

УДК 523.842

ЧЕРЕПАЩУК А. М., ХРУЗИНА Т. С.
ОПТИЧЕСКИЕ ЗАТМЕНИЯ И ПРЕЦЕССИОННЫЕ
ЭФФЕКТЫ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ
HD 153919 = 4U 1700-37

Анализ всех опубликованных фотометрических данных показал наличие долгопериодической ($P=32^d,46$) переменности формы и амплитуды оптических кривых блеска HD 153919, которая, по-видимому, связана с эффектами затмений оптической звезды O 6f «прецессирующей» аккреционной структурой в окрестности нейтронной звезды. Переменность эквивалентной ширины эмиссионной линии He II λ 4686 и амплитуды и формы кривых лучевых скоростей с периодом $32^d,46$ свидетельствуют о том, что «прецессия» аккреционной структуры вызывается прецессией оси вращения оптической звезды O 6f, подобно тому как это, по-видимому, имеет место в системах HZ Her и SS 433. Оптическая кривая блеска, исправленная за эффекты затмения, имеет амплитуду эллипсоидальной переменности $0^m,027-0^m,035$ и хорошо согласуется с длительностью рентгеновского затмения и данными спектроскопических наблюдений. Амплитуда эффекта затмения достигает $0^m,04$. Получены оценки параметров системы и показано, что степень заполнения оптической звездой своей полости Роша $\mu < 1$. Обсуждается вопрос о взрыве сверхновой в двойной системе как причине появления прецессии оси вращения оптической звезды.

OPTICAL ECLIPSES AND THE PRECESSION EFFECTS IN THE X-RAY BINARY SYSTEM HD 153919=4U 1700-37, by *Cherepashchuk A. M., Khruzina T. S.* — The long-period ($P=32^d,46$) variability of the amplitude and shape of the optical light curves of the X-ray binary HD 153919 has been discovered from the analysis of all published photometric data. This periodicity is presumably due to the eclipses of the optical star O 6f by the «precessing» accretion structure surrounding the neutron star. The variability of the equivalent width of the emission line He II λ 4686 and the amplitude and shape of radial velocity curves with the period $32^d,46$ imply that the (precession of the accretion structure is caused by the precession of the rotational axis of the optical star O 6f. This phenomenon is similar to that which is presumably observed in the systems HZ Her and SS 433. Optical light corrected for the eclipse effects has the amplitude of the ellipsoidal light variability $0^m,027-0^m,035$ and is in good agreement with the duration of the X-ray eclipses and with the spectroscopic data. The depth of the eclipse is about $0^m,04$. The estimations of the parameters of the system are obtained. It is shown that the parameter of the Roche Lobe filling for the optical star O 6f is $\mu < 1$. The supernova explosion in a binary system is suggested as the main cause of the precession of the rotational axis of the optical star, and related problems are discussed.

Введение

После отождествления рентгеновских двойных систем с оптическими объектами стало ясно, что главная причина их оптической переменности — эффект эллипсоидальности оптической звезды [1] и эффект отражения, точнее, прогрева поверхности оптической звезды рентгеновским излучением компактного объекта [2, 3]. Как показали дальнейшие исследования [4], модель двойной системы, состоящей из компактного объекта и оптической звезды, фигура которой задается моделью Роша, в случае системы Cyg X-1, где отсутствует рентгеновское затмение, хорошо описывает средние высокоточные оптические кривые блеска.

В большинстве известных рентгеновских двойных систем наблюдаются рентгеновские затмения. Поскольку аккреционный диск вокруг компактного объекта является оптически толстым [5–7], имеет смысл искать оптические затмения в таких системах, что представляет интерес для теории аккреции и для уточнения моделей этих систем, в частности для исследования прецессионных явлений, которые особенно четко проявля-

Таблица 1

**Характеристики данных, использованных для получения
сводных кривых блеска HD 153919 в фильтрах U, B, V**

Работа	Система	Число ночей в фильтрах			Продолжительность наблюдений
		U	B	V	
[22]	UBV	17	17	18	J.D. 2441726–2441749
[16]	UBV	62	76	76	2441730–2441813
[17]	UBV	11	26	26	2441804–2441899
[21]	UBV	17	27	27	2442160–2442175 (U) 2441850–2442174 (B, V)
[20]	UBV	11	15	14	2441767–2441775
[18]	$UVBY$	55	—	67	2442460–2442647
[19]	$UBLUW$	—	73	74	2441811–2442598
[15]	$UBLUW$	—	51	55	2443010–2443044
[23]	UBV	34	35	36	2444285–2444383

ются в затменной системе SS 433 [8–10] и впервые были исследованы в рентгеновской двойной системе HZ Her [11, 12].

За последнее десятилетие накопился обширный материал по фотометрии рентгеновской двойной системы HD 153919=4U 1700-37 ($V = 6^m, 6, P = 3^d, 4, Sp\ O6f$). Исследование кривых блеска, полученных разными авторами в промежутки времени, охватывающие до нескольких десятков орбитальных периодов, показало, что форма кривой блеска этой системы нестабильна. Амплитуда оптической переменности ($\sim 0^m, 05$), если ее трактовать как «чистый» эффект эллипсоидальности оптической звезды, не согласуется с длительностью рентгеновского затмения [13, 14], поэтому оценки масс компонент этой системы нуждаются в уточнении. Для детального исследования характеристик этой системы необходимо построить кривые блеска, охватывающие длительный промежуток времени.

Средние кривые блеска

Первая попытка свести фотометрические наблюдения разных авторов в одну систему была предпринята авторами работы [15], которые кроме своих наблюдений HD 153919 использовали данные работ [16–19]. Мы объединили все опубликованные к настоящему времени данные по фотометрии HD 153919 [15–23] и построили средние кривые блеска в фильтрах U, B, V . Характеристики использованных нами данных приведены в табл. 1.

Наблюдения авторов [18] выполнены в системе Стремгрена $UVBY$. В качестве звезды сравнения здесь, как и в [21, 22], использовалась затменная переменная HR 6327, однако, по мнению авторов, в период их наблюдений она была в максимуме блеска, что контролировалось наблюдениями контрольной звезды HD 153767. Переход в систему UBV осуществлялся смещением среднего уровня блеска для фильтров Y_{Str} и U_{Str} , приблизительно соответствующих по полосе пропускания фильтрам V и U (см. ниже). Наблюдения [15, 19] получены в системе Вальравена $VBLUW$, описанной в [24]. Переход в систему UBV для фильтра V совершался по формуле [24]

$$V_{UBV} = 6,874 - 2,5 [V_{\text{Walr}} + 0,065 (V - B)_{\text{Walr}}].$$

Переход от показателя цвета $(V - B)_{\text{waiv}}$ к $(B - V)_{UBV}$ нелинейный, звездные величины в фильтре B были получены интерполяцией с помощью таблицы, приведенной в [24]. Последним из использованных массивов являлся ряд наблюдений в системе UBV , выполненный Черепашуком [23] в Австралийском национальном университете. Для анализа использовались средние за ночь значения звездных величин системы, быстрая периодическая переменность системы HD 153919, обнаруженная в [25, 26], анализируется в другой работе [23].

Таблица 2

Поправки S к данным разных авторов для сведения наблюдений в одну систему

Работа	U	B	V	Работа	U	B	V
[22]	$0^m,0065$	$-0^m,0046$	$0^m,0034$	[18]	$-7,3719$		$-5,8945$
[16]	$0,0015$	$0,0008$	$0,0008$	[19]	—	$-0,0278$	$0,0034$
[17]	$0,0247$	$-0,0121$	$0,0059$	[15]	—	$-0,0448$	$-0,0151$
[21]	$0,0237$	$-0,0250$	$-0,0061$	[23]	$-7,4214$	$-7,4952$	$-7,4425$
[20]	$0,0414$	$-0,0110$	$-0,0099$				

Для учета различных инструментальных систем в каждый ряд наблюдений вводилась соответствующая поправка, полученная следующим методом [27]. По наиболее полным данным [16], свернутым с периодом колебаний рентгеновского излучения $3^d,412$, проводилась «стандартная» кривая блеска $m_{st}(\varphi)$. Для каждой из точек данного ряда наблюдений вычислялась фаза периода $3^d,412$ и отклонение в данной фазе от «стандартной» кривой $(m - m_{st})$. Поправка вычислялась по формуле

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - m_{st})}{N}.$$

Окончательное значение смещенной звездной величины получалось вычитанием поправки S от исходного значения блеска $m' = m - S$. Значения поправок S для использованных массивов наблюдений приведены в табл. 2.

