

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.1-41

ОКОЛОЗВЕЗДНЫЕ ОСОБЕННОСТИ Ве ЗВЕЗДЫ ХЕРБИГА HD 259431. I. ПРИЗНАКИ МАГНИТОСФЕРНОЙ АККРЕЦИИ

М.А.ПОГОДИН¹, С.Е.ПАВЛОВСКИЙ¹, Н.Г.БЕСКРОВНАЯ¹,
Н.А.ДРАКЕ^{2,3}, О.В.КОЗЛОВА⁴, И.Ю.АЛЕКСЕЕВ⁴,
М.БОРГЕС ФЕРНАНДЕС⁵, К.Б.ПЕРЕЙРА⁵, Г.Г.ВАЛЯВИН⁶,
А.С.МИРОШНИЧЕНКО^{1,7}, С.Ю.ГОРДА⁸, Д.Л.ГОРШАНОВ¹

Поступила 22 июня 2021

Принята к печати 16 февраля 2022

Представлены результаты спектроскопического исследования Ae/Ве звезды Хербига HD 259431, проведенного с 2010 по 2019гг. с использованием спектрографов высокого разрешения: а) Крымской астрофизической обсерватории, б) Южной Европейской обсерватории ESO (Чили), в) Обсерватории OAN SPM в Мексике и г) Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. Проанализировано 245 спектров объекта, полученных в области околозвездных линий (в основном, H α , H β , HeI 5876, FeII 4923 и DNaI), а также некоторых линий атмосферы (HeI 4009, 4026). В этой статье обращается внимание только на анализ циклической переменности параметров некоторых околозвездных линий на временном масштабе порядка одного дня. Обнаружено противофазное изменение бисекторной скорости эмиссионного профиля H β и скорости границы красного крыла абсорбционной линии HeI 5876. Найден период этих изменений $P=2.839$ сут. Предполагая, что эта величина может быть периодом вращения звезды, был оценен угол наклона оси вращения к лучу зрения $i=48^\circ \pm 7^\circ$. Поскольку на разных фазах этого периода профили H β и H γ выглядели то как PCyg-профиль, то как двойной эмиссионный с депрессией в красном крыле, было сделано предположение, что наблюдаемая переменность связана с существованием магнитосферы у HD 259431, имеющей наклон магнитной оси по отношению к оси вращения. В этом случае за один оборот звезды на луче зрения появляется то аккрецируемый, то истекающий поток вещества, поскольку области с этими 2-мя типами кинематики, согласно модели, расположены на разных магнитных широтах. В пользу существования магнитосферы говорят и очень большие скорости границы красного крыла абсорбционной линии HeI 5876 (до +400 км/с), наблюдаемые на фазах, когда на луче зрения оказывается аккреционный поток. Было также установлено, что подобные изменения демонстрируют также линии H δ , HeI 6678 и OI 7773. В то же время в ряде линий, формирующихся в околозвездной среде, удаленной от района взаимодействия диск/звезда, такая циклическая переменность не наблюдалась. Отмечается, что это первый случай обнаружения магнитосферы у Ве звезды Хербига такого раннего спектрального класса (В6). Раньше считалось, что у Ве звезд Хербига не могут наблюдаться магнитосферы.

Ключевые слова: Ae/Ве звезды Хербига: околозвездные оболочки: дисковая аккреция: ветер: HD 259431

1. *Введение.* Звезда спектрального класса В с эмиссионными линиями HD 259431 (MWC 147, V700 Mon) была включена еще в самый первый

список Ae/Be звезд Хербига [1] как кандидат в группу объектов промежуточных масс (от 2 до 10 масс Солнца), находящихся на стадии эволюции до Главной последовательности. HD259431 расположена в центре отражательной туманности NGC 2247, связанной, в свою очередь, с комплексом темных облаков в ассоциации Monoceros OB1.

Как типичная Ae/Be звезда Хербига, HD259431 имеет избыток излучения от ближней до дальней инфракрасной (ИК) области спектра. Он был обнаружен еще в 70-е годы прошлого столетия, многочисленные ссылки на соответствующие публикации приведены в статье Краусса и др. [2]. Этот избыток связан с тепловым излучением пыли в широком диапазоне температур, содержащейся в различных областях реликтового аккреционного диска. Исследование его структурных особенностей методом картирования проводилось неоднократно в разных областях ИК диапазона: в ближнем ИК - Хоун и др. [3], в среднем и дальнем ИК - Или и др. [4], Мену и др. [5]. В диске были обнаружены локальные пространственные образования, некоторые из них имели биполярную структуру, указывающую на существование направленных истекающих потоков, взаимодействующих с окружающей туманностью (Ли и др. [6]).

Кинематическая картина в околосветной оболочке достаточно многообразна. Присутствие в спектре HD259431 эмиссионных линий отмечалось еще в ранних работах Мэррилла и Бевел [7] и Свингса и Струве [8]. В работе Багноли и др. [9] анализируются профили некоторых эмиссионных линий в спектре объекта, полученного с высоким разрешением (H α , [O I], O I , Mg I , Mg II и др.). Все они двойные, что указывает на их формирование во внутренних частях диска. В то же время многочисленные линии в УФ области спектра однозначно свидетельствуют о присутствии ветра в кинематике оболочки (Имхофф [10], Буре и др. [11]).

В ряде публикаций отмечается наличие малоамплитудной фотометрической активности HD259431. Хальбедел [12] ничего не сообщает о переменности блеска в фильтрах В и V по данным наблюдений в течение 3.5 лет. Но в обзорной работе де Винтера и др. [13], охватывающей все имеющиеся до 2000г. фотометрические работы, указывается на переменность в полосе В от 8^m.65 до 8^m.97.

В 2004г. Чхиквадзе [14] опубликовал результаты своего фотометрического мониторинга HD259431, проведенного им в Абастуманской обсерватории (Грузия) в фотометрической системе Стремгрена $ubvuH\beta$ в течение 3.5 лет на рубеже 80-90-х годов. Частично фотометрия сопровождалась спектроскопией низкого разрешения. На основании анализа собственных результатов, а также данных наблюдений этого объекта в рамках программы "ROTOR" на Майданакской АО в Узбекистане [15], он сделал выводы о том, что: а) наблюдается переменность блеска во всех фильтрах на временном масштабе от минут до дней и месяцев

с амплитудой до $0^m.1$; б) увеличение блеска сопровождается уменьшением эквивалентных ширин спектральных линий и в) при наиболее высоком уровне блеска эмиссионные линии показывают признаки истечения вещества в виде профилей типа PCyg.

Автор предположил наличие вспышечной активности у HD259431. Однако легко показать, что вся картина изменений достаточно типичная при вариациях излучения газовой оболочки, по крайней мере, для изменений с характерным временем порядка часов и дней.

Определения спектрального класса HD259431, а также других фундаментальных параметров звезды весьма противоречивы. Спектральный класс объекта оценивали в разных работах в диапазоне от B1 (ван ден Анкер и др. [16]) до A0 (Коэн и Кьюи [17]). Встречались такие оценки, как B2e, B3, B3pe, B5e, B5pne, B6pe. Их полный перечень с указанием соответствующих ссылок приводится в [12]. В настоящее время наиболее общепризнанным считается спектральный класс B6V, впервые определенный еще в начале 2000-х по наиболее разработанной методике [18]. Практически во всех работах отмечается отсутствие атмосферных линий, не искаженных околос звездным влиянием, иногда сообщалось, что все наблюдаемые абсорбционные линии имеют "диффузный вид".

Целью настоящей работы было: а) на основе собственных наблюдений исследовать спектральные особенности HD259431 на временном масштабе от месяцев и лет до суток, используя как линии, формирующиеся в атмосфере звезды, так и наиболее характерные околос звездные линии; б) проверить корреляции между изменением параметров различных линий и в) попытаться интерпретировать обнаруженные явления на основе существующих представлений об объектах этого типа.

Ввиду большого количества полученных нами результатов, мы в данной работе представляем только их часть, связанную с анализом быстрой переменности ряда околос звездных линий, позволившим сделать вывод о существовании у HD259431 магнитосферной аккреции. Остальные результаты, относящиеся к особенностям атмосферных линий и необычной многокомпонентной переменности линии $H\alpha$, будут представлены в следующих работах этого цикла.

