

УДК 524.387

## МНОГОЦВЕТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ С РЕНТГЕНОВСКИМ ИСТОЧНИКОМ

© 2019 г. А. Н. Сазонов<sup>1,2, \*</sup>, И. Н. Анахина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

\*sazonovsacha51@mail.ru

Поступила в редакцию 31.03.2017 г.

После доработки 27.04.2018 г.

Принята к публикации 15.05.2018 г.

Представлены четырехцветные WBVR-фотоэлектрические наблюдения тесной двойной системы (ТДС) HZ Her=Her X-1 в 1986–1994 гг. Приводятся двухцветные диаграммы (W–B)–(B–V) и (B–V)–(V–R), которые дают возможность исследовать поведение аккреционного диска вблизи главных минимумов тесной системы Min I и Min II.

При построении кривых блеска во всех фильтрах от орбитальной фазы во всех фазах прецессионного периода массив наблюдений обрабатывался с учетом матрицы включений рентгеновского источника. Дается количественная и качественная интерпретация полученных результатов на основе модели прецессии аккреционного диска HZ в сторону орбитального движения системы (прямая прецессия). При интерпретации полученного наблюдательного материала, рассматривается одна из существующих моделей, в рамках которой, можно удовлетворительно объяснить неоднородности газового потока, “горячего пятна”, а также существование отдельных брызг, которые движутся по самостоятельным кеплеровским траекториям вокруг внешних частей АД HZ Her X-1.

Использование матрицы моментов включения рентгеновского излучения (РИ) HZ и разбиение всех рядов оптических наблюдений автора на конкретный цикл включения РИ от релятивистского объекта, дают более реалистичную картину поведения ТДС, а также для выявления тонких фотометрических эффектов, происходящих в ней в разных состояниях.

DOI: 10.1134/S0023420619020080

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Тесная двойная система HZ Her=Her X-1 имеет ряд уникальных фотометрических свойств, которые вызывают неослабевающий интерес исследователей всего мира. Одно из свойств такого рода — это связь излучения сгустков плазмы (“блотов”), образующихся в результате дискретного перетекания вещества с оптического компонента ТДС и разнообразного взаимодействия их с внешними слоями аккреционного диска нейтронной звезды.

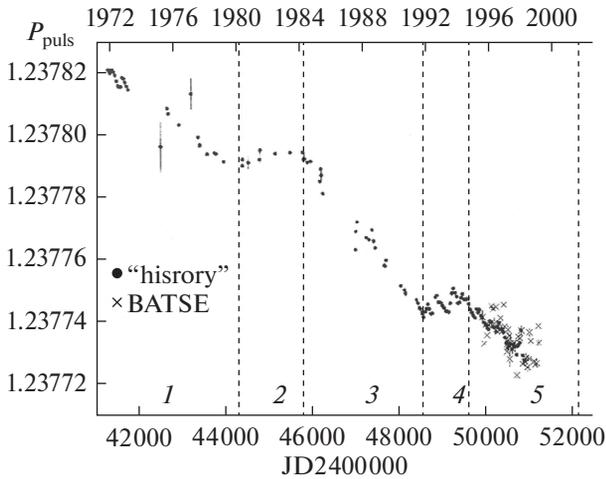
В системе наблюдаются периодические затмения оптической звездой рентгеновского источника, связанного с HZ. Главной причиной оптической переменности рентгеновской тесной двойной системы HZ Her=Her X-1 является “эффект отражения”, точнее, прогрева атмосферы оптической звезды, переработки мощного и жесткого рентгеновского излучения в фотосфере оптической звезды.

Существует квазипериод  $P_3 \cong 34^d, 875$ , который влияет на изменения интенсивности рентге-

новского излучения [1] и формы оптических кривых блеска ТДС [2–4].

Мощное рентгеновское излучение в системе наблюдается в течение  $\sim 11$  суток (состояние “on” — “включено”) после этого рентгеновский поток падает до ненаблюдаемого уровня и остается на нем в течение  $\sim 24$  суток (состояние “off” — “выключено”). Эффект отражения в ТДС HZ Her=Her X-1 не исчезает в любых состояниях 35-дневного прецессионного цикла.

Вся совокупность наблюдательных данных в разных спектральных диапазонах тесной системы HZ Her=Her X-1 подтверждает модель источника рентгеновского излучения с наклонным прецессирующим аккреционным диском вокруг вращающейся нейтронной звезды. Наклон тесной системы к лучу зрения земного наблюдателя, который составляет известную величину ( $i = 87^\circ - 89^\circ$ ) позволяет нам наблюдать тонкие затменные эффекты. Необходимо сразу отметить, что форму рентгеновской кривой блеска тесной системы модулируется 35-суточным прецессионным пе-



**Рис. 1.** График зависимости  $P$  от  $JD2400000$  ускорения или замедления нейтронной звезды в зависимости от аккреции вещества с оптического компонента ТДС с рентгеновским источником. Точки соответствуют всем наблюдениям пульсара от момента его открытия; крестики соответствуют наблюдениям орбитальной обсерватории BATSE; отчетливо просматривается пробел в наблюдениях этого объекта порядка 2-х лет.

риодом. В свою очередь эта форма состоит из главного включения рентгеновского излучения (РИ) средней продолжительностью  $\approx 7P_{\text{orb}}$  и вторичного включения РИ с меньшей интенсивностью, которое длится  $\approx 5P_{\text{orb}}$ .

Эти два физических состояния системы отделены друг от друга временными интервалами длительностью около 4-х орбитальных циклов, во время которых наблюдаемый рентгеновский поток от пульсара практически полностью исчезает.

По всей видимости, такие изменения могут свидетельствовать о затмении рентгеновского источника непрозрачным прецессирующим аккреционным диском НЗ.

В системе наблюдаются на определенных орбитальных фазах резкие уменьшения рентгеновского потока в определенные моменты 35-суточного цикла, так называемые рентгеновские дипы, которые в оптическом диапазоне проявляют себя определенными тонкими фотометрическими особенностями.

Для объяснения физических провалов (или депрессии), которые мы наблюдаем на оптической кривой блеск на орбитальных фазах  $\phi = \sim (0.58-0.68)$  МТДС с аккреционными дисками (АД) компактного объекта в тесной двойной системе с изменяемой геометрией в пространстве и прецессирующей с определенным периодом можно использовать предположение о наличии некоторого газового утолщения на внешнем крае АД.

Определив орбитальную фазу тесной системы, на которой газовый поток из фотосферы (донора) звезды поступает на внешний край аккреционного диска компактного объекта, мы можем определить на графике оптической кривой блеска тесной двойной системы и некоторую фотометрическую особенность, возможно (по всей видимости) связанную с этим газовым потоком.

