

НЕОБЫЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ ЗВЕЗДЫ ТИПА UX Ori V719 Per

© 2021 г. В. П. Гринин^{1, 2, *}, О. Ю. Барсунова¹, С. Г. Сергеев³,
С. Ю. Шугаров^{4, 5}, Е. И. Федорова²

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

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

⁵ Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранская Ломница, Словакия

*E-mail: vgcrao@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2021 г.

После доработки 19.06.2021 г.

Принята к публикации 25.06.2021 г.

Приводятся результаты новых фотометрических (*VR*) наблюдений молодой звезды V719 Per из скопления IC 348. Они показывают, что вплоть до 2014 г. эта звезда демонстрировала переменность блеска, характерную для звезд типа UX Ori, т.е. обусловленную сильными флуктуациями околозвездной экстинкции. В 2014 г. звезда ослабела примерно на 3 звездных величины в полосе *I* и это состояние пониженного блеска продолжалось до 2017 г. Есть основания предполагать, что затмение было вызвано возмущением в самых внутренних областях протопланетного диска звезды. Пыль, поднятая над диском, привела к блокированию излучения звезды, продолжавшемуся около трех лет. Обсуждается роль различных процессов в создании таких возмущений.

Ключевые слова: молодые звезды, переменная околозвездная экстинкция, протопланетные диски, магнитосфера звезды, V719 Per

DOI: 10.31857/S0004629921100145

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда V719 Per (спектральный тип M1.25 [1]) принадлежит молодому скоплению IC 348 и является одной из самых холодных из всех известных на сегодня переменных звезд типа UX Ori. Первые указания на такой тип переменности, обусловленный затмениями звезды фрагментами собственного протопланетного диска, были получены для V719 Per в работах [2–4]. Наблюдения показали, что звезда время от времени слабеет на несколько десятых звездной величины. Более продолжительный фотометрический мониторинг, выполненный нашей группой [5], показал, что у этой звезды наблюдаются значительно более глубокие минимумы блеска с амплитудой до 3^m в полосе *I*. Во время таких событий показатели цвета на диаграмме “цвет–величина” смещаются в синюю сторону, демонстрируя так называемый “эффект поглубления”, характерный для звезд типа UX Ori и обусловленный усилением вклада рассеянного света протопланетного диска в наблюдаемое излучение [6]. В случае V719 Per этот эффект впервые наблюдался в [5]. В работах [7, 8]

были заподозрены периоды в изменениях блеска звезды, которые, однако, не были подтверждены более продолжительными наблюдениями [5].

Важная особенность V719 Per состоит в том, что это одна из немногих молодых звезд, принадлежащая семейству звезд типа UX Ori и являющаяся одновременно звездой типа WTTS (weak line T Tauri star). Для таких звезд характерен низкий темп аккреции. Поэтому, несмотря на низкую эффективную температуру V719 Per ($T_{\text{eff}} = 3669$ K [1]), в ее фотометрическом поведении не обнаружено никаких признаков активности, вызванных горячими аккреционными пятнами. По данным [9], основанным на моделировании распределения энергии в спектре звезды, в центральной части ее околозвездного диска имеется полость радиусом около 0.7 а.е., слабо заполненная веществом. Следствием этого является отсутствие заметного инфракрасного избытка излучения в ближней инфракрасной (ИК) области спектра. Образование такой полости часто связывают с формированием экзопланет во внутренней области протопланетного диска. Ее существование и

является причиной низкой аккреционной активности звезды и, как следствие, слабой эмиссионной активности ($EW(H_{\alpha}) < 2 \text{ \AA}$ [10]).

