

УДК 524.387

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАТМЕННОЙ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКОЙ КАРЛИКОВОЙ НОВОЙ EX DRA ИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЗНЫХ СОСТОЯНИЯХ АКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ

© 2019 г. Т. С. Хрузина<sup>1\*</sup>, И. Б. Волошина<sup>1\*\*</sup>, Ш. Цянь<sup>2</sup>, М. Вольф<sup>3</sup>, В. Г. Метлов<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

<sup>2</sup>Юннаньские обсерватории Китайской академии наук, Куньминь, Китайская Народная Республика

<sup>3</sup>Астрономический институт Чешской академии наук, Прага, Чешская республика

<sup>4</sup>Крымская астрономическая станция ГАИШ МГУ, Научный, Россия

Поступила в редакцию 10.01.2019 г.; после доработки 09.02.2019 г.; принята к публикации 28.02.2019 г.

Представлены результаты долговременных фотометрических наблюдений катаклизмической переменной EX Dra, полученных в период с 2014 по 2016 г. на Крымской станции ГАИШ МГУ (24 ночи, свыше 10 500 измерений). Наблюдения были выполнены при помощи ПЗС фотометра на 50-см и 60-см телескопах в видимой и красной областях спектра в спокойном и активном состояниях. Для полноты анализа были привлечены фотометрические наблюдения, проведенные на обсерватории Ондражейов в 2010 г. в фильтрах *V* и *R* системы Джонсона. По новым многочисленным наблюдениям EX Dra определен орбитальный период системы, хорошо согласующийся с полученными ранее значениями. В рамках комбинированной модели, учитывающей потоки излучения от газовой струи и от горячего пятна на боковой поверхности аккреционного диска, определены параметры компонентов системы (белого и красного карликов, аккреционного диска с горячим пятном и газовой струи) и рассмотрены их изменения при переходе от одной стадии активности к другой. Для успешной аппроксимации шести кривых блеска, у которых согласие наблюдательных и теоретических кривых оказалось неудовлетворительным, был использован вариант комбинированной модели, учитывающий присутствие темных пятен на поверхности вторичного компонента. Это позволило на качественном уровне удовлетворительно воспроизвести вторичные минимумы на кривых блеска, в которых наблюдался сдвиг этого минимума от фазы 0.5. Определены параметры темных пятен на красном карлике. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что вспышки в системе EX Dra связаны с нестационарным характером истечения вещества из вторичного компонента.

DOI: 10.1134/S000462991907003X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Карликовые новые (КН) — тесные двойные системы, в которых звезда позднего типа (вторичный компонент) полностью заполняет свою полость Роша. Истекающее вещество аккумулируется в диске и аккрецирует на соседний (первичный) компонент — белый карлик (БК). Своё название КН получили благодаря рекуррентным вспышкам с амплитудой в  $2\text{--}5^m$  с характерным временем от нескольких дней до нескольких месяцев. Вспышки в системе происходят либо в результате нестабильности скорости истечения вещества из вторичного

компонента (модель МТИМ), либо из-за тепловой нестабильности вещества в аккреционном диске (модель ДИМ), переключающей режимы в нем от низковязкого до высоковязкого (см. [1] и ссылки в ней). Получение детальных фотометрических наблюдений карликовых новых на ранних этапах вспышки и дальнейший их анализ в рамках той или иной модели позволяет сделать вывод о возможной причине вспышки. К сожалению, предсказать начало очередной вспышки достаточно трудно: всплывочный цикл ( $P_b$ ), даже если и известен, представляет собой среднее значение, подъем блеска системы происходит очень быстро (обычно это часы), а нахождение системы в активном состоянии непродолжительно. Требуется проводить непрерывный мониторинг объекта на протяжении достаточно

\*E-mail: kts@sai.msu.ru

\*\*E-mail: vib@sai.msu.ru

длительного времени, превышающего  $P_b$ , что не всегда возможно из-за условий видимости КН.

## 2. КРАТКИЙ ОБЗОР ДАННЫХ ПО EX Dra

Переменная EX Dra (HS 1804+6753) была впервые обнаружена в ходе обзора Hamburger Quasar Survey [2]. Проведенные затем наблюдения этой системы [3] показали, что EX Dra представляет собой долгопериодическую карликовую новую с амплитудой вспышки  $2-3^m$  и орбитальным периодом  $P_{orb} = 5.04^h$ , т.е. система относится к долгопериодическим КН, таким как EM Cyg ( $P_{orb} = 6.96^h$ ).

Кривые блеска EX Dra показывают орбитальную переменность с эфемеридой [4]:

$$T_{\min} = \text{HJD } 245\,2474.80513(10) + \quad (1) \\ + 0.209\,937\,316(13)E + \\ + 18.4(9) \times 10^{-4} \sin \left( 2\pi \frac{E - 3520}{36\,600} \right).$$

Цифры в скобках указывают погрешность последних знаков числа.

Спектральные исследования системы [5] свидетельствуют о присутствии в ее спектре эмиссионных линий  $\text{H}\alpha$ , образующихся вблизи горячего пятна на диске и/или вблизи внутренней точки Лагранжа L1. После коррекции за прогрев поверхности красного карлика M1–2 V горячим излучением первичного компонента авторы [5] получили для полуамплитуды вторичного компонента значение  $K_2 = 210 \pm 10$  км/с. С учетом данных о кривой лучевых скоростей белого карлика было получено отношение масс  $q = M_1/M_2 \sim 1.25$ . В работе [6] из анализа спектральных и фотометрических наблюдений EX Dra получены следующие базовые параметры системы:  $q = 1.34$ ,  $i = 84.2^\circ$ ,  $M_1 = 0.75 M_\odot$ ,  $M_2 = 0.56 M_\odot$ . Баптиста и др. [7], исследуя  $V$  и  $R$  кривые блеска EX Dra как в спокойном состоянии, так и во время вспышки, из анализа профиля затмений получили следующие значения для базовых параметров:  $q = 1.39 \pm 0.12$ ,  $i = 85 \pm 2.5^\circ$ ,  $M_1 = (0.75 \pm 0.15) M_\odot$ ,  $M_2 = (0.54 \pm 0.10) M_\odot$ , расстояние до системы  $d = 290 \pm 80$  пк.

В работе [8] были исследованы многоцветные  $BVR$  кривые блеска этой системы в неактивном состоянии (2–19 июня 2002 г.) в модели, учитывающей четыре источника излучения: главный (белый карлик, БК) и вторичный (красный карлик, КК) компоненты, аккреционный диск и горячее пятно, расположенное на пересечении газового потока с внешним краем диска. По ширине затмения были

получены ограничения на нижний предел наклона орбиты  $i > 83^\circ$  при  $q > 1.23$ . При фиксированном значении  $T_2 = 3750 \pm 150$  К (что соответствует звезде спектрального класса M0–2 V) оптимальное значение температуры первичного компонента составляет  $T_1 = 50\,000 \pm 20\,000$  К, температура горячего пятна  $T_s = 40\,000 \pm 10\,000$  К, температура вещества на внешнем крае диска  $T_d = 6500 \pm 1000$  К, радиус диска  $R_d/\xi = 0.50 \pm 0.05$  ( $\xi$  — расстояние между L1 и центром масс БК),  $\alpha_g = 0.3 \pm 0.2$  ( $\alpha_g$  — параметр, зависящий от вязкости вещества в диске, он определяет профиль распределения температуры вдоль радиуса диска, для стационарного диска значение  $\alpha_g = 0.75$  [9]). Из оценок абсолютной величины вторичного компонента по его спектральному классу ( $8.8 < M_v < 9.7$ ) в сочетании с наблюдаемой яркостью в середине затмения ( $V = 16.57 \pm 0.05$ ) и покраснением ( $A_v = 0.45 \pm 0.63$ ) авторы определили расстояние до EX Dra,  $d = 240 \pm 90$  пк. Список значений параметров EX Dra, ранее полученных разными исследователями, приведен в табл. 1.

Каждые 10–30 дней в системе EX Dra происходят вспышки продолжительностью до 10 дней. Наблюдения системы по данным AAVSO<sup>1</sup> в белом свете (кружки) и в фильтре  $R$  (красные квадраты) в период с 1995 по 2016 г. представлена на рис. 1. Отчетливо видны два разных состояния системы, впервые обнаруженные Хавелин и Хенден [10], дата переключения режимов согласно их расчетам приходится на момент JD 245 2665. До этого времени блеск системы в спокойном состоянии (в минимуме) составлял  $\sim 15.5^m$  (во вспышке внезатменный поток увеличивался до  $13.5^m$ ), после этой даты блеск звезды во время затмений возрос до  $\sim 15^m$  (во вспышке внезатменный поток уменьшился до  $\sim 13^m$ ). Фурье-анализ вспышечного цикла показал [10], что до даты переключения средний период вспышек составлял 23.9 дней (плавно меняясь от  $\sim 18$  до  $\sim 30$  дней), а после нее уменьшился вдвое, до 10–15 дней. При этом временная шкала вспышек стала весьма нестабильной.

В работе [14] рассматриваются два подхода к объяснению вспышек КН, согласно которым вспышки являются либо результатом изменения скорости переноса масс от вторичного компонента (модель MTIM) либо вследствие тепловой нестабильности вещества в аккреционном диске (модель DIM), когда происходит переключение состояния с низкой вязкостью вещества диска на состояние с высокой вязкостью (см. [1] и приведенные там ссылки). Наблюдения карликовых новых, полученные на ранних этапах вспышки, позволяют объяснить вспышку в системе в рамках той или иной

<sup>1</sup> Данные взяты с сайта [www.aavso.org/LCGv2/](http://www.aavso.org/LCGv2/)

Таблица 1. Параметры EX Dra из литературных данных

Параметр	Значение	Ссылка	Параметр	Значение	Ссылка
$P_{orb}$ , сут	0.20993718(2)	[8]	Sp	M0	[6]
	0.209937399(13)	[4]		$M0 \pm 2$	[7]
	0.20993698	[7]		$M1.5 \pm 0.5V$	[13]
$i, ^\circ$	>83	[8]	$K_1$ , км/с	$163 \pm 11$	[7]
	85	[10]		176	[12]
	$85 \pm 2.5$	[7]		167	[5, 6]
	84.2(6)	[6]			
$q = M_1/M_2$	82.1	[12]	$K_2$ , км/с	$224 \pm 17$	[7]
	1.34	[8]		210	[5, 8, 12]
	1.39(11)	[7]		223	[6]
	1.25	[5]			
$M_1, M_\odot$	1.03–1.37	[12]	$R_d, a_0$ покой	0.31(1)	[11]
	0.75(15)	[6, 8, 10]		0.27(1)	[6]
	0.66	[5]		0.267(4)	[7]
	0.70	[12]		0.21	[5]
$M_2, M_\odot$	0.56(2) 0.54(1) 0.52 0.59	[6, 8]	$R_d, \xi$ покой	0.50(1)	[7]
		[7, 10]		0.66	[11]
		[5]			
		[12]			
$R_1$	0.013(1) $R_\odot$	[6]	$\xi$	0.471(2) $a_0$	[6]
	0.011(2) $R_\odot$	[5, 7]		0.85(4) $R_\odot$	[6, 7]
	0.0149 $a_0$	[7]		0.82 $R_\odot$	[12]
	0.0317 $\xi$	[7]			
$R_2, R_\odot$	0.57(4)	[6, 7]	$R_d, a_0$ вспышка	0.49	[11]
	0.59	[12]			
$T_1, K$	28000 $\pm$ 300	[7]	$M_v$ mag	8.8–9.7	[8]
	50000 $\pm$ 20000	[8]			
$T_2, K$	3850 $\pm$ 200	[7]	$E(B - V)$ , mag/кпк	0.15	[7]
	3750 $\pm$ 150	[8]			
$a_0, R_\odot$	1.63(2)	[6]	$d$ , пк	290 $\pm$ 80	[7]
	1.6(1)	[7]		240 $\pm$ 90	[8]
	1.58	[12]			

модели. Модель MTIM предсказывает, что аккреционный диск в системе должен сжиматься в начале вспышки в результате внезапного увеличения истекающего вещества с небольшим угловым моментом, в то время как яркость горячего пятна (ГП) должна увеличиваться в ответ на более высокий темп истечения вещества. Такие эффекты не ожидаются в модели DIM. Так, результаты недавних наблюдений промежуточного поляра EX Dra [15] свидетельствуют о том, что для описания вспышек в данной системе более предпочтительна модель MTIM.

Мы выполнили исследование оптических кри-вых блеска EX Dra в марте–апреле 2010 г. в фильтрах  $V$ ,  $R$  и в период с мая 2014 г. по июнь

2016 г. в полосе  $Rc$ . Целью нашего исследования была проверка гипотезы, высказанной Баптистой в работе [14], согласно которой вспышки в данной системе вызваны усилением темпа истечения вещества из вторичного компонента, а не тепловой нестабильностью из-за изменения вязкости вещества в диске.

В разделе 3 описаны наблюдения EX Dra и выполненное нами определение орбитального периода системы по наблюдениям в период 2010–2016 гг. В разделе 4 приведено краткое описание моделей тесной двойной системы (ТДС), использованных для определения параметров системы, в разделе 5 — результаты проведенного анализа, а в

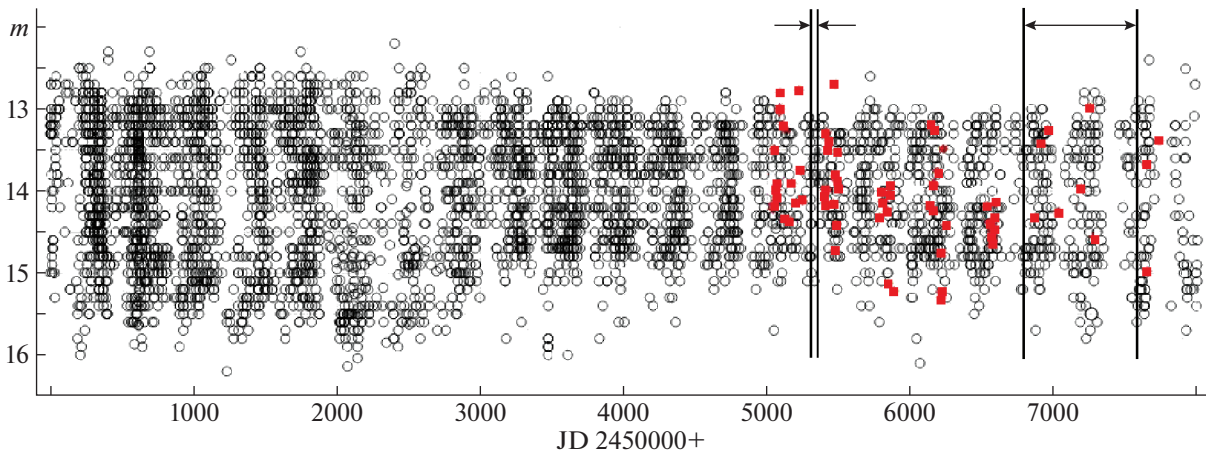


Рис. 1. Наблюдения EX Dra в белом свете (кружки) и в фильтре  $R$  (красные квадраты) в период с 1995 по 2016 г. согласно данным AAVSO. Вертикальные линии показывают область наших наблюдений, использованных для определения параметров системы.