За весь период исследования данного объекта можно выделить три интервала ускорения: 1972–1980 гг.; 1984–1992 гг.; 1994–1997 гг., а также два интервала замедления вращения нейтронной звезды: 1980–1984 гг.; 1992–1994 гг. (см. рис. 1 из работы [5], дополненный данными автора).

Отсюда очевиден вывод: что ускорение или замедление вращения НЗ в тесной двойной системе, а, следовательно, изменение производной периода пульсара напрямую зависит от темпа аккреции вещества на нейтронную звезду.

Темп аккреции вещества напрямую связан с количеством вещества, поступающего от оптической звезды (донора) двойной системы НЗ Her на аккреционный диск пульсара Her X-1.

Таким образом в интервалах ускорения вращения НЗ происходило в среднем возрастание темпа аккреции, а в интервалах замедления — его уменьшение.

Вид кривых блеска оптической звезды системы НЗ Her (точнее, суммарный блеск всех составляющих тесной системы!) в периоды ускорения и замедления имеют четко выраженный характер и заметные различия, которые представлены в настоящей работе.

В настоящей работе ставятся следующие задачи: получить однородный наблюдательный материал в спектральных полосах W, B, V, R, I определенной инструментальной фотометрической системы с последующим приведением к фотометрической стандартной системе Джонсона (UBV); получать наблюдения, охватывающие как моменты входа АД НЗ в рентгеновское затмение, так и выхода из него; при группировке наблюдательных данных по фазам прецессионного 35<sup>d</sup>-дневного периода, наблюдательные данные по JD селективно привязывать к моментам включения рентгеновского источника, согласно информации соответствующего номера рентгеновского цикла (табл. 1) объекта; провести анализ средних орбитальных кривых блеска в 10-и прецессионных фазах.

## 2. ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТДС

В данной работе приводятся результаты оптических наблюдений ТДС НЗ Her=Her X-1 в период с 1986 по 1994 гг. в спектральных полосах WBVR,

Таблица 1. Сравнение рентгеновских включений и оптических данных авторов

Номер цикла	JD2440000+ (наблюдения на спутнике)	JD2440000+ (фотометрические наблюдения авторов)	Погрешность момента включения РИ и оптических наблюдений авторов	Примечание
140	6208.5	с 6615.	Не более 0.047 сут (или 4061 с)	Состояние “low on” – вход в рентгеновское затмение
...	...	...	...	Наблюдения на спутнике отсутствуют со 140 цикла и вплоть до 174 цикла
174	7399.5	с 7363.	Не более 0.004 сут (или 346 с)	Состояние “high on” – вход в рентгеновское затмение
181	7642.7	с 7652.	Не более 0.001 сут (или 86 с)	Состояние “off” – вход в рентгеновское затмение
182	7677.0	с 7703.	Не более 0.003 сут (или 264 с)	Состояние “off” – вход в рентгеновское затмение
...	...	...	...	Наблюдения на спутнике отсутствуют со 183 цикла и вплоть до 200 цикла
200	8304.85	с 8157.	Не более 0.015 сут (или 130 с)	Состояние “off” – вход в рентгеновское затмение
202	8373.6	с 8395.	Не более 0.002 сут (или 172 с)	Состояние “low on” – вход в рентгеновское затмение
203	8408.7	с		
204	8443.6	с 8463.	Не более 0.002 сут (или 172 с)	Состояние “low on” – вход в рентгеновское затмение
205	8478.3	с		
206	8512.4	с		
207	8548.2	с		
208	8583.8	с		
209	8618.3 (8617.0)	с		
210	8651.0	с		
211	8684.9	с		
212	8720.5	с		
213	8756.2 (8755.5)	с		
214	8790.3 (8789.5)	с		
215	8823.20 (8823.3)	с 8815., –	Не более 0.0008 сут (или 75 с)	Состояние “off” – вход в рентгеновское затмение
		с 8822., –	Не более 0.001 сут (или 86 с)	состояние “high on” – выход из рентгеновского затмения
216	8856.9 (8857.3)	с 8856.	Около 0 с	Состояние “high on” – выход из рентгеновского затмения
217	8891.6	с 8866.	Около 0.0025 сут или 250 с	Состояние “high on” – вход в рентгеновское затмение

сгруппированных в 10 прецессионных фазах  $35^d$ -дневного цикла тесной двойной системы.

Работа проводилась на телескопах Крымского представительства МГУ, в основном, на зеркальном телескопе-рефлекторе “Цейс – 600” и телескопе-рефлекторе “АЗТ – 5”.

В качестве приемной астрономической аппаратуры служил одноканальный фотометр с фильтрами WBVR. Этот астрономический прибор с навесной приемной аппаратурой работает в режиме счета фотонов – электрофотометр с довольно стабильным уровнем по напряжению и проверенным в многолетней работе фотоэлектронном множителе ФЭУ – 79 с мультищелочным фотокатодом, что позволяет наблюдать слабые астрономические объекты и фиксировать данные с довольно большой точностью (тысячные доли блеска).

В качестве счетчиков импульсов используются электронно – счетные частотомеры ЧЗ-35, обладающие высоким ( $t = \sim 0.05$  мкс) временным разрешением и хорошей стабильностью.

Большая часть наблюдений выполнена с диафрагмой диаметром 10"; иногда применялись диафрагмы в 15" и 20".

Кроме того, применение частотометров позволило проводить накопление импульсов (экспозицию) со временем и расширить диапазон экспозиций от 30–40 с (для ярких объектов типа Суг X-1) и до 150–200 с (слабые объекты типа звездного микроквара SS 433). Для разных спектральных диапазонов и разных объектов экспозиции подбирались исключительно экспериментальным методом с учетом инструментальных и внешних погрешностей.

Фотометрическая широкополосная система, применяемая авторами наблюдений:

U (центрирован на 350 нм), W (3465), синий B (4390 нм) и желтый V (5545 нм), позже ее дополнили красным R (6945 нм) (длина волны в  $\lambda_{med}$ ).

Позже для авторских наблюдений стал использоваться и фильтр I (что добавило еще 265 индивидуальных наблюдений в этом спектральном диапазоне по нашему объекту), с эффективной длиной волны  $\lambda = 0.9$  мкм.

В наблюдениях использовался пятиканальный “UBVRI” фотометр – поляриметр Хельсинского университета [6] на зеркальном телескопе АЗТ – 11 (КрАО, Крым) с апертурой 125 см.