С другой стороны, фотометрическая активность звезд типа UX Ori, обусловленная сильными флуктуациями околозвездной экстинкции на луче зрения, предполагает небольшой наклон протопланетных дисков звезд относительно направления на наблюдателя [11]. В случае V719 Per на это указывает также большое поглощение в направлении на звезду ($A_V \approx 2.8^m$ [1]). При такой ориентации фотометрический мониторинг звезды дает уникальную возможность изучать стационарные процессы в диске, способные поднимать пыль над его поверхностью и влиять на околозвездную экстинкцию. Ниже мы рассмотрим свойства фотометрической активности V719 Per с учетом новых наблюдений, выполнявшихся в течение шести наблюдательных сезонов с 2014 по 2020 г.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Как и в предыдущих работах нашей группы, оптические наблюдения V719 Per проводились на телескопах АЗТ-8 (0.7 м) Крымской астрофизической обсерватории РАН и G2 (0.6 м) Словацкой академии наук, оснащенных ПЗС фотометрами. Наблюдения выполнялись в трех фотометрических полосах v , r , i и приводились к фотометрической системе Johnson-Cousins V , R_c , I_c . Поскольку ниже все фотометрические параметры приводятся в этой фотометрической системе, мы для простоты опускаем нижний индекс “С”. Детали наблюдений и апертурной фотометрии ПЗС изображений приведены в [5]. Точность фотометрии в максимуме блеска V719 Per в среднем равна 0.03^m во всех трех полосах V , R , I . В глубоких минимумах точность падает до 0.3^m в полосах R и I . В полосе V в глубоких минимумах блеск звезды опускался до 20.5^m и в этом состоянии точность фотометрии была около 0.5^m . Кроме оптической фотометрии мы используем в нашей статье также инфракрасные (ИК) наблюдения в полосах W1 (3.4 мкм) и W2 (4.6 мкм) из архива WISE [12].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показаны кривые блеска V719 Per в полосах R и I , дополненные наблюдениями в двух ИК полосах W1 и W2 из архива WISE [12]. Видно, что в ярком состоянии блеск звезды флуктуирует вблизи значений $I \approx 15.5^m$, $R \approx 14.3^m$. Время от времени звезда испытывает ослабления с амплитудой до 3^m и продолжительностью по-

рядка нескольких дней. В начале 2014 г. блеск звезды после очередного падения не вернулся в исходное состояние, и в таком ослабленном состоянии звезда находилась около трех лет. В 2017 г. она поярчала и вернулась в исходное яркое состояние. Из рис. 1 видно, что во время оптического минимума звезда ослабела также в ИК полосах W1 и W2. Хотя эти наблюдения были немногочисленными, видно, что форма ИК минимума 2014–2017 гг. не совпадает полностью с формой оптического минимума.

Таким образом, наиболее интересным событием в фотометрической жизни V719 Per является глубокий ($\Delta m \approx 3^m$) и продолжительный минимум блеска, наблюдавшийся в течение трех лет с 2014 по 2017 г. Быстрый вход в минимум и еще более быстрый выход из него в сочетании с большой продолжительностью делают это событие непохожим на все ранее наблюдавшиеся минимумы звезд типа UX Ori. Интересно, что в течение следующих за этим затмением трех наблюдательных сезонов мы не наблюдали ни одного глубокого минимума блеска V719 Per. Такого относительно спокойного состояния блеска не наблюдалось в течение всех предыдущих наших наблюдений этой звезды.

На рис. 2 показана диаграмма цвет–величина $I/R - I$. При ее построении были использованы наблюдения с точностью не хуже 0.15^m . Кружками показаны данные, относящиеся к затмению 2014–2017 гг. Видно, что изменения показателя цвета звезды $R - I$ в процессе этого затмения были примерно такими же, как и во время более коротких затмений, наблюдавшихся в предшествующие годы: звезда сначала краснеет, затем при продолжающемся падении блеска показатель цвета $R - I$ начинает уменьшаться. Это означает, что оптические свойства пыли во время всех этих затмений были примерно одинаковыми. Аналогичным образом изменяется показатель цвета $V - I$ на диаграмме $I/(V - I)$, которую мы здесь не показываем.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из оптических кривых блеска V715 Per (рис. 1), а также из гистограммы фотометрической активности звезды (рис. 3) видно, что в каждой фотометрической полосе существует предельное значение минимального блеска, ниже которого звезда не ослабевает. Такое ограничение на амплитуду затмений является важной наблюдательной особенностью всех звезд типа UX Ori. В ранних исследованиях этих звезд указанная особенность считалась несовместимой с моделью переменной околозвездной экстинкции (см. например, обзор [13]). На самом деле ее происхождение не противоречит этой модели и объясняет

