

УДК 52-14:524.338.5

О ПРИЧИНАХ ПЕРЕМЕННОСТИ БЛЕСКА МОЛОДОЙ ЗВЕЗДЫ ВР ТАУ

© 2025 М. А. Бурлак¹, К. Н. Гранкин², А. В. Додин¹, А. В. Жарова¹,
Н. П. Иконникова¹, В. А. Кирюхина¹, С. А. Ламзин^{1*}, Б. С. Сафонов¹, И. А. Страхов¹

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

Поступила в редакцию 23 декабря 2024 года; после доработки 22 февраля 2025 года; принята к публикации 1 марта 2025 года

Построена и проанализирована вековая кривая блеска ВР Тау — классической звезды типа Т Тельца. Обнаружены волнообразные изменения среднего уровня ее блеска с амплитудой $\Delta B \approx 0^m.2$ и характерным временем несколько десятков лет. Приведены аргументы в пользу того, что три эпизода глубоких ($\Delta B \sim 1^m.5$) ослаблений блеска длительностью от одного часа до нескольких суток связаны с затмением горячего (аккреционного) пятна пылью, падающей на звезду вместе с газом. Возможно, такого рода затмения, но с меньшей амплитудой, являются причиной отсутствия у ВР Тау строго выраженной периодичности изменения блеска, связанной с осевым вращением. Найдено, что в диапазоне расстояний от 0.1 до 200 а.е. у ВР Тау нет спутника с массой свыше $0.2 M_{\odot}$. Обсуждается вопрос о причинах вариаций блеска и показателя цвета звезды на разных временных масштабах.

Ключевые слова: звезды: переменные: Т Тельца, Хербига Ae/Be — звезды: отдельные: ВР Тау — звезды: джеты — ISM: джеты и истечения

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезды типа Т Тельца (TTS) — это молодые ($t \lesssim 10^7$ лет) звезды с массой $M \lesssim 2 M_{\odot}$, которые находятся на стадии сжатия и выхода к главной последовательности. Звезды Т Тельца принято делить на две подгруппы (Bertout, 1989): классические (CTTS), и звезды TTS со слабыми линиями (WTTS). В случае WTTS эмиссия в некоторых линиях видимого и УФ-диапазонов, наличие холодных пятен ($T_{sp} < T_{eff}$) и интенсивное рентгеновское излучение обусловлены хромосферно-корональной активностью типа солнечной, но гораздо более мощной, тогда как активность CTTS (переменность излучения во всех спектральных диапазонах, эмиссия в линиях и континууме, истечение вещества из окрестности звезды и т.п.) связана главным образом с аккрецией вещества протопланетного диска (Hartmann et al., 2016). При этом основополагающую роль в проявлениях как аккреционной, так и хромосферно-корональной активности TTS играют сильные магнитные поля этих звезд. В частности, у поверхности CTTS и WTTS индукция дипольной компоненты глобального магнитного поля $B \gtrsim 1$ кГс (Donati and Landstreet, 2009).

Кроме холодных, у CTTS имеются и горячие ($T_{sp} > T_{eff}$) пятна, которые возникают в областях, где аккреционная струя сталкивается с поверхностью звезды (Grinin, 1980). Горячие пятна занимают около 10% поверхности CTTS (Hartmann et al., 2016), что вследствие вращательной модуляции должно приводить к периодической переменности блеска этих объектов, по крайней мере при достаточно большом наклоне их оси вращения к лучу зрения (Herbst et al., 1994).

Такого рода периодичность наблюдалась у многих CTTS, однако у некоторых звезд она отсутствует (см. Rebull et al., 2020; Cody et al., и приведенные там ссылки) вероятно из-за того, что параметры и/или положение горячих пятен на поверхности звезды меняются за время, сравнимое с периодом вращения. Трехмерное магнитогидродинамическое (МГД) моделирование процесса магнитосферной аккреции показывает, что подобного рода явления — следствие нестационарного характера взаимодействия внутренних областей диска с магнитным полем молодой звезды при определенной комбинации их параметров. При этом характерное время проявления нестационарности — от нескольких часов до нескольких суток (Kulkarni and Romanova, 2008; Čemeljić and Siwak, 2019; Romanova et al., 2021).

*E-mail: lamzin@sai.msu.ru

Столь малое время не позволяет аналогичным образом объяснить плавные волнообразные изменения блеска некоторых СТТС с характерным временем $t \gtrsim 10$ лет, наличие которых давно известно из фотографических (Kholopov, 1970) и фотоэлектрических (Grankin et al., 2007) наблюдений. В случае двойных СТТС долгопериодические вариации блеска можно связать с модуляцией темпа аккреции из-за приливного воздействия спутника на диск главного компонента (см., например, Lamzin et al., 2001). Однако вопрос о том, что является причиной такого рода явлений в случае одиночных СТТС, остается открытым.

В этой связи мы обратили внимание на звезду ВР Тау, переменность блеска которой была открыта И. Леман-Балановской 90 лет назад (Lehman-Balanowska, 1935). По данным Kounkel et al. (2019), ВР Тау — одиночная СТТС с высоким ($\dot{M}_{ac} \sim (0.2-1) \times 10^{-8} \text{ год}^{-1}$) темпом аккреции (Long et al., 2011; Nisini et al., 2024) вещества протопланетного диска, обнаруженного с помощью интерферометра ALMA (Long et al., 2019). Из окрестности звезды наблюдается истечение вещества (Alencar and Basri, 2000; Errico et al., 2001; Hartigan et al., 1995), часть которого коллимируется в биполярный джет (Dodin et al., 2024). По оценке Herczeg and Hillenbrand (2014), эффективная температура, экстинкция и светимость ВР Тау соответственно равны $T_{\text{эф}} = 3770 \pm 150 \text{ К}$ (спектральный класс M0.5), $A_V = 0.45$ и $0.4 L_{\odot}$ при расстоянии до звезды $d \approx 130 \text{ пк}$ (Akeson et al., 2019).

На основании доплеровского картирования Donati et al. (2008) заключили, что магнитное поле ВР Тау может быть представлено в виде суммы диполя ($B = 1.2 \text{ кГс}$) и октуполя ($B = 1.6 \text{ кГс}$), оси которых наклонены к оси вращения звезды под углом 20° и 10° соответственно, а горячее пятно занимает несколько процентов ее поверхности и вытянуто вдоль меридиана. Из расчетов Long et al. (2011) следует, что в этой ситуации взаимодействие диска с магнитосферой звезды должно приводить к тому, что локализация и параметры пятна не должны заметным образом меняться с течением времени. Однако стабильного фотометрического периода у ВР Тау обнаружено не было. Создается впечатление, что в разные сезоны период меняется на несколько процентов вблизи значения 8^d (Lin et al., 2023; Rebull et al., 2020; Wendeborn et al., 2024b). При этом наклон оси вращения диска, а значит и звезды, к лучу зрения довольно велик: $i = 38.1 \pm 0.5$ (Long et al., 2019). Kiryukhina and Dodin (2024) также не обнаружили регулярной периодичности в изменении интенсивности эмиссионных линий в спектре звезды.

Вероятно, это означает, что параметры диска и/или конфигурация магнитного поля звезды не остаются постоянными. В этой связи уместно рассмотреть, как менялось фотометрическое поведение ВР Тау на длительном временном интервале, что и составляет предмет данного исследования.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 мы описываем, как были получены наблюдательные данные, на которых основано наше исследование; в разделе 3 рассказываем о полученных результатах; в разделе 4 предлагаем их интерпретацию. Итоги исследования подведены в разделе 5.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для построения исторической кривой блеска ВР Тау, в дополнение к данным из литературы (см. раздел 3.1), мы визуальнo оценили блеск звезды по 458 фотопластинкам коллекции ГАИШ МГУ, которые были получены в период с 27 ноября 1911 г. по 15 февраля 1988 г. в фотометрической системе, близкой к полосе *B* Джонсона. Точность оценки блеска была не хуже $0^m.2$. Полученные результаты представлены в таблице 1, в которой, как и в дальнейшем, мы пользуемся сокращенной юлианской датой: $\text{rJD} = \text{JD} - 2400000$.

Кроме того, нами была получена фотометрия ВР Тау в видимом диапазоне с помощью 60-см телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, оснащенного CCD-камерой с набором *BVR_cI_c*-фильтров системы Бесселя–Казинса (Berdnikov et al., 2020). Блеск звезд сравнения взят с сайта AAVSO¹.

В декабре 2023 г. на 2.5-м телескопе КГО с помощью спекл-поляриметра SPP (Safonov et al., 2017) были проведены поляриметрические наблюдения ВР Тау в полосах *V*, *R*, *I*. Детали процесса наблюдений и их обработки описаны в статье Dodin et al. (2019), а полученные результаты (степень и угол поляризации, а также их ошибки для каждой полосы) представлены в таблице 2.

Чтобы определить количественные ограничения на наличие у ВР Тау близкого спутника, мы провели ее наблюдения методом спекл-интерферометрии и 19 декабря 2023 года в 19:44 UT в полосе *I* получили 9791 кадр с экспозицией каждого 22.9 мс. Полуширина длинноэкспозиционного изображения составила $1''12$.