Для уточнения периода изменения блеска использовался метод Юркевича [28], примененный ко всей совокупности наблюдений, приведенных к единому уровню. Уточненное значение орбитального периода получилось равным $P = 3^d,4118 \pm 0^d,0005$ для фильтров B и V (318 и 393 точек соответственно) и $P = 3^d,4116 \pm 0^d,0004$ для фильтра U (207 точек). В фильтре U метод Юркевича дает также второе значение периода $P = 3^d,4166$, которое, по-видимому, является ложным. Уточненное значение периода $P = 3^d,4118$ хорошо согласуется со значениями, полученными в [29] по данным рентгеновских наблюдений и в [19] и [30] по фотометрическим данным, однако отличается от значения $P = 3^d,4111$, вычисленного в [15] по пяти независимым рядам наблюдений. Возможной причиной такого расхождения является иной способ вычисления поправок, примененный в [15] для учета различия инструментальных систем.

Используя уточненное значение орбитального периода и эпоху J.D. 2442476,68 [29], соответствующую середине затмения рентгеновского источника, мы построили сводные кривые блеска системы в фильтрах U , B , V . Фазы φ орбитального периода вычислены с элементами

$$\text{Min. hel.} = \text{J.D. } 2442476,68 + 3^d,4118 \cdot E, \quad (1)$$

фаза 0 соответствует середине рентгеновского затмения.

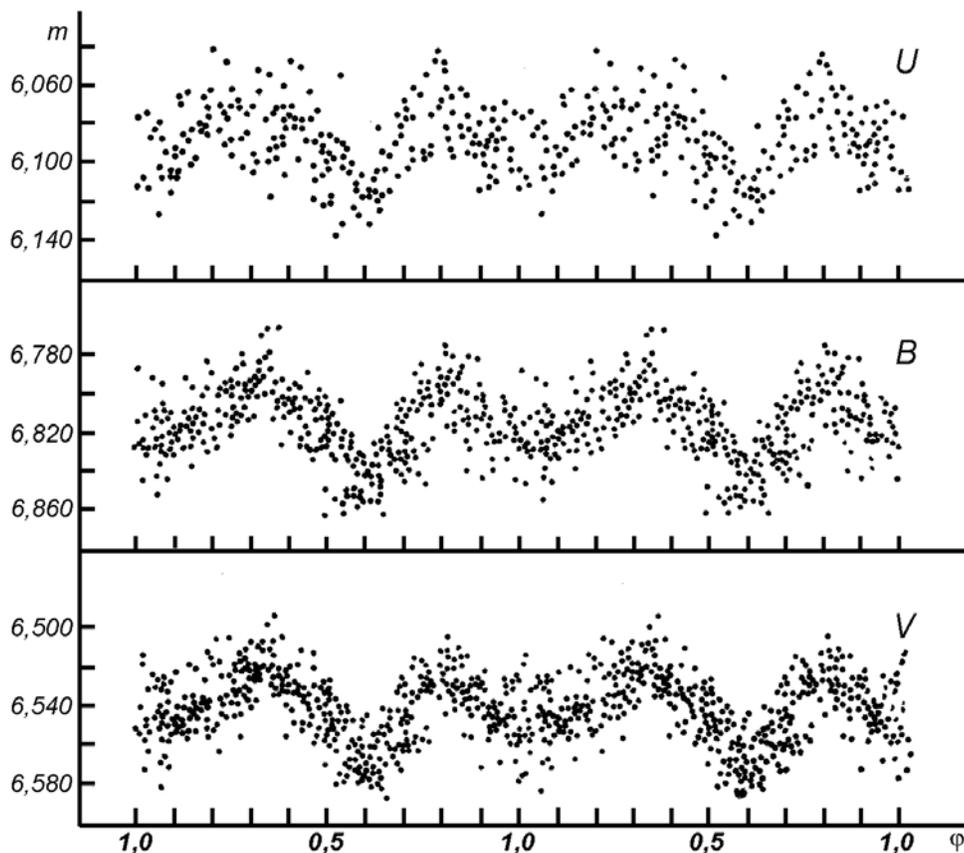


Рис. 1. UBV -кривые блеска системы HD 153919, объединяющие все опубликованные данные. Каждая точка — среднее за ночь (от 3 до 30 измерений). Рассеяние точек вызвано физической переменностью системы

На рис. 1, 2 и в табл. 3 приведены средние кривые блеска HD 153919 в фильтрах UBV . Главный минимум глубиной до $0^m,05$ расположен на фазе ($\varphi=0,63$, вторичный минимум совпадает с фазой ($\varphi=0,0$, однако его форма асимметрична, восходящая ветвь занимает $0,32$, нисходящая ветвь $0,20$ от орбитального периода. В фильтрах B и V кривые блеска подобны по своей форме и амплитуде. Форма главного минимума, так же как и вторичного, асимметрична, на что указывали многие исследователи, например [30]. Средняя кривая блеска в фильтре U отличается от кривых для фильтров B , V . В фазах $0,25-0,4$ на кривой блеска в фильтре V появляется дополнительный минимум глубиной до $0^m,02$. Ниже приведены глубины главного и вторичного минимумов средних кривых блеска.

Главный минимум ($\varphi=0,63$) $\Delta U=0^m,053\pm 0^m,006$, $\Delta B=0^m,052\pm 0^m,004$, $\Delta V=0^m,049\pm 0^m,004$. Вторичный минимум ($\varphi=0,0$) $\Delta U=0^m,039\pm 0^m,006$, $\Delta B=0^m,031\pm 0^m,004$, $\Delta V=0^m,025\pm 0^m,004$. Заметим, что на средних кривых блеска хорошо виден перегиб вблизи фазы $\varphi=0,5$, который, как будет показано ниже, отражает начало затмения оптической звезды газовым потоком, истекающим через внутреннюю точку Лагранжа.

Свидетельства существования газовых потоков в системе

Многочисленные спектральные и рентгеновские исследования [29, 31–34] показали, что в районе фаз $\varphi = 0,6-0,8$ на луч зрения попадает крупномасштабное возмущение плотности звездного ветра, удаляющегося от оптической звезды со скоростью около 800 км/с. В фазе $0,63$ наблюдаются аномально сильные абсорбции H, He I [31, 34], в

Таблица 3

Средние кривые блеска системы HD 153919. В каждой точке усреднено 7, 11 и 13 средних за ночь наблюдений в фильтрах V , B , V соответственно,
 σ - среднеквадратичная «ошибка» среднего

