

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АККРЕЦИИ И ОКОЛОЗВЕЗДНОЙ ЭКСТИНКЦИИ КАК ПРИЧИНА НЕОБЫЧНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ WTTS ЗВЕЗДЫ V715 PER

© 2024 г. В. П. Гринин^{1*}, И. С. Потравнов^{2,3}, М. В. Еселевич³, Н. В. Ефимова¹,
О. Ю. Барсунова¹, С. Ю. Шугаров^{4,5}, Г. А. Борман⁶

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт астрономии РАН, Москва, Россия

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁴ Астрономический институт им. П.К. Штерберга

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Astronomical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Tatranska Lomnitsa, Slovakia

⁶ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

Поступила в редакцию 21.10.2024 г.

После доработки 27.10.2024 г.; принята к публикации 12.11.2024 г.

Представлены новые результаты фотометрического и спектрального мониторинга WTTS звезды V715 Per, расположенной в молодом скоплении IC 348 и демонстрирующей комплексный характер переменности. Показано, что переменность эквивалентной ширины эмиссионной линии Na модулирована с периодом осевого вращения звезды и находится в противофазе с изменениями блеска. Это служит подтверждением ранее предложенной модели фотометрической переменности V715 Per, основанной на переменной околозвездной экстинкции во внутреннем диске на радиусе коротации. По нашим оценкам, радикальная смена характера переменности, произошедшая после 2010 г., с большой вероятностью обусловлена изменениями темпа аккреции в системе. Новые данные фотометрии показали завершение продолжительного ослабления блеска, наблюдавшегося у звезды в период 2017–2023 гг. и вызванного затмением протяженной пылевой структурой во внешних областях диска. Уточненный период малоамплитудной компоненты переменности составил 5.22^d и показал стабильность на протяжении всего ряда наблюдений.

Ключевые слова: звезды Т Тельца, фотометрическая и спектральная переменность, внутренние области диска, аккреция, околозвездная экстинкция.

DOI: 10.31857/S0320010824100037, EDN: NBNWXZ

ВВЕДЕНИЕ

К звездам типа Т Тельца относятся молодые солнцеподобные звезды, находящиеся на стадии эволюции до Главной Последовательности (Петров, 2003). Звезды Т Тельца окружены газопылевыми протопланетными дисками, вещество которых аккрецирует на звезду. Наличие у звезд этого типа крупномасштабных магнитных полей напряженностью $\sim 10^3$ Гс обуславливает взаимодействие их дисков с родительской звездой в режиме магнитосферной аккреции (Бувье и др., 2007; Хартманн и др., 2016). В зависимости от темпа аккреции и ее наблюдательных проявлений звезды типа Т Тельца подразделяются на классические (CTTS) и так называемые weak-line (WTTS) — объекты на стадии диссипации внутренних областей диска и, соответственно, с ослабленными аккреционными маркерами. Присутствие на поверхности звезд Т Тельца холодных магнитных и горячих аккреционных пятен, а также эффекты переменной околозвездной эк-

стинкции обуславливают сложный характер их фотометрической переменности.

Помимо непериодических изменений блеска, вызванных прохождением на луче зрения динамически нестабильных короткоживущих пылевых структур во внутренних областях аккреционных дисков, у звезд типа Т Тельца наблюдается переменность, модулированная с периодом осевого вращения звезды. Она может быть вызвана как вращением запятанной звездной поверхности (Хербст и др., 1994), так и периодическим экранированием звезды внутренним краем аккреционного диска, неосесимметрично возмущенным наклонной магнитосферой (так называемый эффект AA Tau, Бувье и др., 1999). Важно отметить, что благодаря низкой светимости звезд типа Т Тельца крупная пыль может выживать в непосредственной близости звезды и увлекаться аккрецирующим газом внутрь магнитосферы и аккреционных колонок (Нагель, Бувье, 2019, 2020), увеличивая эффективный вертикальный масштаб диска на границе магнитосферы и, соответственно, околозвездную экстинкцию.

*Электронный адрес: vgcrao@mail.ru

Таким образом, у звезд типа Т Тельца следует ожидать связь между вариациями темпа аккреции и изменениями околозвездной экстинкции. Их кривые блеска могут служить для диагностики эффектов взаимодействия пылевой компоненты диска и магнитосферы. Однако для однозначной интерпретации данных наблюдений и отождествления конкретного механизма переменности, помимо фотометрии, необходимо также контролировать уровень аккреционной активности по данным спектроскопии.

В рамках программы фотометрического мониторинга молодого скопления IC 348 (Барсунова и др., 2015, 2016, 2022) были получены многолетние (на интервале 15–20 лет) кривые блеска звезд типа Т Тельца, показавшие большое разнообразие и комбинации различных типов переменности. Одной из наиболее удивительных кривых блеска обладает звезда V715 Per. Подробное исследование и интерпретация ее переменности представлено в работе Гринина и др. (2018). V715 Per (спектр K6e, $I \approx 13^m$) принадлежит к подклассу WTTS (Гринин и др., 2018). У звезды наблюдалась двухкомпонентная переменность блеска: алголеподобные минимумы (переменность типа UX Ori), резко прекратившиеся в 2011 г., а также периодическая компонента ($P \approx 5.23^d$) с изменяющейся амплитудой. Интерпретация, предложенная в статье Гринина и др. (2018), состоит в том, что вариации темпа аккреции в системе приводят к изменению геометрических условий экранирования звезды пылью. Так, алголеподобные минимумы обусловлены высоким темпом аккреции, приводящим к появлению дополнительного пылевого вещества вблизи звезды. Моделирование показало, что за алголеподобные минимумы, действительно, может быть ответственна пыль, проникающая в магнитосферу (Нагель, Бувье, 2020). Уменьшение темпа аккреции приводит к прекращению алголеподобных минимумов. В свою очередь, малоамплитудная периодическая компонента представляет собой переменность типа AA Tau. В рамках этого сценария увеличение амплитуды колебаний блеска, отмеченное после 2011 г., согласуется с увеличением радиуса магнитосферы вследствие уменьшения темпа аккреции. В результате, вертикальный масштаб пылевого диска на границе с магнитосферой увеличивается и приводит к более эффективному экранированию звезды и росту фотометрической амплитуды. Наблюдения в последующих сезонах 2018–2021 гг. (Барсунова и др., 2022) показали продолжение роста амплитуды периодической компоненты переменности в согласии с предложенной моделью, но также обнаружили заметное понижение среднего уровня яркого состояния звезды, начавшееся в 2017 г.

Для подтверждения механизма фотометрической переменности V715 Per, предложенного Грининым и др. (2018), необходимы также данные спектральных наблюдений, позволяющие оценить уровень аккреционной активности звезды в различные эпохи.

Прежние спектральные наблюдения V715 Per носили эпизодический характер, в литературе приводятся единичные оценки эквивалентной ширины эмиссионной линии H α (Хербиг, 1998; Луман и др., 1998; Дам, 2008). Нами был проведен спектральный мониторинг V715 Per на интервале двух лет, покрывающий все фазы осевого вращения звезды. В настоящей статье обсуждаются полученные результаты, а также представляются новые данные фотометрических наблюдений, полученных после 2021 г. Обсуждаются дополнительные детали на обобщенной кривой блеска.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Спектральные наблюдения V715 Per проводились на Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН (ССО) в период с декабря 2021 г. по декабрь 2023 г. с помощью 1.6-м. телескопа АЗТ-33ИК, оснащенного спектрографом низкого разрешения ADAM (Буренин и др., 2016; Афанасьев и др., 2016). Длиннощелевые спектры с номинальным разрешением $R \approx 1200$ ($\Delta\lambda \approx 3.6 \text{ \AA/pix}$) были получены в диапазоне $\Delta\lambda \approx 6400\text{--}10\,000 \text{ \AA}$ с использованием гризмы VPGH600R (600 штр./мм) и с щелью шириной $1.5''$ в проекции на небесную сферу. Спектры регистрировались с помощью CCD детектора на основе чипа E2V с размером пикселя 26 мкм и форматом кадра 1024×256 . Обычно каждую наблюдательную ночь получались 3–4 кадра со спектром объекта с экспозицией 600^s , которые затем суммировались при обработке. Итоговая величина отношения сигнала к шуму составляла $S/N \approx 20\text{--}80$ (на 1 pix) в зависимости от погодных условий.

