

УДК 524.83; 524.82.

35 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ Cyg X-1/V1357 Cyg – ПЕРВОГО КАНДИДАТА В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

В.М. Лютый

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

Приведена история обнаружения (1965 г.) и исследований в течение 35 лет тесной двойной рентгеновской системы Cyg X-1/V1357 Cyg - первого (и, по-видимому, самого надежного) кандидата в черные дыры. За 35 лет исследований удалось, в основном, понять природу оптической, рентгеновской и радио переменности объекта и построить адекватную модель системы, объясняющую многие наблюдательные особенности в очень широком диапазоне – десять порядков по частоте – от жесткого рентгена до радио.

1. Введение. Рентгеновский источник Лебедь X-1 (Cyg X-1) был обнаружен в 1965 г. [1]. Это третий по яркости на рентгеновском небе объект после Солнца и источника Скорпион X-1 (Sco X-1). Первую попытку отождествления Cyg X-1 с оптической звездой предприняли Джаакони и др. [2]. Так как Cyg X-1 находится в галактической плоскости с большим поглощением света, они предположили, что оптический аналог Cyg X-1 должен быть звездой слабее 18^m . Однако в 1971 г. по одновременным наблюдениям в рентгене и радио объект удалось отождествить с радиоисточником и получить его точные координаты [3]. Координаты объекта совпали с координатами довольно яркой (9 величины) звезды +35°1910 из каталога AGK2 (=BD +34°3815).

Первые же спектральные наблюдения [4; 5] показали, что звезда BD +34°3815 (в дальнейшем объект стал более известен как HDE 226868 -по спектральному каталогу) является спектрально-двойной с периодом $5.^d6$. При этом масса второй компоненты, линии которой в спектре отсутствуют, составляет не менее $7M_{\odot}$. Спектральный класс видимой звезды определен как O9.7Iab, т.е. голубой сверхгигант. Большая масса, превышающая более чем вдвое верхний предел массы нейтронной звезды, и малые размеры невидимой компоненты этой двойной системы дают основания считать вторую компоненту черной дырой. (Размеры оцениваются по скорости рентгеновской переменности – за 1 миллисекунду поток может меняться в сотни раз; это время соответствует размеру 300 км – гравитационному радиусу черной дыры с массой $\sim 10 M_{\odot}$).

Сразу после отождествления рентгеновского источника Cyg X-1 со звездой HDE 226868 начались ее фотометрические наблюдения, которые привели к обнаружению переменности блеска с периодом $2.^d8$

[6; 7], т.е. половина орбитального. Суммируя фотометрические и спектральные наблюдения рентгеновской двойной системы Cyg X-1/HDE 226868, Лютый, Сюняев и Черепашук [8] объяснили природу регулярной (периодической) оптической переменности объекта как эффект эллипсоидальности – форма звезды искажена притяжением находящего рядом невидимого, но массивного объекта. Поэтому фотометрический период в 2 раза меньше орбитального – за орбитальный период наблюдается две волны изменения блеска. По фотометрическому фактору эллипсоидальности получен нижний предел массы вторичной компоненты $7.8 M_{\odot}$ – независимо от принятой массы главной компоненты. Это усилило вывод, что невидимая компонента рентгеновской двойной системы Cyg X-1/V1357 Cyg уверенно может считаться первым кандидатом в черные дыры (V1357 Cyg – обозначение звезды HDE 226868 как переменной в Общем каталоге переменных звезд).

В настоящее время общепринятыми являются следующие параметры этой двойной системы: орбитальный период $P = 5.599829 \pm 0.000016$ дней [9], массы компонент, оптической и рентгеновской, $M_o = 18 M_{\odot}$, $M_x = 10 M_{\odot}$, температура голубого сверхгиганта (главной звезды) ~ 32000 градусов, наклон плоскости орбиты $36^{\circ} < i < 67^{\circ}$ [10], расстояние до системы ~ 2 килопарсека [11].

2 Краткая история исследований. Для удобства ориентировки приведем историю исследований рентгеновской двойной системы Cyg X-1/V1357 Cyg по годам с момента обнаружения рентгеновского источника и вплоть до настоящего времени. Отдельные моменты будут подробно описаны ниже.

1965: обнаружение рентгеновского источника Лебедь X-1 (Cyg X-1) [1].

1971: отождествление с радиоисточником, координаты совпали с координатами звезды 9^m HDE 226868 [3]; начало спектральных и фотометрических исследований.