Фильтр U			Фильтр B			Фильтр V		
φ	m	σ	φ	m	σ	φ	m	σ
0,026	6 ^m ,094	0 ^m ,0065	0,020	6 ^m ,823	0 ^m ,0046	0,017	6 ^m ,544	0 ^m ,0054
0,067	6,103	0,0063	0,058	6,824	0,0054	0,054	6,547	0,0048
0,101	6,096	0,0058	0,081	6,820	0,0041	0,078	6,546	0,0043
0,131	6,086	0,0056	0,119	6,818	0,0033	0,112	6,546	0,0026
0,172	6,079	0,0026	0,153	6,818	0,0034	0,147	6,542	0,0034
0,214	6,072	0,0059	0,193	6,809	0,0047	0,185	6,535	0,0043
0,249	6,074	0,0061	0,238	6,805	0,0034	0,226	6,534	0,0046
0,288	6,084	0,0048	0,271	6,801	0,0038	0,260	6,532	0,0036
0,328	6,085	0,0077	0,304	6,799	0,0023	0,286	6,525	0,0029
0,357	6,086	0,0076	0,348	6,789	0,0046	0,318	6,519	0,0028
0,384	6,083	0,0056	0,390	6,804	0,0048	0,356	6,522	0,0034
0,415	6,069	0,0052	0,428	6,809	0,0030	0,388	6,532	0,0036
0,449	6,091	0,0068	0,464	6,814	0,0043	0,426	6,535	0,0030
0,480	6,098	0,0063	0,490	6,823	0,0057	0,463	6,539	0,0039
0,501	6,100	0,0041	0,511	6,822	0,0040	0,491	6,547	0,0034
0,534	6,101	0,0106	0,544	6,837	0,0055	0,517	6,553	0,0040
0,564	6,111	0,0048	0,569	6,839	0,0037	0,548	6,561	0,0039
0,604	6,117	0,0029	0,600	6,841	0,0029	0,576	6,568	0,0024
0,636	6,107	0,0056	0,636	6,841	0,0040	0,608	6,565	0,0034
0,680	6,094	0,0053	0,670	6,825	0,0033	0,641	6,565	0,0044
0,712	6,085	0,0049	0,692	6,824	0,0045	0,675	6,555	0,0038
0,753	6,081	0,0071	0,719	6,820	0,0049	0,698	6,550	0,0039
0,792	6,064	0,0058	0,751	6,807	0,0057	0,729	6,539	0,0047
0,822	6,076	0,0060	0,791	6,802	0,0035	0,764	6,532	0,0032
0,858	6,079	0,0044	0,825	6,793	0,0044	0,811	6,524	0,0031
0,893	6,091	0,0047	0,856	6,808	0,0050	0,844	6,531	0,0034
0,917	6,095	0,0052	0,896	6,811	0,0052	0,877	6,535	0,0030
0,936	6,089	0,0049	0,934	6,821	0,0029	0,914	6,545	0,0037
0,973	6,087	0,0048	0,980	6,820	0,0039	0,946	6,546	0,0032
—	—	—	—	—	—	0,985	6,549	0,0049

этой же фазе появляются и фотометрические аномалии [19, 35]. Интерпретация спектральных аномалий как результата поглощения газовым потоком приводит к выводу, что в фазе 0,63 наблюдатель смотрит вдоль газового потока [36], где поглощение максимально. Наиболее вероятным источником такого потока является истечение вещества в окрестности внутренней точки Лагранжа. Плотность потока, согласно [36], составляет $\sim 10^{10}$ см⁻³, что приблизительно в 4 раза больше плотности окружающего звездного ветра. Характерная геометрическая толщина потока вблизи его начала составляет $\sim 0,1R_v$ где R_v — радиус оптической звезды.

Таким образом, спектроскопические наблюдения свидетельствуют о том, что главный минимум в фазе $\varphi=0,63$ возникает в результате затмения оптической звезды газовым потоком, а не вследствие эффекта эллипсоидальности оптической звезды. Ниже показано, что этот вывод подтверждается и фотометрическими наблюдениями.

Долгопериодические колебания блеска

Авторы [17], анализируя блеск HD 153919 в главном минимуме, заподозрили существование колебаний с периодом 32^d,4. Используя более полные данные и анализируя

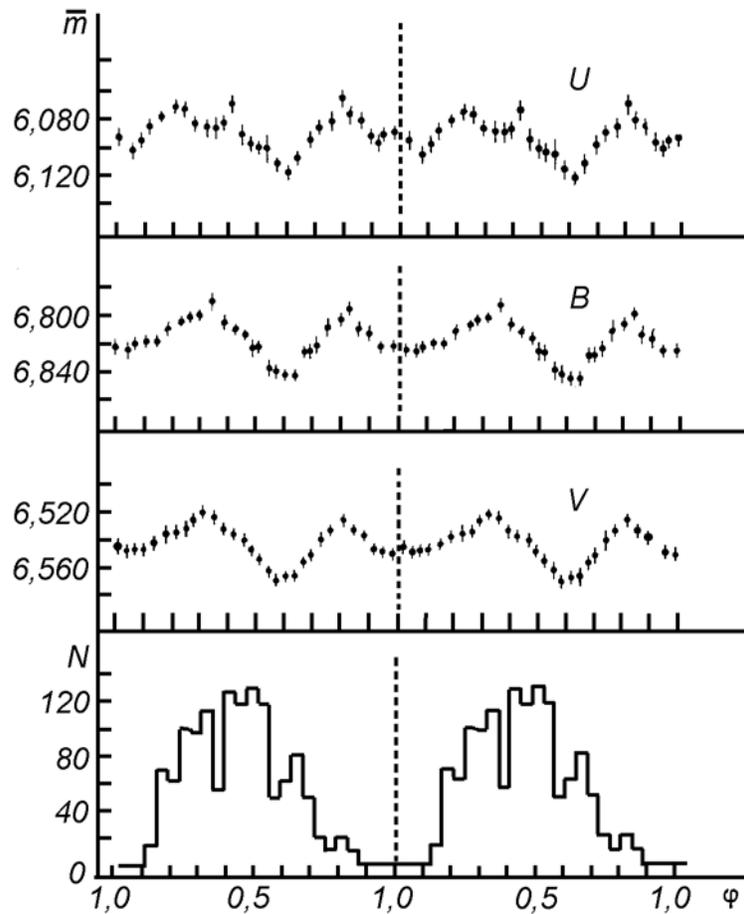


Рис. 2. Средние UBV -кривые блеска HD 153919. Внизу приведена кривая блеска в рентгеновском диапазоне [29]. N — число отсчетов рентгеновского телескопа за 63 с.

отклонения отдельных точек от средних кривых блеска $\Delta m = m' - m_{\text{сред}}$ интервале фаз $\varphi = 0,4 - 0,8$, мы установили реальность этих долгопериодических колебаний.

Для анализа отклонений использовался метод Юркевича, применение которого в нашем случае правомерно, поскольку анализируемые наблюдения охватывают длительный промежуток времени (~ 8 лет), намного превосходящий значение искомого периода. На рис. 3, *a* показано распределение по времени отклонений отдельных наблюдений в интервале фаз $\varphi = 0,4 - 0,8$ от средней кривой блеска в фильтре V в 1973 г. (J.D. 2441700–2442000). На эту эпоху приходится около половины всех имеющихся у нас наблюдений в фильтрах U, B, V , и так как они распределены достаточно равномерно, можно непосредственно видеть регулярные колебания с периодом около 30 дней. Периодограммы, построенные по этому ряду наблюдений методом Юркевича, показывают наличие колебаний в фильтре V с периодом $P_1 = 32^{\text{d}},46 \pm 0^{\text{d}},03$. По всей совокупности данных в полосе V значение периода $P_1 = 32^{\text{d}},55 \pm 0^{\text{d}},05$. В фильтрах B, U поиск периода по всей совокупности данных дал значения $32^{\text{d}},4 \pm 0^{\text{d}},1$ и $32^{\text{d}},46 \pm 0^{\text{d}},04$. Для проверки стабильности долгопериодических колебаний по фазе и амплитуде в фильтре U , где эффект долгопериодических изменений блеска максимален (рис. 3, *б*), построена зависимость отклонений Δm_U в фазах орбитального периода $\varphi = 0,4 - 0,8$ от фазы ψ периода $P_1 = 32^{\text{d}},46$ для трех эпох: J.D. 2441700–2442000, J.D. 2442100–2442700, J.D. 2444300–2444400. Как видно из рис. 3, *б*, обнаруженные колебания — явление не эпизодическое, их форма и амплитуда сохраняются на протяжении почти 100 периодов. Некоторый разброс точек на кривой Δm_U , по-видимому, связан с иррегулярной физической переменностью системы.