С той же целью мы исследовали переменность лучевой скорости ВР Тау, используя для этого 45 архивных спектров звезды, полученных со спектрографом ESPaDOnS (CFHT) (четыре

¹American Association of Variable Star Observers, <https://www.aavso.org>

Таблица 1. Фотографические звездные величины

гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}
19368.410	13.1	35402.443	12.8	37250.269	13.0	37639.448	12.5	38354.320	12.8
21284.270	13.2	35433.378	13.0	37254.351	12.6	37969.541	12.8	38354.358	13.0
33332.304	13.1	35460.370	13.3	37258.284	13.1	38049.283	12.9	38354.394	13.1
33544.569	13.1	35480.315	12.8	37262.330	13.2	38049.321	13.0	38354.429	13.2
33545.519	13.2	35480.367	12.8	37263.379	13.2	38110.245	13.0	38356.434	13.0
33951.444	13.2	36517.402	13.0	37277.229	13.3	38326.325	13.3	38356.469	13.1
33952.475	13.0	36518.353	13.0	37281.318	13.6	38326.340	12.9	38356.494	12.8
33953.492	13.1	36519.411	13.0	37281.398	13.4	38326.361	13.1	38359.456	13.0
34333.461	13.2	36520.332	13.0	37284.237	13.3	38326.387	13.0	38359.490	12.9
34681.428	13.3	36520.318	13.1	37284.361	13.3	38326.422	13.0	38359.523	13.1
34683.396	13.1	36522.267	13.0	37287.393	13.1	38326.467	12.8	38359.558	12.8
34684.452	13.0	36528.370	12.9	37287.435	13.3	38326.515	13.0	38398.236	12.9
34750.306	13.1	36528.405	12.9	37310.272	13.1	38326.570	13.0	38400.247	13.0
34768.280	12.9	36528.520	13.0	37310.360	13.2	38326.595	13.0	38402.204	12.7
34769.240	13.0	36529.635	13.3	37556.449	13.2	38344.343	13.0	38402.279	12.8
35078.483	13.0	36546.351	13.1	37556.533	13.2	38344.398	12.5	38404.258	12.5
35078.509	12.8	36547.389	13.0	37557.449	13.4	38344.434	12.6	38404.290	12.8
35078.536	13.0	36572.446	13.0	37557.551	13.2	38346.409	12.5	38406.240	12.6
35078.562	12.8	36635.249	13.0	37561.450	13.2	38349.377	12.6	38406.321	13.0
35078.588	12.9	36655.233	12.6	37561.552	13.0	38349.420	12.6	38406.391	12.6
35078.614	13.1	36656.250	13.0	37583.391	13.4	38350.315	13.0	38407.326	13.1
35079.369	13.1	36660.260	13.1	37583.480	13.4	38350.352	13.0	38464.293	13.4
35079.392	13.2	36871.524	12.9	37590.496	13.1	38350.388	12.8	38465.285	12.8
35079.415	13.1	36904.320	13.1	37591.444	13.4	38350.420	12.6	38644.502	13.0
35079.439	13.0	36924.352	12.7	37591.531	13.2	38350.457	12.6	38644.534	12.8
35079.463	12.9	37223.395	13.0	37608.320	13.2	38350.491	12.7	38645.486	13.0
35079.488	13.2	37228.390	13.0	37608.411	13.4	38350.527	12.6	38645.523	12.9
35079.511	13.0	37231.326	12.8	37637.268	12.7	38350.562	12.7	38646.527	13.0
35079.535	12.9	37232.492	12.8	37637.363	12.5	38351.575	12.5	38653.460	12.8
35079.558	13.2	37236.495	13.1	37637.453	12.6	38354.246	12.9	38653.494	12.8
35401.500	13.0	37237.505	13.2	37639.360	12.7	38354.282	12.9	38654.495	13.2

Таблица 1. (Продолжение)

гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}	гJD	m_{pg}
38654.530	13.4	38708.393	13.0	39035.461	13.5	39446.302	12.8	40129.534	13.2
38655.515	12.8	38708.434	13.0	39036.450	13.3	39449.341	12.7	40130.507	13.1
38655.548	13.0	38708.476	13.0	39052.364	13.6	39553.241	13.1	40131.544	13.1
38656.500	13.4	38708.518	12.9	39055.368	13.0	39555.247	13.4	40152.390	13.2
38656.536	13.4	38708.549	13.0	39056.347	13.1	39557.240	13.4	40153.494	12.9
38656.570	12.8	38740.275	13.2	39060.336	13.3	39558.239	13.4	40156.488	12.8
38669.502	13.3	38755.225	13.3	39061.432	13.4	39559.237	13.3	40262.207	12.8
38675.553	12.9	38765.208	13.0	39062.307	13.3	39561.240	13.4	40268.238	13.0
38680.508	13.3	38821.298	13.1	39111.303	13.4	39743.458	13.1	40274.239	12.8
38680.545	13.2	38821.349	13.2	39115.294	13.5	39764.441	13.1	40274.262	12.9
38681.562	13.2	38823.235	13.2	39142.342	12.9	39764.476	13.1	40287.233	13.1
38682.396	13.0	38823.277	13.3	39145.286	13.3	39765.450	13.2	40292.227	13.1
38682.433	12.8	38823.317	13.3	39199.262	13.4	39765.486	13.2	40293.239	13.0
38682.477	12.9	38825.323	13.3	39381.532	13.3	39765.513	13.4	40294.226	13.0
38683.411	12.9	38826.279	13.3	39382.445	13.1	39766.459	13.3	40295.238	13.2
38683.448	12.8	38826.320	13.4	39383.516	12.8	39766.495	13.2	40473.537	13.1
38683.492	12.8	38839.236	13.0	39384.477	13.2	39767.487	13.2	40473.573	13.1
38683.492	12.9	38840.266	13.4	39408.414	13.2	39768.420	12.5	40476.529	13.3
38683.563	12.8	38840.308	13.1	39409.430	13.1	39768.455	12.7	40476.562	13.4
38685.499	12.7	38841.272	13.0	39410.372	13.3	39769.377	13.2	40478.546	13.4
38685.541	13.0	38841.315	13.0	39411.395	13.2	39769.457	13.1	40478.575	13.1
38699.465	12.8	38844.284	12.8	39412.377	13.1	39770.410	13.1	40503.528	12.8
38700.381	13.2	38844.321	12.8	39414.392	13.2	39777.578	13.3	40504.523	13.2
38700.419	13.2	38846.259	12.8	39415.364	13.4	39778.526	13.1	40507.515	13.4
38701.365	13.1	39025.532	13.4	39416.418	13.1	39932.222	13.1	40508.502	13.4
38701.411	12.9	39026.499	13.3	39417.415	12.8	39933.234	13.2	40509.510	13.3
38701.452	12.8	39027.503	13.3	39418.412	13.1	39934.228	13.1	40510.515	13.4
38701.482	12.9	39028.532	13.0	39419.410	13.1	39936.280	13.2	40511.493	13.4
38702.421	12.9	39031.520	13.3	39420.383	13.2	39937.233	13.0	40512.504	13.4
38703.410	12.9	39033.513	13.5	39437.305	13.4	39941.236	13.4	40515.560	13.4
38703.456	12.8	39034.505	13.3	39441.320	13.4	39945.244	13.3	40516.555	13.3

Таблица 1. (Продолжение)

rJD	m_{pg}	rJD	m_{pg}	rJD	m_{pg}	rJD	m_{pg}	rJD	m_{pg}
40531.411	13.1	41577.420	13.4	42341.541	13.4	43865.335	13.4	45316.333	13.2
40531.450	13.2	41578.415	13.3	42344.536	13.3	43872.402	13.4	45349.298	13.4
40539.484	13.4	41579.468	13.5	42345.457	13.3	43899.339	13.4	45614.457	13.4
40539.517	13.4	41597.532	13.4	42364.434	13.3	44118.544	13.4	45620.556	13.4
40618.281	12.9	41599.555	13.4	42367.354	13.4	44146.570	13.4	45644.450	13.3
40650.224	13.3	41767.293	13.5	42369.336	13.3	44148.554	13.3	45695.410	13.5
40650.251	13.3	41769.250	12.9	42423.389	13.4	44164.490	13.4	45705.323	13.3
41031.307	13.2	41772.243	13.0	42426.434	13.1	44194.431	13.3	45705.323	13.4
41036.288	13.3	41774.248	13.6	42428.413	13.3	44252.331	13.2	45757.291	13.3
41186.498	13.0	41951.539	13.4	42429.424	13.1	44258.310	13.3	45757.291	13.4
41186.531	13.3	41952.532	13.3	42430.392	13.4	44314.272	13.4	45968.552	13.3
44196.287	13.2	41953.536	13.1	42431.375	13.2	44493.543	13.3	46030.437	13.3
41356.421	13.2	41958.563	13.4	42457.403	13.2	44494.559	13.4	46060.396	13.3
41357.274	13.0	41981.567	13.4	42685.480	13.4	44497.552	13.4	46379.420	13.4
41360.335	13.0	41983.452	13.5	42691.560	13.2	44523.498	13.4	46406.422	13.3
41362.200	13.1	41985.347	13.3	42698.571	13.3	44525.538	13.3	46409.297	13.4
41390.299	13.4	41991.514	13.4	42724.384	13.4	44526.463	13.3	46466.282	13.4
41391.296	13.4	42004.425	13.4	42743.381	13.4	44528.540	13.4	46497.248	13.1
41393.307	13.5	42016.387	13.4	42749.364	13.3	44530.541	13.3	46706.601	13.4
41394.359	13.5	42048.452	13.3	42807.419	13.4	44531.529	13.4	46710.516	13.2
41548.513	13.1	42060.188	13.4	43046.511	13.4	44664.301	13.4	46763.322	13.4
41564.400	13.5	42065.347	13.2	43079.590	13.2	44670.282	13.3	46771.384	13.3
41565.492	13.4	42093.316	13.4	43155.271	13.0	44876.543	13.2	46855.293	13.4
41566.432	13.4	42097.338	13.4	43163.247	13.2	44902.367	13.3	47036.543	13.4
41567.465	12.8	42149.254	13.4	43225.251	13.4	44905.367	13.0	47061.521	13.3
41568.411	13.1	42314.542	13.4	43397.567	13.2	44993.252	13.4	47092.593	13.3
41569.417	12.8	42316.553	13.2	43441.606	13.3	44997.221	13.4	47200.200	13.4
41570.427	13.4	42334.448	13.4	43783.490	13.4	45017.301	13.4	47207.237	13.3
41571.470	13.6	42335.426	13.3	43789.529	13.4	45239.559	13.1		
41573.425	13.6	42340.508	13.3	43816.475	13.3	45264.443	13.0		