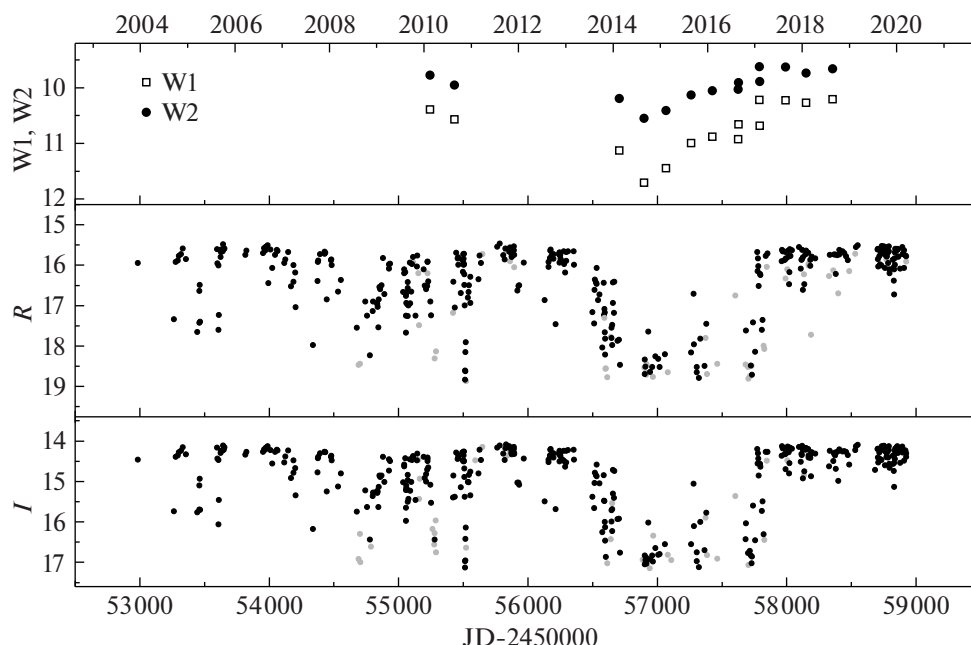


Рис. 1. Кривые блеска V719 Peg в полосах R и I . Серыми точками показаны наблюдения с ошибкой $0.15^m \leq \sigma \leq 0.4^m$. Вверху — данные ИК наблюдений в полосах $W1$ и $W2$ из архива WISE.

ся существованием рассеянного излучения протопланетных дисков [6]. При фотометрических наблюдениях это излучение регистрируется вместе с прямым излучением звезды и в ярком состоянии обычно вносит очень малый вклад в наблюдаемое излучение. Но когда звезда полностью закрыта от наблюдателя пылевым фрагментом диска, рассеянный свет доминирует в наблюдаемом излучении, что препятствует дальнейшему падению блеска объекта. Эта особенность звезд типа UX Ori объясняет, как было отмечено во Введении, также и другие наблюдаемые у них эффекты, такие, как смещение показателей цвета в синюю сторону во время глубоких минимумов, а также рост линейной поляризации при ослаблениях блеска [11].

Таким образом, амплитуда ослаблений блеска $(\Delta m)_{\max}$, максимально возможная в силу указанного выше ограничения, связана простым соотношением с интенсивностью рассеянного излучения диска I_{sc} : $(\Delta m)_{\max} = 2.5 \lg(1 + I_*/I_{\text{sc}})$, где I_* — интенсивность излучения звезды без диска. Зная из наблюдений величину $(\Delta m)_{\max}$, можно очень просто оценить вклад рассеянного излучения в излучения звезды. Как отмечалось выше, в полосе I величина $(\Delta m)_{\max} \approx 3^m$. Отсюда следует, что в этой полосе вклад рассеянного излучения диска в излучение V719 Peg в ярком состоянии составляет около 6%, что примерно соответствует среднему

значению этого отношения (около 10%) для звезд типа UX Ori [11]¹.

Следует отметить, что продолжительные затмения наблюдаются время от времени и у других звезд типа UX Ori (см., например, [15–19]). Интересно, что во время таких событий падение блеска в визуальной области спектра часто сопровождается увеличением потока излучения в ближней ИК области [20–27]. Это свидетельствует о том, что такие затмения были вызваны появлением большого количества горячей пыли над околозвездным диском в ближайших окрестностях молодой звезды. В [23] и [24] в качестве возможного источника такой пыли рассматривался запыленный дисковый ветер. Возможны, однако, и другие механизмы подъема пыли над диском. Например, как показано в [28], ионизованная рентгеновским излучением околозвездная пыль может подниматься на большую высоту в магнитном поле диска, увеличивая его эффективную геометрическую толщину. Пыль над диском может быть так-