2. Наблюдения. Спектроскопический мониторинг HD 259431 с 2010 по 2019гг. проводился в 4-х различных обсерваториях. Первые наблюдения по программе начались в обсерватории OAN SPM (Мексика) на 2.1-м телескопе со спектрографом REOSC при разрешении $R \sim 18000$ в диапазоне длин волн $\lambda\lambda 3800 - 6800 \text{ \AA}$. Предметом исследования были области, содержащие линии $H\alpha$, $H\beta$, HeI 5876, FeII 4923, дублет DNaI 5889, 5895, а также ряд других линий.

Основная часть наблюдений (с 2013 по 2019гг.) была выполнена в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) на 2.6-м телескопе ЗТШ, оснащенный эшелле-спектрографом ЭСПЛ с разрешением $R \sim 20000$. Ввиду того, что используемый ПЗС приемник не перекрывал полностью двумерное изображение, спектры в области $H\alpha$ и в областях $H\beta$, HeI 5876, $FeII$ 4923 и $DNaI$ могли быть получены только в виде двух отдельных экспозиций с переводом угла дифракционной решетки.

Помимо этого, в 2015–2016гг. были проведены наблюдения в обсерватории ESO с эшелле-спектрографом FEROS, установленном на 2.2-м телескопе. Все спектры были получены с наиболее высоким разрешением ($R = 48000$) и в широком спектральном диапазоне $\lambda\lambda 3700 - 9200 \text{ \AA}$ [19].

И, наконец, часть спектрального материала была получена в Коуровской АО Уральского Федерального Университета на 1.2-м телескопе с эшелле-спектрометром ($\lambda\lambda 4100 - 7500 \text{ \AA}$, $R \sim 15000$) [20].

Вся информация о полученных спектрограммах собрана в табл.П1 *Приложения*. Спектрограммы, полученные в определенной спектральной области, усреднялись за ночь. Табл.П1 содержит данные о 85 усредненных за ночь спектрах, полученных в 53 календарные даты с 2010 по 2019гг. Общее число индивидуальных спектрограмм - 245. Если в одну наблюдательную ночь проводились наблюдения в области $H\alpha$ и в области остальных исследуемых линий в виде двух отдельных экспозиций (см. выше), то в таблице приводились данные о двух спектрограммах, каждая из которых являлась усредненной за ночь. MJD-даты и отношение сигнал/шум (S/N) в таблице также приведены для средней спектрограммы, для которой указывалось и число усредненных за ночь спектров N.

В табл.П2 в *Приложении* для каждой даты наблюдений приводятся данные о некоторых спектральных параметрах, в изменениях которых нами была обнаружена регулярность, которая анализируется в данной статье и предполагаемых последующих статьях этого цикла.

Вся первичная обработка спектрального материала проводилась с применением стандартных программ, используемых в обсерваториях OAN, ESO, КрАО и УФО. Мы использовали полученную нами оценку собственной скорости объекта относительно Солнечной системы $V_{\text{соб}} = +27.1 \pm 1.1 \text{ км/с}$ и перевели все полученные спектры в систему длин волн и лучевых скоростей, связанную со звездой.

Величина $V_{\text{соб}}$ была вычислена по положениям голубых линий гелия и по бисекторным скоростям широких атмосферных компонентов бальмеровских линий в области далеких абсорбционных крыльев. В работе [12] приведены оценки этой величины, сделанные ранее в других работах: $+26 \pm 8$, $+19.1 \pm 4.1$, $+23 \pm 2$ и $+21.4 \pm 0.3 \text{ км/с}$. Интересно отметить, что эта величина

отличается от скорости, определяемой по межзвездным (IS) компонентам дублета DNaI: $+14.3 \pm 0.3$ км/с.

Точность измерения различных спектральных параметров, которые анализировались в статье и приведены в табл.П2 (в *Приложении*), составила: ± 0.01 для $V/R(H\alpha)$, ± 3 -5 км/с для $V \text{ bis}(H\beta)$ и ± 10 -20 км/с для V_{red} (HeI 5876) в зависимости от качества спектрограммы.

3. Результаты наблюдений.

3.1. Особенности околозвездных линий в спектре HD259431.

Как уже отмечалось во *Введении*, линейчатый спектр HD259431 очень богат по содержанию различных околозвездных линий, имеющих различные типы профилей и демонстрирующих переменность своих параметров на разных временных масштабах от дней до лет. Больше всего информации содержат эшелле спектры, полученные со спектрографом FEROS. Они охватывают наиболее широкий спектральный диапазон от 3700 до 9200 Å и почти все

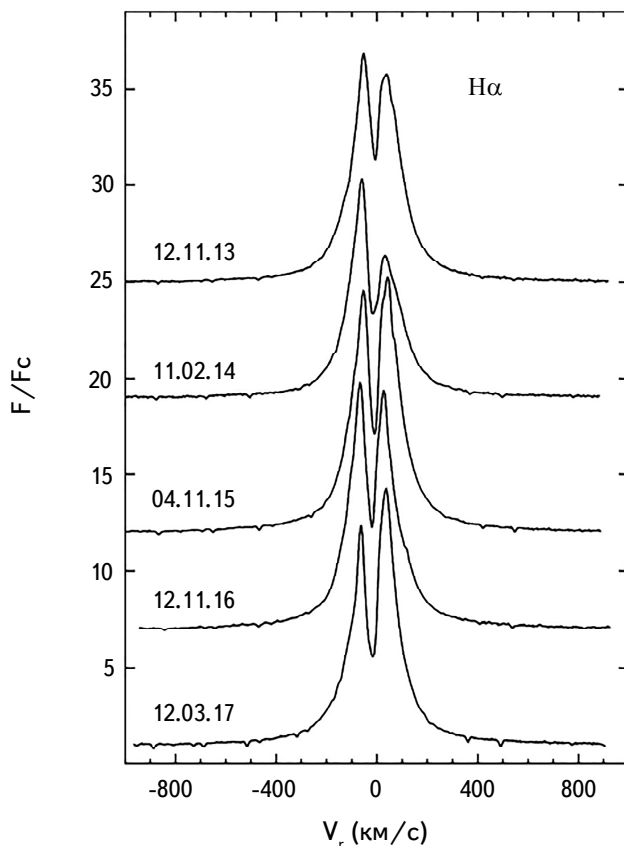


Рис.1. Нормированные профили $H\alpha$, наблюдавшиеся в спектре HD259431 в различные даты. Шкала лучевых скоростей связана со звездой.

имеют хорошее качество. К сожалению, их количество сравнительно невелико (см. табл.П1). Основная часть спектрального материала была собрана в Крымской астрофизической обсерватории за 10 лет наблюдений. Именно эти данные позволили исследовать особенности переменности многих линий на разных масштабах времени.

Наиболее яркой линией в спектре HD259431 является линия $H\alpha$. Ее нормированные профили, полученные в разные даты, показаны на рис.1. Эмиссия в этой линии очень интенсивная, высота профилей в максимуме достигает 10-15 уровней непрерывного спектра F_c . Профили представляют собой 2 эмиссионных пика, разделенных центральной абсорбцией, имеющей мало изменяющуюся лучевую скорость -20 ± 4 км/с. Эта центральная абсорбция наблюдается и в линиях $H\beta$ и $FeII$ 4923 на скоростях, соответственно, -10 ± 8 км/с и -3 ± 2 км/с. Такая картина должна наблюдаться, если эта спектральная деталь формируется в далеком, уже потерявшем скорость ветре, экранирующем на больших расстояниях звезду от наблюдателя. Линия имеет очень широкие эмиссионные крылья, которые, как правило, присутствуют у наиболее интенсивных спектральных линий, и их природа связывается с электронным рассеянием в обширной пространственной оболочке (см. [12]).