1972: спектрально-двойная, $P_{orb} = 5^d.6$, масса вторичной (невидимой) компоненты $7-10 M_{\odot}$ – черная дыра [4; 5].

1972: фотометрическая переменность с $P_{phot} = P_{orb}/2$ [6; 7].

1973: эффект эллипсоидальности сверхгиганта как природа оптической переменности, масса вторичной компоненты $> 7 M_{\odot}$ по фотометрическим данным, наиболее вероятные значения – $M_o = 20; M_x = 12 M_{\odot}$ [8], что почти совпадает с принятыми современными (1995 г.) значениями [10].

1974: неправильная переменность в 2–3 раза превышающая амплитуду орбитальной [12; 13].

1983: прецессионный (?) период 294 ± 5 дней в рентгеновском диапазоне [14]; $P = 294^d$ в оптическом диапазоне [15].

1985: обнаружено дополнительное излучение в min I (фаза 0.0) – очень узкий пик (длительность 2–3 часа) малой амплитуды [16].

1987: более точный прецессионный период $P = 294.1 \pm 0.7$ по оптическим данным [17].

1991: Начало 5-летнего мониторинга CGRO/BATSE в жестком (20–100 кэВ) рентгене, 2 перехода «high_soft» (1994 и 1996), орбитальная модуляция с $P = 5^d.6$, рентгеновский минимум совпадает с верхним соединением компактного объекта (фаза 0.0), максимум на фазе 0.5 [18].

1993: орбитальная модуляция в радиодиапазоне [19].

1994: детальное исследование дополнительного излучения в min I [20].

1996: начало рентгеновского мониторинга на RXTE/ASM в диапазоне 2–10 кэВ.

1997: обнаружена долговременная переменность сверхгиганта 09.7Iab: светимость в фильтре U увеличилась на 5% [22].

1998: радиомониторинг в диапазоне 2–15 ГГц, орбитальная модуляция с $P = 5^d.6$, но с запаздыванием по фазе от 0.12 (15 ГГц) до 0.29 (2 ГГц) относительно рентгена и оптики; прецессионный период 150 дней в радио и рентгене [21].

1999: наиболее точные эфемериды по спектральным ($P_{sp} = 5.599829 \pm 0.000016$ days) и фотометрическим ($P_{ph} = 5.599836 \pm 0.000024$) данным [9], исключено предположение о переменности орбитального периода.

1999: комплексный анализ переменности в жестком (CGRO/BATSE) и мягком (RXTE/ASM) рентгене, оптическом, ИК и радио (15 ГГц) диапазонах [23]; модель системы Cyg X-1/V1357 Cyg в «жестком» и «мягком» состояниях: приливно деформированный O-сверхгигант, гравитационно сфокусированный звездный ветер, наклоненный к плоскости орбиты и прецессирующий аккреционный диск, комптонизированная корона диска (жесткий рентген), радиоструи, перпендикулярные к плоскости аккреционного диска.

2001: обнаружено запаздывание рентгеновской переменности относительно оптической на 12 дней, что интерпретируется как время прохождения вещества в аккреционном диске [24].

2003: исследование переменности линии H_{α} , корреляция с орбитальной и прецессионной переменностью [25].

2006: долговременная фотометрическая и спектральная переменность сверхгиганта вызвана изменениями его температуры и радиуса – в максимуме 1995–1997 гг. радиус уменьшился, а температура поверхности и, соответственно, светимость увеличились; затем температура уменьшилась, но радиус увеличился, коэффициент заполнения звездой полости Роша увеличился с обычного 0.9 до единицы, что привело к усилению темпа аккреции и увеличению рентгеновской активности [26].

3. Природа оптической переменности. Когда стало ясно, что Cyg X-1/V1357 Cyg – тесная двойная система с невидимой в оптическом диапазоне вторичной компонентой (черная дыра + аккреционный диск, вклад которого в оптическую светимость составляет всего 2–3%) и отсутствием затемнений, естественно встал вопрос о природе регулярной оптической переменности. Этот вопрос был решен в 1973 г. [8] – эффект эллипсоидальности сверхгиганта, вызванный воздействием на него притяжения черной дыры. Поскольку наблюдатель дважды за орбитальный период видит большую или меньшую сторону звезды-

эллипсоида, кривая блеска представляет собой двойную волну за период (фотометрический период вдвое меньше орбитального). Форма кривой блеска близка к синусоиде, хотя и несколько отличается, прежде всего, в главном (фаза 0.0) и вторичном (фаза 0.5) минимумах: за счет заполнения полости Роша звезда немного отличается от эллипсоида, имея, скорее, грушевидную форму.