¹ Следует подчеркнуть, что рассеянное излучение протопланетного диска не является постоянной величиной. Напротив, I_{sc} непрерывно флуктуирует из-за изменений условий освещенности диска звездой, вызванных флуктуациями околозвездной экстинкции во внутренних областях диска. Этим объясняется разброс точек на зависимостях параметров поляризации звезд типа UX Ori от блеска [11]. У молодых звезд, наблюдаемых с полярных направлений, такие флуктуации вызывают появление теней на изображениях дисков, наблюдаемых с помощью интерферометров в ближней ИК области спектра [14].

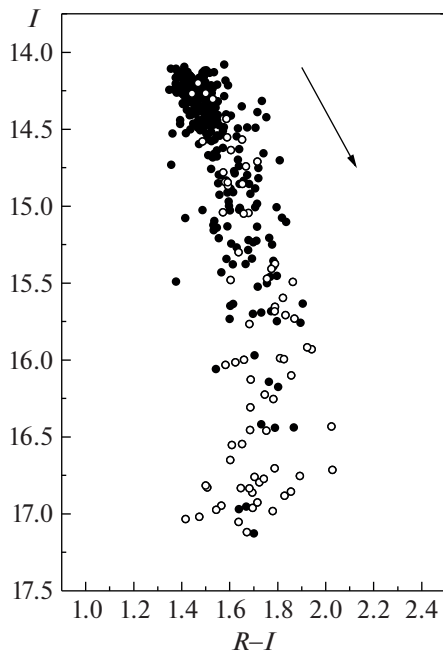


Рис. 2. Диаграмма цвет—величина $I/(R - I)$. Кругками выделены данные, относящиеся к протяженному затмению 2014–2017 гг. Стрелкой показано направление стандартного закона межзвездного покраснения для $A_V = 1^m$.

же поднята циклоническим вихрем (см., например, [29]). В этом случае затмения звезды будут повторяться до тех пор, пока вихрь не затухнет. Такие повторяющиеся и затухающие по амплитуде затмения наблюдались в [30] у звезды типа UX Ori WW Vul. Появление пыли над протопланетным диском может быть вызвано катастрофическими столкновениями крупных планетезималей с последующим образованием облаков мелкой пыли. О таких столкновениях свидетельствуют вспышки ИК излучения в спектре осколочного (debris) диска звезды ID8 (2MASS J08090250-4858172), являющейся молодым (35 млн. лет) аналогом Солнца [31]. Наконец, пыль между звездой и наблюдателем может появиться в результате падения на диск газопылевых фрагментов из остатков протозвездного облака. Такая модель нестационарной аккреции была предложена в [32] и рассматривается как возможный источник вспышек фуоров (см. [33] и цитированные там статьи).

Во всех перечисленных выше моделях трудно ожидать быстрого изменения околозвездной экстинкции, необходимого для объяснения быстрого начала и столь же быстрого завершения минимума 2014–2017 гг. По-видимому, можно исключить также возможность того, что этот минимум был вызван транзитом по диску звезды пылевого фрагмента околозвездного диска, поскольку непонятно, как в условиях дифференциального

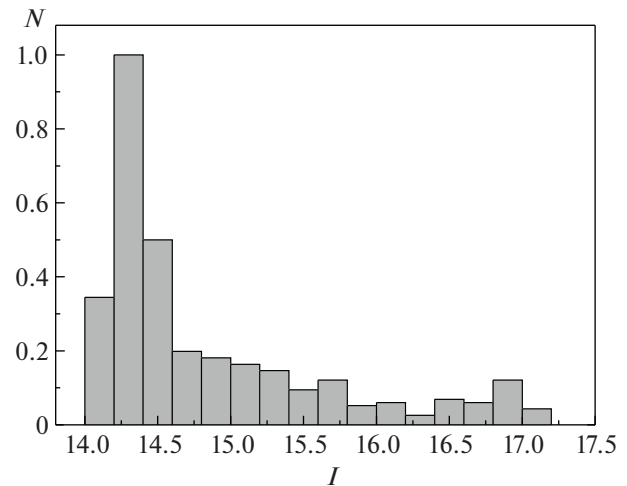


Рис. 3. Нормированная гистограмма фотометрической активности V719 Per в полосе I .