В фотометрических данных средние ошибки наших оценок блеска могут достигать до величин  $0.065^m - 0.085^m$  в спектральной полосе “U”, и до  $0.045^m$  в “B”, а также не превышают величины  $0.025^m$  в спектральных полосах “V”, “R”, “I”, соответственно.

Суммарное число WBVR-наблюдений составляет 2355 индивидуальных измерений (по всем фильтрам) за 304 ночи в период мониторинга 1986–1994 гг. [4] и последующие годы.

Прецессионные фазы  $\psi_{35}$   $35^d$ -дневного цикла вычислялись в предположении, что  $\psi_{35} = 0$  в момент включения рентгеновского источника тесной системы.

Средние ошибки наших оценок блеска (для слабых объектов наблюдения) могут достигать до величин  $(0.065 - 0.085)^m$  в спектральной полосе “U(W)”, и до  $0.045^m$  в “B”, а также не превышают  $(0.015 - 0.025)^m$  в спектральных полосах “V”, “R”, “I” соответственно.

Для сильных объектов наблюдения эти оценки блеска значительно лучше!

### 3. ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕСНОЙ СИСТЕМЫ

Все полученные наблюдения в период 1986–1994 гг. были обработаны на ЭВМ “БЭСМ – 6” (физфак МГУ), “ЕС – 1022” (КрАО), на персональных компьютерах по программам, разработанным одним из авторов (А.Н. Сазонов) статьи в период 1985–1995 гг.

Так как наблюдения выполнялись на различных астрономических инструментах (“АЗТ – 11”, “Цейсс – 600”, “Цейсс – 1000”, “АЗТ – 5”, “АЗТ – 14”) разных обсерваторий СССР, России, Крыма, Узбекистана, Казахстана и т.д., авторы данной статьи имели в своей работе различные оптические системы, со своими коэффициентами редукиции к единой оптической платформе.

Наблюдения проводились также с различной приемной аппаратурой, то перед обработкой данных было необходимо перевести астрономические данные из инструментальных фотометрических систем в международные системы, чтобы полученными данными могли пользоваться другие исследователи в своих наблюдениях.

Приведем расшифровку используемых в статье некоторых терминов, а именно:

“high on” – высокое состояние, “low on” – излучение, составляющее около 30% потока в высоком состоянии и примерно на фазе равной  $\psi = 0.50$  для  $35^d$  прецессионного цикла, а также “off” – низкое состояние  $35^d$ -прецессионного цикла в тесной двойной системе.

Фазы орбитального периода  $\phi$ , вычислялись согласно элементам [4]:

$$\text{Min Hel} = \text{JD}2441329^d .57519 + 1^d .70016773 \cdot E. \quad (1)$$

Таблица 2. Модифицированная

Номер цикла	JD2440000+ (наблюденная)	Error days (наблюденная)	Satellite instrument	JD2440000+ (расчетная)	(Obs-Cal)
140	6208.5	0.5	EXOSAT	6209.374	-0.874
...	...	...	...	...	...
174	7399.5	0.3	Ginga	7394.391	5.109
181	7642.7	0.2	Ginga	7638.365	4.335
182	7677.0	2.0	Ginga		
...	...	...	...	...	...
200	8304.85	0.05	ROSAT	8300.581	4.269
202	8373.6	0.4	BATSE	8370.288	3.312
203	8408.7	0.4	BATSE	8405.141	3.559
204	8443.6	0.4	BATSE	8439.994	3.606
205	8478.3	0.4	BATSE	8474.848	3.452
206	8512.4	0.4	BATSE	8509.701	2.699
207	8548.2	0.4	BATSE	8544.555	3.645
208	8583.8	0.4	BATSE	8579.408	4.392 (3.592)
209	8618.3 (8617.0)	0.4	BATSE	8614.262	4.038 (2.738)
210	8651.0	0.4	BATSE	8649.115	1.885
211	8684.9	0.4	BATSE	8683.969	0.931
212	8720.5	0.5	BATSE	8718.822	1.678
213	8756.2 (8755.5)	0.5	BATSE	8753.675	2.525 (1.825)
214	8790.3 (8789.5)	0.4	BATSE	8788.529	1.771 (0.971)
215	8823.20 (8823.3)	0.47 (0.468)	BATSE	8823.382	-0.182 (-0.082)
216	8856.9 (8857.3)	0.5	BATSE	8858.236	-1.336 (-0.936)
217	8891.6	0.4	BATSE	8893.089	-1.489
218	8926.7 (8926.4)	0.5	BATSE	8927.943	-1.243 (-1.543)
219	8961.1	0.4	BATSE	8962.796	-1.696
221	9031.1	0.4	BATSE	9032.503	-1.403
222	9066.2 (9066.0)	0.4	BATSE	9067.356	-1.156 (-1.356)
223	9101.7 (9101.5)	0.4	BATSE	9102.210	-0.51 (-0.710)
224	9136.7 (9136.95)	0.4	BATSE	9137.063	-0.363 (-0.113)
225	9172.1	0.4	BATSE	9171.917	0.183
226	9206.0	0.4	BATSE	9206.770	-0.770
227	9239.65 (9239.8)	0.4	BATSE	9241.624	-1.974 (-1.824)
229	9308.74	0.4	BATSE	9311.331	-2.591
230	9343.48	0.5	BATSE	9346.184	-2.704
231	9378.44	0.4	BATSE	9381.037	-2.597
232	9413.19	0.4	BATSE	9415.891	-2.701
233	9448.25	0.4	BATSE	9450.744	-2.494
234	9481.2 (9482.9)	0.4	BATSE	9485.598	-4.398 (-2.698)
235	9518.58 (9518.6)	0.4	BATSE	9520.451	-1.871 (-1.851)
236	9553.0 (9552.9)	0.4	BATSE	9555.305	-2.305 (-2.405)

Все наблюдаемые данные за эти годы ставятся (приводятся) в соответствие с фазой 35<sup>d</sup>-дневного цикла с учетом того, что моменты  $T_{35}$  соответствуют эфемеридам [4]:

$$T_{35} = \text{JD}2441781.0 \pm 0.5 + (34^{\text{d}}.875 \pm 0^{\text{d}}.003) \cdot E, \quad (2)$$

и матрице  $\|A\|$  моментов включения рентгеновского источника (РИ) нейтронной звезды (НЗ) ТДС Her X-1=HZ Her (табл. 2), которая была создана по уже апробированной работе [4].

По используемой методике, с привлечением формул (1) и (2), имеются графики зависимостей блеска спектральных диапазонов W(U), B, V, R от десяти прецессионных фаз (от 0.0 до 1.0).

