

УДК 524.387-735

ПАРАМЕТРЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ НОВОЙ V404 Cyg – ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ С ЧЕРНОЙ ДЫРОЙ

© 2004 г. А. М. Черепашук^{1,2}, Н. В. Борисов³,
М. К. Абубекеров¹, Д. К. Клочков¹, Э. А. Антохина²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория Н. Архыз, Россия

Поступила в редакцию 15.03.2004 г.; принята в печать 27.05.2004 г.

Представлены данные спектроскопических наблюдений системы V404 Cyg, полученные на 6-м телескопе САО РАН в 2001–2002 гг. Изложены результаты статистического подхода к интерпретации сводной кривой лучевых скоростей рентгеновской двойной V404 Cyg. На основе анализа сводной кривой лучевых скоростей в рамках модели Роша по синтетическому профилю линии поглощения CaI 6439.075 Å получена зависимость массы рентгеновского компонента m_x от массы оптического компонента m_v . С привлечением значения наклона орбиты $i = 54^\circ - 64^\circ$, оцененного по эффекту эллипсоидальности оптической звезды, и отношения масс компонент $q = m_x/m_v = 16.7$, найденного по вращательному уширению линий, масса черной дыры получается равной $m_x = 10.65 \pm 1.95 M_\odot$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская новая GS 2023+338 открыта во время вспышки 22 мая 1989 г. с борта спутника Гинга [1]. В работе [2] открытие было подтверждено. Во время вспышки блеск GS 2023+338 увеличился с $V \sim 18.3^m$ до $V = 11.6^m$. Вскоре рентгеновский источник был отождествлен с оптической звездой V404 Cyg, классифицированной как новая после вспышки 1938 г. [3, 4].

Рентгеновская новая V404 Cyg состоит из оптической звезды-субгиганта спектрального класса K0IV, заполняющей свою полость Роша, и черной дыры, аккрецирующей вещество из диска-накопителя. Функция масс оптического компонента в V404 Cyg имеет значение $f_v = 6.08 \pm 0.06 M_\odot$ [5], что намного превышает предельную массу нейтронной звезды и позволяет говорить о компактном объекте рентгеновской новой V404 Cyg как о черной дыре. Отсутствие эффекта рентгеновского пульсара от компактного объекта не позволяет определить массу оптического компонента. Оценка массы оптического компонента, произведенная по спектральному классу, колеблется от $0.5 M_\odot$ до $1.0 M_\odot$ [6].

Параметры рентгеновской системы известны недостаточно точно. В работе [7] из кривой блеска, полученной в фильтре I , определен возможный диапазон наклона орбиты $46^\circ - 73^\circ$ и отношение масс компонент $q = m_x/m_v = 8 - 12$. Исходя из

найденного значения полуамплитуды кривой лучевых скоростей $K_v = 211 \pm 4$ км/с функция масс оптической звезды равна $f_v = 6.3 \pm 0.3 M_\odot$. Полагая массу оптического компонента близкой к $1.0 M_\odot$, авторы [7] приходят к выводу, что масса компактного объекта равна $8 - 12 M_\odot$.

В работе [5] полуамплитуда кривой лучевых скоростей оптической звезды была уточнена: $K_v = 208.5 \pm 0.7$ км/с, что соответствует уже приведенному выше значению функции масс $f_v = 6.08 \pm 0.06 M_\odot$. Оценка отношения масс компонент $q = 16.7 \pm 1.3$ произведена авторами по вращательному уширению линий металлов из спектрального диапазона $6400 - 6600$ Å. В предположении, что верхний предел наклона орбиты составляет 80° (значение получено по отсутствию рентгеновского затмения [8]), а масса оптической звезды $0.2 - 1.3 M_\odot$, масса компактного объекта получается заключенной в интервале $7 - 24 M_\odot$.

Исследование кривой блеска системы V404 Cyg в фильтре K дает значение наклона орбиты $52^\circ - 60^\circ$ [6]. Опираясь на значение отношения масс компонент $q = 16.7$ [5] и значение массы оптического компонента $0.5 - 1.0 M_\odot$, масса компактного объекта составляет $10 - 15 M_\odot$.

По результатам анализа кривой блеска в фильтре H возможное значение наклона орбиты находится в пределах $59^\circ - 73^\circ$ [9]. Из чего следует, что максимальное значение массы черной дыры не

Таблица 1. Журнал спектроскопических наблюдений рентгеновской новой V404 Cyg

Дата	UT	Экспозиция, с	Количество спектров	Диапазон, Å	Разрешение, Å
12 июля 2001 г.	18:07–20:30	2700	3	5700–8200	5.5
14 июля 2001 г.	18:52–20:26	2700	2	5700–8200	5.5
15 июля 2001 г.	20:20–21:53	2700	2	5700–8200	5.5
16 июля 2001 г.	21:09–22:40	2700	2	5700–8200	5.5
14 июня 2002 г.	17:35–20:14	1800	5	5500–6800	3.0
09 июля 2002 г.	18:25–19:35	1800	2	5500–6800	3.0
10 июля 2002 г.	18:43–20:20	1800	3	5500–6800	3.0
11 июля 2002 г.	16:52–20:02	1800	6	5500–6800	3.0
12 июля 2002 г.	18:56–19:57	1800	2	5500–6800	3.0

превышает $12.5 M_{\odot}$. При отношении масс компонент $q = 16.7$ значение массы черной дыры близко к $9.5 M_{\odot}$.