наблюдательных сезона: с февраля 2006 по январь 2014 г.), и пять спектров, полученных со спектрографом ESPRESSO (VLT) в декабре 2022 г. (Kiryukhina and Dodin, 2024). Для определения лучевой скорости ВР Тау в каждом отдельном

спектре вычислялось средневзвешенное значение скоростей 250 абсорбционных линий с незначительным блендированием. В качестве абсорбционного спектра сравнения, относительно которого методом наименьших квадратов рассчитывались

Таблица 2. Результаты поляризационных наблюдения ВР Тау в полосах V , R , I

Дата, dd.mm.yyyy	UT, hh:mm	p_V	σ_p	θ_V	σ_θ	p_R	σ_p	θ_R	σ_θ	p_I	σ_p	θ_I	σ_θ
07.12.2023	18:14	—	—	—	—	0.58	0.24	38.7	23.6	0.89	0.17	59.2	11.2
19.12.2023	19:48	0.69	0.17	84.0	13.9	0.34	0.19	50.3	30.8	0.56	0.16	72.4	16.7
29.12.2023	21:56	0.44	0.16	134.0	21.1	0.12	0.16	75.7	76.3	0.10	0.15	119.9	92.0

скорости линий, был использован спектр WTTS TAP 45 со схожими параметрами звездной атмосферы (Kiryukhina and Dodin, 2024). Итоговая точность определения лучевой скорости по отдельным спектрам составила около 10 м с^{-1} .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Историческая кривая блеска ВР Тау

При построении исторической кривой блеска ВР Тау мы, в дополнение к нашим измерениям (см. раздел 2), взяли данные из работ Kholopov (1951), Robinson et al. (2022), Grankin et al. (2007), а также из баз данных Herbst et al. (1994) и AAVSO. Кроме того, мы использовали неопубликованные результаты наших фотоэлектрических (сентябрь 2012 г. — октябрь 2015 г.) и ПЗС (сентябрь 2014 г. — январь 2023 г.) наблюдений, выполненных в Крымской астрофизической обсерватории на 1.25-м телескопе АЗТ-11 с фотометром-поляриметром (Pirola, 1975), а также ПЗС-камерами FLI ProLine PL230 (2015–2021 гг.) и greateseyes ELSEi (2022–2023 гг.). Результирующая кривая блеска приведена на рис. 1. Дополнительно на рисунке большой квадратной скобкой со стрелками отражено то обстоятельство, что в публикации Lehman-Balanowska (1935) приведен лишь диапазон изменений блеска, но не указано, к какому временному интервалу этот диапазон относится.

На рис. 1а видно, что в полосе B , кроме сильных колебаний блеска на временной шкале 1–10 суток (Gotz, 1961; Robinson et al., 2022; Wendeborn et al., 2024b), у ВР Тау в течение последних 100 лет плавно менялся средний уровень блеска: он несколько понижался примерно до 1980 г., а затем начал плавно возрастать и сейчас стал примерно таким же, каким был сто лет назад. Точнее говоря, в период с 1970 по 1985 г. звезда в полосе B была в среднем на 0^m8 слабее, чем с 2010 по 2024 г., что в 2.2 раза превышает величину σ_B , характерную для этих десятилетий. Более того, как видно из рис. 2а, гистограммы распределений блеска в эти две эпохи, нормированные на общее число наблюдений в каждую эпоху, выглядят по-разному, равно как и соответствующие кумулятивные функции распределения вероятности (рис. 2с). Используя

критерий Колмогорова–Смирнова (Prokhorov and Popomagenko, 2012), мы нашли, что с вероятностью менее 0.1% это различие может быть обусловлено случайными причинами. На этом основании полагаем, что характер изменений блеска ВР Тау в полосе B в две рассматриваемые эпохи действительно был различным.

Похоже, что в полосе V средний уровень блеска также достиг минимума около 1980 г. (см. рис. 1b), но утверждать это с полной определенностью мы не можем, поскольку в более раннюю эпоху имеются в основном визуальные оценки блеска, ошибки которых могут быть довольно велики. С той же степенью достоверности можно утверждать, что после 1980 г. среднее значение показателя цвета $B - V$ стало уменьшаться (рис. 1с). Формально отличие средних значений $B - V$ в периоды с 1985 по 1997 г. и с 2010 по 2024 г. не велико — 1.07 ± 0.14 и 0.97 ± 0.09 соответственно. Однако гистограммы распределений значений $B - V$, как видно из рис. 2b, и соответствующие им кумулятивные функции распределения вероятности (рис. 2d) в эти эпохи заметно отличаются. Критерий Колмогорова–Смирнова позволяет предполагать, что с вероятностью более 99.9% отличия в характере изменений показателя цвета $B - V$ не обусловлены статистической ошибкой, то есть реальны.

Приведенные выше аргументы дают основание утверждать, что средние значения блеска ВР Тау в полосах B и V испытывают долгопериодические вариации с амплитудой $\Delta B \approx 0^m2$ и характерным временем несколько десятков лет. При эффективной температуре звезды $T_{\text{eff}} \lesssim 4000 \text{ К}$ (Hecceg and Hillenbrand, 2014) показатель цвета $B - V$ ее фотосферы даже без учета межзвездного покраснения должен быть больше 1.7 (Pecaut and Mamajek, 2013). Как видно из рис. 1, наблюдаемая величина $B - V$ меньше этого значения, следовательно, мы всегда видим горячее пятно, а вековая переменность блеска ВР Тау связана либо с изменением параметров пятна, либо с переменной экстинкцией его излучения.

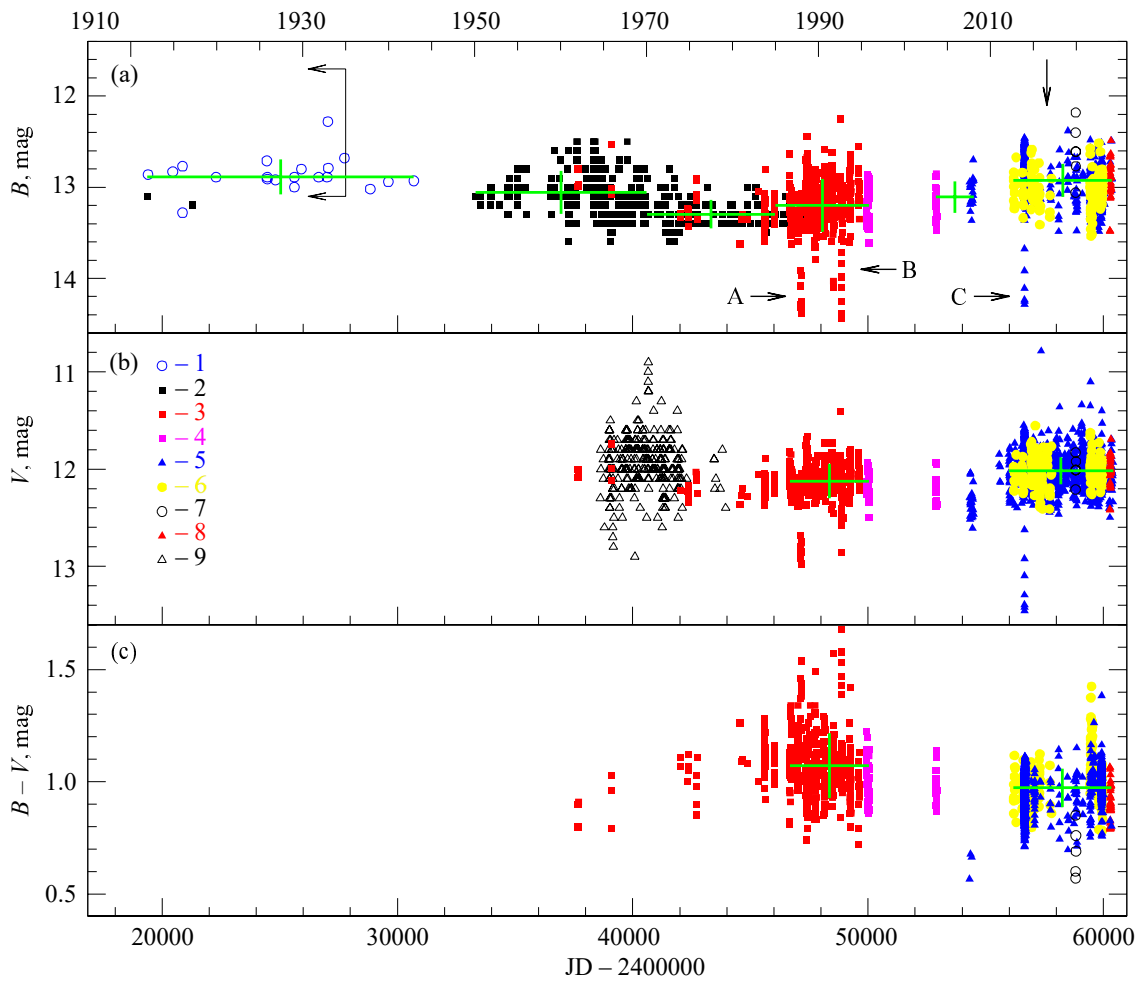


Рис. 1. Вековая кривая блеска VP Tau в полосах B , V и соответствующее изменение показателя цвета $B - V$. Различными символами и цветами показаны данные, взятые из следующих работ: 1 — Kholopov (1951), 2 — наши оценки фотопластинок, 3 — Herbst et al. (1994), 4 — Grankin et al. (2007), 5 — AAVSO, 6 — наши фотозлектрические и ПЗС-данные (КрАО), 7 — Robinson et al. (2022), 8 — ПЗС-наблюдения КГО, 9 — визуальные данные AAVSO. Зелеными крестами показаны средние значения с их ошибками в пределах соответствующих временных интервалов. Горизонтальными стрелками с литерами А, В и С помечены эпизоды глубоких ослаблений блеска, которые более детально изображены на рис. 3 и 4. Вертикальной стрелкой показан примерный момент возникновения микроджета, согласно Dodin et al. (2024).