Для сравнения с этим подходом, имеем графики с зависимостями блеска системы в спектральных диапазонах W, B, V, R (I) от десяти прецессионных фаз (от  $\psi = 0.0$  и до  $\psi = 1.0$ ), с использованием формулы (1) матрицы моментов включения рентгеновского источника Her X-1 (табл. 2) (модифицированная таблица под конкретную задачу) в тесной двойной системе.

При качественном и количественном сравнении этих подходов, на кривых блеска тесной системы (во всех спектральных диапазонах), видны существенные различия во всех прецессионных фазах  $\psi$  и во всех 3-х основных состояниях ее (“high on”, “low on”, “off”) 35<sup>d</sup>-прецессионного цикла.

Таким образом, использование матрицы моментов включения РИ и разбиение всех наблюдений автора, дают более реалистичную картину поведения ТДС для выявления тонких фотометрических эффектов.

Также приводятся данные по критериям: “наблюдения”–“вычисленные величины”, – своего рода ошибки включения рентгеновского источника в тесной системе по оптическим наблюдениям авторов, что имеет свою ценность и информативность исследования космического объекта по непрерывному мониторингу.

В таблице имеется также информация и по усредненным ошибкам наблюдения включения рентгеновского источника по информации с орбитальных обсерваторий, которые ведут наблюдения за этим объектом.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТДС HER X-1=HZ HER В ИЗБРАННЫЙ ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЯ

Благодаря весьма длительным исследованиям тесной двойной системы HZ Her=Her X-1 в раз-

ных спектральных диапазонах излучения (в рентгеновском, оптическом, радиодиапазоне и т.д.) удалось получить очень обширную базу данных, которая охватывает весь 1.7<sup>d</sup>-суточный орбитальный период нашего объекта.

Во время четвертого интервала ускорения нейтронной звезды (после открытия этого объекта и начала исследования!), были получены основные научные результаты, вскоре после окончания очередного аномально низкого состояния рентгеновского потока (ALS) от Her X-1.

Для изучения газовых потоков в тесной двойной системе был применен оригинальный метод доплеровской томографии узких эмиссионных линий атомов в высокой степени ионизации [7], [8].

Эмиссия от потока вещества возбуждается рентгеновским излучением от пульсара, облучающим этот газовый поток. Эмиссия достигает своего максимума на орбитальной фазе  $\phi_{1.7} = 0.59-0.60$ , когда, по-видимому, передний фронт газового потока достигает края аккреционного диска НЗ. Здесь самое близкое расстояние до поверхности НЗ и наиболее высокая интенсивность рентгеновского излучения, ионизирующего и нагревающего разреженный газ. С этого момента газовый поток в двойной системе начинает вливаться во внешний край аккреционного диска НЗ.

Процесс втекания газовой струи потока завершается на орбитальной фазе  $\phi_{1.7} \approx 0.67$ . На внешнем крае аккреционного диска формируется газовая конденсация, ответственная за физическое явление “дипа”.

Различные особенности рентгеновского излучения пульсара Her X-1 можно удовлетворительно объяснить в модели наклонного прецессирующего аккреционного диска (АД) нейтронной звезды (НЗ).

В этой модели внутренний край АД должен располагаться достаточно близко (на расстоянии  $\sim 10R_{\text{НЗ}}$ ) от поверхности НЗ и являться областью переизлучения прямого потока излучения от пульсара, которая ответственна за ряд особенностей на кривой блеска тесной двойной системы [9].

Толщина такой затеняющей области, в таком случае, должна быть порядка  $\sim (10-20)R_{\text{НЗ}}$ .

В этой модели область генерации постоянно затеняется веществом газового потока с оптического компонента ТДС в направлении слева направо, и располагается на определенной части альфвеновской поверхности, вблизи внутреннего края аккреционного диска (АД) нейтронной звезды (НЗ).

Это соответствует прецессионному вращению аккреционного диска в сторону вращения ней-

тронной звезды и орбитального движения ТДС как гравитационно-связанного целого.

То есть мы наблюдаем прямую прецессию аккреционного диска пульсара Her X-1. Прямая прецессия АД НЗ Her X-1 наблюдается особенно четко в коротковолновой части спектра (ультрафиолетовый спектральный диапазон).

Вполне очевидно, что область генерации, имеющая меньший угловой растр, закроется аккреционным диском НЗ раньше. Угловой размер области излучения с более высокими энергиями имеет меньшую ширину, и она практически не затеняется АД в состоянии “high on”.

Это предположение, сделанное нами в ранних работах, имеет и экспериментальное подтверждение, а также оптическими наблюдениями и самого автора статьи [4].

Необходимо заметить, что в определенный момент вращения НЗ Her X-1 область генерации начинает затеняться внутренним краем аккреционного диска. Когда видимая геометрическая площадь этой области значительно уменьшаться в результате затенения, по всей видимости наступит ослабление интенсивности рентгеновского излучения.

Таким образом данные физические процессы в тесной системе начинают формировать первый пик главного импульса на рентгеновской кривой блеск пульсара Her X-1.

Вид кривых блеска оптического компонента системы NZ Her в периоды ускорения и замедления НЗ имеют заметные различия (см. рис. 1 и 2).

Например, в периоды замедления НЗ, когда снижается уровень рентгеновского потока от пульсара, на кривых блеска практически не видно вторичного минимума (Min II) как в состоянии “high on”, так и в состоянии “low on”.

Это можно объяснить тем, что в такие интервалы активности пульсара значительно уменьшается наклон аккреционного диска НЗ к орбитальной плоскости и, соответственно, к лучу зрения земного наблюдателя. Поэтому уменьшается видимая площадь аккреционного диска и тем самым снижается степень экранировки им фотосферы оптической звезды.

Необходимо учитывать, что интенсивность рентгеновского излучения, регистрируемая земным наблюдателем, зависит как от угла поворота нейтронной звезды вокруг своей оси, так и от положения аккреционного диска, поскольку он своим внутренним краем частично экранирует область генерации РИ. К тому же, в различных фазах прецессионного движения диск занимает различные пространственные положения отно-

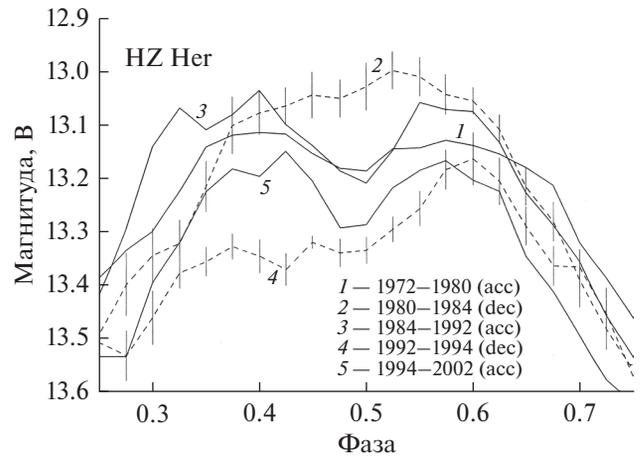


Рис. 2. Вид кривых блеска оптического компонента двойной системы NZ Her в периоды ускорения и замедления НЗ.