Анализ кривой блеска в фильтре R с учетом спектроскопической оценки отношения масс компонент $q = 16.7$ [5] дает наклонение орбиты $i = 56^{\circ} \pm 2^{\circ}$ [10]. Также в работе [10] выявлена 6-ч переменность кривой блеска. Помимо этого в рентгеновской новой V404 Cyg наблюдается 6-ч переменность профиля линии $H\alpha$, но корреляции между блеском системы и переменностью линии $H\alpha$ отсутствует [11, 12]. В работе [13] дано описание роста и уменьшения эквивалентной ширины, а также формы профиля эмиссионной линии $H\alpha$

Таблица 2. Наблюдаемые барицентрические лучевые скорости рентгеновской новой V404 Cyg (за начальную юлианскую дату принята $JD_0 = 2448813.873$ [5])

Фаза	Лучевая скорость, км/с
0.229	187.10
0.295	195.90
0.365	161.20
0.387	139.80
0.535	–58.39
0.606	–111.09
0.696	–198.10
0.770	–212.50
0.930	–68.42

на временах вплоть до $\sim 1-2$ ч. Среди возможных причин, вызывающих вариацию эквивалентной ширины линии эмиссии $H\alpha$, авторы называют флуктуации фотоионизирующего потока со стороны компактного объекта, порождаемого локальными вспышками в аккреционном диске или в дисковой короне [13]. Окончательный механизм, вызывающий быстрые изменения эквивалентной ширины и профиля линии $H\alpha$, не установлен. Также до настоящего времени не объяснена асимметрия крыльев линии эмиссии $H\alpha$ (более подробно см. [13]).

Нашей целью являлось уточнение кривой лучевых скоростей оптической звезды рентгеновской новой V404 Cyg и самих параметров тесной двойной системы (ТДС), а также исследование кратковременной переменности формы профиля эмиссионной линии $H\alpha$.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Два сета спектроскопических наблюдений рентгеновской новой V404 Cyg были выполнены на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории в период с 12 по 16 июля 2001 г. и с 14 июня по 12 июля 2002 г. Наблюдения проводились в первичном фокусе с использованием светосильного спектрографа с длинной щелью UAGS и ПЗС-приемника РМ1024 площадью 1024×1024 пикс. (с размером пиксела 24×24 мкм). При наблюдениях 2001 г. использовалась дифракционная решетка с дисперсией 651 штр./мм, что обеспечило обратную линейную дисперсию 3.1 Å/пикс. в исследуемом спектральном диапазоне 5700–8200 Å. Разрешение полученных спектрограмм составило 5.5 Å.

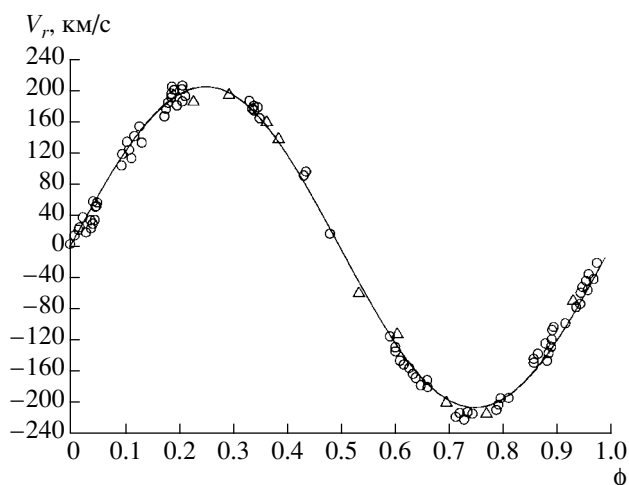


Рис. 1. Сводная кривая наблюдаемых лучевых скоростей оптической звезды рентгеновской новой V404 Cyg. Светлые кружки — наблюдаемые лучевые скорости, полученные по абсорбционным линиям металлов Казаресом и Чарльзом [5]. Светлые треугольники — лучевые скорости, полученные в данной работе. Сплошная линия — теоретическая кривая лучевых скоростей в модели Роша, определенная по синтетическому профилю линии поглощения CaI 6439.075 Å без учета влияния аппаратной функции при значениях $m_x = 10.46 M_\odot$, $m_v = 0.7 M_\odot$ и $i = 59^\circ$ (остальные параметры см. в табл. 3). Штриховая линия — теоретическая кривая лучевых скоростей в модели точечных масс для $m_x = 10.46 M_\odot$, $m_v = 0.7 M_\odot$ и $i = 59^\circ$, которая почти совпадает с кривой лучевых скоростей для модели Роша.

При наблюдениях в 2002 г. использовалась дифракционная решетка R1305/17 с дисперсией 1305 штр./мм, что обеспечило обратную линейную дисперсию 1.5 Å/пикс. и позволило получить в исследуемом спектральном диапазоне 5500–6800 Å разрешение 3.0 Å. Журнал наблюдений приведен в табл. 1.

Калибровка всех полученных спектров производилась по HeNe-стандарту. Обработка спектрограмм была выполнена в системе MIDAS. При обработке спектров использовалась стандартная процедура поправки на плоское поле, вычета фона, поправки за “байес” и устранение “горячих пикселей”. Для всех спектрограмм в качестве спектрофотометрического стандарта использовался одиночный белый карлик BD+284211. В качестве стандарта лучевых скоростей использовалась звезда спектрального класса K0IV HR8857 [5].

