 7, 2016, Nizhny Arkhyz, Russia.
- Международная астрономическая конференция «Звезды, планеты и их магнитные поля», Санкт-Петербургский ГУ, 17 – 21 сентября 2018 г.
- International astronomical conference “Physics of magnetic stars”, Special Astrophysical Observatory RAS, October 1 – 5, 2018, Nizhny Arkhyz, Russia.
- “Mendeleev 2019 Congress”, St. Petersburg, September 9 – 13, 2019.
- International astronomical conference “Physics of stars and planets: atmospheres, activity, magnetic fields”, Shamakhy, September 16 – 20, 2019, Azerbaijan.
- The second international workshop “The UXOri type stars and related objects”, St. Petersburg, September 30 – October 4, 2019.
- All-Russian conference “Ground-based astronomy in Russia. 21st Century All-Russian conference “Ground-based astronomy in Russia. 21st Century”, SAO RAS, 21 – 25 September, 2020, Nizhny Arkhyz, Russia.
- Юбилейное совещание в Крымской астрофизической обсерватории «Магнетизм и активность Солнца, звезд и галактик», пос. Научный, 31 августа 3 сентября 2021 г., Крым, Россия.
- Всероссийская научная конференция «Нестационарные процессы в протопланетных дисках и их наблюдательные проявления», КрАО, п. Научный, 11-16 сентября 2022 г., Крым, Россия.

Положения, выносимые на защиту

1. Вывод о том, что Ве звезда Хербига HD52721 является тесной взаимодействующей системой, состоящей из двух звезд класса В с близкими параметрами атмосфер и орбитальным периодом $P = 1.610^d$. Вывод был сделан на основе анализа оригинальных фотометрических (4000 измерений блеска) и спектральных (94 спектра высокого разрешения) данных наблюдений, полученных в 2009 – 2013 гг. на Кисловодской горной станции ГАО РАН, в Крымской астрофизической обсерватории и обсерватории OAN SPM в Мексике, а также опубликованных архивных данных.

2. Определение орбитального периода двойной системы HD52721 $P = 1^d.6101524 \pm 0^d.0000030$, параметров ее компонентов и морфологических особенностей ее околозвездной оболочки.

3. Результаты спектральных наблюдений Ae/Be звезды Хербига HD37806, проведенных в течение 2009 – 2019 гг. на телескопе ЗТШ-2.6м (Крымская АО) и 2.1-м телескопе обсерватории OAN SPM в Мексике (277 спектров высокого разрешения).

4. Результаты моделирования изменений профилей спектральных данных, наблюдаемых у Ae/Be звезды Хербига HD37806, в терминах вариаций широтного распределения зоны истекающего ветра, азимутальных неоднородностей оболочки и переменности темпа аккреции на различных временных масштабах.

Глава 1

Фотометрическое исследование уникальной Ве звезды Хербига HD52721

1.1. Предварительная информация об объекте

HD52721 (GU CMa, MWC 164, B2Vne, $V = 6^m.6$) является одним из наиболее ярких и массивных объектов, связанных с ассоциацией отражательных туманностей CMaR1 в обширном комплексе звездообразования, включающем более 100 молодых звезд различной массы. Он известен, как визуально двойная система ADS 5713 (RST 3489) с менее ярким компонентом, наблюдающимся на угловом расстоянии от главного $\Delta\rho = 0''.65$ и имеющим $\Delta m = 0^m.95$. Если принять расстояние до HD52721 равным 1050 пк [72], то расстояние между компонентами системы в проекции на картинную плоскость будет порядка 650 а.е.

В спектре HD52721 присутствуют эмиссионные бальмеровские линии, этот объект был в свое время включен Финкенцеллером и Мундтом [9] в группу молодых звезд Хербига [1]. Как у большинства горячих молодых звезд, у HD52721 не наблюдается избытка излучения пылевого происхождения в ближнем и среднем ИК диапазонах, так как пыль быстро выметается и разрушается на близких расстояниях от объекта. Избыток излучения появляется только на $\lambda > 10$ мкм [72], он связан с тепловым излучением пыли в наиболее удаленных областях реликтового аккреционного диска. На более близких расстояниях в диске присутствует только газовая составляющая, ответственная за формирование в спектре эмиссионных линий.

Детальный обзор наблюдательных свойств HD52721 приведен в большой обзорной работе Тин А Дье и др. [72]. Наиболее интересной особенностью объекта является его периодическая фотометрическая переменность, впервые отмеченная еще в 70-х годах прошлого столетия Клэриа [73].

Самый полный анализ этой переменности был проведен на основе данных UBVR фотометрии в рамках программы ROTOP, осуществленной на Майданакской обсерватории (Узбекистан). За период 1987-1998 гг. было сделано 320 измерений HD52721 в течение 12 наблюдательных циклов. Результаты этого исследования были опубликованы в работе Ежковой [74]. Несколько основных участников этой программы стали также соавторами обзора [72], где была развита интерпретационная часть этого результата. Согласно результатам фотометрии, на кривой блеска объекта наблюдается периодическая переменность, у которой были выделены два равнозначных периода: $P = 0^d.80508$ и $P = 1^d.610158$, при этом второй период в пределах точности определения соответствовал удвоенному первому периоду. Фазовые кривые блеска, построенные для этих двух периодов, приведены на рис.1.1. На них виден минимум блеска с амплитудой порядка $0^m.25$, типичный для затменных переменных. Существование этой переменности подтверждается и по более ранним данным из работы Прадери и др. [75] (107 BVRI измерений в течение 5 ночей в марте 1985 г.), а также по результатам HIPPARCOS-фотометрии [76] в конце 90-х годов (удвоенный период $P = 1^d.610137$). Следует отметить, что по данным майданакской фотометрии, показатели цвета U-B, B-V и V-R не показывают зависимости от фазы периодической фотометрической переменности.

В обзорной работе [Тин А Дье и др. [72], в соавторы которой были включены и майданакские наблюдатели, были рассмотрены 3 возможные интерпретации наблюдаемого явления:

1. Орбитальное движение двух компонентов двойной системы с очень близкими значениями радиуса и эффективной температуры с периодом $P = 1.610$ дней с попеременным затмением друг друга через каждые полпериода. Авторы [72] отвергли этот вариант, ссылаясь на то, что на спектрах HD52721, полученных в 1991 г. на основном звездном спектрографе БТА-6м (САО РАН) атмосферные линии не показывают ожидаемой раздвоенности на фазах фотометрических максимумов, когда оба компонента не экранируют друг друга и движутся вдоль луча зрения в противоположных направлениях.

2. Такая же двойная система, но один из ее компонентов маломассивный и более холодный (предположительно, звезда класса K0). Период орбитального движения в такой системе $P = 0.805$ дней, холодный компонент периодически экранирует горячий, но сам фотометрически себя не проявляет из-за малой яркости. Авторы [72] считают такую интерпретацию наиболее вероятной.

3. Возможная пульсационная активность HD52721, расположенного близко к зоне неустойчивости переменных типа β Сер.

Основной целью нашего исследования было определить истинную природу наблюдаемой фотометрической переменности HD52721. Обращает на себя внимание тот факт, что по короткому фотометрическому наблюдению, полученному в марте 1985 г. [75], где ошибки в вычислении фаз несущественны, четко видно, что объект становится краснее в минимуме блеска (рис.1.2). По майданакским данным, охватывающим 12 лет, цветовой эффект не обнаруживается (рис.1.1). Возникло подозрение, что причиной может быть недостаточная точность определения периода, что вполне могло отразиться на точности построения фазовых кривых для столь длительного промежутка времени. Среднеквадратичная ошибка вычисления фазы $\sigma\Phi$ в момент времени t может быть выражена как:

$$\sigma\Phi = (t - t_0) \sigma P / P^2 \quad (1)$$

где t_0 – начальная дата, P – период, а σP – его среднеквадратическая ошибка.

12-летний цикл охватывает более 5400 полных периодов $P = 0^d.80508$, и при ошибке определения периода порядка $\sigma = \pm 0.00001^d$ может накопиться ошибка в расчете фазы до 0.05. Это приведет к замыванию построенной фазовой зависимости. Поэтому нашей первой задачей было уточнение периода путем переобработки всех майданакских фотометрических данных.

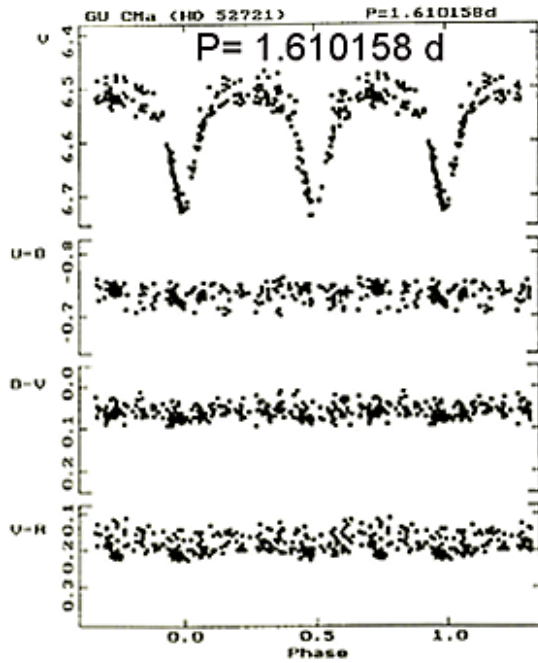


Figure 1.

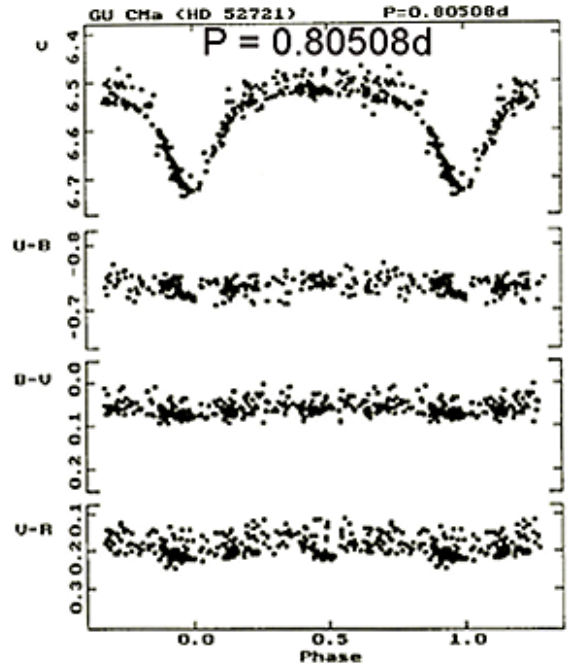


Figure 2.

Рис. 1.1. Фазовые кривые блеска и показателей цвета HD52721 по результатам наблюдений в рамках программы РОТОР в 1987-1998 гг. взятые из статьи [74], построенные для периода $P = 0^d.80508$ и для удвоенного периода $P = 1^d.610158$

1452 *H. R. E. Tjin A Djie et al.*

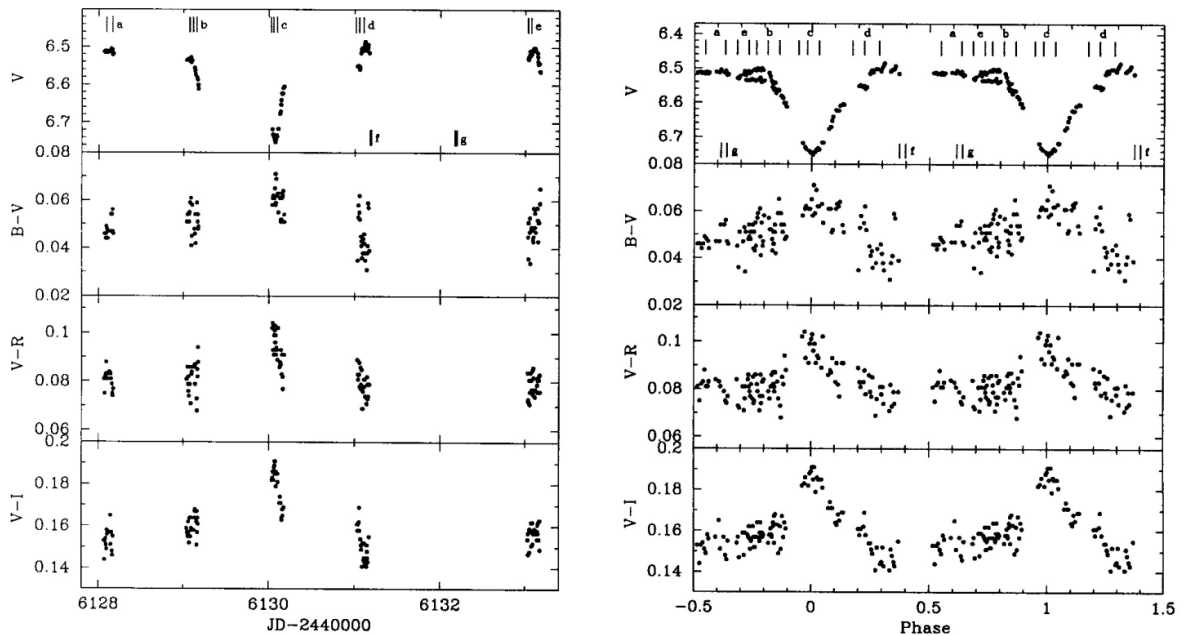


Figure 9. Light curve (left) and phase diagram (right) of HD 52721 in *BVRI* during five nights in 1985 March. For the construction of the phase diagram a period of 0.80508 d was assumed. Vertical marks indicate the times at which $H\alpha$ (top) and $Mg II \lambda 2800$ (bottom) data were obtained.

Рис. 1.2. Фотометрическая переменность HD52721 в марте 1985 г. по данным работы Прадери и др. [75]. Фазовые кривые построены с тем же периодом $0^d.80508$, что и на рис.1.1 (см. рис.9 из [72]).

1.2. Переобработка майданакских фотометрических данных

Одна из основных майданакских наблюдателей О.В. Ежкова предоставила нам исходные данные всех фотометрических наблюдений HD52721 по программе РОТОР в 1987-1998 гг. Применение к ним известного метода Лафлера-Кинмана [77] позволило получить более точные значения для короткого периода $P_1 = 0^d.8050757$ и длинного периода $P_2 = 1^d.6101514$. Процесс уточнения заключался в последовательном уменьшении шага между соседними пробными периодами, используемыми для минимизации параметра Θ (так называемая статистика Лафлера-Кинмана), до выхода этой величины на горизонтальное плато на периодограмме в области ожидаемого минимума, когда дальнейшее дробление шага уже не приводит к уточнению положения минимума на периодограмме. В нашем случае величина шага пробного периода была доведена до 10^{-6} суток. Плато значений для короткого и длинного периода оказалось ограничено значениями пробного периода $0^d.8050718 - 0^d.8050796$ и $1^d.6101430 - 1^d.6101640$, соответственно. Вычисление центра тяжести обоих минимумов на периодограмме позволило получить P_1 и P_2 .

Сравнивая величины $2P_1$ и P_2 , можно вычислить среднюю величину $P = 1^d.6101524 \pm 0^d.0000030$.

Новая фазовая кривая блеска HD52721 для периода 1.610^d по майданакским данным показана на рис.1.3. На рисунке видно, что:

- 1). Разброс точек на фазовых кривых стал существенно меньше, чем на рис.1.1.
- 2). Два соседних минимума в действительности оказываются неодинаковыми по глубине. По разбросу точек в окрестности более глубокого минимума можно вычислить его звездную величину $V = 6^m.737 \pm 0^m.003$. В соседнем минимуме $V = 6^m.722 \pm 0^m.003$, то есть разница по глубине у них составляет $0^m.015$, что в 3 раза превышает средний разброс точек в области минимумов.

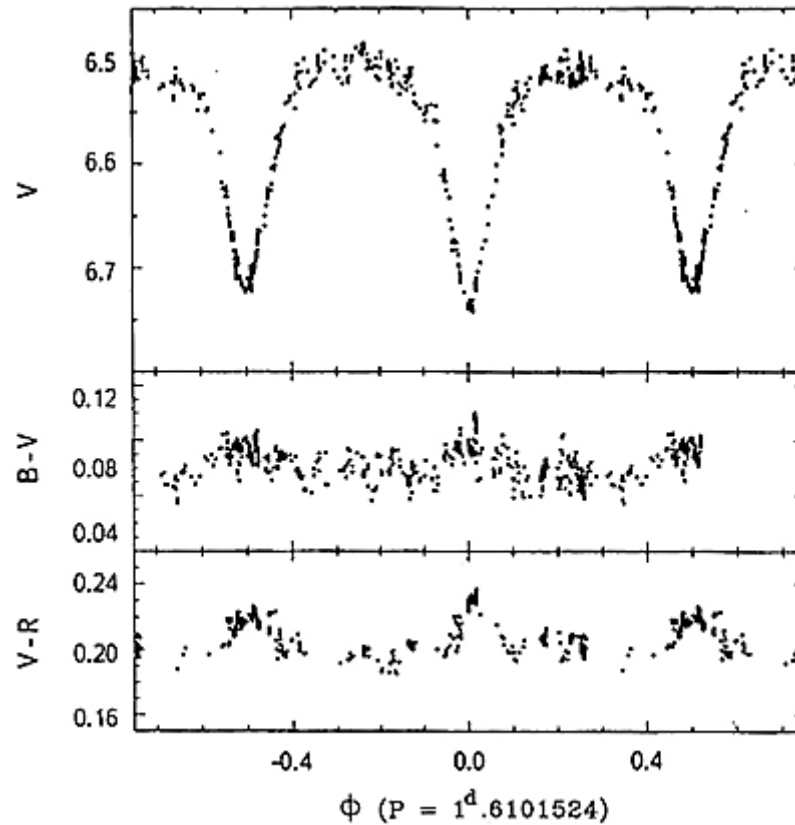


Рис. 1.3. Фазовые кривые блеска и показателей цвета HD52721 по майданакским данным 1987-1998 гг., рассчитанные с уточненным значением периода $P = 1^{\text{d}}.6101524$. При сглаживании по 10 соседним точкам, точность одного измерения составила $\pm 0^{\text{m}}.007$. Нулевая фаза $\Phi = 0$ соответствует фазе более глубокого (главного) минимума.

При этом, в области максимума блеска разброс точек существенно больше, чем в области минимумов: $V = 6^{\text{m}}.510 \pm 0^{\text{m}}.010$.

3). Эффект покраснения объекта на фазах минимума блеска стал виден очень отчетливо, как это и наблюдалось ранее по короткому фотометрическому ряду (см. [72, 75]).

На рис. 1.3 показана шкала фаз, смещенная таким образом, чтобы нулевая фаза $\Phi = 0$ приходилась на более глубокий минимум, который будет принят, как “главный” минимум. Даты, соответствующие нулевой фазе, могут быть рассчитаны по формуле:

$$\text{JD}2455263.2416 \pm NP, \quad (2)$$

где период $P = 1^{\text{d}}.6101524$, а N – целое число.

Точность вычисления дат нулевой фазы составила $\pm 0^d.0042$, которая была получена при сравнении положений соседних фотометрических минимумов по шкале фаз, которые определялись при измерении их центров тяжести с учетом того, что их фазы должны отличаться на 0.5.

Вопрос о том, одинаковая или различная глубина двух соседних минимумов на фазовой кривой, построенной для $P = 1.610$ дня, является принципиальным. Если подтвердится их различная глубина, то гипотезы б) и в) из [72] должны будут быть отвергнуты. Для того чтобы решить этот вопрос, мы дополнительно использовали базу данных ASAS [78]. Оттуда были взяты результаты фотометрии HD52721, проведенной с сентября 2003 г. по декабрь 2009 г. За это время было произведено около 500 измерений объекта в фильтре V, точность одного измерения составляла $\pm 0^m.03$. На рис.1.4 приводится фазовая диаграмма, построенная на основе ASAS-фотометрии для периода $P = 1^d.6101524$. Для уменьшения шумовой дорожки кривая была сглажена с окном в 10 точек. На ней хорошо видно, что оба фотометрических минимума заметно отличаются по глубине. Таким образом, можно сделать вывод, что именно $P = 1^m.610$ является истинным периодом фотометрических параметров. Гипотезы б) и в), выдвинутые в [72], должны быть исключены, так как они обе предсказывают одинаковую глубину фотометрических минимумов. Наиболее вероятной остается гипотеза а), где предполагается, что HD52721 – это двойная затменная система, состоящая из двух В-звезд с близкими параметрами и орбитальным периодом $P = 1.610$ дней.

Однако, для окончательного заключения было необходимо рассмотреть еще одну альтернативную гипотезу, объясняющую наблюдаемую фазовую кривую блеска с двумя неодинаковыми минимумами. О подобной циклической переменности упоминалось, в частности, в статье Харманса [79], где рассматривалась модель одиночной Ве звезды с двумя симметричными темными пятнами, связанными с наклонным магнитным ротатором.

Небольшое отличие в параметрах пятен может привести к фотометрической переменности, наблюдаемой у HD52721. Окончательный ответ о природе этого

объекта должны были дать спектральные наблюдения, описанные во второй главе диссертации.

На рис.1.4, представлена фазовая кривая блеска, построенная по данным ASAS-фотометрии. На ней видно, что помимо двух основных минимумов, кривая содержит локальные детали, наблюдающиеся на разных фазах периода. Подобные детали на фазах минимумов блеска не наблюдаются на рис.1.3, относящемуся к более ранним майданакским данным. Весьма вероятно, что время жизни этих образований очень небольшое. А увеличенный разброс точек на фазах максимумов по майданакским данным находится в соответствии с локальными поярчаниями объекта на этих фазах по данным ASAS-фотометрии.

Мы провели свое собственное фотометрическое исследование HD52721, целью которого было:

а) организовать фотометрическое сопровождение нашей параллельной спектральной программе, в частности, для того, чтобы иметь возможность определять точную фазу каждого спектра объекта.

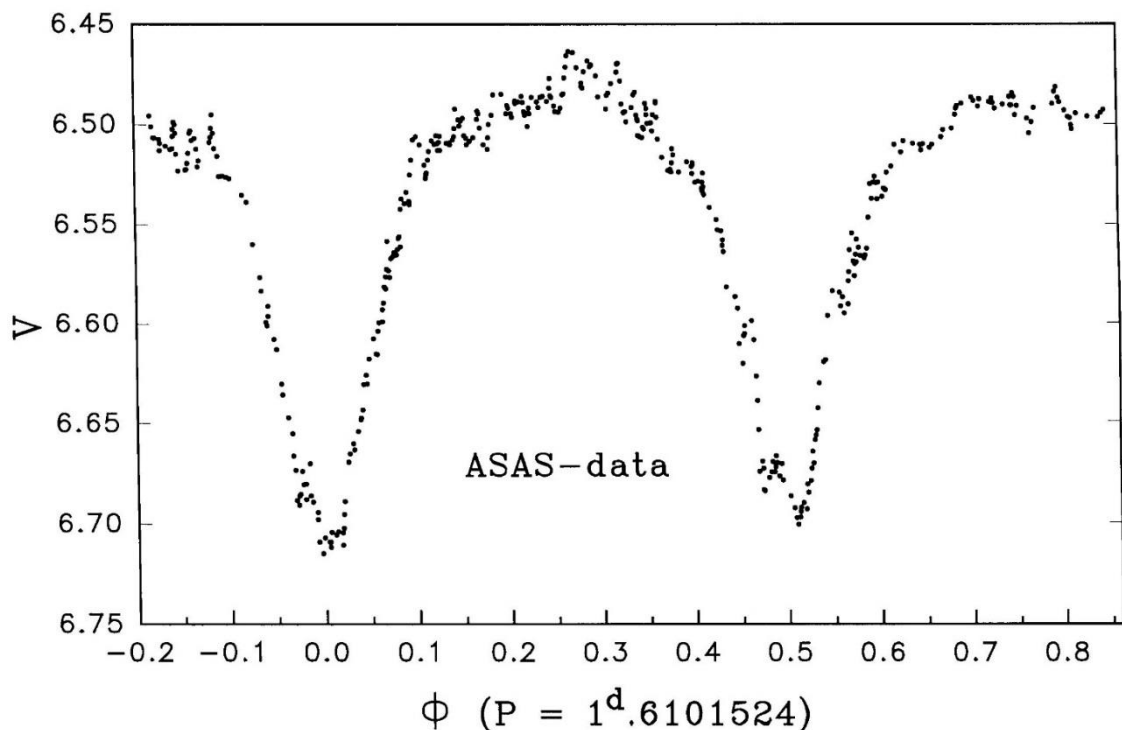


Рис. 1.4. Фазовая кривая блеска в фильтре V, построенная по данным ASAS, полученным в 2003 – 2009 гг., сглаженная по 10 точкам с ошибкой каждой точки $\pm 0^m.01$. Кривая построена для периода $P = 1^d.6101524$.

- б) в очередной раз проверить различие в глубине двух соседних минимумов.
- с) исследовать новые локальные фотометрические детали на фазовых кривых блеска, подобные тем, которые были обнаружены в начале 2000-х годов по данным ASAS.

1.3. Фотометрические наблюдения HD52721 на Кисловодской горной станции ГАО РАН

1.3.1. Методическая часть

Фотометрические наблюдения HD52721 в течение 10 ночей с 12 по 28 марта 2010 г. и в течение 25 ночей с 16 января по 25 марта 2013 г. на Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН. ПЗС-камера ST-8 фирмы SBIG была установлена на телескопе системы Максутова фирмы Carl Zeiss Jena с фокусным расстоянием $F = 2018$ мм. и диаметром объектива $D = 150$ мм. Приемником излучения служила матрица KAF-1600 (1530 x 1020 пк, поле $21' \times 14'$).

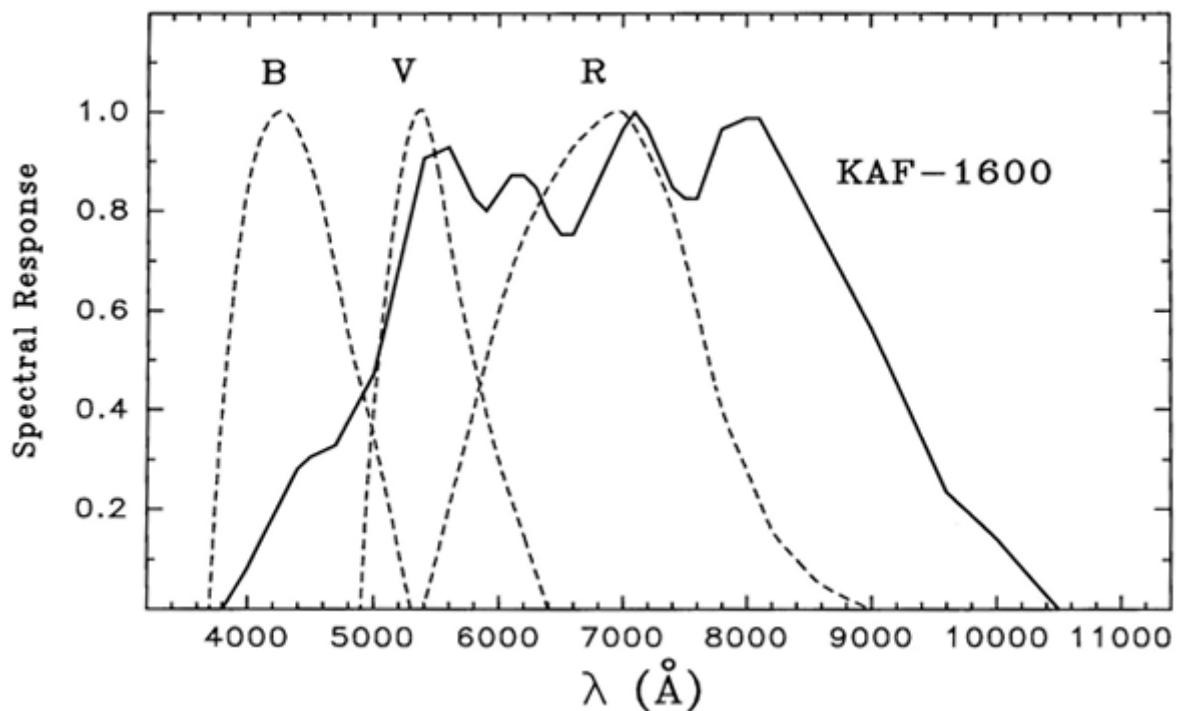


Рис. 1.5. Спектральная кривая реакции ПЗС матрицы KAF-1600 в сравнении с кривыми пропускания фильтров BVR стандартной фотометрической системы Джонсона.

Так как в нашу задачу не входило исследование цветовых характеристик объекта, наблюдения проводились в интегральном свете (без фильтров).

Кривая спектральной чувствительности матрицы в сравнении с кривыми пропускания стандартных джонсоновских фильтров UBVR приведена на рис.1.5. Как видно на рисунке, инструментальная полоса по длине волны соответствует стандартной полосе R, но ширина ее приблизительно в 3 раза больше.