3.2. Глубокие ослабления блеска VP Tau

Нами были обнаружены три эпизода сильного ($\Delta B \approx 1^m.5$) ослабления блеска звезды, которые на рис. 1 отмечены литерами А, В и С. Более детально изменения блеска в полосе V для эпизодов А (конец декабря 1987 г.) и В (середина сентября 1992 г.) приведены на рис. 3а, с соответственно.

Из рис. 3b, d видно, что ослабление блеска в этих эпизодах сопровождалось ростом показателя цвета $B - V$, то есть звезда краснела. Качественно такую зависимость V от $B - V$ естественно интерпретировать как уменьшение вклада излучения горячего пятна, однако не очевидно по какой причине это происходит: вследствие уменьшения темпа аккреции или экранирования излучения пятна.

Совсем другая картина наблюдалась 26 декабря 2013 г. (эпизод С) — см. рис. 4. В этом случае

ослабление блеска в полосе V было примерно на $0^m.5$ глубже, чем в предыдущих эпизодах, а падение блеска и возврат к исходному уровню происходили гораздо быстрее: всего за 1.5 часа. Кроме того, падение блеска происходило при почти постоянных (в пределах ошибок) значениях показателей цвета: $B - V \approx 0.83$ и $V - R \approx 0.86$.

Примерно через шесть часов после этого эпизода происходившее до того уменьшение величины $B - V$ сменилось ее ростом (см. рис. 5а, с). Иными словами, перед резким ослаблением блеска звезда «голубела», а после него начала «краснеть» (см. также рис. 5b). Это убеждает нас в том, что весьма короткое и глубокое ослабление блеска, которое зарегистрировано всего одним наблюдателем (А. Rodda, AAVSO, — реальное событие). Ослабление блеска при практически по-

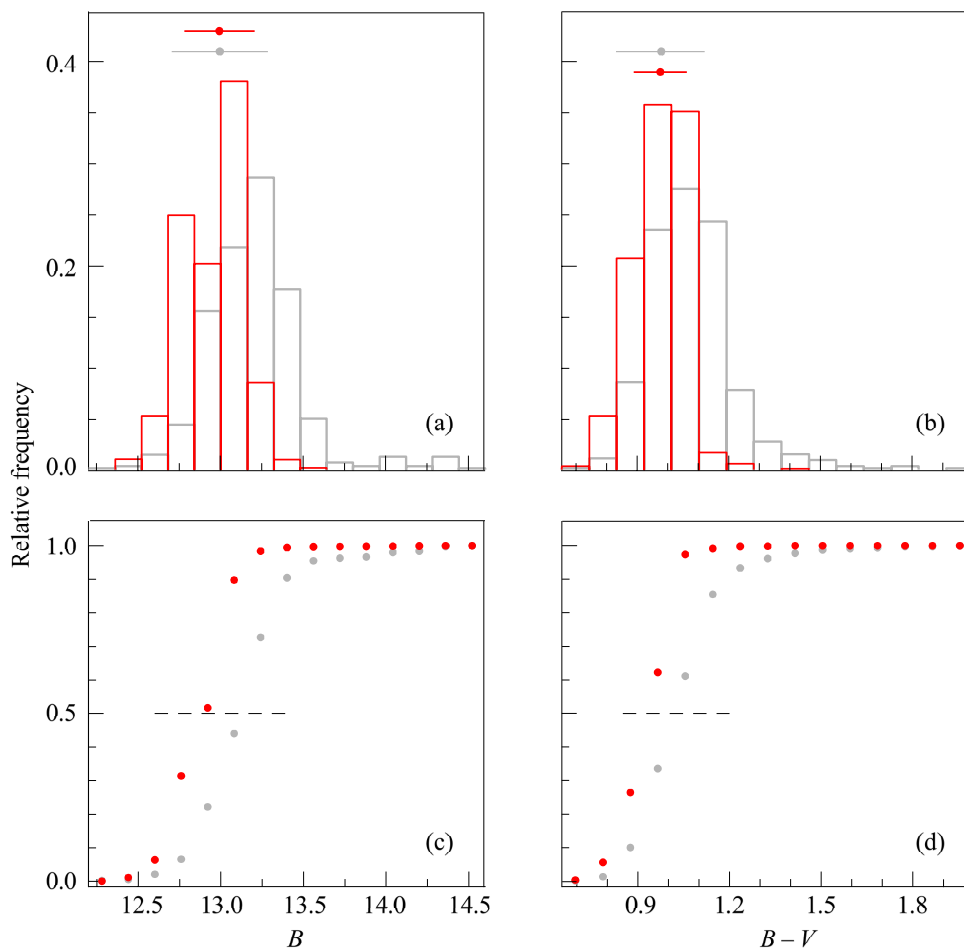


Рис. 2. Гистограммы, описывающие изменение блеска в полосе B (а) и показателя цвета $B - V$ (б) в сезоны 1985–1997 гг. (серый цвет, около 500 измерений) и 2010–2024 гг. (красный цвет, примерно 2000 измерений). Цветными кружками и линиями над гистограммами показаны средние значения величин B и $B - V$ и соответствующие им среднеквадратичные отклонения в рассматриваемых временных интервалах. На панелях (с) и (d) приведены кумулятивные диаграммы для каждой из гистограмм. Штриховая линия проведена на этих панелях для определения медианного значения соответствующих величин.

стоянном (и достаточно малом) показателе цвета $B - V$ означает, что это событие нельзя объяснить уменьшением яркости горячего пятна вследствие уменьшения темпа аккреции. Вопрос о возможных причинах глубоких ослаблений блеска ВР Тау мы рассмотрим в разделе 4.

3.3. Ограничения на параметры гипотетического спутника

Kounkel et al. (2019) не обнаружили переменности лучевой скорости ВР Тау по спектрам ИК-диапазона, полученным с помощью спектрографа APOGEE 2.5-м телескопа обсерватории Apache Point, и на этом основании заключили, что у звезды нет спутника. Однако в работе Kounkel et al. (2019) отсутствуют количественные ограничения на параметры спутника. Мы решили исправить этот недостаток, для чего проанализировали 45 архивных спектров звезды (см. раздел 2),

чтобы определить, как меняется лучевая скорость звезды V_r с течением времени.

Полученные значения лучевых скоростей мы аппроксимировали периодической зависимостью для пробных периодов P в диапазоне от 50 до 40 тысяч дней:

$$V_r \cos(\varphi + \Delta\varphi) + \bar{v}, \quad \varphi = \frac{2\pi t}{P}. \quad (1)$$

Параметры синусоиды V_r , \bar{v} , $\Delta\varphi$ и их ошибки определялись методом наименьших квадратов.

Протопланетный диск ВР Тау, по-видимому, аксиально симметричен (Jennings et al., 2022), а его внутренние и внешние области наклонены к лучу зрения под одинаковым углом (Dodin et al., 2024). Это позволяет предположить, что орбита гипотетического спутника лежит в плоскости диска, а ее эксцентриситет $e = 0$. В таком случае наклон орбиты к лучу зрения должен быть таким же, как и у диска, то есть $i = 38^\circ.1 \pm 0^\circ.5$ (Long et al., 2019),

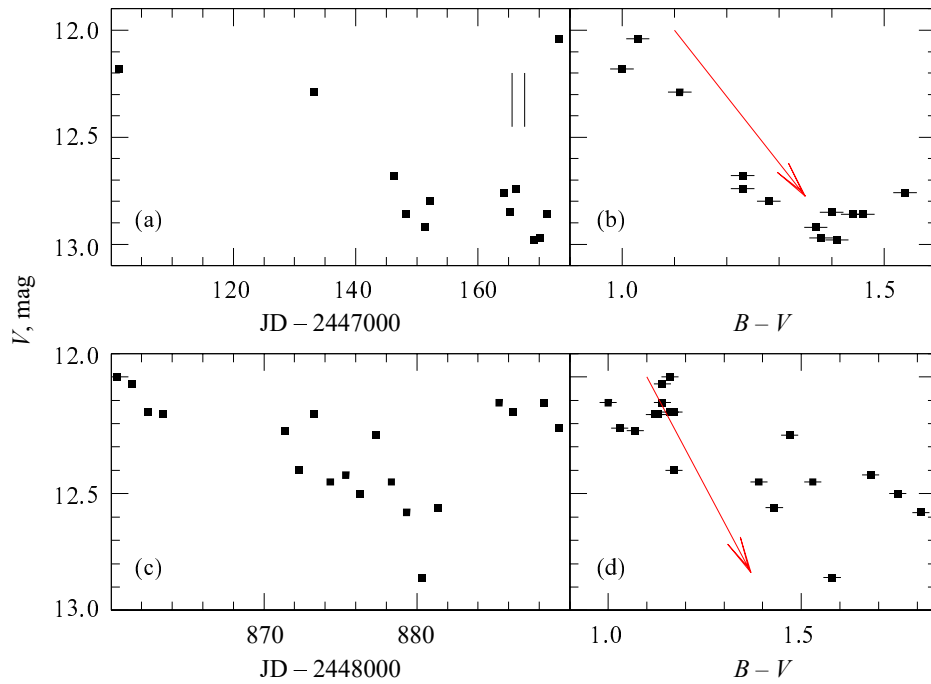


Рис. 3. Изменение блеска в полосе V и показателя цвета $B - V$ вблизи глубоких ослаблений блеска ВР Тау: верхний и нижний ряды для эпизодов А и В на рис. 1 соответственно. Вертикальными линиями на панели (а) отмечены моменты времени, в которые были получены спектры, анализируемые в работе Hartigan et al. (1995). Стрелкой на диаграммах V от $B - V$ показано направление покраснения при стандартном законе экстинкции. Подробности в тексте.