Лучевые скорости новой V404 Cyg определены по сдвигу бленд спектрального интервала 6400–6520 Å относительно того же участка спектра стандарта лучевых скоростей HR 8857. В табл. 2

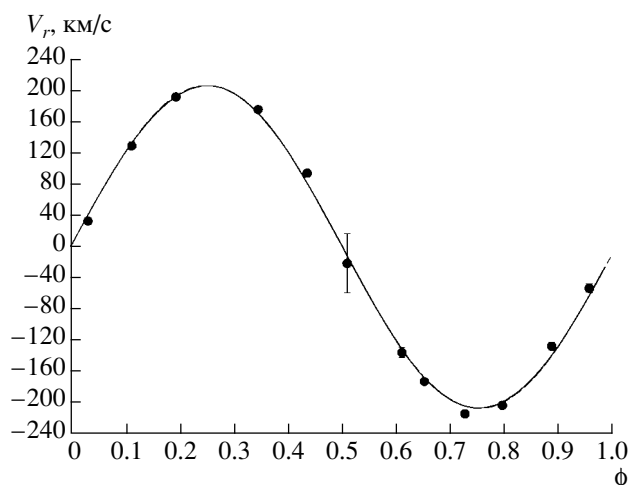


Рис. 2. Лучевые скорости, усредненные внутри фазовых интервалов (темные кружки). Для сравнения приведена теоретическая кривая лучевых скоростей в модели Роша (сплошная линия) и модели точечных масс (штриховая линия) для $m_x = 10.46 M_\odot$, $m_v = 0.7 M_\odot$ и $i = 59^\circ$.

приведены наблюдаемые лучевые скорости оптической звезды системы V404 Cyg, исправленные за скорость движения Земли и систематическую скорость.

Для сводной кривой лучевых скоростей наряду с нашими спектральными данными использовались лучевые скорости из работы [5], определенные по смещению спектрального участка 6212–6605 Å относительно того же участка спектра стандарта лучевых скоростей HR 8857. На основе сводной кривой был уточнен орбитальный период ТДС V404 Cyg. За начальную юлианскую дату была принята $JD_0 = 2448813.873$ [5]. Новое значение орбитального периода в пределах ошибок согласуется с прежним значением $P_{orb} = 6^d4714 \pm \pm 0.0001$ [5] и составляет $P_{orb} = 6^d4715 \pm 0.0001$.

Сводная кривая наблюдаемых лучевых скоростей на основе наших спектральных данных и данных работы [5] представлена на рис. 1. Для уменьшения влияния случайных ошибок лучевые скорости были усреднены внутри фазовых интервалов (рис. 2). Поскольку наблюдаемые лучевые скорости недостаточно равномерно распределены по фазовым интервалам, то среднеквадратичное отклонение для среднего значения лучевой скорости на фазе 0.508 составило 37.80 км/с (или 18.1% от полуамплитуды лучевых скоростей). Столь большое значение отклонения связано с большим градиентом регулярных изменений лучевых скоростей вблизи фазы 0.5. По причине того, что значение среднеквадратичного отклонения наблюдаемой лучевой скорости σ_{V_r} на фазе 0.508 намного превышает среднеквадратичные отклонения лучевой

Таблица 3. Численные значения параметров, используемых для синтеза кривых лучевых скоростей оптического компонента V404 Cyg в модели Роша

P , сут	6.4715	Период
e	0.0	Эксцентриситет
i , град	54, 59, 64	Наклонение орбиты
μ	1.0	Коэффициент заполнения полости Роша оптическим компонентом
f	1.0	Коэффициент асинхронности вращения оптического компонента
$T_{\text{эф}}$, К	5500	Эффективная температура оптического компонента
β	0.08	Коэффициент гравитационного потемнения
k_x	0.03	Отношение рентгеновской светимости релятивистского компонента к болометрической светимости оптического компонента L_x/L_v
A	1.0	Коэффициент переработки рентгеновского излучения
u	0.5	Коэффициент потемнения к краю

скорости на остальных фазовых интервалах ($\sim(2-3)\%$ от полуамплитуды лучевых скоростей; рис. 2), и тем самым вносит заметное “возмущение” в значение невязки (см. далее формулу (1)), интерпретация средней кривой лучевых скоростей была выполнена без учета среднего значения наблюдаемой лучевой скорости на фазе 0.508.

3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СРЕДНЕЙ КРИВОЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

В рентгеновской новой V404 Cyg оптический компонент заполняет критическую полость Роша. Вследствие приливного воздействия со стороны релятивистского спутника форма оптического компонента отличается от сферической. Обращенная к релятивистскому компоненту сторона прогрета исходящим от него рентгеновским излучением. Поэтому интерпретация усредненных лучевых скоростей была выполнена в модели Роша, позволяющей в первом приближении учесть вышеперечисленные эффекты взаимодействия компонентов. Значения параметров модели Роша рентгеновской двойной V404 Cyg приведены в табл. 3.

Наличие рентгеновского излучения, наблюдаемого от двойной системы V404 Cyg, свидетельствует о том, что оптический компонент, являющийся звездой спектрального класса K0IV, заполнил полость Роша. Поскольку заполнение полости Роша звездой спектрального класса K0IV

исчисляется ядерной шкалой времени $\sim 10^{10}$ лет, то орбита ТДС успевает округлиться, а вращение оптического компонента синхронизируется с орбитальным. Поэтому орбита рентгеновской новой V404 Cyg в наших расчетах была принята круговой, а коэффициент асинхронности вращения $f = 1.0$.