Во время наблюдений матрица ПЗС-камеры охлаждалась до температуры в пределах от -20°C до -30°C , в зависимости от температуры окружающего воздуха. В течение одной ночи наблюдений она поддерживалась с постоянной точностью в пределах $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Для каждой наблюдательной ночи было сделано не менее 6 темновых кадров с той же экспозицией, что и для звездных кадров ($t_{\text{exp}} = 20$ секунд), а также для каждой ночи наблюдений было сделано не менее 6 кадров плоского поля с той же экспозицией. Благодаря равенству по времени экспозиций для звездных кадров и темновых кадров у нас не было необходимости в получении bias-кадров.

Большое внимание было уделено сортировке полученных ПЗС-кадров. Из всех кадров, полученных в течение 35 наблюдательных ночей в 2010 и 2013 гг, было отбраковано приблизительно 20% материала, который был признан недостаточно качественным. В результате было оставлено всего 2879 ПЗС-кадров (1136 за 2010 г. и 1743 за 2013 г.), пригодных для последующей фотометрической обработки и для построения объединенной фазовой кривой блеска исследуемого объекта. Процедура отбраковки «плохих» ПЗС-кадров проводилась в 2 этапа:

1. Исключались кадры с вытянутыми изображениями, как результат ошибок ведения часового механизма. Вытянутость по прямому восхождению допускалась не более, чем в 2 раза.

2. Для каждой ночи наблюдений строились видимые фотометрические кривые в инструментальной системе для 4-х звезд: объект исследования, звезда сравнения и 2 вспомогательные звезды, присутствующих на этом же ПЗС-кадре (см. рис.1.6.). Отбраковывались кадры, которые соответствовали одновременным

статистически значимым одиночным отклонениям величиной более 3σ по отношению к соседним точкам на всех 4-х видимых кривых блеска.

В результате нам удалось значительно ослабить влияние неидеальных астроклиматических условий наблюдений на ГАС ГАО РАН, а также несовершенства наблюдательного инструмента, заключавшегося по большей части в неравномерности часового ведения.

Фотометрическая калибровка изображений и их первичная обработка (получение инструментальных кривых блеска) проводилась при помощи программной системы Арех II, разработанной в ГАО РАН (Девяткин и др. [80] и Куприянов и др. [81]), а также в рамках проекта ISON (Молотов и др. [82]). Это универсальная программная платформа для обработки астрономических изображений, используемая для поточной автоматической обработки больших массивов данных в различных областях наблюдательной астрономии. В частности, для целей настоящей работы был использован специальный пакет для поиска внесолнечных планет транзитным методом, созданный совместно со специалистами проекта TFRM (Форс и др. [83]) и реализующий наиболее точные алгоритмы ПЗС-фотометрии. Подробно использованная методика с описанием соответствующего математического аппарата приведена в работе автора настоящей диссертации (Павловский и др. [84]) со ссылками на первоисточники.

Для построения инструментальных кривых блеска, прежде всего, была выполнена стандартная процедура коррекции с использованием темновых изображений и изображений плоского поля. Было также сделано удаление косметических дефектов ПЗС-чипа «горячих» и «холодных» пикселей и столбцов, а также следов космических частиц. Кроме того, неидеальные астроклиматические условия на ГАС в период наблюдений и, в частности, наличие паразитных засветок, требовали учета локальных неоднородностей фона неба при вычислении потоков от объектов на ПЗС-изображениях.

В качестве звезды сравнения на одном ПЗС-кадре была выбрана звезда HD52774 с приблизительно таким же показателем цвета, как и у исследуемого

объекта. Пример типичного ПЗС-кадра показан на рис.1.6., на котором обозначены следующие звезды:

- HD52721 – исследуемая звезда ($V = 6^m.59$, $B-V = 0^m.06$)
- HD52774 – звезда сравнения ($V = 8^m.82$, $B-V = 0^m.01$)
- SAO 152253 – вспомогательная звезда № 1 ($V = 9^m.29$, $B-V = 1^m.17$)
- SAO 52591 – вспомогательная звезда № 2 ($V = 8^m.68$, $B-V = 1^m.13$)

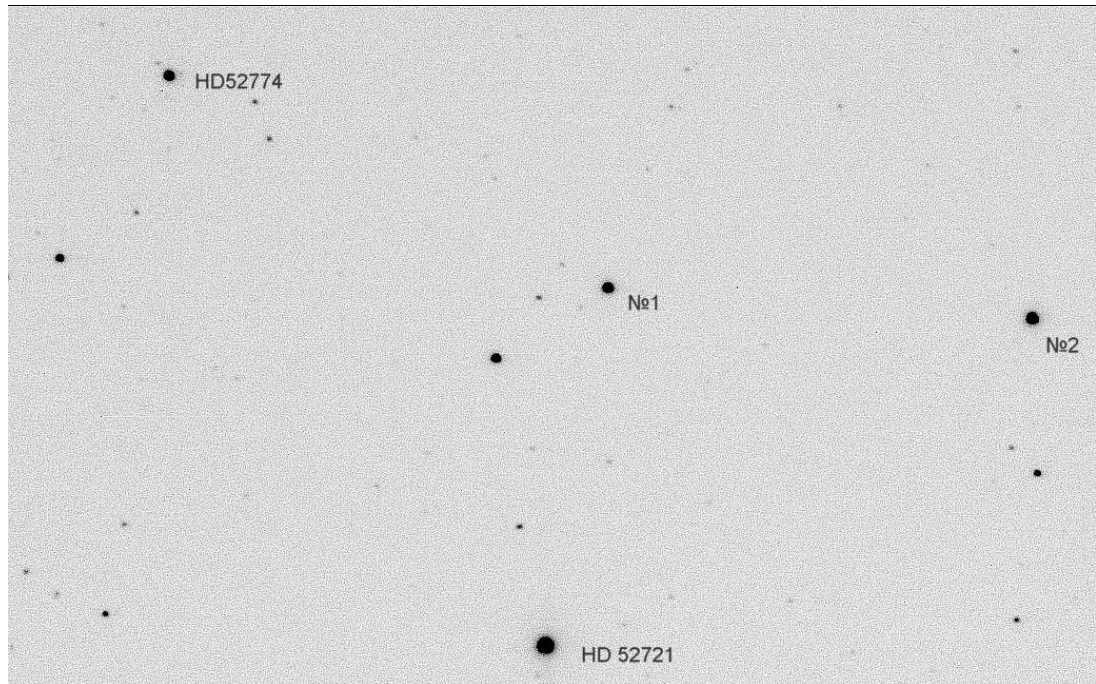


Рис. 1.6. Типичный ПЗС-кадр, на котором указаны объект исследования, звезда сравнения и 2 вспомогательные звезды.

1.3.2. Результаты фотометрических наблюдений

При построении кривой блеска объекта исследования относительно звезды сравнения требовалось предварительно убедиться, что:

а) эффект переменной воздушной массы при разных экспозициях не окажет искажающего влияния на измеряемое отношение потоков от объекта и звезды сравнения.

б) звезда сравнения сама не является фотометрически переменным объектом. Для подобной проверки были использованы 2 вспомогательные звезды,

попадающие на тот же ПЗС-кадр, вместе с объектом и со звездой сравнения. Эффект переменной воздушной массы заключается в том, что при ее увеличении, звезды с разными показателями цвета будут ослабевать по-разному. Поскольку атмосферная экстинкция сильнее в голубой области спектра, а в широкую полосу спектрального пропускания аппаратуры проходит излучение с заметным спектральным градиентом внутри этой полосы, то в голубой части полосы ослабление света при увеличении воздушной массы будет сильнее, чем в ее красной части. Благодаря этому голубые объекты оказываются более чувствительными к изменениям воздушной массы, чем красные.

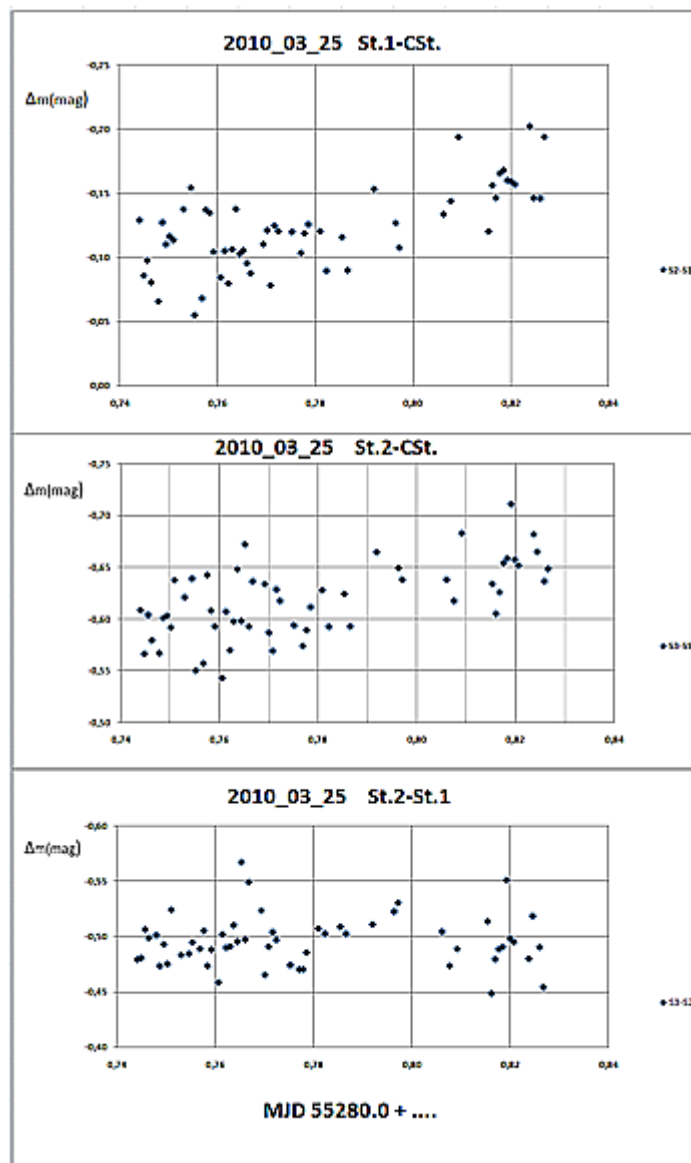


Рис. 1.7. Звездные величины вспомогательных звезд №1 (St.1), №2 (St.2) относительно звезды сравнения (CSt) и относительно друг друга в ночь 25.03.2010

Для исследования этого эффекта мы использовали измерения потоков от двух вспомогательных звезд относительно звезды сравнения. Как было отмечено выше, объект исследования и звезда сравнения имеют почти одинаковые показатели цвета, а у обеих вспомогательных звезд эти показатели гораздо краснее, при этом по величине они достаточно близки друг к другу

На рис.1.7. видно на примере одной ночи наблюдений (25.03.2010), что в конце ночи, когда область наблюдений уже приближалась к горизонту, обе вспомогательные звезды существенно увеличили свой блеск относительно более голубой звезды сравнения. Между тем, отношение потоков от обеих вспомогательных звезд практически не менялось в течение всей ночи. Поскольку наш объект и звезда сравнения имеют весьма близкие показатели цвета, то на их относительную кривую блеска эффект воздушной массы не должен оказывать влияния. Для проверки того факта, что обнаруженные нами глубокие минимумы блеска объекта относительно звезды сравнения (как основные, так и дополнительный, см. ниже) связаны именно с переменностью объекта, а не самой звездой сравнения, мы сравнили относительный блеск объекта относительно звезды сравнения в течение разных ночей наблюдений с относительным блеском вспомогательной звезды №2 при одной и той же звезде сравнения. Специально использовались результаты измерений, когда исследуемая область была максимально высоко над горизонтом, и эффект разных воздушных масс не был существенным. Одна из выбранных ночей соответствовала глубокому дополнительному минимуму на кривой блеска объекта (25.03.2010, см. рис.1.8.), а вторая – максимуму блеска (07.03.2013, см. рис.1.9.). Если в первую ночь относительный блеск объекта был слабее примерно на $0^m.20$, чем во вторую ночь ($-2^m.16$ и $-2^m.38$), то относительный блеск вспомогательной звезды был одинаковым в обе ночи ($-0^m.107 \pm 0^m.023$ и $-0^m.106 \pm 0^m.004$ соответственно). Это подтверждает фотометрическое постоянство звезды сравнения и правильность ее выбора в качестве репера для исследования аномалий переменности объекта программы.

В результате проделанной работы были построены фазовые кривые блеска HD52721 относительно звезды сравнения отдельно для 2010 г. (Рис.1.8) и для 2013 г. (Рис.1.9) для периода $P = 1^d.6101524$, полученного из нашего анализа майданакских данных. Рисунки 1.8 и 1.9 являются рабочими, и шкала фаз на них дается с произвольным нуль-пунктом. Объединенная и усредненная по 10 точкам фазовая кривая блеска за 2010 и 2013 гг. приведена на рис.1.10.

В оба наблюдательных сезона фазовая кривая демонстрирует форму, обычную для затменно-двойных переменных. Четко обрисовываются два основных широких минимума блеска разной глубины. Их глубина отличается друг от друга на $\approx 0^m.04$. Точность определения звездной величины HD52721 в случае неусредненной фазовой зависимости (рис.1.8 и 1.9) равна приблизительно $0^m.02$. Для зависимости, усредненной по 10 точкам (рис.1.10) она составляет порядка $0^m.007$.

Как видно на рис.1.8, на кривой блеска в 2010 г. присутствует дополнительный глубокий минимум, достигающий наибольшей глубины на фазе ≈ 0.20 при отсчете от более глубокого минимума. Начало этого минимума было прописано по данным двух ночей наблюдений 12 и 20 марта. Середина минимума была построена по данным ночи 25.03, а его окончание – по данным, полученным 17.03. Таким образом, в пользу реальности этого дополнительного минимума (глубина около $0^m.20$, ширина по фазе порядка 0.10) свидетельствует тот факт, что он был выявлен по данным 4-х ночей наблюдений с 12 по 25 марта, на временном интервале, перекрывающем 8 полных циклов периодической переменности объекта. В конце ночи 12.03 на фазе 0.12 от основного минимума наблюдался еще один локальный малоамплитудный минимум с длительностью по фазе около 0.07, подобно тому, что был отмечен в 1985 г. в работе [74]. Поскольку он был виден только в течение одной ночи, мы не можем утверждать, что эти изменения связаны с изменением фазы. Скорее всего, это быстрая переменность блеска объекта на временном масштабе 1 час.

В 2013 гг. картина локальных деталей на фазовой кривой была уже иной. На фазах максимума от 0.20 до 0.35 от основного минимума наблюдались

волнообразные изменения блеска. Ниспадающая часть волны была видна только в одну ночь, а восходящая часть – в течение 2-х ночей. Если понижение блеска в начале волны, скорее всего, связано с быстрой фотометрической переменностью в течение одной ночи, то его локальный рост на фазе около 0.30 был зафиксирован по данным двух разных ночей наблюдений, что говорит в пользу фазовой природы этой переменности. Подобная структура на фазовой кривой блеска также наблюдалась в начале 2000-х по данным ASAS (рис.1.4).

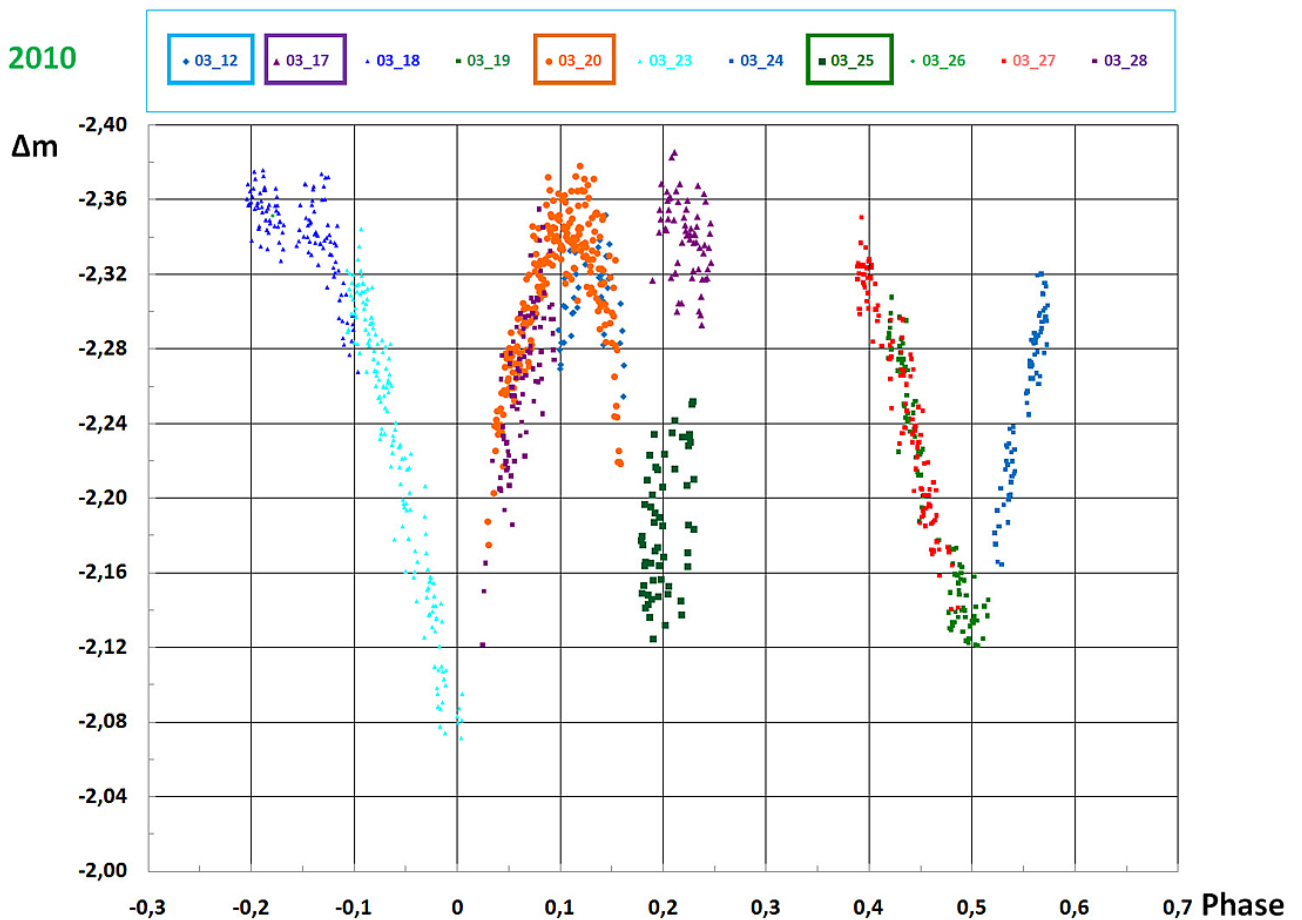


Рис. 1.8. Фазовая кривая блеска HD52721, полученная в 2010 г. Δm – звездная величина объекта в инструментальной системе относительно звезды сравнения, построенная для периода $P = 1^d.6101524$ с нуль-пунктом по шкале фаз, определяемым по формуле (2). Различные символы соответствуют различным ночам наблюдений. Их расшифровка приведена в отдельной прямоугольной рамке над рисунком (например, 03_19 означает 19.03.2010). Рамками обозначены даты, когда наблюдался вторичный минимум.

2013

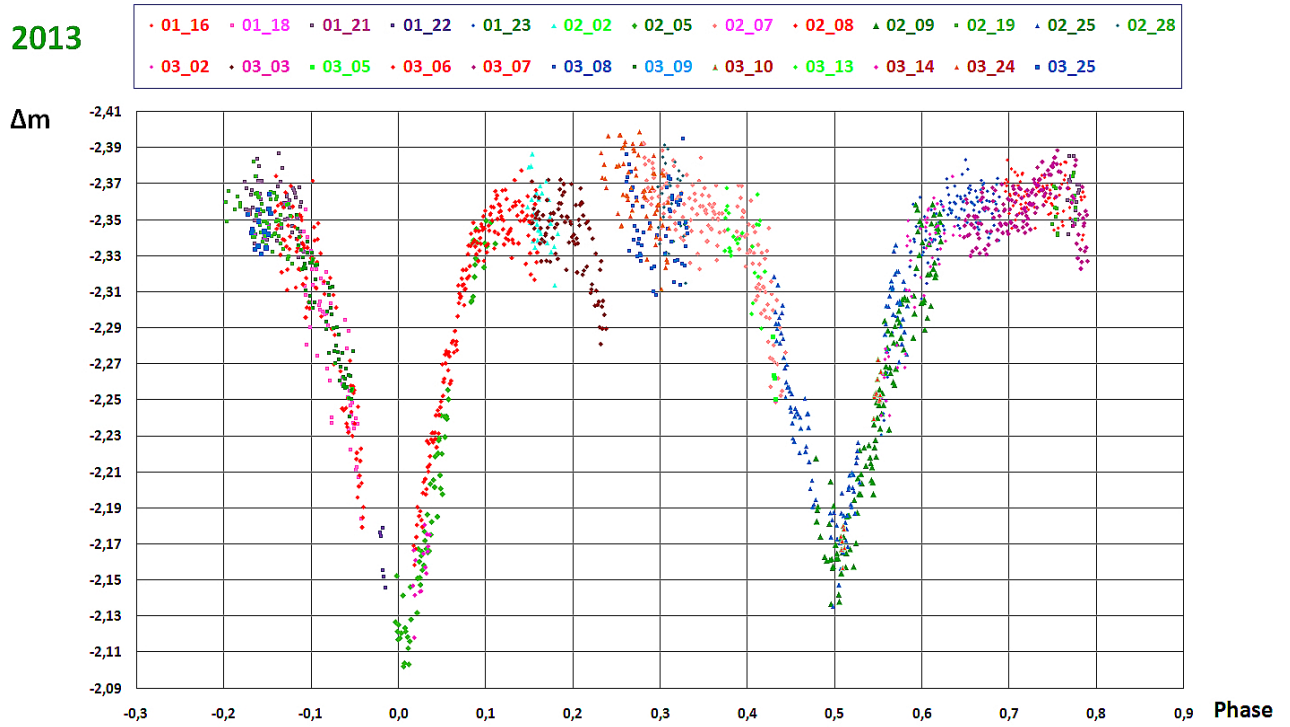


Рис. 1.9. Фазовая кривая блеска HD52721, полученная в 2013г. Обозначения те же, что и на рис.1.8.

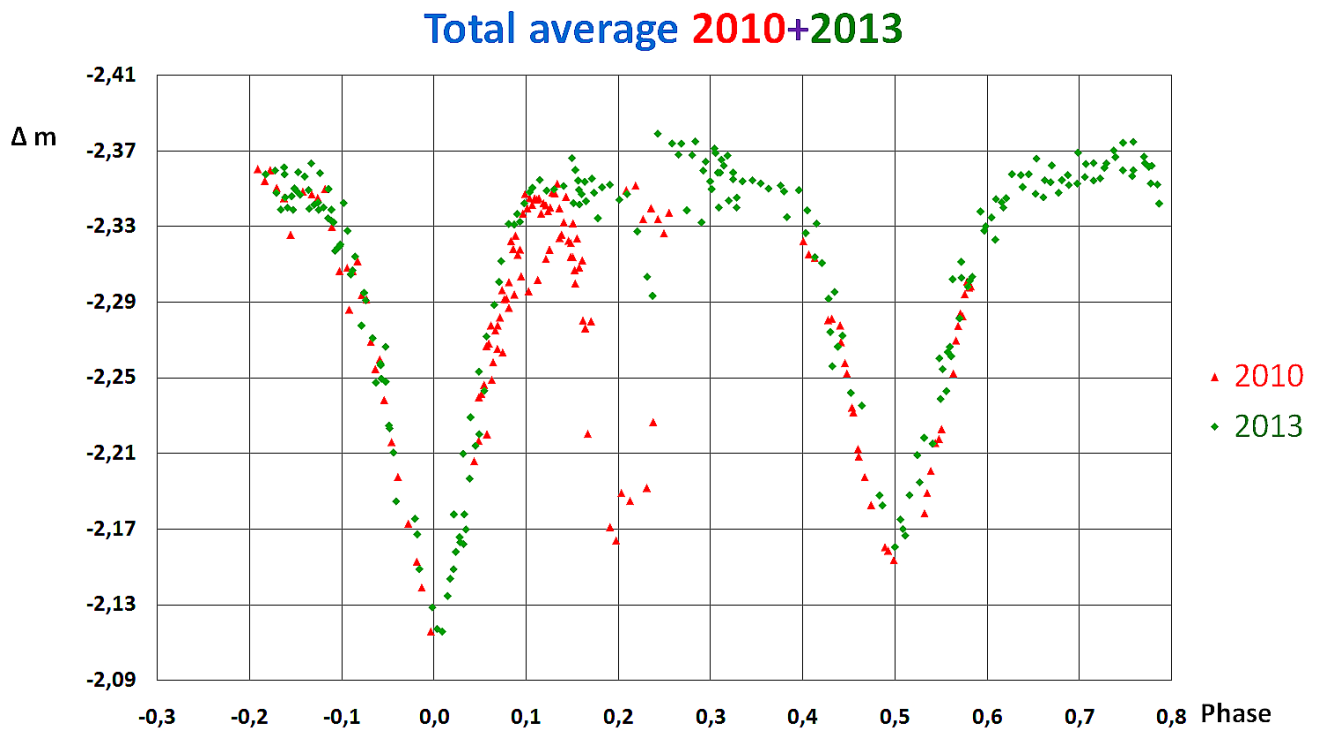


Рис. 1.10. Объединенная и усредненная по 10 точкам фазовая кривая блеска HD52721 по данным, полученным в 2010 и 2013 гг. (годы помечены разными символами).

1.4. Выводы из главы 1

1. Результаты переобработки старых фотометрических данных по Ве звезде Хербига HD52721, а также проведения собственной программы фотометрических наблюдений этого объекта на Кисловодской горной станции ГАО РАН в 2009 и 2013 гг. позволили с большой вероятностью предположить, что объект представляет собой затменную тесную двойную систему, состоящую из 2-х звезд класса В с близкими параметрами атмосферы и орбитальным периодом $P = 1.6101524$ дня. Главным аргументом в пользу этого предположения является различная глубина соседних по времени фотометрических минимумов на кривой блеска этого объекта. Окончательный вывод о природе этого объекта был сделан уже после анализа данных спектроскопии (см. Главу 2).

2. Помимо двух основных минимумов, в 2010 г. на кривой блеска объекта на фазе $\Phi \sim 0.2$ наблюдался дополнительный достаточно глубокий фотометрический минимум. Такой минимум мог возникнуть при появлении на луче зрения плотного истечения из внешней оболочки в сторону самой системы. Подобное образование предсказывалось в ряде теоретических работ, в частности, в работе Сотниковой и Гринина [100]. Этот результат был получен на основе модельных Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) расчетов. Согласно этой модели, такое истечение вращается с периодом, равным орбитальному периоду системы и может быть причиной появления локальной дополнительной экстинкции на луче зрения между системой и наблюдателем.

3. Наблюдаемый эффект покраснения показателей цвета на фазах фотометрических минимумов позволяет предположить, что внутренняя газовая оболочка достаточно плотна, чтобы вносить заметный вклад в наблюдаемый блеск объекта. Цветовая температура излучения газа должна быть существенно ниже, чем температура горячих звезд-компонентов системы. Во время минимумов блеска площадь излучаемой звездной поверхности уменьшается из-за взаимной

экранировки компонентов, и вклад излучения звезд по сравнению с излучением оболочки становится меньше. Отсюда и общее покраснение объекта.

6. Существование зон повышенной поверхностной температуры на сторонах звезд, обращенных друг к другу, может быть причиной появления локальных увеличений блеска на фазах фотометрического максимума, которые наблюдались нами в 2013 г., а также в период 2003-2009 гг. по данным ASAS. Причиной такого явления может быть эффект отражения между компонентами системы. В системе может быть также гипотетический обмен массой через внутреннюю точку Лагранжа. Об этом также свидетельствует увеличение разброса точек на кривых блеска на фазах фотометрических максимумов, которое наблюдалось во все сезоны наблюдений.

Глава 2

Спектральное исследование HD52721

2.1. Спектроскопия высокого разрешения

Спектральные наблюдения HD52721 были проведены на двух обсерваториях. Одной из них была Крымская астрофизическая обсерватория. Наблюдения проводились с октября 2009г. по октябрь 2010г. на телескопе ЗТШ-2.6м. Был использован кудэ-спектрограф ASP-14 и ПЗС-камера Andor IKON-L (2048 x 2048 px). За 14 ночей было получено 54 спектра HD52721 с разрешением $R \sim 25000$ в области линий H α , HeI 6678 и дублета натрия DNaI (5889, 5895). Ширина спектрального интервала для каждой линии составляла примерно 68Å. Для первичной обработки данных наблюдений использовались пакеты программ CCDPROC и SPE, разработанные сотрудником КрАО С. Г. Сергеевым. Проводилась очистка спектров от космических частиц, коррекции за плоское поле, калибровка шкалы длин волн и нормировка к континууму. Отношение сигнал/шум для индивидуальных спектров достигало значения порядка 100. Перечень всех спектров, полученных в КрАО приведен в Табл. П1 в Приложении.