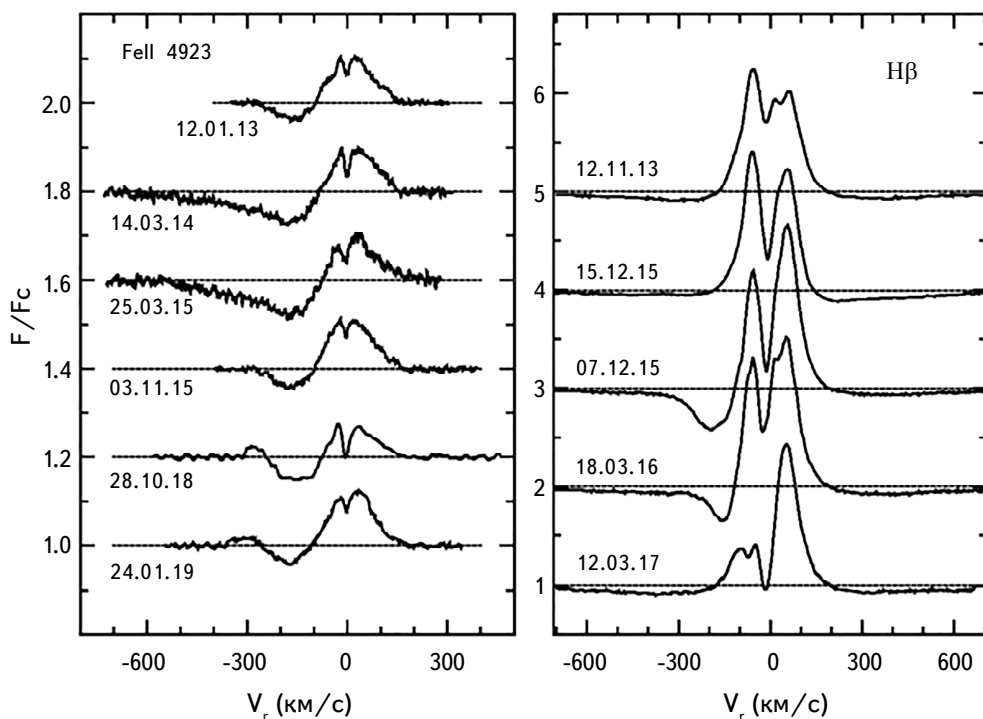


Рис.2. То же, что на рис.1, но для линий $FeII$ 4923 и $H\beta$. Штриховой линией отмечен уровень непрерывного спектра.

На рис.1 видно, что в разные даты отношение интенсивностей голубого и красного эмиссионных пиков линии $H\alpha$ (V/R) изменяется на временном масштабе в несколько месяцев (табл.П2). Особенности этой переменности будут проанализированы в следующих частях данного цикла работ.

На рис.2 показаны типичные профили линий $H\beta$ и $FeII$ 4923, наблюдавшиеся в спектре HD259431 в различные даты. Линии $H\beta$, также как и $H\alpha$, демонстрируют изменения отношения V/R , но общая картина переменности здесь сложнее. В отдельные даты наблюдаются дополнительные абсорбционные детали на эмиссионном профиле, иногда появляется PCyg-структура, свидетельствующая об истечении вещества на луче зрения. Линия $H\beta$ формируется в областях более близких к звезде, чем линия $H\alpha$, и активные явления в ней проявляются сильнее.

Но четче всего признаки ветра видны в линии $FeII$ 4923, PCyg-абсорбция

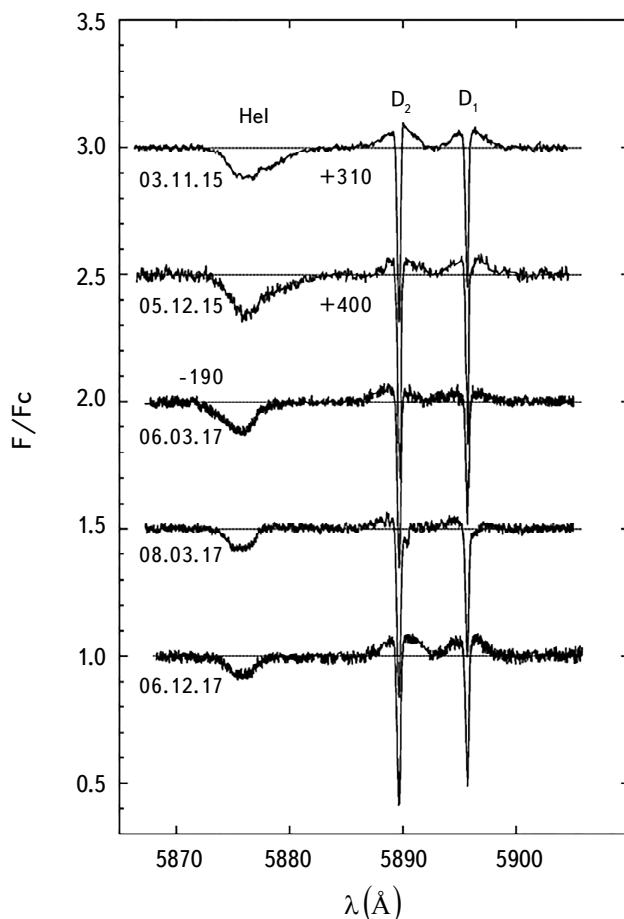


Рис.3. То же, что на рис.1 и 2, но для линий HeI 5876 и $DNaI$. На некоторых профилях отмечены скорости голубой и красной границы профиля.

в разные даты имеет различные профиль и протяженность.

Линия HeI 5876 наблюдается всегда в абсорбции (рис.3). В отдельные даты протяженность красного крыла этой линии достигает +400 км/с. Эта скорость соответствует скорости аккреционного потока в области его контакта со звездой. Она может достигать такой большой величины, только если выпадение вещества на поверхность звезды происходит в режиме свободного падения. Но это может быть только в том случае, если аккреция из диска на звезду носит магнитосферный характер.

3.2. Циклическая переменность параметров линий H γ и HeI 5876 и признаки магнитосферной аккреции у HD259431. Как уже отмечалось, спектральные параметры этой Ве звезды Хербига демонстрируют

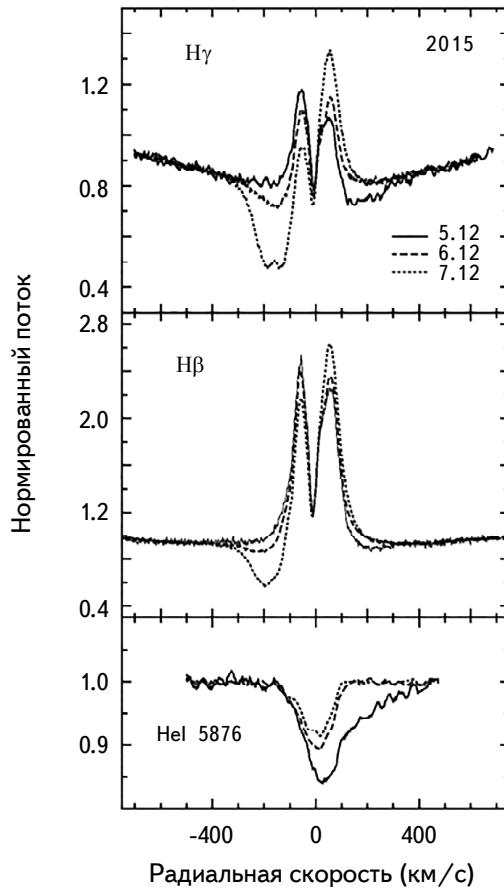


Рис.4. Быстрая переменность профилей H γ , H β и HeI 5876 в спектре HD259431, наблюдавшаяся 5-7 декабря 2015г. Рисунок иллюстрирует трансформацию профилей балмеровских линий из двойного эмиссионного с депрессией в красном крыле в профиль типа РСуг в течение 3-х суток. В первую дату линия HeI демонстрирует увеличение ширины красного абсорбционного крыла более чем до +400 км/с.

очень разнообразные виды переменности на разном временном масштабе, которую оказывается достаточно сложно систематизировать. Так, например, у HD259431 обнаруживается необычная спектральная переменность на временном масштабе порядка одного дня. На рис.4 (вверху) показано, как профиль эмиссионной линии $H\gamma$ за двое суток с 5 по 7 декабря 2015г. из двойного с пониженной интенсивностью красного пика превратился в прямой PCyg-профиль. Аналогичные изменения происходили и у линии $H\beta$, а профиль линии HeI 5876 5 декабря, когда присутствовала депрессия красного эмиссионного крыла у профилей бальмеровских линий, показывал аномально большую протяженность красного абсорбционного крыла, более чем до $+400$ км/с (рис.4). 6 и 7 декабря в линиях $H\beta$ и $H\gamma$ наблюдался уже ветер, признаки которого были наиболее выражены в последнюю дату. Подобные спектральные изменения позволили предположить, что на масштабе времени порядка дней на луче зрения в оболочке HD259431 аккреционный поток вещества сменился на истекающий. Чтобы интерпретировать подобное явление, требовалось убедиться на всем полученном наблюдательном материале, является ли этот процесс циклическим. Если он связан с существованием азимутальной неоднородности, вращающейся вместе со звездой, то в изменении спектральных параметров можно было бы ожидать наличие периода, совпадающего с периодом вращения звезды. Этот период прежде не оценивался, но его значение должно было бы находиться где-то между 2 и 3 сутками (исходя из существующей оценки радиуса звезды в 6.6 радиусов Солнца [2,6] и ожидаемого диапазона угла i от 40° до 60° [2]).