За неизвестные параметры ТДС приняты массы обоих компонентов и наклонение орбиты. Решение обратной задачи выполнено методом перебора по неизвестным параметрам. Для каждого значения массы оптического компонента m_v из дискретного набора значений $0.5 M_{\odot}$, $0.7 M_{\odot}$, $0.9 M_{\odot}$ при фиксированном значении наклонения орбиты i производился перебор по массе компактного объекта m_x . Результатом явились зависимости массы компактного объекта от массы оптического для наклонений орбиты 54° , 59° , 64° . Значения наклонения орбиты двойной системы выбраны на основе результатов интерпретации кривой блеска ТДС в фильтрах R , K и H , по результатам интерпретации которых значение i соответственно равно $56^{\circ} \pm 2^{\circ}$ [10], $56^{\circ} \pm 4^{\circ}$ [6] и $59^{\circ} - 73^{\circ}$ [9]. Проверка статистических гипотез об адекватности модели проводилась по уровню значимости $\alpha = 5\%$.

Так как лучевая скорость оптического компонента в данной работе и в работе Казареса и Чарльза [5] определена по линиям абсорбции металлов из спектрального диапазона $6200-6500 \text{ \AA}$,

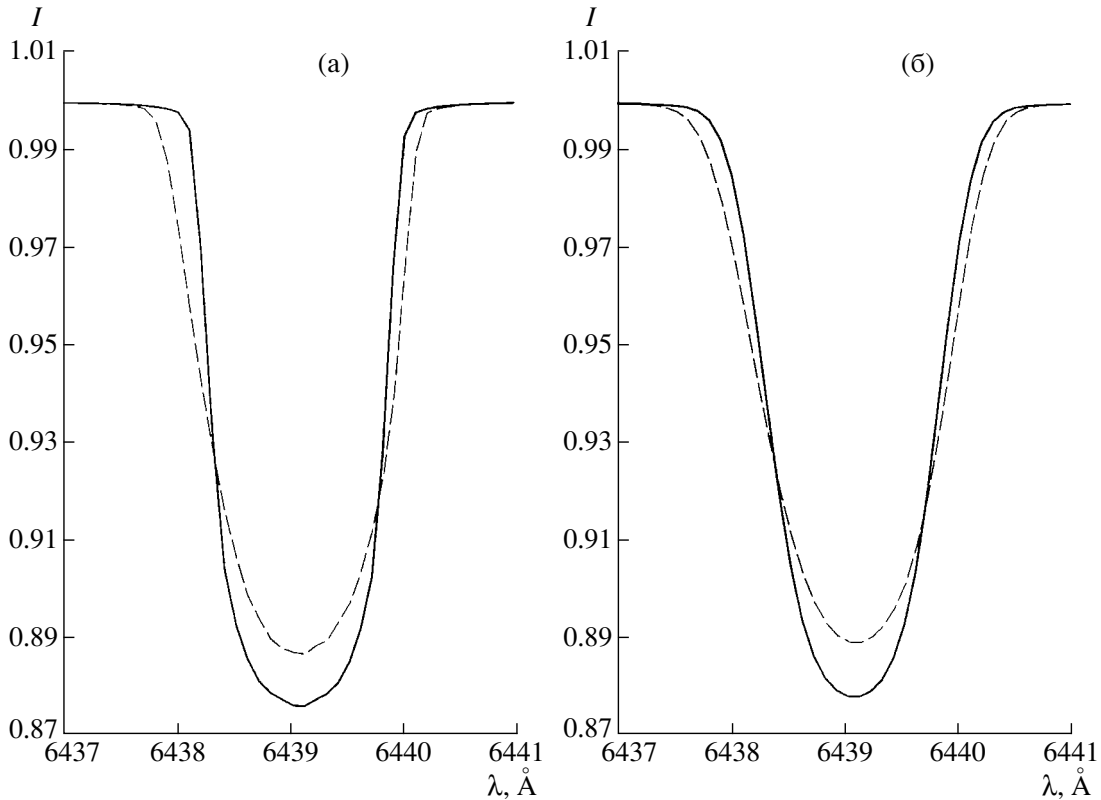


Рис. 3. (а) — Синтетические профили линии поглощения CaI 6439.075 Å, полученные в модели Роша при $m_x = 10.46 M_\odot$, $m_v = 0.7 M_\odot$ и $i = 59^\circ$ (остальные параметры см. в табл. 3) на орбитальной фазе 0.00 (сплошная линия) и 0.25 (штриховая линия). (б) — Те же профили свернутые с аппаратной функцией с FWHM = 0.5 Å на орбитальной фазе 0.00 (сплошная линия) и 0.25 (штриховая линия). Профили линий на орбитальной фазе 0.25 исправлены за доплеровское смещение.

то расчет теоретических лучевых скоростей произведен по синтетическому профилю линии поглощения CaI 6439.075 Å. Вследствие небольшой ширины абсорбционных линий металлов ~ 1 Å в спектре оптической звезды V404 Cyg теоретические кривые лучевых скоростей вычислялись по профилю линии CaI 6439.075 Å, свернутому с инструментальным профилем. В качестве инструментального профиля использовалась функция Гаусса с шириной на половине значения ее максимума (интенсивности) FWHM = 0.5 Å. Величина инструментального профиля FWHM принята равной 0.5 Å на основании того, что большинство лучевых скоростей, вошедших в сводную кривую (рис. 2) определены по спектрам, полученным со значением FWHM = 0.5 Å [5]. Для сравнения результатов интерпретация наблюдаемой средней кривой лучевых скоростей V404 Cyg была также выполнена по синтетическому профилю линии поглощения CaI 6439.075 Å без учета аппаратной функции. На рис. 3 представлены синтетические абсорбционные профили линии CaI 6439.075 Å на фазах орби-

тального периода 0.00 и 0.25 без учета влияния аппаратной функции и свернутые с аппаратной функцией.