Кроме того, были проведены наблюдения HD52721 в обсерватории Сан Педро Мартин Национального Университета Мексики ОАН SPM UNAM (Энсенада, Мексика) с использованием эшелле-спектрографа REOSC [85], установленном на 2.1-м телескопе. Спектрограф имеет разрешение $R = 17000$ и общий рабочий диапазон $\lambda\lambda$ 3800 – 6800 Å (26 спектральных порядков). В течение 5 ночей с 18 по 25 февраля 2010 г. было получено 40 спектров объекта (от 5 до 9 спектров за ночь) с временем экспозиции 3 минуты для каждого спектра. Обработка данных наблюдений проводилась с помощью пакета IRAF и включала в себя стандартные процедуры, такие же, как и для спектров, полученных в КрАО, а также аппроксимацию континуума для отдельных порядков. Спектры,

полученные в течение ночи, были усреднены, благодаря чему отношение сигнал/шум в результирующих спектрах составило от 100 до 200 в зависимости от погодных условий при наблюдениях. Информация о спектрах приводится в Табл.1. Расчет фазы периода $P = 1^d.6101524$ проводился по формуле (2).

Таблица 1

ПЕРЕЧЕНЬ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОВ, УСРЕДНЕННЫХ ЗА НОЧЬ,
ПОЛУЧЕННЫХ В ОБСЕРВАТОРИИ OAN SPM UNAM

Дата	Юлианская дата на середину серии (JD2455000 +..)	Фаза фотометрического периода ($P = 1^d.610$)	Состояние блеска
18.02.10	246.713	0.735	Максимум
19.02.10	247.778	0.396	Промежуточное
23.02.10	251.760	0.869	Промежуточное
24.03.10	252.832	0.535	Минимум
25.03.10	253.776	0.115	Промежуточное

Как показали результаты обработки всех спектрограмм, спектр HD52721 по типу линий отличается разнообразием. В нем можно увидеть следующие линии:

1. Чисто атмосферные линии HeI 4009, 4026, 4144, 4388, 4471 и бальмеровские линии H ϵ и H δ .
2. Интенсивную околозвездную линию H α , демонстрирующую одиночный эмиссионный профиль с небольшой седлообразной выемкой возле вершины.
3. Околозвездные линии FeII разных мультиплетов с профилем типа PCyg.
4. Околозвездные компоненты линий H β и HeI 6678, накладывающиеся на широкую атмосферную абсорбционную подложку. В отличие от линии H α , эти линии имеют двойные эмиссионные профили.
5. Межзвездные (IS) линии дублета натрия DNaI.

Главную роль, для окончательного решения вопроса о природе объекта, играют линии, формирующиеся в атмосфере.

2.2. Атмосферные линии

Поведение этих линий в зависимости от фазы фотометрической периодической переменности позволяет однозначно определить природу HD52721, а именно, решить вопрос:

а) представляет ли объект двойную затменную систему, состоящую из двух звезд спектрального класса В, или

б) является одиночной В - звездой с двумя темными магнитными пятнами на ее поверхности (см. [79]).

В каждом из этих двух случаев должны наблюдаться совершенно различные фазовые изменения ширин профилей линий и их положений на шкале длин волн.

1. В случае затменной двойной звезды, главный (более глубокий) минимум соответствует фазе орбитального движения, на которой более яркий компонент максимально экранируется менее ярким. Эта фаза принимается за нулевую ($\Phi = 0.0$), а фаза $\Phi = 0.5$ будет соответствовать максимальному экранированию менее яркого компонента системы более ярким. В этом случае в минимумах блеска, когда оба компонента двигаются вдоль картинной плоскости, ширина общего профиля линии, образованного накладывающимися профилями каждого из компонентов системы, будет наименьшей и будет определяться только проекционной скоростью вращения звезд. В максимуме же блеска оба компонента будут двигаться по своим орбитам вдоль луча зрения, каждый в свою сторону по отношению к наблюдателю. И общий профиль линии станет шире, так как к скорости собственного вращения компонентов добавится и скорость орбитального движения. Если орбитальная скорость достаточно велика, то профиль будет даже выглядеть, как раздвоенный. Если оба компонента системы имеют близкие, но не совсем одинаковые параметры атмосферы, то в общем составном профиле линии, профиль одного из компонентов может доминировать. В этом случае, при изменении фазы орбитального движения, должны наблюдаться позиционные изменения линии вдоль шкалы длин волн. Если в общий профиль линии больший вклад вносит более яркий компонент (за счет

большого радиуса), то на фазах от 0 до 0.5, когда яркий компонент приближается к наблюдателю, лучевая скорость общего профиля будет смещена в сторону отрицательных значений. Она пройдет через ноль в минимуме блеска, а на фазах от 0.5 до 1 будет смещена уже в сторону положительных значений. В целом, фазовая кривая лучевых скоростей будет выглядеть, как перевернутая синусоида, колеблющаяся относительно центра тяжести двойной системы γ в гелиоцентрической системе отсчета (см. рис. 2.1, верхний).

2. В случае же одиночной звезды – магнитного ротатора с двумя холодными магнитными полюсами фазовые, зависимости ширин и положений профилей атмосферных линий будут совершенно другими. Эти зависимости возникают от того, что поверхностная температура в области пятна меньше чем на остальной поверхности звезды. При вращении звезды вклад холодных и горячих областей на поверхности звезды, обращенной к наблюдателю, будет меняться с фазой вращения. Как показывает анализ синтетических спектров звезд разных спектральных классов, максимальная глубина линий гелия достигается при температуре поверхности около 20000 К. Поскольку поверхности компонентов системы HD52721 имеют более высокую температуру (около 25000 К), линии гелия в области пятен могут оказаться глубже, чем на остальной поверхности. Тем более, глубже там должны быть и атмосферные бальмеровские линии, интенсивность которых резко усиливается от спектрального класса В к спектральному классу А (см. рис.2.1., нижний).

Фотометрически, наблюдаемая картина изменения блеска может быть очень похожей для обеих моделей. Но скорости наблюдаемых атмосферных линий для запятненной одиночной звезды будут изменяться с фазой вращения совсем по-другому. Фотометрические минимумы будут наблюдаться, когда одно из пятен окажется перед звездой и наблюдателем. В этом положении профиль атмосферной линии будет симметричным и несмещенным. При дальнейшем повороте звезды уходящее холодное пятно будет искажать красную часть профиля, делая ее глубже. В результате, положение общего профиля станет

смещаться в красную сторону. Аналогично, на фазах появления второго пятна,

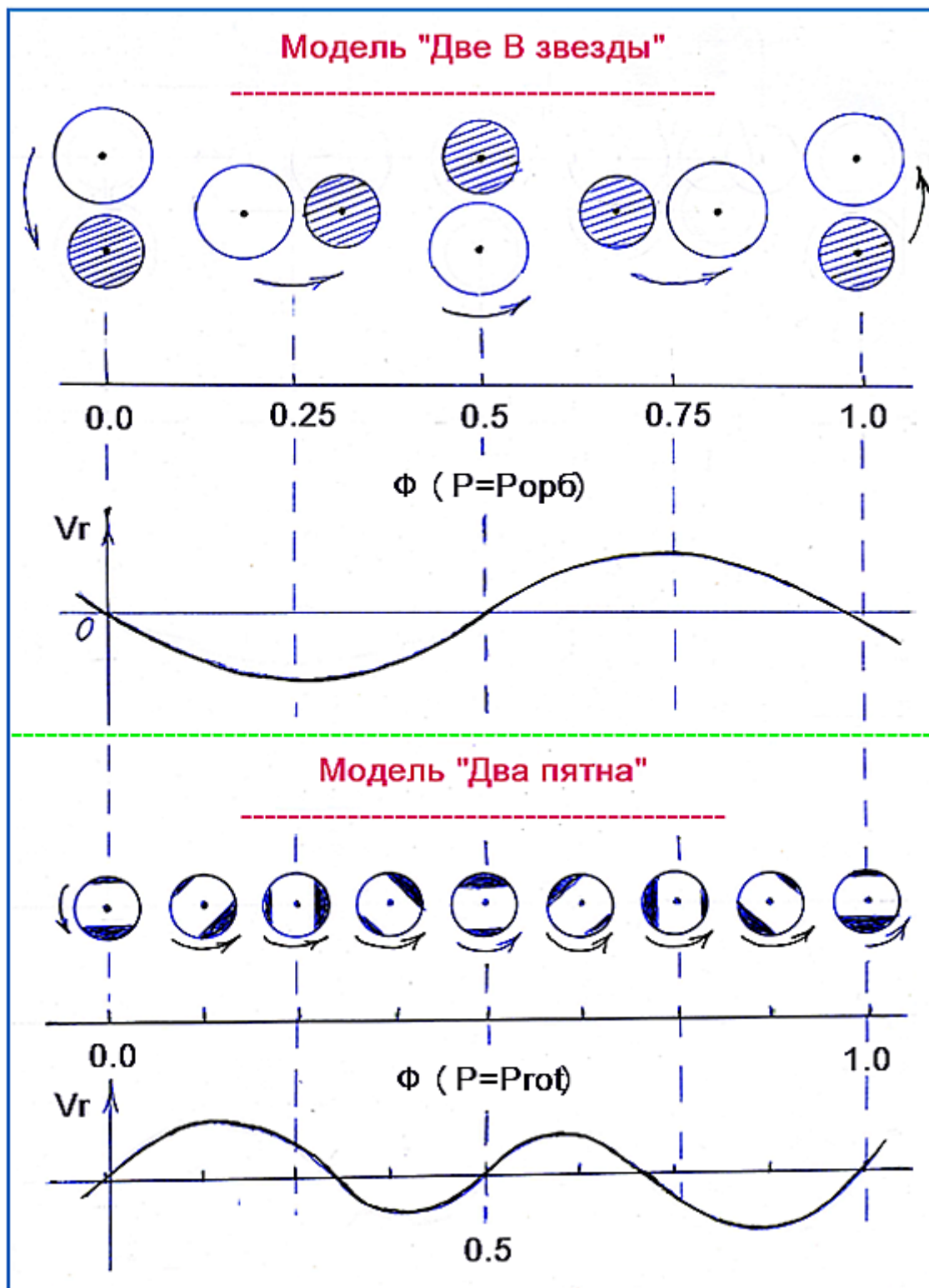


Рис.2.1. Схематическая иллюстрация фазовых кривых изменения лучевой скорости атмосферной линии для двух моделей: а) двойной затменной системы, состоящей из двух компонентов спектрального класса В (вверху) и б) одиночной звезды с двумя пятнами на поверхности (внизу). Пояснения к рисунку приведены в тексте.

приближающегося к наблюдателю, общий профиль будет смещен уже в фиолетовую сторону. Значит, где-то около фазы фотометрического максимума, когда оба пятна будут находиться по разные стороны от луча зрения лучевая скорость общего профиля линии должна снова быть несмещенной. Таким образом, за один поворот звезды кривая лучевых скоростей атмосферных линий должна дважды пройти через нулевое значение (скорость совпадает с собственной скоростью звезды). В результате должны наблюдаться циклические изменения скорости атмосферных линий с периодом вдвое большим, чем период вращения звезды.

На рис.2.2 показаны фазовые изменения наблюдаемых лучевых скоростей нескольких линий гелия и бальмеровских линий, построенных для фотометрического периода $P = 1.610$ дней. Мы видим картину, полностью соответствующую модели двойной модели системы: а) зависимость имеет вид перевернутой синусоиды с периодом, равным $P = 1.610$ дней.

Шкалы лучевых скоростей на графиках даны в системе центра тяжести системы. Скорость γ этого центра относительно Солнца была рассчитана путем усреднения всех значений лучевой скорости на всех фазах и для всех линий. Она оказалась равной $\gamma = +25.4 \pm 1.2$ км/с. Интересно было сравнить величину γ со скоростью узких межзвездных линий DNaI, которая по всем измерениям за все сезоны составила $+31.1 \pm 0.5$ км/с. Видно, что она, хоть и близка к значению скорости гравитационного центра системы, но немного отличается от нее. Эти компоненты резонансного дублета натрия формируются в межзвездных облаках вблизи самого объекта и могут иметь некоторое смещение в пространстве относительно него.

Очень показательными являются фазовые изменения профилей атмосферных линий. На рис.2.3 на примере атмосферной линии HeI 4026 показан вид профиля на фазе, близкой к фотометрическому минимуму ($\Phi = 0.53$). На рисунке видно, что в минимуме блеска составной профиль линии хорошо аппроксимируется модельными профилями с $T_{\text{эфф}} = 25000$ К, $\log g = 4.0$ и $V \sin i$ между 160 и 200 км/с. Расчеты проводились с использованием программ

Пискунова SYNTH+ROTATE [86] и TLUSTY [87]. На рис.2.4 показан профиль этой же линии в максимуме блеска в сравнении с тем, который наблюдается в минимуме. Видно, что в максимуме блеска профиль гораздо шире, что соответствует разбросу наблюдаемых величин $V \sin i$ для HD52721 от 200 до 450 км/с, встречавшихся в литературе, и это – ожидаемый эффект для тесной двойной системы. Но на широком профиле в максимуме блеска отсутствует раздвоенность

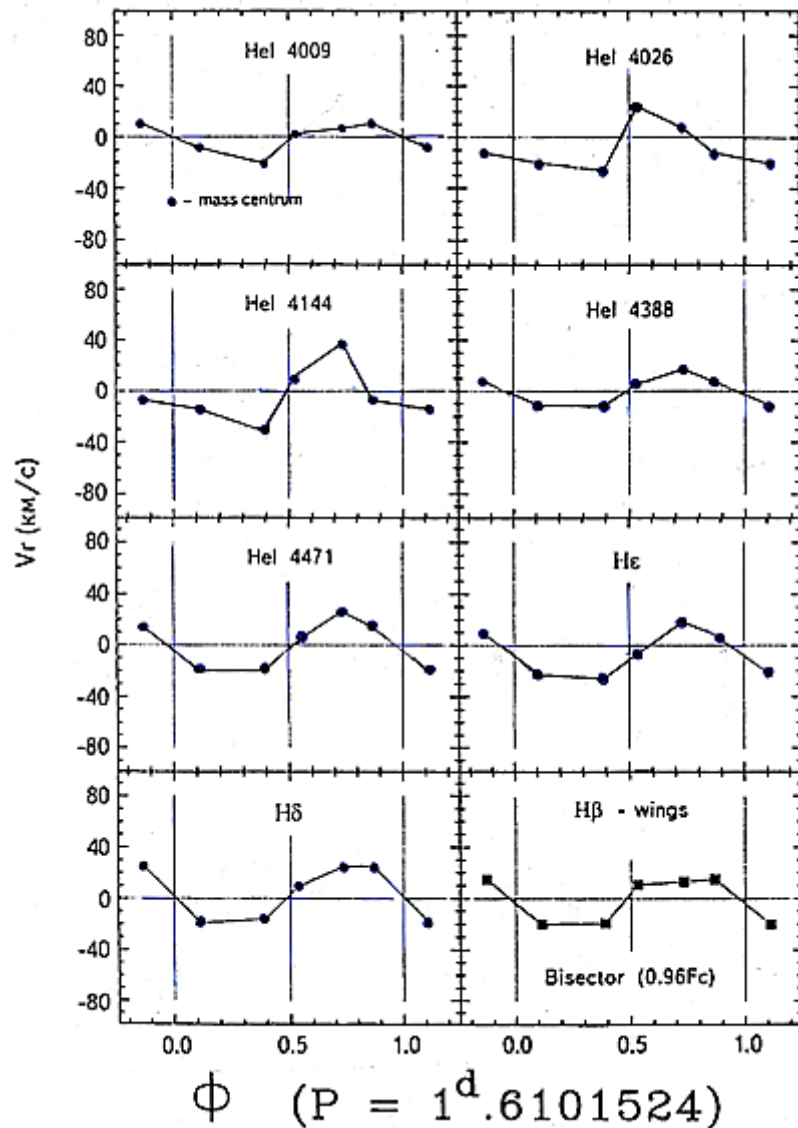


Рис.2.2. Фазовые изменения лучевой скорости ряда атмосферных линий для периода $P = 1^d.6101524$, измеренные по лучевой скорости центра тяжести абсорбционного профиля. Для линии H β представлены фазовые изменения бисекторной скорости, измеренной для крыльев атмосферного профиля на уровне 0.96 Fc (темные квадраты). Шкала лучевых скоростей привязана к центру тяжести системы (+25.4 км/с).

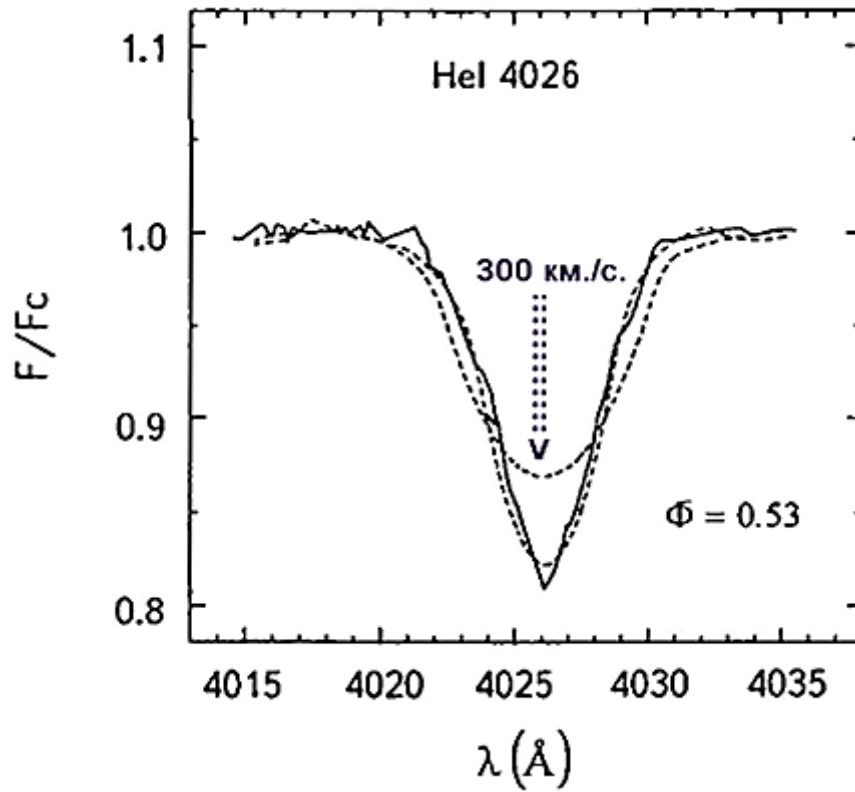


Рис. 2.3. Сравнение нормированного профиля линии HeI 4026 на фазе фотометрического минимума ($\Phi = 0.53$) с теоретическими профилями для моделей: $T_{\text{эфф}} = 25000$ K, $\log g = 4.0$, $V \sin i = 200$ и 300 км/с.

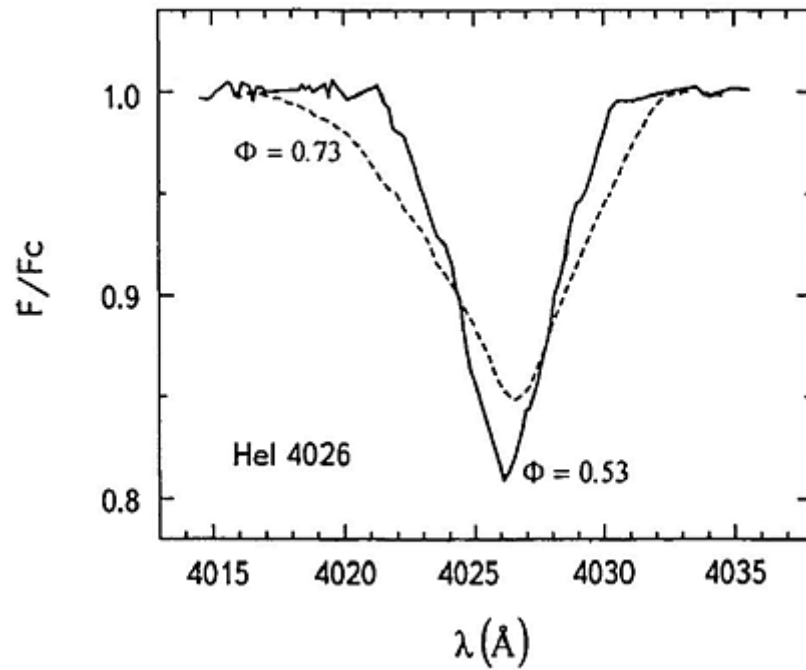


Рис. 2.4. Сравнение нормированного профиля линии HeI 4026, наблюдаемой в максимуме ($\Phi = 0.73$) и в минимуме ($\Phi = 0.53$) блеска.

минимума профиля, которая также должна была бы наблюдаться при значительной скорости орбитального движения. Именно это обстоятельство и заставило в свое время майданакских наблюдателей отвергнуть гипотезу о системе, состоящей из 2-х В звезд (см. раздел 1.1).

На самом деле, этот эффект имеет очень простое объяснение. Как уже отмечалось в разделе 1.1, согласно базе данных SIMBAD, вблизи HD52721 находится еще одна звезда ($\Delta\alpha \sim 0''.65$, $\Delta m \sim 0^m.95$). Поскольку расстояние между HD52721 и Солнечной системой составляет около 1000 пс [72], третья звезда должна располагаться от системы в картинной плоскости на дистанции порядка 650 а.е., и она, скорее всего, гравитационно с системой не связана. Но такое близкое видимое расположение этой звезды к объекту исследования, приводит к тому, что она не может быть от него пространственно разрешена ни при фотометрических, ни при спектральных наблюдениях. Она будет неизбежно попадать как в щель спектрографа при спектроскопии, так и сливаться с изображением объекта при его фотометрии. Ее излучение будет влиять как на общий блеск объекта, так и на его спектр. Блеск третьей звезды (звезда поля?) сравним по величине с блеском каждого из компонентов системы. Если спектральный класс и $V \sin i$ третьей звезды окажутся близкими к этим же параметрам компонентов системы (а таких большинство в комплексе звездообразования в Большом Псе!), то в минимуме блеска она не исказит существенно составные профили атмосферных линий, так как профили всех трех звезд будут совмещены по шкале лучевых скоростей. На фазе фотометрического максимума профили двух звезд-компонентов системы разойдутся в разные стороны по шкале длин волн, а профили третьей звезды останутся в центральном положении и замоют раздвоенность общих профилей самой системы. В результате атмосферные профили станут широкими, но не будут раздвоенными, что и наблюдается.

И снова наблюдаемые фазовые изменения профилей атмосферных линий хорошо объясняются в рамках модели двойной затменной системы. Как показывают расчеты, для альтернативной модели одиночной звезды с двумя

темными пятнами подобные изменения ширин профилей атмосферных линий наблюдаться не могут. Для разных температур поверхности происходят значительные изменения глубины линий, а ширина практически не меняется. Таким образом, исследование атмосферных линий HD52721 однозначно показало, что объект является затменной двойной системой, состоящей из 2-х звезд класса В с близкими параметрами атмосферы и орбитальным периодом $P = 1.610$ дня.

2.3. Параметры компонентов системы

В работе [72], где было принято расстояние до HD52721 $d = 1050$ пс, $T_{\text{эфф}} = 25100$ К (как и в нашей работе) и светимость объекта $\log (L/L_{\text{sun}}) = 4.25$ в максимуме блеска, оценка радиуса каждого из компонента системы составила $R \approx 5 R_{\text{sun}}$, если он примерно одинаков для них обоих. Стандартное выражение для функции масс, величина орбитального периода $P = 1.610$, а также предположение о круговых орбитах, равенстве масс компонентов и $\sin i = 1$ позволяют получить простые выражения для скорости орбитального движения $V_{\text{орб}}$ и расстояние от центра каждого компонента системы до ее центра масс $r_{\text{орб}}$:

$$V_{\text{орб}} = 115 (M/M_{\text{sun}})^{1/3} \text{ км/с} \quad (3)$$

$$r_{\text{орб}}/R = 3.68 (R/R_{\text{sun}})^{-1} (M/M_{\text{sun}})^{1/3} \quad (4)$$

Для величины M , характерной для звезд класса В2, $M = 10 M_{\text{sun}}$, и $R/R_{\text{sun}} = 5-6$ (из литературы), находим $r_{\text{орб}} = (1.3 - 1.6) R$ и $V_{\text{орб}} = 250$ км/с. Даже существующая неопределенность в значении M не сильно повлияет на оценку $V_{\text{орб}}$, так как зависимость этой величины от M достаточно слабая (кубический корень).

Вывод о том, является ли эта двойная система полностью синхронизированной, можно сделать на основе сравнения отношения скорости вращения компонентов V_{rot} к их орбитальной скорости $V_{\text{орб}}$ и отношения среднего радиуса звезды-компонента R к расстоянию между компонентами и центром масс системы $r_{\text{орб}}$. Выше нами была получена оценка $R/r_{\text{орб}} = 0.63$. Величина V_{rot} просто

вычисляется по значениям периода вращения звезды и ее радиуса. Если предположить, что радиус R равен от $5 R_{\text{sun}}$ [72] до $6 R_{\text{sun}}$ (средний ожидаемый радиус для В2 звезды, близкой к ГП), и равенство орбитального периода и периода вращения звезд $P = 1.610$ дня, тогда величина V_{rot} находится в пределах от 160 до 200 км/с., следовательно, отношение $V_{\text{orb}}/V_{\text{rot}}$ будет равно 1.25 – 1.56, что соответствует отношению $r_{\text{orb}}/R = 1.3 - 1.6$. То есть, в пределах имеющейся неопределенности в оценках величин параметров компонентов, систему можно считать синхронизованной.

Расчет радиуса полостей Роша в такой системе по известной формуле Игглтона [89] для равных масс у компонентов ($q = 1$):

$$r = 0.49q^{2/3} / (0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})) \quad (5)$$

приводит к оценке $\Gamma = 0.38$ от расстояния между компонентами. Так, при $r_{\text{orb}}/R = 1.6$ радиус полости Роша у каждого компонента будет $1.2R$. Учитывая, что в контактных двойных системах форма звезд-компонентов вытягивается и приобретает каплеобразную форму, полученные оценки находятся в согласии.

2.4. Околозвездные линии

Наиболее яркой эмиссионной линией в спектре HD52721 является линия $\text{H}\alpha$. На рис.2.5 показаны типичные нормированные профили этой линии, построенные с учетом изменяющегося уровня континуума, который проявляется в виде фотометрической переменности объекта. Величина $F_c = 1$ соответствует уровню континуума F_c в состоянии максимума блеска. Профиль линии одиночный эмиссионный с широкими крыльями, затрудняющими процедуру нормировки профиля, так как на большом удалении от центра эти крылья плавно сливаются с континуумом. Для точного определения эквивалентных ширин в данном случае требуется использование синтетического спектра атмосферы. Нам в нашей работе не удалось найти значимой корреляции эквивалентной ширины линии $\text{H}\alpha$ с фазой фотометрического периода объекта.