разделе 6 обсуждаются полученные результаты. В разделе 7 суммируются основные выводы работы.

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения EX Dra были выполнены в марте-апреле 2010 г. в обсерватории Ондржейов (Чешская республика) на 65-см телескопе в фильтрах  $V$  и  $R$  системы Джонсона. Использована CCD камера G2-3200<sup>2</sup>. Время экспозиции составляло 90 с для обоих фильтров. В качестве звезды сравнения использована звезда GSC 04429–01414 ( $V = 14.4^m$ ). Ее звездная величина в видимой и красной областях спектра на момент наблюдений была неизвестна, поэтому данные приведены в относительных единицах.

Наблюдения системы в 2014–2016 гг. проведены при помощи ПЗС-фотометра на 50- и 60-см телескопах Крымской Астрономической станции ГАИШ МГУ. В качестве приемника излучения на 50-см телескопе использовалась ПЗС-камера Arogee Alta U8300 (3326 × 2504 pix, 1 pix = 5.4  $\mu\text{m}$ ) с максимумом эффективности 60% в области 5800–6600  $\text{\AA}$  и 30% в области 4000  $\text{\AA}$ . На 60-см телескопе использовалась ПЗС-камера Arogee 47 (1024 × 1024 pix, 1 pix = 13  $\mu\text{m}$ ). Продолжительность рядов наблюдений зависела от погодных условий, обычно превышала 5 ч чтобы охватить 1–1.5 орбитальных циклов. Выбор фильтра для наблюдений определялся чувствительностью используемого приемника излучения, максимальной в красной области спектра  $Rc$  ( $\lambda = 6700 \text{\AA}$ ). Погрешность единичного наблюдения

примерно одинакова для обоих телескопов и составляла  $\sigma \sim 0.02\text{--}0.06^m$ . Длительность экспозиций из-за слабости объекта варьировалась от 40 до 60 с в зависимости от погодных условий. Детали наблюдений представлены в табл. 2.

Основной звездой сравнения в наблюдениях 2014–2016 гг. служила N 120 из списка стандартов AAVSO с координатами  $\alpha(2000) = 18^{\text{h}}03^{\text{m}}37.55^{\text{s}}$  и  $\delta(2000) = 67^{\circ}57'01.7''$  из ближайшей окрестности EX Dra, ее блеск составляет:  $B = 12.411^m$ ,  $V = 12.038^m$  и  $Rc = 11.832^m$ . Постоянство блеска стандарта проверялось по нескольким контрольным звездам. В течение 3-х ночей в качестве звезды сравнения использовалась звезда N 134. Одновременно в течение 2-х из этих ночей также наблюдалась и звезда N 120, что дало нам возможность сравнить потоки излучения EX Dra, вычисленных относительно обеих звезд сравнения. Оказалось, что это различие, в среднем, составляет  $\Delta m = m(134) - m(120) = -0.002$  (часть точек имеет одинаковые значения вычисленных потоков в звездных величинах), а соотношение потоков равно  $F(120) = 0.998 F(134)$ . Для единообразия все наши наблюдения были приведены к стандарту N 120. Обработка полученных наблюдений производилась с помощью метода апертурной фотометрии с использованием пакета программ MAXIM-DL.

Из 24 рядов наблюдений 17 были получены на 50-см телескопе AZT-5 (2014–2015 гг.), 7 рядов, начиная с сентября 2015 по июнь 2016 г. — на 60-см телескопе Zeiss-600, и 2 ряда наблюдений в фильтре  $Rc$  в одну ночь (27.05.2014 г.) проводились одновременно на обоих телескопах с целью определения систематической разницы полученных потоков. Сравнение кривых блеска показало, что связь потоков излучения в фильтре  $Rc$ , полученных

<sup>2</sup>Подробности см. на сайте [www.gxccd.com](http://www.gxccd.com)

Таблица 2. Журнал наблюдений EX Dra

“Дата” JD Фильтр	$T_1 - T_2$ , “Дата”+	$\varphi_1 - \varphi_2$	$n$	$T_{\min}$ (набл.)	$T_{\min}$ (теор.)	$m_{\min}$	$m_{\max}$
2455281, V	0.423–0.588	0.824–1.614	144	5281.45689	5281.45820	1.961	–0.179
2455294, R	0.424–0.655	0.752–1.854	210	5294.47576	5294.47714	1.668	–0.038
2455295, V	0.277–0.563	0.816–2.181	235	5295.52471	5295.52610	2.005	–0.133
2455309, R	0.347–0.622	0.835–2.148	250	5309.59021	5309.59139	1.318	–0.789
2455316, R	0.382–0.615	0.346–1.456	210	5316.51694	5316.51810	1.534	–0.085
2456790, Rc	0.284–0.497	0.019–1.032	266	6790.487916	6790.48864	15.089	13.003
2456805, Rc	0.291–0.494	0.503–1.472	344	6805.394538	6805.39514	15.524	13.428
2456806, Rc	0.278–0.480	0.205–1.168	252	6806.444571	6806.44508	15.370	12.935
2456819, Rc	0.376–0.498	0.596–1.177	147	6819.462557	6819.46396	15.525	13.925
2456834, Rc	0.281–0.497	0.592–1.619	378	6834.365058	6834.36635	15.528	14.130
2456916, Rc	0.300–0.508	0.277–1.264	706	6916.450335	6916.45050	15.411	13.314
2456960, Rc	0.195–0.550	0.359–2.053	1252	6960.327314	6960.32940	15.573	14.094
2457089, Rc	0.199–0.474	0.848–2.159	475	7089.439954	7089.44041	15.287	13.025
2457090, Rc	0.204–0.538	0.635–2.227	660	7090.280370	7090.28118	15.328	13.059
2457091, Rc	0.218–0.578	0.465–2.184	703	7091.329479	7091.33029	15.444	13.236
2457106, Rc	0.225–0.484	0.949–2.183	511	7106.236423	7106.23672	15.580	14.114
2457108, Rc	0.256–0.522	0.625–1.893	519	7108.337453	7108.33865	15.611	14.302
2457118, Rc	0.258–0.463	0.265–1.243	401	7118.411180	7118.41122	15.607	14.200
2457123, Rc	0.245–0.502	0.023–1.247	505	7123.451527	7123.45230	15.614	14.286
2457124, Rc	0.276–0.508	0.932–2.036	453	7124.290578	7124.29130	15.595	13.919
2457167, Rc	0.307–0.532	0.901–1.978	443	7167.330393	7167.33139	15.591	14.193
2457182, Rc	0.360–0.520	0.608–1.370	315	7182.441782	7182.441783	15.591	14.309
2457267, Rc	0.249–0.500	0.959–2.159	497	7267.257557	7267.25841	15.601	14.275
2457268, Rc	0.251–0.500	0.733–1.919	487	7268.308530	7268.30939	15.635	14.438
2457271, Rc	0.224–0.469	0.894–2.061	487	7271.245937	7271.24788	15.642	14.549
2457456, Rc	0.198–0.483	0.987–2.345	560	7456.200439	7456.20052	15.211	12.744
2457457, Rc	0.244–0.503	0.968–2.203	347	7457.250034	7457.25049	15.311	12.911
2457463, Rc	0.309–0.573	0.856–2.115	343	7463.335462	7463.33657	15.687	14.440
2457551, Rc	0.271–0.543	0.848–2.143	518	7551.302396	7551.30305	15.672	14.363

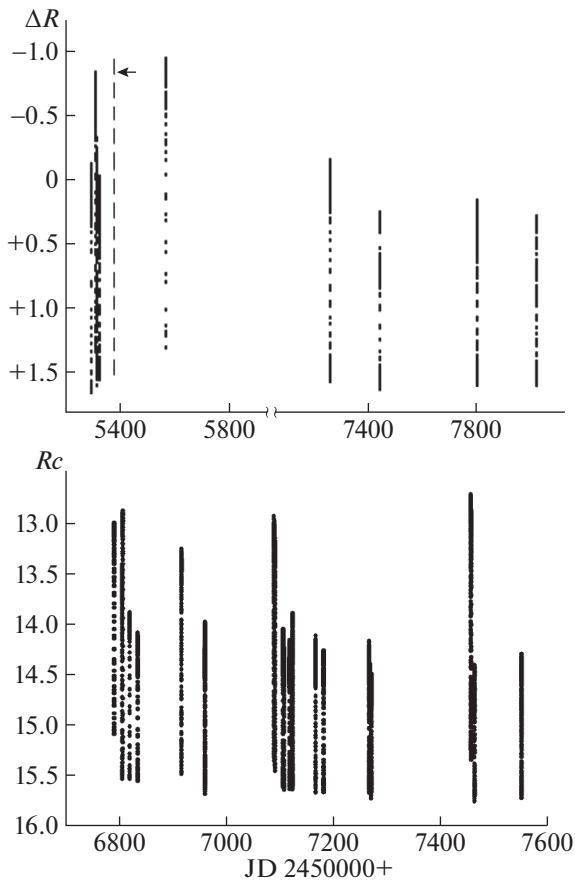
Примечание. Во 2-м столбце даны доли юлианского дня начала и конца наблюдений в соответствующую дату, в 3-м столбце — соответствующий фазовый интервал наблюдений. Для наблюдений 2010 г. (5 дат) в двух последних столбцах приведены  $m_{\min}$  и  $m_{\max}$  относительно звезды сравнения.

в инструментальных системах AZT-5 ( $Rc(50)$ ) и Zeiss-600 ( $Rc(60)$ ), описывается зависимостью

$$Rc(50) = Rc(60) + 0.05^m.$$

Значения  $Rc(50)$  и  $Rc(60)$  выражены в звездных величинах. Аналогичная зависимость была

получена и для катаклизмических переменных GY Gnc [16] и ASAS-SN 13cx [17], также наблюдавшихся на данных телескопах. Все последующие расчеты были выполнены для кривых блеска в инструментальной системе AZT-5.

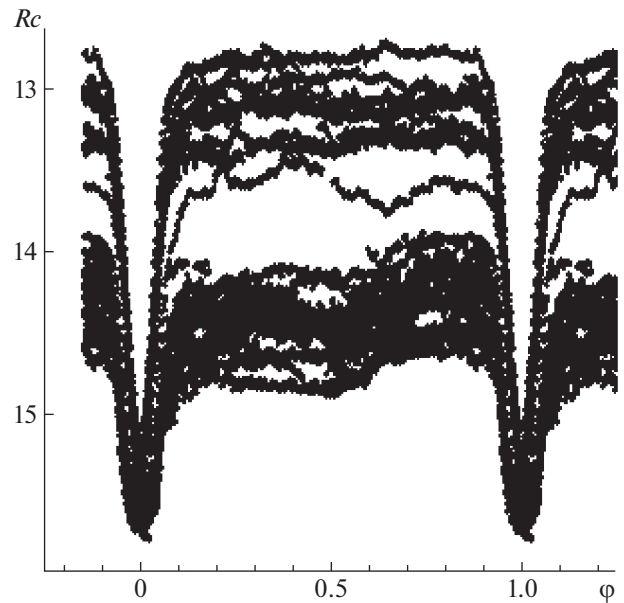


**Рис. 2.** Распределение наблюдений по времени. Вверху — относительные наблюдения в фильтре  $R$ , внизу — в фильтре  $Rc$ . Наблюдения справа от штриховой вертикальной линии на верхней панели использовались только для определения орбитального периода системы, поскольку они охватывают лишь фазы вблизи главного минимума.

На рис. 2 представлено распределение наших наблюдений по времени. Вверху — наблюдения, полученные в фильтре  $R$  (относительные величины)<sup>3</sup>, внизу — в фильтре  $Rc$ . Отчетливо выделяются наблюдения во время вспышек, когда блеск системы увеличивается на  $\sim 1-1.2^m$ , при этом в минимуме блеск возрастает не более чем на  $\sim 0.2-0.5^m$ . Полная амплитуда кривых блеска составляет  $\sim 1.7^m$  в состоянии покоя, и  $\sim 2.5^m$  во время вспышки.

На рис. 3 приведена свертка всех наблюдений в фильтре  $Rc$  с орбитальным периодом из фор-

<sup>3</sup>Для исследований были выбраны только полные кривые блеска, полученные в период JD 245 5281–5316, они расположены слева от вертикальной штриховой линии; наблюдения, полученные в обсерватории Онджейов после 2010 г. (справа от вертикальной линии), содержат лишь область главного минимума, и в нашей работе использовались только в процедуре определения орбитального периода.



**Рис. 3.** Свертка всех наблюдений в фильтре  $Rc$  с эфемеридами (1).

мулы (1). Хорошо заметны изменения формы и амплитуды кривых блеска во время вспышки в сравнении со спокойным состоянием.

Наличие синусоидального члена в эфемеридах орбитального движения потребовало уточнения его значения на эпоху наших наблюдений. Данная процедура выполнялась отдельно для наблюдений в фильтрах  $R$  и  $Rc$ . Использовался метод Лафлера-Кинмана. На рис. 4 приведены спектры мощности, полученные для двух массивов наблюдений, вверху — по наблюдениям в фильтре  $R$ , внизу — в фильтре  $Rc$  соответственно.

Поиск орбитального периода производился в диапазоне частот  $4.7-4.8 \text{ сут}^{-1}$  с шагом 0.005 по фазе. Учитывая большие промежутки времени между отдельными группами наблюдений в фильтре  $R$ , поиск орбитального периода выполнен как по всем имеющимся данным, так и по отдельным участкам. В результате анализа мы получили:

1. по широкому диапазону JD 245 5294–8014 значение периода  $P_{orb} = 0.209 9374(5)^d$ , совпадающее с линейным членом в формуле (1),  $P_{orb} = 0.209 937 399(13)^d$ , из работы [4];

2. по более узкому диапазону JD 245 5294–5567 значение периода  $P_{orb} = 0.209 9429(1030)^d$ ;

3. по диапазону JD 245 5294–5325 значение периода  $P_{orb} = 0.209 9576(1080)^d$ . Формальный рост значения периода нивелируется увеличением его погрешности.