Каждую ночь также получался полный набор калибровочных кадров, включавший кадры темнового тока (bias), кадры кварцевой лампы для коррекции плоского поля и спектр калибровочной Ne–Ar лампы для привязки шкалы длин волн. Для абсолютной спектрофотометрической калибровки также квазисинхронно получались спектры звезды–стандарта G191–B2B.

Обработка спектров выполнялась с помощью стандартной методики в пакете IRAF. Процедура включала в себя комбинирование кадров, коррекцию темнового тока и деление изображений на нормализованное плоское поле. Привязка к шкале длин волн, идентификация положения спектра на кадре, определение области фона и экстракция одномерного изображения выполнялись с помощью инструментов контекста *longslit*. В ходе спектрофотометрической калибровки на основе спектров стандартов определялась кривая спектральной чувствительности, которая корректировалась за атмосферную экстинкцию и затем применялась к спектрам объекта.

За указанный период V715 Per наблюдалась в течение 49 различных ночей. Из них четыре наблюдатель-

ных сета имели продолжительность 5–7 ночей, близкую к периоду осевого вращения звезды.

В дополнение к спектральным наблюдениям продолжался фотометрический мониторинг V517 Per, проводимый на телескопе АЗТ-8 (0.7 м) Крымской астрофизической обсерватории с помощью ПЗС-камеры AP7p (511 × 511 пикселей, размер пикселя 24 × 24 мкм), и на телескопах G1 (0.5 м) и G2 (0.6 м) Словацкой Академии Наук (Tatranska Lomnica) с помощью ПЗС камер ST10–XME (2184 × 1472 пикселей, размер пикселя 6.8 мкм) и FLIML3041 (2048 × 2048 пикселей, размер пикселя 15 × 15 мкм) соответственно. Наблюдения проводились в трех оптических фотометрических полосах v, r, i и приводились к фотометрической системе Johnson–Cousins V, R_c, I_c (далее для краткости индекс “с” мы будем опускать). Для первого сета наблюдений на телескопе G1 + ST10–XME (2009–2010 гг.) с целью согласования нуля-пункта фотометрических систем в каждой полосе была введена поправка к стандартным величинам, рассчитанная как разность между средней звездной величиной по данным наблюдениям и средней звездной величиной для этого же сезона по наблюдениям на АЗТ-8.

Измерения блеска звезд выполнялись методом апертурной дифференциальной фотометрии с использованием в качестве стандартов звезд того же скопления H139, H205 и H210, характеризующихся наиболее стабильным фотометрическим поведением. Средняя точность фотометрии составляет 0.04^m в полосе V и около 0.03^m в полосах R и I .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кривая блеска V715 Per и уточнение периода малоамплитудной компоненты фотометрической переменности

Новые данные фотометрии, полученные в 2021–2024 гг., продолжают кривую блеска V715 Per, опубликованную в работах Барсуновой и др. (2022) и Гринина и др. (2018). Из сводной кривой блеска, представленной на рис. 1, видно, что за период наших оптических наблюдений с 2003 г. V715 Per продемонстрировала различные типы переменности. До минимума в ноябре 2010 г. (JD ~ 2455500) кривая блеска V715 Per сочетала алголеподобные ослабления блеска с нарастающей амплитудой и малоамплитудную периодическую переменность с характерной амплитудой $\Delta I \sim 0.05^m$, $\Delta R \sim 0.1^m$, $\Delta V \sim 0.2^m$. Перед самым глубоким минимумом 2010 г. произошло постепенное ослабление среднего уровня яркого состояния звезды, особенно хорошо заметное в полосе V . После минимума 2010 г. наблюдалось постепенное увеличение среднего уровня яркого состояния на величину $\sim 0.2^m$, одинаковую для всех трех фильтров. Также увеличилась амплитуда периодических колебаний блеска.

Указанные выше особенности фотометрической активности звезды уже были отмечены ранее в статье Гринина и др. (2018). Новым элементом кривой блеска звезды является неглубокий ($\Delta I \sim 0.2^m$) минимум, начавшийся в декабре 2016 г. и продолжавшийся около 6 лет. Он наблюдался на фоне периодических колебаний блеска с амплитудой $\Delta I \sim 0.3^m$. На момент последних наблюдений в 2024 г. амплитуда периодической переменности оставалась постоянной на уровне максимальных значений, достигнутых в 2016 г.

Построенные диаграммы цвет–величина (рис. 2) для периодов до максимума 2016 г. и во время продолжительного минимума показывают разный наклон цветовых треков: во время минимума он немного круче, чем до него. Это указывает на то, что за ослабление блеска звезды во время этого минимума 2017–2023 гг. ответственна более крупная пыль, нежели за переменность предыдущих лет.

По новому массиву данных мы также уточнили период переменности, связанной с осевым вращением звезды. Для этого из наблюдений были исключены точки, соответствующие алголеподобным минимумам. Из полученного массива был вычтен тренд, полученный двойным усреднением (см. ниже рис. 6 в Приложении). Периодограмма, рассчитанная по методу Ломба–Скэргла, показала максимум, соответствующий периоду $P = 5.220^d$ (вероятность ложной тревоги $FAP < 0.001$) (см. ниже рис. 7, Приложение)¹.

В предыдущих работах (Барсунова и др. (2022) и (Гринин и др., 2018) был приведен период 5.23^d . Однако он был найден по меньшему массиву данных. Кроме того, в 2003–2010 гг. фазовое изменение блеска звезды имело небольшую амплитуду (рис. 3). Это могло оказать влияние на предыдущую оценку периода. Благодаря уточненному периоду, мы выяснили, что никакого сдвига фазовой кривой, о котором сообщалось в статье Барсуновой и др. (2022), не наблюдается. После минимума 2010 г. фазовые кривые разных сезонов хорошо коррелируют между собой.

Переменность линии H α

На основе полученных спектрограмм V715 Per мы провели измерения эквивалентной ширины (EW) эмиссионной линии H α . Измерения проводились на спектрах, нормированных относительно уровня континуума. Эквивалентная ширина вычислялась прямым интегрированием профиля эмиссионной линии. Оценка ошибки измерений EW была выполнена с использованием подхода (Вольман и Эверсберг, 2006), где стандартное отклонение измерения определяется как:

$$\sigma(EW) = \sqrt{1 + \frac{F}{F_c} \frac{\Delta\lambda - EW}{S/N}}, \quad (1)$$

¹Заметим, что значение периода 5.22^d приводится также в статье Нордхаген и др. (2006). Предложенная этими авторами модель переменности звезды отличается от представленной в нашей статье: они предполагают, что периодические колебания блеска V715 Per обусловлены поверхностной неоднородностью звезды.