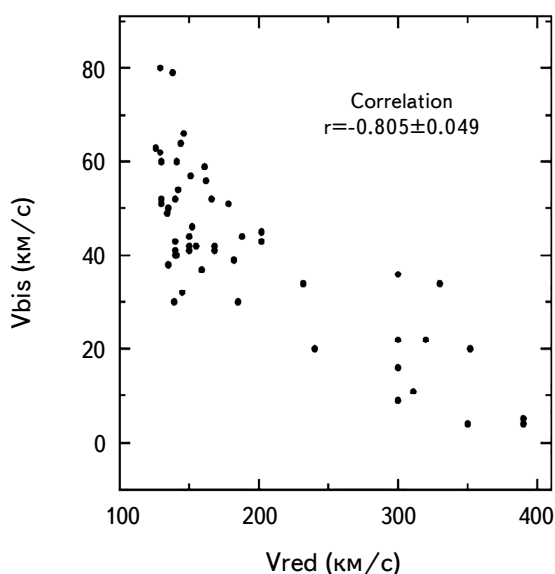


Рис.5. Антикореляция изменений параметров V_{bis} ($H\beta$) и V_{red} (HeI 5876).

Мы провели периодограммный анализ двух спектральных параметров - бисекторной скорости V_{bis} эмиссионного профиля $H\beta$, измеренного на уровне $1 Fc$, и лучевой скорости красной границы абсорбционной линии $HeI\ 5876 - I_{red}$, формирующейся в аккреционном потоке. На рис.5 видно, что эти два параметра показывают очень сильную антикорреляцию с $r = -0.805 \pm 0.049$.

Используя известный метод Ломба-Скаргла [21] и рассмотрев диапазон пробных периодов от 2.0 до 3.0 сут с шагом 0.001 дня, мы получили периодограммы для этих двух параметров, показанные на рис.6. Уровень значимости на периодограммах оценивался по способу, приведенному в [22]. На обеих из них присутствует период $P = 2.839 \pm 0.002$ сут. Это значение соответствует ожидаемому периоду вращения звезды. Полагая радиус звезды равным 6.6 радиуса Солнца и $V \sin i = 90 \pm 10$ км/с [11,23], можно вычислить наклон оси вращения звезды к лучу зрения:

$$\sin i = PV \sin i / 2\pi R_{star}. \quad (1)$$

Полученная оценка $i = 48^\circ \pm 7^\circ$ хорошо согласуется с величиной $i = 52^\circ \pm 4^\circ$,

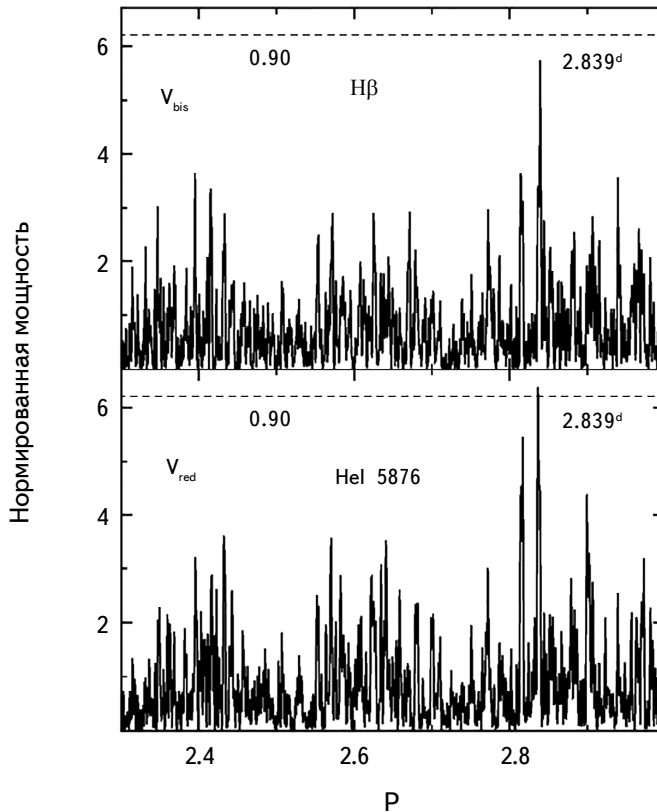


Рис.6. Периодограмма Ломба-Скаргла изменений величин параметров V_{bis} ($H\beta$) и V_{red} ($HeI\ 5876$). На обеих периодограммах виден период $P = 2.839^d$.

полученной в [2] по изображению диска на частотах излучения СО.

На левом фрагменте рис.7 показаны фазовые диаграммы параметров $V_{\text{bis}}(\text{H}\beta)$ и $V_{\text{red}}(\text{HeI})$, построенные для периода $P=2.839$ сут. Обращает на себя внимание большой разброс точек на каждой из диаграмм. По-видимому, он связан с существованием других видов быстрой спектральной переменности, которые пока идентифицировать не удалось. Для большей иллюстративности диаграммы были сглажены по 5-ти соседним точкам (правые фрагменты рис.7). Хорошо видны противофазные изменения обоих параметров.

Используя эти фазовые зависимости, можно оценить дату появления максимальной скорости $V_{\text{red}}(\text{HeI})$ как $\text{MJD } 55501.27 \pm 0.15$. На рис.8 и 9 показан вид профилей различных околозвездных линий в спектре HD259431, формирующихся в разных районах околозвездной оболочки, от фазы вращения. Спектры этих линий были получены в ESO с спектрографом FEROS. Как видно на рисунках, можно выделить 3 группы линий в зависимости от их поведения при изменении фазы периода $P=2.839$ сут. В первую группу входят

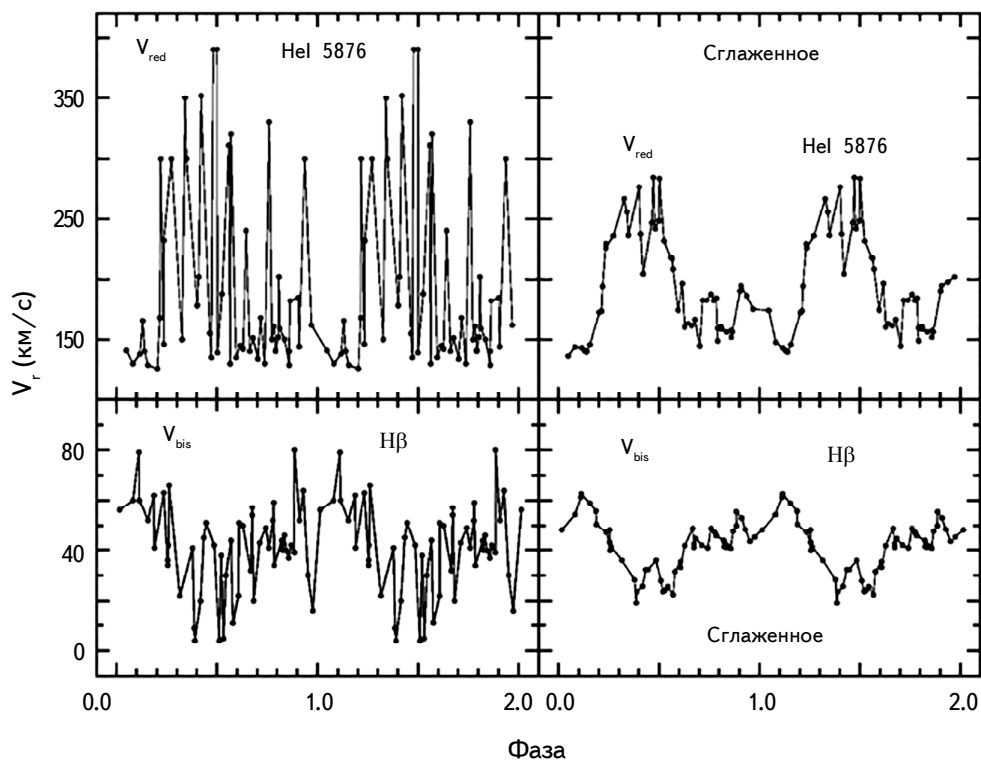


Рис.7. Фазовые диаграммы величин $V_{\text{bis}}(\text{H}\beta)$ и $V_{\text{red}}(\text{HeI } 5876)$, построенные для периода $P=2.839$ сут (слева) и сглаженные для большей наглядности по 5 соседним точкам (справа). Фазовые изменения величины происходят в противофазе. Средняя ошибка одного измерения: $\pm 3-5$ км/с (для V_{bis}) и $\pm 10-20$ км/с (для V_{red}).