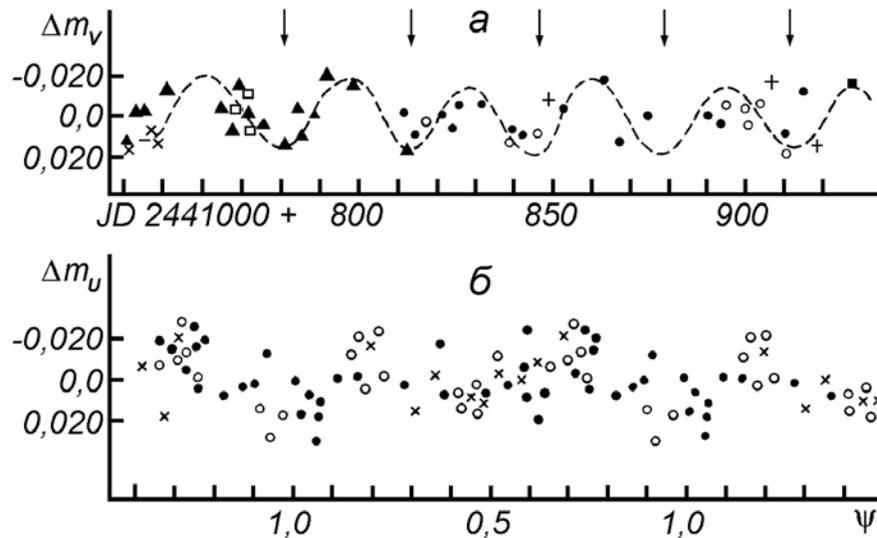


Рис. 3. *а* — отклонения средних за ночь наблюдений НВ 153919 в фильтре *V* от средней кривой блеска $\Delta m_V = m' - m_{\text{сред}}$ в фазах орбитального периода $\varphi = 0,4 - 0,8$ в эпоху J.D. 2441700–2442000. Стрелками показаны моменты минимумов, предсказанные с элементами (2); *б* — кривая отклонений Δm_U , построенная с элементами (2), как функция фазы периода $32^{\text{д}},46$ для трех эпох. Точками отмечены наблюдения для эпохи J.D. 2441700–2442000, кружками — J.D. 2442100–2442700, крестами - J.D. 2444300–2444400

На рис. 4 приведены отклонения ($m' - m_{\text{сред}}$) от средних кривых для фильтров *U*, *B*, *V* как функция фазы ψ периода $P_1 = 32^{\text{д}},46$. Моменты минимума вычислялись по формуле

$$T_{\text{min}} = \text{J.D. } 2441455,96 + 32^{\text{д}},46 \cdot E. \quad (2)$$

Кривые отклонений (рис. 4) имеют вид двойной волны, максимумы которой приблизительно одинаковы по величине, а минимумы различаются в 2–4 раза. В фильтре *U* амплитуда долгопериодических колебаний максимальна и достигает $0^{\text{м}},03$, в полосах *B*, *V* амплитуда составляет $\sim 0^{\text{м}},02$.

По аналогии с системами HZ Her [11, 12] и SS 433 [8–10] можно предположить, что долгопериодическая переменность с периодом $32^{\text{д}},46$ отражает изменения ориентации аккреционной структуры и газовых потоков в окрестности компактного объекта, которые могут быть связаны с прецессией оси вращения оптической звезды [11, 12, 37]. Строго говоря, изменение ориентации аккреционной структуры нельзя называть прецессией, поскольку эта структура лишь «отслеживает» изменение интенсивности и направления газовых потоков в системе, обусловленное изменением направления оси вращения прецессирующей оптической звезды. Тем не менее для удобства дальнейшего изложения мы будем называть обнаруженные нами эффекты долгопериодической переменности и период $P_1 = 32^{\text{д}},46$ прецессионными. Изменения ориентации аккреционной структуры и газовых потоков вызывают изменение условий затмения ими оптической звезды, что и приводит к периодическому отклонению кривых блеска HD 153919 от средней кривой.

На рис. 5 приведены кривые блеска HD 153919 в различных фазах ψ прецессионного периода $P_1 = 32^{\text{д}},46$: $\psi_1 = 0,9 - 1,1$, $\psi_2 = 0,1 - 0,3$, $\psi_3 = 0,3 - 0,5$, $\psi_4 = 0,5 - 0,7$, $\psi_5 = 0,7 - 0,9$. Как видно из рис. 5, кривые блеска в интервале фаз орбитального периода $\varphi = 0,5 - 0,8$ подвержены значительным изменениям с периодом $32^{\text{д}},46$. Заметим, что в этом диапазоне орбитальных фаз наблюдаются пульсации в рентгеновском и оптическом диапазоне с характерным временем ~ 100 мин [23, 25, 26]. Если считать, что минимум на фазе

$\varphi=0,63$ связан с эллипсоидальностью оптической компоненты, то амплитуда переменности не согласуется с длительностью рентгеновского затмения [13, 14]. Поэтому можно заключить, что минимум блеска на фазах $\varphi=0,5-0,8$ связан с затмением оптической звезды газовым потоком, истекающим из внутренней точки Лагранжа. С другой стороны, форма и амплитуда кривых блеска в участках фаз орбитального периода $\varphi=0,3-0,5$ практически не зависят от фазы ψ прецессионного периода. Поэтому можно пред-

Таблица 4

Кривая эллипсоидальной переменности HD 153919 в фильтрах V, B

Фильтр V				Фильтр B			
φ	m_V	σ	N	φ	m_B	σ	N
0,066	6 ^m ,540	0 ^m ,0009	5	0,034	6 ^m ,811	0,0026	7
0,099	6,536	0,0034	5	0,069	6,814	0,0040	5
0,120	6,533	0,0019	8	0,100	6,808	0,0040	7
0,146	6,532	0,0036	6	0,136	6,807	0,0053	7
0,166	6,523	0,0031	8	0,159	6,803	0,0044	7
0,188	6,520	0,0038	8	0,191	6,793	0,0021	7
0,326	6,516	0,0023	8	0,311	6,794	0,0085	10
0,353	6,524	0,0035	8	0,363	6,801	6,0039	6
0,375	6,528	0,0015	8	0,389	6,805	0,0028	6
0,399	6,536	0,0030	8	0,412	6,805	0,0036	6
0,427	6,537	0,0032	9	0,438	6,813	0,0046	7
0,462	6,542	0,0031	9	0,467	6,812	0,0042	6

Примечание. N — число средних за ночь наблюдений, осредненных в данной точке.

полагать, что изменения блеска на фазах $\varphi=0,3-0,5$, особенно для фаз прецессионного периода $\psi_2-\psi_4$, связаны с «чистым» эффектом эллипсоидальности оптической звезды. Далее будет показано, что при такой интерпретации кривых блеска амплитуда «чисто» эллипсоидальной переменности находится в хорошем согласии с длительностью рентгеновского затмения. Дополнительным аргументом в пользу чисто эллипсоидального характера изменения блеска в области фаз $\varphi=0,3-0,5$ служит совпадение перегиба кривой блеска в фазе $\varphi=0,5$ с моментом перехода кривой лучевых скоростей оптической звезды через γ -скорость. Вблизи фазы $\varphi=0,0$ в моменты ψ_1 и ψ_5 наблюдается резко асимметричный минимум, который до фазы $\varphi=0,98$ может быть объяснен эффектом эллипсоидальности. В моменты $\psi_2-\psi_4$ вторичный минимум становится симметричным, однако центр симметрии смещается в диапазон фаз $\varphi=0,05-0,08$, что может быть связано с наличием вокруг компактного объекта светящейся в оптическом диапазоне аккреционной структуры (оптическая светимость $\sim 10^{35}$ эрг/с) и затмением ее газовыми потоками и оптической звездой.

Таким образом, результаты фотометрических наблюдений согласуются с данными спектроскопических и рентгеновских наблюдений, свидетельствующих о наличии затмения оптической звезды газовыми потоками и аккреционной структурой на фазе $\varphi=0,63$.

Эллипсоидальная кривая блеска

Используя данные, относящиеся к различным фазам ψ прецессионного периода, можно построить кривую блеска системы HD 153919, свободную от влияния эффектов затмения. Для построения эллипсоидальной кривой блеска в фазах $\varphi=0,3-0,5$ использовались те наблюдения, которые соответствуют фазам прецессионного периода $\psi_2-\psi_4$.