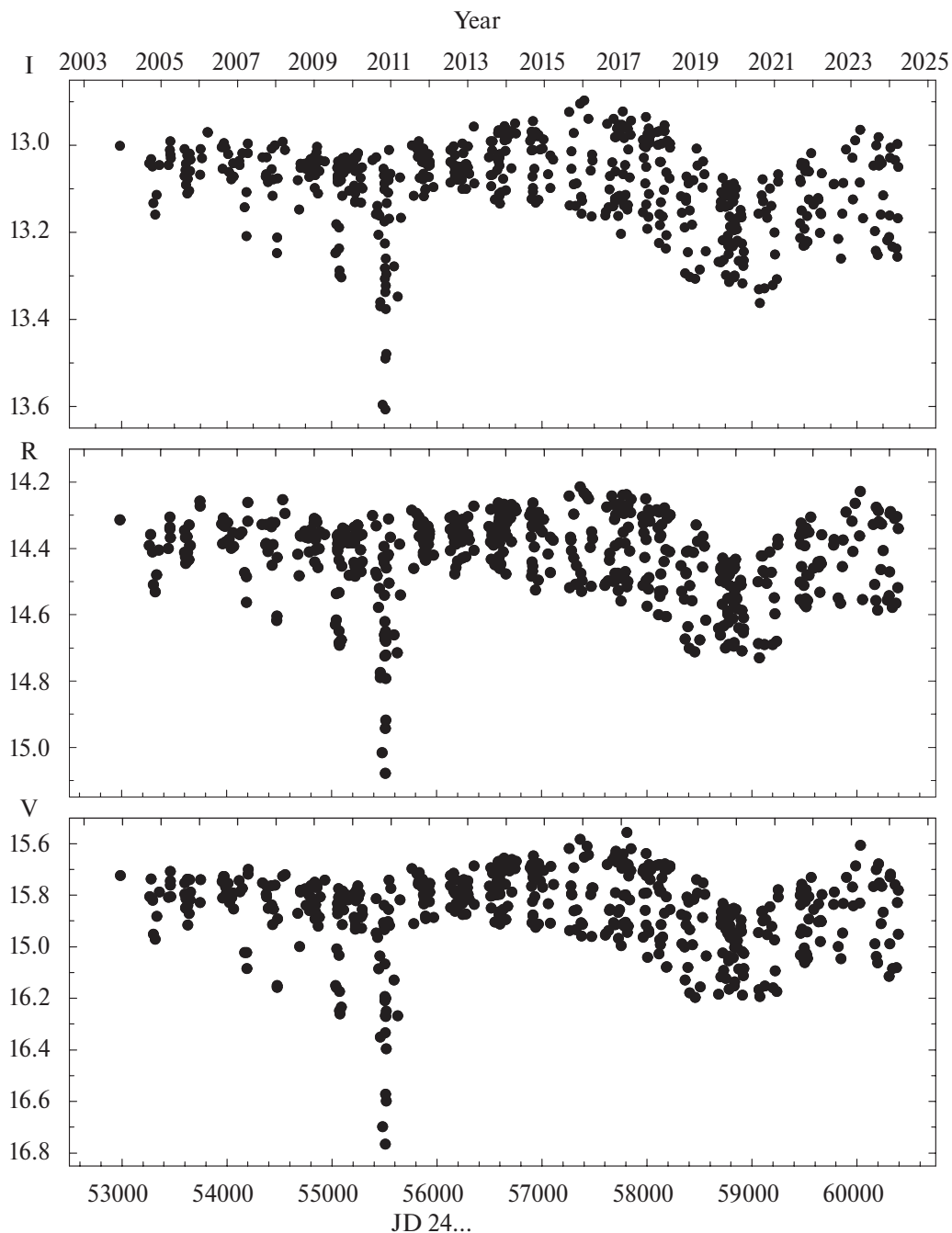


Рис. 1. Кривая блеска V715 Per в полосах V, R, I.

здесь F и F_c — потоки в линии и континууме соответственно, $\Delta\lambda$ — интервал длин волн, занимаемый эмиссионной линией.

На рис. 4 представлены результаты измерений $EW(H\alpha)$ вместе с тремя значениями, полученными ранее в статьях Хербига (1998), Луман и др. (1998); Дам (2008). Последнее из этих трех наблюдений, выполненное в 2006 г. Дамом (2008), пришлось на временной интервал, в котором у звезды начались алгоподобные минимумы блеска с нарастающей амплитудой. Значение $EW(H\alpha) = 8.03 \text{ \AA}$ в этот момент оказалось в несколько раз больше по сравнению с двумя

более ранними наблюдениями Хербига (1998) и Луман и др. (1998). На основании этого Гринин и др. (2018) предположили, что в интервале времени между этими наблюдениями у звезды повысился темп аккреции. Как следует из рис. 4, новые спектральные наблюдения, выполненные в 2021–2023 гг., подтверждают это предположение: среднее значение $EW(H\alpha)$ за этот период оказалось в несколько раз меньше по сравнению с наблюдениями в 2006 г.

На рис. 5 представлена фазовая кривая вариаций $EW(H\alpha)$. Для вычисления фаз использовалась эфемерида $JD(\text{max.light}) = 2459563.341 + 5.22 \times E$ и

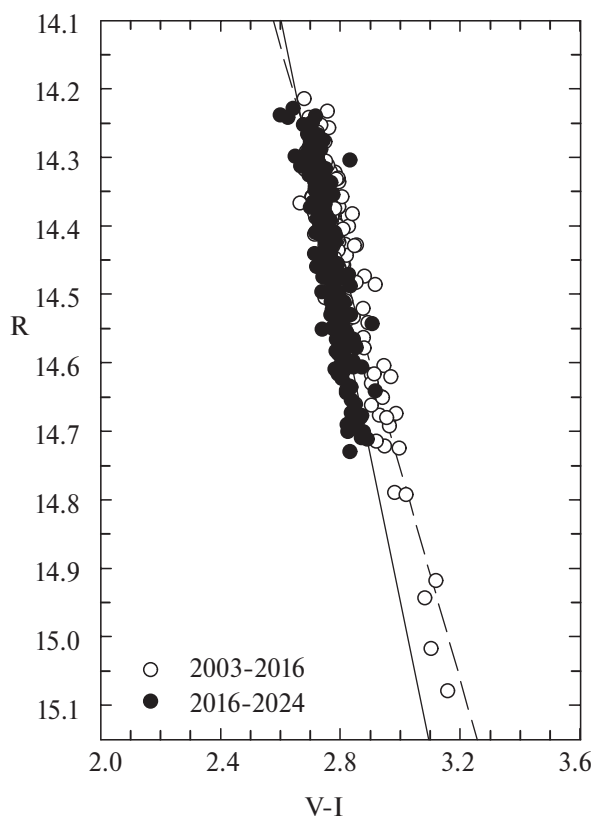


Рис. 2. Диаграмма цвет—величина для двух фрагментов кривой блеска: до максимума 2016 г. (штриховая линия, открытые кружки) и после (сплошная линия, заполненные кружки). Прямыми линиями показан наклон цветových треков. Коэффициент корреляции Пирсона составляет 0.86 и 0.75 соответственно.

уточненный период $P = 5.22^d$ (см. предыдущий раздел). В качестве начального момента был выбран максимум фотометрического блеска V715 Per в полосе I по данным наблюдений 2021–2023 гг. На рисунке ясно видна переменность $EW(H\alpha)$ на временном масштабе нескольких суток, превышающая ошибки измерений и модулированная с периодом осевого вращения звезды. Характерной особенностью является наличие среднего уровня эмиссии в $H\alpha$, соответствующего $EW(H\alpha) \approx 2.7 \text{ \AA}$. В диапазоне фаз $\phi = 0.2\text{--}0.6$ систематически наблюдается увеличение эквивалентной ширины линии: $EW(H\alpha) \approx 3.7 \text{ \AA}$. В отдельные ночи были получены еще большие значения вплоть до $EW(H\alpha)_{\max} = 6.4 \text{ \AA}$, наблюдавшееся 16.01.2022. Следует заметить при этом, что ни одно из наших измерений не превысило величины $EW(H\alpha) = 8.03 \text{ \AA}$, полученной Дамом (2008). Остальные два исторических измерения $EW(H\alpha) \approx 2.0 \text{ \AA}$ (Хербиг, 1998) и $3.6 \text{ \AA}$ (Луман и др., 1998) находятся в пределах наблюдавшихся нами значений. Интересно проследить поведение $EW(H\alpha)$ на спектрах, полученных в последовательные ночи для нескольких вращательных циклов. Такие последовательности спектров были получены нами, например, в периоды 25.03–

30.03.2022 и 28.11–3.12.2023. В обоих случаях в указанном выше интервале фаз были отмечены повышенные значения $EW(H\alpha)$. В то же время наличие на графике точек, соответствующих “фоновому” значению $EW(H\alpha)$, означает, что увеличение эквивалентной ширины линии $H\alpha$ в диапазоне фаз $\phi = 0.2\text{--}0.6$ не является переменным, а носит статистический характер.