Но есть один параметр профиля линии, который можно измерить достаточно точно. Это лучевая скорость центра тяжести эмиссионного профиля V_m . Фазовая зависимость этой величины показана на рис.2.6. Она имеет вид синусоиды, колеблющейся относительно лучевой скорости гравитационного центра системы $\gamma = +25.4$ км/с, определенной по атмосферным линиям в разделе 2.2. На фазах фотометрических минимумов синусоида пересекает значение γ , на фазах Φ от 0 до 0.5, когда более яркий (первичный) компонент приближается к

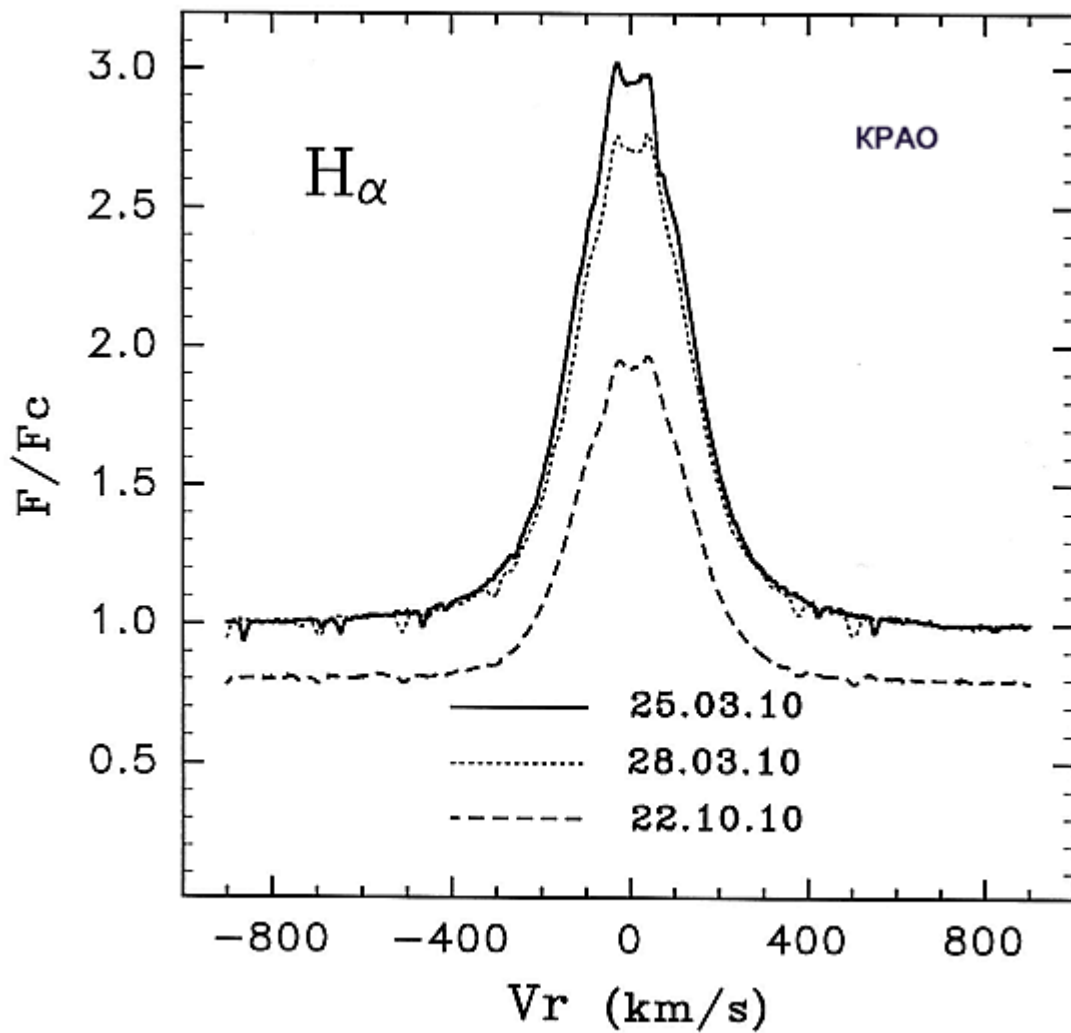


Рис. 2.5. Типичные нормированные профили эмиссионной линии H_α , наблюдавшиеся в разные даты. При нормировке учитывался циклически изменяющийся уровень спектра F_c . Величина $F_c = 1$ соответствует состоянию максимального блеска.

наблюдателю, а менее яркий (вторичный) – удаляется, величины V_m принимают положительные значения (относительно скорости γ), а на фазах от 0.5 до 1 – отрицательные. Такая зависимость может свидетельствовать о существовании локального уплотнения в оболочке в области вторичного компонента.

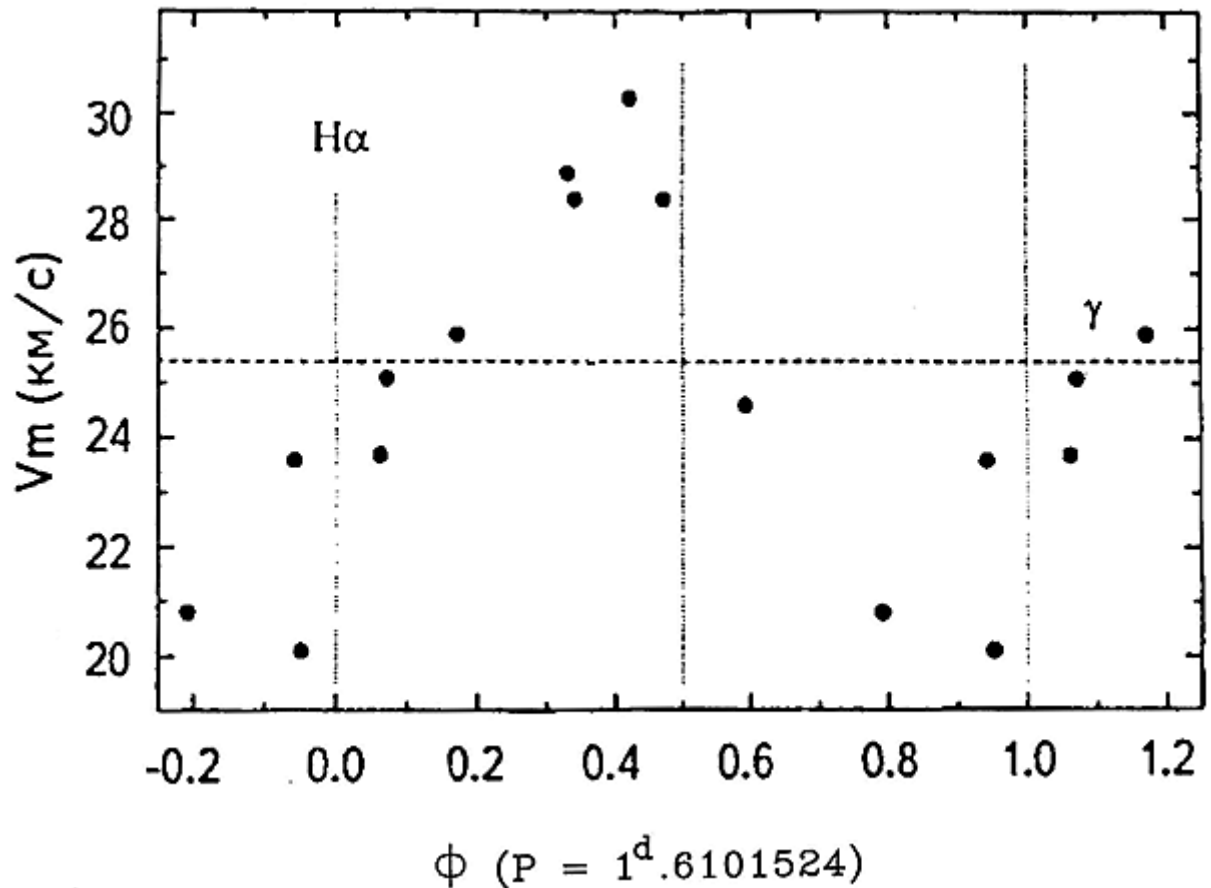


Рис. 2.6. Зависимость гелиоцентрической скорости центра тяжести V_m эмиссионного профиля $H\alpha$ от фазы фотометрического периода. γ – гелиоцентрическая скорость собственного движения центра тяжести системы. Средняя точность одного измерения скорости V_m составляет ± 0.9 км/с.

Подобное же свидетельство дают фазовые изменения профилей другой бальмеровской линии – $H\beta$ (см. рис. 2.7). Этот рисунок еще более иллюстративный. В отличие от $H\alpha$, профиль линии $H\beta$ – эмиссионный двойной, накладывающийся на атмосферную подложку. На рисунке четко видно, что на фазе Φ от 0 до 0.5, когда первичный компонент приближается, а вторичный – удаляется, более узкий эмиссионный профиль смещен относительно атмосферной

абсорбции в красную сторону. На фазах Φ от 0.5 до 1 – картина обратная, эмиссия смещается в фиолетовую сторону, как бы следуя за вторичным компонентом в его орбитальном движении.

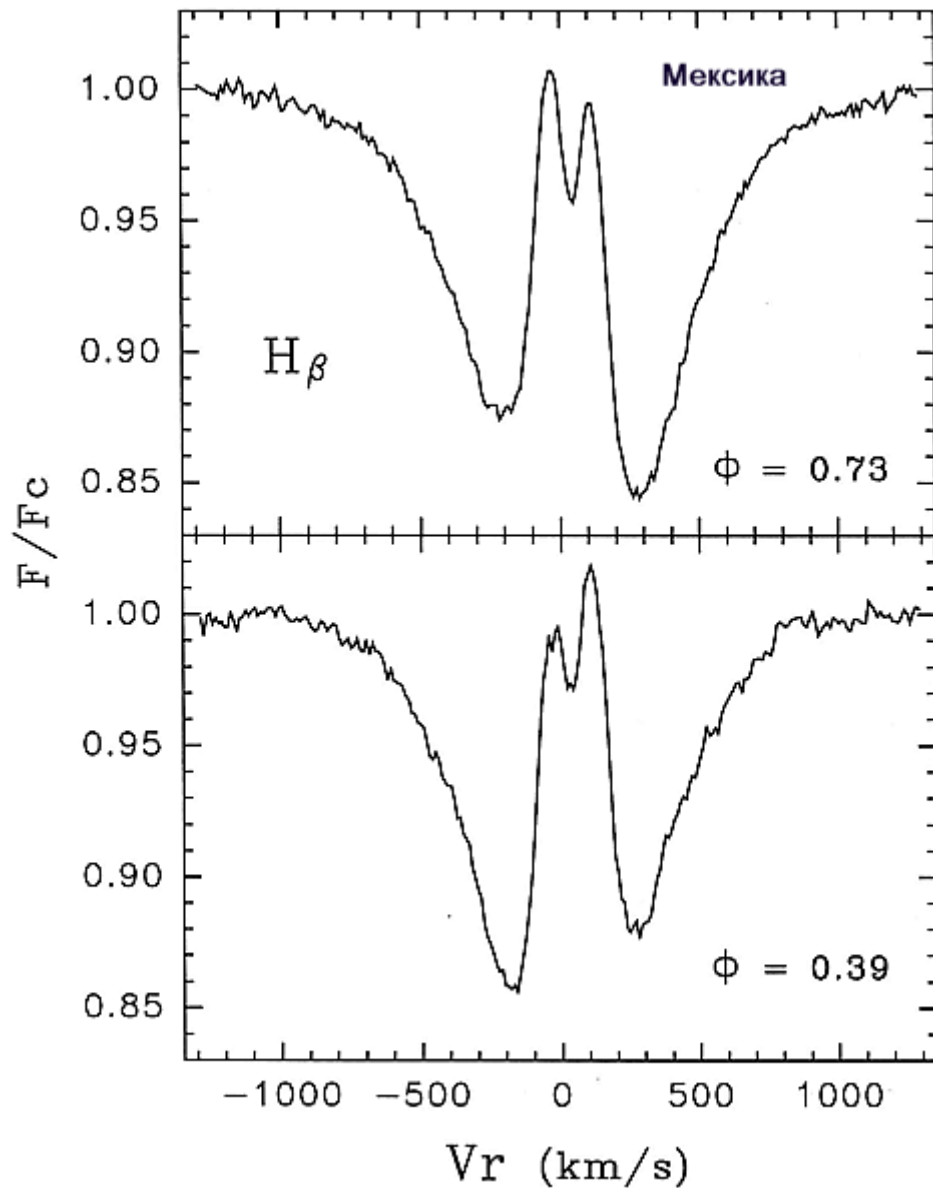


Рис. 2.7. Нормированные профили линии $H\beta$, наблюдавшиеся на фазах $\Phi = 0.39$ и 0.73 по разные стороны от минимума блеска.

Но такая очевидная на первый взгляд ситуация на самом деле не так проста. Подобный наблюдаемый эффект может быть следствием не только смещения эмиссионного компонента, он может быть связан со смещением атмосферной абсорбционной подложки в противоположную сторону, которое обсуждалось

выше. Оба эффекта работают в одном направлении, и разделить их не так просто в случае бальмеровских линий $H\alpha$ и $H\beta$, у которых атмосферный абсорбционный профиль имеет крутые штарковские крылья, усиливающие эффект.

Ответ дает картина фазовых изменений линии HeI 6678, проиллюстрированная на рис.2.8 и 2.9. Эта линия, как и $H\beta$, имеет двойной эмиссионный профиль, наложенный на более широкую атмосферную подложку. Но околозвездная компонента здесь гораздо уже атмосферной подложки, и поэтому ее профиль не искажается (как у $H\beta$) широкими атмосферными абсорбционными крыльями. Ее фазовые изменения можно наблюдать в неискаженном виде. Как видно на рисунках, на фазах, когда главный компонент приближается (Φ от 0 до 0.5) отношение V/R двух пиков двойного эмиссионного профиля значительно меньше единицы, а на фазах Φ от 0.5 до 1, наоборот, больше единицы. На фазах около минимумов, профиль становится симметричным и показывает только центральное ядро. Такие изменения профиля HeI 6678 хорошо соответствуют предположению о существовании уплотнения в газовой оболочке HD52721, сконцентрированного около вторичного компонента. Судя по профилям линий $H\beta$ и HeI 6678, имеющих два эмиссионных пика, разделенных центральной абсорбцией, внутренняя околозвездная оболочка объекта имеет вид газового диска, окружающего оба компонента системы.

Обращает на себя внимание вид профилей эмиссионных линий $FeII$ (см. рис.2.10). Они имеют РСуг структуру и не показывают никаких фазовых изменений. У наиболее сильной из них $FeII$ 5169 (мультиплет 42) голубой край РСуг-абсорбции достигает лучевой скорости -1000 км/с. По всей видимости, эти линии формируются в удаленном звездном ветре, где уже отсутствуют азимутальные неоднородности.

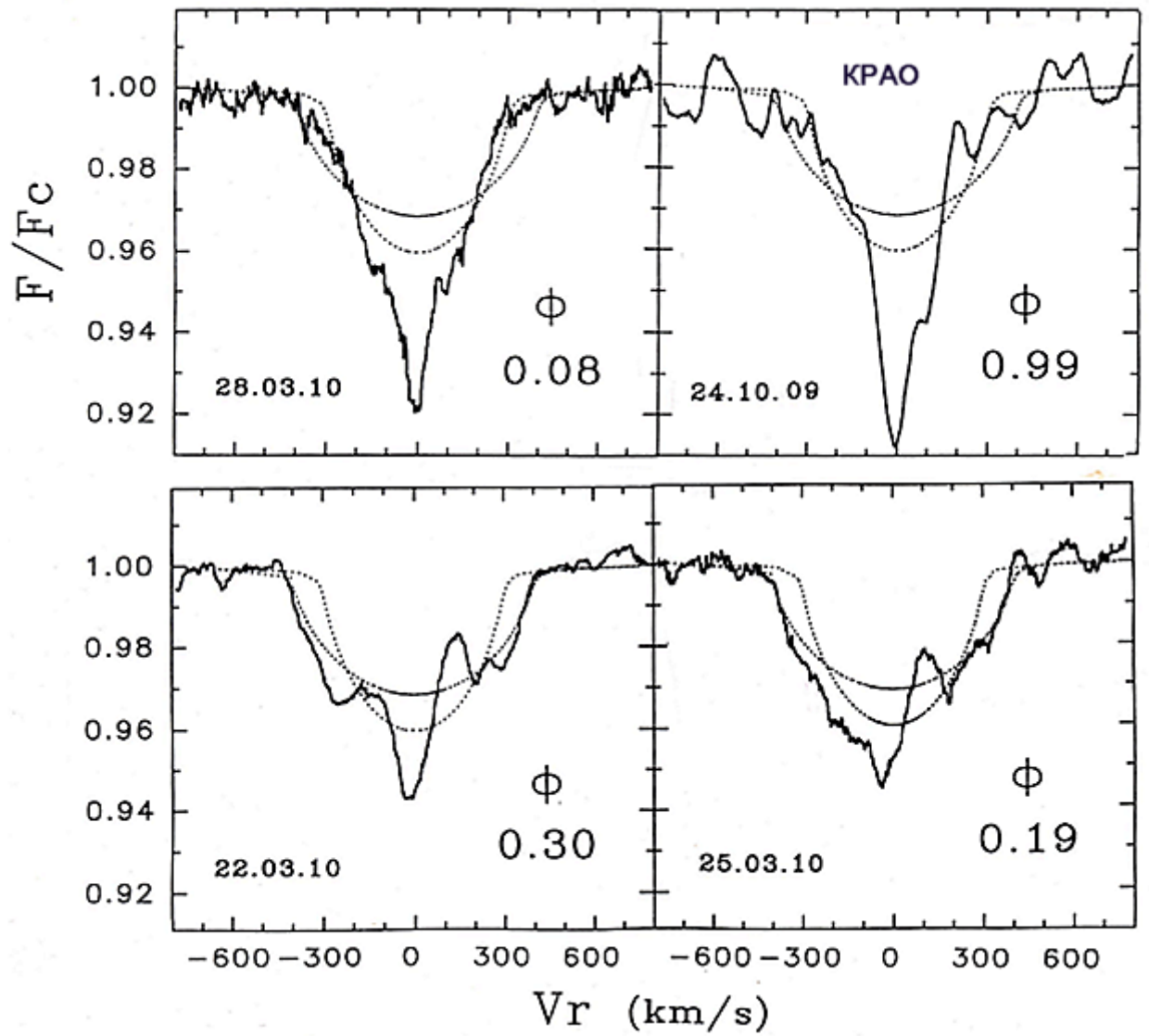


Рис. 2.8. Изменения нормированного профиля линии HeI 6678 с фазой фотометрического периода между основным и вторичным минимумом. Синтетические профили, рассчитанные для моделей с $V \sin i = 300$ и 400 км/с, приведены для иллюстрации фазовых изменений ширины атмосферного абсорбционного профиля.

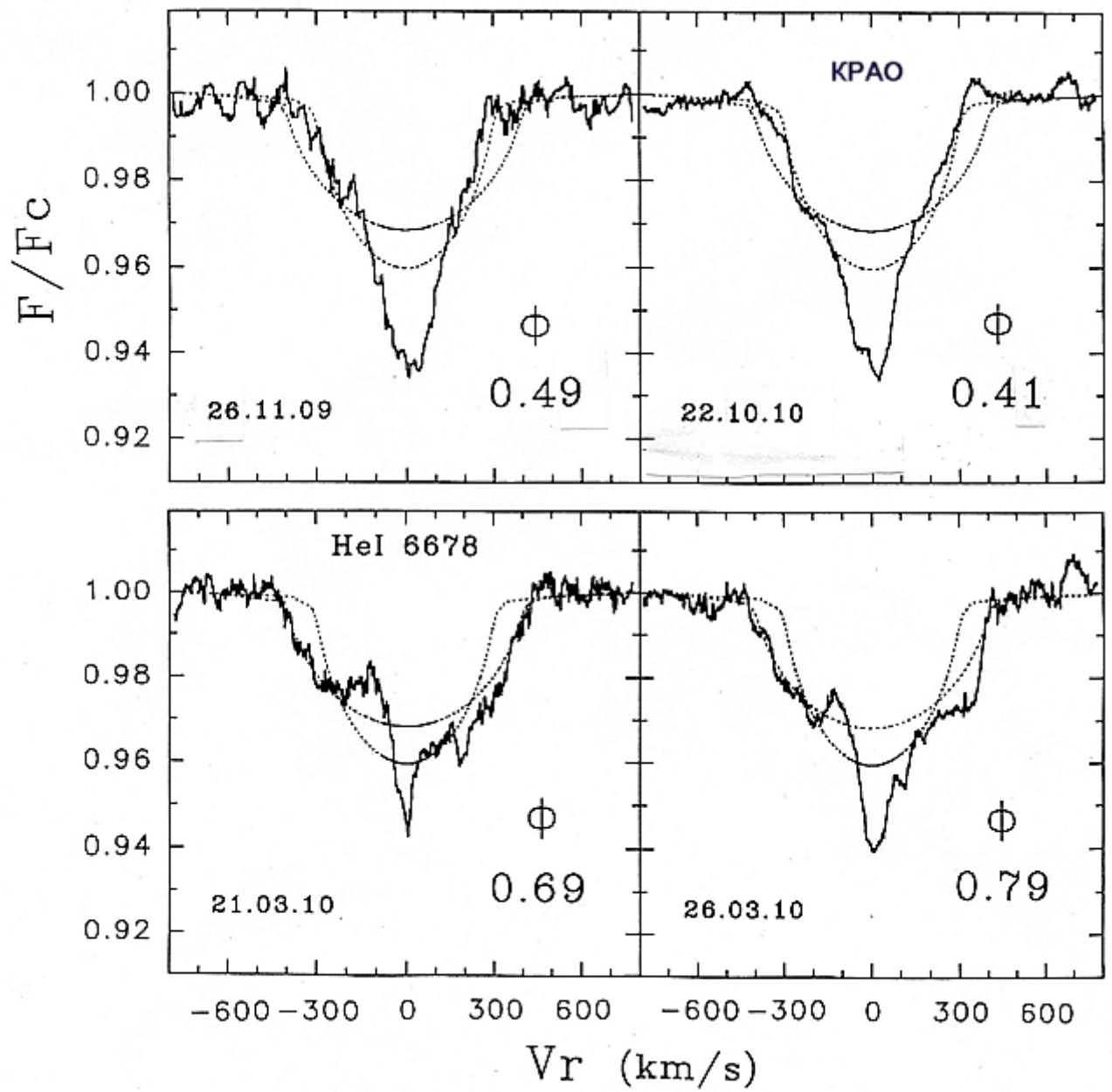


Рис. 2.9. То же, что рис.2.8, но на фазах между вторичным и основным минимумом.

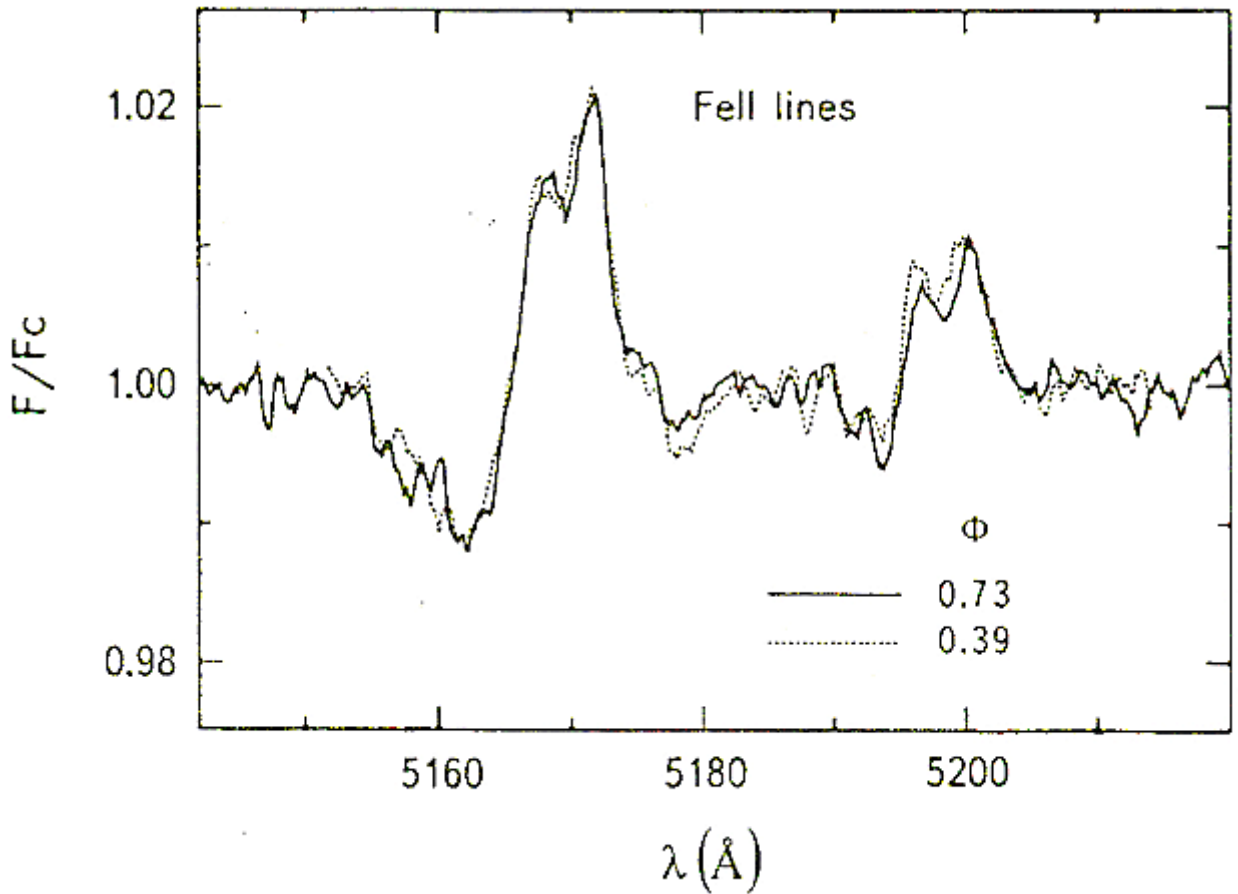


Рис. 2.10. Нормированные профили линий FeII в спектре HD52721 на фазах фотометрического периода $\Phi = 0.39$ и 0.73 .

Следует отдельно сказать о признаках звездного ветра у HD52721. Как было показано, околозвездные линии H β и HeI 6678 имеют двойные эмиссионные профили, которые свидетельствуют о наличии газовой дискообразной оболочки, хоть и содержащей азимутальную неоднородность. Но самая яркая околозвездная линия H α имеет другой тип профиля (см. рис. 2.5). Это одиночный эмиссионный профиль с маленькой ложбинкой в области его вершины. Его ширина на уровне атмосферной подложки достигает ± 800 км/с, и она гораздо шире, чем ожидаемая ширина максимальной скорости вращающегося газового диска, равной первой космической скорости звезды с массой $10 M_{\text{sun}}$ и радиусом $R = 5-6 R_{\text{sun}}$: $\pm (GM/R)^{0.5} = \pm 570-620$ км/с. Такой профиль можно объяснить присутствием у компонентов системы прозрачного ветра, диагностируемого в линии H α в форме заливания этой эмиссией двойного эмиссионного профиля от более плотного газового диска и уширения общего эмиссионного профиля газовой околозвездной

оболочки. В линии H β подобный ветер уже незаметен, там наблюдается только газовый диск.

На рис. 2.10 представлены профили линий FeII, формирующихся, в основном, в ветре и не модулируемых азимутальной неоднородностью, вращающейся в диске.

1.5. Выводы из главы 2

1. Спектроскопические наблюдений в Крымской АО и Обсерватории OAN SPM в Мексике в 2009-2010 гг. (94 спектра высокого разрешения) позволили однозначно установить, что объект представляет собой затменную тесную двойную систему, состоящую из 2-х звезд класса В с близкими параметрами атмосферы, орбитальным периодом $P = 1.6101524$ дня.

2. Были определены орбитальные скорости компонентов системы ~ 250 км/с и их расстояние до центра тяжести системы ~ 1.6 радиуса звезды. Есть некоторая неопределенность в оценки степени синхронизованности системы. Отношение расстояния между центрами компонент до центра тяжести системы к радиусу звезды составило 1.3-1.6, а отношение орбитальной скорости к скорости вращения звезд-компонентов – 1.25-1.56, это свидетельствует о том, что система HD52721 должна быть синхронизованной в рамках точности определения ее параметров.

3. Внутренняя газовая оболочка окружает оба компонента системы. Она имеет вид плотного диска, ориентированного почти «в ребро по отношению к наблюдателю. Оболочка содержит азимутальную неоднородность с повышенной плотностью, сконцентрированную около вторичного (менее яркого) компонента и вращающуюся твердотельно вместе с орбитальным вращением компонентов системы. На существовании такой неоднородности указывают изменения профиля линии HeI 6678 с фазой фотометрического периода $P = 1^d.610$.

В качестве возможной интерпретации природы этого образования можно предложить:

а) плотная струя, истекающая из системы из внешней точки Лагранжа, или,

б) уплотнение на искривленной границе взаимодействия звездных ветров компонентов системы, при условии, что один из ветров более мощный (см. работу Усова [88]).

4. Было показано, что присутствие третьей звезды в непосредственной близости от HD52721 может влиять на фотометрические и спектральные особенности параметры объекта и объяснить ряд до сих пор непонятных явлений.

Глава 3

Спектральные особенности Ae/Be звезды Хербига HD37806

3.1. Предварительная информация об объекте

Изолированная Ae/Be звезда Хербига HD37806 (MWC120, B8 - A2), расположенная вблизи ассоциации Orion OB 1b, была отмечена, как звезда с эмиссионными линиями в спектре, еще в ранних работах Мэррилла и Бёвел [90] и Свингса и Струве [91]. После обнаружения у нее избытка излучения в дальней инфракрасной области спектра по данным IRAS (Оудмайер и др. [92]), она была включена в расширенный список молодых Ae/Be звезд Хербига, составленный Пик Сином Тэ и др. [10]. К ее особенностям можно отнести слабое покраснение ($A_V < 0^m.1$, [93, 94]), большую величину $V \sin i = 120 \pm 30$ км/с ([41, 95]) и значительную скорость удаления от Солнца $+47 \pm 21$ км/с [41]. Объект был даже включен в каталог «убегающих» звезд (Тэтцлафф и др. [96]). По данным спектроастрометрии (Вилрайт и др. [97]) у HD37806 было заподозрено наличие второго компонента с $\Delta\rho \geq 0".1$ и $\Delta m \leq 5^m$, с указанием, что этот факт требует подтверждения. Попытки измерить магнитное поле HD37806 не привели к значимому результату из-за высокого значения $V \sin i$ (Вэйд и др. [39], Алесян и др. [41], Багнуло и др. [98]). Тем не менее, высокоточная фотометрия со спутника MOST (Русинский и др. [99]) позволила обнаружить малоамплитудную циклическую переменность блеска объекта с периодом около 1.5 суток. Авторы интерпретировали этот результат, как эффект вращательной модуляции, вызванный горячим контрастным пятном на поверхности звезды. Такое пятно может быть признаком магнитосферного характера аккреции из диска на звезду.