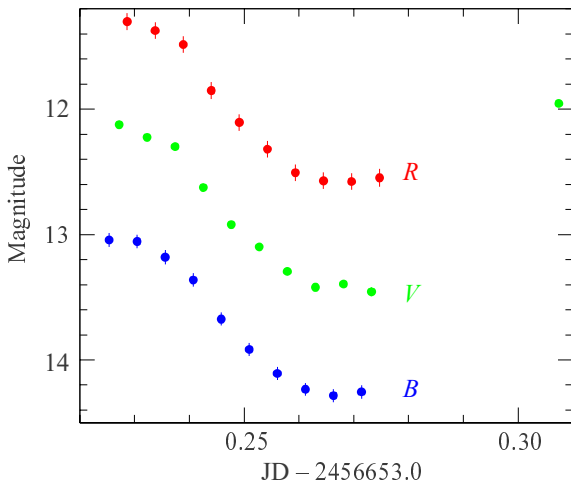


Рис. 4. Изменение блеска в полосах B , V и R 26 декабря 2013 г. (эпизод С на рис. 1).

поэтому орбитальная скорость главной звезды V связана с ее лучевой скоростью V_r соотношением $V = V_r / \sin i$.

Функция масс более яркой звезды в двойной системе (с учетом $e = 0$):

$$\frac{m^3 \sin^3 i}{(M + m)^2} = 1.038 \times 10^{-7} V_r^3 P, \quad (2)$$

где V_r — амплитуда изменения лучевой скоро-

сти более яркой звезды в км с^{-1} , P — период в сутках, $M \approx 0.5 M_\odot$ — масса ВР Тау (см. ниже), m — масса спутника в M_\odot , i — угол наклона орбиты к лучу зрения.

Отсюда следует, что

$$m = 1.038 \times 10^{-7} V_r^3 P \left(1 + \frac{M}{m} \right)^2 \frac{1}{\sin^3 i}. \quad (3)$$

Решая численно это уравнение относительно m , получаем возможную массу спутника при данном значении периода. Большая полуось a вычисляется с помощью третьего закона Кеплера:

$$a = (M + m)^{1/3} P^{2/3}. \quad (4)$$

Полученный с помощью этого соотношения верхний предел массы спутника m в зависимости от его удаления a от ВР Тау, с учетом $M = 0.5 M_\odot$, показан на рис. 6.

Другой подход к оценке параметров возможного спутника ВР Тау основан на результатах наших спекл-интерферометрических наблюдений (см. раздел 2), в ходе которых двойственность также не была обнаружена. Используя полученную из этих наблюдений автокорреляционную функцию, мы по методике, описанной в работе Strakhov et al. (2023), нашли верхний предел расстояний между звездой и ее спутником, в зависимости от

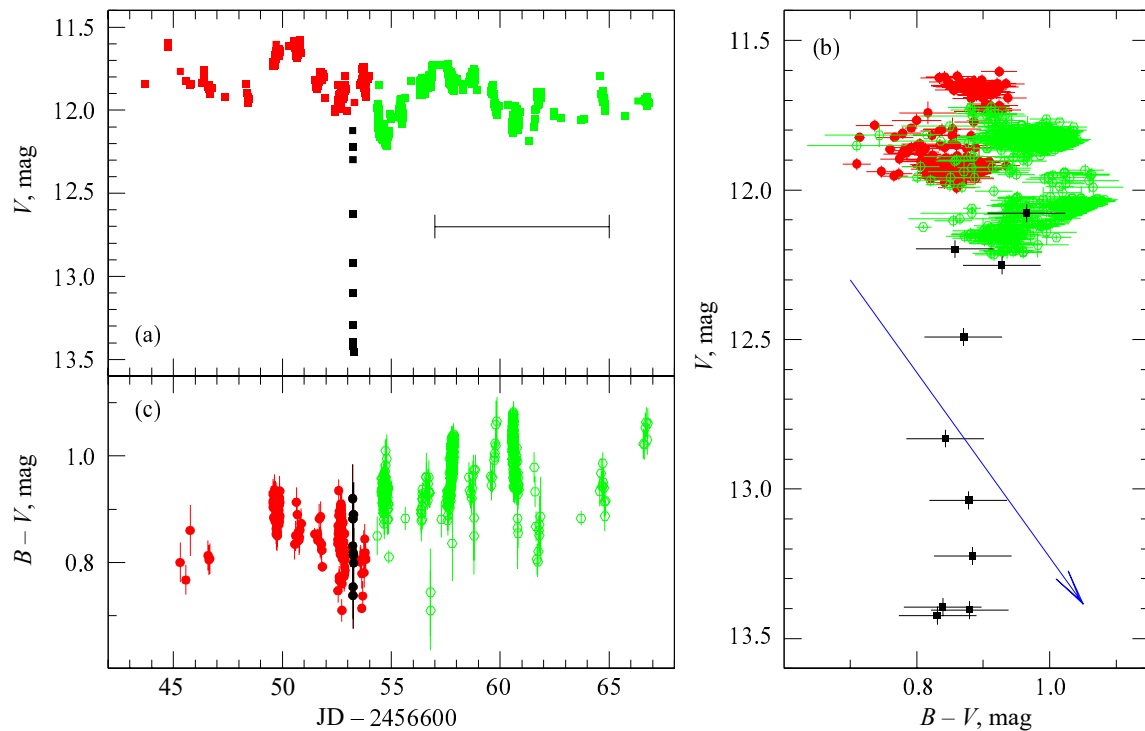


Рис. 5. Панели (а) и (с): изменение блеска в полосе V и показателя цвета $B - V$ вблизи 26 декабря 2013 г. (эпизод С на рис. 1). Панель (b): зависимость «цвет — блеск» для этого участка кривой блеска. Стрелкой на диаграмме V от $B - V$ показано направление покраснения при стандартном законе экстинкции. Горизонтальный отрезок показывает временной интервал, соответствующий примерно значению периода осевого вращения: $P = 8^d$. Участки кривой блеска с разным характером зависимости V от $B - V$ показаны разным цветом. Подробности в тексте.

разности блеска компонентов в полосе I . Результат представлен на рис. 7.

Чтобы сопоставить результаты спекл-интерферометрических наблюдений звезды в полосе I с полученной выше оценкой зависимости $M(a)$ по лучевым скоростям, мы поступили следующим образом. Сначала определили абсолютную звездную величину M_I ВР Тау в полосе I , используя значение ее блеска в этом диапазоне, найденное из наших фотометрических наблюдений: $M_I = 10^m 33 \pm 0^m 09$. При этом мы предполагали, что расстояние до звезды $d = 130$ пк (Akeson et al., 2019), а экстинкция $A_I = 0.27$, что получается при значениях $A_V = 0.45$ (Herczeg and Hillenbrand, 2014) и $R_V = 3.1$. Приняв эффективную температуру звезды $T_{\text{eff}} = 3770 \pm 150$ К (Herczeg and Hillenbrand, 2014) и используя теоретические треки и изохроны молодых звезд из работы Baraffe et al. (2015), нашли, что масса ВР Тау примерно равна $0.5 M_{\odot}$, а возраст близок к 1 млн лет (рис. 8а). Отметим, что масса ВР Тау по результатам наблюдений с помощью интерферометра ALMA (Long et al., 2019) получилась равной $0.52^{+0.15}_{-0.12} M_{\odot}$.

После этого для звезд изохроны с возрастом 1 млн лет мы построили зависимость $\Delta M_I(m)$,

которая описывает, насколько отличается блеск звезд с массой m и $0.5 M_{\odot}$ в полосе I (см. рис. 8b). Поскольку $\Delta M_I = \Delta m_I$, эта зависимость позволяет пересчитать полученные из наблюдений величины Δm_I в разность масс компонентов. В свою очередь, видимое расстояние между компонентами ρ связано с радиусом (круговой) орбиты соотношением $\rho = a \cos i$ при преобразовании угловой меры в линейную.

Объединение результатов спекл-интерферометрических и спектральных наблюдений ВР Тау приведено на рис. 9. Из рисунка следует, что если у звезды имеется спутник, то в диапазоне расстояний от 0.1 до 15 а.е. и от 30 до 200 а.е. он представляет собой коричневый карлик или планету ($m < 0.1 M_{\odot}$), а в диапазоне от 15 до 30 а.е. масса гипотетического спутника не превышает $0.2 M_{\odot}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Как мы уже отмечали в разделе 3.1, у ВР Тау показатель цвета $B - V$ все время гораздо меньше величины, соответствующей ее эффективной температуре. Вероятно, это говорит о том, что на поверхности звезды имеется горячее (аккреционное) пятно, которое всегда видно с Земли. Как сказано в разделе 3.1, Donati et al. (2008) на основании

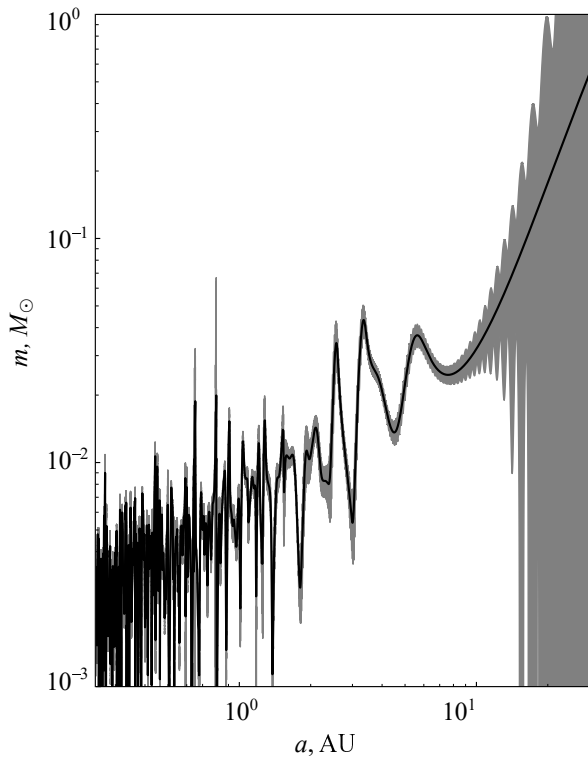


Рис. 6. Верхний предел массы гипотетического спутника ВР Тау в зависимости от расстояния между звездами, полученный по измерению лучевых скоростей.