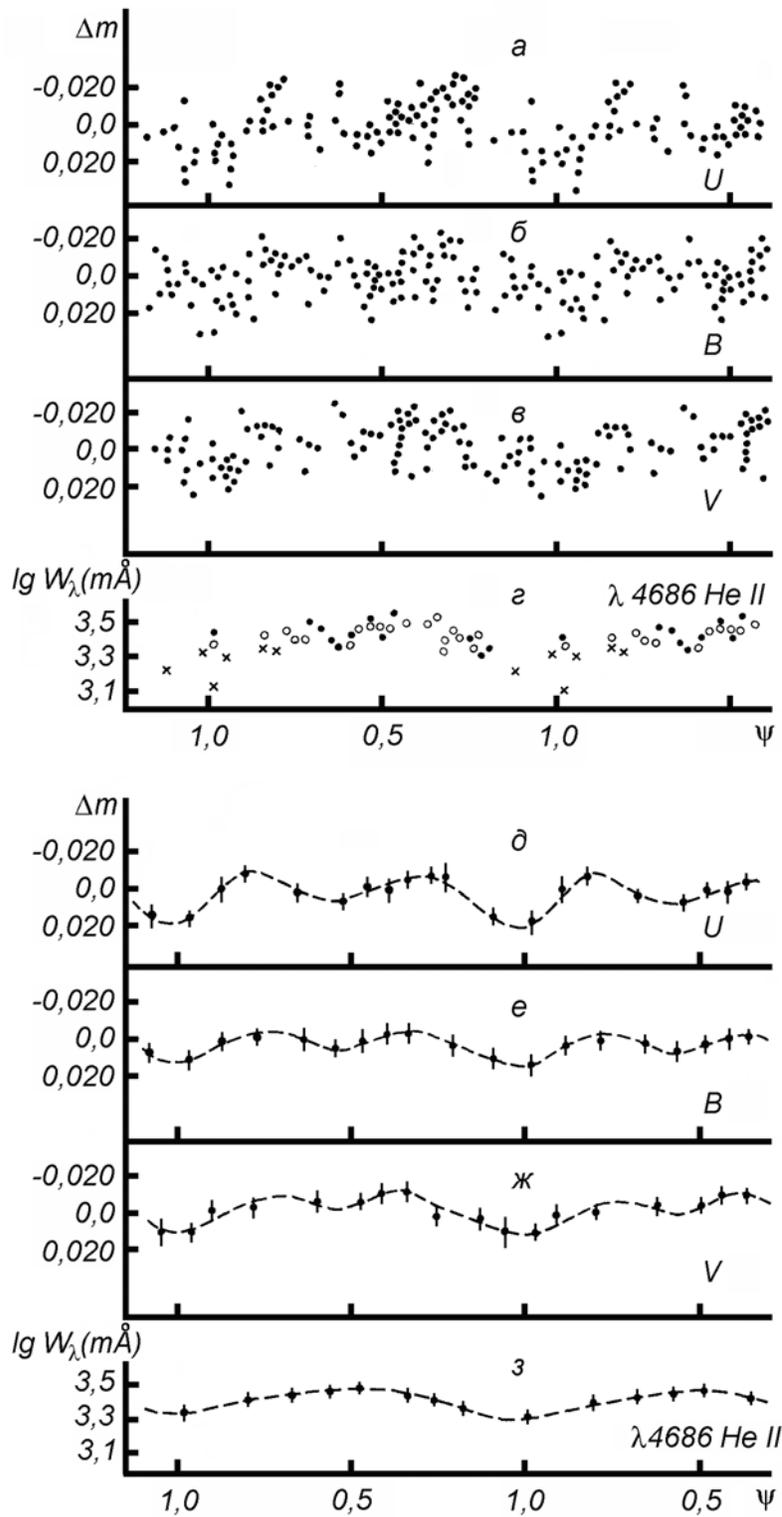


Рис. 4. *а, б, в* — кривые отклонений в фильтрах *U, B, V* средних за ночь наблюдений HD 153919 в фазах орбитального периода $\varphi=0,4-0,8$ от средних кривых блеска $\Delta m = m' - m_{\text{сред}}$, построенные с элементами (2); *д, е, ж* — усредненные кривые отклонений; *г* — зависимость эквивалентной ширины эмиссионной линии He II $\lambda 4686$ в системе HD 153919 от фазы прецессионного периода $P_1=32^{\text{д}}, 46$. Точками отмечены данные [34], крестами — [44], кружками — [32]; *з* — средняя кривая для $W_{\lambda 4686}(\psi)$. Эквивалентные ширины приведены в логарифмической шкале

1234

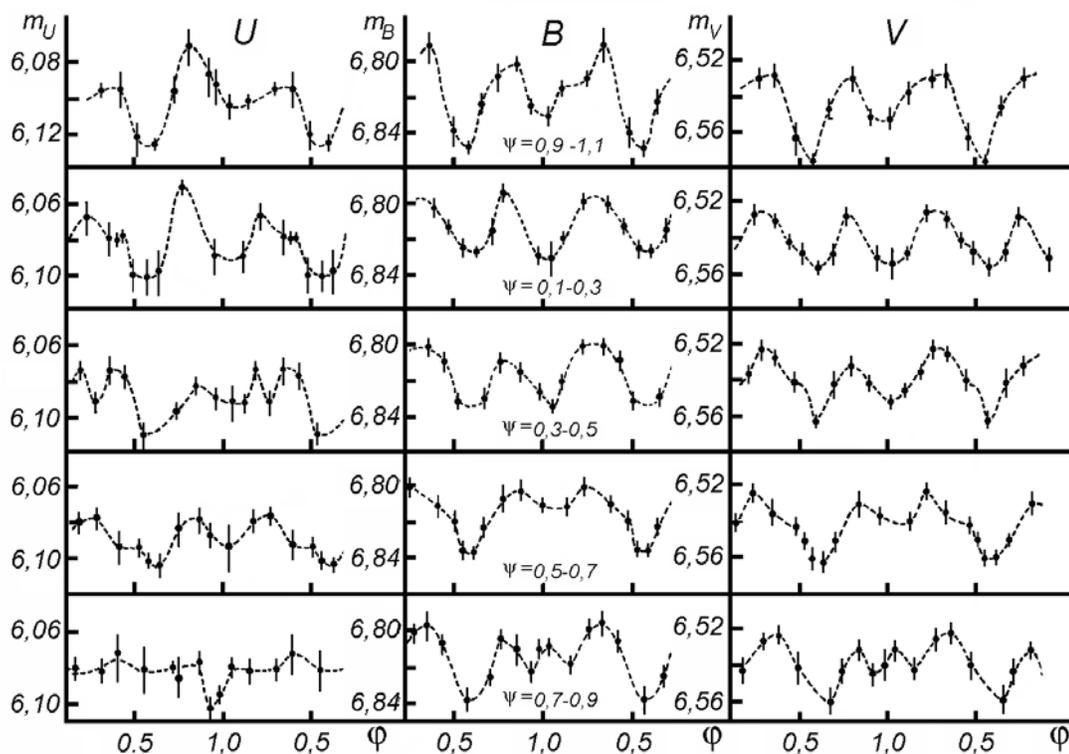


Рис. 5. *UBV*-кривые блеска HD 153919, вычисленные с периодом $P=3^{\text{d}},4118$ в разных фазах ψ прецессионного периода $P_1=32^{\text{d}},46$