По наблюдениям в фильтре  $Rc$  (см. нижнюю панель рис. 4) получен период  $P_{orb} = 0.209 9366(6)^d$ . Таким образом, все полученные значения периода

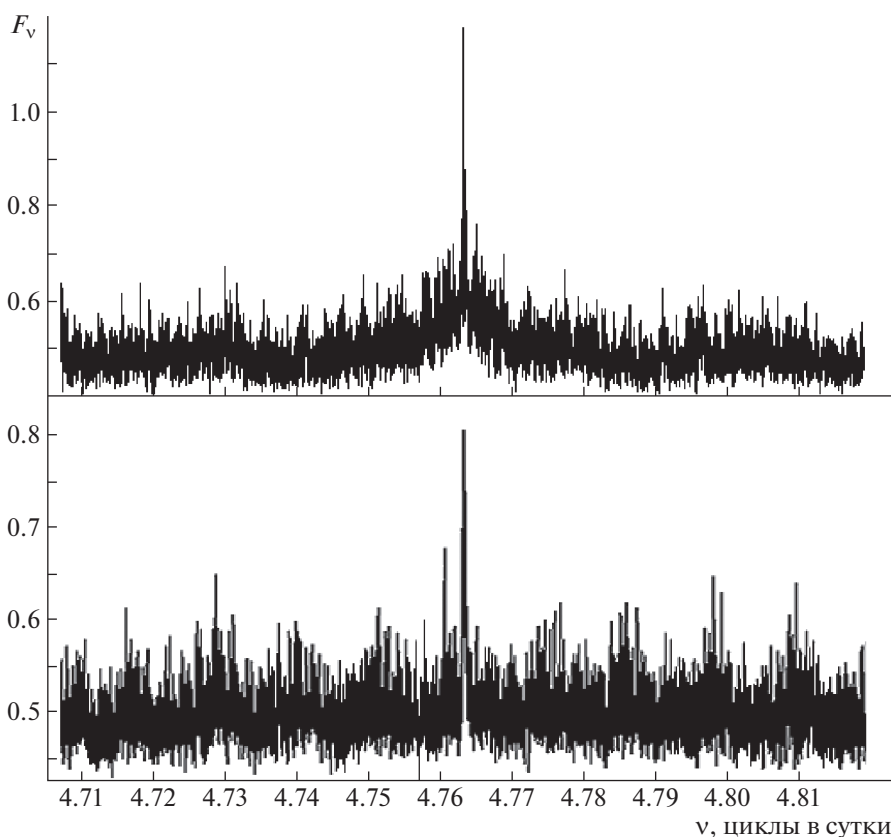


Рис. 4. Спектры мощности, полученные методом Лафлера–Кинмана по наблюдениям в фильтрах  $R$  (вверху) и  $Rc$  (внизу).

в пределах своей погрешности совпадают с периодом, полученным в работе [4], и, как более точный, мы использовали его при свертке кривых блеска EX Dra.

#### 4. МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ. ОПИСАНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Форма кривых блеска EX Dra как в спокойном состоянии, так и во время вспышек, в основном, типична для карликовых новых (см. рис. 5, 6). Такие кривые успешно воспроизводятся в рамках стандартной “комбинированной” модели, учитывающей присутствие горячей линии вблизи боковой поверхности аккреционного диска и горячего пятна на нем на подветренной стороне газовой струи [18].

Из рассмотрения кривых блеска (JD 6805, 6834, 7167, 7267, 7271)<sup>4</sup> видно, что вторичный минимум хотя и симметричен, но при этом смещен

на орбитальную фазу  $\varphi \sim 0.6$  (наиболее заметно это на кривой блеска JD 7167), на внезатменной части кривой JD 6834 вообще присутствуют два локальных минимума (см. рис. 6, слева). В рамках “комбинированной” модели описать такое смещение невозможно, поскольку горячее пятно на этих фазах закрыто краем диска, а газовый поток на фазах  $\varphi \sim 0.5$  при  $i > 83^\circ$  не виден. Обеспечить наблюдаемое смещение вторичного минимума, а также дипы различной глубины на кривых блеска, можно в случае асимметричного вклада излучения вторичного компонента в суммарный поток. Такой эффект дает наличие одного/двух холодных пятен поверхности звезды. Для учета присутствия темного пятна на поверхности КК при интерпретации кривой блеска мы использовали программный код, описанный в работах [19, 20].

##### 4.1. Основные положения “комбинированной” модели

Система состоит из сферической звезды (первичный компонент), окруженной аккреционным диском, и красного карлика (вторичный компонент), полностью заполняющего свою полость Роша. Звезда разбита на 648 элементарных площадок, излучающих в соответствии с собственной

<sup>4</sup>Здесь и далее кривые блеска, полученные в ту или иную юлианскую дату, например, JD 245 6834, для краткости обозначены как JD 6834. Для данных в 2010 г., поскольку наблюдения получены в течение всего 35 дней, обозначения более краткие, например, JD 295 для даты JD 245 5295.



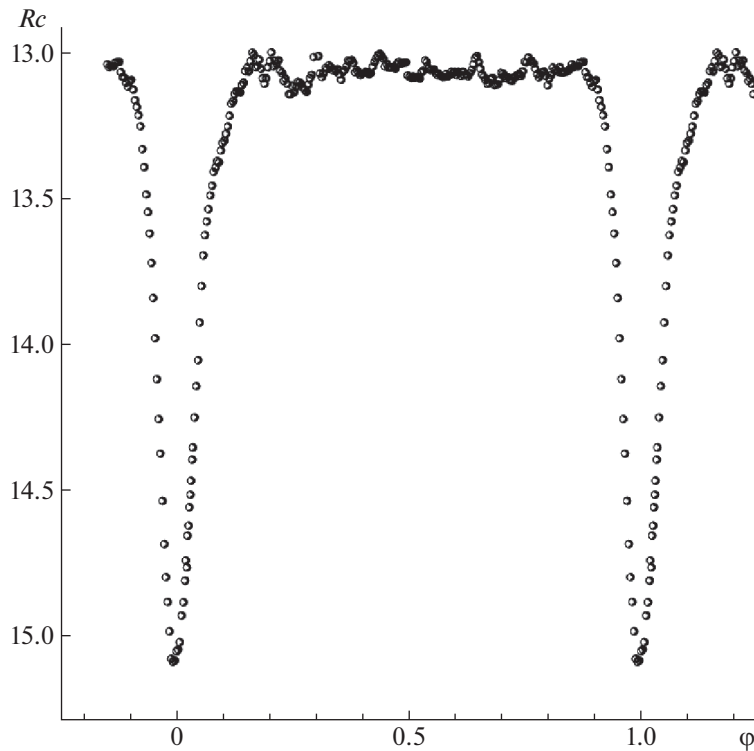


Рис. 5. Характерный вид кривой блеска EX Dra во время вспышки. Приведены неусредненные наблюдения (JD 6790).

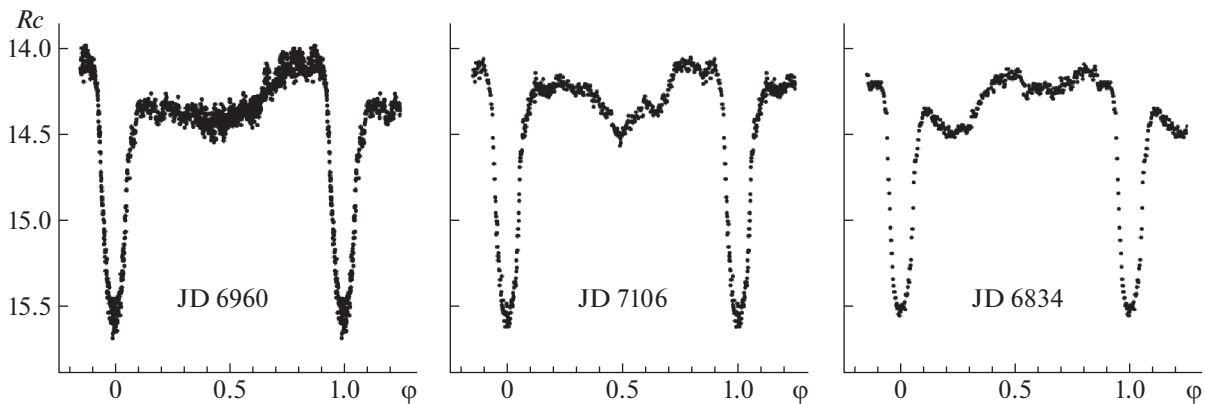


Рис. 6. Типичные кривые блеска EX Dra в неактивном состоянии.

температурой  $T_i$ , зависящей от эффективной температуры вторичного компонента  $T_2$ . При вычислении  $T_i$  учитывается прогрев поверхности КК излучением из внутренних областей аккреционного диска с температурой  $T_{in}$ ,  $T_{in} \geq T_1$ , где  $T_1$  — эффективная температура первичного компонента. Форма и размеры вторичной задаются параметром  $q = M_1/M_2$ . При вычислении потока с элементарной площадкой на поверхности КК учитываются гравитационное потемнение и потемнение к краю в линейном приближении.

Гравитационное потемнение описывается формулой  $T_i = T_2(g/g_0)^\beta$ , где  $T_i$  — локальная темпе-

ратура,  $g$  — локальное ускорение силы тяжести в центре элементарной площадки на поверхности приливо деформированной звезды позднего спектрального класса,  $\beta = 0.08$  [21]. Яркость элементарной площадки на звезде описывается законом  $dI = B_\lambda(T)[1 - u(\lambda, T)(1 - \cos \gamma)] \cos \gamma dS$ , где  $\gamma$  — угол между нормалью к элементарной площадке на поверхности звезды и лучом зрения,  $u(\lambda, T)$  — коэффициент линейного потемнения к краю,  $B_\lambda(T)$  — функция Планка,  $dS$  — площадь рассматриваемой элементарной площадки.

Первичный компонент описывается сферой радиуса  $R_1$ , он расположен в фокусе слабо эллипти-



ческого аккреционного диска с эксцентриситетом  $e \leq 0.25$ , большой полуосью  $a$ , и ориентацией  $\alpha_e$  (это угловое расстояние в плоскости орбиты между периастром диска и линией, соединяющей центры масс компонентов). Диск оптически непрозрачен, сложной формы — геометрически тонкий вблизи поверхности белого карлика, и геометрически толстый на внешнем крае с углом раскрытия  $\beta_d$ . Температура каждой элементарной площадки на диске определяется зависимостью  $T(r) = T_{in}(R_{in}/r)^{\alpha_g}$ , где  $R_{in}$  — радиус первой орбиты вблизи первичной,  $R_{in} \sim R_1$ , а параметр  $\alpha_g$  зависит от вязкости газа  $\alpha_H$  в диске. В стационарном состоянии диска значение  $\alpha_g = 0.75$  [9], при уменьшении  $\alpha_g$  поток от диска значительно возрастает из-за более пологого распределения температуры диска вдоль его радиуса. При расчете локальной температуры избранной элементарной площадки на диске учитывается ее нагрев излучением вторичного компонента (данный эффект, как правило, незначителен), а также нагрев высокотемпературным излучением, проходящим из внутренних областей диска.

К другим излучающим компонентам относятся (подробное описание можно найти в работе [18]:

1. Область соударения газовой струи с диском, расположенная вблизи его боковой поверхности. Взаимодействие струи и диска является безударным, ударная волна возникает в узкой области вдоль края струи (“горячая линия”, ГЛ), как следствие взаимодействия набегающих потоков диска и околодискового гало с веществом струи. Излучающая область ГЛ представлена усеченным эллипсоидом, центр эллипсоида расположен в плоскости орбиты внутри тела диска. Область энерговыделения в используемой модели состоит из двух областей на поверхности усеченного эллипсоида (части эллипсоида ГЛ вне тела диска) на его наветренной ( $\varphi \sim 0.25$ ) и подветренной ( $\varphi \sim 0.75$ ) сторонах.

2. Горячее пятно (ГП) на боковой поверхности диска на подветренной стороне струи. Здесь излучающая область представлена половиной эллипса, центр которого  $U$  совпадает с точкой пересечения оси газового потока с диском.

В итоговых таблицах мы приводим следующие параметры областей взаимодействия газового потока с боковой поверхностью диска, определенные в результате нашего анализа: это полуоси  $a_v$ ,  $b_v$  и  $c_v$  эллипсоида, часть которого вне тела диска описывает форму газового потока; максимальные температуры вещества струи на границе с диском с наветренной ( $T_{ww,max}$ ) и подветренной ( $T_{lw,max}$ ) сторон эллипсоида, при удалении от края диска температура вещества ГЛ уменьшается по косинусоидальному закону; угол  $\beta_1$ , образованный осью газового потока с линией, соединяющей компоненты системы (вычисляется в процессе расчетов); радиус ГП на боковой поверхности диска  $R_{sp}$  —

расстояние между точкой  $U$  и внешним краем пятна в плоскости орбиты. Часть ГП попадает внутрь газовой струи, т.е. реальный размер ГП на поверхности диска меньше, однако излучение от “закрытой” части пятна компенсируется излучающими районами на подветренной стороне струи. Все геометрические параметры выражены в единицах  $a_0$  — расстояния между центрами масс компонентов (в программном коде принято, что  $a_0 = 1$ ).

#### 4.2. Основные положения модели с пятнами на поверхности вторичного компонента

Данная модель (будем называть ее “пятенной”) основана на описанной выше “комбинированной” модели, в которую внесено следующее дополнение.

На поверхности КК присутствуют одно или два “темных” пятна<sup>5</sup>, эффективная температура элементарной площадки в области этих пятен более низкая по сравнению с тем значением, которое площадка имела бы в отсутствие пятна, в  $F_s$  раз, т.е.  $T(x_s, y_s, z_s) = F_s T_2(x, y, z)$ . Предполагается, что значение параметра  $F_s$  внутри данного пятна постоянно. Пятна в проекции на плоскость, касательную к поверхности звезды в точке  $(x_s, y_s, z_s)$ , имеют форму круга с радиусом  $R_s$ , который задается в единицах  $r_i$  радиуса звезды в рассматриваемой точке. Для определения положения центра пятна на ее поверхности используются углы  $\eta$  и  $\phi$ , где  $\eta$  — широта пятна, отсчитываемая от “носика” звезды в направлении задней полусферы ( $0^\circ < \eta < 180^\circ$ ), а  $\phi$  — его долгота ( $0^\circ < \phi < 360^\circ$ ), отсчитываемая от орбитальной плоскости по часовой стрелке; нулевой меридиан лежит в плоскости орбиты на левой полусфере звезды, если смотреть со стороны первичного компонента. Условие попадания рассматриваемой площадки на поверхности звезды с координатами ее центра  $(x, y, z)$  или  $(r, \eta, \phi)$  в область пятна является выполнение неравенства:  $(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2 < R_s^2$ .

В модели с двумя темными пятнами количество искомых параметров увеличивается на 8, они непосредственно связаны с темными пятнами. Поэтому имеет смысл применять ее в ситуации, когда основные параметры (диска, ГЛ, ГП) зафиксированы либо меняются в достаточно узком диапазоне значений.

Для решения обратной задачи определения параметров системы в обеих моделях, при которых форма синтезированной кривой блеска максимально приближена к наблюдаемой, используется метод Нелдера—Мида [22]. При поиске глобального

<sup>5</sup>Количество пятен, в принципе, может быть любым, однако, для описания каждого пятна требуется 4 независимых параметра ( $R_s, F_s, \eta, \phi$ ), так что даже при двух пятнах поиск оптимальных параметров значительно усложняется.

минимума невязки для каждой из кривых блеска задается несколько десятков различных начальных приближений, так как при большом количестве независимых переменных в исследуемой области параметров обычно существует набор локальных минимумов. Для оценки согласованности теоретической и наблюдаемой кривых блеска ТДС в рамках используемой модели вычислялась невязка в критерии  $\chi^2$  в виде:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^J \frac{(m_j^{theor} - m_j^{obs})^2}{\sigma_j^2},$$

где  $m_j^{theor}$  и  $m_j^{obs}$  — звездные величины объекта в  $j$ -ой орбитальной фазе, полученные теоретически и из наблюдений соответственно,  $\sigma_j$  — дисперсия наблюдений в  $j$ -ой точке,  $J$  — число нормальных точек на средней кривой блеска.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Из-за сравнительно большого количества входных параметров ( $q$ ,  $i$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $R_1$ ,  $R_d$ ,  $A^6$ ,  $\alpha_e$ ,  $e < 0.25$ ,  $\alpha_g$ ,  $a_v$ ,  $b_v$ ,  $c_v$ ,  $T_{ww,max}$ ,  $T_{lw,max}$ ,  $R_{sp}$ ), для ограничения области их изменения мы приняли во внимание данные, полученные ранее из спектральных и фотометрических исследований (см. табл. 1).