Сравнение фазовой кривой изменений $EW(H\alpha)$ с фазовой кривой блеска в полосе I , имеющей квазисинусоидальный характер и также приведенной на рис. 5, показывает явную антикорреляцию между эквивалентной шириной линии $H\alpha$ и блеском звезды. При этом самые сильные изменения $EW(H\alpha)$ происходят на фазе падения блеска. Возвращение эквивалентной ширины линии к нормальному состоянию происходит быстрее, чем рост блеска до максимального значения. Сходный эффект также наблюдался у AA Tau (Донати и др., 2010).

Аккреционная активность V715 Per

Используя результаты спектральных наблюдений, мы сравнили уровень аккреционной активности в эпоху глубоких алголеподобных минимумов (до 2011 г.) и в текущую эпоху, когда наблюдается в основном периодическая компонента блеска. Для этих оценок мы использовали также эмпирическую зависимость светимости в линии $L_{H\alpha}$ от аккреционной светимости L_{acc} (Фанг и др., 2009). Светимость в линии связана с определяемой из наблюдений эквивалентной шириной $EW(H\alpha)$ как $L_{H\alpha} = 4\pi D^2 F_C EW(H\alpha)$. Здесь $D = 334 \text{ пк}$ (Gaia Collaboration, 2023) – расстояние до звезды, а F_C – поток в континууме в окрестности линии $H\alpha$, который определялся из соответствующей модели атмосферы из сетки MARCS (Густавсон и др., 2008). Темп аккреции $\dot{M}_{\text{acc}}$ выражается через аккреционную светимость как:

$$\dot{M}_{\text{acc}} = \frac{L_{\text{acc}} R_*}{GM_*} \left(1 - \frac{R_*}{R_m}\right)^{-1}, \quad (2)$$

где R_* , M_* – радиус и масса звезды соответственно, а R_m – радиус магнитосферы звезды. Для аккрецирующих звезд типа Т Тельца в хорошем приближении можно считать радиус магнитосферы совпадающим с радиусом коротации $R_{\text{cor}} = (GM_*/\omega^2)^{1/3}$. Подставляя фундаментальные параметры V715 Per $R_* = 2.27 R_\odot$, $M_* = 0.7 M_\odot$ из работы (Роман-Зунига и др., 2023) (находящиеся в хорошем согласии со сводкой параметров из статьи Гринина и др., 2018), получаем радиус коротации $R_{\text{cor}} \equiv R_m \approx 5 R_*$.

Для двух значений эквивалентной ширины линии $H\alpha$: $EW(H\alpha) = 8.03 \text{ \AA}$, полученного Дамом (2008) в эпоху, когда у звезды наблюдались алголеподобные минимумы, и среднего значения $EW(H\alpha) = 2.7 \text{ \AA}$ по нашим наблюдениям на ССО в текущую эпоху – мы получили значения аккреционной светимости

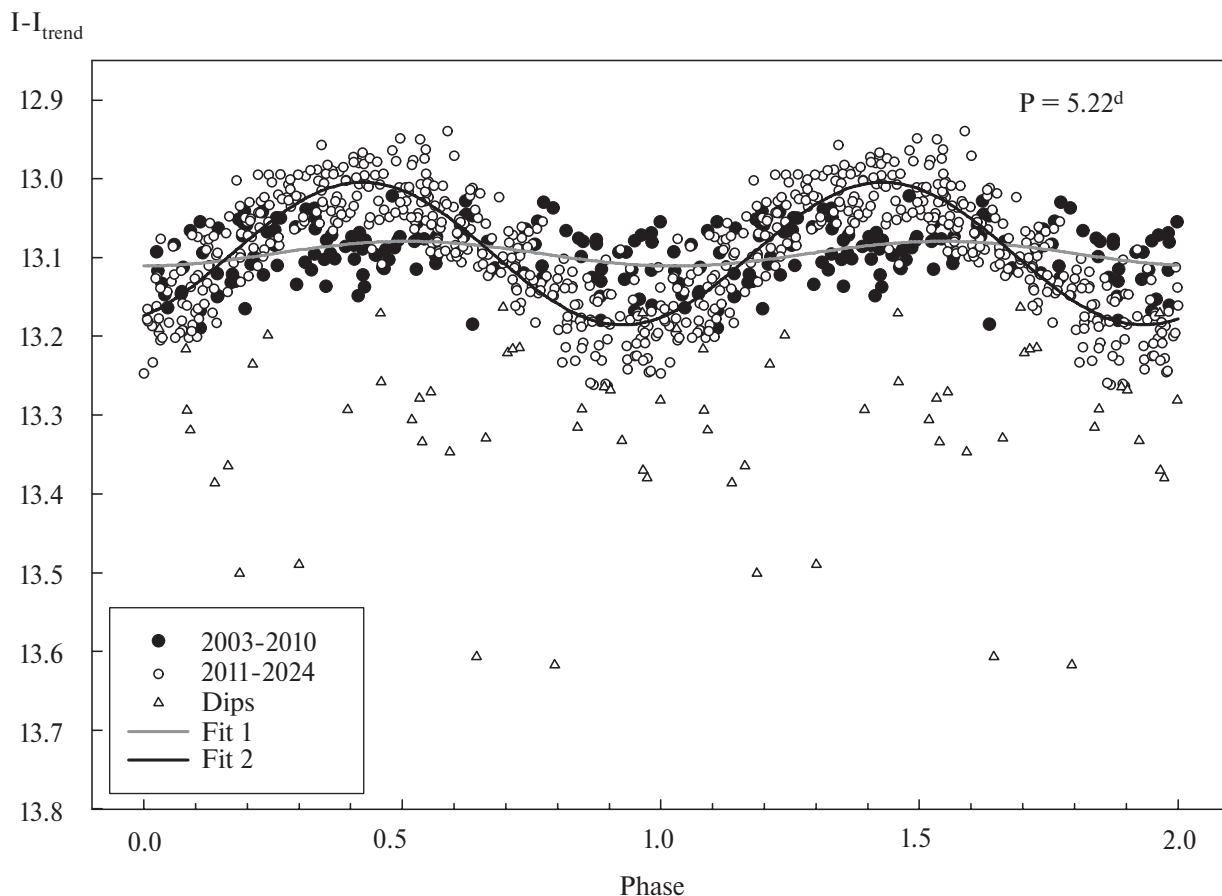


Рис. 3. Фазовая кривая в полосе I для данных с вычтенным трендом. Открытыми и заполненными кружками показан массив, использовавшийся при анализе, для периодов до и после затмения 2010 г. соответственно; треугольниками показаны точки, соответствующие минимумам. Серой и черной линиями показаны синусоидальные аппроксимации для периодов до и после затмения 2010 г. соответственно.

сти $\log(L_{\text{acc}}/L_{\odot}) = -2.03$ и $\log(L_{\text{acc}}/L_{\odot}) = -1.44$ соответственно. Подставляя полученные значения в соотношение (2), находим темпы аккреции $\dot{M}_{\text{acc}} = 4.95 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ и $\dot{M}_{\text{acc}} = 1.14 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ для 2006 г. и в текущую эпоху соответственно. Из этих оценок следует, что темп аккреции по наблюдениям 2006 г. был почти в четыре раза больше текущего значения.