Фундаментальные параметры звезды, такие, как масса M и радиус R , а также возраст объекта t_{age} и расстояние до него r , в разных работах оценивались по-разному, в достаточно широком диапазоне значений: M – от 3.0 до 4.3 масс

Солнца, $R = 4.6 \pm 0.5$ радиусов Солнца, $t_{\text{age}} = 1.5 - 2.0 \cdot 10^6$ лет, d от 375 до 430 пс ([20, 41, 53, 101-103]). Ориентация оси симметрии околозвездного диска по отношению к лучу зрения была оценена в статье Лазарева и др. [20] по данным картирования PIONIER+VLTI ($i = 41.5^\circ$) и по результатам интерпретаций свечения диска в линии $\text{Br}\gamma$ в рамках модели дискового ветра Креплина, Тамбовцевой, Гринина и др. [105], где была получена такая же оценка $i \sim 40^\circ$. Картирование областей удаленного диска показало отсутствие в диске локальных пространственных неоднородностей [53]. Это ожидаемый результат для столь молодого объекта, в диске которого еще не началась фрагментация, как, например, у той же Ae/Be звезды Хербига ABAur, чей возраст оценивается в $\sim 4 \cdot 10^6$ лет, и в окрестности которой наблюдаются очаги планетообразования и спиралеобразные структуры (Боккалетти и др. [104]).

Особенности спектра HD37806 к настоящему времени изучены мало. Если подобные исследования и проводились, то они не представлены в печати. В основном приводился профиль эмиссионной линии $\text{H}\alpha$ в различные сезоны наблюдений с интервалами между ними в несколько месяцев и лет. Описание этого профиля, наблюдавшегося с 1995 по 2007 гг., дается Харрингтоном и Куном [106] со ссылкой на более ранние работы [107-109]. Во все сезоны профиль демонстрировал два основных эмиссионных компонента, разделенные центральной абсорбцией. Голубой (фиолетовый) компонент всегда имел меньшую интенсивность, чем красный, а его форма менялась в достаточно широких пределах. Иногда его интенсивность была сравнима с интенсивностью красного компонента, иногда она уменьшалась настолько, что сам профиль приобретал вид PCyg III по классификации Билса [110]. В последнем случае в области дополнительной голубой эмиссии могла появиться многокомпонентная структура в виде вторичных абсорбционных деталей.

Целью настоящей работы было:

а) на основе собственных наблюдений исследовать спектральные особенности HD37806 на временном масштабе от месяцев и лет до дней и часов, причем не ограничиваться одной линией $\text{H}\alpha$, а использовать и другие линии,

такие, как H β , HeI 5876, FeII 4923 и дублет DNaI, формирующихся в различных областях околозвездного газа;

б) проверить корреляции между изменениями параметров различных линий на разном временном масштабе и

в) попытаться интерпретировать обнаруженные наблюдаемые явления на основе существующих представлений об объектах этого типа.

3.2. Наблюдения

Основные наблюдения проводились в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) на 2.6-м телескопе ЗТШ. До осени 2013 г. использовался кудэ спектрограф ASP-14, оснащенный ПЗС-камерой, обеспечивающей спектральное разрешение с $R \sim 20000$. В течение 6-ти наблюдательных сезонов с 2009 по 2013 гг. было получено 18 усредненных за ночь спектров в области H α , один спектр в области H β и 13 усредненных за ночь спектров в области линий HeI 5876 и дублета DNaI. После ввода в эксплуатацию эшелле спектрографа примерно с таким же спектральным разрешением, наши наблюдения проводились только на нем. Ввиду того, что используемый ПЗС приемник не перекрывал полностью эшелльное двумерное изображение, спектры в области H α и в области линий H β , HeI 5876, DNaI, и FeII 4923, могли быть получены только в виде двух отдельных экспозиций с переводом угла дифракционной решетки. Всего с 2013 по 2019 гг. было получено 49 усредненных за ночь спектров. Таким образом, общее количество индивидуальных спектров, полученных на ЗТШ с 2009 по 2019 годы, составило 250 (81 усредненный за ночь спектр за 48 ночей наблюдений). Полный перечень этих спектров приведен в Приложении в Таблице П2.

Дополнительно были использованы эшелле спектры, полученные в течение 3-х дат в феврале 2010 г. на 2.1-м телескопе обсерватории OAN SPM (Мексика) со спектрографом REOSC ($R \sim 17000$). В каждую ночь наблюдений в течение 40 минут было получено по 9 спектров в области $\lambda\lambda 3800-6800\text{\AA}$ (26 порядков), которые затем усреднялись. Юлианские даты усредненных спектров, их

отношение сигнал/шум (S/N) в области $5000 \text{ \AA}$, а также отношение интенсивностей фиолетового и красного эмиссионных пиков профиля линии $H\alpha$ (V/R) представлены в Табл. 2

Таблица 2

ПЕРЕЧЕНЬ СПЕКТРОВ HD37806, ПОЛУЧЕННЫХ В OAN SPM

Дата	JD (2450000.0 +...)	N	S/N (5000Å)	V/R ($H\alpha$)
19.02.10	5246.767	9	90	0.55
26.02.10	5253.728	9	65	0.47
27.02.10	5254.729	9	65	0.52

Вся первичная обработка спектрального материала проводилась с применением стандартных программ, используемых в обсерваториях КрАО и OAN SPM: это программы DECH (Галазутдинова) и SPE (Сергеева) в КрАО и IRAF – в обсерватории OAN SPM. При нормировке профилей линий, формирующихся в околозвездной оболочке, накладывающихся на атмосферную компоненту линии, использовались синтетические атмосферные профили, рассчитанные с помощью программы Пискунова SYNTH+ROTATE [86] и базы данных VALD для модельных параметров атмосферы HD37806, взятых из литературы: $T_{\text{eff}} = 10000 \text{ K}$, $\log g = 4.0$, $V \sin i = 120 \text{ км/с}$ и собственную скорость звезды относительно Солнца $+50 \text{ км/с}$. Все полученные спектры были приведены в систему длин волн и лучевых скоростей, связанную со звездой

3.3. Профили околозвездных линий

3.3.1. Линия $H\alpha$

Больше всего спектров за весь период наблюдений было получено в области линии $H\alpha$. Рис. 3.1 иллюстрирует типы профилей этой линии, наблюдавшиеся в различные сезоны. Наиболее часто встречается двойной эмиссионный профиль с изменяющимся отношением V/R , которое в большинстве случаев, оказывалось меньше единицы. Все части профиля переменны, особенно заметные изменения происходят в области голубого (фиолетового) эмиссионного компонента, но центральная абсорбция меняется слабо. Интенсивность ее минимума всегда остается примерно на уровне единицы от непрерывного спектра ($1 F_c$), а положение по шкале лучевых скоростей V_r равно приблизительно -50 км/с (-48 ± 5 км/с за весь период с 2009 по 2019 гг.).

Когда отношение V/R сильно уменьшается, то эмиссионный профиль выглядит, как PCyg III (по классификации Билса [110]) с дополнительным голубым эмиссионным компонентом. Такой тип профиля $H\alpha$ наблюдался, в частности, с ноября 2012 г. по март 2013 г. (рис.3.1). В такие даты в области голубого пика отчетливо видны мелкие локальные детали, проявляющиеся в виде бегущих волн интенсивности на временном масштабе порядка суток. При этом глубина и положение центральной абсорбционной компоненты остаются такими же, как и в случае двойного эмиссионного профиля.

Но в отдельные даты профили $H\alpha$ приобретали вид, который никогда раньше не наблюдался. Оба эмиссионных пика становились равными по интенсивности, а иногда голубой пик оказывался даже интенсивнее красного ($V/R \geq 1$). Такие профили наблюдались в декабре 2017 г., их примеры показаны на рис. 3.2.

В целом можно сказать, что наши наблюдения подтвердили основные особенности типа профиля $H\alpha$ в спектре HD37806, описанные в работе [106], но, дополнительно, была получена и новая информация. Во-первых, стало ясно, что в некоторые даты отношение V/R может становиться и больше единицы. Во-вторых, стало возможным сделать вывод о существовании по меньшей мере двух различных компонент его переменности. Первая из них – это изменение типа

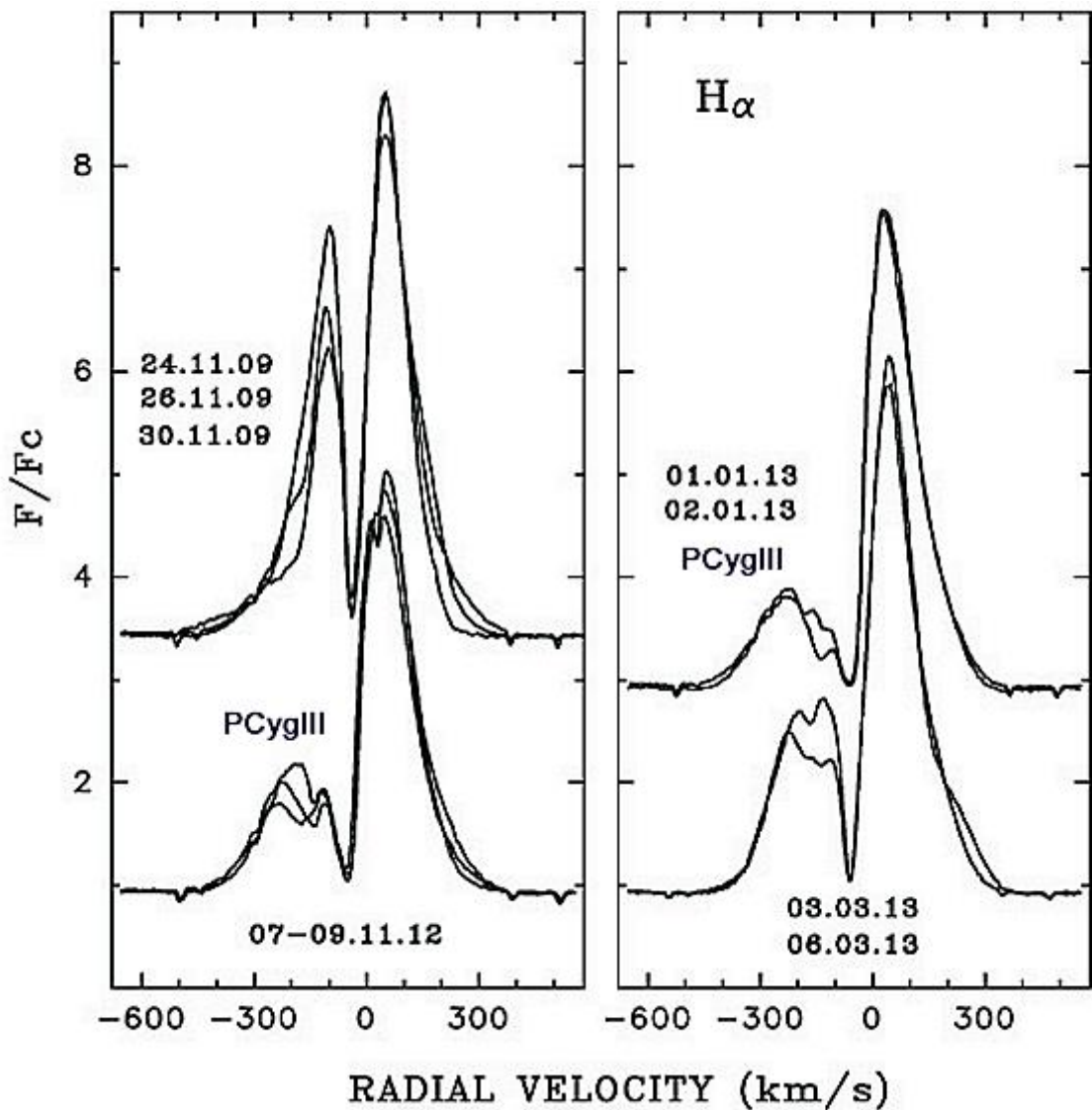


Рис. 3.1. Типичные нормированные профили линии $H\alpha$, наблюдавшиеся в спектре HD37806 в разные даты (указаны на рисунке). Шкала лучевых скоростей привязана к звезде.

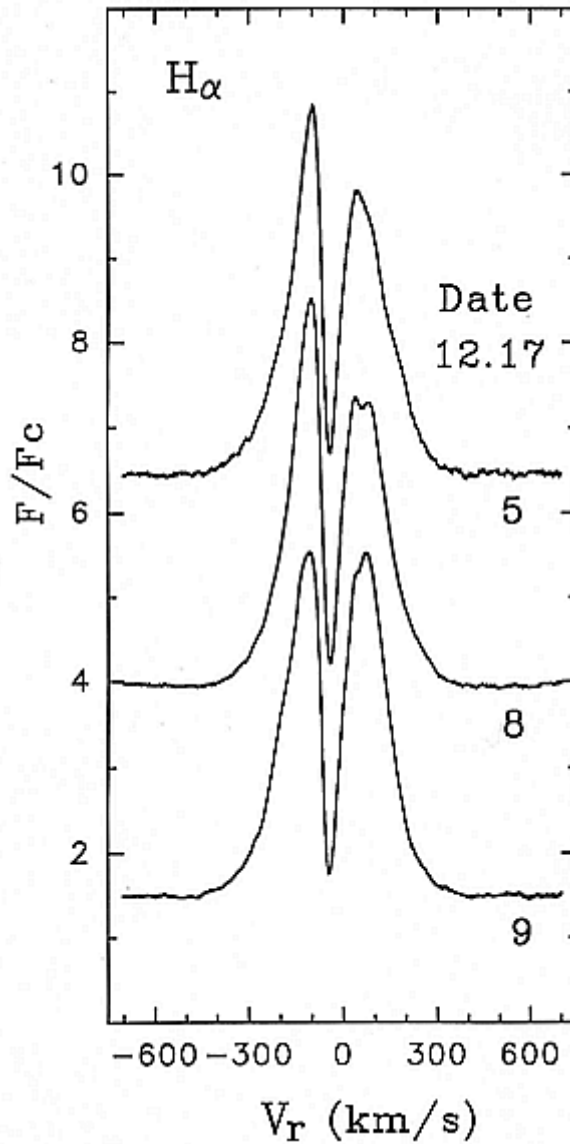


Рис. 3.2. Профили линии $H\alpha$, которые наблюдались в декабре 2017 г.

самого профиля от двойного эмиссионного до PCyг III и наоборот. Обычно в течение одного наблюдательного сезона такие трансформации замечены не были, тип профиля сохранялся все соседние даты. Мы можем сделать вывод, что характерное время подобных изменений должно быть порядка месяца.

Вторая компонента переменности профиля – это уже упомянутые бегущие волны интенсивности, наблюдающиеся главным образом в области голубого эмиссионного пика во все даты, но более всего они были заметны, когда этот пик становится мало интенсивным (тип профиля PCyг III). Эти изменения

происходили от ночи к ночи, и их временной масштаб сравним с ожидаемым периодом вращения звезды.

3.3.2. Профили $H\beta$ и $FeII$ 4923.

Примеры профилей линий $H\beta$ и $FeII$ 4923 показаны на рис. 3.3. Они демонстрируют большое разнообразие, их труднее систематизировать, чем профили $H\alpha$. В целом, их можно считать двойными эмиссионными, но изменения отношения V/R имеют менее регулярный характер. Иногда они происходят от ночи к ночи. Линия $H\beta$ очень редко демонстрирует профиль типа $PCyg$ III, он наблюдался только в ноябре 2016 г., когда отношение $V/R(H\alpha)$ было минимальным. У линии $FeII$ профиль типа $PCyg$ не наблюдался ни разу. Но у обеих линий в некоторые даты присутствуют явные признаки аккреции в виде протяженного красного абсорбционного компонента профиля, простирающегося почти до +400 км/с (март 2017 г.). В отдельные даты у профилей $H\beta$ и $FeII$ наблюдается более тонкая структура в виде локальных эмиссионных или абсорбционных компонент различной ширины, которые появляются как в голубой, так и красной части профиля. Но во все даты у профилей обеих линий присутствовала центральная абсорбционная компонента на лучевой скорости около -50 км/с, которая наблюдалась также и у $H\alpha$ профиля.

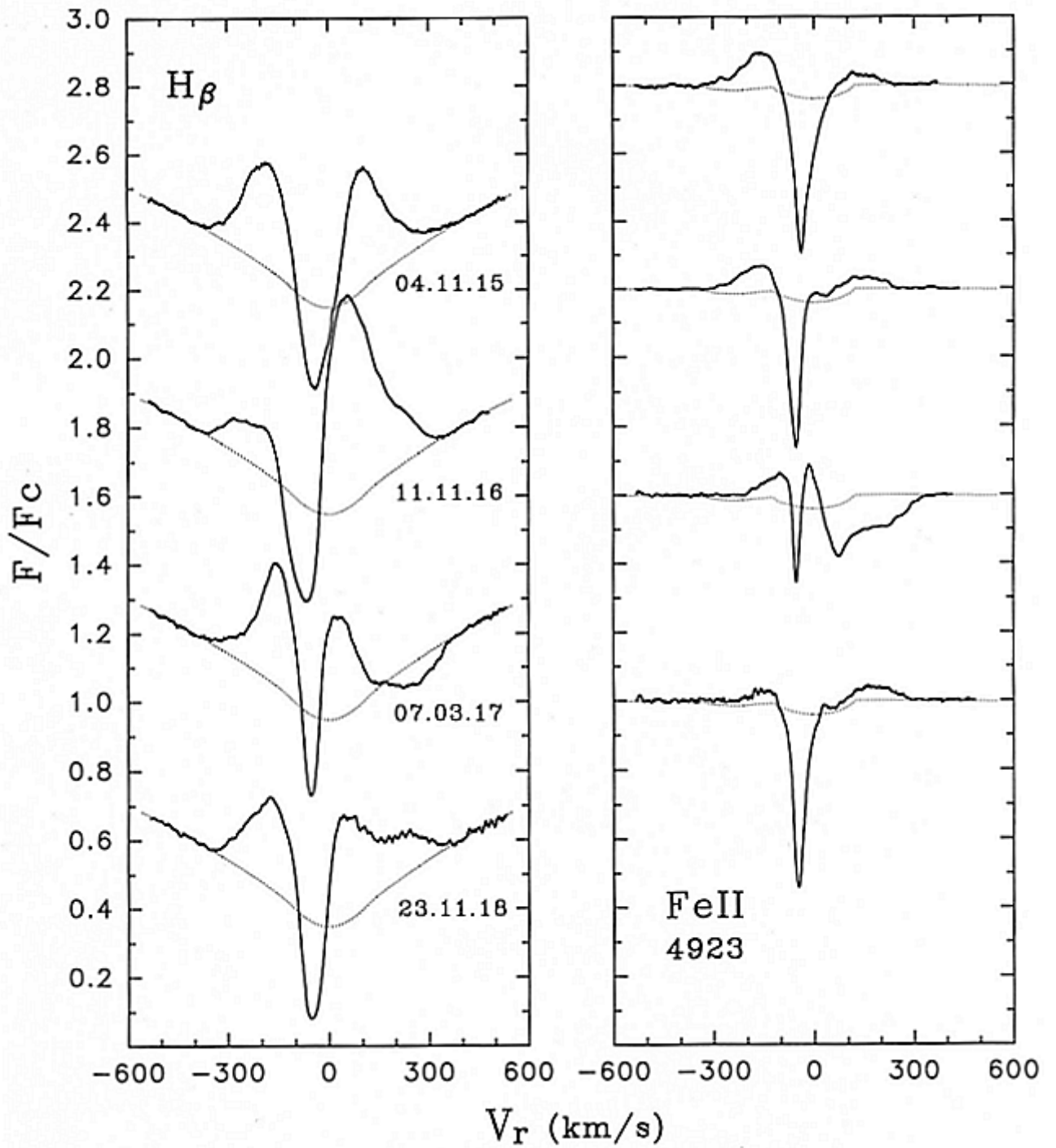


Рис. 3.3. Профили линий $H\beta$ и $FeII$ 4923 в спектре HD37806 в разные даты наблюдений. Пунктирными линиями показаны синтетические атмосферные профили, рассчитанные для модели: $T_{eff} = 10000$ K, $\log g = 4.0$, $V \sin i = 120$ км/с.

3.3.3. Линии дублета DNaI 5889,5895

В спектре HD37806 линии резонансного дублета натрия наблюдались в виде эмиссии небольшой интенсивности с максимумом приблизительно на нулевой скорости и наложенной на нее группой узких абсорбционных линий, состав, лучевые скорости и ширина которых менялась от даты к дате. В ноябре 2009 г. была отчетливо видна только одна узкая линия, имеющая вид межзвездной (IS), на лучевой скорости около -30 км/с. При этом, ее асимметрия указывала на наличие еще одной компоненты, смещенной еще в более голубую сторону (рис.3.4, левая часть).

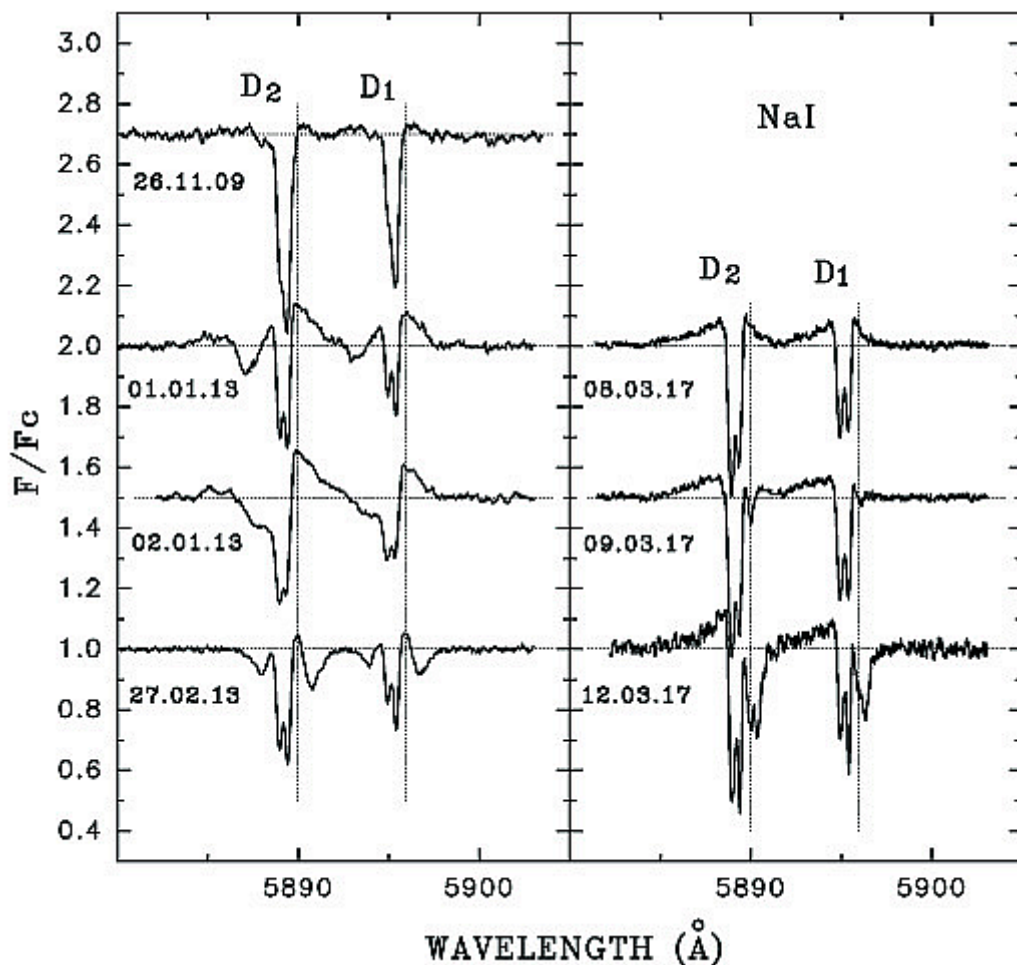


Рис. 3.4. Профили линий дублета DNaI в разные даты наблюдений. Пунктирными линиями показан уровень непрерывного спектра и лабораторные длины волн обеих компонент дублета D₁ и D₂. Шкала длин волн привязана к звезде.

Во все последующие сезоны наблюдалось уже несколько подобных линий. Среди них всегда присутствовала пара линий с примерно постоянными скоростями около -30 и -50 км/с. В январе 2013 г. появилась третья голубая компонента, которая за одни сутки сместилась по лучевой скорости с -145 до -115 км/с. В конце февраля она тоже была видна на скорости -105 км/с, но в эту же дату 27 февраля появилась и четвертая, уже красная компонента на скорости $+45$ км/с (рис.3.4, левая часть).

Новые дополнительные компоненты, кроме двух постоянных на -30 и -50 км/с, наблюдались уже в красной части профилей линий дублета (март 2017, рис. 3.4, правая часть).

Следует отметить, что все перечисленные узкие абсорбционные линии дублета натрия были четко видны на профилях его обеих компонент D_1 и D_2 , и их измеренные скорости на профилях каждой из них совпадали в пределах не хуже ± 1 км/с. Судя по отношению интенсивностей абсорбционных линий на профилях всех компонент, линии не являются насыщенными.

Поскольку временной масштаб переменности профилей дублета натрия составлял порядка суток, было трудно обнаружить по нашему недостаточно непрерывному и плотному наблюдательному ряду какие-либо закономерности в появлении и исчезновении локальных компонент профилей всех линий.

Но нам удалось наблюдать некоторые эпизоды, когда изменения всех исследуемых линий носили более глобальный характер (см. ниже, в секторе 3.4).

3.3.4. Линия $\text{HeI } 5876$.

Линия нейтрального гелия на $\lambda 5876$ демонстрирует очень быструю переменность. На временном масштабе $\sim$ сутки не удастся получить непрерывный ряд спектральных данных, детально описывающий физические явления, определяющие изменения этой линии. Основные типы ее профилей показаны на рис. 3.5. Все они имеют околосветное происхождение, атмосферный компонент линии у звезд подобного спектрального класса крайне слаб. Часто наблюдается

двухкомпонентный профиль с абсорбцией в центральной и красной части и эмиссией в голубой части профиля. О таком типе профиля HeI 5876, характерного для Ae/Be звезд Хербига (и, в частности, для HD37806), говорилось еще в работе Бёма и Каталы [95] в 90-х годах прошлого столетия. Считается, что это профиль типа обратного PСуг, образующийся при аккреции газа на звезду. На рис.3.5 видно, что эмиссия в синей части профиля может менять свою интенсивность от даты к дате, а иногда и совсем исчезнуть (ноябрь 2016 гг.). А 3 января 2012 г. и голубая и красная части профиля наблюдались в эмиссии, образуя двойной эмиссионный профиль.

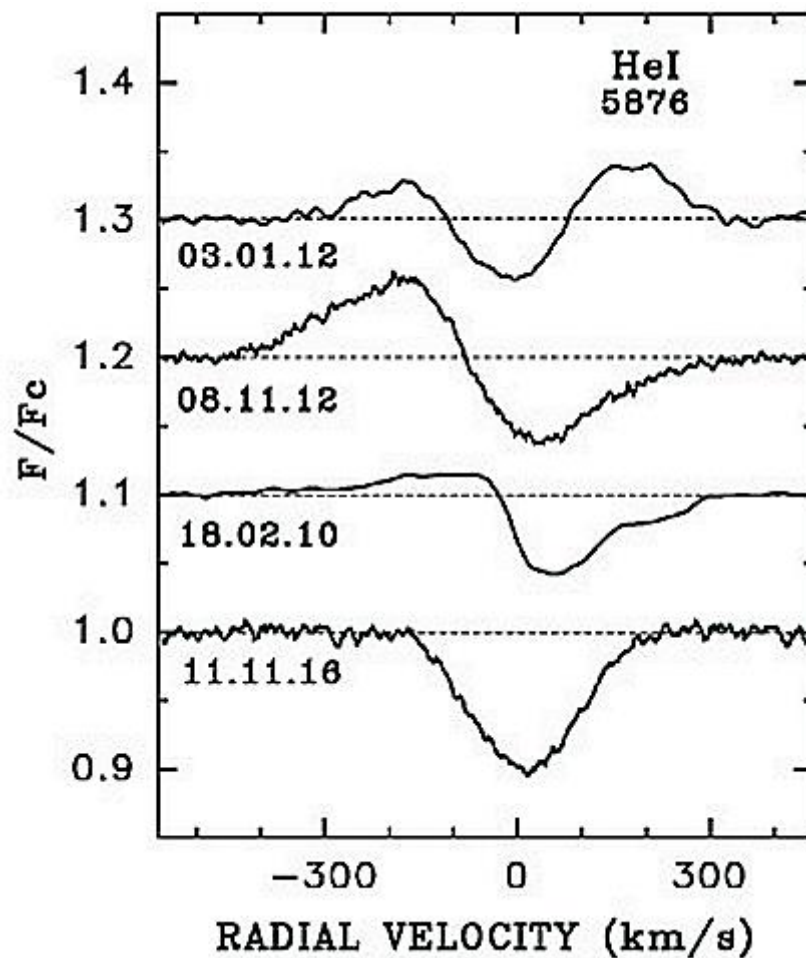


Рис. 3.5. Различные типы профилей линии HeI 5876, наблюдавшиеся в спектре HD37806. Штриховой линией показан уровень непрерывного спектра. Шкала лучевых скоростей и остальные обозначения те же, что и на предыдущих рисунках.