линии, образующиеся в значительной мере в области взаимодействия звезды с ее диском. Это, помимо уже обсуждавшихся линий H β , H γ и HeI 5876, линии H δ , HeI 6678 и триплет OI 7773. Их изменения с фазой подобны изменениям профиля HeI 5876. На фазе около нуля у профилей наблюдается очень протяженное красное абсорбционное крыло. На фазах далеко от нуля профили становятся типа PCyг (рис.8). Ко второй группе относятся линии,

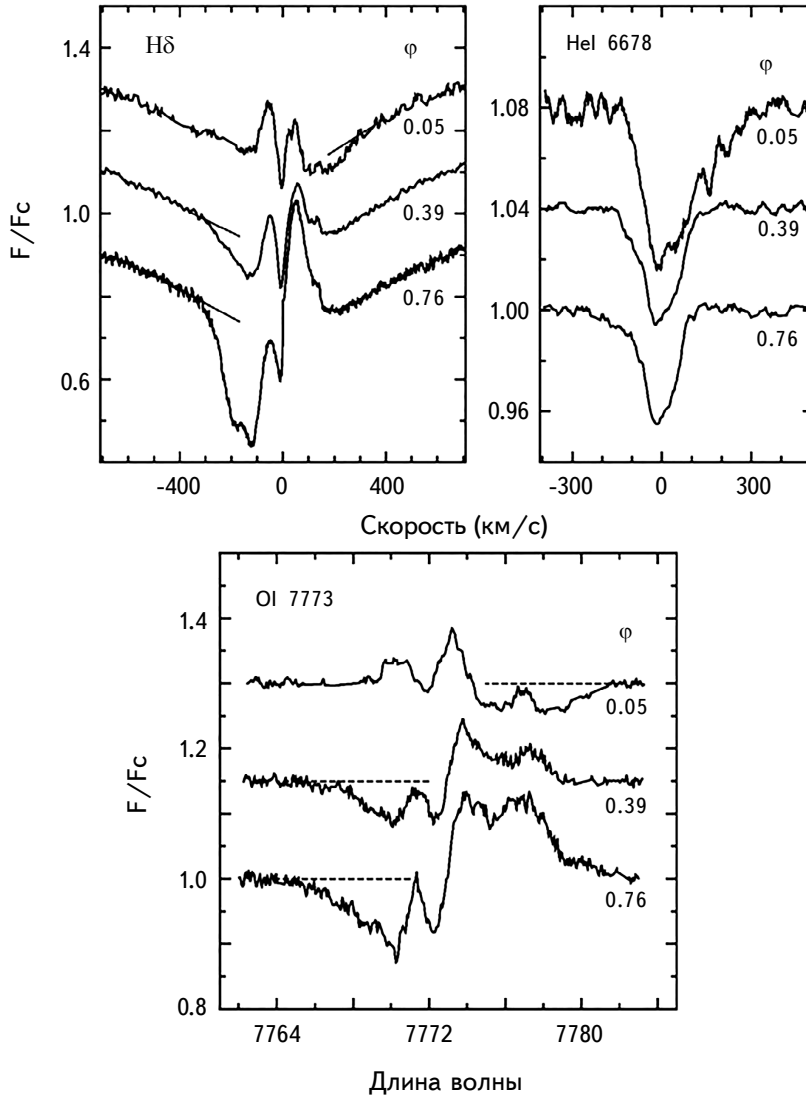


Рис.8. Примеры фазовых изменений профилей линий, формирующихся близко к области взаимодействия диска со звездой, построенные для периода $P = 2.839$ сут. Отмечена фаза, отсчитываемая от момента, когда скорость V_{red} (HeI 5876) принимает максимальное значение (см. текст), что соответствует времени прохождения аккреционного потока через луч зрения.

демонстрирующие двойной эмиссионный профиль, не меняющийся с фазой периода $P=2.839$ сут. Примером этого типа линий может быть триплет SiIII 4553, 4568, 4575 (компоненты на 4568 и 4575 взаимно блендируются). Они должны формироваться во вращающемся диске вдали от области взаимодействия диска со звездой (рис.9, внизу). В третью группу включаются линии, образующиеся в ветре также далеко от области взаимодействия диск-звезда. На всех

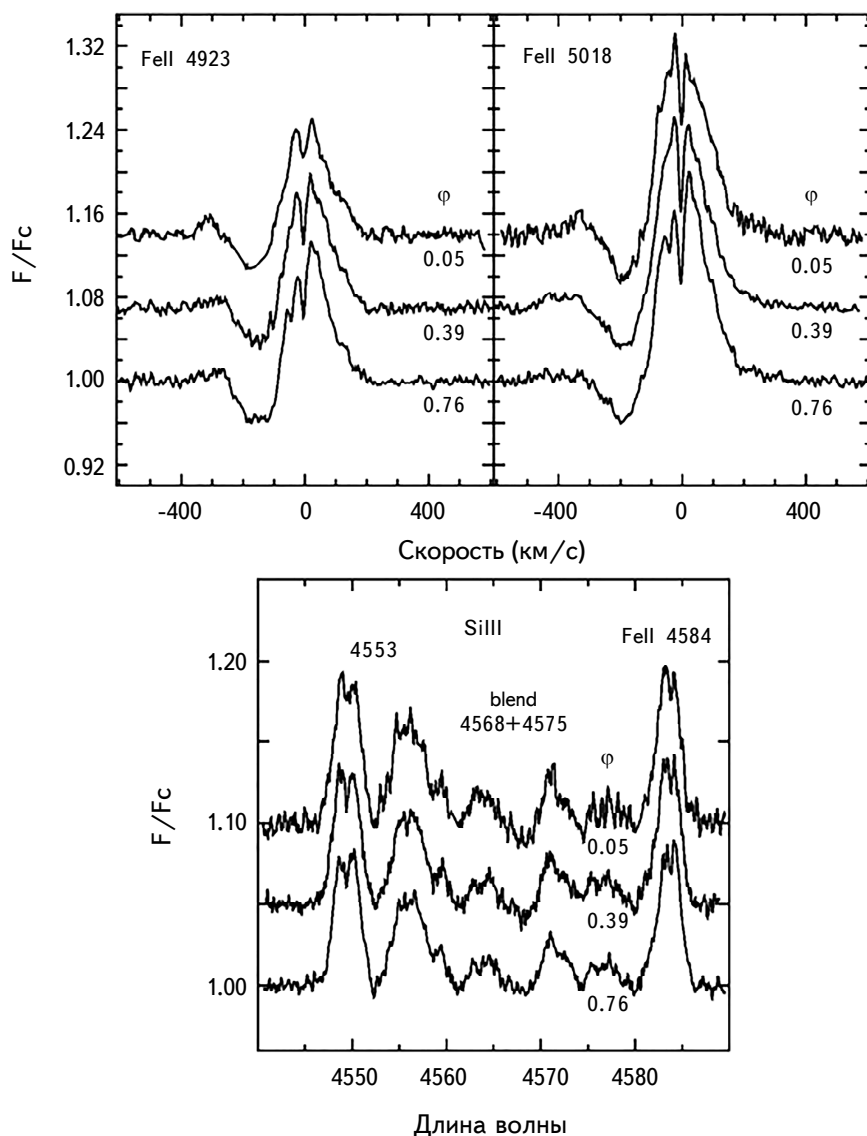


Рис.9. То же, что на рис.8, но для линий, формирующихся вдали от области взаимодействия диска со звездой, либо в диске (триплет SiIII), либо в зоне ветра (FeII 4923, 5018). Фазовые изменения профилей этих линий не наблюдаются.