сительно НЗ и земного наблюдателя, что несомненно отражается на оптической кривой блеск пульсара Her X-1.

Для состояния “high on” пульсара Her X-1, когда плоскость диска максимально раскрыта к земному наблюдателю, мы принимаем рентгеновское излучение от “северного полюса НЗ”, а “южный полюс НЗ” закрыт от наблюдателя аккреционным диском. В этом случае мы имеем максимальную диаграмму рентгеновского излучения — главный импульс двухпиковой структуры.

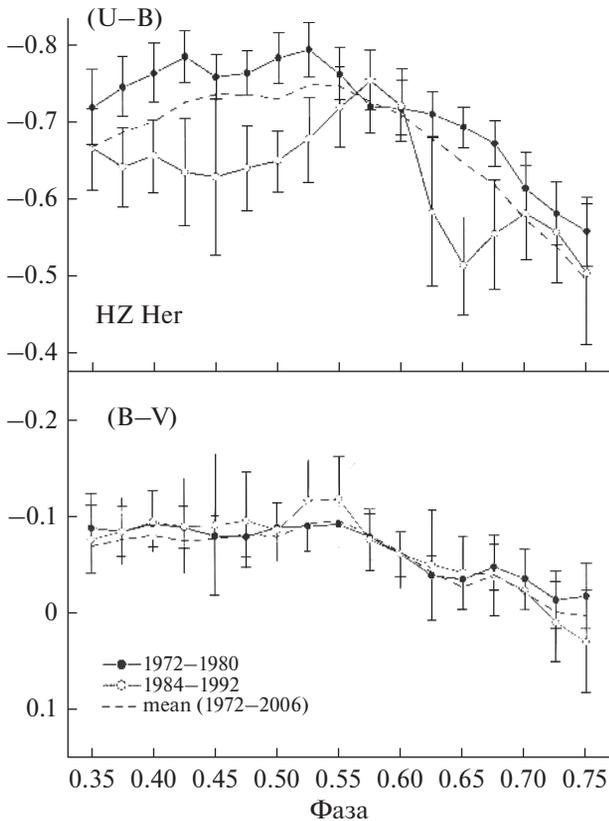
Для состояния “low on” пульсара Her X-1 мы принимаем рентгеновское излучение от “южного полюса НЗ” и видимая площадь которого составляет небольшую долю от видимой площади “северного полюса”.

На рентгеновской кривой блеск пульсара Her X-1 в диапазоне 2–20 кэВ четко выделяется главный импульс, который имеет характерную двухпиковую структуру и большую ширину.

По мере дальнейшего вращения НЗ затененные области генерации рентгеновского излучения достигают максимальной величины, а в структуре главного импульса наблюдается локальный минимум интенсивности РИ.

Затем область генерации (области генерации рентгеновского излучения должны совпадать с магнитными полюсами НЗ) начинает выходить из затенения, возрастает ее видимая площадь, формируя уже второй пик, а далее из-за уменьшения этой площади интенсивность во втором пике начинает падать. Вскоре магнитный полюс НЗ исчезает за противоположным лимбом НЗ.

Асимметрия интенсивностей РИ первого и второго пиков теоретически может возникнуть, если



**Рис. 3.** Представлены кривые блеска HZ Her (точнее, суммарный блеск всей ТДС) с зависимостью орбитального периода (фаза ( $1^d.7$ )) и цвета (U–V) и (B–V) в годы наблюдения.

предположить, что ось вращения помимо большого угла наклона к земному наблюдателю имеет также небольшой наклон относительно меридиана земного наблюдателя в картинной плоскости.

Таким образом, мы имеем, что разное ослабление первого и второго пиков с  $35^d$  прецессионным циклом в рассматриваемой нами модели для интерпретации наших оптических данных в 5-и цветах (U(W)BVRI) можно правдоподобно объяснить в предположении [9], что прецессия аккреционного диска НЗ происходит в направлении вращения НЗ и орбитального движения, т.е. наблюдается прямая прецессия АД НЗ.

Тем не менее мы имеем, что в интервалах режима ускорения НЗ кривые блеска системы во всех фильтрах имеют стандартный вид, со вторичным минимумом с центром на орбитальной фазе  $\phi = 0.5$ , как в состоянии “high on”, так и в состоянии “low on”.

На нашем рис. 1 представлены данные измерения  $1.24$  с – собственного периода пульсара Her X-1 примерно за 25 лет рентгеновских исследова-

ний нашего объекта, которые мы взяли из работы [10]. Вертикальными штриховыми линиями на нем выделены характерные временные интервалы, на которых наблюдаются либо периоды ускорения вращения НЗ, либо периоды замедления ее вращения по причинам указанным нами ранее.

На этом же графике мы видим три временных интервала ускорения: 1972–1980 гг.; 1984–1992 гг.; 1994–1997 гг., а также два временных интервала замедления вращения нейтронной звезды: 1980–1984 гг.; 1992–1994 гг.

Оптические данные в спектральных диапазонах W(U)BVR(I) авторов данной работы за период наблюдений более, чем за 20 лет, показывают аналогичную картину поведения ТДС HZ Her=Her X-1.