Невязка между усредненной наблюдаемой кривой лучевых скоростей и теоретической вычислялась по формуле

$$\Delta(m_x) = \frac{\sum_{j=1}^M (n_j - 1) \sum_{j=1}^M n_j (V_j^{teor} - \bar{V}_j^{obs})^2}{M \sum_{j=1}^M n_j (n_j - 1) \sigma_j^2}, \quad (1)$$

где \bar{V}_j^{obs} — наблюдаемое среднее значение лучевой скорости на фазовом интервале с центром на фазе $\bar{\phi}_j$, V_j^{teor} — теоретическое значение лучевой скорости на этой фазе, σ_j — среднеквадратичное отклонение \bar{V}_j^{obs} от наблюдаемых значений лучевой скорости в данном фазовом интервале с центром в $\bar{\phi}_j$, M — количество фазовых интервалов, а n_j — число усредненных наблюдений лучевых скоростей в данном фазовом интервале.

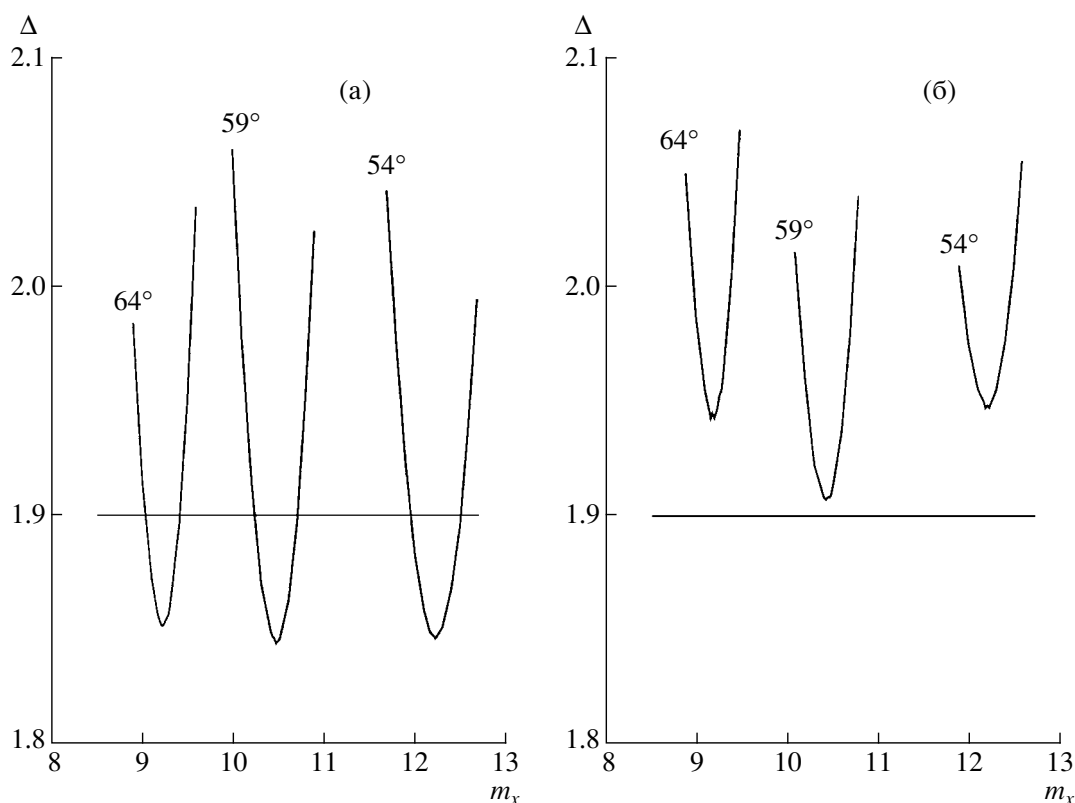


Рис. 4. Значения невязок, вычисленных при интерпретации кривой лучевых скоростей в модели Роша при $m_v = 0.7 M_\odot$ (остальные параметры см. в табл. 3) на основе синтетического профиля линии CaI 6439.075 Å с учетом влияния на него аппаратной функции с FWHM = 0.5 Å для наклонений орбиты $i = 54^\circ, 59^\circ, 64^\circ$. (б) — То же без учета влияния аппаратной функции на синтетический профиль линии CaI 6439.075 Å.

Величина $\Delta(m_x)$ распределена по закону Фишера $F_{M, \sum_{j=1}^M (n_j - 1), \alpha}$ [14]. Задавшись уровнем значимости α , можно найти доверительное множество для искомого параметра m_x при фиксированном значении m_v . Оно состоит из тех значений m_x , для которых выполняется условие

$$\Delta(m_x) \leq F_{M, \sum_{j=1}^M (n_j - 1), \alpha}.$$

Алгоритм расчета теоретических профилей линий поглощения и теоретических кривых лучевых скоростей изложен в [15, 16] и поэтому в данной работе не приводится. Отметим лишь, что в данном алгоритме при вычислении формы локального профиля линии поглощения CaI 6439.075 Å для каждой элементарной площадки решалось уравнение переноса излучения. В то время как в алгоритме синтеза кривых лучевых скоростей по линии поглощения Hγ [17] локальный профиль площадки вычислялся путем интерполяции табличного абсорбционного профиля Hγ из работы Куруца [18].

Значения невязок, вычисленных в процессе интерпретации средней наблюдаемой кривой лучевых скоростей, представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, учет влияния инструментального

профиля необходим. Теоретические кривые лучевых скоростей, полученные без учета влияния аппаратной функции на синтетический абсорбционный профиль линии поглощения CaI 6439.075 Å, не адекватны наблюдательным данным — модели ТДС отвергаются по уровню значимости $\alpha = 5\%$ (рис. 4б).