Полная амплитуда орбитальной переменности составляет $0.^m05$ и одинакова во всем оптическом ($UBVR$) и ближнем ИК (IJK) диапазонах (чисто геометрический эффект). Небольшая амплитуда указывает на малый наклон плоскости орбиты, так как максимальная амплитуда эффекта эллипсоидальности составляет $0.^m3$ при $i = 90^\circ$. Кривая лучевой скорости из [9], свернутая с орбитальным периодом, показана на рис. 1, а кривая блеска в полосе V – на рис. 2. Сплошной линией показана теоретическая кривая эллипсоидальности [27]. Сравнивая рис. 1 и рис. 2, видим, что минимум соответствует переходу лучевой скорости через ноль. Главный минимум – верхнее соединение рентгеновского источника (впереди оптическая звезда – сверхгигант).

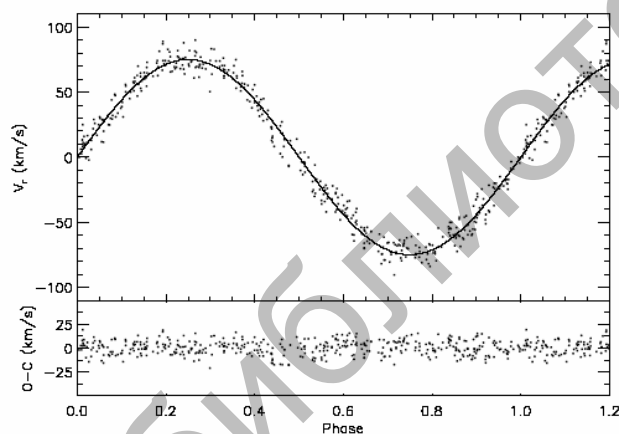
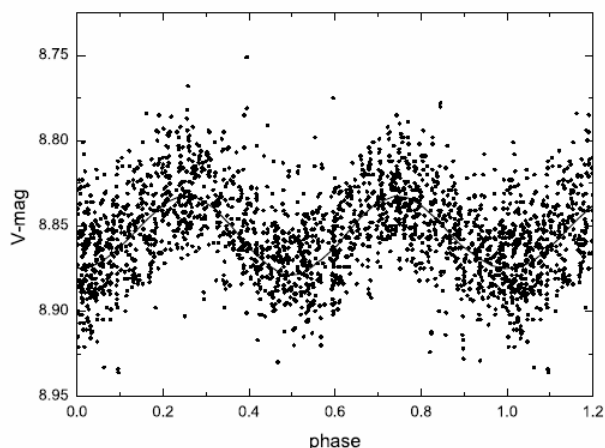


Рис. 1. Кривая лучевой скорости по всем известным данным по сравнению с синусоидой (сплошная линия), внизу – отклонения от синусоиды

Дисперсия точек на кривой блеска обусловлена флуктуационной переменностью, связанной, скорее всего, с газовыми потоками в системе (вклад аккреционного диска очень мал). В отличие от регулярной орбитальной переменности, амплитуда которой одинакова во всем оптическом диапазоне, амплитуда флуктуационной, неправильной, переменности увеличивается с уменьшением длины волны. Так, в полосе U амплитуда флуктуационной переменности в полтора раза больше, чем в V). Характерное время такой переменности – от минут до часов, так что в отдельные периоды орбитальная кривая блеска сильно искажается [12; 13]. Причем чаще «пропадает» второй максимум (фаза 0.75). Это, видимо, связано с газовым потоком вещества, истекающего из сверхгиганта через первую точку Лагранжа L_1 .



4. Переменность в рентгене и радио. В июне 1996 г. начались регулярные рентгеновские наблюдения Cyg X-1 на спутнике RXTE в диапазоне 2–10 кэВ, а несколько позже – радионаблюдения в диапазоне 2–15 ГГц. Природа переменности в рентгене и радио совсем другая: наблюдается одна волна за период. Но если в рентгене минимум совпадает с главным минимумом в оптическом диапазоне (фаза 0.0, верхнее соединение рентгеновского источника), то в радио минимум запаздывает относительно оптического. Причем запаздывание увеличивается с уменьшением частоты: от $0,12P$ на частоте 15 ГГц до $0,29P$ на частоте 2,25 ГГц [21]. Максимум и в рентгене, и в радио приходится на фазу 0,5 – вторичный минимум оптической кривой блеска (в радио с соответствующим запаздыванием), т.е. нижнее соединение рентгеновского источника.