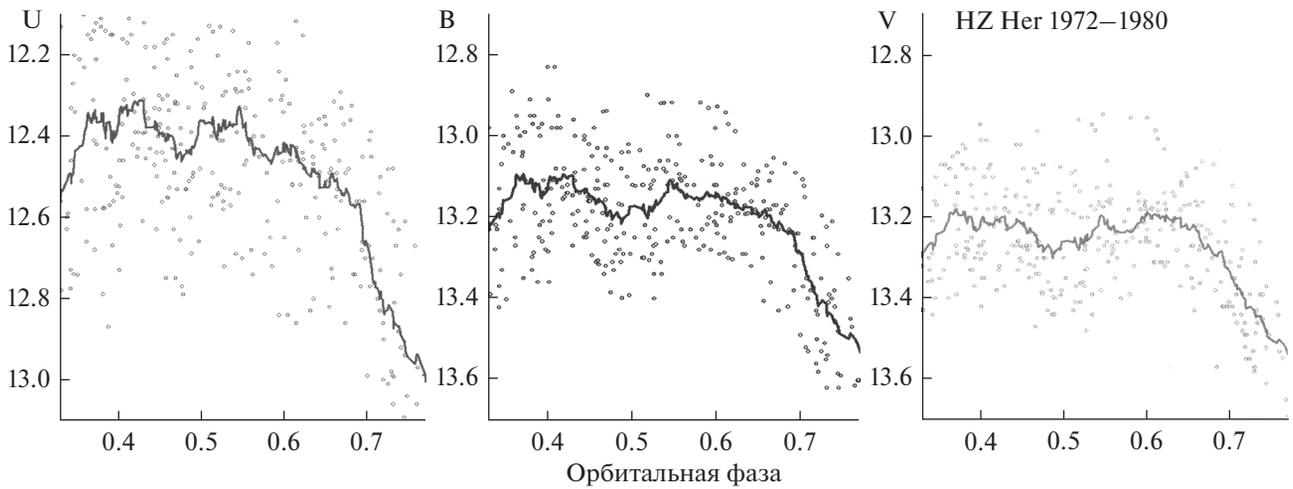
Существенен и факт интерпретации поведения нейтронной звезды в тесной системе по оптическим данным авторов данной статьи в тот период отсутствия рентгеновских данных, что повышает ценность оптических данных, полученных этими авторами.

Очевидно также, что ускорение или замедление вращения НЗ, а, следовательно, изменение производной периода пульсара Her X-1 напрямую зависит от темпа аккреции вещества на нейтронную звезду. Темп аккреции прямо связан с количеством вещества, поступающего от донора – оптической звезды HZ Her тесной двойной системы на аккреционный диск вокруг пульсара Her X-1.

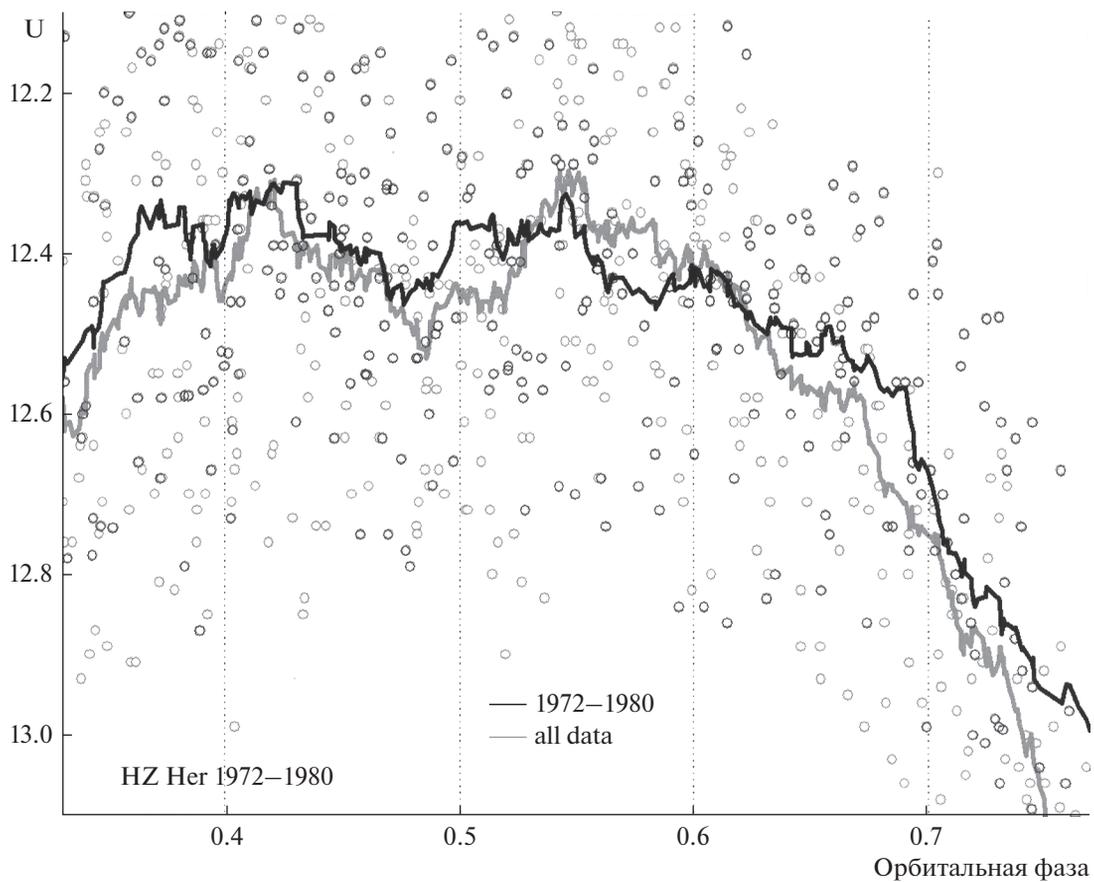
Таким образом в интервалах ускорения вращения НЗ происходило в среднем возрастание темпа аккреции, а в интервалах замедления – его уменьшение. Вид кривых блеска HZ Her в периоды ускорения и замедления имеют весьма заметные различия (см. рис. 2 и 3). Рис. 3 отражает поведение ТДС в цветах от орбитальной фазы.

В первом интервале замедления вращения НЗ, а именно, в 1982 г. было выявлено, что в фазах вблизи элонгаций рентгеновского источника ( $\phi = 0.25$  и  $\phi = 0.75$ ) оптическая кривая блеска двойной тесной системы мало чем отличалась от других эпох исследования объекта, что в свою очередь говорит нам о неизменности геометрической площади “горячего пятна” на доноре системы в 1982 наблюдательный год.