ОБСУЖДЕНИЕ

С учетом фотометрических наблюдений в сезонах 2021–2024 гг., представленных в настоящей статье, общая продолжительность фотометрического мониторинга WTTS звезды V715 Per составила 21 год. На протяжении этого интервала времени звезда продемонстрировала беспрецедентную смену характера переменности. С 2003 по 2010 г. у звезды наблюдались нерегулярные алгоподобные минимумы с нарастающей амплитудой на фоне малоамплитудной периодической переменности. После 2010 г. алгоподобные минимумы внезапно прекратились, а амплитуда периодической компоненты и уровень яркого состо-

яния стали постепенно увеличиваться. Новые данные фотометрии за 2021–2024 гг. демонстрируют сохранение периодической переменности на фоне вариаций уровня яркого состояния. Алгоподобные минимумы в это время по-прежнему не наблюдались. В статье Гринина и др. (2018) была предложена модель, в которой необычная фотометрическая переменность V715 Per обусловлена переменной околозвездной экстинкцией, а смена характера переменности связана с вариациями темпа аккреции в системе.

Результаты нашего спектроскопического мониторинга V715 Per на Саянской солнечной обсерватории в 2021–2023 гг. подтвердили наличие эмиссии в линии $EW(H\alpha)$ в текущую эпоху и показали ее переменность на временном масштабе нескольких суток. Свертка с уточненным в настоящей работе периодом $P = 5.22^d$ показала, что переменность эмиссии $EW(H\alpha)$ модулирована с периодом осевого вращения звезды. Сравнение с фазовой кривой блеска показывает явную антикорреляцию с $EW(H\alpha)$: при ослаблении блеска наблюдается рост эмиссии в линии. Так как переменность показателей цвета периодической компоненты

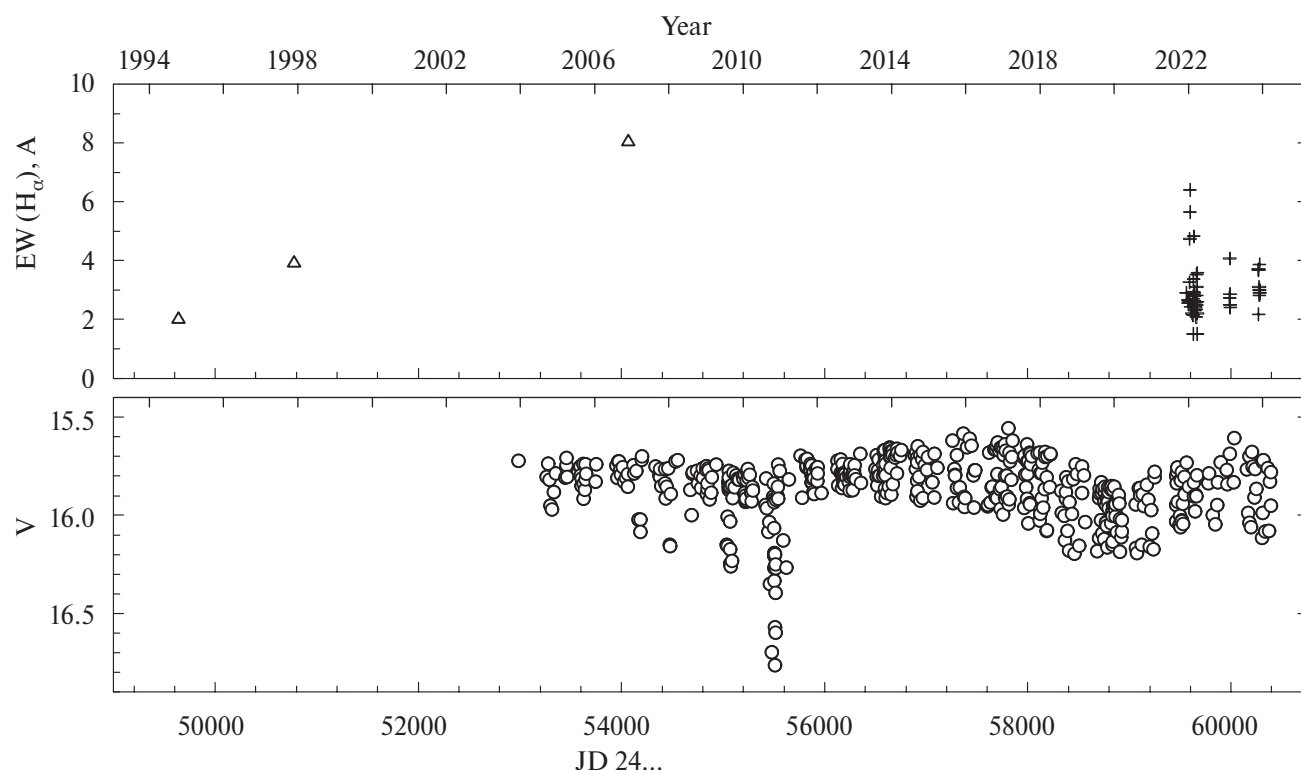


Рис. 4. Верхняя панель: измерения эквивалентных ширин линии $H\alpha$ в спектре V715 Per. Треугольники — литературные данные, крестики — результаты нашего мониторинга в 2021–2023 гг. Нижняя панель: кривая блеска в полосе V по данным 2003–2023 гг.

демонстрирует их увеличение с ослаблением блеска, согласующееся с межзвездным законом покраснения (Барсунова и др., 2022), то эта переменность ранее была отождествлена с затмениями околозвездной пылью. Поскольку, однако, амплитуда периодической компоненты невелика, наблюдаемая антикорреляция в изменениях $EW(H\alpha)$ с блеском не может быть объяснена одним лишь коронографическим эффектом, связанным с затмениями. При наблюдаемой амплитуде колебаний блеска в полосе R (около 0.35^m) максимально возможное увеличение $EW(H\alpha)$ за счет этого эффекта не превышает 40%, тогда как наблюдения дают увеличение $EW(H\alpha)$ в 2–2.5 раза. Это говорит о том, что во время таких событий увеличивается не только эквивалентная ширина этой линии, но и поток излучения, а следовательно, и темп аккреции. Другой причиной, по которой коронографический эффект не играет большой роли в наблюдаемых вариациях $EW(H\alpha)$, является отмеченная выше асимметрия в поведении линии $H\alpha$ с фазой колебаний блеска. Причиной периодических вариаций темпа аккреции могут быть возмущения на границе между магнитосферой и диском, вызванные наклоном магнитного диполя относительно оси вращения звезды. Моделирование переменности AA Tau в работе Есау и др. (2014) показало, что в такой модели должны наблюдаться изменения профиля линии $H\alpha$ с фазой колебаний блеска, но наблюдательная проверка этого в слу-

чае V715 Per возможна только с помощью спектроскопии высокого разрешения.

В рамках модели переменности типа AA Tau, предложенной в статье Гринина и др. (2018) для объяснения периодических малоамплитудных изменений блеска V715 Per, в качестве экрана выступает возмущенный внутренний край околозвездного диска. Этот экран не является стабильным. Ключевой особенностью, прослеживающейся на протяжении почти всего 21-летнего периода наблюдений V715 Per, оказывается увеличение его эффективной высоты, приводящее к росту амплитуды затмений. Возможным объяснением является увеличение радиуса магнитосферы звезды, вызванное уменьшением темпа аккреции (напомним, что $R_{\text{mag}} \propto \dot{M}_{\text{acc}}^{-2/7}$) и, как следствие, доли телесного угла, занимаемого пылью на ее границе (Гринин и др., 2018). При этом азимутальная структура возмущения остается стабильной. Это следует из сохранения фаз фотометрических затмений с хорошей точностью на протяжении всего периода наблюдений. Сохранение фаз, несмотря на изменения формы и амплитуды затмений, также отмечалось и у прототипа — звезды AA Tau (Бувье и др., 1999).