Наиболее полное исследование переменности рентгеновской двойной системы Cyg X-1/V1357 Cyg в разных диапазонах – от жесткого рентгена до радио – проведено в работе [23] по наблюдениям 1996–1998 г.г. Известно, что рентгеновский источник Cyg X-1 может иметь два состояния по рентгеновому потоку: «Hard State – L/H – Low/Hard» (основное состояние – низкий поток в мягком рентгене и высокий в жестком) и «Soft State – H/S – High/Soft» – вспышки в мягком рентгене длительностью 2–3 месяца. Самая известная такая вспышка наблюдалась летом 1996 г., когда начал работать рентгеновский спутник RXTE (рис. 1 в [23]). К сожалению, радионаблюдения начались позже, когда эта вспышка («переход») закончилась. Однако по более ранним наблюдениям известно, что в H/S радиопоток низкий.

Оказалось, что в H/S орбитальная модуляция почти полностью отсутствует, даже в оптическом диапазоне. Но в L/H орбитальная модуляция четко проявляется как в оптическом и ИК диапазонах (двойная волна), так и в рентгеновском и радио (одна волна за период). Орбитальная модуляция видна даже в жестком рентгене, хотя и значительно слабее, чем в мягком (см. рис. 2 в [23]). Прецессионный

период 294^d , обнаруженный ранее в рентгене и оптике [14; 15], наблюдался также и в 1996–1998 гг., но, во-первых, только в стадии L/H, во-вторых, он был в 2 раза меньше, 147 дней [23; 24], т.е. в это время наблюдалась двойная волна прецессионного периода.

По результатам анализа переменности Cyg X-1/V1357 Cyg в 1996–1998 г.г. авторы [23] предложили модель этой двойной системы, объясняющую:

- 1) орбитальную модуляцию во всем спектральном диапазоне;
- 2) долгопериодическую (прецессионную) модуляцию;
- 3) отсутствие оптической и рентгеновской орбитальной модуляции в H/S;
- 4) уменьшение радиопотока во время H/S;
- 5) коррелированные вспышки в рентгене и радио и некоторые другие особенности рентгеновской, оптической и радио переменности.

Ответы на эти вопросы, анализ амплитуды орбитальной и прецессионной переменности в 1996–1998 г.г. и возможная физическая интерпретация (табл.) привели к схематической модели рентгеновской двойной системы Cyg X-1/V1357 Cyg, учитывающей все отмеченные особенности (см. рис. 7 в [23]) в состояниях Low/Hard и High/Soft:

Low/Hard

- оптика + ИК – приливно-деформированная O-звезда;
- эмиссионные линии – область точки Лагранжа L_1 ;
- мягкий рентген – аккреционный диск, наклоненный к плоскости орбиты и прецессирующий с периодом 147 дней;
- жесткий рентген – комптонизирующая корона диска;
- радио-струи, перпендикулярные плоскости диска и прецессирующие вместе с ним;
- большой внутренний радиус диска, важную роль играет ADAF (advection-dominated accretion flow);
- гравитационно сфокусированный звездный ветер.

High/Soft

- оптика + ИК – то же, но есть дополнительный прогрев O-звезды рентгеновским излучением;
- мягкий рентген – очень яркий аккреционный диск с внутренним радиусом до последней устойчивой орбиты вокруг черной дыры;
- меньшая роль ADAF;
- нет радиоизлучения – отсутствие струй;
- нет жесткого рентгена – отсутствие комптонизирующей короны;
- гравитационно сфокусированный звездный ветер.