фазах они имеют профили типа PCyg (FeII 4923, 5018, рис.9, верхняя панель).

Такой вид спектральной переменности HD259431, когда за один оборот звезды аккреция на луче зрения сменяется ветром, хорошо объясняется в рамках модели наклонного магнитного ротора и наличия магнитосферы около звезды. Эта модель предполагает зону ветра на низких магнитных широтах и область аккреционных потоков на более высоких магнитных широтах (см. схематический рис.10, построенный по работе [24]). Рисунок приводится в системе звезды, на нем луч зрения за один период вращения совершает полный оборот вокруг оси вращения, пересекая поочередно то зону ветра (А), то область аккреции (В), что и приводит к наблюдаемой переменности.

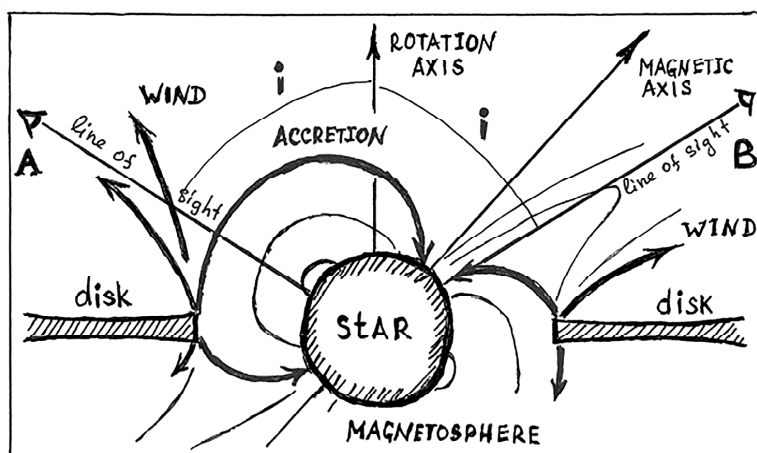


Рис.10. Схематическое изображение звезды с аккреционным диском и магнитосферой, ось которой наклонена по отношению к оси вращения (магнитный ротор). Рисунок приведен в системе отсчета звезды. В положении А наблюдатель видит ветер на низких магнитных широтах, а в положении В - поток вещества, аккрецируемый через магнитосферу на высоких магнитных широтах.

Как уже отмечалось, в пользу существования магнитосферы у HD259431 говорит и высокая скорость аккреционного потока (+300-400 км/с), диагностируемая по красной границе I_{red} абсорбционных линий HeI 5876 и 6678 на фазах вращения, когда этот поток пересекает луч зрения. Такая высокая скорость может быть достигнута только при выпадении вещества на звезду с внутренней границы магнитосферы в режиме свободного падения.

Используя известные параметры объекта, можно оценить ожидаемый радиус гипотетической магнитосферы r_A по формуле, приведенной во многих работах (см., например, [25,26]):

$$r_A = \left[\frac{B^4 R^{12}}{(\text{rateMacc})^2 (2GM)} \right]^{1/7}, \quad (3)$$

где M и R - масса и радиус звезды, B - напряженность магнитного поля, а

{rateMass} - темп аккреции. Принимая, что масса и радиус звезды в 6.6 раз превышают эти значения для Солнца [2,6], а темп аккреции у HD259431 оценивается как $7.8 \cdot 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ [27], получаем $rA = 1.9 R$ для $B = 300$ Гс и $rA = 1.5 R$ для $B = 200$ Гс.

Из-за высокой величины V_{ini} прямым методом магнитное поле HD259431 измерить трудно, но поля 100-300 Гс типичны для Ae/Be звезд Хербига (см., например, [28,29]), так что полученная величина для радиуса гипотетической магнитосферы этого объекта представляется реалистичной.

В нашей работе впервые обнаружены признаки магнитосферы у Ae/Be звезды Хербига такого раннего спектрального класса (B6). Этот результат опровергает вывод, сделанный в [30], что у Ве звезд Хербига магнитосфера должна отсутствовать.

6. Заключение. В результате спектроскопического мониторинга Ae/Be звезды Хербига HD259431, проведенного в 4-х обсерваториях с 2010 по 2019гг., было получено 245 спектров объекта с разрешением R от 15000 до 48000 в области околозвездных линий (в основном, $H\alpha$, $H\beta$, $\text{HeI } 5876$, $\text{FeII } 4923$ и DNaI), а также отдельных линий атмосферы ($\text{HeI } 4009$, 4026). Среди обсерваторий, где осуществлялась программа наблюдений, были: а) Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КРАО), б) Южная Европейская Обсерватория в Чили (ESO), в) Обсерватория OAN SPM (Мексика) и г) Коуровская астрономическая обсерватория Уральского Федерального Университета.

Анализ спектрального материала показал, что значительная переменность наблюдается во всех исследуемых линиях на временной шкале от часов до лет. Как правило, она носит сложный многокомпонентный характер, что затрудняет ее систематизацию. Тем не менее, удалось выделить некоторые типы переменности, которые носят регулярный характер.

К одному из таких типов можно отнести противофазные изменения (с корреляцией около $r = -0.80$) бисекторной скорости эмиссионной линии $H\beta$ (на уровне $1 Fc$) и скорости красной границы абсорбционной линии $\text{HeI } 5876$. Исследованию особенностей именно этой переменности и посвящена настоящая работа из данного цикла.

Периодограммный анализ показал наличие периода изменений этих параметров $P = 2.839$ сут, близкого к ожидаемому периоду вращения звезды. Предположив, что переменность может быть связана с вращением азимутальной неоднородности около звезды, была сделана оценка наклона оси ее вращения $i = 48^\circ \pm 7^\circ$. За один цикл поворота эмиссионные бальмеровские линии могли изменить тип своего профиля от двойного эмиссионного с депрессией красного крыла до профиля типа PCyg, что соответствовало попаданию на луч зрения то аккреционного, то истекающего потока вещества. Такая картина хорошо объясняется в рамках модели магнитосферной аккреции из диска на звезду при наклоне магнитной

оси к оси вращения. При этом на луче зрения поочередно оказывались бы то зона ветра, то область аккрецируемого потока, которые, согласно модели, расположены на разных магнитных широтах. В пользу существования магнитосферы у HD259431 свидетельствует и появление крайне протяженного красного крыла у абсорбционной компоненты линий HeI 5876 и 6678 (до +400 км/с) на фазах, когда у профилей бальмеровских линий наблюдалась депрессия красного эмиссионного крыла. Эта скорость соответствует максимальной скорости аккреционного потока непосредственно перед его контактом с поверхностью звезды. Ее значение может достичь такой величины только при аккреции в режиме свободного падения с внутренней границы магнитосферы.

Оценки ожидаемого радиуса магнитосферы по заданным величинам массы и радиуса звезды, темпу аккреции и напряженности магнитного поля также приводят к реалистичным значениям: $r_A = 1.9 R$ для $B = 300$ Гс и $r_A = 1.5 R$ для $B = 200$ Гс, где R - радиус звезды. В результате, нами были впервые обнаружены убедительные признаки магнитосферы у Ве звезды Хербига столь раннего спектрального класса (В6). Ранее считалось, что Ве звезды Хербига, в отличие от Ae звезд из этой группы, не могут иметь магнитосферы [28].

Линии H γ , H β и HeI 5876 не единственные, где наблюдаются фазовые изменения профилей, рассчитанные для периода $P = 2.839$ сут. Подобные изменения демонстрируют и линии H δ , HeI 6678 и OI 7773. Но есть и линии, где этот вид переменности не наблюдается. Это линии FeII 4923, 5018, с профилями типа PCyg и линии триплета SiIII 4553, 4568, 4574, показывающие всегда двойной эмиссионный профиль. По-видимому, первые из них формируются, в основном, в зоне ветра на больших расстояниях от звезды с магнитосферой, а вторые - в экваториальном диске.

МАП, НГБ и ГГВ благодарят за поддержку грант Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-780 "Экзопланеты-4".