Зависимости между массами компонент для разных значений наклона орбиты, полученные в модели Роша на основе синтетического профиля CaI 6439.075 Å с учетом влияния на него аппаратной функции, представлены в табл. 4, без учета влияния аппаратной функции — в табл. 5. Графически результат представлен на рис. 5. Поскольку в случае неучета влияния аппаратной функции на профиль линии поглощения CaI 6439.075 Å невязки между теоретической и наблюдаемой кривой лучевых скоростей слишком велики, чтобы принять модель по уровню значимости $\alpha = 5\%$, то значения массы компактного объекта в табл. 5 и на рис. 5б приведены без доверительных интервалов.

Таблица 4. Зависимость массы релятивистского компонента от массы оптического компонента, полученная в модели Роша с учетом влияния аппаратной функции на синтезируемый профиль линии CaI 6439.075 Å для углов наклона орбиты 54°, 59°, 64°

m_v, M_\odot	m_x, M_\odot		
	$i = 54^\circ$	$i = 59^\circ$	$i = 64^\circ$
0.5	$11.87^{+0.24}_{-0.22}$	$10.13^{+0.21}_{-0.23}$	$8.87^{+0.22}_{-0.19}$
0.7	$12.22^{+0.30}_{-0.27}$	$10.46^{+0.25}_{-0.23}$	$9.21^{+0.21}_{-0.18}$
0.9	$12.56^{+0.28}_{-0.27}$	$10.78^{+0.26}_{-0.25}$	$9.53^{+0.20}_{-0.19}$

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФОРМЫ КРИВОЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ СИСТЕМЫ V404 Cyg ОТ НАКЛОНЕНИЯ ОРБИТЫ

Для выявления различия формы кривых лучевых скоростей от наклона орбиты системы V404 Cyg был выполнен специальный расчет теоретических кривых лучевых скоростей в модели Роша. Масса оптической звезды принята равной $m_v = 0.7 M_\odot$, масса черной дыры — $m_x = 10 M_\odot$. Расчет выполнен для наклонов орбиты $i = 40^\circ$, $i = 54^\circ$, $i = 64^\circ$ и $i = 80^\circ$. Значения остальных параметров модели Роша оставлены прежними (табл. 3). Поскольку с ростом наклона орбиты двойной системы величина полуамплитуды кривой лучевых скоростей K_v увеличивается, то вычисленные теоретические кривые лучевых скоростей были пронормированы на максимальное значение лучевой скорости из фазового интервала 0.0–0.5. Максимальное различие формы кривых лучевых скоростей достигалось на орбитальной фазе $\phi = 0.36$. Величина различия кривых лучевых скоростей для наклона орбиты $i = 40^\circ$ и $i = 80^\circ$ составила $\sim 0.3\%$ от полуамплитуды K_v с учетом влияния аппаратной функции на синтетический профиль CaI 6439.075 Å и $\sim 0.5\%$ без учета влияния аппаратной функции. Для сравнения напомним, что различие формы кривых лучевых скоростей ТДС с параметрами, близкими к системе Cyg X-1 ($q = m_x/m_v \simeq 0.5$), при изменении наклона орбиты с $i = 40^\circ$ на $i = 80^\circ$ составляло $\sim 3\%$ от полуамплитуды K_v [19].

В случае же увеличения наклона орбиты рентгеновской новой V404 Cyg с $i = 54^\circ$ до $i = 64^\circ$ форма кривой лучевых скоростей при учете влияния аппаратной функции на синтетический профиль линии поглощения CaI 6439.075 Å изменяется на $\sim 0.10\%$ от полуамплитуды K_v и на $\sim 0.13\%$ в случае пренебрежения сглаживанием аппаратной

Таблица 5. Зависимость массы релятивистского компонента от массы оптического компонента, полученная в модели Роша без учета влияния аппаратной функции на синтезируемый профиль линии CaI 6439.075 Å для углов наклона орбиты 54°, 59°, 64°

m_v, M_\odot	m_x, M_\odot		
	$i = 54^\circ$	$i = 59^\circ$	$i = 64^\circ$
0.5	11.83	10.10	8.86
0.7	12.20	10.42	9.18
0.9	12.54	10.77	9.48

функцией синтетического профиля линии поглощения CaI 6439.075 Å. Вследствие малого изменения формы кривой лучевых скоростей при изменении наклона орбиты значения минимумов невязок не столь сильно различаются для разных значений i , как в случае двойной системы Cyg X-1 [19, рис. 5] (рис. 4).

Величина средней квадратичной ошибки σ_{v_r} наблюдаемой средней кривой лучевых скоростей V404 Cyg составляет $\sim (2-3)\%$ от ее полуамплитуды K_v , что не позволяет произвести оценку наклона орбиты, как это было сделано в случае рентгеновской двойной Cyg X-1 [19]. Тем не менее модель Роша по-прежнему подтверждает возможность ее применения для оценки наклона ТДС по кривой лучевых скоростей — величина минимума невязки для разных наклонов орбиты различна (рис. 4). Особенно это заметно на рис. 4б. Для успешной оценки наклона орбиты по кривой лучевых скоростей рентгеновской новой V404 Cyg величина σ_{v_r} должна составлять $\sim 0.10\%$ от полуамплитуды K_v или в абсолютных единицах ~ 0.2 км/с. Поэтому дальнейшие высококачественные спектроскопические наблюдения системы V404 Cyg представляются весьма перспективными.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ V404 Cyg

Значение отношения масс компонентов $q = m_x/m_v$, полученное на основе вращательного уширения линий металлов в спектре оптического компонента рентгеновской новой V404 Cyg, составляет $q = 16.7$ [5]. Построив соответствующую прямую на зависимости между массами компонент (рис. 5), получим, что в пределах наклона орбиты $i = 54^\circ - 64^\circ$ масса черной дыры заключена в диапазоне $m_x = 8.7-12.6 M_\odot$, оптической звезды — в диапазоне $m_v = 0.52-0.76 M_\odot$. Таким образом, среднее значение массы черной дыры в системе V404 Cyg равно $10.65 \pm 1.95 M_\odot$.