Параметры синтезированных кривых для описания наблюдений вычислялись в два этапа. На первом этапе по наиболее “классическим” кривым блеска определялись базовые параметры системы ( $q$ ,  $i$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $R_1$ ). Поскольку полученные кривые блеска представляют собой последовательность однородных данных (наблюдения приведены к одной инструментальной системе, использовалась одна и та же звезда сравнения) можно наложить дополнительное ограничение на область допустимых параметров задачи. А именно, при наличии последовательности из нескольких кривых блеска для перевода потоков синтезированных кривых блеска в звездные величины была использована единая энергетическая единица — поток от системы  $F(m)$ , соответствующий одной и той же звездной величине  $m$  для всех используемых кривых блеска в соответствующем фильтре. В этом случае при сравнении синтезированных кривых блеска с наблюдаемыми для определения параметров системы можно использовать не только форму кривых, но и изменение уровня потока излучения. Подробное описание данной методики приведено во многих наших работах (см., напр., [23], а также недавние работы [16, 17]).

В результате первого этапа нашего анализа были выбраны следующие значения базовых параметров:  $q = 1.34$ ,  $i = 83.5^\circ$ ,  $R_1 = 0.0315\xi = 0.0167a_0$ . Средний радиус вторичного компонента определяется отношением масс в системе, и для  $q = 1.34$  составляет  $\langle R_2 \rangle = 0.3649a_0$ , значение  $\xi = 0.5301a_0$ . Температуры звезд не фиксировались, но были ограничены значениями температур звезд спектрального класса  $M0 \pm 2$  V (3400–3700 K [24]) для вторичного компонента, и диапазоном 19 000–35 000 K для первичной из-за значительных колебаний полученных величин  $T_1$  у разных кривых блеска на первом этапе расчетов. В качестве энергетических единиц были приняты  $F(Rc = 13.5) = 0.1658 \times 10^{-9}$ ,  $F(\Delta R = 0.0) = 0.11477 \times 10^{-9}$ , и  $F(\Delta V = 0.0) = 0.11056 \times 10^{-9}$  усл.ед. соответственно. Использование условных единиц обусловлено тем фактом, что функция Планка, с помощью которой вычисляется поток излучения от элементарных площадок на компонентах системы в единичном интервале длин волн (в нашем случае — в сантиметрах), представляет собой поток энергии, проходящей через площадку 1 см<sup>2</sup>, а единицей измерения расстояний в программном коде является  $a_0$  — расстояние между компонентами ТДС,  $a_0 = 1$ , в физических единицах, например, в сантиметрах, эта величина заранее неизвестна.

На втором этапе был выполнен поиск оптимальных параметров системы. В табл. 3–5 представлены параметры компонентов системы для кривых блеска в фильтрах  $R$  (3 кривых),  $V$  (2 кривых) и  $Rc$  (18 кривых), определенные в рамках “комбинированной” модели, как в спокойном состоянии, так и во время вспышки. В табл. 6 приведены параметры для 6 кривых блеска (JD 6805, 6834, 7108, 7167, 7267, 7271), вычисленные в рамках “пятенной” модели, поскольку, как отмечалось выше, форма их внезатменной части не поддается интерпретации в “комбинированной” модели. В нижней части каждой из таблиц даны усредненные за орбитальный период вклады излучения различных компонентов в суммарный поток. Погрешности полученных нами параметров оценивались путем задания условной границы невязки  $1.1\chi_{\min}^2$  для выбранной кривой блеска. Данный способ оценки погрешности не дает значение канонической ошибки соответствующего параметра в критерии  $\chi^2$ , но позволяет оценить его устойчивость к изменениям. Полученные таким образом значения погрешностей последнего знака параметра приведены в скобках.

На рис. 7, 8 показаны наблюдаемые неосредненные и синтезированные с параметрами из соответствующих таблиц кривые блеска EX Dra в фильтрах  $R$  и  $V$ , на рис. 9–11 в фильтре  $Rc$  в спокойном состоянии, на рис. 12 и 13 — во время

<sup>6</sup>  $A$  — параметр параболоида, описывающего внутреннюю (не боковую) поверхность диска; обычно  $A \sim 6$ –12. Чем меньше  $A$ , тем больше толщина внешнего края диска  $\beta_d$ .

**Таблица 3.** Параметры EX Dra, полученные в рамках “комбинированной” модели из анализа  $R$  и  $V$  кривых блеска системы. Базовые параметры системы зафиксированы на значениях  $q = 1.34$ ,  $i = 83.5^\circ$ ,  $R_1 = 0.0167a_0$ ,  $\xi = 0.530$ ,  $\langle R_2 \rangle = 0.365a_0$

Параметр	JD 281 ( $V$ )	JD 295 ( $V$ )	JD 294 ( $R$ )	JD 309 ( $R$ ) вспышка	JD 316 ( $R$ )
$\Delta m_{\max}$	-0.18	-0.13	-0.04	-0.79	-0.09
$\Delta m_{\min}$	1.96	2.01	1.67	1.32	1.53
$T_1$ , К	$20500 \pm 315$	$20540 \pm 210$	$20310 \pm 270$	$18770 \pm 125$	$22610 \pm 335$
$T_2$ , К	$3640 \pm 35$	$3625 \pm 10$	$3600 \pm 20$	$3640 \pm 40$	$3660 \pm 25$
Параметры аккреционного диска					
$e$	0.001–0.04	0.001–0.04	0.001–0.01	0.001–0.02	0.002–0.02
$R_d, \xi$	0.40(2)	0.50(4)	0.51(1)	0.72(2)	0.49(4)
$a, a_0$	0.21(1)	0.26(2)	0.27(1)	0.38(1)	0.26(2)
$0.5\beta_d, ^\circ$	1.6(2)	0.9(1)	1.51(1)	0.42(3)	1.5(1)
$T_{in}$ , К	$22360 \pm 395$	$25190 \pm 305$	$20930 \pm 290$	$29570 \pm 485$	$23180 \pm 390$
$T_{out}$ , К	$8065 \pm 130$	$6350 \pm 60$	$9330 \pm 205$	$11800 \pm 175$	$8415 \pm 125$
$\alpha_g$	0.436(9)	0.577(5)	0.352(6)	0.325(8)	0.411(8)
$\alpha_e, ^\circ$	$46 \pm 2$	$60 \pm 33$	$56 \pm 10$	$64 \pm 30$	$46 \pm 3$
Параметры горячей линии					
$a_v, a_0$	0.016(5)	0.027(8)	0.03(1)	0.0013(7)	0.008(2)
$b_v, a_0$	0.22(2)	0.28(1)	0.29(1)	0.29(4)	0.25(2)
$c_v, a_0$	0.0062(3)	0.0051(6)	0.007(5)	0.004(1)	0.007(1)
$T_{ww, \max}$ , К	$34560 \pm 9550$	$41540 \pm 11950$	$58745 \pm 16440$	$63035 \pm 17645$	$40740 \pm 16650$
$T_{lw, \max}$ , К	$29560 \pm 1220$	$34385 \pm 870$	$53330 \pm 2420$	$60840 \pm 13250$	$36415 \pm 1940$
$\beta_1, ^\circ$	$17 \pm 3$	$20 \pm 2$	$9 \pm 1$	$36 \pm 2$	$21 \pm 2$
Радиус горячего пятна					
$R_{sp}, a_0$	0.14(4)	0.16(2)	0.16(1)	0.13(5)	0.15(4)
Вклады излучения компонентов в суммарный поток от системы $F_{full}$					
Звезда	0.30(1)	0.34(2)	0.38(1)	0.22(1)	0.40(1)
Белый карлик	0.13(2)	0.14(2)	0.06(1)	0.025(3)	0.08(1)
Диск с ГП	0.49(6)	0.39(5)	0.54(5)	0.74(6)	0.46(4)
ГЛ	0.08(2)	0.13(2)	0.02(1)	0.015(3)	0.06(1)
$\chi^2$	1146	1475	1959	5518	2086

вспышек, а на рис. 14 и 15 —  $Rc$  кривые блеска, синтезированные с параметрами из табл. 6, полученными в рамках “пятенной” модели. Внизу или справа для каждой даты показаны вклады излучения компонентов системы в суммарный поток в условных единицах.

### 5.1. $V$ кривые блеска. Спокойное состояние

Анализ данных в фильтре  $V$  показывает (рис. 7, табл. 3), что обе кривые блеска получены в спокойном состоянии системы. Полная амплитуда переменности с течением времени не изменилась, немного уменьшилась глубина вторичного миниму-

**Таблица 4.** Параметры EX Dra, полученные в рамках “комбинированной” модели из анализа  $Rc$  кривых блеска системы в неактивном состоянии, при фиксированных значениях базовых параметров (см. табл. 3)

Параметр	JD 6819	JD 6960	JD 7106	JD 7118	JD 7123
$N$	138	809–10	1504–5	1562	1586
$\Delta m_{\max}$	13.93	14.09	14.11	14.20	14.29
$\Delta m_{\min}$	15.53	15.57	15.58	15.61	15.61
$T_1, K$	$19475 \pm 600$	$19615 \pm 210$	$20265 \pm 290$	$19475 \pm 275$	$20055 \pm 290$
$T_2, K$	$3650 \pm 22$	$3615 \pm 17$	$3620 \pm 17$	$3590 \pm 12$	$3595 \pm 20$
Параметры аккреционного диска					
$e$	0.009(8)	0.010(9)	0.005(4)	0.03(2)	0.02(2)
$R_d, \xi$	0.32(1)	0.39(3)	0.54(6)	0.62(3)	0.43(2)
$a, a_0$	0.167(6)	0.21(2)	0.29(3)	0.32(2)	0.23(1)
$0.5\beta_d, ^\circ$	1.7(4)	0.9(1)	1.1(2)	0.9(1)	0.6(1)
$T_{in}, K$	$20600 \pm 725$	$21055 \pm 280$	$20745 \pm 400$	$19565 \pm 100$	$23790 \pm 470$
$T_{out}, K$	$12975 \pm 425$	$9890 \pm 95$	$6730 \pm 110$	$6355 \pm 20$	$8210 \pm 100$
$\alpha_g$	0.23(2)	0.427(8)	0.448(8)	0.435(6)	0.58(1)
$\alpha_e, ^\circ$	$54 \pm 40$	$60 \pm 11$	$61 \pm 45$	$45 \pm 1$	$64 \pm 2$
Параметры горячей линии					
$a_v, a_0$	0.010(9)	0.040(4)	0.04(2)	0.05(3)	0.033(6)
$b_v, a_0$	0.16(4)	0.208(4)	0.31(2)	0.32(2)	0.236(6)
$c_v, a_0$	0.005(1)	0.004(1)	0.006(1)	0.006(1)	0.003(1)
$T_{vw, \max}, K$	$37920 \pm 30845$	$56090 \pm 13875$	$47690 \pm 10170$	$33205 \pm 12605$	$41740 \pm 12765$
$T_{lv, \max}, K$	$38095 \pm 7560$	$52445 \pm 1625$	$38175 \pm 2060$	$33195 \pm 3505$	$47245 \pm 4690$
$\beta_1, ^\circ$	$12 \pm 2$	$12 \pm 1$	$14 \pm 1$	$12 \pm 1$	$15 \pm 1$
Радиус горячего пятна					
$R_{sp}, a_0$	0.12(5)	0.19(2)	0.14(2)	0.15(4)	0.17(2)
Вклады излучения компонентов в суммарный поток от системы $F_{full}$					
Звезда	0.400(7)	0.446(8)	0.476(8)	0.455(7)	0.523(2)
Белый карлик	0.066(9)	0.088(9)	0.084(9)	0.090(9)	0.104(9)
Диск с ГП	0.52(6)	0.40(3)	0.37(4)	0.40(3)	0.32(3)
ГЛ	0.014(3)	0.066(9)	0.07(2)	0.055(9)	0.053(8)
$\chi^2$	4030	1661	1961	5103	3393

Таблица 4. Окончание

Параметр	JD 7124	JD 7182	JD 7267	JD 7463	JD 7551
$N$	1590–1	1867	2271	3205–6	3624–5
$\Delta m_{\max}$	13.92	14.31	14.28	14.44	14.36
$\Delta m_{\min}$	15.60	15.59	15.60	15.69	15.67
$T_1, \text{K}$	$21240 \pm 240$	$19035 \pm 100$	$20385 \pm 310$	$18635 \pm 325$	$18560 \pm 295$
$T_2, \text{K}$	$3615 \pm 18$	$3605 \pm 19$	$3605 \pm 23$	$3560 \pm 28$	$3565 \pm 20$
Параметры аккреционного диска					
$e$	0.02(1)	0.003(1)	0.03(2)	0.01(1)	0.03(2)
$R_d, \xi$	0.52(6)	0.351(1)	0.49(6)	0.42(2)	0.31(9)
$a, a_0$	0.27(3)	0.185(1)	0.25(3)	0.220(9)	0.161(5)
$0.5\beta_d, ^\circ$	0.9(1)	0.5(1)	0.9(2)	0.8(1)	1.1(1)
$T_{in}, \text{K}$	$25735 \pm 330$	$19155 \pm 85$	$23220 \pm 390$	$18635 \pm 335$	$20695 \pm 480$
$T_{out}, \text{K}$	$7775 \pm 75$	$7380 \pm 25$	$6515 \pm 90$	$7105 \pm 80$	$9480 \pm 130$
$\alpha_g$	0.521(9)	0.449(1)	0.52(1)	0.50(1)	0.57(1)
$\alpha_e, ^\circ$	$67 \pm 45$	$40 \pm 3$	$69 \pm 2$	$47 \pm 2$	$86 \pm 2$
Параметры горячей линии					
$a_v, a_0$	0.04(1)	0.022(1)	0.03(2)	0.030(6)	0.024(1)
$b_v, a_0$	0.32(1)	0.308(1)	0.30(2)	0.270(5)	0.147(8)
$c_v, a_0$	0.006(1)	0.002(1)	0.005(1)	0.003(1)	0.003(1)
$T_{ww, \max}, \text{K}$	$29145 \pm 3825$	$73425 \pm 6045$	$30895 \pm 7320$	$50520 \pm 10185$	$75620 \pm 31820$
$T_{lw, \max}, \text{K}$	$37060 \pm 3085$	$50635 \pm 2245$	$31830 \pm 4175$	$43040 \pm 1230$	$66480 \pm 2600$
$\beta_1, ^\circ$	$17 \pm 2$	$9 \pm 1$	$12 \pm 2$	$9 \pm 1$	$11 \pm 1$
Радиус горячего пятна					
$R_{sp}, a_0$	0.14(2)	0.09(3)	0.10(4)	0.18(2)	0.17(2)
Вклады излучения компонентов в суммарный поток от системы $F_{full}$					
Звезда	0.436(9)	0.518(9)	0.51(1)	0.526(8)	0.556(9)
Белый карлик	0.088(8)	0.102(9)	0.11(1)	0.112(9)	0.108(9)
Диск с ГП	0.39(3)	0.22(2)	0.33(3)	0.28(2)	0.29(3)
ГЛ	0.086(9)	0.16(3)	0.05(1)	0.082(9)	0.046(7)
$\chi^2$	1626	1176	1294	2233	2163