Чтобы исключить возможное влияние газового потока, мы ограничились точками, у которых $\varphi=0,3-0,48$. В моменты ψ_1, ψ_5 использовались точки с фазами $\varphi=0,3-0,4$. Полученная таким образом эллипсоидальная кривая блеска отражалась относительно фазы $\varphi=0,5$. Аналогичным образом строилась эллипсоидальная кривая блеска для вторичного минимума, где предпочтение отдавалось наблюдениям с фазами $\varphi=0,8-0,98$ в моменты прецессионного периода ψ_1 и ψ_5 . В табл. 4 даны средние значения звездных величин для эллипсоидальной кривой блеска HD 153919 до $\varphi=0,5$. Сглаженные эллипсоидальные кривые блеска системы, освобожденные от влияния затмения, приведены на рис. 6. В фазах орбитального периода $\varphi=0,25$ и $0,75$ пунктиром обозначена эллипсоидальная кривая блеска HD 153919 с максимально возможной амплитудой. Наблюдения в фильтре *U* не использовались для построения эллипсоидальной кривой блеска, поскольку здесь средние кривые наиболее сильно отягощены эффектами затмения и поглощения в «прецессирующих» газовых потоках. Как видно из рис. 6, построенная нами эллипсоидальная кривая блеска системы HD 153919 и положение середины рентгеновского затмения находится в хорошем соответствии с кривой лучевых скоростей. Глубины главного и вторичного минимумов эллипсоидальной кривой блеска в пределах ошибок совпадают и составляют $\Delta V=0^{\text{m}},028\pm 0^{\text{m}},004$, $\Delta B=0^{\text{m}},026\pm 0^{\text{m}},005$ для минимума в фазе $\varphi=0,5$ и $\Delta V=0^{\text{m}},026\pm 0^{\text{m}},004$, $\Delta B=0^{\text{m}},025\pm 0^{\text{m}},005$ для минимума в фазе $\varphi=0,0$. Таким образом, лишь половина амплитуды оптической переменности HD 153919 связана с эффектом эллипсоидальности, глубины затмений в фазах $\varphi=0,5-0,8$ и $\varphi=0,0-0,3$ достигают $0^{\text{m}},04$ и $0^{\text{m}},02$ соответственно (см. рис. 6). Поэтому система HD 153919 может считаться затменной переменной в оптическом диапазоне. Фазы орбитального периода, на которые приходятся максимальные глубины затмений в обоих минимумах, различаются на полпериода. При увеличении глубины затмения в фазе $\varphi=0,63$ глубина затмения в фазе $\varphi=0,1$ уменьшается (см. рис. 5).

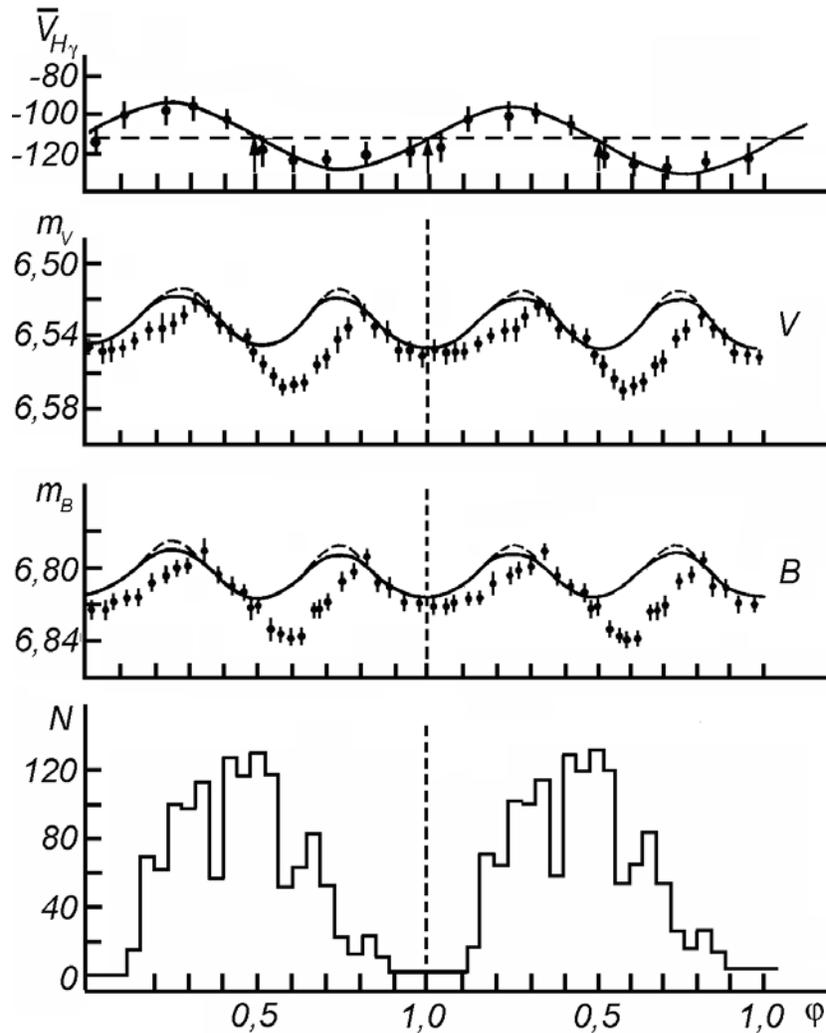


Рис. 6. Средние B , V -кривые блеска HD 153919 (точки) и восстановленные нами кривые эллипсоидальной переменности (сплошные линии). Пунктиром отмечена максимальная амплитуда эллипсоидальной переменности. Вверху приведена кривая лучевых скоростей по линии поглощения $H\gamma$ [34, 44–47], внизу — схема рентгеновского затмения. Минимум эллипсоидальной кривой блеска совпадает с переходом лучевых скоростей через γ -скорость и серединой рентгеновского затмения. Оптическое затмение в фазе $\Phi = 0,63$ совпадает с локальным минимумом рентгеновского излучения в этой фазе

Оценка массы компактного объекта и физические характеристики системы

Построенная нами кривая эллипсоидальной переменности HD 153919 (табл. 4, рис. 6) может быть использована для оценки параметров орбиты двойной системы. Для определения наклона орбиты i и отношения масс компонент системы $q = M_x/M_v$, необходимо знать длительность рентгеновского затмения. В [29] приведена сводка значений длительности рентгеновских затмений в системе HD 153919 = 4U 1700-37 по данным спутников «Ухуру» и «Коперник» в 1973, 1974, 1975, 1976 гг., из которой видно, что длительность затмения меняется в пределах от 0,61 до 1,10 сут, а амплитуда интенсивности рентгеновского излучения системы при уменьшении длительности рентгеновского затмения увеличивается в 1,5–2 раза [38]. Интересно было бы изучить зависимость длительности рентгеновского затмения и внезатменного значения рентгеновского потока системы от фазы прецессионного периода $32^d,46$. Имеющихся данных пока недостаточно для определенного заключения по этому вопросу.

Таблица 5

Параметры орбиты двойной рентгеновской системы HD 153919=4U 700-37 при различных значениях массы оптической звезды M_v и степени заполнения полости Роша μ , при $u = 0,4$, $\beta=0,25$ для наиболее вероятной ($A=0^m,02$) и максимальной ($A=0^m,035$) амплитуды эллипсоидальной переменности

M_v/M_\odot	$A = 0^m,027$				$A = 0^m,035$		
	μ						
	0,98	0,95	0,93	0,90	1,0	0,98	0,97
20	–	–	$i = 74^\circ \pm 2$ $q = 0,054$ $\pm 0,008$	$i = 83^\circ \pm 7$ $q = 0,055$ $\pm 0,009$	–	–	$i = 65^\circ \pm 1$ $q = 0,050$ $\pm 0,004$
25	–	–	$i = 76 \pm 4$ $q = 0,050$ $\pm 0,006$	$i = 84 \pm 6$ $q = 0,052$ $\pm 0,006$	–	–	$i = 65 \pm 3$ $q = 0,049$ $\pm 0,006$
30	–	–	$i = 78 \pm 6$ $q = 0,048$ $\pm 0,008$	$i = 87 \pm 3$ $q = 0,050$ $\pm 0,006$	–	–	$i = 67 \pm 4$ $q = 0,046$ $\pm 0,008$
40	–	$i = 68 \pm 2$ $q = 0,043$ $\pm 0,004$	$i = 81 \pm 9$ $q = 0,045$ $\pm 0,004$	–	–	$i = 65 \pm 4$ $q = 0,037$ $\pm 0,009$	$i = 67 \pm 5$ $q = 0,041$ $\pm 0,006$
50	–	$i = 70 \pm 4$ $q = 0,043$ $\pm 0,004$	$i = 79 \pm 3$ $q = 0,042$ $\pm 0,004$	–	–	$i = 64 \pm 4$ $q = 0,037$ $\pm 0,006$	$i = 67 \pm 4$ $q = 0,038$ $\pm 0,006$