вращения квазикеплеровского диска может возникнуть протяженная структура, ограниченная по азимуту резкими границами. Учитывая низкую светимость звезды ($L \approx 0.28 L_\odot$, [1]), можно предположить, что роль такого экрана выполняет околозвездная пыль, проникающая непосредственно в магнитосферу звезды. Такая возможность рассматривалась недавно в [34] применительно к звезде типа Т Тельца V715 Per, демонстрирующей сложную переменность блеска, обусловленную изменениями околозвездной экстинкции. Было показано, что пыль, прежде чем сублимировать, может некоторое время двигаться вместе с газом в магнитосфере и экранировать излучение звезды. Светимость V719 Per примерно в 5 раз меньше, чем светимость V715 Per. Поэтому, если пыль может присутствовать в магнитосфере V715 Per, то она, тем более, может проникать в магнитосферу V719 Per.

Если это так, то падение блеска звезды в оптическом участке спектра должно было бы сопровождаться усилением ее излучения в ближней ИК области спектра. Как было отмечено выше, такое поведение оптического и ИК излучения действительно наблюдалось у ряда звезд типа UX Ori во время глубоких минимумов. В нашем случае, однако, согласно данным WISE ИК излучение V719 Per, наоборот, — *ослабело* во время оптического минимума (рис. 1). Это означает, что пылевой экран, блокировавший излучение звезды, закрывал лишь небольшую часть полного телесного угла: $\Delta\Omega/4\pi \ll 1^2$. Поскольку продолжительность затмения V719 Per такова, что пылевой экран дол-

² В противном случае ИК излучение пыли в магнитосфере было бы сравнимо по мощности с излучением самой звезды.

жен был полностью окружать звезду по азимуту, то указанное выше ограничение на $\Delta\Omega$ выполнимо лишь при условии, что экран имел небольшую высоту. Это условие может быть выполнено, если пыль проникает неглубоко в магнитосферу звезды. Очевидно, что такой пылевой барьер мог полностью экранировать звезду от наблюдателя при условии, что околозвездный диск V719 Per наклонен на небольшой угол относительно направления на наблюдателя. Но такая ориентация диска как раз и является одним из основных условий, необходимых для реализации модели переменной околозвездной экстинкции у звезд типа UX Ori.

Следует заметить, что проникновение пыли даже не очень глубоко в магнитосферу звезды должно сопровождаться усилением теплового излучения пыли в ближней ИК области спектра. Это дополнительное излучение может быть одной из причин отмеченного выше несовпадения формы затмения звезды в оптике и в полосах W1 и W2. Другой возможной причиной может быть недостаточно большая оптическая толщина некоторых частей протяженного пылевого экрана в ИК области спектра.

Таким образом, мы можем предположить, что наблюдавшийся минимум блеска V719 Per мог быть вызван увеличением темпа аккреции газа на звезду, продолжавшимся около трех лет. Принимая во внимание сезонные пропуски в фотометрических наблюдениях, нельзя исключить возможность того, что такое продолжительное затмение на самом деле представляло собой последовательность более коротких во времени и следующих друг за другом ослаблений блеска звезды. В любом случае возникает вопрос о причине такой четкой локализации этого процесса во времени. Учитывая необычную форму затмения V719 Per, не имеющую аналогов среди наблюдавшихся ранее затмений звезд типа UX Ori, представляют интерес дальнейшие наблюдения фотометрической активности этой звезды желательно в комбинации со спектральными и ИК наблюдениями. Было бы также важно измерить магнитное поле звезды.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы инфракрасные наблюдения, полученные с помощью космического телескопа WISE. Авторы благодарны Л.В. Тамбовцевой, Н.А. Катышевой и анонимному рецензенту за обсуждение статьи и полезные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа В.П.Г, Е.И.Ф. и О.Ю.Б выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 075-15-2020-780. Работа С.Ю.Ш. поддержана Сло-