Таблица

Результаты анализа орбитальной и прецессионной переменности Суг X-1

Диапазон	% Орбитальной модуляции	Физическая интерпретация	% Прецессионной модуляции	Физическая интерпретация
20–100 кэВ	2	Погл. в зв. ветре	18	Прецессия диска/струй
2–10 кэВ	9	Погл. в зв. ветре	26	Прецессия диска
<i>U</i> (0.36 мкм)	3	Эллипсоидальность	2	Прецессия диска?
<i>B</i> (0.43 мкм)	3	Эллипсоидальность	2	Прецессия диска?
<i>V</i> (0.55 мкм)	3	Эллипсоидальность	2	Прецессия диска?
<i>J</i> (1.25 мкм)	4	Эллипсоидальность	?	
<i>H</i> (1.65 мкм)	5	Эллипсоидальность	?	
<i>K</i> (2.20 мкм)	3	Эллипсоидальность	?	
15 ГГц	19	Погл. в зв. ветре	24	Напр./проекция струи
8.3 ГГц	18	Погл. в зв. ветре	26	Напр./проекция струи
2.3 ГГц	7	Погл. в зв. ветре	17	Напр./проекция струи

5. Переменность сверхгиганта в Суг X-1/V1357 Суг. Самый последний результат в исследовании этой рентгеновской системы – обнаружение долговременной переменности сверхгиганта 09.7Iab – главной звезды системы [26]. Как уже отмечалось, еще в 1997 г. авторы [22] обратили внимание на вековое изменение блеска сверхгиганта. Следующие 10 лет исследований, фотометрических и спектральных, дали совершенно новый и неожиданный результат. Оказалось, что в 1990–2000 г.г. сверхгигант в системе Суг X-1 испытал «медленную» вспышку с максимумом в 1995–1997 г.г. Анализ фотометрической (*UBV*) и спектральной (линия гелия He I λ 4713Å) переменности [26] показал, что во время вспышки радиус сверхгиганта уменьшился, а температура поверхности увеличилась на 2000–3000 градусов, что и привело к 10-ти процентному увеличению светимости в полосе *U* (в других – меньше).

В 2000 г. светимость звезды стала уменьшаться, и к 2003 г. упала ниже среднего уровня 1971–1985 г.г. (за счет уменьшения температуры). При этом увеличился радиус звезды, и, соответственно, степень заполнения полости Роша. Последнее привело к увеличению

темпа аккреции и, как следствие, увеличению рентгеновской активности (рис. 3). На этом рисунке показана корреляция между уменьшением блеска и увеличением рентгеновской активности в мягком диапазоне.

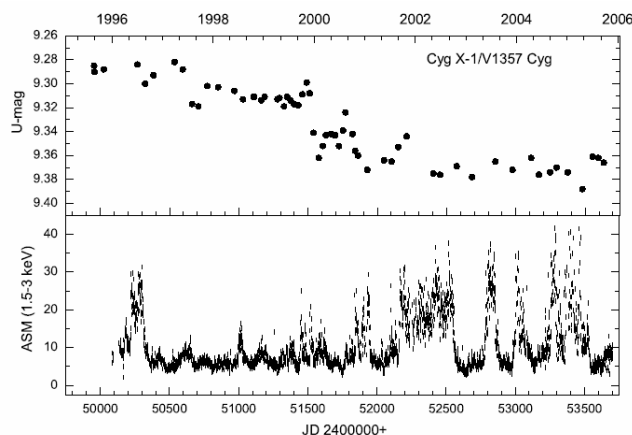


Рис. 3. Оптическая (фильтр U) и рентгеновская (ASM 1.5–3 кэВ) кривые блеска Cyg X-1/V1357 Cyg в 1995–2005 г.г. Видно сильное увеличение рентгеновской активности в минимуме блеска

Заключение. За 35 лет исследований (оптических, спектральных, ИК, рентгеновских, радио) двойной системы Cyg X-1/V1357 Cyg решена основная задача – природа переменности в широком диапазоне частот от рентгена до радио, определены с высокой точностью элементы орбиты и массы компонент. Полностью подтвержден первоначальный вывод о большой массе вторичной, невидимой компоненты, в 3 раза превышающей верхний предел массы нейтронной звезды. Это укрепляет предположение, что компактный релятивистский объект в системе является, скорее всего, черной дырой (полное доказательство – обнаружение горизонта событий, но как это сделать, пока никто не знает).

В то же время остается и много невыясненных вопросов. В частности, например, дополнительное узконаправленное излучение в главном минимуме. В настоящее время проводится анализ проводившихся в течение последних 10 лет специальных наблюдений в главном минимуме, так что это проблема, возможно, будет решена в ближайшее время.