3.4. Особенности переменности спектральных линий на временном масштабе от дней до месяцев.

3.4.1. Изменения отношения V/R профиля линии $H\alpha$.

Трансформация типа профиля линии $H\alpha$ из двойного эмиссионного в PCyг III и обратно, обсуждавшаяся в предыдущем разделе, может быть количественно проиллюстрирована изменением отношения интенсивностей голубого (фиолетового) и красного эмиссионных пиков V/R , показанным на рис.3.6. Можно условно определить границу, при переходе через которую профиль меняет тип: если V/R меньше 0.5, то профиль считается типа PCyг III, а при $V/R > 0.5$ – двойным эмиссионным. На рисунке виден слабый тренд понижения V/R с 2009 по 2016 годы и сильный локальный всплеск в 2017 - 2018 гг., когда голубой и красный эмиссионный пик стали сравнимыми и даже одинаковыми по интенсивности, а в некоторые ночи голубой пик был даже интенсивнее. При этом, помимо медленных изменений V/R , наблюдалась и быстрая переменность этой величины от ночи к ночи.

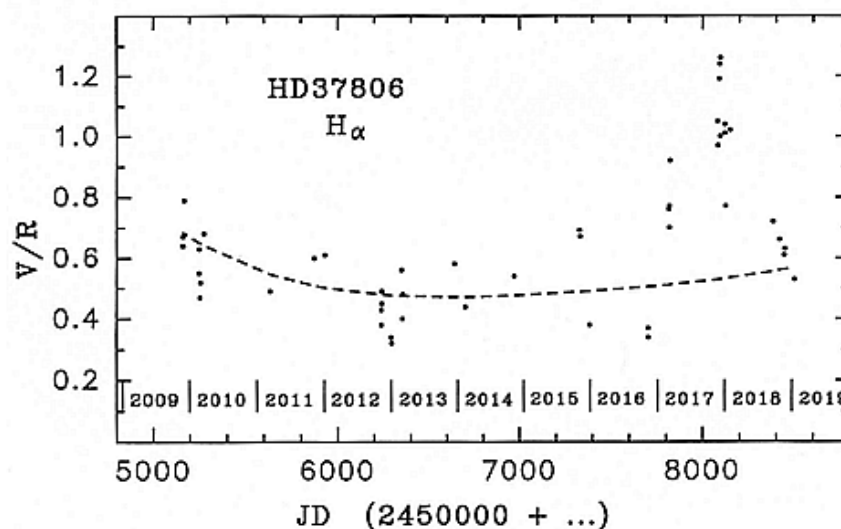


Рис. 3.6. Характер изменения отношения интенсивностей голубого (V) и красного (R) эмиссионных пиков профиля $H\alpha$, наблюдавшегося в спектре HD37806 с 2009 по 2019 гг.

3.4.2. Изменения тонкой структуры голубых эмиссионных профилей линии $H\alpha$ в даты, когда профиль имел РСуд III тип.

Это явление мы рассмотрим на примере переменности $H\alpha$ профиля, наблюдавшейся в течение 4-х дат с 7 по 11 ноября 2012 г. Эти изменения профиля показаны на рис.3.7.

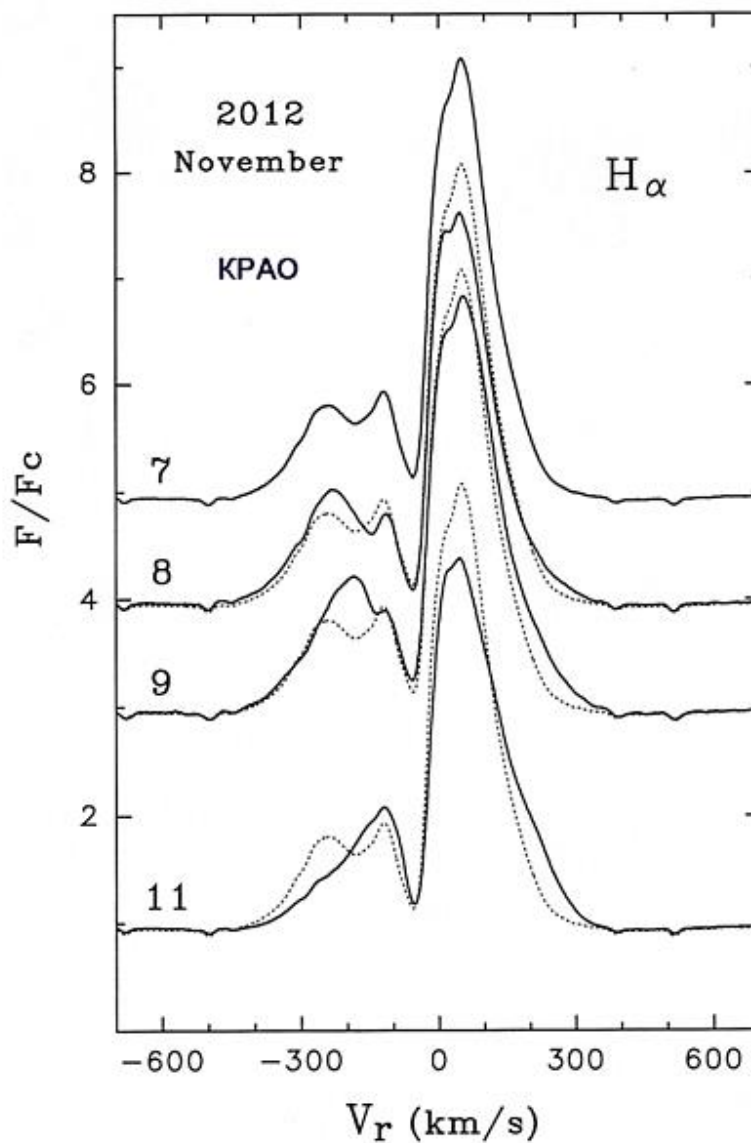


Рис. 3.7. Нормированные профили $H\alpha$ в спектре HD37806, полученные в ночи 7/8, 8/9, 9/10 и 11/12 ноября 2012 г. На рисунке указаны первые даты для каждой ночи. Пунктирной линией для сравнения показан профиль, наблюдавшийся в первую дату. Шкала лучевых скоростей дана в системе отсчета звезды.

Для увеличения отношения сигнал/шум все профили на рис.3.7 были сглажены с окном в 15 пикселей ($0.50 \text{ \AA}$). Такая ширина окна оказывалась существенно уже спектральных локальных деталей, смещение которых анализируется в этом разделе, процедура сглаживания не могла повлиять на результаты анализа. Как видно на рисунке, переменность от ночи к ночи наблюдалась во всех частях профиля от его голубого края до красного. Практически неизменной оставалась только центральная абсорбция с лучевой скоростью около -55 км/с . Наиболее примечательные изменения происходили в области голубого эмиссионного максимума. Он демонстрировал тонкую структуру, проявляющуюся в виде мелкой абсорбционной детали, накладывающейся в первую ночь наблюдений на самую вершину этой эмиссионной компоненты ($V_{\Gamma} = -175 \text{ км/с}$). Эта деталь изменяла от ночи к ночи свою глубину и лучевую скорость, становясь со временем все мельче и смещаясь в сторону нулевой лучевой скорости. В ночь 8/9 ноября она располагалась уже на $V_{\Gamma} = -150 \text{ км/с}$, а в следующую ночь 9/10 ноября – на $V_{\Gamma} = -135 \text{ км/с}$. В последнюю ночь 11/12 ноября она исчезла совсем, а сама голубая эмиссионная компонента стала существенно уже, ее голубое крыло понизилось в интенсивности. Интерпретация такой спектральной переменности, как и других явлений, обнаруженных в ходе выполнения нашей работы, будет предложена в рамках дискуссии в последующем разделе 3.6.

3.4.3. Эпизоды появления признаков аккреции на профилях спектральных линий в марте 2017 г.

Как уже отмечалось, величина $V/R(\text{H}\alpha)$ показывает два основных типа переменности. Это быстрые изменения от суток к суткам, имеющие сравнительно небольшую амплитуду, и более глобальную переменность на временном масштабе $\sim$ месяцы. Последний тип переменности можно представить, как плавный мало заметный тренд от 2009 до 2019 года, резкое увеличение, начавшееся весной 2017 г. и достигшее максимума ($V/R \geq 1$) осенью 2017 г. –

весной 2018 г, и пошедшее на спад к осени 2018 г. (рис. 3.6). Предполагая, что появление подобного всплеска V/R может отражать какие-то глобальные структурные изменения в оболочке, мы попытались провести сравнительный анализ особенности поведения линий $\text{HeI } 5876$, $\text{H}\beta$, $\text{FeII } 4923$ и DNaI на временном масштабе от ночи к ночи в разные фазы всплеска $V/R(\text{H}\alpha)$.

Наш выбор пал на 3 сезона, когда наблюдения проводились в течение нескольких ночей подряд:

а) 11 и 12 ноября 2016 г., время наименьших значений V/R ($0.34 - 0.37$), когда профиль $\text{H}\alpha$ имел тип PCyg III ;

б) 5 ночей с 6 по 12 марта 2017 г., когда величина V/R была уже на подъеме ($0.70 - 0.92$) и

в) 4 ночи с 3 по 9 декабря 2017 г., когда отношение V/R было на максимуме ($1.00 - 1.26$).

В ноябре 2016 г. единственной необычной особенностью профилей спектральных линий был PCygIII -профиль линии $\text{H}\beta$, который таким не наблюдался больше ни в одну дату (рис.3.8).

В марте 2017 г. профили всех спектральных линий кардинально изменились. У линий $\text{H}\beta$ и DNaI оставалась неизменной центральная абсорбция на -50 км/с, такая же, как у $\text{H}\alpha$. Но, кроме того, 6 и 7 марта у них наблюдались красные абсорбционные компоненты, указывающие на присутствие аккреции на звезду (рис.3.8 и 3.9). Признаки аккреции в эти даты были и на профиле линии $\text{HeI } 5876$. Следует отметить, что у линий $\text{H}\beta$ и HeI широкая красная абсорбционная компонента простиралась в максимуме почти до $+400$ км/с. Видимые уже 6 ноября, признаки аккреции достигли максимального развития в следующую ночь 7 марта, 9 марта они практически исчезли у линий HeI и $\text{H}\beta$. Можно оценить время жизни этого явления – оно не менее 3-х суток, так как начало эпизода до 6 марта мы не застали.

Более детально аккреционный эпизод в марте 2017 г. проиллюстрирован на рис.3.10 на примере линий $\text{FeII } 4923$ и NaI D_2 , где признаки аккреции прослеживались до 12 марта, когда в HeI и $\text{H}\beta$ они уже не были видны. Судя по

эволюции профиля натрия D_2 , первый аккреционный эпизод закончился, действительно 8 марта, но 9 марта начался новый, который был хорошо виден только в линиях D_2 и $FeII$ до 12 марта, когда признаки аккреции стали еще заметнее. При этом у соответствующих им красных абсорбций просматривалась многокомпонентная структура, которая никогда не была ранее заметна в линиях $H\beta$ и HeI . Протяженность этой красной абсорбционной компоненты достигала у

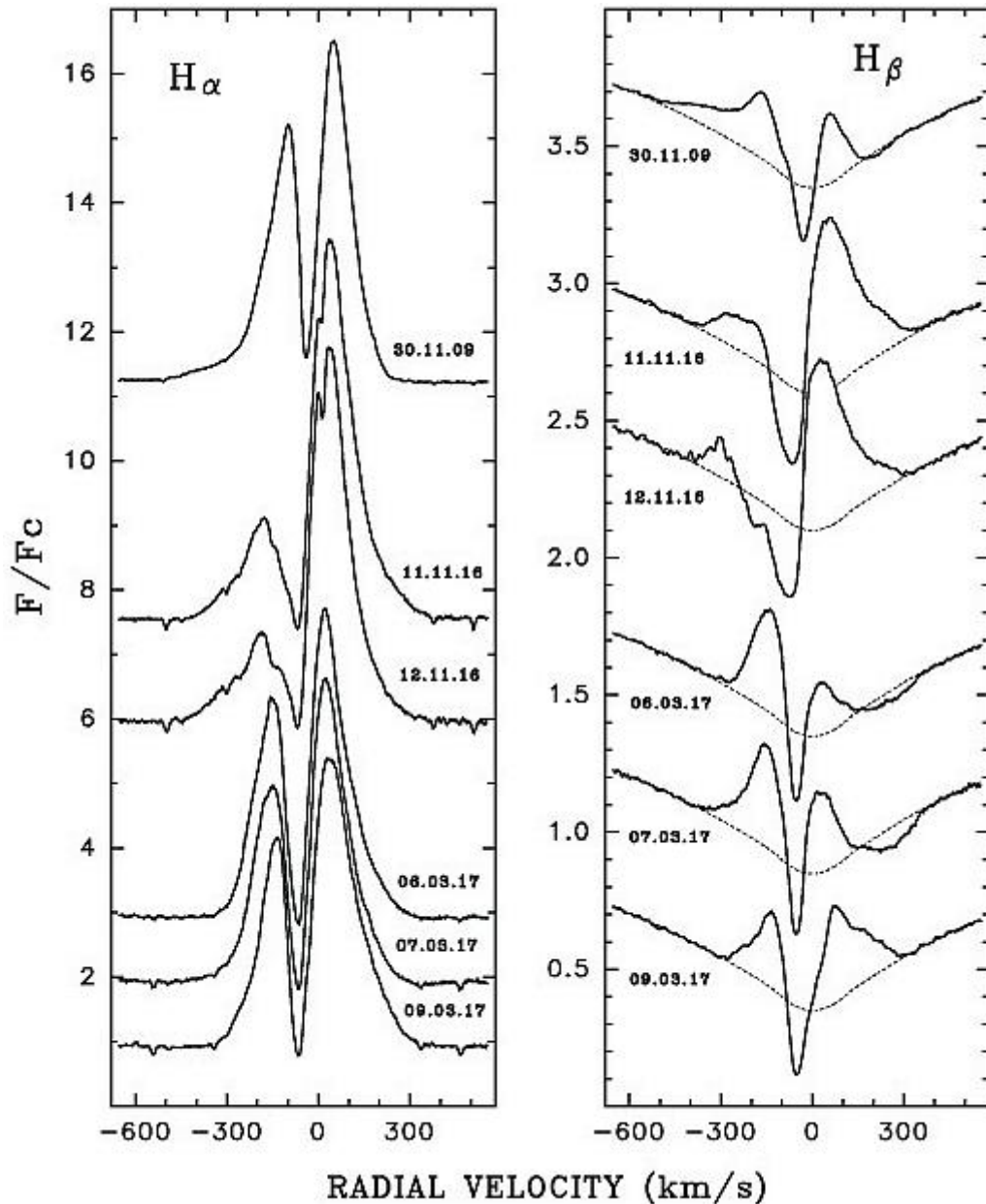


Рис. 3.8. Нормированные профили линий $H\alpha$ и $H\beta$ в спектре HD37806 в ноябре 2016 г., когда профили имели вид PCyг III и в марте 2017 г. во время первого аккреционного эпизода (см. текст). Все обозначение те же, что и на предыдущих рисунках.

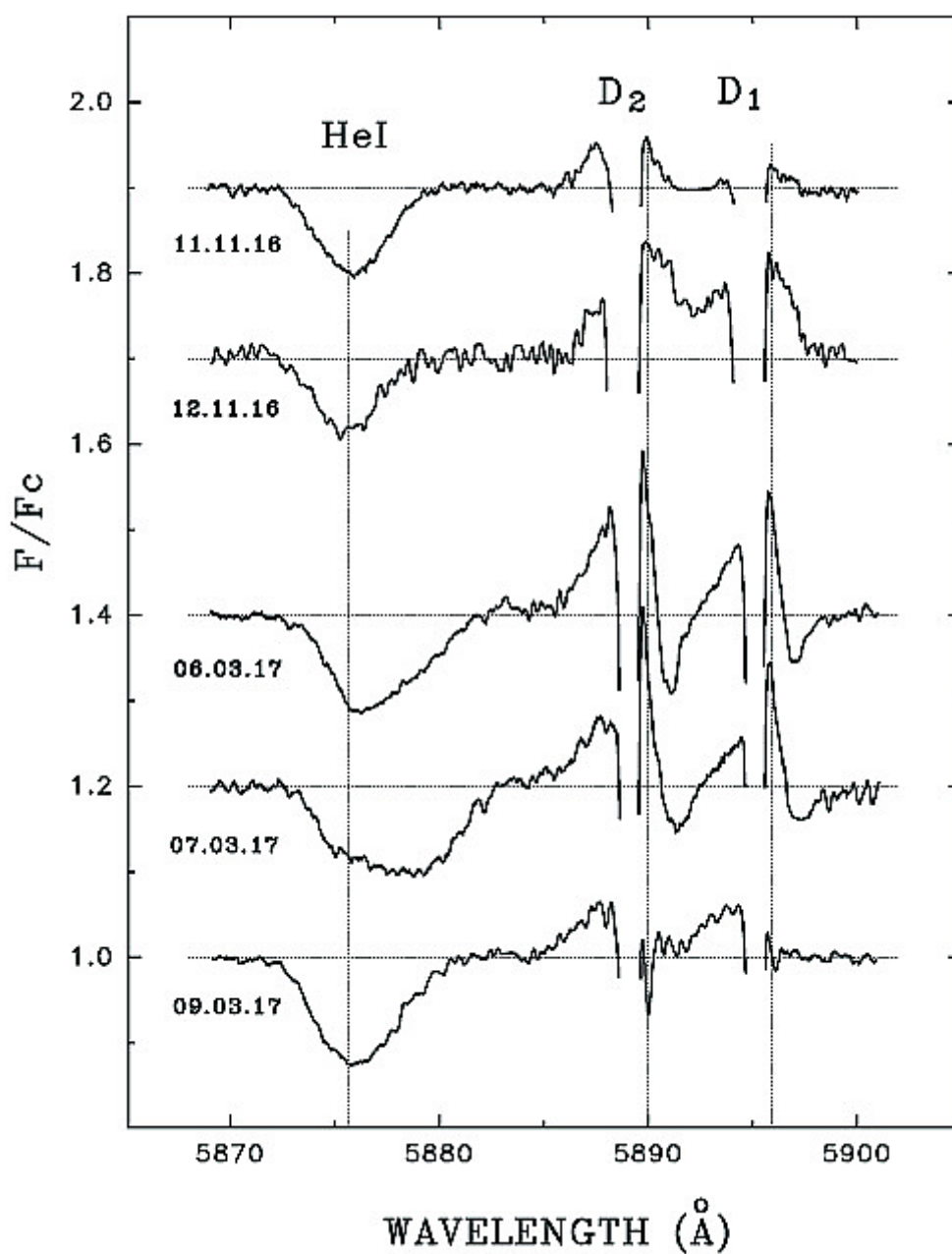


Рис. 3.9. То же, что рис.3.8, но для линий HeI 5876 и DNaI.

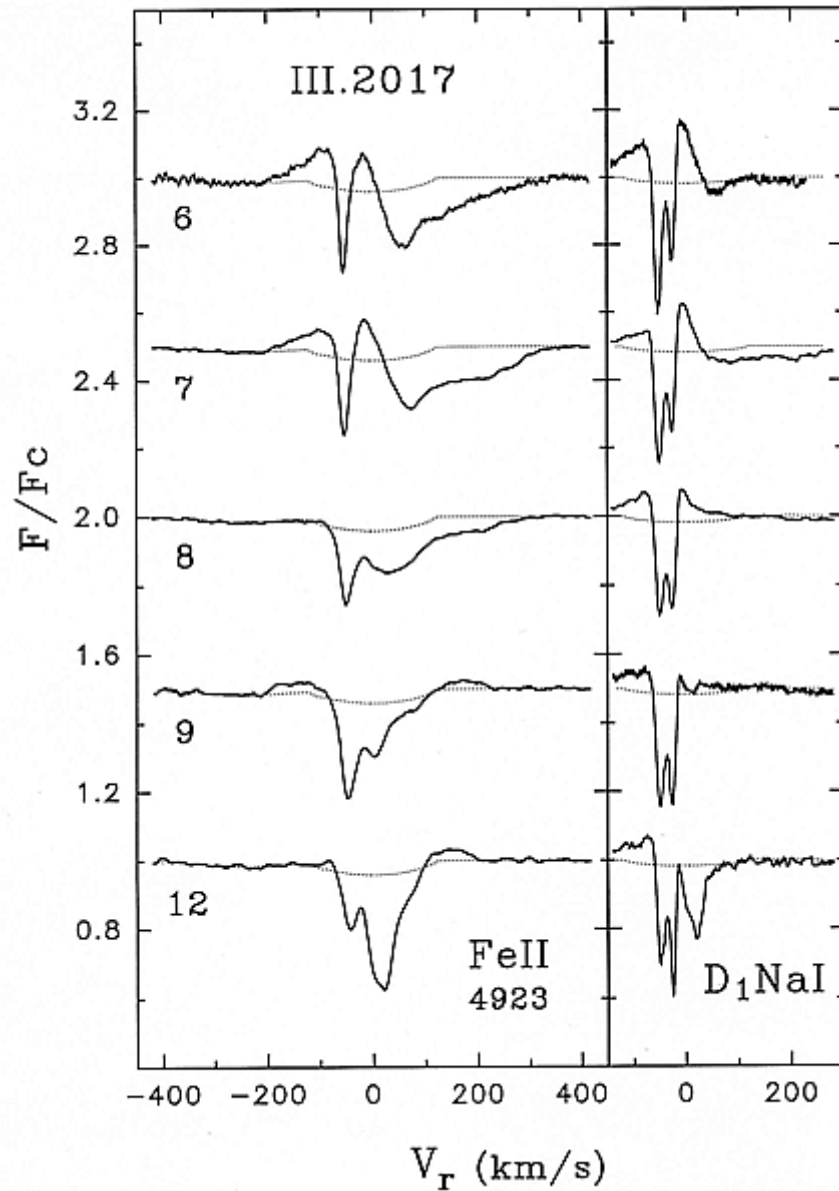


Рис. 3.10. Профили линий FeI 4923 и NaI D₁ во время обоих аккреционных эпизодов с 6 по 12 марта 2017 г.

линии FeII тех же величин, что и у H β и HeI, а именно $\sim +350$ км/с, у линий же D натрия она не была шире, чем до $+250$ км/с.

Анализ поведения всех спектральных линий позволяет предположить, что:

а) время жизни двух аккреционных эпизодов, наблюдавшихся в марте 2017 г., составляет несколько дней, это говорит в пользу того, что природа этого явления связана не с вращательной модуляцией профилей азимутальными неоднородностями в оболочке, а с реальным изменением темпа аккреции, и

б) неоднородные аккреционные потоки появлялись сначала в дальней оболочке, где они диагностируются в линиях натрия и ионизованного железа, а потом приближались к поверхности звезды и становились заметными и в линиях гелия и H β .

3.4.4. Спектральная переменность HD37806 в максимуме V/R(H α) в декабре 2017 г.

В декабре 2017 г. профили линии H α демонстрировали два эмиссионных пика с более интенсивным голубым компонентом. Это была как раз середина периода повышенного отношения V/R(H α), продолжавшегося несколько месяцев (см. рис. 3.6). Предположив, что этот факт отражает какую-то необычную особенность глобальной структуры оболочки, мы исследовали поведение остальных спектральных линий, наблюдавшихся в этот период в течение 4-х ночей с 3 по 9 декабря 2017 г.

Рис. 3.11 иллюстрирует изменения профилей линий HeI 5876, H β , FeII 4923 и NaI D₁, происходивших в эти даты. На нем видно, как появляются и усиливаются от даты к дате признаки аккреции. 3 декабря таким признаком была только увеличенная протяженность красного абсорбционного крыла линии натрия D₁. У других линий подобные явления не наблюдались. Уширение красного абсорбционного крыла линии D₁ увеличилось 5 декабря, а 8 декабря у этой линии появилась отдельная абсорбционная красная компонента, а крыло распалось на несколько локальных абсорбций. И, наконец, 9 декабря красная абсорбционная компонента D₁ достигло максимальной ширины +250 км, при этом, локальные абсорбционные детали в красном крыле линии также присутствовали. В остальных линиях признаки аккреции в виде протяженной красной компоненты появились только в последнюю ночь 9 декабря. Протяженность этой компоненты достигала +400 км/с у линии HeI и H β , и +350 у линии железа. В остальных спектральных линиях были такие же, как и в другие периоды наблюдений. У всех линий наблюдалась мало изменяющаяся центральная

абсорбция на -45 км/с. У линии натрия к ней добавлялась также неизменная для этой линии абсорбция на -27 км/с. Состав других локальных деталей, изменяющихся от суток к суткам, был более многообразный. Изменялось от даты к дате и отношение V/R для эмиссионных компонент линий $H\beta$, железа и натрия, иногда эмиссия в этих линиях совсем пропадала.

Анализ изменения спектральных линий в декабре 2017 г. подтвердил сделанное нами ранее предположение, что появляющиеся признаки аккреции отражают реальное изменения темпа аккреции в оболочке HD37806, которая начинается в ее периферийных частях и уже потом достигает ее внутренних областей.

Обращает на себя внимание, что признаки аккреции, наблюдаемые в спектральных линиях в течение нескольких дней, появлялись только в окрестностях «всплеска» отношения $V/R(H\alpha)$, когда профиль $H\alpha$ выглядел, как двойной эмиссионный с близкими по интенсивности голубым (фиолетовым) и красным эмиссионными пиками.

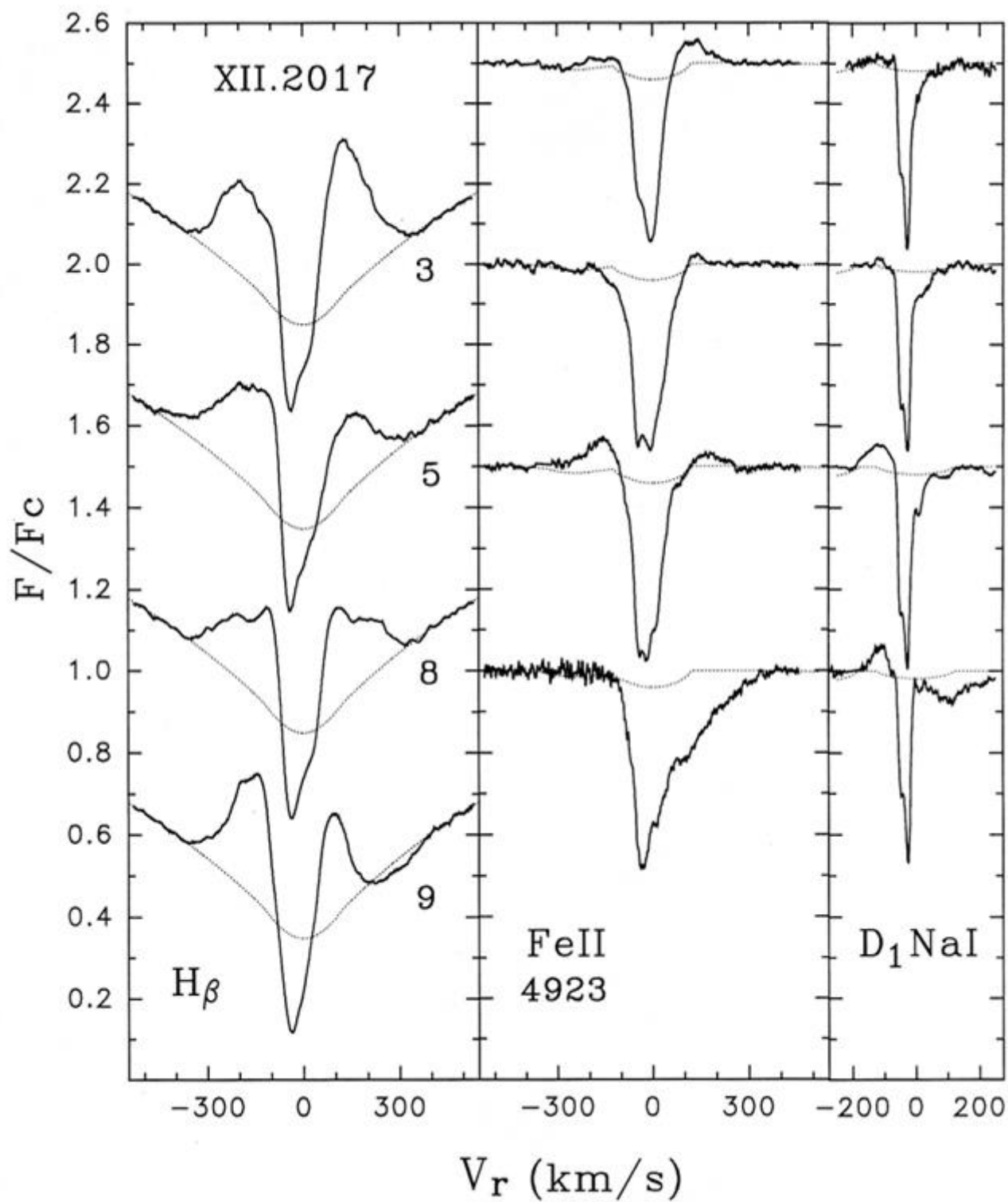


Рис. 3. 11. Изменение профилей различных спектральных линий HD37806 с 3 по 12 декабря 2017 г., когда отношение $V/R(H\alpha)$ было наибольшим.