Работа ГСЮ была выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России, тема № FEUZ-2020-0030.

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 196140, Пулково, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: mikhailpogodin@mail.ru

² Лаборатория наблюдательной астрофизики СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальная астрофизическая лаборатория LNA/MCTI, Итажуба, Бразилия

⁴ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Республика Крым, Россия

⁵ Национальная Обсерватория ON/MCTI, Рио-де-Жанейро, Бразилия

⁶ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, Россия

⁷ Университет Северной Каролины, Отделение физики и астрономии, Гринсборо, США

⁸ Коуровская астрономическая обсерватория Уральского Федерального Университета, Екатеринбург, Россия

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

ПЕРЕЧЕНЬ СПЕКТРОВ HD259431, ПОЛУЧЕННЫХ С 2010 ПО 2019гг.

№	Дата	MJD (50000+..)	Обсерватория	Спектральная область	N	S/N
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	19.02.10	5246.372	OAN	3800-6800 Å	9	120
2	24.02.10	5251.319	OAN	3800-6800 Å	9	190
3	25.02.10	5252.356	OAN	3800-6800 Å	7	95
4	26.02.10	5253.295	OAN	3800-6800 Å	7	130
5	10.11.13	6606.988	КрАО	H α	8	80
6	12.11.13	6608.005	КрАО	H α	3	75
7	12.11.13	6608.053	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	160
8	23.11.13	6619.084	КрАО	H α	4	50
9	11.02.14	6699.933	КрАО	H β , He, Fe, Na	4	70
10	11.02.14	6699.933	КрАО	H α	2	70
11	14.03.14	6730.789	КрАО	H α	2	60
12	14.03.14	6730.843	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	65
13	15.03.14	6731.701	КрАО	H α	3	60
14	15.03.14	6731.811	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	65
15	18.03.14	6734.717	КрАО	H α	3	40
16	18.03.14	6734.771	КрАО	H β , He, Fe, Na	4	110
17	07.04.14	6754.745	КрАО	H α	2	30
18	07.04.14	6754.777	КрАО	H α	3	95
19	10.11.14	6971.896	КрАО	H α	6	40
20	11.11.14	6972.903	КрАО	H α	4	100
21	13.11.14	6974.023	КрАО	H α	5	40
22	13.11.14	6974.071	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	50
23	13.11.14	6974.863	КрАО	H β , He, Fe, Na	5	35
24	13.11.14	6974.896	КрАО	H α	3	100
25	14.11.14	6975.824	КрАО	H α	2	40
26	14.11.14	6975.859	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	30
27	25.03.15	7106.780	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	85
28	25.03.15	7106.826	КрАО	H α	4	45
29	26.03.15	7107.745	КрАО	H α	3	45
30	26.03.15	7107.823	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	45
31	03.11.15	7329.879	КрАО	H α	4	60
32	04.11.15	7330.000	КрАО	H β , He, Fe, Na	8	195
33	04.11.15	7330.877	КрАО	H α	3	70
34	04.11.15	7330.925	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	115
35	05.11.15	7331.871	КрАО	H α	2	90
36	05.11.15	7331.933	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	140
37	05.12.15	7361.290	ESO	3700-9200	2	70
38	06.12.15	7362.251	ESO	3700-9200	4	220
39	07.12.15	7363.290	ESO	3700-9200	2	180
40	26.12.15	7383.488	КрАО	H α	3	90
41	16.03.16	7463.787	КрАО	H β , He, Fe, Na	4	100

Таблица П1 (окончание)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
42	18.03.16	7465.070	ESO	3700-9200	1	150
43	21.03.16	7468.004	ESO	3700-9200	1	160
44	23.03.16	7470.027	ESO	3700-9200	1	150
45	26.09.16	7657.307	ESO	3700-9200	1	75
46	27.09.16	7658.305	ESO	3700-9200	1	105
47	28.09.16	7659.307	ESO	3700-9200	1	100
48	12.11.16	7704.082	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	150
49	12.11.16	7704.119	КрАО	H α	1	70
50	13.11.16	7705.150	КрАО	H β , He, Fe, Na	1	30
51	06.03.17	7818.859	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	80
52	07.03.17	7819.694	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	90
53	07.03.17	7819.855	КрАО	H α	4	95
54	08.03.17	7820.859	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	105
55	08.03.17	7820.905	КрАО	H α	1	35
56	09.03.17	7821.844	КрАО	H α	1	30
57	09.03.17	7821.870	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	70
58	12.03.17	7824.810	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	100
59	12.03.17	7824.878	КрАО	H α	2	60
60	03.12.17	8090.959	КрАО	H α	2	30
61	03.12.17	8090.994	КрАО	H β , He, Fe, Na	6	105
62	06.12.17	8093.015	КрАО	H α	2	45
63	06.12.17	8093.041	КрАО	H β , He, Fe, Na	4	85
64	07.12.17	8094.500	OAN	3800-6800	4	130
65	09.12.17	8096.034	КрАО	H α	2	70
66	09.12.17	8096.075	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	40
67	10.12.17	8097.002	КрАО	H α	1	40
68	12.01.18	8130.865	КАО	4100-7500	3	70
69	01.02.18	8150.855	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	30
70	01.02.18	8150.928	КрАО	H α	1	30
71	16.02.18	8165.761	КАО	4100-7500	1	90
72	25.02.18	8174.725	КАО	4100-7500	1	80
73	28.02.18	8178.225	КрАО	H α	1	70
74	20.03.18	8198.664	КАО	4100-7500	1	85
75	30.03.18	8207.830	КрАО	H β , He, Fe, Na	1	40
76	28.10.18	8419.976	КрАО	H β , He, Fe, Na	4	125
77	21.11.18	8443.918	КрАО	H β , He, Fe, Na	2	60
78	22.11.18	8444.960	КрАО	H β , He, Fe, Na	4	100
79	23.11.18	8445.844	КрАО	H β , He, Fe, Na	4	135
80	17.12.18	8469.844	КрАО	H β , He, Fe, Na	1	30
81	17.01.19	8500.956	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	150
82	22.01.19	8505.944	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	55
83	24.01.19	8507.961	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	140
84	25.01.19	8508.912	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	90
85	20.02.19	8534.838	КрАО	H β , He, Fe, Na	3	85

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

Таблица П2

ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

№	Дата	MJD (50000+...)	V/R (H α)	V_{bis} (H β) км/с	V_{red} (HeI 5876) км/с
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	19.02.10	5246.372	1.10	57	151
2	24.02.10	5251.319	1.22	20	352
3	25.02.10	5252.356	1.24	59	161
4	26.02.10	5253.295	1.25	79	138
5	10.11.13	6606.988	1.06		
6	12.11.13	6608.005	1.08		
7	12.11.13	6608.075		34	232
8	23.11.13	6619.084	1.03		
9	11.02.14	6699.855		11	311
10	11.02.14	6699.933	1.49		
11	14.03.14	6730.789	1.06		
12	14.03.14	6730.823		42	155
13	15.03.14	6731.701	1.07		
14	15.03.14	6731.800		43	202
15	18.03.14	6734.717	1.07		
16	18.03.14	6734.771		39	182
17	07.04.14	6754.745	1.23		
18	07.04.14	6754.798		64	144
19	10.11.14	6971.896	1.13		
20	10.11.14	6972.903	1.13		
21	11.11.14	6974.023	1.12		
22	12.11.14	6974.071		52	166
23	13.11.14	6974.863		45	202
24	13.11.14	6974.896	1.13		
25	13.11.14	6975.824	1.08		
26	14.11.14	6975.859		34	330
27	25.03.15	7106.780		80	129
28	25.03.15	7106.826	0.90		
29	26.03.15	7107.745	0.88		
30	26.03.15	7107.823		66	146
31	03.11.15	7329.879	0.94		
32	04.11.15	7330.000		4	390
33	04.11.15	7330.877	0.95		
34	04.11.15	7330.925		46	152
35	05.11.15	7331.871	0.92		
36	05.11.15	7331.933		62	129
37	05.12.15	7361.290	0.97	5	390
38	06.12.15	7362.251	0.96	42	150
39	07.12.15	7363.290	0.93	63	126
40	26.12.15	7383.488	1.06		
41	16.03.16	7463.787		50	135
42	18.03.16	7465.070	0.94	60	141