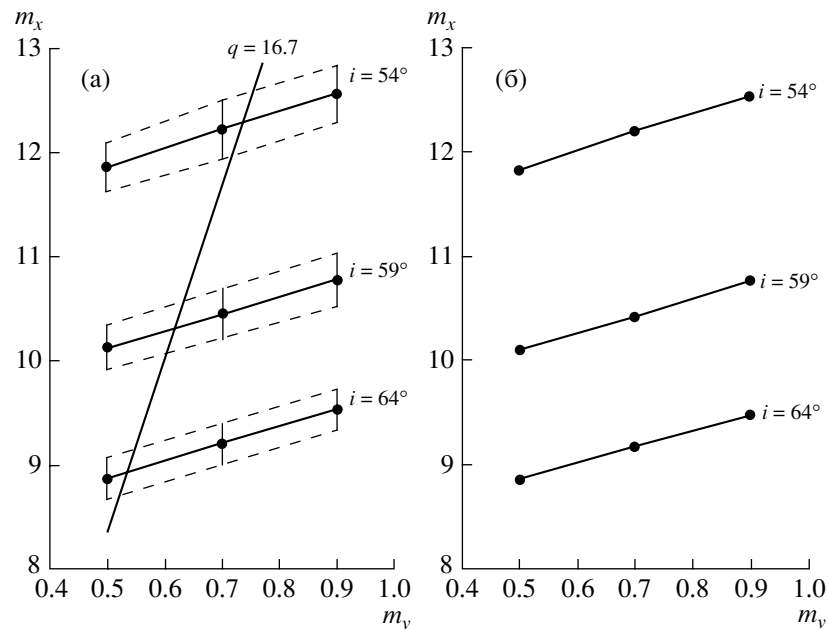


Рис. 5. (а) — Зависимость массы компактного объекта рентгеновской двойной V404 Cyg от массы оптической звезды, полученная из анализа средней кривой лучевых скоростей в модели Роша по профилю линии CaI 6439.075 Å с учетом влияния на него аппаратной функции с FWHM = 0.5 Å. Прямая линия — отношение масс компонент $q = m_x/m_v = 16.7$ согласно результатам [5]. (б) — То же без учета влияния аппаратной функции на синтетический профиль линии CaI 6439.075 Å.

6. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПРОФИЛЯ ЛИНИИ ЭМИССИИ $H\alpha$

В работе [11] впервые обращено внимание на S-волнову переменность профиля эмиссионной линии $H\alpha$. Полученный в [11] период переменности профиля линии эмиссии $H\alpha$ равен 5.7 ч. Позже, в исследовании [12] на основе большого числа спектрофотометрических данных 1990–1991 гг. период переменности линии эмиссии $H\alpha$ был уточнен. Линия показывала 5.656-ч переменность.

Наиболее детальное исследование оптической переменности и поведения линии $H\alpha$ на коротких временах рентгеновской новой V404 Cyg выполнено в [13]. Авторы работы [13] установили качественную корреляцию между поведением континуума и эквивалентной шириной линии $H\alpha$. При увеличение эквивалентной ширины линии $H\alpha$ наблюдается рост континуума. Изменения потока, как в континууме аккреционного диска, так и в линии $H\alpha$, происходят за 1–2 ч более чем в два раза.

В течение наблюдательных ночей 14 июня и 11 июля 2002 г. нами было получено соответственно 5 и 6 спектров в диапазоне 5500–6800 Å (табл. 1). Это позволило исследовать поведение линии эмиссии $H\alpha$ на временах ~ 30 мин. Профили линии эмиссии $H\alpha$ представлены на рис. 6. Средние за ночь профили линии $H\alpha$ представлены

на рис. 7. Средний профиль определен как среднеарифметический по всем профилям линии $H\alpha$ за ночь. Из рис. 6 и 7 видно, что профиль линии эмиссии $H\alpha$ претерпевает не только значительные изменения внутри одной ночи, но и сильно меняется от ночи к ночи.

Мы исследовали кратковременную переменность профиля линии $H\alpha$. Для оценки отклонения профиля линии $H\alpha$ от среднего за ночь профиля использовался статистический критерий Фишера. Для этого значение относительной интенсивности линии эмиссии $H\alpha$ были усреднены в интервалах длин волн ~ 5 Å. Значение невязки вычислялось посредством выражения

$$\Delta(I^{obs}(t)) = \frac{\sum_{j=1}^M (n_j - 1)}{M} \times \left(\frac{\sum_{j=1}^M n_j (I_j^{mean} - \bar{I}_j^{obs}(t))^2}{\sum_{j=1}^M n_j (n_j - 1) \sigma_j^2} \right), \quad (2)$$

где \bar{I}_j^{obs} — наблюдаемое среднее значение относительной интенсивности линии $H\alpha$ в интервале длин волн с центром на $\bar{\lambda}_j$ в момент времени t , I_j^{mean} — среднее значение относительной интен-