Таблица 6

Характеристики рентгеновских двойных систем, у которых обнаружены прецессионные явления

Система	$P_{\text{прец}}$	$P_{\text{орб}}$	$P_{\text{пульс}}$	M_v	M_x	e	Ссылка
NZ Her	34 ^d ,85	1 ^d ,7	1,24 с	$\sim 2M_\odot$	$\sim M_\odot$	0,01	[11, 12]
SS 433	165,5	13,1	—	$\sim 20M_\odot$	$(0,3-5)M_\odot$	~ 0	[8-10]
Cyg X-1	39,0 (78,4)	5,6	—	$\sim 20M_\odot$	$\sim 10M_\odot$	~ 0	[48, 49]
HD 153919	32,46	3,4	97 мин	$\sim 25M_\odot$	$\sim 1M_\odot$	—	Настоящая работа, [23, 25, 26]
HD 77581	93,3	8,96	283 с	$\sim 20M_\odot$	$\sim 1,7M_\odot$	0,12	[23, 50]

Считая, что поглощение в газовых потоках может лишь увеличить длительность рентгеновского затмения, мы использовали для оценки параметров системы минимальное значение относительной длительности [29] $\Delta T/P = 0,18 \pm 0,02$. Из функции масс системы $f(m) = (0,033 \pm 0,007)M_\odot$ [39] следует, что при $i = 50-90^\circ$ $q = 0,03-0,06$. Средняя амплитуда эллипсоидальной переменности составляет $0^m,027-0^m,035$. Взяв амплитуду эллипсоидальной переменности $A = 0^m,027$ и используя результаты расчетов эллипсоидальной переменности [40, 41] при значении коэффициента потемнения к краю $u = 0,4$ и параметра гравитационного потемнения $\beta = 0,25$, мы оценили характеристики системы HD 153919. Оказалось, что для типичного значения массы звезды O $6f$ $M_v = 25M_\odot$, $\mu = 0,93 \pm 0,03$, $i = 76^\circ \pm 14_4$, $q = 0,051 \pm 0,008$, $M_x = (1,28 \pm 0,30)M_\odot$.

Для других значений масс оптической звезды характеристики системы приведены в табл. 5. В случае амплитуды $A = 0^m,035$ характеристики системы следующие: $\mu = 0,97 \pm 0,02$, $i = 65^\circ \pm 3$, $q = 0,049 \pm 0,008$, $M_x = (1,22 \pm 0,30)M_\odot$ для $M_v = 25M_\odot$ (см. табл. 5).

Дальнейшее увеличение амплитуды A ограничивается наблюдательными фотометрическими данными (см. рис. 6).

Следует подчеркнуть (см. табл. 5), что во всех случаях степень заполнения полости Роша оптической звездой $\mu < 1$, что согласуется с современными представлениями о природе рентгеновских двойных систем и их эволюции [42, 43].

Полученные оценки физических параметров системы требуют уточнения, поскольку из-за прецессии оси вращения оптической звезды ее фигура может отличаться от эквипотенциали в модели Роша, и использование результатов расчетов [40, 41] возмож-

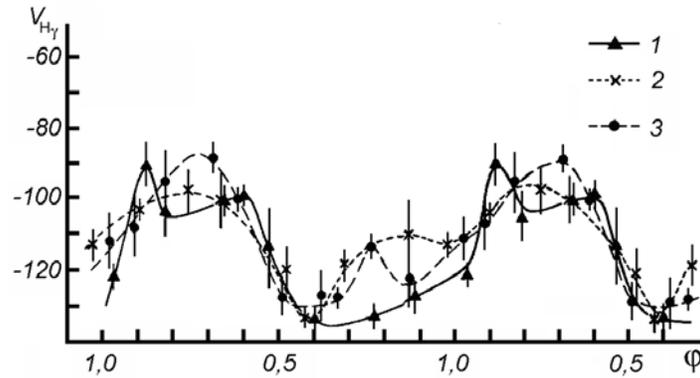


Рис. 7. Кривые лучевых скоростей HD 153919 по линии поглощения $H\gamma$ в разных фазах ψ прецессионного периода $P_1=32^d,46$.
1 — $\psi = 0,15-0,50$; 2 — $\psi = 0,5-0,9$; 3 — $\psi = 0,9-1,15$

но лишь в первом приближении. Тем не менее, поскольку нам впервые удалось согласовать амплитуду эллипсоидальной переменности с длительностью рентгеновского затмения, приведенные выше значения параметров системы могут быть использованы для построения модели двойной системы HD 153919, состоящей из эллипсоидальной оптической звезды, не полностью заполняющей свою полость Роша, и аккрецирующей нейтронной звезды с массой порядка солнечной.

Долгопериодические колебания в спектральных линиях

В случае, если ось вращения оптической звезды прецессирует относительно полного вектора момента количества движения системы, можно ожидать периодической переменности доплеровских ширин линий в ее спектре. Влияние эффектов потемнения к краю и гравитационного потемнения, а также несимметрия формы звезды в двойной системе при почти полном заполнении полости Роша может приводить также к периодическому, с периодом, равным периоду прецессии, изменению эквивалентных ширин линий и формы и амплитуды кривых лучевых скоростей оптической звезды.

Так как данные об эквивалентных ширинах линий системы немногочисленны, для анализа их переменности была выбрана эмиссионная линия He II $\lambda 4686$, эквивалентная ширина которой слабо зависит от фазы орбитального периода [31, 32].

На рис. 4, z приведена зависимость эквивалентной ширины эмиссионной линии He II $\lambda 4686$ по данным работ [32, 34, 44] от фазы прецессионного периода $P_1=32^d,46$ для системы HD 153919. Видна хорошая корреляция эквивалентных ширин с фазой прецессионного периода, причем в моменты максимальной глубины главного минимума эквивалентная ширина линии уменьшается. Формы кривых лучевых скоростей по эмиссии He II $\lambda 4686$ и по абсорбционным линиям подобны, поэтому можно считать, что эмиссионная линия He II $\lambda 4686$ формируется в атмосфере оптической звезды. Следовательно, зависимость эквивалентной ширины эмиссии He II $\lambda 4686$ от фазы периода

прецессии $32^d,46$ может служить указанием на то, что прецессирует оптическая звезда. Дополнительные указания на наличие прецессии оси вращения оптической звезды дают долгопериодические изменения амплитуды и формы кривых лучевых скоростей. Конти и Каули [34] отмечали, что для абсорбционных линий C IV $\lambda\lambda 5801, 5812$ существуют систематические различия кривых лучевых скоростей от эпохи к эпохе с характерным временем порядка месяца. Подобный же эффект для других линий наблюдал Хатчингс [33]. В качестве примера на рис. 7 приведена кривая лучевых скоростей для линии поглощения H γ по данным [34, 44–47] в разные фазы прецессионного периода $32^d,46$ для системы HD 153919.

Таким образом, и фотометрические, и спектроскопические данные свидетельствуют о наличии прецессионных явлений в системе HD 153919, причем спектроскопические данные дают дополнительные указания на то, что прецессирует оптическая звезда.

Заключение

Долгопериодические изменения блеска HD 153919 с периодом $32^d,46$ очень похожи на 35-дневную и 165-дневную переменность блеска систем HZ Her и SS 433, для которых имеется много указаний на наличие прецессионных явлений в системе. Подобные долгопериодические изменения формы кривой блеска и поляризации заподозрены также в системе Cyg X-1 [48, 49] и обнаружены в системе HD 77581 = 4U 0900-40 [50]. В табл. 6 собраны все доступные данные о долгопериодической переменности оптических кривых блеска рентгеновских двойных систем.