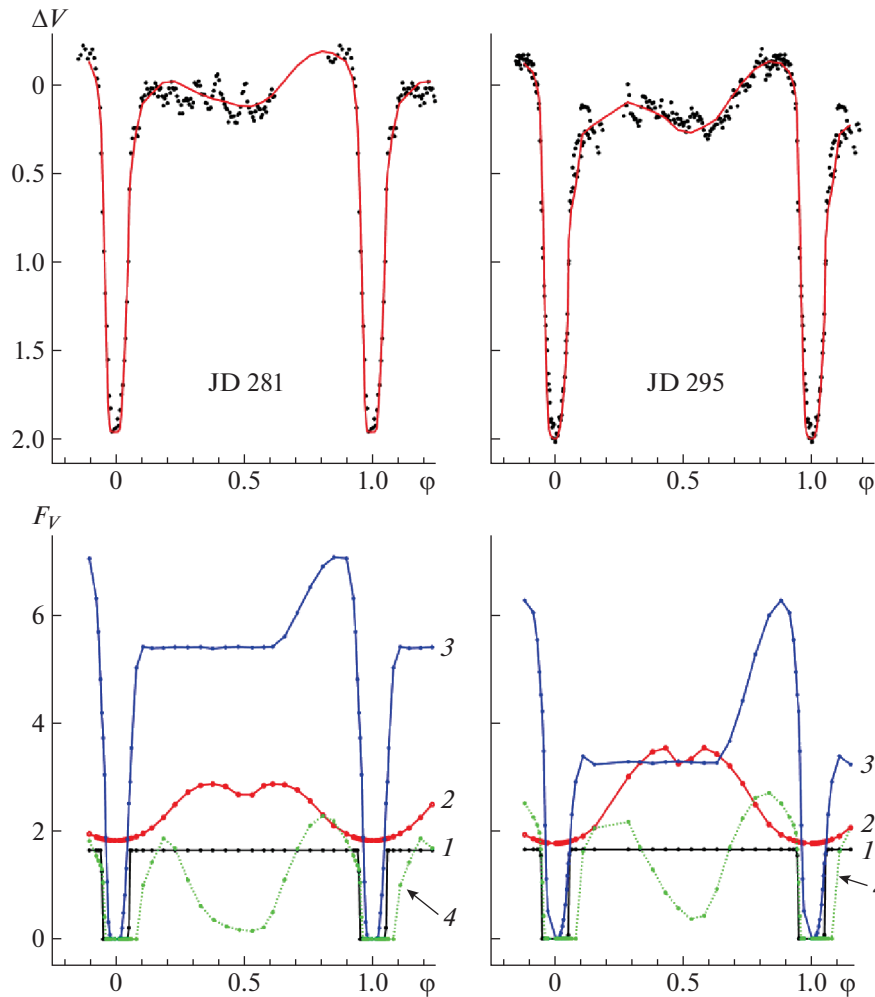
**Таблица 5.** Параметры EXDra, полученные в рамках “комбинированной” модели из анализа  $R_c$  кривых блеска системы во время вспышки, при фиксированных значениях базовых параметров (см. табл.3)

Параметр	JD 6790	JD 6806	JD 6916	JD 7089	JD 7090	JD 7091	JD 7456	JD 7457
$N$	0	76	600	1424	1428–9	1433–4	3171	3176–77
$\Delta m_{\max}$	13.00	12.94	13.31	13.03	13.06	13.24	12.74	12.91
$\Delta m_{\min}$	15.09	15.37	15.41	15.29	15.33	15.44	15.21	15.31
$T_1, K$	$20690 \pm$ $\pm 425$	$19970 \pm$ $\pm 550$	$21490 \pm$ $\pm 240$	$20275 \pm$ $\pm 110$	$20255 \pm$ $\pm 225$	$20940 \pm$ $\pm 160$	$18890 \pm$ $\pm 233$	$20450 \pm$ $\pm 155$
$T_2, K$	$3624 \pm 44$	$3650 \pm 6$	$3640 \pm 44$	$3610 \pm 24$	$3645 \pm 44$	$3650 \pm 20$	$3650 \pm 45$	$3605 \pm 15$
Параметры аккреционного диска								
$e$	0.003(3)	0.036(35)	0.017(27)	0.005(4)	0.005(15)	0.016(8)	0.01(2)	0.026(9)
$R_d, \xi$	0.72(3)	0.648(2)	0.67(2)	0.690(6)	0.659(14)	0.592(9)	0.678(10)	0.700(8)
$a, a_0$	0.38(2)	0.332(1)	0.349(9)	0.364(4)	0.348(8)	0.309(5)	0.357(5)	0.362(4)
$0.5\beta_d, ^\circ$	0.6(1)	0.7(1)	1.6(2)	1.4(1)	0.7(1)	1.6(1)	1.0(1)	0.8(1)
$T_{in}, K$	$24195 \pm$ $\pm 540$	$24605 \pm$ $\pm 700$	$29710 \pm$ $\pm 395$	$27200 \pm$ $\pm 165$	$24785 \pm$ $\pm 335$	$28825 \pm$ $\pm 275$	$31780 \pm$ $\pm 395$	$33420 \pm$ $\pm 340$
$T_{out}, K$	$12650 \pm$ $\pm 235$	$12400 \pm$ $\pm 330$	$8815 \pm$ $\pm 110$	$10350 \pm$ $\pm 55$	$12515 \pm$ $\pm 140$	$10275 \pm$ $\pm 90$	$11585 \pm$ $\pm 130$	$11155 \pm$ $\pm 105$
$\alpha_g$	0.25(1)	0.24(1)	0.423(5)	0.335(3)	0.267(5)	0.375(4)	0.348(5)	0.374(3)
$\alpha_e, ^\circ$	$74 \pm 40$	$73 \pm 15$	$60 \pm 2$	$68 \pm 35$	$81 \pm 1$	$59 \pm 1$	$61 \pm 2$	$73 \pm 2$
Параметры горячей линии и горячего пятна на диске								
$a_v, a_0$	0.08(2)	0.043(26)	0.030(22)	0.079(12)	0.079(17)	0.052(24)	0.07(1)	0.049(13)
$b_v, a_0$	0.25(3)	0.36(1)	0.31(2)	0.259(7)	0.338(18)	0.278(11)	0.335(14)	0.25(2)
$c_v, a_0$	0.006(1)	0.007(2)	0.011(2)	0.013(1)	0.005(1)	0.010(1)	0.009(1)	0.007(1)
$T_{ww, \max}, K$	$77670 \pm$ $\pm 35700$	$86470 \pm$ $\pm 35170$	$46520 \pm$ $\pm 22220$	$33650 \pm$ $\pm 16690$	$36275 \pm$ $\pm 13700$	$48535 \pm$ $\pm 21145$	$56010 \pm$ $\pm 19465$	$108475 \pm$ $\pm 38540$
$T_{lw, \max}, K$	$59360$ $\pm 2545$	$58965 \pm$ $\pm 6895$	$39050 \pm$ $\pm 2835$	$30660 \pm$ $\pm 600$	$36390 \pm$ $\pm 3125$	$39730 \pm$ $\pm 1385$	$44120 \pm$ $\pm 1760$	$78880 \pm$ $\pm 2560$
$\beta_1, ^\circ$	$30 \pm 6$	$18 \pm 7$	$17 \pm 3$	$24 \pm 2$	$20 \pm 1$	$17 \pm 2$	$22 \pm 3$	$27 \pm 2$
$R_{sp}, a_0$	0.13(5)	0.12(9)	0.13(3)	0.21(2)	0.19(3)	0.16(3)	0.20(3)	0.17(3)
Вклады излучения компонентов в суммарный поток от системы $F_{full}$								
Звезда	0.176(4)	0.188(6)	0.277(1)	0.198(7)	0.199(5)	0.267(9)	0.196(9)	0.224(15)
БК	0.033(3)	0.032(4)	0.045(5)	0.030(4)	0.034(3)	0.039(5)	0.022(3)	0.030(3)
Диск с ГП	0.77(5)	0.72(6)	0.66(5)	0.75(6)	0.73(5)	0.66(5)	0.73(5)	0.73(5)
ГЛ	0.019(3)	0.06(1)	0.018(3)	0.022(5)	0.037(6)	0.034(7)	0.052(8)	0.016(3)
$\chi^2$	5565	3478	2662	508	1750	1214	3121	1716

**Таблица 6.** Параметры EXDra, полученные в рамках модели с пятнами на вторичной из анализа  $Rc$  кривых блеска системы во время вспышки, при фиксированных значениях базовых параметров (см. табл.3)

Параметр	JD 6805	JD 6834	JD 7108	JD 7167	JD 7268	JD 7271
$N$	71	209	1514	1795	2276	2290–1
$\Delta m_{\max}$	13.43	14.13	14.30	14.19	14.44	14.55
$\Delta m_{\min}$	15.52	15.53	15.61	15.59	15.64	15.64
$T_1, K$	$21655 \pm 205$	$21660 \pm 5$	$21245 \pm 280$	$20550 \pm 330$	$20215 \pm 190$	$19345 \pm 145$
$T_2, K$	$3645 \pm 27$	$3650 \pm 40$	$3605 \pm 13$	$3610 \pm 25$	$3590 \pm 18$	$3595 \pm 10$
Параметры аккреционного диска						
$e$	0.034(7)	0.08(2)	0.13(2)	0.06(3)	0.016(2)	0.019(3)
$R_d, \xi$	0.57(2)	0.69(1)	0.42(3)	0.49(5)	0.43(4)	0.34(1)
$a, a_0$	0.291(12)	0.337(7)	0.199(12)	0.243(22)	0.225(23)	0.175(5)
$0.5\beta_d, ^\circ$	1.2(1)	0.74(1)	0.85(8)	1.1(1)	0.9(1)	0.7(1)
$T_{in}, K$	$32750 \pm 330$	$26440 \pm 100$	$23715 \pm 430$	$21520 \pm 445$	$21510 \pm 280$	$20060 \pm 220$
$T_{out}, K$	$9375 \pm 80$	$6935 \pm 20$	$7610 \pm 110$	$7235 \pm 125$	$6170 \pm 75$	$7735 \pm 80$
$\alpha_g$	0.479(6)	0.546(1)	0.545(12)	0.460(9)	0.501(8)	0.417(6)
$\alpha_e, ^\circ$	$59 \pm 2$	$104 \pm 1$	$71 \pm 2$	$57 \pm 1$	$65 \pm 5$	$62 \pm 21$
Параметры горячей линии (ГЛ) и горячего пятна на диске						
$a_v, a_0$	0.055(2)	0.037(1)	0.019(3)	0.035(8)	0.020(9)	0.016(4)
$b_v, a_0$	0.263(9)	0.247(1)	0.263(11)	0.296(9)	0.294(8)	0.269(8)
$c_v, a_0$	0.008(1)	0.006(1)	0.004(1)	0.006(1)	0.004(1)	0.003(1)
$T_{ww, \max}, K$	$73115 \pm 18140$	$101900 \pm 80$	$34520 \pm 4600$	$48255 \pm 9400$	$37290 \pm 4550$	$37385 \pm 3545$
$T_{lw, \max}, K$	$54975 \pm 1565$	$79475 \pm 60$	$38475 \pm 3700$	$38035 \pm 1345$	$28345 \pm 1080$	$28510 \pm 1750$
$\beta_1, ^\circ$	$20 \pm 1$	$26 \pm 1$	$11 \pm 1$	$11 \pm 2$	$12 \pm 2$	$11 \pm 2$
$R_{sp}, a_0$	0.19(2)	0.11(2)	0.11(2)	0.12(3)	0.08(2)	0.04(2)
Параметры темных пятен на вторичной						
$R_{s1}, R_2(i)$	0.39(6)	0.40(6)	0.19(7)	0.49(7)	0.34(5)	0.39(4)
$f_{s1}$	0.93(3)	0.87(9)	0.93(5)	0.94(3)	0.90(7)	0.96(1)
$\eta_{s1}, ^\circ$	$29 \pm 3$	$73 \pm 31$	$20 \pm 14$	$35 \pm 10$	$49 \pm 11$	$38 \pm 6$
$\phi_{s1}, ^\circ$	$34 \pm 20$	$23 \pm 21$	$24 \pm 22$	$22 \pm 14$	$22 \pm 13$	$44 \pm 15$
$R_{s2}, R_2(i)$	0.26(9)	0.60(9)	0.23(8)	0.31(2)	0.31(9)	0.49(1)
$f_{s2}$	0.8(2)	0.33(5)	0.91(8)	0.99(1)	0.85(9)	0.90(6)
$\eta_{s2}, ^\circ$	$43 \pm 7$	$85 \pm 6$	$97 \pm 23$	$21 \pm 20$	$99 \pm 6$	$92 \pm 2$
$\phi_{s2}, ^\circ$	$102 \pm 16$	$208 \pm 11$	$149 \pm 59$	$121 \pm 30$	$128 \pm 15$	$154 \pm 3$
Вклады излучения компонентов в суммарный поток от системы $F_{full}$						
Звезда	0.32(2)	0.43(1)	0.51(2)	0.45(1)	0.50(1)	0.50(1)
БК	0.056(5)	0.10(1)	0.12(1)	0.10(1)	0.12(1)	0.12(1)
Диск с ГП	0.59(4)	0.46(3)	0.29(2)	0.38(3)	0.32(2)	0.32(3)
ГЛ	0.034(5)	0.015(3)	0.08(2)	0.07(2)	0.06(1)	0.06(1)
$\chi^2$	2151	6867	1704	1682	853	464





**Рис. 7.** Наблюдения EX Dra в 2010 г. в фильтре V, полученные в обсерватории Ондржейов. Вверху точками показаны неосредненные кривые блеска, сплошными линиями — теоретические кривые блеска, синтезированные с параметрами из табл. 3. Внизу — вклады в суммарный поток (в условных единицах) излучения белого карлика (1), вторичной (2), аккреционного диска с горячим пятном (3) и горячей линии (4).