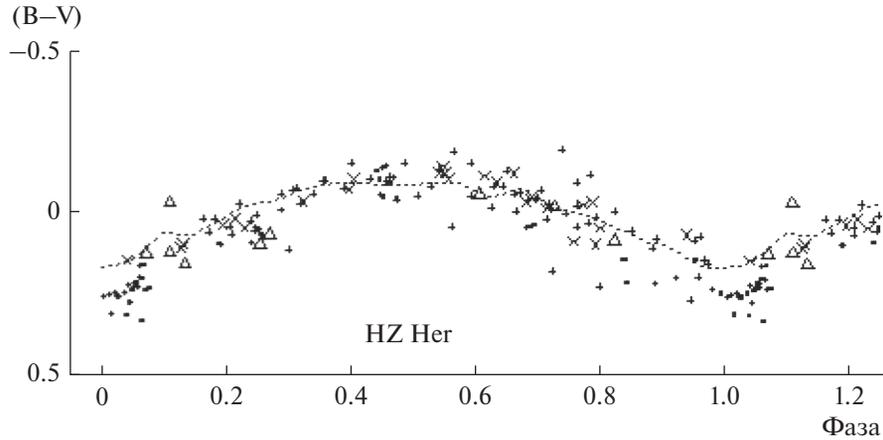
При внимательном анализе интервалов ускорения НЗ бросается в глаза тот факт, что в интервале второго ускорения нейтронной звезды (1984–1992 гг.), когда вращение НЗ происходило с более быстрым темпом ускорения, чем в первом интервале 1972–1980 гг., на некоторых фрагментах оптической кривой блеска, представленных на рис. 4, наблюдается заметная депрессия в спектральном диапазоне U (и примерно такая же



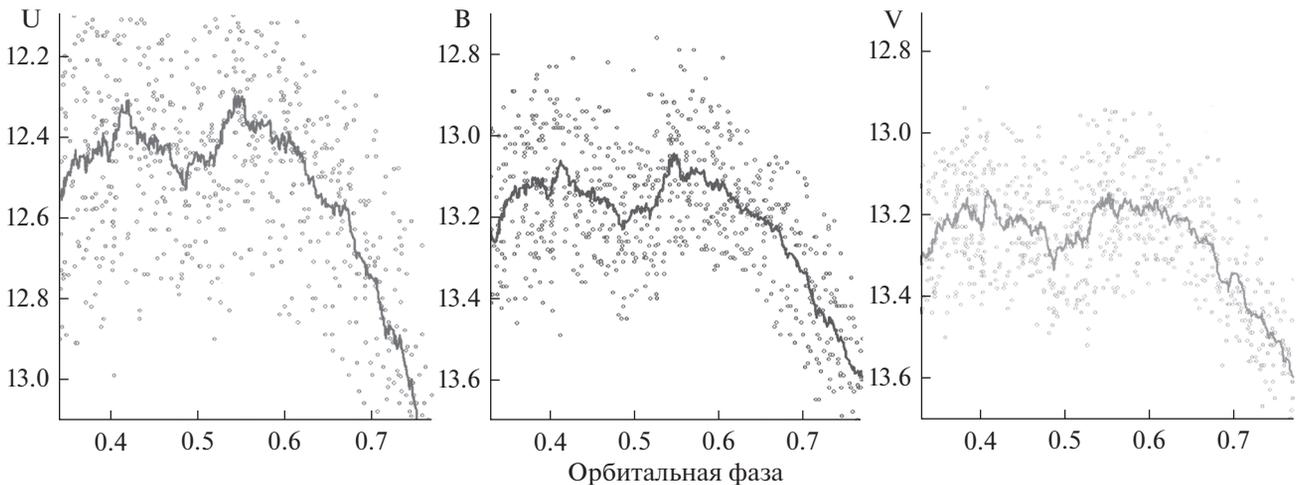
**Рис. 4.** Наблюдения объекта HZ Her в спектральных диапазонах U, B, V. В спектральных диапазонах B и V в эти годы наблюдений депрессия не так отчетливо проявляется, хотя фактически она имеется и там.



**Рис. 5.** Две кривые блеска в спектральном диапазоне U от orb. периода  $1^d.7$  (примерно такая же картина и в диапазоне W; только данных значительно меньше за этот же период наблюдений) в 1972–1980 гг. (кривая 1); кривая 2 — это все данные, имеющиеся у авторов и в открытой печати. Глубина депрессии в этой спектральной полосе достигает 0.08 звездной величины и более (в зависимости от селективной выборки данных и в разных временных диапазонах).



**Рис. 6.** Зависимость показателей цвета  $(B-V)$  от орбитальной фазы системы, где депрессия в показателе цвета едва намечается для двух фаз ускорения НЗ. Оптических данных для такого строгого вывода недостаточно, все зависит от методов выборки данных, и от трех состояний системы, а именно: “high on”, “low on”, “off”.



**Рис. 7.** Три кривые блеска HZ Her (all data) в спектральных диапазонах U, B, V, где имеется четко выраженный вторичный минимум оптического компонента.

картина и в спектральном диапазоне W), в интервале орбитальных фаз  $\Delta\phi_{1,7} = 0.60-0.67$ .

Глубина депрессии в этой спектральной полосе достигает 0.08 звездной величины и более (см. рис. 5).

Эта наблюдаемая фотометрическая особенность, которая была замечена авторами этой статьи на оптической кривой блеск тесной двойной системы, а также выясненная этими же авторами работы и на ранних стадиях исследования этого уникального объекта.

В спектральном диапазоне B депрессия меньше и составляет 0.05 звездной величины, а в фильтре V – не более 0.03 звездной величины. На графиках показателей цвета от орбитальной фазы (рис. 6) депрессия в показателе цвета  $(B-V)$  едва

намечается для двух интервалов ускорения НЗ, хотя указанный эффект находится в пределах ошибок осреднения оптических данных.

Максимальная разница в показателе цвета  $(U-B)$ , а также и для показателя цвета  $(W-B)$ , от средней кривой, построенной по всему имеющемуся массиву фотометрических данных (к этому моменту!), достигает 0.15 звездной величины для второго интервала ускорения.

Полагаем, что обнаруженная депрессия в спектральных диапазонах U(W), B, V, R, I, скорее всего, вызывается поглощением горячим разреженным газом излучения от фотосферы HZ Her, идущего в направлении земного наблюдателя.

Таким образом, в данном случае вероятнее всего наблюдается эффект от газового потока си-

стемы, перетекающего с HZ Her на внешний край аккреционного диска H3.

При рассмотрении и анализе оптических наблюдений вблизи главного минимума оптического компонента системы HZ Her (фазы  $\phi = 0.96-0.04$ ) в 1982 и 1983 гг., колебания минимального уровня блеска системы и показателей цвета (U–V) несколько превышали значение (0.22–0.23) звездной величины, что не наблюдалось впоследствии, в период второго интервала ускорения (1988–1992 гг.) (см. рис. 7).

Наиболее вероятным трактованием такого результата является колебание блеска системы и цветового показателя (U–V) (а также и показателя цвета (W–B)), есть изменение геометрических размеров аккреционного образования, а точнее той его части, которая может переизлучать газовый поток в оптическом диапазоне спектра.

В первом интервале замедления (1980–1984 гг.) вращения H3 вблизи фаз рентгеновского затмения, блеск тесной системы (в эпоху наблюдения 1982 г.) был в среднем на  $0^m.15$  выше, а цвет (U–V)  $0^m.12$  “был голубее”, чем в предшествующие и последующие эпохи наблюдения.