Оценка аккреционной активности звезды в различные эпохи была выполнена нами на основе доступных измерений эмиссии в линии $H\alpha$, служащей прямым индикатором аккреционной светимости. Наибо-

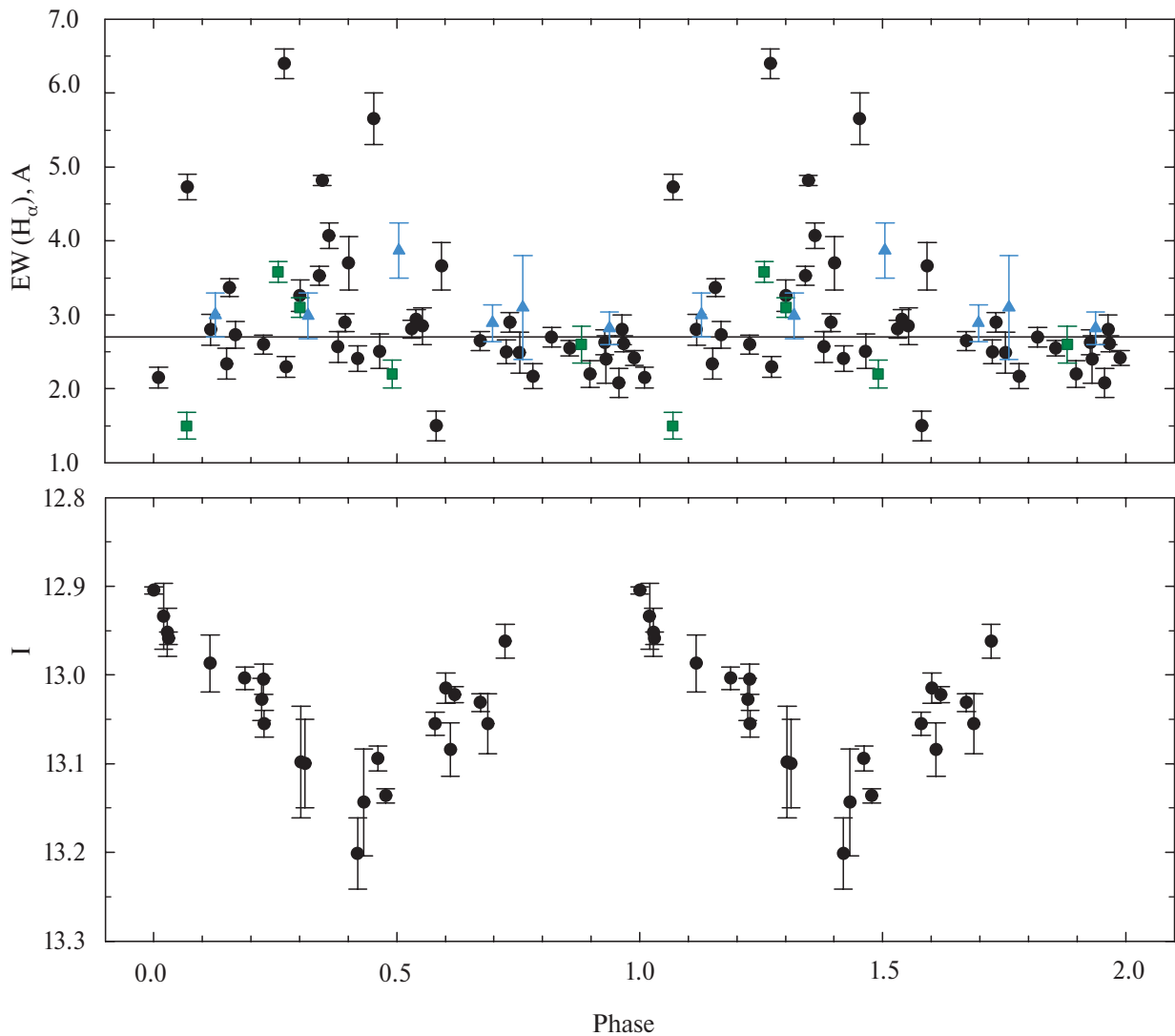


Рис. 5. Верхняя панель: фазовая кривая переменности эквивалентной ширины линии $H\alpha$ в спектре V715 Per, свернутая с периодом $P = 5.22^d$. Разными значками показаны серии последовательных наблюдательных ночей, полностью покрывающих период осевого вращения звезды: треугольники — 25.03–30.03.2022, квадраты — 28.11–03.12.2023. Нижняя панель: фазовая кривая блеска в полосе I по данным сезонов 2021–2023 гг.

более важным представляется сравнение темпов аккреции в эпоху, когда у V715 Per наблюдались алголеподобные минимумы, и в текущую эпоху доминирующей переменности типа AA Tau. К сожалению, достаточно представительная статистика измерений доступна только для периода 2021–2023 гг. по результатам нашего спектрального мониторинга. Эта статистика показала наличие среднего уровня эмиссии, соответствующего темпу аккреции $\dot{M}_{\text{acc}} = 1.14 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$. Измерения в отдельные даты показывают большие значения, которые могут являться следствием нестационарного характера аккреции у звезд WTTS (см., например, Романова и др., 2018; Потравнов и др., 2019). В эпоху алголеподобных минимумов в 2006 г. было выполнено единственное измерение (Дам 2008), которое соответствует темпу аккреции в ~ 4 раза больше, чем средний уровень в теку-

щую эпоху. И хотя это является верхней оценкой, соответствующее значение $EW(H\alpha)$ превосходит максимальные значения, наблюдавшиеся в ходе нашего мониторинга, и поддерживает предположение, что это измерение было получено в эпоху повышенной аккреционной активности звезды. В таком случае за счет повышенного темпа аккреции радиус магнитосферы был на $\sim 30\%$ меньше, чем в текущую эпоху. В свою очередь, это позволяет естественным образом объяснить: (i) меньшую амплитуду переменности типа AA Tau в ту эпоху, обусловленную более компактной магнитосферой и меньшей эффективной высотой возмущения во внутреннем диске; (ii) наблюдение алголеподобных минимумов, вызванных более высоким темпом аккреции и эффективной поставкой вещества в ближайшую окрестность звезды. Вновь отмеченная нами деталь на исторической кривой блес-

ка V715 Per: ускорение в 2010 г. плавного уменьшения блеска звезды в полосе V , закончившееся последним, наиболее глубоким, алголеподобным минимумом, показывает завершение этой эпохи. После этого поставка на звезду избыточной массы вещества завершается, и звезда переходит в другую эпоху фотометрической активности — с доминирующей переменностью типа AA Tau. Увеличение уровня яркого состояния, начавшееся сразу после прекращения алголеподобных минимумов и достигшее максимума в 2016 г., можно интерпретировать и как следствие очищения внутренних областей диска от пыли.

Другим новым результатом является обнаруженное по фотометрическим наблюдениям обширное затмение звезды с амплитудой около $\approx 0.2^m$ (примерно одинаковой во всех трех полосах VRI), наложившееся на общий тренд повышения среднего уровня блеска, начавшегося после прекращения алголеподобных минимумов. Начало этого затмения в виде понижения среднего уровня яркого состояния было отмечено Барсуновой и др. (2022). Затмение продолжалось около 6 лет, с 2017 по 2023 г., и имело правильную форму, симметричную относительно минимума. Оно было вызвано прохождением по лучу зрения протяженной пылевой структуры, состоящей из крупных частиц. Подобные продолжительные затмения наблюдаются и у других молодых звезд с дисками, ориентированными под небольшими углами к лучу зрения, например, у звезды WW Vul (Ростоचना-Шаховская и др., 2012). Они могут быть объяснены в рамках модели затмения пылевым облаком, образованным большим вихрем в протопланетном диске и поднявшим пыль над диском (Клар, Боденхеймер, 2003; Жу и др., 2014; Барге и др., 2017). Согласно расчетам, такие структуры совершают несколько оборотов вокруг звезды и затем диссипируют. Тот факт, что за время 21-летнего фотометрического мониторинга V715 Per подобные детали кривой блеска прежде не наблюдались, говорит о том, что этот вихрь возник достаточно далеко от центральных областей диска. Его следующее прохождение по лучу зрения может произойти через несколько десятков лет.