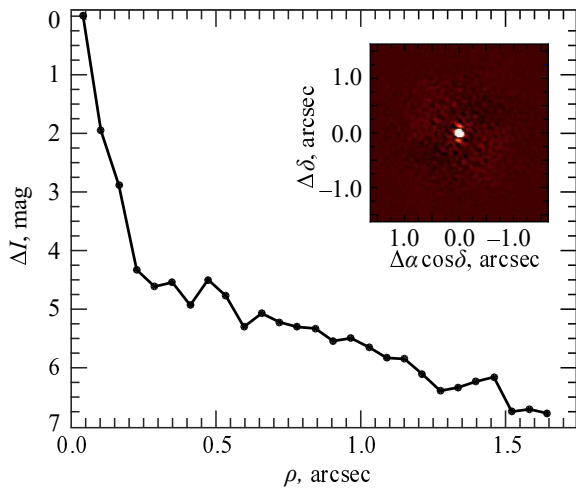


Рис. 7. Ограничение на разность блеска ВР Тау и ее гипотетического спутника в полосе I_c в зависимости от расстояния между ними по данным спеклинтерферометрии. На врезке показана автокорреляционная функция.

доплеровского картирования заключили, что горячее пятно занимает несколько процентов поверхности ВР Тау и вытянуто вдоль меридиана. Этот факт подтвержден трехмерными МГД-расчетами Long et al. (2011). На рис. 10 показано, как должно

перемещаться пятно с такой геометрией относительно наблюдателя при вращении звезды вокруг оси. Для наглядности мы заменили реальное распределение болометрической интенсивности излучения внутри горячего пятна, приведенное на рис. 9 в работе Long et al. (2011), овальным пятном, условно выделив в нем внутреннюю область, в которой формируется свыше 80% болометрического потока пятна.

Из рисунка понятно, что вклад излучения горячего пятна в коротковолновой области должен сильно меняться при вращении звезды вокруг оси. Иными словами, при фотометрических наблюдениях в полосе пропускания фильтра B у ВР Тау должна отчетливо проявляться периодичность, однако найти период до сих пор не удалось: разные авторы получали значения от $7^{\text{d}}6$ до $8^{\text{d}}3$ (см., например, Lin et al., 2023, Wendeborn et al., 2024b). Мы также пытались найти период вращения звезды по вариациям лучевых скоростей эмиссионных линий в видимом и УФ-спектрах звезды. Наибольшую точность скоростей имеют линии He I и He II, однако период не определяется однозначно: наблюдательные данные ложатся на фазовые кривые с примерно одинаковым разбросом относительно синусоидальной зависимости для целого набора периодов из диапазона от 7.0 до 8.5 дней.

Отсутствие четко выраженного периода означает, что имеется дополнительный к вращательной модуляции фактор, меняющий поток излучения от системы «фотосфера + горячее пятно». Можно предположить, что таким фактором является нестационарный характер аккреции и наличие нерегулярных вспышек, связанных с процессом аккреции и/или коронально-хромосферной активностью (Costigan et al., 2014). Кстати сказать, у ВР Тау наблюдались три вспышки длительностью порядка нескольких десятков минут, в ходе которых поток от звезды менялся примерно на 10%, но такого рода вспышки достаточно редкое явление (Lin et al., 2023).

Gotz (1961) сообщает, что у ВР Тау в период rJD 35051–36200 (1954–1957 гг.) на фоне нерегулярной переменности нередко в течение суток происходили изменения блеска на $0^{\text{m}}6$ – $0^{\text{m}}8$. К сожалению, из контекста непонятно, увеличивался или уменьшался при этом блеск звезды, поэтому особый интерес представляют три глубоких ослабления блеска ВР Тау — эпизоды А, В и С, описанные в разделе 3.2. Напомним, что в эпизодах А и В ослабление блеска сопровождалось ростом показателя цвета $B - V$, что, в принципе, могло быть связано с уменьшением вклада потока от горячего пятна из-за снижения темпа аккреции.

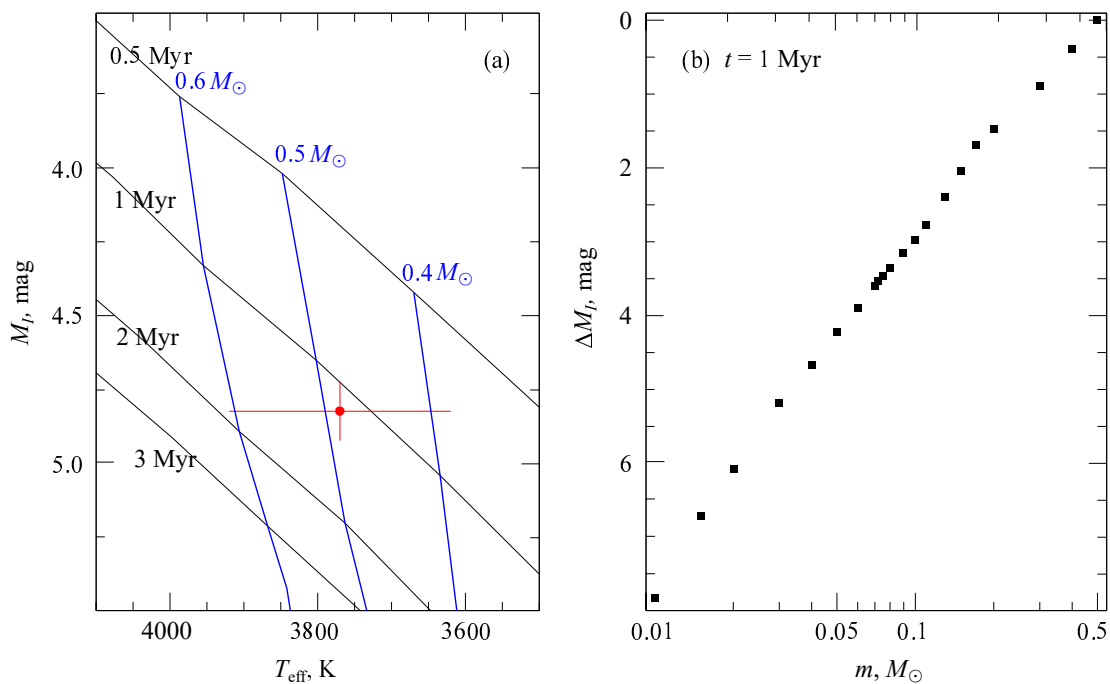


Рис. 8. Положение ВР Тау на диаграмме «эффективная температура — абсолютная звездная величина в полосе I » (а) и разность блеска в той же полосе между ВР Тау ($M = 0.5 M_{\odot}$) и звездами с массой m при возрасте 1 млн лет (б). Графики построены по данным Baraffe et al. (2015).

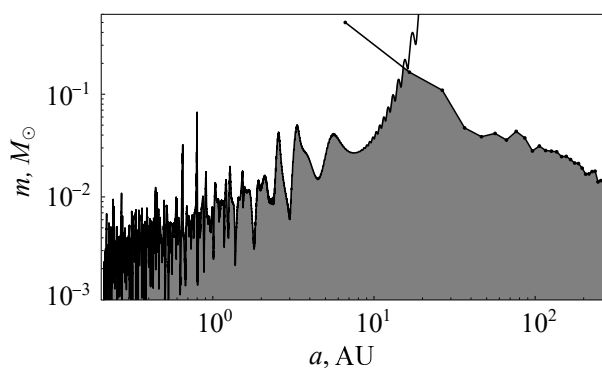


Рис. 9. Ограничение на массу гипотетического спутника ВР Тау в зависимости от его удаления от главной звезды при объединении рис. 6 и 7. Заштрихованная область соответствует допустимым параметрам спутника.

Однако столь же глубокое, как и предыдущие, но более кратковременное ($\Delta t \sim 1^{\text{h}}$) ослабление блеска 26 декабря 2013 г. (эпизод С) происходило при практически постоянном значении $B - V \approx 0.8$. Иными словами, становясь все более тусклой, ВР Тау оставалась весьма голубой, что трудно объяснить следствием уменьшения темпа аккреции. По нашему мнению, в данном случае ослабление блеска произошло из-за экранировки пятна веществом аккреционной струи, а рассеяние света звезды на пылинках падающего вещества

сделало свет более голубым, компенсируя тем самым вклад пятна в коротковолновое излучение.

Если скорость падения вещества $V_{\text{ac}} \sim 300 \text{ км с}^{-1}$ (Wendeborn et al., 2024c), то протяженность затмевающего звезду газопылевого облака должна быть $l \approx V_{\text{ac}} \Delta t \sim 10^{11} \text{ см}$, то есть порядка радиуса звезды, $R = 1.5 R_{\odot}$ (Herczeg and Hillenbrand, 2014), что согласуется с картиной затмения, вызванного ослаблением света частью аккреционной струи, которая проецируется на звезду. Вышесказанное дает нам основание предположить, что причиной фотометрической переменности ВР Тау на масштабах от нескольких часов до нескольких суток, наряду с переменным темпом аккреции, может быть переменная околозвездная экстинкция.

Bouvier et al. (1999) показали, что периодические вариации блеска звезды AA Tau, сопровождаемые изменением степени поляризации (Ménard et al., 2003), обусловлены затмением звезды газопылевым «горбом» (hump), который возникает на внутренней границе протопланетного диска при его взаимодействии с магнитосферой звезды. Такого рода явления наблюдаются у многих СТТС, диск которых виден почти с ребра (Cody et al., 2014). Это, в частности, свидетельствует о том, что пыль у СТТС поздних спектральных классов может «выживать» (не испаряться) в аккреционном потоке вплоть до расстояний, сравнимых с радиусом звезды².