ма и уменьшилась амплитуда флуктуаций потока. Из сравнения параметров, полученных для кривых блеска JD 281 и JD 295, следует, что радиус диска вырос с  $0.4\xi$  до  $0.5\xi$ , при этом толщина внешнего края диска уменьшилась почти в 2 раза. Более крутое распределение температуры вдоль радиуса диска из-за роста  $\alpha_g$  в 1.3 раза привело к охлаждению температуры на внешнем крае диска на  $\sim 1700$  K, несмотря на более высокую температуру  $T_{in}$  (почти на 3000 K) в пограничном слое. Формально усредненный по периоду вклад диска в суммарный поток  $F_d/F_{full}$  в пределах погрешностей не изменился. Азимут струи  $\beta_1$  зависит от скорости звука вещества на поверхности звезды, которая, в свою очередь, зависит от температуры газа. Уменьшение величины  $\beta_1$  свидетельствует об увеличении скорости истечения вещества  $\dot{M}$  из звезды, а ее увеличение — о замедлении соответственно. В нашем случае азимут потока постоянен

в пределах погрешностей, также не изменились (в пределах ошибок) ни температура звезды  $T_2$ , ни размеры и температуры горячего пятна и горячей линии.

## 5.2. R кривые блеска

В фильтре R из трех кривых блеска (JD 294, 309, 316) только одна (JD 309) была получена во время вспышки (см. рис. 8). Полная амплитуда переменности составила  $1.78^m$ ,  $2.08^m$  и  $1.62^m$  для JD 294, 309 и 316 соответственно, но форма кривой блеска JD 309 заметно изменилась, и внезатменный блеск вырос на  $0.6\text{--}0.7^m$  по сравнению с кривыми блеска в соседние даты в неактивном состоянии. Температура красного карлика  $T_2$  в начале вспышки и после выхода из нее не изменилась в пределах погрешности. Температура белого карлика во время вспышки немного снизилась ( $\sim 8\%$ ),

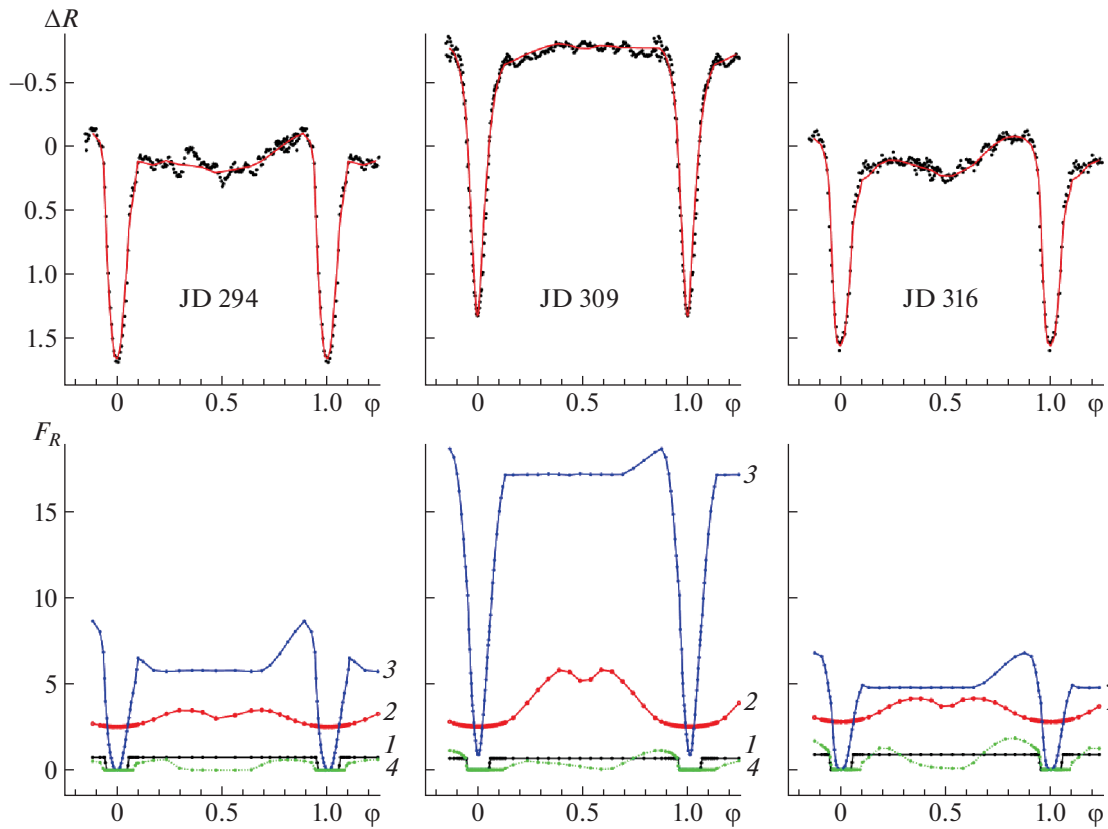


Рис. 8. Наблюдения EX Dra в 2010 г. в фильтре  $R$ , полученные в обсерватории Ондржейов. Обозначения те же, что на рис. 7.

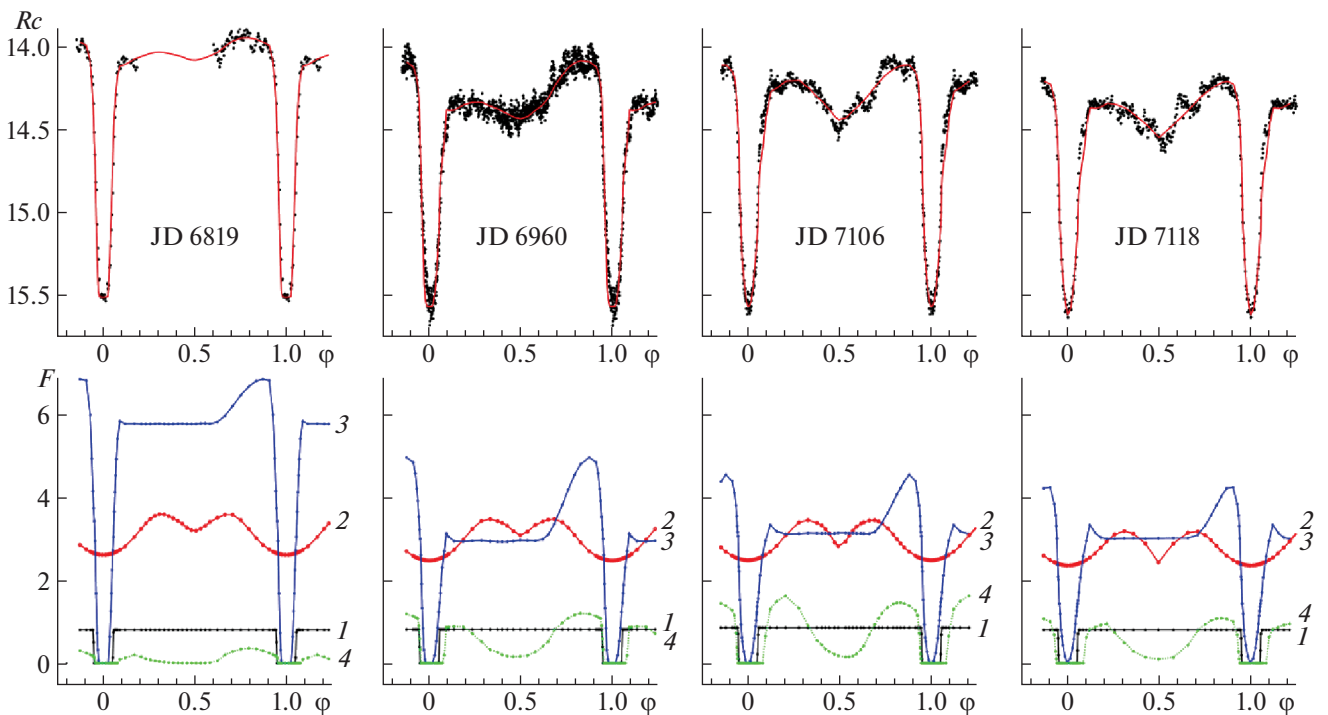


Рис. 9. Наблюдения EX Dra в 2014–2015 гг., полученные на Крымской астрономической станции ГАИШ в фильтре  $Rc$  в период неактивного состояния системы. Обозначения те же, что на рис. 7.

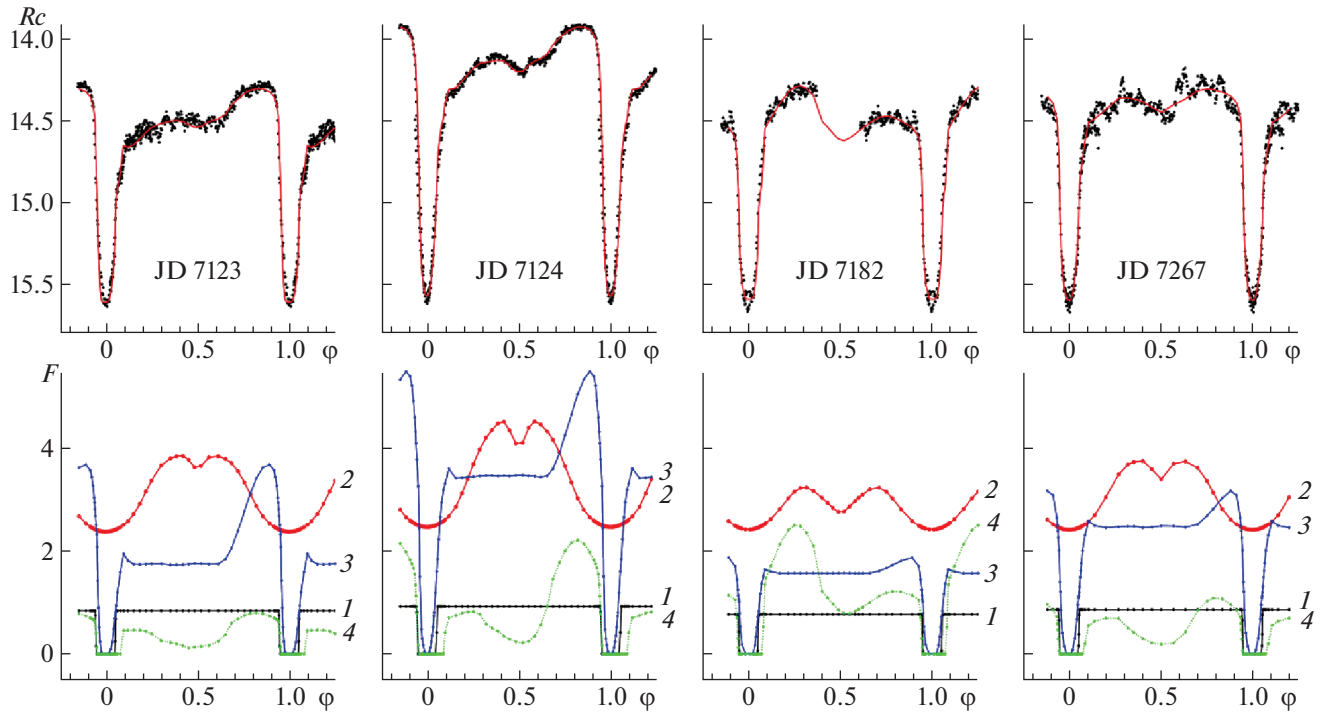


Рис. 10. То же, что на рис. 9. Наблюдения EX Dra в 2015 г.

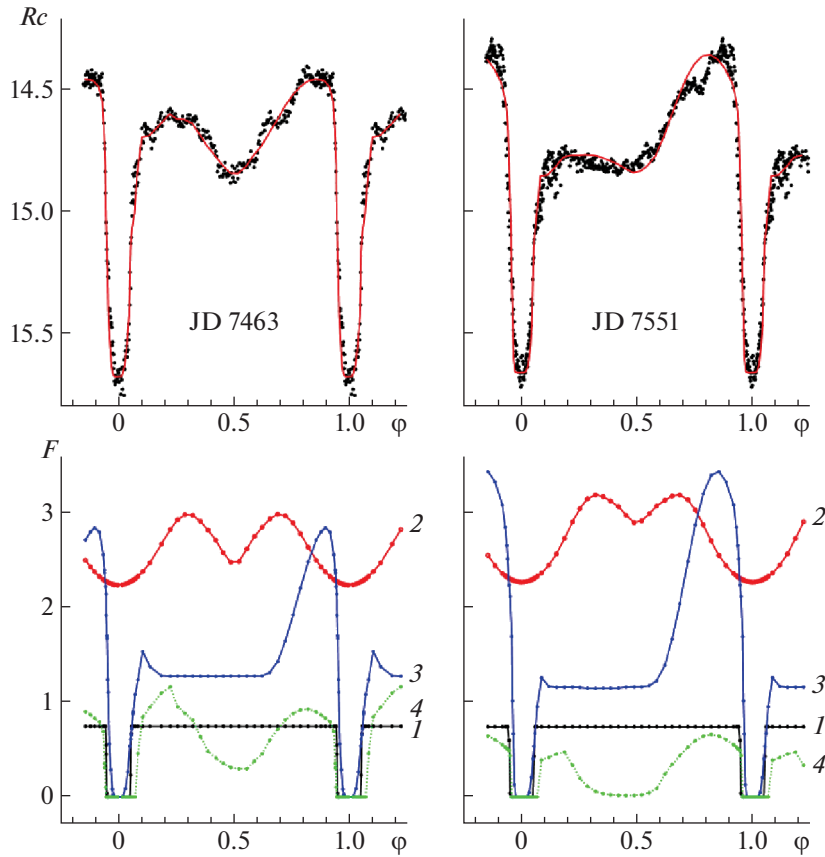


Рис. 11. То же, что на рис. 9. Наблюдения EX Dra в 2016 г.

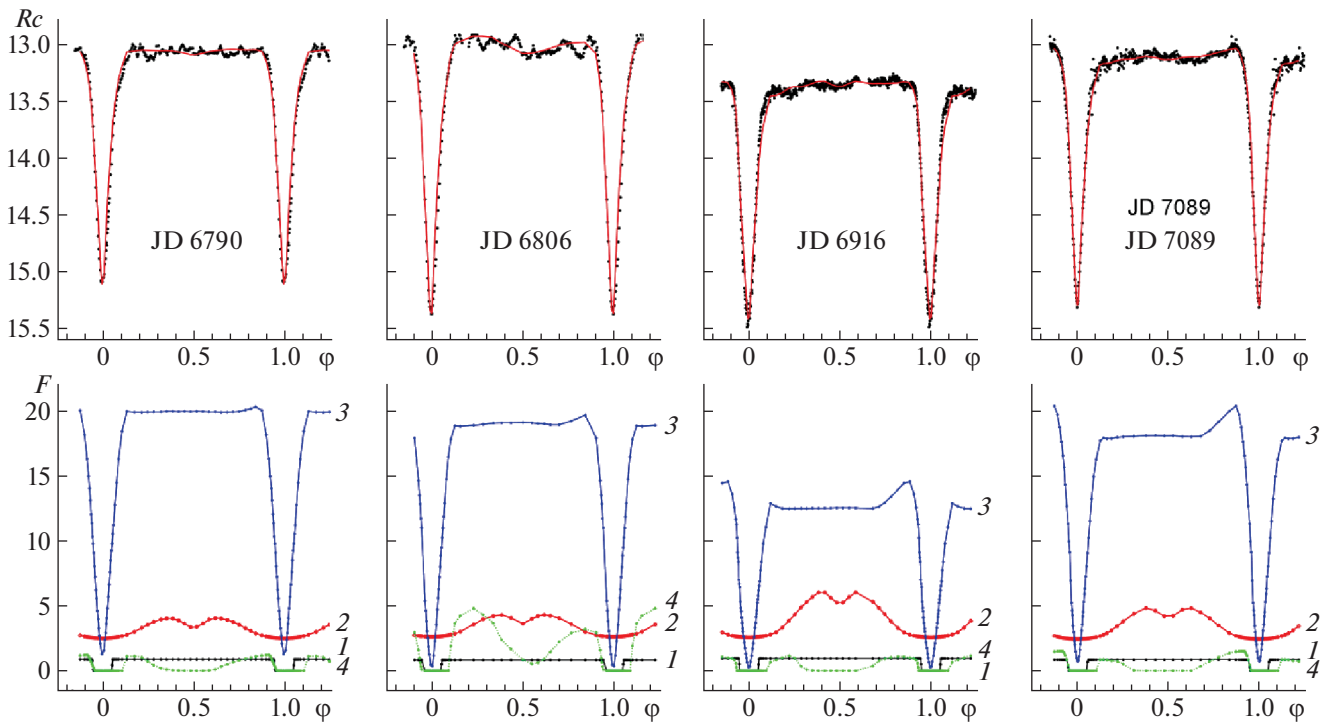


Рис. 12. Наблюдения EX Dra в 2014–2015 гг., полученные на Крымской астрономической станции ГАИШ в фильтре  $Rc$  во время вспышек. Обозначения те же, что на рис. 7.