вацким агентством по научным исследованиям и разработкам грантом APVV-15-0458, грантом Словацкой Академии наук VEGA 2/0030/21.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. L. Luhman, J. R. Stauffer, A. A. Muench, et al., *Astrophys. J.* **593**, 1093 (2003).
2. W. Herbst, J. A. Maley, and E. C. Williams, *Astron. J.* **120**, 349 (2000).
3. R. E. Cohen, W. Herbst, and E. C. Williams, *Astron. J.* **127**, 1602 (2004).
4. S. P. Littlefair, T. Naylor, B. Burningham, and R. D. Jeffries, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **358**, 341 (2005).
5. O. Ju. Barsunova, V. P. Grinin, S. G. Sergeev, A. O. Semenov, and S. Yu. Shugarov, *Astrophysics* **58**, 193, (2015).
6. В. П. Гринин, Письма в Астрон. Ж. **14**, 65 (1988) [V. P. Grinin, *Soviet Astronomy Letters* **14**, 27, (1988)].
7. Ü. Kiziloğlu, N. Kiziloğlu, and A. Baykal, *Astron. J.* **130**, 2766 (2005).
8. L. Cieza and N. Baliber, *Astrophys. J.* **649**, 862 (2006).
9. T. S. LeBlank, K. R. Covey, and K. G. Stassun, *Astron. J.* **142**, 55 (2011).
10. G. H. Herbig, *Astrophys. J.* **497**, 736, (1998).
11. V. P. Grinin, N. N. Kiselev, N. Kh. Minikulov, G. P. Chernova, and N. V. Voshchinnikov, *Astrophys. Sp. Sci.* **186**, 283 (1991).
12. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, et al., *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
13. W. Herbst, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **98**, 1088 (1986).
14. T. Stolker, M. Sitko, B. Lazareff, M. Benisty, C. Dominik, R. Waters, et al., *Astrophys. J.* **849**, 143, (2017).
15. D. N. Shakhovskoj, V. P. Grinin, and A. N. Rostopchina, *Astrophysics* **48**, 135, 2005.
16. J. Bouvier, K. Grankin, L. E. Ellerbroek, H. Bouy, and D. Barrado, *Astron. and Astrophys.* **557**, A77 (2013).
17. E. H. Semkov, S. P. Peneva, and S. I. Ibryamov, *Astron. and Astrophys.* **582**, A113 (2015).
18. S. Facchini, C. F. Manara, P. C. Schneider, C. J. Clarke, et al. *Astron. and Astrophys.* **596**, A38 (2016).
19. S. Belan and D. Shakhovskoj, *uxor.ru* (2019).
20. M. G. Hutchinson, J. S. Albinson, P. Barrett, J. K. Davies, A. Evans, M. J. Goldsmith, and R. C. Maddison, *Astron. and Astrophys.* **285**, 883 (1994).
21. V. P. Grinin, D. N. Shakhovskoi, V. I. Shenavrin, A. N. Rostopchina, and L. V. Tambovtseva, *Astronomy Reports* **46**, 646 (2002).
22. A. Juhasz, T. Prusti, P. Abraham, and C. P. Dullemond, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **374**, 1242 (2007).
23. V. P. Grinin, A. A. Arkharov, O. Yu. Barsunova, S. G. Sergeev, and L. V. Tambovtseva, *Astronomy Letters* **35**, 114 (2009).
24. V. I. Shenavrin, P. P. Petrov, and K. N. Grankin, *Information Bulletin on Variable Stars* **6143**, 1 (2015).

25. *T. Giannini, D. Lorenzetti, A. Harutyunyan, G. Li Causi, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **588**, A20 (2016).
26. *M. Koutoulaki, S. Facchini, C. F. Manara, A. Natta, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **625**, A49 (2019).
27. *K. R. Covey, K. A. Larson, G. J. Herczeg, C. F. Manara*, *Astron. J.* **161**, 61 (2021).
28. *T. T. Ke, H. Huang, and D. N. C. Lin*, *Astrophys. J.* **745**, 60 (2012).
29. *P. Barge and M. Viton*, *Astrophys. J.* **593**, L117 (2003).
30. *A. N. Rostopchina-Shakhovskaja, V. P. Grinin, and D. N. Shakhovskoi*, *Astrophysics* **55**, 147 (2012).
31. *H. Y. A. Meng, K. Y. L. Su, G. H. Rieke, D. J. Stevenson, et al.*, *Science* **345**, 1032 (2014).
32. *J. A. Graham*, *ASP Conf. Ser.* **62**, 363 (1994).
33. *L. Hartmann and J. Bae*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **474**, 88 (2018).
34. *E. Nagel and J. Bouvier*, *Astron. and Astrophys.* **643**, 157 (2020).