Возможно, однако, и другое объяснение: пылевой структурой, вызвавшей протяженное затмение, может быть околозвездный диск невидимого компаньона, либо образованный им дисковый ветер (Тамбовцева и др., 2006). В обоих случаях на изображении диска должна быть видна тень, перемещение которой по диску может пролить свет на структуру околозвездного окружения этой молодой звезды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты спектрально-го и фотометрического мониторинга WTTS звезды V715 Per, расположенной в молодом скоплении IC 348. Звезда характеризуется сложной многокомпо-

нентной фотометрической переменностью. В течение нашего 21-летнего мониторинга она продемонстрировала переменность типа AA Tau, глубокие алголеподобные минимумы и обнаруженное в рамках настоящего исследования ослабление блеска продолжительностью около 6 лет. Согласно ранее предложенной модели, общей причиной изменений блеска V715 Per является переменная околозвездная экстинкция, а преобладание того или иного типа переменности в различные эпохи вызвано вариациями темпа аккреции в системе, в свою очередь оказывающими долговременное влияние на экстинкцию во внутренних областях диска. Впервые проведенный спектральный мониторинг V715 Per показал модуляцию эквивалентной ширины эмиссионной линии H α с периодом осевого вращения звезды и в противофазе с изменениями блеска. Это служит подтверждением того, что периодическая компонента фотометрической переменности V715 Per вызвана затмениями звезды искривленным внутренним краем пылевого диска, т.е. механизмом типа AA Tau. При этом новое уточненное значение периода $P = 5.22^d$ позволило показать стабильность фазовых кривых, а значит и азимутальной структуры внутреннего диска, на протяжении всего периода наших наблюдений. Сравнение аккреционной активности в системе показало, что в эпоху преобладания алголеподобных минимумов звезда демонстрировала примерно в 4 раза больший темп аккреции в сравнении с современной, что согласуется с предложенной Гриным и др. (2018) феноменологической моделью переменности. Этот результат подчеркивает тесную связь вариации темпа аккреции и переменной околозвездной экстинкции у молодых звезд малых масс, у которых пыль может выживать на границе магнитосферы и даже внутри нее (см. по этому поводу статьи Нагель, Бувье, 2020, и Нагель и др., 2024). Альтернативная модель малоамплитудной переменности может быть основана на температурной неоднородности поверхности звезды (пятнах), но, в отличие от принятой нами модели переменной околозвездной экстинкции, она не объясняет, почему фотометрическая история звезды так выражено среагировала на завершение алголеподобных минимумов блеска.

В то время как за переменность типа AA Tau и алголеподобные минимумы ответственна пыль, расположенная во внутреннем диске, наблюдавшееся нами продолжительное ослабление блеска V715 Per было вызвано прохождением по лучу зрения протяженной пылевой структуры, расположенной на значительном удалении от звезды. Это событие свидетельствует о том, что околозвездный диск этой звезды ориентирован к наблюдателю почти с ребра, так что луч зрения практически касается его “поверхности”. Такая ориентация роднит звезды типа T Тельца с переменностью типа AA Tau со звездами типа UX Ori, околозвездные диски которых также

наклонены под небольшим углом к лучу зрения (Гринин и др., 1991; Креплин и др., 2016). Дальнейшее продолжение фотометрического мониторинга V715 Peg представляет несомненный интерес, так как позволит наблюдать транзиты по диску звезды новых деталей в ее протопланетном диске. Для более детального исследования процесса аккреции на эту звезду необходимы спектральные наблюдения с высоким разрешением, позволяющие изучать переменность профилей линий. Учитывая слабость объекта, для их получения нужны большие телескопы.

Авторы благодарят рецензента за ценные замечания. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Работа С.Ю.Ш. поддержана грантами Словацкой Академии Наук VEGA 2/0030/21 и APVV-20-0148. Наблюдения на Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН получены на оборудовании ЦКП “Ангара”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В., *Астрофиз. Бюлл.* **71**, 514 (2016).
- Барге и др. (P. Barge, L. Ricci, C.L. Carilli, and R. Previn-Ratnasingham), *Astron. Astrophys.* **605**, A122 (2017).
- Барсунова и др. (O.Yu. Barsunova, V.P. Grinin, S.G. Sergeev, A.O. Semenov, and S.Yu. Shugarov), *Astrophysics* **58**, 193 (2015).
- Барсунова и др. (O.Yu. Barsunova, V.P. Grinin, A.A. Arkharov, A.O. Semenov, S.G. Sergeev, and N.V. Efimova), *Astrophysics* **59**, 147 (2016).
- Барсунова и др. (O.Yu. Barsunova, V.P. Grinin, S.G. Sergeev, S.Yu. Shugarov, N.V. Efimova, and S.V. Nazarov), *Astrophysics* **65**, 368 (2022).
- Бувье и др. (J. Bouvier, S.H.P. Alencar, T.J. Harries, et al.), *Protostars and Planets V* (Ed. B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil, Univer. of Arizona Press, 2007), p. 479.
- Бувье и др. (J. Bouvier, A. Chelli, S. Allain, L. Carrasco, R. Costero, I. Cruz-Gonzalez, C. Dougados, M. Fernandez, et al.), *Astron. Astrophys.* **349**, 619 (1999).
- Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В. и др.), *Письма в Астрон. журн.* **42**, 333 (2016) R.A. Burenin, A.L. Amvrosov, M.V. Eselevich, et al., *Astron. Lett.* **42**, 295 (2016)].
- Вольман, Эверсберг (K. Vollmann and T. Eversberg), *Astron. Nachr.* **327**, 862 (2006).
- Гайя Коллаборация (Gaia Collaboration), *Astron. Astrophys.* **674**, A1 (2023).
- Гринин и др. (V.P. Grinin, N.N. Kiselev, N.K. Minikulov, G.P. Chernova, and N.V. Voshchinnikov), *Astrophys. Space Sci.* **186**, 283 (1991).
- Гринин и др. (V.P. Grinin, O.Yu. Barsunova, S.G. Sergeev, A.A. Arkharov, S.Yu. Shugarov, A.O. Semenov, and N.V. Efimova), *Astron. Rep.* **62**, 677 (2018).
- Густавсон и др. (B. Gustafsson, B. Edvardsson, K. Eriksson, U.G. Jorgensen, A. Nordlund, and B. Plez), *Astron. Astrophys.* **486**, 951 (2008).
- Дам (S. Dahm), *Astron. J.* **136**, 521 (2008).
- Донати и др. (J.-F. Donati, M.B. Skelly, and J. Bouvier), *MNRAS* **409**, 1347 (2010).
- Есау и др. (C.F. Esau, T.J. Harries, and J. Bouvier), *MNRAS* **443**, 1022 (2014).
- Жу и др. (Z. Zhu, J.M. Stone, R.R. Rafikov, and X. Bai), *Astrophys. J.* **785**, id122, 25 (2014).
- Клар, Боденхеймер (H.H. Klahr and P. Bodenheimer), *Astrophys. J.* **582**, 869 (2003).
- Креплин и др. (A. Kreplin, D. Madlener, L. Chen, G. Weigelt, S. Kraus, V. Grinin, L. Tambovtseva, and M. Kishimoto), *Astron. Astrophys.* **590**, A96 (2016).
- Луман и др. (K.L. Luhmann, G.H. Rieke, C.J. Lada, and E.A. Lada), *Astrophys. J.* **508**, 347 (1998).
- Нагель, Бувье (E. Nagel and J. Bouvier), *Astron. Astrophys.* **625**, A45, 8 (2019).
- Нагель, Бувье (E. Nagel and J. Bouvier), *Astron. Astrophys.* **643**, A157, 9 (2020).
- Нагель и др. (E. Nagel, J. Bouvier, and A.E. Duarte), *Astron. Astrophys.* **688**, A61 (2024).
- Нордхаген и др. (S. Nordhagen, W. Herbst, K.L. Rhode, and E.C. Williams), *Astron. J.* **132**, 1555 (2006).
- Петров (P.P. Petrov), *Astrophysics* **46**, 506 (2003).
- Потравнов и др. (I.S. Potravnov, V.P. Grinin, and N.A. Serebriakova), *Astron. Astrophys.* **630**, A64, 9 (2019).
- Роман-Зунига и др. (C.G. Roman-Zuniga, M. Kounkel, J. Hernandez, K. Pena Ramirez, R. Lopez-Valdivia, K.R. Covey, A.M. Stutz, A. Roman-Lopes, et al.), *Astron. J.* **165**, 51 (2023).
- Романова и др. (M.M. Romanova, A.A. Blinova, G.V. Ustyugova, et al.), *New Astron.* **62**, 94 (2018).
- Ростопчина-Шаховская и др. (A.N. Rostopchina-Shakhovskaja, V.P. Grinin, and D.N. Shakhovskoi), *Astrophysics* **55**, 147 (2012).
- Тамбовцева и др. (L.V. Tambovtseva, V.P. Grinin, and G. Weigelt), *Astron. Astrophys.* **448**, 633 (2006).
- Фанг и др. (M. Fang, R. van Boekel, and W. Wang), *Astron. Astrophys.* **504**, 461 (2009).
- Хартманн и др. (L. Hartmann, G. Herczeg, and N. Calvet), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 105 (2016).
- Хербиг (G. Herbig), *Astrophys. J.* **497**, 736 (1998).
- Хербст и др. (W. Herbst, D.K. Herbst, E.J. Grossman, and D. Weinstein), *Astron. J.* **108**, 1096 (1994).