3.5. Обсуждение результатов наблюдений

3.5.1. Вклад диска и ветра в формирование профилей линий и в медленные изменения отношения $V/R(H\alpha)$

Скорость вращения аккреционного диска на его внутренней границе у поверхности звезды (другими словами, первая космическая скорость) определяется отношением массы звезды M к ее радиусу R . У звезд Хербига спектрального класса $A0e$, приближающихся в своей эволюции к Главной последовательности, это отношение близко к солнечному. И, соответственно, их первая космическая скорость будет такая же, как у Солнца ~ 440 км/с. Но HD37806 – очень молодой объект, его радиус больше, чем у других более проэволюционировавших $A0e$ звезд Хербига, и у него отношение M/R с учетом неточностей определения будет от 0.67 до 0.93 в долях от солнечного (см. сектор 3.1). По известной формуле расчета первой космической скорости и, принимая во внимание наклон оси вращения объекта к лучу зрения $i \sim 40^\circ$ [20, 105], легко получить, что аккреционный диск может давать вклад в наблюдаемые профили линий только в пределах лучевых скоростей ± 240 -280 км/с. Между тем, наблюдаемые ширины эмиссионных профилей линий в спектре HD37806 составляют: ± 450 км/с – для $H\alpha$, ± 350 -400 км/с – для $H\beta$, ± 250 -300 км/с – для $FeII$ 4923 и ± 150 -200 км/с для линий дублета $DNaI$. Из этого следует, что, по крайней мере, для $H\alpha$ и $H\beta$ роль ветра в формировании профиля линии должна быть велика. Если природа ветра связана с магнитной центрифугой, то его скорость, быстро увеличивающаяся с удалением от звезды в области разгона, должна затем уменьшаться с расстоянием по закону Кеплера, когда механизм ускорения центрифугой станет уже не эффективным. О таком законе скорости свидетельствует, в частности, наблюдаемый сдвиг эмиссионного профиля $H\alpha$ в голубую сторону, с бисекторной скоростью -26 ± 16 км/с на уровне интенсивности 1.1 F_c . Этот сдвиг возникает при экранировании звездным диском

наиболее высокоскоростной части удаляющегося ветра, что приводит к депрессии эмиссионного красного крыла. В этом случае наблюдаемый тип профиля линии $H\alpha$ и его медленные изменения на шкале времени $\tau \sim$ месяцы могут быть объяснены в рамках феноменологической модели с изменяющимся широтным распределением истекающего газа, пересекающего луч зрения. Если внешняя граница зоны ветра увеличивается по широте при удалении от звезды («flared geometry»), то могут возникнуть 3 ситуации. В первом случае (А) зона ветра полностью закрывает звезду от наблюдателя, и он видит классический профиль типа PCyg II. Во втором случае (В) лучом зрения будет пересекаться только внешняя часть зоны ветра, а его внутренняя часть, где скорость истечения максимальна, экранировать звезду не будет. Тогда наблюдатель увидит профиль типа PCyg III с дополнительным голубым эмиссионным пиком. И наконец, если зона ветра так сожмется по широте, что луч зрения будет пересекать только самую удаленную часть ветра, где скорость истечения уже мала – будет наблюдаться двойной эмиссионный профиль с центральной абсорбцией, имеющей небольшую отрицательную скорость и отношением $V/R < 1$ (случай С). Именно такая абсорбция наблюдалась на всех профилях всех исследуемых линий, разброс значений ее лучевой скорости был сравнительно невелик: -47.2 ± 3.4 км/с ($H\alpha$), -45.7 ± 6.4 км/с ($H\beta$), -45.8 ± 6.1 км/с (FeII 4923), -48 ± 3.7 км/с (DNaI). Эта лучевая скорость увеличивалась по амплитуде до -55 - 60 км/с, у профилей $H\alpha$ и $H\beta$, когда они становились профилями типа PCyg III (ноябрь 2016 г.) и уменьшалась до -40 км/с, когда профили были двойными эмиссионными с близкими интенсивностями обоих пиков (декабрь 2017 г.). Эти изменения положения центральной абсорбции не наблюдались у профиля линии FeII 4923. Вероятно, область формирования этой линии охватывала только диск и самую примыкающую к нему часть зоны ветра, где плотность газа должна быть выше, чем в высокоширотном ветре. Таким образом, наблюдаемая переменность величины V/R ($H\alpha$) на временном масштабе $\sim$ месяцы может быть объяснена в рамках предположения о широтном перераспределении газа в зоне ветра. Такая

интерпретация уже не раз применялась при анализе переменности формы профилей линий у Ae/Be звезд Хербига

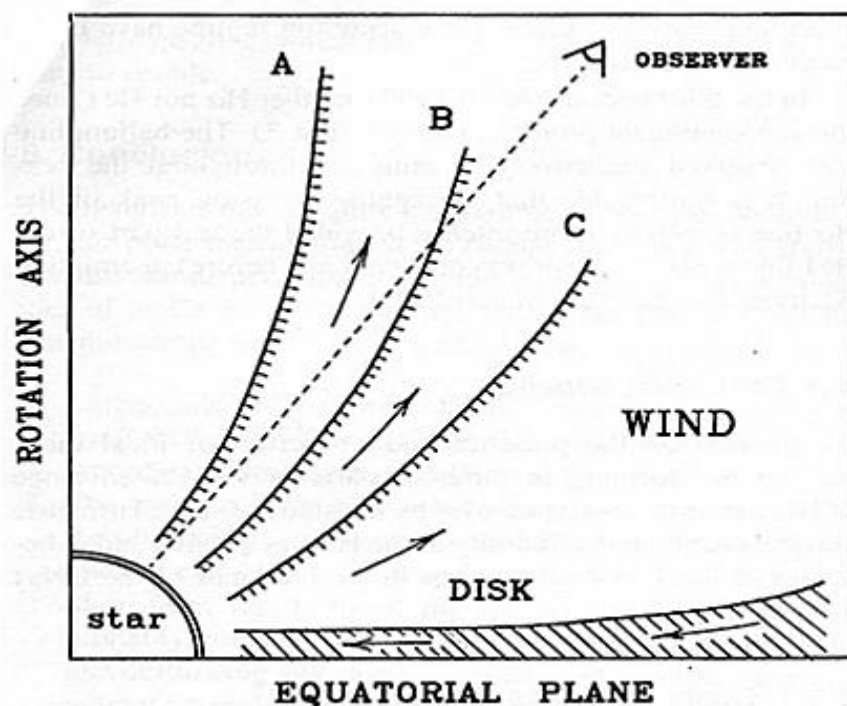
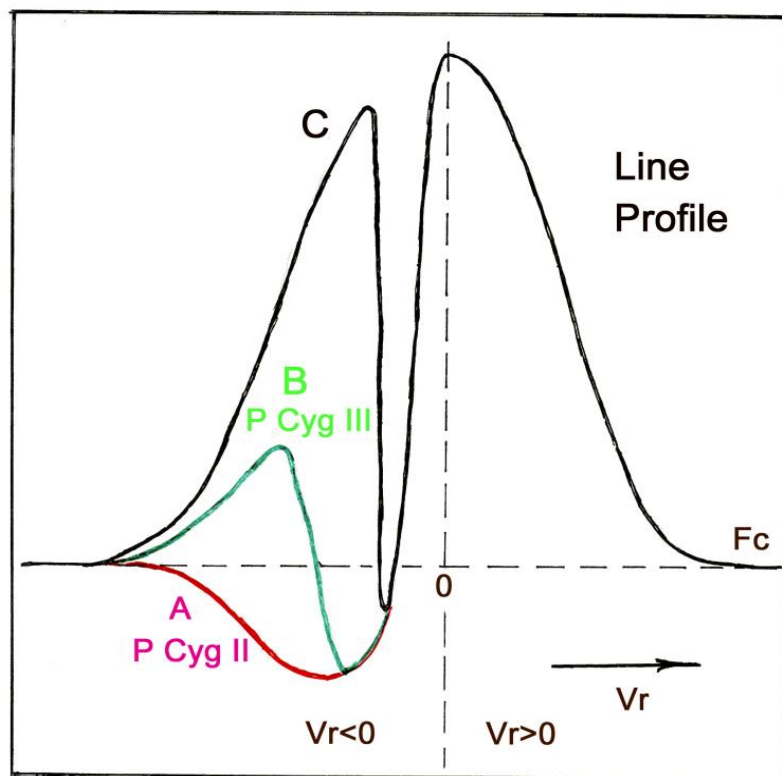


Рис. 3.12. Схематическая иллюстрация различных типов профилей линий, формирующихся в зоне ветра с различным распределением по широте (случаи А, В и С описаны в тексте).

(см., например, работу Курчакова и др. [111]). В литературе, (см. Бувье и др. [112]), есть упоминание, что изменения широтного распределения зоны ветра могут быть связаны с изменениями конфигурации магнитного поля в области его взаимодействия с диском в результате изменения темпа аккреции. Временной масштаб таких изменений может составлять от суток до лет.

Если центральная абсорбция на лучевой скорости около -50 км/с может быть связана с экранировкой звезды удаленными истекающими потоками в зоне ветра, перекрывающей луч зрения только в своей периферийной части, то обращает на себя внимание другая абсорбционная компонента на лучевой скорости $V_{\Gamma} = -25.6 \pm 1.6$ км/с. Она наблюдается только в линиях резонансного дублета натрия и ее величина стабильнее, чем у других абсорбционных компонент. Поэтому район ее образования может быть связан с межзвездными облаками на луче зрения,двигающимися от Солнца с меньшими скоростями, чем HD37806.

3.5.2. Переменность локальных абсорбционных деталей на профилях спектральных линий на временном масштабе порядка нескольких суток

Переменность от ночи к ночи наблюдалась у всех исследуемых линий в спектре HD37806. Она имеет вид локальных движущихся абсорбционных и эмиссионных деталей на профилях линий, быстрых изменений интенсивностей эмиссионных пиков, а то и полного исчезновения эмиссии. Если характерное время подобной переменности меньше суток, то по наблюдениям от ночи к ночи не удастся проследить характер переменности.

Но иногда изменения происходят на более медленном временном масштабе — в несколько суток. Примером может быть изменение формы и лучевой скорости локальной абсорбции, накладывающейся на вторичный голубой эмиссионный профиль Na , имеющий тип $\text{P}_{\text{Cug III}}$, с 7 по 12 ноября 2012 г. (см. сектор 3.4.2 и рис.3.7). За трое суток деталь сместилась по шкале лучевых скоростей с -175 км/с

до -135 км/с, а потом исчезла совсем. Это явление можно объяснить вращением долгоживущей струи на границе зоны ветра. Если струя сформировалась в диске на некотором расстоянии от звезды, то угловая скорость вращения места ее образования (основания струи) и, следовательно, самой струи, должна быть меньше, чем у самой звезды из-за кеплеровского закона вращения в диске. Поэтому она может оставаться видимой в течение времени, превышающего период вращения звезды, то есть, в продолжении нескольких дней. Можно предположить, что струя пересекает луч зрения в той своей части, где разгон вещества уже сменился его замедлением. В этой области вращение истекающего вещества уже не твердотельное, и форма струи из-за уменьшения угловой скорости вращения при удалении от звезды приобретает изогнутый вид в сторону, противоположную направлению вращения. Периферийная часть струи при ее вращении будет отставать по фазе от ее основания. Поэтому наблюдатель может видеть в первую дату часть струи, близкую к основанию, где скорость ветра еще достаточно велика, а в последующие даты – все более удаленные области и меньшей скоростью истечения. И, наконец, через несколько дней подобная струя может просто исчезнуть из поля зрения, либо диссипировать, либо переместиться в область, невидимую для наблюдателя. Такая интерпретация хорошо объясняет наблюдавшееся явление и требует только два предположения:

а) ветер должен быть дисковый с областью формирования на некотором расстоянии от поверхности звезды и

б) скорость истечения должна быть с замедлением. Оба предположения соответствуют существующим представлениям о природе ветра у Ae/Be звезд Хербига.

Природа более быстрых изменений параметров линий в спектрах Ae/Be звезд Хербига с характерным временем порядка одних суток, что сравнимо с ожидаемым периодом вращения HD37806 ($P \sim 1.3^d$), уже обсуждалась в ряде работ. Она связывалась с существованием в ветре локальных азимутальных неоднородностей, вращающихся вместе со звездой. В гидродинамических моделях Гринина и др., Романовой и др. и Шульмана возникновение струйной

структуры ветра вблизи поверхности звезды объяснялось, как результат взаимодействия внутреннего аккреционного диска с гипотетической магнитосферой звезды при условии, что она глубоко проникает в диск и имеет угловой момент вращения больше, чем вещество в кеплеровском диске (режим пропеллера). Эпизодические появления подобных деталей в области не только отрицательных, но и положительных скоростей может быть связано с азимутальной неоднородностью аккреционных потоков внутри магнитосферы.

Все подобные интерпретации, так или иначе, сводятся к предположению о магнитосферном характере аккреции у исследуемого объекта. Однако, прямого доказательства наличия магнитосферы у HD37806, такого, как, например, периодичность изменения параметров линий, формирующихся в области взаимодействия диска со звездой, пока не получено. Хотя существует немало косвенных свидетельств, о которых речь пойдет дальше.

3.5.3. Эпизоды появления признаков аккреции на профилях спектральных линий

За весь период наших наблюдений мы наблюдали 3 эпизода, когда четкие признаки аккреции появлялись сразу в нескольких линиях: HeI 5876, H β , FeII 4923 и DNaI. Два из них наблюдались в марте 2017 г. (см. сектор 3.4.3) и один – в декабре 2017 г. (сектор 3.4.4). Были сделаны выводы, что:

1) Продолжительность каждого эпизода должна составлять несколько дней, что больше, чем время ожидаемого периода вращения звезды (не более 1.5 суток). Поэтому они не могли быть следствием модуляции профилей при вращении азимутально-неоднородного аккреционного потока внутри магнитосферы.

2) Эти эпизоды должны быть результатом процессов, захватывающих значительный объем оболочки, перекрывающий районы формирования таких линий, как HeI 5876 и DNaI. При этом само явление начиналось в более удаленных областях оболочки, диагностируемых только в линиях DNaI, а потом распространялось во внутренние районы, достигая поверхности звезды.

3). В момент максимального развития аккреционного эпизода скорости красных абсорбционных компонент линий HeI 5876, H β и FeII 4923 достигали +370-400 км/с, что является свидетельством того, что аккреция проходила через магнитосферу.

4) По-видимому, природа каждого эпизода связана с локальными изменениями темпа аккреции на звезду. Интересно также отметить, что наблюдались подобные эпизоды только в то время, когда линия H α имела двойной эмиссионный профиль, и ни разу, когда профиль был типа PCyg III. Но для более определенного заключения нам не хватает статистических данных.

3.6. Свидетельства наличия магнитосферы у HD37806

Как уже отмечалось, прямых доказательств магнитосферного характера аккреции у HD37806 пока не получено. Не была обнаружена циклическая переменность параметров спектральных линий, формирующихся в области взаимодействия аккреционного диска со звездой. Не удалось измерить и магнитное поле объекта прямым спектрополяриметрическим методом, слишком большая величина $V \sin i = 120$ км/с не позволяет регистрировать тонкое зеемановское расщепление. Однако можно отметить несколько свидетельств того, что магнитосфера у HD37806 все же существует.

1. В даты максимального развития признаков аккреции у спектральных линий, красная абсорбционная компонента их профилей имела аномально большую протяженность: в марте 2017 г. у линии H β ее граница была на лучевой скорости +375 км/с, у линии FeII – на +385 км/с, а у линии HeI 5876 – на +420 км/с; в декабре эти же значения были, соответственно, +400, +380 и +380 км/с (см. разделы 2.4.3 и 2.4.4). Такую высокую скорость аккреционный поток может развить только в режиме свободного падения внутри магнитосферы.

2. При интерпретации распределения излучения в линии Br γ по околозвездному диску HD37806 в рамках модели дискового ветра (Креплин и др. [105]), авторами была получена внутренняя граница ветра на расстоянии около

2 радиусов звезды. Естественно предположить, что это значение соответствует альвеновскому радиусу, то есть границе гипотетической магнитосферы.

3. Наличие магнитосферы необходимо для интерпретации узких ветровых компонент спектральных линий в рамках предположения об эффекте магнитного пропеллера на внутренней границе диска (Гринин и др. [45], Шульман [113]).

4. В работе Русинского и др. [99], где представлены результаты высокоточной фотометрии HD37806 со спутника MOST, была обнаружена быстрая переменность блеска звезды с периодом около 1.5 суток. Эта величина соответствует ожидаемому периоду вращения звезды. Такая переменность может быть результатом вращательной модуляции блеска горячим пятном на поверхности звезды в месте падения аккреционного потока, появление которого предсказывает магнитосферный сценарий.

6. Согласно известной приближенной формуле (см. Ванг [114]), можно оценить ожидаемый радиус магнитосферы R_m по величине магнитного поля B , темпа аккреции dM_{acc}/dt , массе звезды M и ее радиусу R :

$$R_m = [(B^4 R^{12}) / (2GM (dM_{acc}/dt)^2)]^{1/7} \quad (6)$$

Наиболее точная оценка темпа аккреции HD37806 (по величине эмиссионного бальмеровского скачка) была приведена в работе Донехью и Бриттэна [115] – $1.4 \cdot 10^{-7} M_{sun}/год$. Хотя магнитное поле у этого объекта измерить и не удалось из-за высокой проекционной скорости вращения, можно с большой вероятностью сказать, что оно у него есть, как и у большинства Ae звезд Хербига и составляет порядка 10^2 Гс. При величине поля на поверхности звезды $B = 200 - 300$ Гс, можно получить оценку радиуса гипотетической магнитосферы в долях радиуса звезды: $R_m/R = 1.7 - 2.2$. Эта величина находится в согласии с оценкой из [105].

Все приведенные выше аргументы позволяют считать, что предположение о существовании магнитосферы у HD37806 вполне реалистичным.

3.7. Выводы из главы 3

В результате проведения многолетнего спектроскопического мониторинга Ae/Be звезды Хербига HD37806 с 2009 по 2019 гг. на двух обсерваториях (Крымская АО и обсерватория OAN SPM в Мексике) было получено 277 спектров высокого разрешения (R около 20000) этого объекта в области спектральных линий $H\alpha$, $H\beta$, HeI 5876, FeII 4923 и дублета DNaI. Анализ полученных данных показал, что:

1. Все линии показывают переменность в широком диапазоне временных масштабов от месяцев и лет до часов и дней. Самые медленные изменения ($\tau \sim$ месяцы) демонстрирует тип профиля линии $H\alpha$, который в отдельные даты выглядит как PCyг III, а в другое время – как двойной эмиссионный, с голубым пиком менее интенсивным, чем красный ($V/R < 1$). В один из периодов (с марта 2017 по январь 2018 г.) возникла обратная картина, интенсивнее стал уже голубой пик ($V/R > 1$). Прежде такое явление у HD37806 не наблюдалось.

Была предложена интерпретация этой переменности – широтное перераспределение истекающего газа в зоне ветра, которая становится шире по широте по мере удаления от звезды («flared geometry»), наклонена под углом к лучу зрения и пересекает его только в своей периферийной части.

2. Переменность профилей от ночи к ночи (на временной шкале $\tau \sim$ дни) наблюдалась у всех исследуемых линий. Ее традиционное объяснение – предположение об азимутальных неоднородностях, вращающихся в оболочке. В основном они возникают в ветре, причем, как в области его формирования возле поверхности звезды, так и на некотором расстоянии от нее (дисковый ветер).

3. Два раза (в марте и в декабре 2017 г.) наблюдались так называемые «аккреционные эпизоды», когда на профилях линий HeI 5876, $H\beta$, FeII 4923 и DNaI появлялись четкие признаки аккреции на звезду – широкие красные

абсорбционные компоненты, простирающиеся у первых трех линий во время наибольшего развития почти до $+400$ км/с. Характерное время этих эпизодов составляло несколько дней, поэтому они не могли быть следствием вращательной модуляции, так как звезда имеет ожидаемый период вращения около 1.5 суток. Мы предположили, что причиной подобных явлений были локальные увеличения темпа аккреции у HD37806. Обращает на себя внимание тот факт, что «аккреционные эпизоды» появлялись только в такие даты, когда профиль Na выглядел не как P Cyg III, а как двойной эмиссионный с достаточно высоким отношением V/R, то есть когда, по нашей интерпретации, зона ветра становилась наиболее узкой по широте. В литературе уже не раз говорилось о возможной связи темпа аккреции на звезду и геометрии зоны ветра, истекающего из района взаимодействия диска и магнитосферы (Бувье и др. [112]). Если конфигурация магнитного поля звезды имеет вид искаженного диполя, сжатого по экватору аккреционным потоком (см. рисунок 12 из работы Камензинда [29]), то степень «прижатия» зоны ветра к плоскости диска должна зависеть от степени давления диска на магнитную конфигурацию, то есть от темпа аккреции. Такой сценарий мог бы объяснить связь наблюдаемой геометрии зоны ветра и темпа аккреции на звезду.

4. И, наконец, в последнем разделе этой главы сделано обобщение всех имеющихся свидетельств существования магнитосферы у HD37806.

Заключение

К наиболее важным результатам нашего исследования трех избранных Ae/Be звезд Хербига можно отнести следующее:

1. На основании анализа прежних фотометрических данных и собственной фотометрической и спектроскопической программы исследования уникальной Be звезды Хербига HD52721, проведенной в 2009 – 2013 гг., было однозначно показано, что объект представляет собой затменную тесную двойную систему, состоящую из двух звезд класса В с близкими параметрами атмосферы и с орбитальным периодом $P = 1.610^d$.

2. На основе данных наших наблюдений обнаружены структурные особенности околозвездной среды HD52721, включающие:

а) наличие азимутальной неоднородности на внутренней газовой оболочке, сконцентрированной около менее яркого и массивного компонента и вращающейся с периодом, равным орбитальному периоду системы;

б) появление в отдельные даты локального плотного истечения из внешней оболочки системы в сторону самой системы, существование которого предсказывает теория;

в) было подтверждено появление дополнительных увеличений блеска на фазах фотометрического максимума, которые могут быть связаны с эффектом отражения в тесной двойной системе или с обменом масс между компонентами через внутреннюю точку Лагранжа.

3. За десять лет наблюдений был получен богатый спектроскопический материал (около 300 спектров высокого разрешения) для Ae/Be звезды Хербига HD37806, спектральные исследования которой проводились ранее только эпизодически.

4. На основе анализа полученных спектроскопических данных было установлено, что наблюдаемая переменность профилей различных линий в спектре HD37806 может быть связана с:

- а) широтным перераспределением газа в зоне ветра;
- б) с движением азимутальных неоднородностей истекающего вещества;
- в) эпизодическими усилениями темпа дисковой аккреции на звезду, которое может влиять на ширину зоны ветра по широте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Herbig G.H. The spectra of Be-and-Ae type stars associated with nebulosity // *Astrophysical Journal Supplement*. – 1960. – V. 4. – pp. 337-382.
2. Larson R.B. Numerical calculations of the dynamics of collapsing proto-stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1969. – V. 145. – Is 3. – pp. 271-295.
3. Stahler S.W., Shu F.H., Taam R.E. Evolution of protostars. I. – Global formulations and results // *Astrophysical Journal*. – 1980. – V 241. – pp. 637-654.
4. Palla F., Stahler S.W. The evolution of intermediate-mass protostars. I. Basic results // *Astrophysical Journal*. – 1991. – V. 375. – pp. 288-299.
5. Palla F., Stahler S.W. The birthline for intermediate-mass stars // *Astrophysical Journal Letters*. – 1990. – V. 360. – pp. L47-L50.
6. Palla F., Stahler S.W. The pre-main-sequence evolution of intermediate-mass stars // *Astrophysical Journal*. – 1993. – V. 418. – pp. 414-425.
7. Hayashi C. Stellar evolution in early phases of gravitational collapse // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 1961. – V. 13. – pp. 450-452.
8. Joy A.H. T Tauri variable stars // *Astrophysical Journal*. – 1945. – V. 102. – pp. 168-195.
9. Finkenzeller U., Mundt R. The Herbig Ae/Be stars associated with nebulosity // *Astronomy and Astrophysics. Suppl. Ser.* – 1984. – V. 55. – pp. 109-141.
10. Thé P.S., de Winter D., Perez M.R. A new catalogue of members and candidate members of the Herbig Ae/Be (HAEBE) stellar group // *Astronomy and Astrophysics, Suppl. Ser.* – 1994. – V. 104. – pp. 315-339.
11. Вошинников Н.В., Гринин В.П., Киселев Н.Н., Миникулов Н.Х. Пыль вокруг молодых звезд. Наблюдения поляризации UX Ori в глубоких минимумах // *Астрофизика*. – 1988. – Т. 28. – Вып. 2. – с. 311-327.
12. Гринин В.П., Киселев Н.Н., Миникулов Н.Х., Чернова Г.П. Наблюдения линейной поляризации в глубоких минимумах WWVul // *Письма в Астрономический журнал*. – 1988. – Т. 14. – с. 514-525.

13. Гринин В.П., Киселев Н.Н., Миникулов Н.Х. Наблюдение «зодиакального света» у изолированной Ae звезды Хербига BF Ori // Письма в Астрономический журнал. – 1989. – Т. 15. – с. 1028-1038.
14. Pérez M.R., Grady C.A. Observational overview of young intermediate-mass objects: Herbig Ae/Be stars // Space Science Reviews. – 1998. – V. 133. – pp. 81-121.
15. Testi L., Palla F., Natta A. A search for clustering around Herbig Ae/Be stars. II. Atlas of the observed sources // Astronomy and Astrophysics. Suppl. Ser. – 1998. – V. 133. – pp. 81-121.
16. Hillenbrand L.A. Isolated Herbig Ae/Be stars: rare examples of individual high-mass star forming events // ASP.Conf.Ser. – 1994. – V. 62. – pp. 369-372.
17. Antonellini S., Kamp I., Lahuis F., et al. Mid-IR spectra of the pre-main sequence Herbig stars: an explanation for the non- detections of water lines // Astronomy and Astrophysics. – 2016. – V 585. – A61. – (13 pp.).
18. Seok J.Y., Li A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in protoplanetary disks around Herbig Ae/Be and T Tauri stars // Astrophysical Journal. – 2017. – V. 835. – A291. – (36 pp).
19. Beltran M.T., de Wit W.-J. Accretion disks in luminous young stellar objects // Astronomy and Astrophysics Review. From Stars to Massive Stars. – 2016. – 6th-9th. – id.3.
20. Lazareff B., Berger J.-P., Kluska J., et al. Structure of Herbig Ae/Be disks at the milliarcsecond scale. A statistical survey in the H band using PIONIER-VLT // Astronomy and Astrophysics. – 2017. – V. 599. – A85. – (41 pp).
21. Hone E., Kraus S., Davies C.L., et al. Compact gaseous accretion disks in Keplerian rotation around MWC 137 // Astronomy and Astrophysics. – 2019. – V. 623. – A38. – (9 pp).
22. Davies C.L., Hone E., Kluska J., et al. Spatially resolving in innermost regions of the accretion disks of young low-mass stars with GRAVITY // Messenger. – 2019. – V. 178. – pp. 43-44.