Не окончательно решен и вопрос о прецессионном периоде – почему в 1980-х годах наблюдался период 294 дня, в 1996–1998 – 147 дней? В другой рентгеновской двойной системе, Her X-1/HZ Her, прецессионный период 35 дней наблюдается неизменным с момента обнаружения объекта (1969 г.) и по настоящее время. Правда, в отличие от Cyg X-1, в системе Her X-1 компактный объект (вторичная компонента) – нейтронная звезда.

Список литературы

1. Bowyer S., Byram E.T., Chubb T.A., Friedmann H. // Science. 1965. V. 147. P. 394.
2. Giacconi R., Gorenstein P., Gursky H., Usher P.D., Waters J.R., Sandage A., Osmer P., Peach J.V. //Astrophys. J. (Letters). 1967. L119.
3. Braes L.L.E., Miley G.K. //Nature. 1971. V.232. P.246.
4. Bolton C.T. //Nature. 1972. V.235. P.271.
5. Webster B.L., Murdin P. //Nature. 1972. V.235. P.37.
6. Лютый В.М. //IAU Circ. 1972. № 2395.
7. Лютый В.М. //Переменные звезды. 1972. Т.18. С.417.
8. Лютый В.М, Слюняев Р.А., Черепашук А.М. //Астроном. журн. 1973. Т.50. С.3.
9. Brocksopp C., Tarasov A.E., Lyuty V.M., Roshe P. //Astron. and Astrophys. 1999. V.343. P.861.
10. Herrero A., Kudritzki R.P., Gabler R., Vilchez J.M., Gabler A. //Astronomy and Astrophysics. 1995. V.297. P.556.
11. Margon B., Bowyer S. //Astrophys. J. (Letters). V.185. P.L113.
12. Лютый В.М, Слюняев Р.А., Черепашук А.М. //Астроном. журн. 1974. Т.51. С.1150.
13. Walker E.N., Quintanilla A.R. //MNRAS. 1978. V.182. P.315.
14. Priedhorsky W.C., Terrel J., Holt S.S. //Astrophys.J. 1983. V.270. P.233
15. Kemp J.C., Barbour M.S., Henson G.D. et al. //Astrophys. J. (Letters). 1983. V.271. P.L65.
16. Лютый В.М. // Астроном. журн. 1985. Т.62. С.731.
17. Кемп Дж. (Kemp J.), Карицкая Е.А., Кумсиашвили М.И., Лютый В.М., Хрузина Т.С., Черепашук А.М. //Астроном. журн. 1987. Т.64. С.326.
18. Paciesas W.S., Robinson C.R., McCollough M.L., Zhang S.N., Harmon B.A., Wilson C.A. //Proc. 4th Compton Symp., Am. Ins. Phys., Woodbury, eds. C.D.Dermer, M.S.Strickman, J.D.Kurfess, NY. 1997. P.834.
19. Han X. PhD thesis, New Mexico Institute of Mining and Technology, 1993.
20. Волошина И.Б., Лютый В.М. //Astronomische Nachrichten. 1995. V.316, N.2. P.85.
21. Pooley G.G., Fender R.P., Brocksopp C. //MNRAS. 1999. V.302. L1.
22. Волошина И.Б., Лютый В.М., Тарасов А.Е. //Письма в Астроном. журн. 1997. Т.23. С.335.
23. Brocksopp C., Fender R.P., Larionov V., Lyuty V.M., Tarasov A.E., Pooley G.G., Paciesas W.S., Roche P. //MNRAS. 1999. V.309. P.1063.
24. Карицкая Е.А., Волошина И.Б., Горанский В.П., Гранкин К.Н., Джаниашвили Э.Б., Ежкова О.В., Кочиашвили Н.Т., Кумсиашвили М.И., Кусакин А.В., Лютый В.М., Мельников С.Ю., Метлова Н.В. //Астроном. журн. 2001. Т.78, №5. С.408.
25. Tarasov A.E., Brocksopp C., Lyuty V.M. //Astron. and Astrophys. 2003. V.402. P.237-246.
26. Karitskaya E.A., Lyuty V.M., Bochkarev N.G., Shimanskii V.V., Tarasov A.E., Bondar A.V., Galazutdinov G.A., Lee B.-C., Metlova N.V. //Inform. Bull. of variable stars. 2006. N.5678. P.1-4.
27. Балог Н.И., Гончарский А.В., Черепашук А.М. //Письма в Астроном. журн. 1981. Т.7. С.605.