Можно полагать, что долгопериодическая переменность рентгеновских двойных систем отражает последствия взрыва сверхновой в двойной системе. Ранее [51] высказывались соображения о том, что прецессионные явления в системе 88 433 связаны с прецессией оси вращения оптической звезды [37] и отмечалось, что некомпланарность оси вращения оптической звезды и плоскости орбиты системы может быть связана с ударом неоднородной оболочки сверхновой о поверхность оптической звезды. Другой возможной причиной такой некомпланарности может быть слабая анизотропия взрыва сверхновой, которая может привести к повороту орбитальной плоскости системы относительно оси вращения оптической звезды. Грубые оценки показывают, что анизотропия взрыва $\sim 1\%$ достаточна, чтобы повернуть плоскость орбиты двойной системы на угол в десятки градусов. Взрыв сверхновой в двойной системе, когда взрывается компонента меньшей массы, не приводит к распаду системы, однако при этом появляется значительный эксцентриситет орбиты [52]. Оценки характерных времен округления орбиты и выравнивания асинхронности вращения оптической звезды требуют знания внутреннего строения звезды и вязкости звездного вещества. В работе [53] показано, что выравнивание асинхронности вращения звезды в двойной системе должно происходить раньше, чем произойдет округление орбиты. Конкретные количественные оценки времен выравнивания возмущений, внесенных в двойную систему в результате взрыва сверхновой, представляют отдельную большую проблему, исследование которой начало развиваться в последние годы [54, 55]. Наконец, не исключено, что некомпланарность оси вращения оптической звезды к плоскости орбиты могла возникнуть при образовании двойной системы.

Авторы выражают благодарность Н. Г. Бочкареву, А. И. Захарову, А. В. Тутукову и Х. Ф. Халиуллину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лютый В. М., Сюняев Р. А., Черепашук А. М. Астрон. ж., 1973, **50**, 3.
2. Cherepashchuk A. M., Efremov Yu. N., Kurochkin N. E., Shakura N. I., Sanyaeв R. A. Inform. Bull. Var. Stars, 1972, № 720.
3. Bahcall J. N., Bahcall N. A. Astrophys. J. (Lett.), 1972, **178**, L1.

4. *Балог Н. И., Гончарский А. В., Черепашук А. М.* Астрон. ж., 1981, 58, 67.
5. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Astron. and Astrophys., 1973, 24, 337.
6. *Pringle J. E., Rees M. J.* Astron. and Astrophys., 1972, 21, 1.
7. *Novikov I. D., Thorne K. S.* In: Black Holes / Eds Witt C. De, Witt B. De N. Y.: Gordon and Breach, 1973.
8. *Cherepashchuk A. M.* Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1981, 194, 761.
9. *Гладышев С. А., Горанский В. П., Курочкин Н. Е., Черепашук А. М.* Астрон. циркуляр, 1980, № 1145, 1146.
10. *Бочкарев Н. Г., Карицкая Е. А., Курочкин Н. Е., Черепашук А. М.* Астрон. циркуляр, 1980, № 1147.
11. *Petterson J. A.* Astrophys. J. (Lett). 1975, 201, L61.
12. *Gerend D., Boynton P.* Astrophys. J., 1976, 209, 562.
13. *Bahcall J. N.* Lecture of the Enrico Fermi Summer School on Phys. and Astrophys. Of Neutron Stars and Black Holes. Varenna, Italy, 1975.
14. *Avni Y., Bahcall J. N.* Astrophys. J. (Lett.), 1975, 202, L 131.
15. *Paradijs J.A., Hammerschlag-Hensberg G., Zuiderwijk E. I.* Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 1978, 31, 189.
16. *Penny A.J., Olowin R.P., Penford J. E., Warren P. R.* Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1973, 163, P 7.
17. *De Freitas Pachero J. A., Steiner J. E., Quasi G.R.* Astron. and Astrophys., 1974, 33, 131.
18. *Hammerschlag-Hensberg G., Zuiderwijk E. J.* Astron. and Astrophys., 1977, 54, 543.
19. *Genderen A. M.* Astron. and Astrophys., 1977, 54, 683.
20. *Feinstein A., Forte f. C.* Publ. Astron. Soc. Pasif., 1974, 86, 284.
21. *Bolton C. T., Herbst W.* Astron. J., 1976, 81, 339.
22. *Jones C., Liller W.* Astrophys. J., 1973, 184, L 65.
23. *Черепашук А. М.* Астрон. ж., 1982, 59 (в печати).
24. *Walraven J. H., Tinbergen J., Walraven Th.* Bull. Astron. Inst. Neth., 1964, 17, 520.
25. *Kruszewski A.* Commis. 27 IAU Inform. Bull. Var. Stars, 1978, № 1424.
26. *Kruszewski A., Surdej J., Zaiewski I., Semeniuk I.* Acta Astron., 1979, 29, 481.
27. *Халиуллина А. И., Халиуллин Х. Ф.* Астрон. ж., 1981, 58, 1043.
28. *Jurkewich I.* Astrophys. Space Sci., 1971, 13, 154.
29. *Branduardi G., Mason K. O., Sanford P.* Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1978, 185, 137.
30. *Genderen A. M., Uiterwaal G. M.* Astron. and Astrophys., 1976, 52, 139.
31. *Dachs J.* Astron. and Astrophys., 1976, 47, 19.
32. *Dachs J., Schober H.* Astron. and Astrophys., 1974, 33, 49.
33. *Hutchings J.B., Thackeray A.D., Webster B.L., Andrews P.J.* Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1973, 163, P13.
34. *Conti P. S., Cowley A. P.* Astrophys. J., 1975, 200, 133.
35. *Moffat A. F. J., Dachs I.* Astron. and Astrophys., 1977, 58, 5.
36. *Fahiman G. G., Walker G. A. H.* Astrophys. J., 1980, 240, 169.
37. *Van den Heuvel E.P.J., Ostriker J.P., Petterson J.* Astron. and Astrophys., 1980, 81, L7.
38. *Mason K. O., Branduardi G., Sanford P.* Astrophys. J., 1976, 203, L 29.
39. *Асланов А. А., Черепашук А. М.* Астрон. ж., 1982, 59 (в печати).
40. *Бочкарев Н. Г., Карицкая Е. А., Шакура Н. И.* Астрон. ж., 1979, 56, 16.
41. *Бочкарев Н. Г., Карицкая Е. А.* Астрон. ж., (в печати).
42. *Massevitch A. G., Tutukov A. V., Jungelson L. R.* Astrophys. Space Sci., 1976, 40, 115.
43. *Van den Heuvel E. P. J.* IAU Symp. Structure and Evolution of Close Binary Systems. Dordrecht: Reidel Co. 1976.
44. *Hutchings J. B.* Astrophys. J., 1974, 192, 677.
45. *Hensberge G., Van den Heuvel E.P.J., Paes de Barros M. N.* Astron. and Astrophys., 1973, 29, 69.
46. *Hammerschlag-Hensberge G., de Loore C., Van den Heuvel E.P.J.* Astron. and Astrophys. Suppl.Ser., 1978, 32, 375.
47. *Wolff S. C., Morrison N. D.* Astrophys. J., 1974, 187, 69.
48. *Карицкая Е. А.* Астрон. циркуляр, 1979, № 1088.
49. *Кетр J. C., Герман Л. С., Барбур М. С.* Astron. J., 1978, 83, 962.
50. *Хрузина Т. С., Черепашук А. М.* Астрон. ж., 1982, 59 (в печати).
51. *Черепашук А. М.* Письма в Астрон. ж., 1981, 7, 201.
52. *Тутуков А. В., Юнгельсон Л. Р.* Научные информ. Астросовета АН СССР, 1973, № 27, 70.
53. *Zahn J.* Ann. Astrophys., 1966, 29, 313.
54. *Lecar M., McKee C. F., Wheeler I. C.* Astrophys. J., 1976, 205, 556.
55. *Fryxell B. A., Arnett W. D.* Astrophys. J., 1981, 243, 994.

Гос. астрономический ин-т
им. П. К. Штернберга

Поступила в редакцию
5.VI.1981