В период второго интервала ускорения H3 (наблюдательный сезон 1988 года) в фазах  $35^d$  цикла “оп” (включено) амплитуда изменений блеска системы во вторичном минимуме (Min II) превысила  $0^m.32$  в спектральном диапазоне V, а уровень блеска вблизи вторичного минимума (Min II в фазе  $\phi = 0.48$ ) достиг минимальных значений ( $13^m.52$  в диапазоне V).

На орбитальных (оптических) кривых блеска двойной системы (см. статью и рис. 4 из работы [11]), где приводится поток излучения в исследуемых ультрафиолетовых линиях спектра, наблюдается заметное увеличение эмиссии от 1.5 до 3 раз в интервале орбитальных фаз от  $\phi_{1.7} = 0.55 \pm 0.05$  и до  $\phi_{1.7} = 0.67 \pm 0.02$  с максимумами потока излучения на  $\phi_{1.7} = 0.59 \pm 0.01$ .

Авторы этой работы [11] отмечают присутствие в спектре как широких компонентов линий, так и узких компонентов. Широкая компонента дуплета эмиссионных линий O VI  $\lambda\lambda = 1032, 1037.6 \text{ \AA}$  вблизи оптического затмения была отождествлена с излучением от аккреционного диска H3. Источник узких эмиссионных линий авторы [11] не смогли установить на тот момент.

## ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного анализа можно определенно сказать, что по авторским оптическим данным, полученным с высокой точностью

(инструментальных фотометрических систем, приведенных к международной фотометрической системе), проинтерполировано поведение пульсара Her X-1 в период наблюдений 1987–1989 гг., когда отсутствовали рентгеновские данные по объекту (см. табл. 1), что позволило восполнить существенный пробел в оптических и рентгеновских наблюдениях;

2. По наблюдениям объекта в 1986–1994 гг. была выявлена некоторая особенность тесной системы, а именно: перетекание вещества от оптического компонента к аккретору системы через внутреннюю точку Лагранжа  $L_1$  происходит не непрерывно, а дискретно, на определенных орбитальных фазах  $\phi$ . Это происходит, когда внутренняя критическая полость Роша оптического компонента тесной системы достигает определенной степени заполненности веществом, близкой к 1, после чего начинается истечение вещества.

3. Обнаружен физический эффект от перетекания вещества с оптического компонента системы HZ Her на аккреционный диск H3: на орбитальных кривых блеска тесной системы, в районе  $\phi = 0.63-0.67$ , наблюдается физический “феномен” – заметный “провал” – депрессия излучения, по оптическим наблюдениям 1987–1989 гг. При использовании оптических данных за более длительный период мониторинга, например, 1985–1995 гг., этот диапазон поглощения излучения распространяется на орбитальные фазы от  $\phi_{1.7} = 0.59$  и до  $\phi_{1.7} = 0.69$ . Это происходит в оптическом диапазоне по данным W(U)BV фотометрии (и отчасти в спектральном диапазоне R и I).

4. Этот наблюдаемый на орбитальной кривой блеска “провал” можно объяснить фактом экранировки рентгеновского излучения от компактного объекта в системе звездным веществом над внешним краем аккреционного диска H3 в тесной двойной системе. Далее, в оптическом диапазоне, на кривой лучевой скорости HZ Her в спектральной линии He II  $\lambda = 4686 \text{ \AA}$  на орбитальных фазах от  $\phi_{1.7} \approx 0.57$  и до фазы  $\phi_{1.7} \approx 0.67$  (рис. 2с из работы [12]). В крайней ультрафиолетовой области спектра, в узких линиях высокоионизированных атомов [11] наблюдается эмиссия на орбитальных кривых блеска с плавным подъемом излучения от  $\phi_{1.7} \approx 0.55$  до максимума на  $\phi_{1.7} = 0.59 \pm 0.01$  и с последующим более быстрым падением к  $\phi_{1.7} \approx 0.67$ ;

5. Прямая прецессия АД H3 Her X-1 наблюдается особенно четко в коротковолновой части спектра (ультрафиолетовый спектральный диапазон (спектральный диапазон W и/или диапазон U)).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tananbaum H., Gursky H., Kellogg E.M. et al.* Optical observations binary of HZ HER = HER X-1" // *Astrophys. J.* V. 174. 1972. P. L143.
2. *Курочкин Н.Е.* Photographic observations of HZ Her = Her X-1 // *Переменные звезды.* 1972. Т. 18. С. 425.
3. *Boynnton P.E., Canterna R., Crosa L. et al.* Optical observations of binary X-ray sources // *Astrophys. J.* 1973. V. 186. P. 617.
4. *Сазонов А.Н.* Многоцветные фотоэлектрические WBVR-наблюдения ТДС HZ Her=Her X-1 в 1986–1988 гг. Часть 1: Методика наблюдений и наблюдения объекта // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88. № 02. С. 162–179.
5. *Staubert R., Schandl S., Wilms J.* Long-term developments in Her X-1: Correlation between the histories of the 35 day turn-on cycle and the 1.24 sec pulse period // *AIP Conf. Proc.* 2006. July 9. V. 840. P. 65.
6. *Шаховской Н.М., Сазонов А.Н.* SS 433: Структура аккреционного диска и его короны на базе синхронной UBVR – фотометрии // *Письма в "Астрон. журн."*. 1996. Т. 22. № 8. С. 580–586.
7. *Marsh T.R., Horn K.* Optical observations of binary HZ HER=HER X-1 // *MNRAS.* 1988. V. 235. P. 269.
8. *Marsh T.R.* HZ HER=HER X-1 // *Astrophys. And Space Sci.* 2005. V. 296. P. 403.
9. *Шеффер Е.К., Конаева И.Ф., Аверинцев М.Б. и др.* Рентгеновские исследования пульсара Геркулес X-1 на АС "Астрон" в 1983–1985 гг. Препринт № 1252. М.: ИКИ АН СССР, 1987.
10. *Staubert R., Schandl S., Wilms J.* HZ HER=HER X-1 // *AIP Conf. Proc.* 2006. July 9. V. 840. P. 65.
11. *Boroson B.S., Vrtilik S.D., Raymond J.C., Still M.* FUSE Observations of a Full Orbit of Hercules X-1: Signatures of Disk, Star, and Wind // *Astrophys. J.* 2007. V. 667. P. 1087.
12. *Reynolds A.P., Quaintrell H., Still M.D. et al.* A new mass estimate for Hercules X-1 // *MNRAS.* 1997. V. 288. P. 43.