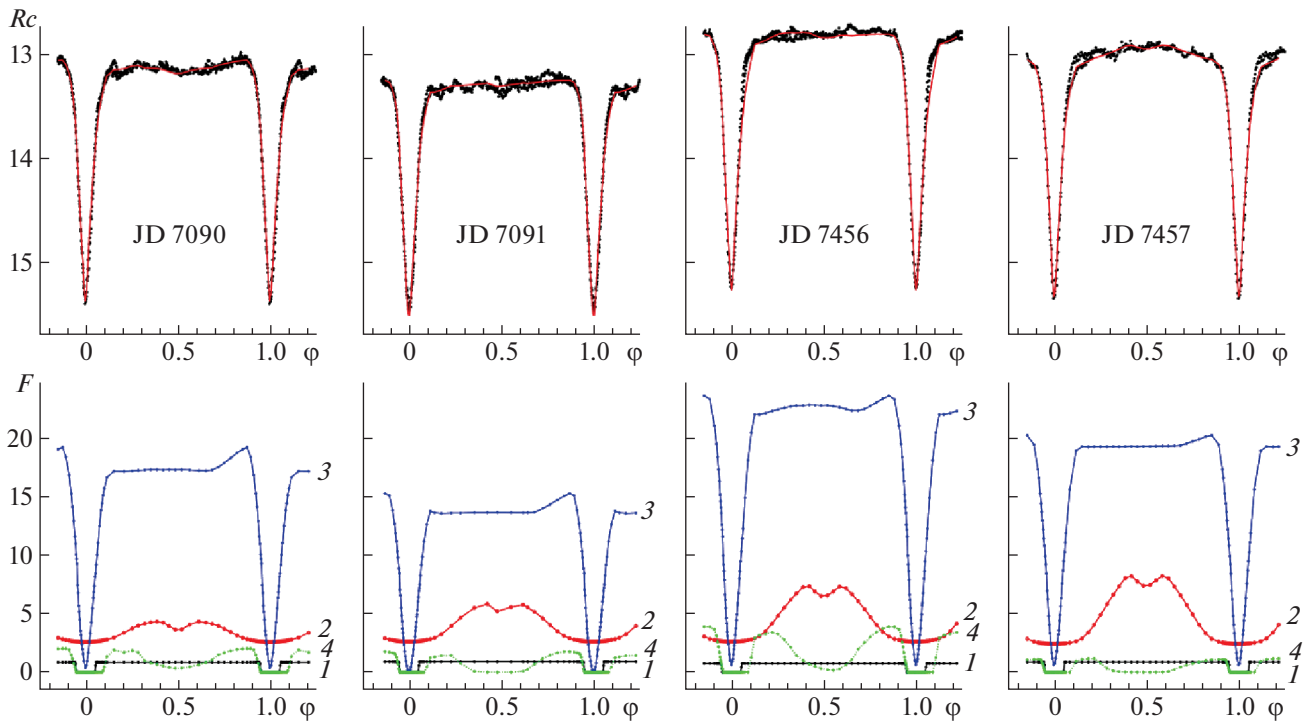
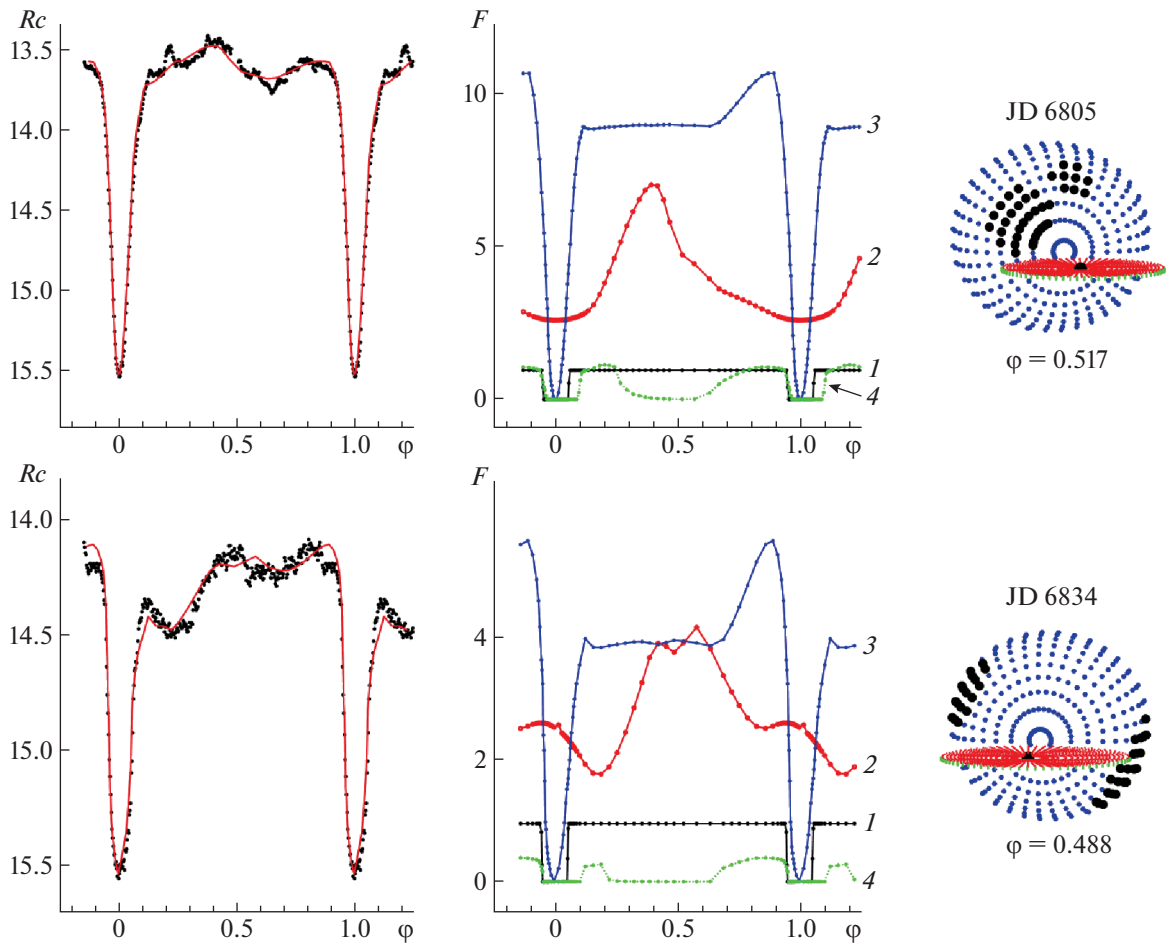


Рис. 13. То же, что на рис. 12. Наблюдения EX Dra 8–9 марта 2015 г. и 8–9 марта 2016 г.

а после вспышки возросла на  $\sim 6\%$  в сравнении с довспышечным значением. Параметры ГЛ и ГП в пределах погрешностей не изменились. Значимые

изменения во время вспышки наблюдаются только у параметров диска. В спокойном состоянии радиус диска сохраняется на уровне  $0.5\xi$ , полутолщина его



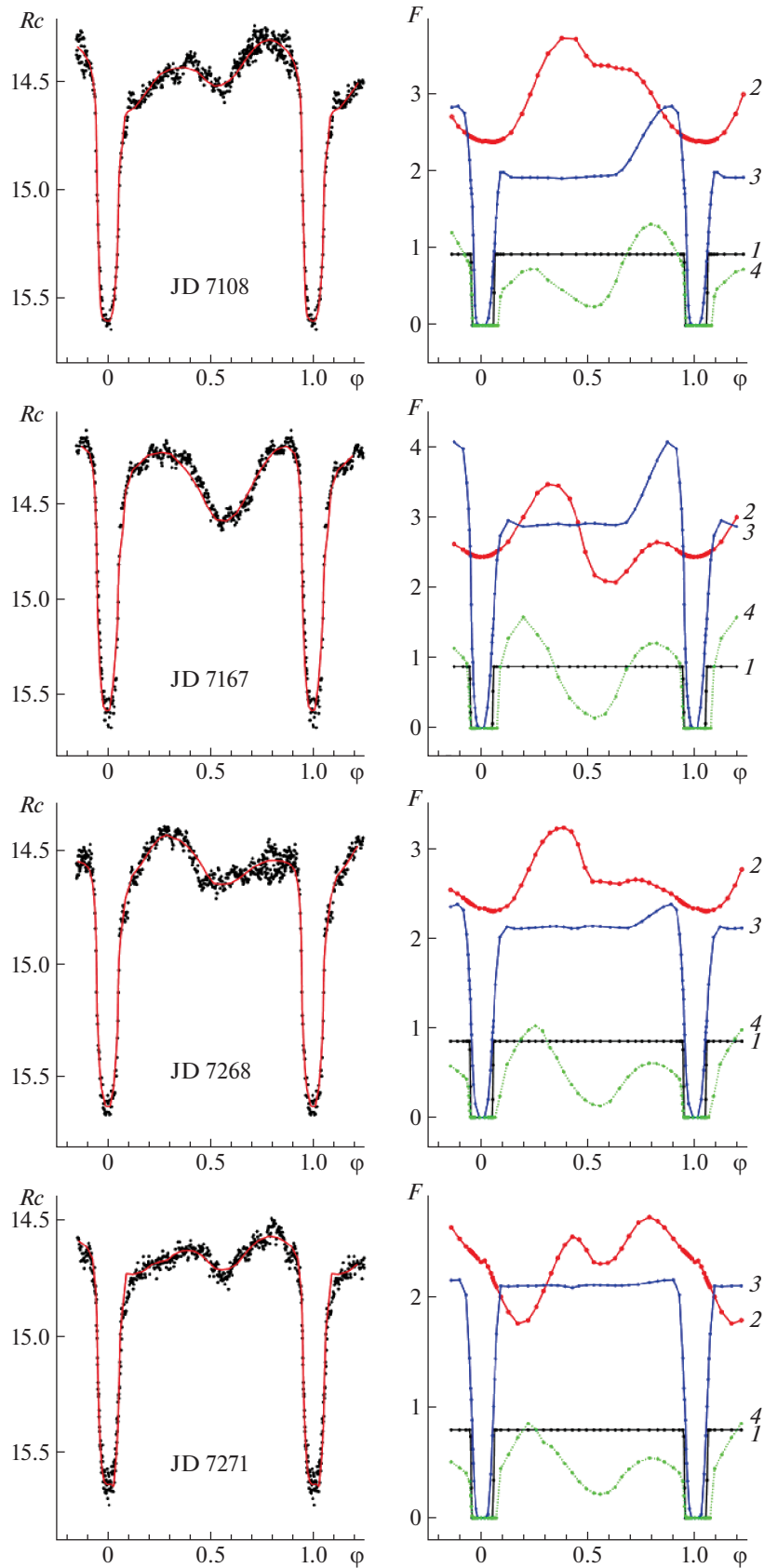
**Рис. 14.** Кривые блеска EX Drg, полученные в 2014 г. в фильтре  $R_c$  (спокойное состояние). Слева — неосредненные (точки) и теоретические кривые блеска (линии), синтезированные в “пятенной” модели с параметрами из табл. 6. В центре — вклады излучения в суммарный поток от системы (в условных единицах) белого (1) и красного (2) карликов, аккреционного диска с горячим пятном (3) и горячей линии (4). Справа — схематичные изображения системы в указанной на рисунке орбитальной фазе.

внешнего края  $\sim 1.5^\circ$ . Во время вспышки радиус диска возрастает до  $\sim 0.7\xi$ , а толщина его края уменьшается до  $\sim 0.4^\circ$ . Таким образом, в спокойном состоянии объем диска в среднем в  $\sim 1.2$  раза больше, чем во время вспышки, следовательно, при вспышке диск, хотя и больше по радиусу, но более тонкий, более плотный и более горячий ( $T_{in}$ ,  $T_{out}$  диска выше, чем в покое, профиль температуры менее крутой), чем до вспышки и после нее. Вклад излучения компонентов системы в суммарный поток в спокойном состоянии в пределах погрешностей совпадает, а во время вспышки вклад излучения диска (средний по периоду) достигает  $0.74(6)$  от суммарного потока, т.е. он в 1.5 раза выше, чем в покое. Изменение азимута  $\beta_1$  струи свидетельствует о высоком темпе истечения вещества перед вспышкой, его резком замедлении во время вспышки и о возвращении к значению  $\beta_1 \sim 20^\circ$  после нее.

### 5.3. $R_c$ кривые блеска

В фильтре  $R_c$  наши данные более многочисленны, однако, в отличие от данных в фильтрах  $V$  и  $R$  они распределены неравномерно в интервале  $N \sim 0 - 3625$ , где  $N$  — номер орбитального цикла относительно первого минимума, наблюдаемого в данном фильтре ( $N = 0$  для JD 6790.48864, см. табл. 2). Проследить последовательные изменения параметров системы нельзя, однако можно выделить несколько интересных групп.

1. Кривые блеска JD 6805 ( $N = 71$ , табл. 6), JD 6806 ( $N = 76$ , табл. 5), и близкая к ним JD 6819 ( $N = 138$ , табл. 4). Кривая JD 6806 получена во время вспышки, кривые JD 6805 и 6819 — в спокойном состоянии системы. Перед вспышкой (JD 6805) на поверхности красного карлика в районе “носика” звезды наблюдаются холодные “пятна” радиусом (0.3–0.4) от радиуса карлика в



**Рис. 15.** Наблюдения EX Dra в 2015 г. в фильтре  $Rc$  в неактивном состоянии. Слева — неосредненные (точки) и теоретические кривые блеска, синтезированные в “пятенной” модели с параметрами из табл. 6. Справа — вклады излучения компонентов системы в суммарный поток в условных единицах, обозначения те же, что на рис. 14.

рассматриваемой области (см. рис. 14), контраст невелик ( $\sim 0.8-0.9$ ), но магнитные поля пятен, и общее понижение температуры здесь способствуют снижению скорости истечения вещества.