Таблица П2 (окончание)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
43	21.03.16	7468.004	0.97	60	130
44	23.03.16	7470.027	0.92	40	141
45	26.09.16	7657.307	1.05		
46	27.09.16	7658.305	1.02		
47	28.09.19	7659.307	0.98		
48	12.11.16	7704.082		36	300
49	12.11.16	7704.119	1.03		
50	13.11.16	7705.150		22	320
51	06.03.17	7818.859		20	240
52	07.03.17	7819.694		16	300
53	07.03.17	7819.855	0.93		
54	08.03.17	7820.859		9	300
55	08.03.17	7820.905	0.92		
56	09.03.17	7821.844	0.91		
57	09.03.17	7821.870		49	134
58	12.03.17	7824.810		52	130
59	12.03.17	7824.878	0.87		
60	03.12.17	8090.959	0.95		
61	03.12.17	8090.994		30	139
62	06.12.17	8093.015	0.96		
63	06.12.17	8093.041		42	168
64	07.12.17	8094.500	0.94	41	168
65	09.12.17	8096.034	1.04		
66	09.12.17	8096.075		22	300
67	10.12.17	8097.002	1.07		
68	12.01.18	8130.865	1.12	44	188
69	01.02.18	8150.855		51	130
70	01.02.18	8150.928	1.12		
71	16.02.18	8165.761	1.11	37	159
72	25.02.18	8174.725	1.13	56	162
73	28.02.18	8178.225	1.16		
74	20.03.18	8198.664	1.15	51	178
75	30.03.18	8207.830		54	142
76	28.10.18	8419.976		4	350
77	21.11.18	8443.918		44	150
78	22.11.18	8444.960		41	140
79	23.11.18	8445.844		38	135
80	17.12.18	8469.844		30	185
81	17.01.19	8500.956		52	140
82	22.01.19	8505.944		32	145
83	24.01.19	8507.961		41	150
84	25.01.19	8508.912		43	140
85	20.02.19	8534.838		40	140

(1) - номер спектра, среднего за ночь, (2) - календарная дата, (3) - MJD для усредненного спектра, (4) - отношение V/R линии $H\alpha$, (5) - бисекторная скорость линии $H\beta$ на уровне $1 Fc$, (6) - скорость красной границы линии HeI 5876

CIRCUMSTELLAR PROPERTIES OF THE HERBIG Be STAR HD 259431. I. SIGNATURES OF MAGNETOSPHERIC ACCRETION

M.A.POGODIN¹, S.E.PAVLOVSKIY¹, N.G.BESKROVNAYA¹, N.A.DRAKE^{2,3},
O.V.KOZLOVA⁴, I.Yu.ALEKSEEV⁴, M.BORGES FERNANDES⁵,
C.B.PEREIRA⁵, G.G.VALYAVIN⁶, A.S.MIROSHNICHENKO^{1,7},
S.Yu.GORDA⁸, D.L.GORSHANOV¹

We present results of the spectroscopic study of the Herbig Ae/Be star HD259431 carried out from 2010 to 2019 using high-resolution spectrographs in: a) Crimean astrophysical observatory, b) European Southern Observatory (ESO, Chile), c) Observatory OAN SPM in Mexico and d) Kourovka astronomical observatory (UrFU). 245 spectra of the object obtained near the circumstellar lines $H\alpha$, $H\beta$, HeI 5876, FeII 4923, DNaI, and also near the atmospheric lines HeI 4009 and 4026 were analyzed. In this paper we focus attention on the limited part of the results connected with the analysis of cyclic variations of parameters of some circumstellar lines on the timescale of one day. Counter-phase variations of the bisector velocity of the $H\beta$ emission profile and the velocity of the red boundary of the absorption of the HeI 5876 line profile were revealed. We found the period of this variability $P=2.839$ days. Assuming that this value can be the rotation period of the star, we estimated the inclination angle of the rotation axis $i=48^\circ \pm 7^\circ$. The $H\beta$ and $H\gamma$ line profiles look at different rotation phases as a PCyg profile or as a double-peaked emission profile with a depression in the red wing alternately, and we assume that this can be connected with the existence of a magnetosphere with the magnetic axis inclined relative to the rotation axis. In this case, the observer can see during one period either the accretion flow at high latitudes or a wind zone at lower latitudes. The high velocity of the red boundary of the HeI 5876 absorption at phases when the accretion flow intersects the line of sight (up to +400 km/s) also speaks in favour of the existence of a magnetosphere of HD259431. The similar character of variability is demonstrated also in the lines $H\delta$, HeI 6678 and OI 7773. At the same time, a number of lines such as the FeII 4923, 5018 and the SiIII triplet do not show such variations. We note that our result is the first detection of magnetospheric accretion among the early-type Herbig Be stars in contrast to the earlier conclusion that the Herbig Be stars have no magnetospheres.

Keywords: *Herbig Ae/Be stars: circumstellar envelopes: disk accretion: wind:*
HD 259431

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.H.Herbig*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **4**, 337, 1960.
2. *S.Kraus, T.Preibish, K.Ohnaka et al.*, *Astrophys. J.*, **676**, 490, 2008.
3. *E.Hone, S.Krauss, C.L.Davies et al.*, *Astrophys. J.*, **623**, 38, 2019.
4. *J.D.Ilee, J.Fairlamb, R.D.Oudmaijer et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **445**, 3723, 2014.
5. *J.Menu, R.Boekel, Th.Henning et al.*, *Astron. Astrophys.*, **581**, 107, 2015.
6. *D.Li, N.Marinas, C.M.Telesco et al.*, *Astrophys. J.*, **796**, 74, 2014.
7. *P.W.Merrill, C.G.Burwell*, *Contrib. from Mount Wilson Obs.*, **471**, 1, 1933.
8. *V.P.Swings, O.Struve*, *Astrophys. J.*, **97**, 194, 1943.
9. *T.Bagnoli, R. van Lieshout, L.B.M.Waters et al.*, *Astrophys. J.*, **724**, L5, 2010.
10. *C.L.Imhoff*, *Astron. Soc. Pasif. Conf. Ser.*, **62**, 107, 1994.
11. *J.-C.Bouret, C.Martin, D.Deleuib et al.*, *Astron. Astrophys.*, **410**, 175, 2003.
12. *E.M.Halbedel*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **101**, 1004, 1989
13. *D. de Winter, M.E. van den Ancker, A.Maira et al.*, *Astron. Astrophys.*, **380**, 609, 2001.
14. *J.N.Chkhikvadze*, *Astrophysics*, **47**, 454, 2004.
15. *V.S.Shevchenko*, *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*, **62**, 57, 1994.
16. *M.E. van den Ancker, D. de Winter, H.R.E.Tjin A Dje*, *Astron. Astrophys.*, **330**, 145, 1998.
17. *M.Cohen, L.V.Kuhi*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **41**, 743, 1979.
18. *J.Hernandez, N.Calvet, C.Bricefio et. al.*, *Astron. J.*, **127**, 1682, 2004.
19. *O.Stahl, A.Kaufer, S.Tublesing*, *Astron. Soc. Pasif. Conf. Ser.*, **188**, 331, 1999.
20. *В.Е.Панчук, М.В.Юшкин, М.В.Якопов*, *Астрон. Бюллетень*, **69**, 497, 2014.
21. *J.D.Scargle*, *Astrophys. J.*, **263**, 835, 1982.
22. *J.H.Horne, S.L.Baliunas*, *Astrophys. J.*, **302**, 757, 1986.
23. *E.Alecian, G.A.Wade, C.Catala et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **429**, 1001, 2013.
24. *M.Camenzind*, *Rev. in Modern Astronomy*, **3**, 234, 1990.
25. *Y.-M.Wang*, *Astrophys. J.*, **465**, L111, 1996.
26. *J.Arons, S.M.Lee*, *Astrophys. J.*, **207**, 914, 1976.
27. *B.Donehew, S.Brittain*, *Astron. J.*, **141**, 46, 2011.
28. *G.Wade, S.Bagnulo, D.Drouin et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **376**, 1145, 2007.
29. *S.Hubrig, B.Stelzer, M.Schöller et al.*, *Astron. Astrophys.*, **502**, 283, 2009.
30. *P.W.Cauley, C.M.Johns-Krull*, *Astrophys. J.*, **797**, 112, 2014.