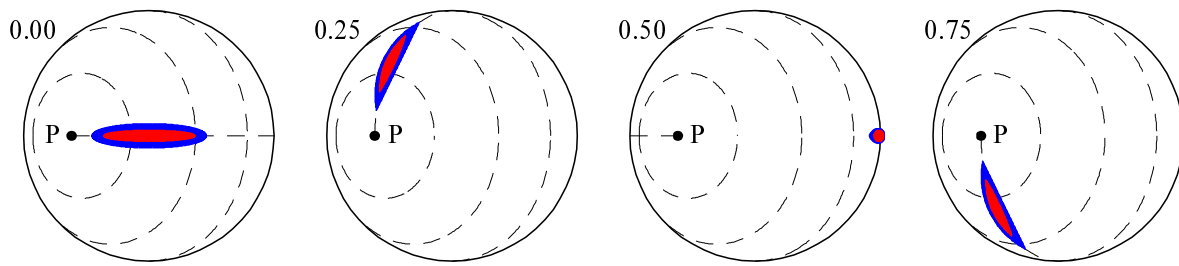


Рис. 10. Полукачественная картина перемещения пятна относительно наблюдателя, по данным из статьи Long et al. (2011), его положения показаны для фаз вращательного периода $\varphi = 0.00, 0.25, 0.50$ и 0.75 . Точка P — полюс звезды, а штриховыми линиями обозначены параллели $30^\circ, 60^\circ$ и 90° , а также меридиан, проходящий через центр пятна. Красным цветом выделена область, в которой формируется основная доля болометрического потока пятна (см. текст).

Но тогда резонно предположить, что изменение блеска СТТС, у которых диск довольно сильно наклонен к лучу зрения, также может быть вызвано переменной экстинкцией, обусловленной падающей на звезду пылью. У звезд, к числу которых относится и ВР Тау ($i \approx 38^\circ$), блеск будет меняться в зависимости от того, сколько и какого размера пылинок долетело до той области аккреционной струи, которая проецируется на звезду. Количественное моделирование переменности блеска ВР Тау, обусловленное переменной экстинкцией, — нетривиальная задача, решение которой зависит как от свойств пылинок в интересующей нас области (распределение по размерам, индикатрисса рассеяния и т.п.), геометрии струи, так и от фазы вращательного периода.

Не менее важно знать и распределение интенсивности излучения в пределах горячего пятна, которое на самом деле не известно. Дело в том, что в трехмерных МГД-расчетах картины аккреции на ВР Тау (Long et al., 2011) темп аккреции является свободным параметром задачи. При выбранном авторами значении $\dot{M}_{ac} < 10^{-8} M_\odot \text{ год}^{-1}$ максимальный поток излучения с поверхности пятна оказывается $F \lesssim 10^{10} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (см., например, рис. 9 из этой работы), что меньше фотосферного потока, соответствующего эффективной температуре ВР Тау, то есть такое аккреционное пятно не может быть существенно горячее фотосферы. Более того, моделирование излучения ВР Тау в видимом (Dodin and Lamzin, 2013; Wendeborn et al., 2024c) и ультрафиолетовом (Wendeborn et al., 2024a) диапазонах показывает, что в среднем в пятне $\lg F > 11$.

Wendeborn et al. (2024b) проанализировали большой объем фотометрических данных, полученных в 2021 и 2022 гг. в разных спектральных

²Аналогичные, но более продолжительные (порядка нескольких десятков суток) затмения могут быть обусловлены так называемым запыленным дисковым ветром (см., например, Dodin et al., 2019, Burlak et al., 2024).

полосах видимой области спектра. Они не исключили, что рассеяние на околозвездной пыли может давать некоторый вклад в переменность блеска звезды, и даже оценили необходимые для этого характерные размеры пылинок. Однако их анализ основан на предположении, что пылевое облако закрывает всю звезду и пятно одновременно (однородное затмение). Кроме того, они не рассматривали, как будет влиять на характер затмения положение пятна относительно наблюдателя и зависимость интенсивности его излучения от угла (посветление к краю). В этой связи отметим, что постоянство показателя цвета при падении блеска в эпизоде С можно объяснить не только преобладанием крупных (порядка 1 мкм и более) пылинок, но и большой оптической толщиной при неоднородном затмении мелкой пылью (Dodin and Suslina, 2021; Natta and Panagia, 1984).

Если изменение содержания пыли в аккреционной струе ВР Тау действительно является одной из существенных причин ее фотометрической переменности, то важно понять, почему меняется «запыленность» падающего на звезду вещества. Для ответа на этот вопрос следует детально рассмотреть, как могут пылинки из протопланетного диска проникать в магнитосферу звезды и сколько долго они могут выживать в горячей аккреционной струе. Для наблюдательной проверки этой гипотезы прежде всего нужно получить информацию о том, как меняется поляризация ВР Тау при осевом вращении звезды.

Нам только три раза удалось провести поляризационные наблюдения звезды. Из таблицы 2 видно, что во время наблюдений степень поляризации звезды в полосах V, R, I была довольно мала (около 0.5%), а точность наших измерений не позволяет судить ни о переменности степени и угла поляризации, ни о зависимости этих параметров от длины волны. В литературе мы нашли только одно упоминание об измерении поляризации звезды: 25 сентября и 14 ноября 1976 г. Bastien (1982) провел измерения в полосах пропускания фильтров, центрированных на 0.59 и 0.75 мкм. Во время

этих наблюдений степень поляризации также была меньше 0.5%, а ошибки наблюдений слишком велики для того, чтобы делать какие-либо выводы.

Обратимся теперь к интерпретации вековой кривой блеска ВР Тау. В разделе 3.1 мы показали, что средние значения блеска звезды испытывают вариации с амплитудой $\Delta B \approx 0^m2$ и характерным временем порядка нескольких десятков лет. Как видно из рис. 1, после 1980 г. увеличение средней яркости звезды сопровождалось уменьшением показателя цвета $B - V$, что естественно объяснить увеличением вклада излучения горячего пятна, то есть ростом темпа аккреции вещества протопланетного диска.

В принципе, нельзя исключить, что темп аккреции модулируется орбитальным движением маломассивного спутника звезды (планеты или коричневого карлика), но отсутствие азимутальной асимметрии диска ВР Тау (Jennings et al., 2022) и полученные нами ограничения на параметры спутника (см. раздел 3.3) делают такое объяснение не очень привлекательным. В качестве альтернативы можно связать вековое изменение темпа аккреции с изменением структуры и/или величины магнитного поля звезды.

Радикальные изменения характера фотометрической переменности, по-видимому связанные с изменением параметров магнитного поля, наблюдались у некоторых звезд типа Т Тельца, например у V410 Тау (Yu et al., 2019) и AA Тау (Bouvier et al., 2013). Возможно, в случае ВР Тау перестройка структуры магнитного поля происходит не скачкообразно, как у этих звезд, а плавно, как в процессе 22-летнего цикла солнечной активности. По мнению Zaire et al. (2024), такого рода явления происходят у GM Aig: волнообразные изменения амплитуды колебаний блеска из-за осевого вращения ($P_{\text{rot}} \approx 6^d$) связаны с нестационарным динамо-процессом, характерное время которого около 100 дней. Заметим, что, по данным Flores et al. (2019), среднее значение индукции магнитного поля ВР Тау 6 ноября 2017 г. совпадало в пределах ошибок со значениями, полученными Donati et al. (2008) в начале и в конце 2006 г., но отсюда не следует, что геометрия магнитного поля за 11 лет не изменилась.

В этой связи обратим внимание на асимметричную структуру биполярного джета ВР Тау. Dodin et al. (2024) нашли, что в течение последних примерно 150 лет объекты Хербига—Аро возникали только в удаляющейся от нас части джета ВР Тау, то есть в контр-джете, а до этого — в струе, направленной к нам. Kondratyev et al. (2024) показали, что асимметрию джетов и контрджетов при взрывах сверхновых можно объяснить нарушением зеркальной симметрии магнитного поля

относительно экваториальной плоскости. Как мы уже отмечали, магнитное поле ВР Тау представляет собой сумму диполя и октополя, наклоненных относительно друг друга и оси вращения звезды (Donati et al., 2008), то есть конфигурацию с нарушенной зеркальной симметрией. Если вследствие этого наиболее активным сейчас является контрджет, то можно допустить, что примерно 150 лет назад конфигурация магнитного поля была другой. Иными словами, структура магнитного поля ВР Тау менялась с течением времени.

Поскольку речь зашла о джете ВР Тау, отметим следующее обстоятельство: в спектрах звезды, полученных 5 и 7 января 1988 г., Hartigan et al. (1995) обнаружили линии [S II] $\lambda 6716$ и $\lambda 6731 \text{ \AA}$, которые, как теперь стало ясно, принадлежали контр-джету, но их не наблюдалось в спектре, полученном в октябре 1990 г. (Hamann, 1994). На рис. 3а видно, что спектры 1988 г. были получены в период, когда блеск звезды сильно упал, вследствие чего слабые линии [S II] стали более заметны.

5. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Из анализа кривой блеска ВР Тау мы заключили, что параметры и локализация горячих (аккреционных) пятен на поверхности звезды, найденные с помощью магнитного доплеровского картирования и соответствующих трехмерных МГД-расчетов, не согласуются с отсутствием четко выраженной вращательной модуляции кривой блеска. Скорее всего, это противоречие обусловлено целым рядом причин: нестационарным характером аккреции, нерегулярными затмениями звезды пылевой компонентой аккреционной струи, проявлением хромосферно-корональной активности.

По нашему мнению, все эти причины так или иначе связаны с переменностью структуры и/или величины магнитного поля звезды. Возможно, что и обнаруженные нами вариации среднего уровня блеска ВР Тау с характерным временем порядка нескольких десятков лет также обусловлены долгопериодическими вариациями магнитного поля.