Сравнение параметров системы показывает, что радиус диска непосредственно перед вспышкой меньше, чем в последующие даты ( $R_d/\xi \sim 0.57, 0.65$  и  $0.32$  для JD 6805, 6806 и 6819 соответственно), при этом толщина его внешнего края больше, чем во время вспышки ( $0.5\beta_d \sim 1.2^\circ, 0.7^\circ$  и  $1.7^\circ$  соответственно), после вспышки видимый радиус диска уменьшается почти в 2 раза с соответствующим увеличением толщины его внешнего края. Перед вспышкой распределение температуры вдоль радиуса диска ближе к равновесному, чем в момент вспышки и после нее ( $\alpha_g \sim 0.48, 0.24$  и  $0.23$  соответственно), но в целом значения параметра  $\alpha_g$  во вспышке и в спокойном состоянии сравнимы. Изменение температуры на внешнем крае диска мало ( $T_{out} \sim 9400-13\,000$  К), в пограничном слое перед вспышкой она достигает  $T_{in} \sim 33\,000$  К, а во время вспышки и после нее снижается ( $T_{in} \sim 25\,000$  и  $20\,500$  К).

2. Кривые блеска JD 7089 ( $N = 1424$ ), JD 7090 ( $N = 1428-9$ ), JD 7091 ( $N = 1433-4$ ). Все три кривые блеска получены во время вспышки (табл. 5), наибольший поток наблюдался в первую дату. Длительность вспышки составляет, как минимум,  $10P_{orb}$ . Параметры меняются следующим образом для JD 7089, 7090, 7091 соответственно:  $T_2 = 3610, 3645, 3650$  К;  $\beta_1 = 24^\circ, 20^\circ, 17^\circ$ ;  $R_s/\xi = 0.69, 0.66, 0.59$ ;  $0.5\beta_d = 1.4^\circ, 0.7^\circ, 1.6^\circ$ ;  $\alpha_g = 0.34, 0.27, 0.38$ ;  $T_{in} = 27\,000, 25\,000, 29\,000$  К;  $T_{out} = 10\,300, 12\,500, 10\,300$  К;  $F_d/F_{full} = 0.75, 0.73, 0.66$ ;  $T_{lw,max}/1000 = 30-31, 33-39, 38-41$ ;  $R_{sp}/a_0 = 0.21, 0.19, 0.16$ .

3. Кривые блеска во вспышке (табл. 5) JD 7456 ( $N = 3171$ ), JD 7457 ( $N = 3176-7$ ), и в покое JD 7463 ( $N = 3205-6$ , табл. 4). Во вспышке параметры диска близки к тем, что получены для группы 2, вклад в суммарный поток в максимуме сохраняется на уровне 73%, а значение  $\alpha_g \sim 0.35-0.37$ . При переходе в спокойное состояние радиус диска уменьшается до  $0.42\xi$ , как и в группе 1, уменьшается и температура диска в пограничном слое и на внешнем крае, распределение температуры приближается к равновесному.

4. Кривые блеска в спокойном состоянии JD 7106 ( $N = 1504-5$ , табл. 4), JD 7108 ( $N = 1514$ , табл. 6), JD 7118 ( $N = 1562$ , табл. 4), JD 7123 ( $N = 1586$ , табл. 4), JD 7124 ( $N = 1590-91$ , табл. 4). Для одной из кривых блеска (JD 7108) смещение вторичного минимума на фазу  $\varphi \sim 0.6$  предполагает наличие пятен на поверхности вторичного компонента, одно из которых также

лежит вблизи “носика” звезды, вызывая искажение эллипсоидальной формы вклада вторичного компонента. Остальные кривые блеска удается описать в рамках модели без пятен. У последней кривой блеска (JD 7124) наблюдается заметное возрастание потока излучения, как от диска, так и от ГП и ГЛ. Если допустить, что в данной группе мы наблюдаем предвспышечное состояние системы, то оно сопровождается появлением пятен на вторичном компоненте в районе “носика” звезды. При этом наблюдается сравнительно высокая скорость истечения вещества ( $\beta_1 \sim 11^\circ-12^\circ$ ); через промежутки времени порядка  $(20-30)P_{orb}$  скорость истекающего вещества падает ( $\beta_1 \sim 15^\circ-17^\circ$ ), радиус диска сначала уменьшается (JD 7123,  $R_d/\xi \sim 0.43$ ), а затем возрастает (JD 7124,  $R_d/\xi \sim 0.52$ ), одновременно с этим растет и излучение от ГП.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Баптиста в серии своих работ для объяснения вспышек карликовых новых рассматривает две модели [14, 25–27]. Согласно модели МТИМ (Mass Transfer Instability Model) [28] вспышка есть зависящий от времени отклик вязкого аккреционного диска на рост темпа переноса вещества от звезды-донора. В модели ДИМ (Disk Instability Model) [29] вещество переносится с почти постоянной скоростью в диск с низкой вязкостью  $\alpha_0^7$  и аккумулируется до тех пор, пока не достигается критическая поверхностная плотность на данном радиусе. Возникает горячая волна, приводящая к переключению диска в высоковязкий режим ( $\alpha \sim 0.1\alpha_0$ ), позволяющий газу быстро распространяться внутрь и аккрецировать на белый карлик.

Для модели МТИМ предсказаны малые изменения параметра  $\alpha$  при переходе от спокойного состояния к активному (вспышка); яркий, стационарный диск реагирует на изменения темпа истечения вещества  $\dot{M}$  за такой же короткий интервал времени, как и во время вспышки. Вследствие всплеска  $\dot{M}$  модель предсказывает переполнение газового потока и усиление эмиссии вдоль его траектории за пределами аккреционного диска в начале вспышки. Диск реагирует на внезапное добавление вещества с низким удельным угловым моментом сокращением размеров, затем он расширяется из-за перераспределения углового момента. Вязкость

<sup>7</sup>Здесь  $\alpha_0 \simeq \frac{v_h}{c_s} = 0.082 \left[ \frac{v_f}{\text{км/с}} \right] \left( \frac{T_f}{18\,000 \text{ К}} \right)^{-1/2}$  [30];

$v_f$  — скорость фронта ударной волны, распространяющейся по аккреционному диску,  $c_s$  — скорость звука внутри этого фронта,  $T_f$  — температура вещества в ударной волне.



спокойного диска примерно такая же, как во время вспышки,  $\alpha \sim 0.2-0.7$  в зависимости от системы. Объекты, для которых справедлива эта модель вспышек, получили название DDNs-системы.

В модели DIM для обеспечения наблюдаемых длительности и амплитуды вспышки необходимо, чтобы вязкость диска в покое была на порядок величины меньше, чем во время вспышки. Эта модель предсказывает неяркий нестационарный диск в состоянии покоя со слабым откликом на изменения  $\dot{M}$ , здесь нет ни усиленного газового потока, ни сжатия диска перед вспышкой, диск просто расширяется до максимально возможного размера. Истекающее вещество аккумулируется в неустойчивом, низковязком диске. Распределение радиальной температуры во вспышке близко к зависимости  $T \sim R^{-3/4}$  ( $\alpha_g \sim 0.75$ ), которое ожидается для непрозрачного стационарного (steady-state) диска [31], в то время как в спокойном состоянии это распределение довольно плоское,  $\alpha_g \ll \ll 0.75$ , с  $T_d < 6000$  К везде [32]. То есть вязкость аккреционного диска много ниже в покое, чем во вспышке, диск далек от стационарного. Объекты, для которых справедлива эта модель вспышек, в свою очередь называют MDNs-системами.

Таким образом, анализ наблюдательных данных свидетельствует о существовании двух различных групп карликовых новых. В то время как вспышки одной группы могут быть поняты в модели DIM, вспышки карликовых новых другой группы могут быть объяснены только с точки зрения модели MTIM. И вопрос не в том, какая модель справедлива, а какая — нет, а в том, какой механизм следует применить к конкретной системе.

О принадлежности к группе также говорит морфология кривой блеска затменной системы: т.к. в модели DIM предполагается, что аккреция на БК низкая, на кривых блеска в спокойном состоянии преобладает излучение ГП (мощный орбитальный горб) и наблюдается двухступенчатое затмение. С другой стороны, вязкие диски в покое в модели MTIM подавляют излучение ГП, наблюдаемый на кривых блеска орбитальный горб слабый или отсутствует вообще, а гладкие “бесступенчатые” профили затмения подобны тем, что наблюдаются у новоподобных систем.

Сравнение карт затмений на стадии роста блеска в начале вспышки и в спокойном состоянии позволяет предположить, что вспышки в системе EX Dra вызываются эпизодами усиленного истечения вещества из вторичного компонента [7, 14], как предсказывает модель MTIM. Анализ наших наблюдений катаклизмической переменной EX Dra свидетельствует о принадлежности данной системы к объектам DDNs. Это обусловлено высокой вязкостью вещества в аккреционном диске,

ее малым изменением при переходе из спокойного состояния в активное, а также сжатием аккреционного диска и ростом излучения от ГП и ГЛ перед вспышкой.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены долговременные фотометрические наблюдения карликовой новой EX Dra, системы с большим орбитальным периодом, в спокойном, предвспышечном и активном состояниях. Наблюдения выполнены на двух обсерваториях — Крымской астрономической станции ГАИШ (2014–2016 гг.) и обсерватории Астрономического института Чешской академии наук в п. Ондржейов (2010 г.) в фильтрах *Rc*, *V*, *R*. Проведенный анализ этих наблюдений позволил сделать следующие выводы.

1. Орбитальный период системы, найденный по нашим наблюдательным данным, подтверждает полученное ранее значение [4].

2. “Комбинированная” модель, учитывающая наличие горячего пятна на боковой поверхности аккреционного диска и вклад излучения струи вблизи внешнего края диска, позволяет определить параметры EX Dra в разных стадиях активности системы для 80% изученных кривых блеска.

3. Анализ остальных 20% (6 кривых блеска) не дал удовлетворительной аппроксимации наблюдательных кривых блеска теоретическими, поэтому было введено дополнительное предположение о наличии темных пятен на поверхности вторичного компонента. Для описания таких кривых использована “пятенная” модель, учитывающая присутствие на поверхности вторичного компонента одного-двух темных пятен. Учет их присутствия позволил качественно воспроизвести вторичные минимумы на фазах, отличающихся от  $\varphi \sim 0.5$ .

4. Детальное рассмотрение поведения полученных нами параметров системы, их изменений при переходе из спокойного состояния в активное подтверждает принадлежность EX Dra к системам DDNs, для которых справедлива модель вспышки MTIM, т.е. вспышка в системе карликовой новой EX Dra вызвана усиленным истечением вещества со вторичного компонента.

5. На данном этапе исследований нельзя исключить влияние пятенной активности на поверхности вторичного компонента позднего спектрального класса на изменения темпа истечения вещества из звезды. Для подтверждения данного предположения необходимы дальнейшие наблюдения объекта.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку (грант РФФИ № 17-52-53200). Работа Т.С. Хрузиной (моделирование) поддержана грантом Программы развития МГУ Ведущая научная школа “Физика звезд, релятивистских объектов и галактик”.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят докторов К. Хорноч, Я. Врстил и Х. Кусакову за помощь в получении наблюдений на обсерватории Ондржейов и В.П. Горанского за предоставление программы определения периодов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Warner, *Cataclysmic Variable Stars*, Cambridge Astrophysics Series 28 (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995).
2. N. Bade, H.-J. Hagen, and D. Reimers, 23 Eslab Symp., edited by J. Hunt and B. Battrock (ESA SP-296; Noordwijk: ESA), 883 (1989).
3. H. Barwig, H. Fiedler, D. Reimers, N. Bade, in Abstracts of IAU Symp. 165 “Compact Stars in Binary Systems”, edited by H. van Woerden (Dordrecht: Kluwer), 89 (1993).
4. L. Pilarčik, M. Wolf, P. A. Dubovský, K. Hornoch, and L. Kotková, *Astron. and Astrophys.* **539**, id. A153 (2012).
5. I. Billington, T. R. Marsh, and V. S. Dhillon, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **278**, 673 (1996).
6. H. Fiedler, H. Barwig, and K. H. Mantel, *Astron. and Astrophys.* **327**, 173 (1997).
7. R. Baptista, M. S. Catalán, and L. Costa, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **316**, 529 (2000).
8. A. W. Shafter and J. N. Holland, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115**, 1105 (2003).
9. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.* **24**, 337 (1973).
10. A. V. Halevin and A. A. Henden, *Inform. Bull. Var. Stars* № 5833 (2008).
11. V. Joergens, H. C. Spruit, and R. G. M. Rutten, *Astron. and Astrophys.* **356**, L33 (2000).
12. D. A. Smith and V. S. Dhillon, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **301**, 767 (1998).
13. C. Knigge, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **373**, 484 (2006).
14. R. Baptista, *Mem. Soc. Astron. Ital.* **83**, 530 (2012).
15. C. Hellier, J. Kemp, T. Naylor, F. M. Bateson, A. Jones, D. Overbeek, R. Stubbings, and K. Mukai, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **313**, 703 (2000).
16. Т. С. Хрузина, И. Б. Волошина, В. Г. Метлов, *Астрон. журн.* **93**(11), 942 (2016).
17. Т. С. Хрузина, И. Б. Волошина, Ш. Цянь, В. Г. Метлов, *Астрон. журн.* **95**(1), 35 (2018).
18. Т. С. Хрузина, *Астрон. журн.* **88**(5), 463 (2011).
19. Т. С. Хрузина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **72**(2), 203 (1985).
20. А. М. Cherepashchuk, N. A. Katysheva, T. S. Khruzina, S. Yu. Shugarov, A. M. Tatarnikov, M. A. Burlak, and N. I. Shatsky, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **483**, 1067 (2019).
21. L. B. Lucy, *Zeitschrift für Astrophysik* **65**, 89 (1967).
22. Д. Химмельблау, *Прикладное нелинейное программирование* (М.: Мир, 1975), с. 163.
23. Т. С. Хрузина, А. М. Черепашук, Д. В. Бисикало, А. А. Боярчук, О. А. Кузнецов, *Астрон. журн.* **80**(3), 239 (2003).
24. G. M. H. J. Habets and J. R. W. Heintze, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **46**, 193 (1981).
25. R. Baptista and M. S. Catalán, *Astrophys. J.* **539**, L55 (2000).
26. R. Baptista and A. Bortoletto, *Astron. J.* **128**, 411 (2004).
27. R. Baptista, R. F. Santos, M. Faúndez-Abans, and A. Bortoletto, *Astron. J.* **134**, 867 (2007).
28. G. T. Bath, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **171**, 311 (1975).
29. J. P. Lasota, *New Astronomy Review* **45**, 449 (2001).
30. J. K. Cannizzo, in *Accretion Disks in Compact Stellar Systems*, edited by J. C. Wheeler (Singapore: World Scientific, 1993), p. 6.
31. K. Horne and M. C. Cook, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **214**, 307 (1985).
32. J. Wood, K. Horne, G. Berriman, R. Wade, D. O’Donoghue, and B. Warner, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **219**, 629 (1986).