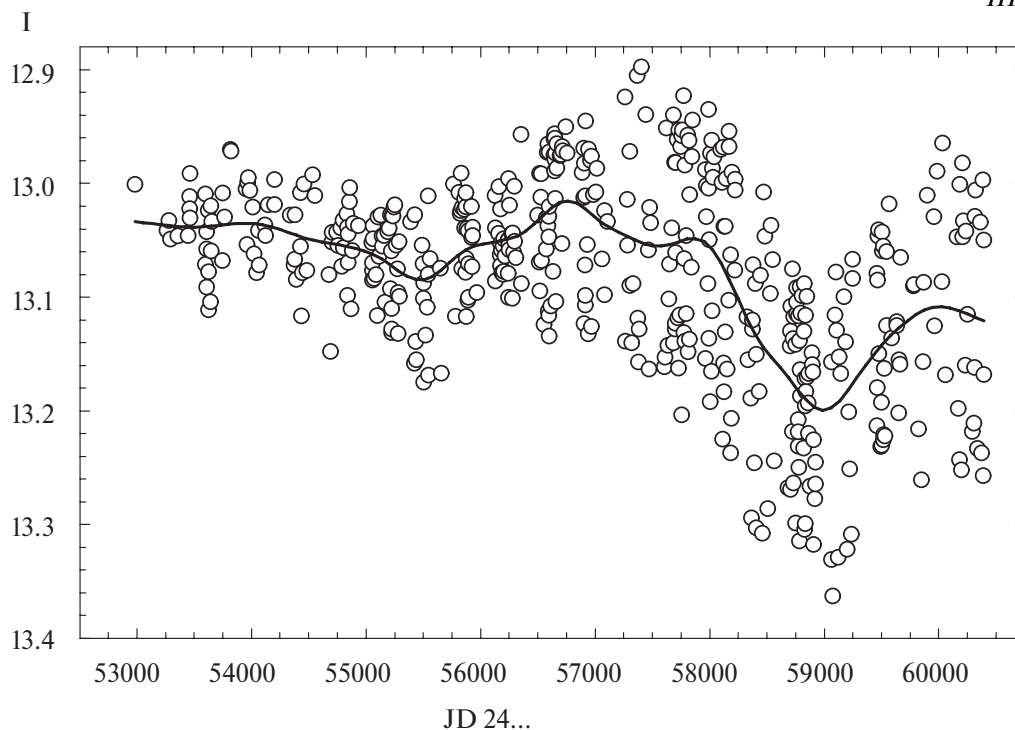


Рис. 6. Кривая блеска V715 Peg в полосе *I* без алголеподобных минимумов. Сплошная линия — полученный двойным усреднением тренд.

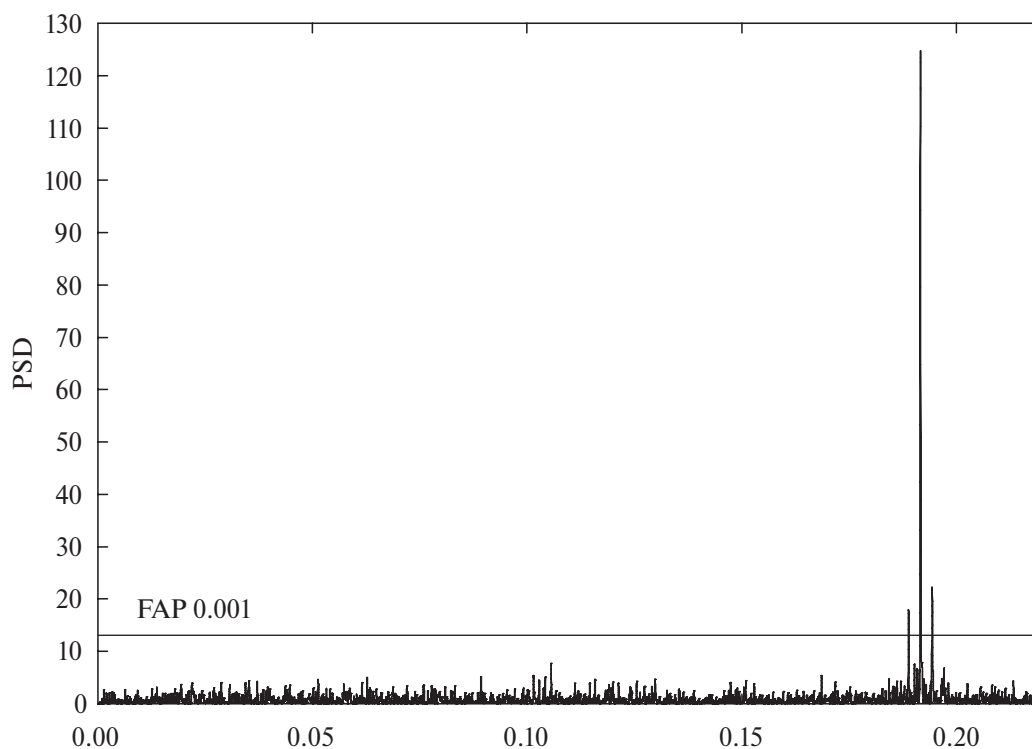


Рис. 7. Спектр мощности V715 Peg в полосе *I*. Горизонтальной линией показан уровень, соответствующий $FAP = 0.001$. Максимальный пик соответствует периоду 5.22^d .