Существенно продвинуться в понимании причин нетривиальной переменности ВР Тау на разных временных масштабах могло бы помочь повторное магнитное доплеровское картирование, а также поляриметрический мониторинг на протяжении двух—трех оборотов звезды вокруг оси, сопровождаемый спектральными и фотометрическими наблюдениями не только в видимой, но и в ближней ИК-области. В известном смысле данную публикацию следует рассматривать как обоснование актуальности такого рода исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы посвящают эту статью памяти наших недавно скончавшихся друзей и коллег Andrea Richichi и Christoph Leinert. Мы благодарим сотрудников КГО ГАИШ МГУ за помощь при проведении наблюдений, профессора W. Herbst за предоставление информации из своей базы фотометрических данных, а также рецензента В. П. Гринина за полезные замечания. С благодарностью отмечаем, что при выполнении работы были использованы базы данных SIMBAD (CDS, Strasbourg, France), Astrophysics Data System (NASA, USA) и AAVSO (<https://www.aavso.org>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа А. В. Додина и Б. С. Сафонова поддержана грантом РНФ № 23-12-00092. Результаты получены с использованием оборудования, приобретенного в рамках программы развития МГУ имени М. В. Ломоносова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- R. L. Akeson, E. L. N. Jensen, J. Carpenter, et al., *Astrophys. J.* **872** (2), article id. 158 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/aaff6a
- S. H. P. Alencar and G. Basri, *Astron. J.* **119** (4), 1881 (2000). DOI:10.1086/301300
- I. Baraffe, D. Homeier, F. Allard, and G. Chabrier, *Astron. and Astrophys.* **577**, id. A42 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201425481
- P. Bastien, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **48**, 153 (1982).
- L. N. Berdnikov, A. A. Belinskii, N. I. Shatskii, et al., *Astronomy Reports* **64** (4), 310 (2020). DOI:10.1134/S1063772920040010
- C. Bertout, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **27**, 351 (1989). DOI:10.1146/annurev.aa.27.090189.002031
- J. Bouvier, A. Chelli, S. Allain, et al., *Astron. and Astrophys.* **349**, 619 (1999).
- J. Bouvier, K. Grankin, L. E. Ellerbroek, et al., *Astron. and Astrophys.* **557**, id. A77 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201321389
- M. A. Burlak, A. V. Dodin, A. V. Zharova, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 281 (2024). DOI:10.1134/S1990341324700287
- A. M. Cody, L. A. Hillenbrand, and L. M. Rebull, *Astron. J.* **163** (5), id. 212 (2022). DOI:10.3847/1538-3881/ac5b73
- A. M. Cody, J. Stauffer, A. Baglin, et al., *Astron. J.* **147** (4), article id. 82 (2014). DOI:10.1088/0004-6256/147/4/82
- G. Costigan, J. S. Vink, A. Scholz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440**, 3444 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu529
- A. Dodin, K. Grankin, S. Lamzin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (4), 5524 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty2988
- A. V. Dodin and S. A. Lamzin, *Astronomy Letters* **39**, 389 (2013). DOI:10.1134/S1063773713060042
- A. V. Dodin, S. A. Potanin, M. A. Burlak, et al., *Astron. and Astrophys.* **684**, id. L25 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202449436
- A. V. Dodin and E. A. Suslina, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503** (4), 5704 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab487
- J. F. Donati, M. M. Jardine, S. G. Gregory, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **386** (3), 1234 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13111.x
- J. F. Donati and J. D. Landstreet, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 333 (2009). DOI:10.1146/annurev-astro-082708-101833
- L. Errico, S. A. Lamzin, and A. A. Vittone, *Astron. and Astrophys.* **377**, 557 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20011108
- C. Flores, M. S. Connelley, B. Reipurth, and A. Boogert, *Astrophys. J.* **882** (2), article id. 75 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab35d4
- W. Gotz, *Veroeffentlichungen der Sternwarte Sonneberg* **5**, 87 (1961).
- K. N. Grankin, S. Y. Melnikov, J. Bouvier, et al., *Astron. and Astrophys.* **461**, 183 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20065489
- V. P. Grinin, *Astrofizika* **16** (2), 147 (1980). DOI:10.1007/BF01005461
- F. Hamann, *Astrophys. J. Suppl.* **93**, 485 (1994). DOI:10.1086/192064
- P. Hartigan, S. Edwards, and L. Ghandour, *Astrophys. J.* **452**, 736 (1995). DOI:10.1086/176344
- L. Hartmann, G. Herczeg, and N. Calvet, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 135 (2016). DOI:10.1146/annurev-astro-081915-023347
- W. Herbst, D. K. Herbst, E. J. Grossman, and D. Weinstein, *Astron. J.* **108**, 1906 (1994). DOI:10.1086/117204
- G. J. Herczeg and L. A. Hillenbrand, *Astrophys. J.* **786**, article id. 97 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/786/2/97
- J. Jennings, M. Tazzari, C. J. Clarke, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **514** (4), 6053 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1770
- P. N. Kholopov, *Peremennye Zvezdy (Variable Stars)* **8**, 83 (1951).
- P. N. Kholopov, *Irregular Variables Associated with Nebulae and Similar Objects, in Non-Stationary Stars and Methods of Their Study. Eruptive Stars*, Ed. by A. A. Boyarchuk and R. E. Gershberg (Nauka, Moscow, 1970), pp. 241–301.

32. V. A. Kiryukhina and A. V. Dodin, *Astronomy Letters* **50** (9), 571 (2024). DOI:10.1134/S1063773724700440
33. I. A. Kondratyev, S. G. Moiseenko, and G. S. Bisnovaty-Kogan, *Physical Review D* **110** (8), id. 083025 (2024). DOI:10.1103/PhysRevD.110.083025
34. M. Kounkel, K. Covey, M. Moe, et al., *Astron. J.* **157** (5), article id. 196 (2019). DOI:10.3847/1538-3881/ab13b1
35. A. K. Kulkarni and M. M. Romanova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **386** (2), 673 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13094.x
36. S. A. Lamzin, S. Y. Melnikov, K. N. Grankin, and O. V. Ezhkova, *Astron. and Astrophys.* **372**, 922 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010564
37. I. Lehman-Balanowskaja, *Peremennye Zvezdy (Variable Stars)* **5** (1), 9 (1935).
38. C.-L. Lin, W.-H. Ip, Y. Hsiao, et al., *Astron. J.* **166** (3), id. 82 (2023). DOI:10.3847/1538-3881/ace322
39. F. Long, G. J. Herczeg, D. Harsono, et al., *Astrophys. J.* **882** (1), article id. 49 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab2d2d
40. M. Long, M. M. Romanova, A. K. Kulkarni, and J. F. Donati, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (2), 1061 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.18193.x
41. F. Ménard, J. Bouvier, C. Dougados, et al., *Astron. and Astrophys.* **409**, 163 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030936
42. A. Natta and N. Panagia, *Astrophys. J.* **287**, 228 (1984). DOI:10.1086/162681
43. B. Nisini, M. Gangi, T. Giannini, et al., *Astron. and Astrophys.* **683**, id. A116 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202346742
44. M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, *Astrophys. J. Suppl.* **208** (1), article id. 9 (2013). DOI:10.1088/0067-0049/208/1/9
45. V. Pirola, *Annales Academiae Scientiarum Fennicae: Physica* **418** (1975).
46. L. M. Rebull, J. R. Stauffer, A. M. Cody, et al., *Astron. J.* **159** (6), id. 273 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab893c
47. C. E. Robinson, C. C. Espaillet, and J. E. Rodriguez, *Astrophys. J.* **935** (1), id. 54 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac7e51
48. M. M. Romanova, A. V. Koldoba, G. V. Ustyugova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (1), 372 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab1724
49. B. S. Safonov, P. A. Lysenko, and A. V. Dodin, *Astronomy Letters* **43**, 344 (2017). DOI:10.1134/S1063773717050036
50. I. A. Strakhov, B. S. Safonov, and D. V. Cheryasov, *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 234 (2023). DOI:10.1134/S1990341323020104
51. J. Wendeborn, C. C. Espaillet, S. Lopez, et al., *Astrophys. J.* **970** (2), id. 118 (2024a). DOI:10.3847/1538-4357/ad4a62
52. J. Wendeborn, C. C. Espaillet, T. Thanathibodee, et al., *Astrophys. J.* **971** (1), id. 96 (2024b). DOI:10.3847/1538-4357/ad543d
53. J. Wendeborn, C. C. Espaillet, T. Thanathibodee, et al., *Astrophys. J.* **972** (1), 100 (2024c). DOI:10.3847/1538-4357/ad65ed
54. L. Yu, J. F. Donati, K. Grankin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489** (4), 5556 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz2481
55. B. Zaire, J. F. Donati, S. P. Alencar, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **533** (3), 2893 (2024). DOI:10.1093/mnras/stae1955
56. M. Čemelić and M. Siwak, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **491** (1), 1057 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz3088
57. Yu. V. Prokhorov and L. S. Ponomarenko, *Lectures on Probability Theory and Mathematical Statistics (Moscow University Press, Moscow, 2012)* [in Russian].

On the Causes of Brightness Variability of a Young Star BP Tau

M. A. Burlak¹, K. N. Grankin², A. V. Dodin¹, A. V. Zharova¹, N. P. Ikonnikova¹, V. A. Kiryukhina¹, S. A. Lamzin¹, B. S. Safonov¹, and I. A. Strakhov¹

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Crimean Astrophysical Observatory RAS, 298409 Nauchny, Republic of Crimea

We have constructed and analyzed the secular light curve of BP Tau, a classical T Tau star. Wave-like variations in the average brightness level of the star with an amplitude of $\Delta B \approx 0^m.2$ and a characteristic time of several decades were found. We present arguments in favor of the concept that three deep ($\Delta B \sim 1^m.5$) dimming episodes lasting from one hour to several days are associated with the eclipse of a hot (accretion) spot by the dust infalling on the star along with gas. It is possible that such eclipses, albeit with a smaller amplitude, are the reason for the lack in BP Tau of a strictly expressed brightness variation periodicity related to axial rotation. We found that in the distance range of 0.1 to 200 AU, BP Tau has no companions with masses greater than $0.2 M_{\odot}$. Possible reasons of brightness and color index variability of the star on different time scales are discussed.

Keywords: stars: variables: T Tauri, Herbig Ae/Be—stars: individual: BP Tau—stars: jets—ISM: jets and outflows