23. Perraut K. and GRAVITY collaboration The GRAVITY young stellar objects survey. I. Probing the disks of Herbig Ae/Be stars in terrestrial orbits // *Astronomy and Astrophysics*. – 2019. – V. 632. – A53. – (22 pp).
24. Menu J., van Boekel R., Henning Th. et al. The structure of disks around intermediate-mass young stars from mid-infrared interferometry. Evidence for a population of group II disks with gaps // *Astronomy and Astrophysics*. – 2015. – V. 581. – A107. – (25 pp).
25. Strafella F., Pezzuto S., Corciulo G.G. et al. Stellar winds in Herbig Ae/Be stars // *Astrophysical Journal*. – 1998. – V. 505. – Is 1. – pp. 299-314.
26. Гринин В.П., Ростопчина А.Н. Ориентация околозвездных дисков и статистика H α профилей Ae/Be звезд Хербига // *Астрономический Журнал*. – 1996. – Т. 73. – № 2. – с. 194-202.
27. Gullbring E., Hartmann L., Briceno C., et al. Disk accretion rates for T Tauri stars // *Astrophysical Journal*. – 1998. – V. 492. – Is 1. – pp. 323-341.
28. Guenter E.W., Lehmann H., Emerson J.P., et al. Measurements of magnetic field strength on T Tauri stars // *Astronomy and Astrophysics*. – 1999. – V. 341. – pp. 768-783.
29. Camenzind M. Magnetized disk-wind and the origin of bipolar outflows // *Reviews in Modern Astronomy*. – 1990. – V. 3. – pp. 234-265.
30. Königl A. Disk accretion onto magnetic T Tauri stars // *Astrophysical Journal Letters*. – 1991. – V. 370. – L39-L43.
31. Collier C.A., Campbell C.G. Rotational evolution of magnetic T Tauri stars with accretion disks // *Astronomy and Astrophysics*. – 1993. – V. 274. – pp. 309-318.
32. Shu F., Najta J., Ostriker E., et al. Magnetocentrifugally driven flows from young stars and disks. I. A generalized model // *Astrophysical Journal*. – 1994. – V. 429. – pp. 781-796.
33. Contiello M., Langer N., Brott I., et al. Sub-surface convective zones in hot massive stars and their observable consequences // *Astronomy and Astrophysics*. – 2009. – V. 499. – pp. 279-290.

34. Hubrig S., Schöller M., Yudin R.V. Magnetic fields in Herbig Ae stars // *Astronomy and Astrophysics*. – 2004. – V. 428. – L1-L4.
35. Hubrig S., Stelzer B., Schöller M. Searching for a link between the magnetic nature and other observed properties of Herbig Ae/Be stars with debris disks // *Astronomy and Astrophysics*. – 2009. – V. 502. – pp. 283-301.
36. Hubrig S., Ilyin I., Schöller M. et al. HARPS spectropolarimetry of observation Herbig Ae/Be stars // *Astronomische Nachrichten*. – 2013. – V. 334. – pp. 1093-1100.
37. Hubrig S., Kholtygin A., Ilyin I., et al. The first spectropolarimetric observations of the peculiar O4Ief supergiant ζ Puppis // *Astrophysical Journal*. – 2016. – V. 882. – A104. – (7 pp).
38. Wade G.A., Drouin D., Bagnulo S., et al. Discovery of the pre-main sequence progenitors of the magnetic Ap/Bp stars? // *Astronomy and Astrophysics*. – 2005. – V. 442. – L31-L34.
39. Wade G.A., Bagnulo S., Drouin D., et al. A search for strong ordered magnetic fields in Herbig Ae/Be stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2007. – V. 376. – Is. 3. – pp. 1145-1161.
40. Alecian E., Wade G.A., Catala C., et al. Characterization of the magnetic fields of the Herbig Be star HD200775 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2008. – V. 385. – pp. 391-403.
41. Alecian E., Wade G.A., Catala C., et al. A high-resolution spectropolarimetric survey of Herbig Ae/Be stars. I. Observations and measurements // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2013. – V. 429. – Is 2. – pp. 1001-1026.
42. Alecian E., Neiner C., Mathis S., et al. The dramatic change of the fossil magnetic field of HD190073: evidence of the birth of the convective core in a Herbig star? // *Astronomy and Astrophysics*. – 2013. – V. 549. – L8-L11.
43. Cauley P.W., Johns-Krull C.M. Diagnosing mass-flow around Herbig Ae/Be stars using the HeI λ 10830 line // *Astrophysical Journal*. – 2014. – V. 797. – Is. 2. – A112. – (21 pp).
44. Тамбовцева Л.В., Гринин В.П., Козлова О.В. Не-ЛТР модели аккреционных дисков звезд типа UX Ori // *Астрофизика*. – 1999. – Т. 42. – Вып. 1. – с. 75-88.

45. Гринин В.П., Потравнов И.С., Ильин И.В. Шульман С.Г. Эффект магнитного пропеллера в спектрах молодых звезд // Письма в Астрономический журнал. – 2015. – Т. 41. – с. 444-453.
46. Takasao S., Tonida K., Kazundari I. et al. A three-dimensional simulation of a magnetized accretion disk: fast funnel accretion onto a weakly-magnetized star // Astrophysical Journal. – 2018. – V. 857. – Is 1. – article id. 4. – (25 pp).
47. Romanova M.M., Blinova A.A., Ustyugova G.V., et al. Properties of strong and weak propellers from MHD simulations // New Astronomy. – 2018. – V. 62. – pp. 94-114.
48. Тамбовцева Л.В., Гринин В.П. Пыль в дисковых ветрах молодых звезд как источник околозвездной экстинкции // Письма в Астрономический журнал. – 2008. – Т. 34. – с. 259-269.
49. Гринин В.П., Тамбовцева Л.В. Дисковый ветер в излучении молодых звезд промежуточных масс // Астрономический журнал. – 2011. – Т. 88. – с 766-780.
50. Ermolaeva N.A., Grinin V.P., Dmitriev D.V. Formation of the helium line 10830 Å in biconical winds of Herbig Ae/Be stars // ASP Conf.Ser. – 2017. – V. 510. – pp. 36-39.
51. Bacciotti F., Ray T.P., Mundt R., et al. Hubble Space Telescope/STIS spectroscopy of the optical outflow from DG Tauri: indications for rotation in the initial jet channel // Astrophysical Journal. – 2002. – V. 576. – Is. 1. – pp. 222-231.
52. Ferreira J., Dougados C., Cabrit S. Which jet launching mechanism(s) in T Tauri stars? // Astronomy and Astrophysics. – 2006. – V. 453. – pp. 785-796.
53. Schöller M., Pogodin M.A., Cahuasqui J.A. et al. Spectroscopic signatures of magnetospheric accretion in Herbig Ae/Be stars. I. The case of HD101412 // Astronomy and Astrophysics. – 2016. – V. 592. – pp. 50-57.
54. Pogodin M.A. Rapid line-profile variability of H-alpha and H-beta in the A-type shell star HD163296 // Astronomy and Astrophysics. – 1994. – V. 282. – pp. 141-150.
55. Beskrovnaya N.G., Pogodin M.A., Najdenov I.D., et al. Short-term spectral and polarimetric variability in the Herbig Ae star AB Aurigae as an indicator of the

circumstellar inhomogeneity // *Astronomy and Astrophysics*. – 1995. – V. 298. – pp. 585-593.

56. Beskrovnaya N.G., Pogodin M.A., Yudin R.V., et al. Cyclic phenomena in the circumstellar gaseous envelope of the candidate Herbig A0e star HD163296 // *Astronomy and Astrophysics. Supplement Series*. – 1998. – V. 127. – pp. 243-249.

57. Beskrovnaya N.G., Pogodin M.A., Miroshnichenko A.S., et al. Spectroscopic, photometric and polarimetric study of the Herbig Ae candidate HD36112 // *Astronomy and Astrophysics*. – 1999. – V. 343. – pp. 163-174.

58. Beskrovnaya N.G., Pogodin M.A. Active phenomena in the circumstellar environment of the Herbig Ae star HD31648 // *Astronomy and Astrophysics*. – 2004. – V. 414. – pp. 955-967.

59. Pogodin M.A., Franco G.A.P., Lopes D.F. Spectroscopic behavior of the unusual Ae star HD190073 // *Astronomy and Astrophysics*. – 2005. – V. 438. – Is. 1. – pp. 239-250.

60. Kozlova O.V., Grinin V.P., Chuntunov G.A. Dynamical processes in the neighborhood of the Herbig Ae star MWC 480 based on spectral monitoring data // *Astrophysics*. – 2003. – V. 46. – Is. 3. – pp. 265-281.

61. Kozlova O.V. Long-term spectral variability of the Herbig Ae star HD179218 // *Astrophysics*. – 2004. – V. 47. – Is. 3. – pp. 287-299.

62. Козлова О.В., Шаховской Д.М., Ростопчина А.Н. и др. Структура внутренних областей околозвездных газовых оболочек молодых горячих звезд. I. Изолированная Ae-звезда Хербига WW Vul // *Астрофизика*. – 2006. – V. 49. – pp. 171-185.

63. Козлова О.В., Погудин М.А., Алексеев И.Ю., и др. Об особенностях ветра уникальной Ae звезды Хербига HD 190073 // *Астрофизика*. – 2019. – Т. 62. – № 3. – с. 357-378.

64. Sorelli C., Grinin V.P., Natta A. Infall in Herbig Ae/Be stars: what NaD tell us // *Astronomy and Astrophysics*. – 1996. – V. 309. – pp. 155-162.

65. Kozlova O.V., Grinin V.P., Rostopchina A.N. Non-stationary gas accretion on UX Ori type stars // *Astronomy and Astrophysics Transactions*. – 1998. – V. 15. – № 1. – pp. 153-157.

- 66.** Rostopchina A.N., Grinin V.P., Shakhovskoi D.N. Cyclic variability of UX Ori Stars: UX Ori, SV Cep, and RZ Psc // Письма в Астрономический журнал. – 1999. – Т. 25. – № 4. – с. 291-298.
- 67.** Grinin V.P., Kozlova O.V., Rostopchina A.N. Optical spectra of five UX Ori-stars // Astronomy and Astrophysics. – 2001. – V. 379. – pp. 482-495.
- 68.** Pogodin M.A., Miroshnichenko A.S., Bjorkman K.S., et al. Spectroscopic behavior of the Herbig Be star HD200775 around its maximum activity in 1997 // Astronomy and Astrophysics. – 2000. – V. 359. – pp. 299-305.
- 69.** Pogodin M.A., Miroshnichenko A.S., Tarasov A.E. et al. A new phase activity of the Herbig Be star HD200775 in 2001: Evidence for binarity // Astronomy and Astrophysics. – 2004. – V.417. – pp. 715-723.
- 70.** Pogodin M.A., Malanushenko V.P., Kozlova O.V., et al. The Herbig B0e star HD53367: circumstellar activity and evidence of binarity // Astronomy and Astrophysics. – 2006. – V. 452. – pp. 551-559.
- 71.** Ismailov N.Z., Pogodin M, A., Bashirova U.Z. et al. The Herbig Be star IL Cep A as a long-periodic spectroscopic binary // Astronomy Reports. – 2020. – V. 64. – pp. 23-33.
- 72.** Tjin A Djie H.R.E., van den Ancker M.E., Blondel P.F.C., et al. The stellar composition of the formation region CMaR1-II. Spectroscopic and photometric observations of nine young stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2001. – V. 325. – pp. 1441-1457.
- 73.** Claria J.J. Investigation of a Milky Way region in Canis Majoris // Astronomical Journal. – 1974. – V. 79. – pp. 1022-1039.
- 74.** Ezhkova O.V. On the period of GU Canis Majoris // Information Bulletin on Variable Stars. – 1999. – № 4693. – pp. 1-2.
- 75.** Praderie F., Catala C., Czarny J., et al. Short term H-alpha variations in two Herbig PMS stars: HR5999 and HD52721 // Astronomy and Astrophysics. Supplement Series. – 1991. – V. 89. – pp. 91-103.
- 76.** ESA // The Hipparcos Catalogue – 1997 – ESA SP-1200.

77. Lafler J., Kinman T.D. An RR Lyrae star survey with the Lick 20-inch astrograph II. The calculation of RR Lyrae periods by electronic computer // *Astrophysical Journal Supplement*. – 1965. – V. 11. – pp. 216-222.
78. Pojmanski G. The All Sky Automated Survey. Catalog of variable stars. I. 0h – 6h quarter of the southern hemisphere // *Acta Astronomica*. – 2002. – V. 52. – pp. 397-427.
79. Harmanec P. Studies in Be-star variability. I. A remarkable similarity of the rapid periodic light variations of EM Cep, σ Ori E, and possibly LQ And // *Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia*. – 1984. – V. 35. – pp. 193-202.
80. Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., et al. Apex I and Apex II software packages for the reduction of astronomical CCD observations // *Solar System Research*. – 2010. – V. 44. – Is. 1. – pp. 68-80.
81. Kouprianov V.V. Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects // *Advances in Space Research*. – 2008. – V. 41. – Iss. 7. – pp. 1029-1038.
82. Molotov I., Agapov V., Titenko V., et al. International scientific optical network for space debris research // *Advances in Space Research*. – 2008. – V. 41. – Iss. 7. – pp. 1022-1028.
83. Fors O., Nuñez J., Muiños J.L., et al. Telescope Fabra ROA Montec: A new robotic wide field Baker-Nunn facility // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 2013. – V. 125. – Iss. 927. – pp. 522-538.
84. Павловский С.Е., Погодин М.А., Куприянов В.В., Горшанов Д.Л. Новое фотометрическое исследование тесной двойной системы Ae/Be звезды Хербига HD52721: признаки существования крупномасштабных азимутальных неоднородностей // *Письма в Астрономический журнал*. – 2015. – Т. 41. – № 6. – с. 317-327.
85. Levine S., Chakrabarty D. // IA-UNAM. – 1994. – Technical Report. – Mu-94-04.
86. Piskunov N.E. SYNTH – a code for rapid spectral synthesis // *Stellar Magnetism, Proceedings of international meeting on the problem "Physics and evolution of stars"*, held in Nizhnij Arkhyz 30 September - 5 October 1991. Edited by Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk. Sankt Petersburg: "NAUKA". – 1992. – p. 92.

- 87.** Hubeny I., Lanz T. NASA/GSPC, Code 681, “TLUSTY – A user guide”. – 1997.
- 88.** Usov V.V. Stellar wind collision and dust formation in long-period, heavily interacting Wolf-Rayet binaries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1991. – V. 252. – Iss. 1 – pp. 49-52.
- 89.** Eggleton P.P. Approximations of the radii of Roche lobes // *Astrophysical Journal*. – 1983. – V. 268. – pp. 368-369.
- 90.** Merrill P.W., Burwell C.G. Catalogue and bibliography of stars of classes B and A whose spectra have bright hydrogen lines // *Astrophysical Journal*. – 1933. – V. 78. – p. 87.
- 91.** Swings V.P., Struve O. Spectrographic observations of peculiar stars // *Astrophysical Journal*. – 1943. – V.97. – pp. 194-224.
- 92.** Oudmaijer R.D., van der Veen, W.E.C.J., Waters L.B.F.M., et al. SAO stars with infrared excess in the IRAS Point Sours Catalog // *Astronomy and Astrophysics. Supplement Series*. – 1992. – V. 96. – pp. 625-643.
- 93.** van den Ancker M.E., de Winter D., Tijn A Dije M.R.E. HIPPARCOS photometry of Herbig Ae/Be stars // *Astronomy and Astrophysics*. – 1998. – V. 330. – pp. 145-154.
- 94.** de Winter D., van den Ancker M.E., Maira A., et al. A photometric catalogue of southern emission stars // *Astronomy and Astrophysics*. – 2001. – V. 380. – № 2. – pp. 609-614.
- 95.** Böhm T., Catala C. Rotation, winds and active phenomena in Herbig Ae/Be stars // *Astronomy and Astrophysics*. – 1995. – V. 301. – pp. 155-169.
- 96.** Tetzlaff N., Neuhauser R., Hohle M.M. A catalogue of young runaway Hipparcos stars within 3 kps from the Sun // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2011. – V. 410. – pp. 190-200.
- 97.** Wheelwright H.E., Oudmaijer R.D., Goodwin S.P. The mass ratio and formation mechanisms of Herbig Ae/Be star binary systems // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2010. – V. 401. – Iss. 2. – pp. 1199-1218.
- 98.** Bagnulo S., Fossati L., Landstreet J.D., et al. The FORS1 catalogue of stellar magnetic field measurements // *Astronomy and Astrophysics*. – 2015. – V. 583. – A115. – (pp. 37).

- 99.** Rucinski S.M., Zwintz K., Hareter M., et al. Photometric variability of the Herbig Ae star HD37806 // *Astronomy and Astrophysics*. – 2010. – V. 522. – A113. – (pp. 8).
- 100.** Сотникова Н.Я., Гринин В.П. Гидродинамические процессы в молодых двойных системах как источник циклической переменности околозвездной экстинкции // *Письма в АЖ*. – 2007. – Т. 33. – С. 667 – 678.
- 101.** Arun R., Mathew B., Manoj P., et al. On the mass accretion rate and infrared excess in Herbig Ae/Be stars // *Astrophysical Journal*. – 2019. – V. 157. – № 4. – A159. – (10 pp.).
- 102.** Kluska J., Olofsson H., van Vinkel H., et al. A family portrait of disk inner rims around Herbig Ae/Be stars. Hunting for warps, rings, self shadowing, and misalignments in the inner astronomical units // *Astronomy and Astrophysics*. – 2020. – V 636. – A116. – (22 pp.).
- 103.** Launhardt R., Henning T., Quirrenbach A., et al. ISPY – NACO Imaging survey for planets around young stars. Survey description and results from the first 2.5 years of observations // *Astronomy and Astrophysics*. – 2020. – V. 635. – A162. – (23 pp.).
- 104.** Boccaletti A., Di Folco E., Pantin E., et al. Possible evidence of ongoing planet formation in AB Aurigae. A showcase in the SPHERE/ALMA synergy // *Astronomy and Astrophysics*. – 2020. – V. 637. – A5. – (6 pp.)
- 105.** Kreplin A., Tambovtseva L., Grinin V., et al. On the Br γ line emission of the Herbig Ae/Be star MWC120 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2018. – V. 476. – Iss. 4 – pp. 4520-4526.
- 106.** Harrington D.M., Kuhn J.R. Spectropolarimetric observations of Herbig Ae/Be stars. II. Comparison of spectropolarimetric surveys: Haebe, Be and other emission-line stars // *Astrophysical Journal. Supplement. Series*. – 2009. – V. 180. – № 1. – pp. 138-181.
- 107.** Oudmaijer R.D., Drew J.E. – “H α spectropolarimetry of B[e] and Herbig Be stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1999. – V. 305. – Iss. 1. – pp. 166-180.

- 108.** Vink J.S., Drew J.E., Harries T.J., et al. Probing the circumstellar structure of Herbig Ae/Be stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2002. – V. 337. – Iss. 1. – pp. 356-368.
- 109.** Mottram J.C., Vink J.S., Oudmaijer R/D., et al. On the difference between Herbig Ae and Herbig Be stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2007. – V. 377. – Iss. 3. – pp. 1363-1374.
- 110.** Beals C.S. The spectra of the P Cygni stars // *Publications of the Dominion Astrophysical Observatory*. – 1953. – V. 9. – pp. 1-137.
- 111.** Курчаков А.В., Погодин М.А., Распаев Ф.К. Крупномасштабная переменность профилей $H\alpha$ и $H\beta$ в спектре В8е звезды Хербига MWC419 и ее модельная интерпретация // *Астрофизика*. – 2007. – Т. 50. – № 2. – с. 259-280.
- 112.** Bouvier J., Alencar S.H.P., Bouvier T. Magnetospheric accretion-ejection process in the classical T Tauri star AA Tau // *Astronomy and Astrophysics*. – 2007. – V. 463. – Iss. 3. – pp. 1017-1028.
- 113.** Шульман С.Г. Формирование резонансных линий в движущихся газовых потоках с большой скважностью // *Астрофизика*. – 2017. – Т. 60. – сс. 205-218.
- 114.** Wang Y.-M. Location of the inner radius of the magnetospherically threaded accretion disk // *Astrophysical Journal Letters*. – 1996. – V. 465. – pp. 111-113.
- 115.** Donehew B., Brittain S. Measuring the stellar accretion rates of Herbig Ae/Be stars // *Astronomical Journal*. – 2011. – V. 141. – Iss. 2. – A46. – (10 pp.).

Приложение

Таблица III

ПЕРЕЧЕНЬ СПЕКТРОВ HD52721, ПОЛУЧЕННЫХ В КРЫМСКОЙ АО

Дата	Спектральная область	Юлианская дата на середину экспозиции (JD2455000+...)	Фаза фотометрического периода $P=1^d.610$
1	2	3	4
24.10.09	HeI 6678	129.503	0.940
	H α	129.535	0.960
	DNaI	129.558	0.974
	HeI 6678	129.590	0.994
	HeI 6678	129.611	0.007
	HeI 6678	129.632	0.020
25.10.09	HeI 6678	130.563	0.598
	H α	130.585	0.612
	DNaI	130.614	0.630
	HeI 6678	130.632	0.641
29.10.09	HeI 6678	134.599	0.105
	HeI 6678	134.620	0.118
	HeI 6678	134.643	0.132
31.10.09	HeI 6678	136.527	0.302
	HeI 6678	136.548	0.315
	HeI 6678	136.574	0.331
	H α	136.597	0.346
	DNaI	136.632	0.368
26.11.09	H α	162.580	0.483
	HeI 6678	162.596	0.493
01.12.09	HeI 6678	168.472	0.142
	HeI 6678	168.542	0.188
	HeI 6678	168.561	0.199
	HeI 6678	168.573	0.205
21.03.10	HeI 6678	277.235	0.690
	HeI 6678	277.256	0.704
	DNaI	277.319	0.743
22.03.10	HeI 6678	278.215	0.299
	HeI 6678	278.236	0.312
	DNaI	278.269	0.333
	H α	278.284	0.341
23.03.10	HeI 6678	279.219	0.923
	HeI 6678	279.242	0.937
	H α	279.262	0.950
	DNaI	279.289	0.966

Таблица III (продолжение)

1	2	3	4
25.03.10	H α	281.223	0.154
	HeI 6678	281.243	0.167
	HeI 6678	281.265	0.181
	DNaI	281.298	0.201
26.03.10	H α	282.218	0.785
	HeI 6678	282.235	0.795
	HeI 6678	282.256	0.809
	DNaI	282.285	0.827
28.03.10	H α	284.265	0.057
	HeI 6678	284.282	0.068
	HeI 6678	284.303	0.080
	DNaI	284.332	0.098
22.10.10	H α	492.521	0.396
	HeI 6678	492.544	0.410
	HeI 6678	492.563	0.422
	DNaI	492.583	0.434
23.10.10	H α	493.546	0.032
	HeI 6678	493.568	0.046
	HeI 6678	493.590	0.060

ПЕРЕЧЕНЬ СПЕКТРОВ HD37806, ПОЛУЧЕННЫХ В КрАО
С КУДЭ-СПЕКТРОГРАФОМ ASP-14

(1) – номер спектра среднего за ночь, (2) – календарная дата, (3) – MJD для усредненного спектра, (4) – спектральная область, (5) – число индивидуальных спектров, (6) – отношение сигнала к шуму, (7) – отношение V/R у профиля H α

№	Дата	MJD (50000+..)	Спектральная область	N	S/N	V/R(H α)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	24.11.09	5159.929	H α	3	105	0.64
2	25.11.09	5160.925	H α	3	60	0.64
3	26.11.09	5161.967	H α	2	90	0.67
4	26.11.09	5161.991	He,Na	1	70	
5	01.12.09	5165.961	H α	3	75	0.79
6	01.12.09	5166.012	H β	2	100	
7	22.02.10	5249.825	H α	3	60	0.63
8	19.03.10	5274.763	H α	3	95	0.68
9	13.03.11	5633.794	H α	3	50	0.49
10	07.11.11	5872.981	H α	3	95	0.60
11	07.11.11	5873.009	He,Na	3	135	
12	03.01.12	5929.896	H α	3	110	0.61
13	03.01.12	5929.924	He,Na	3	130	
14	08.11.12	6239.120	H α	8	150	0.38
15	08.11.12	6239.125	He,Na	1	65	
16	08.11.12	6239.900	H α	2	90	0.43
17	08.11.12	6240.020	He,Na	10	210	
18	09.11.12	6240.930	H α	6	45	0.45
19	09.11.12	6240.960	He,Na	6	50	
20	11.11.12	6243.000	H α	9	180	0.49
21	11.11.12	6243.011	He,Na	9	180	
22	01.01.13	6293.819	H α	4	85	0.34
23	01.01.13	6293.903	He,Na	4	115	
24	02.01.13	6294.800	H α	3	55	0.32
25	02.01.13	6294.885	He,Na	5	45	
26	27.02.13	6350.728	H α	4	70	0.56

Таблица П2 (продолжение)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
27	27.02.13	6350.793	He,Na	3	95	0.40
28	03.03.13	6354.713	H α	4	90	
29	03.03.13	6354.786	He,Na	3	80	0.48
30	06.03.13	6357.712	H α	3	75	
31	06.03.13	6357.791	He,Na	3	95	
32	20.03.13	6371.785	He,Na	2	100	

**ПЕРЕЧЕНЬ СПЕКТРОВ HD37806, ПОЛУЧЕННЫХ В КрАО
С ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФОМ ЭСПЛ**

(1) – номер спектра среднего за ночь, (2) – календарная дата, (3) – MJD для усредненного спектра, (4) – спектральная область, (5) – число индивидуальных спектров, (6) – отношение сигнала к шуму (если в спектре содержится несколько исследуемых линий, то для $\lambda 5000\text{\AA}$), (7) – отношение V/R у профиля $H\alpha$

№	Дата	MJD (50000+..)	Спектральная область	N	S/N	V/R($H\alpha$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	15.12.13	6641.893	$H\alpha$	3	73	0.58
2	15.12.13	6641.963	$H\beta, He, Na, Fe$	4	120	
3	11.02.14	6699.741	$H\alpha$	2	100	0.44
4	11.02.14	6699.782	$H\beta, He, Na, Fe$	2	140	
5	09.11.14	6970.002	$H\beta, He, Na, Fe$	4	115	
6	09.11.14	6970.045	$H\alpha$	4	20	0.54
7	04.11.15	7330.984	$H\alpha$	3	95	0.69
8	05.11.15	7331.054	$H\beta, He, Na, Fe$	3	170	
9	06.11.15	7332.024	$H\alpha$	3	55	0.67
10	06.11.15	7332.106	$H\beta, He, Na, Fe$	2	155	
11	26.12.15	7382.920	$H\alpha$	3	95	0.38
12	11.11.16	7703.931	$H\alpha$	2	80	0.37
13	12.11.16	7704.007	$H\beta, He, Na, Fe$	3	160	
14	12.11.16	7704.870	$H\alpha$	3	30	0.34
15	13.11.16	7705.092	$H\beta, He, Na, Fe$	3	50	
16	06.03.17	7818.700	$H\alpha$	2	80	0.76
17	06.03.17	7818.789	$H\beta, He, Na, Fe$	4	145	
18	07.03.17	7819.750	$H\beta, He, Na, Fe$	2	115	
19	07.03.17	7819.778	$H\alpha$	2	75	0.70
20	08.03.17	7820.754	$H\beta, He, Na, Fe$	1	180	
21	09.03.17	7821.754	$H\beta, He, Na, Fe$	4	205	
22	09.03.17	7821.772	$H\alpha$	2	110	0.77
23	12.03.17	7824.695	$H\alpha$	2	75	0.92
24	12.03.17	7824.763	$H\beta, He, Na, Fe$	2	105	
25	25.11.17	8082.066	$H\alpha$	3	155	1.05
26	26.11.17	8083.000	$H\alpha$	4	105	0.97

Таблица ПЗ (продолжение)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
27	03.12.17	8090.823	H α	3	35	1.19
28	03.12.17	8090.909	H β ,He,Na,Fe	3	80	
29	05.12.17	8092.917	H α	2	15	1.24
30	05.12.17	8092.975	H β ,He,Na,Fe	3	80	
31	08.12.17	8095.907	H α	2	40	1.26
32	08.12.17	8095.967	H β ,He,Na,Fe	3	250	
33	09.12.17	8096.908	H α	2	25	1.00
34	09.12.17	8096.960	H β ,He,Na,Fe	2	90	
35	02.01.18	8120.955	H α	1	25	1.01
36	03.01.18	8121.713	H α	1	25	1.04
37	07.01.18	8125.848	H α	2	90	0.77
38	07.01.18	8125.919	H β ,He,Na,Fe	4	155	
39	01.02.18	8150.686	H α	4	25	1.02
40	01.02.18	8150.774	H β ,He,Na,Fe	4	50	
41	23.09.18	8384.095	H α	2	85	0.72
42	29.10.18	8420.053	H β ,He,Na,Fe	3	220	
43	29.10.18	8420.108	H α	2	110	0.66
44	23.11.18	8445.053	H β ,He,Na,Fe	3	160	
45	23.11.18	8445.090	H α	2	85	0.61
46	24.11.18	8445.979	H β ,He,Na,Fe	3	130	
47	24.11.18	8446.033	H α	3	90	0.63
48	17.01.19	8500.714	H α	1	50	0.53
49	17.01.19	8500.767	H β ,He,Na,Fe	2	120	