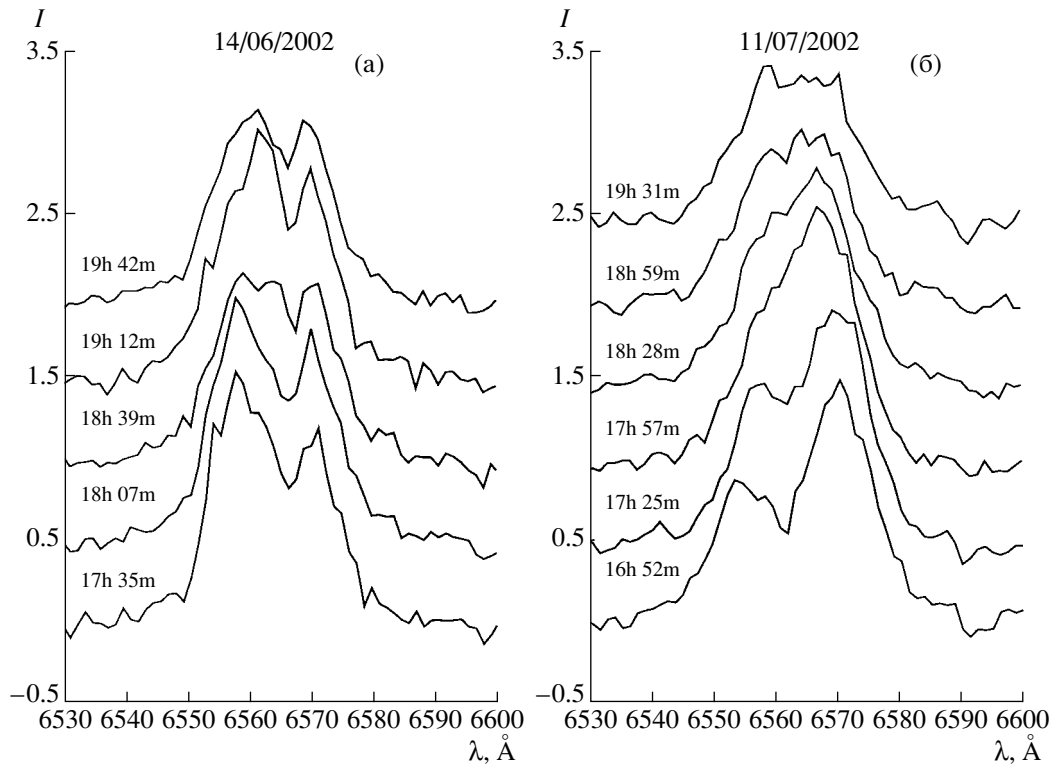


Рис. 6. Профиль линии эмиссии $H\alpha$, полученный в течении ночи 14 июня 2002 г. в орбитальной фазе $\phi = 0.365$ (а) и в течении ночи 11 июля 2002 г. в орбитальной фазе $\phi = 0.535$ (б). Для наглядности профили искусственно разнесены по шкале ординат.

сивности среднего профиля линии $H\alpha$ в интервале длин волн с центром на $\bar{\lambda}_j$ в момент времени t , σ_j — среднеквадратичное отклонение для $\bar{I}_j^{obs}(t)$ в данном интервале длин волн с центром в $\bar{\lambda}_j$, M — количество интервалов длин волн, а n_j — число усредненных значений относительной интенсивности в данном интервале длин волн.

Задавшись уровнем значимости α , мы нашли моменты времени t , в которые профиль линии $H\alpha$ значимо отклонялся от среднего за ночь. Отклонение профиля от среднего полагалось значимым в случае

$$\Delta(I^{obs}(t)) \geq F_{M, \sum_{j=1}^M (n_j - 1), \alpha}.$$

Для работы был выбран уровень значимости $\alpha = 5\%$. Результат представлен на рис. 8. Как следует из рис. 8, ночью 14 июня значимые отклонения от среднего произошли за ~ 2 ч. Ночью 11 июля значимые отклонения профиля линии эмиссии происходили в течение $\sim 0.5-1$ ч. Следует обратить внимание на поведение линии. Фаза интенсивного “роста” компоненты эмиссии может внезапно смениться фазой ее уменьшения и наоборот. Причем смена фаз происходит за время ~ 0.5 ч (рис. 6б и 8б).

Природа переменности линии $H\alpha$ до сегодняшнего момента не установлена. Причиной S-волновой переменности профиля $H\alpha$ на корот-

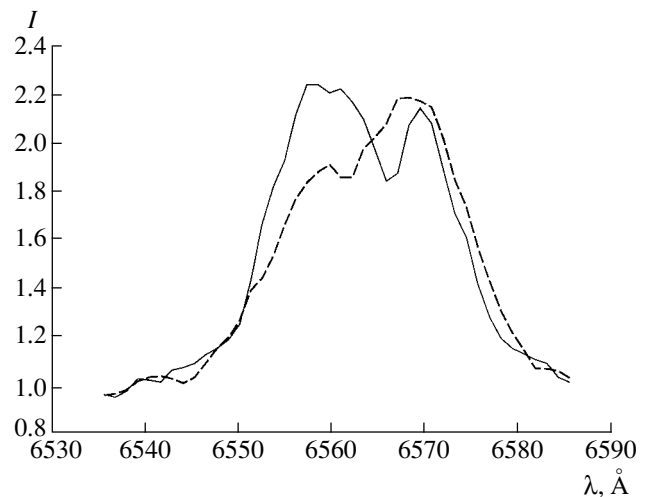


Рис. 7. Средний профиль линии эмиссии $H\alpha$, полученный в течении ночи 14 июня 2002 г. в орбитальной фазе $\phi = 0.365$ (сплошная линия) и в течении ночи 11 июля 2002 г. в орбитальной фазе $\phi = 0.535$ (штриховая линия).

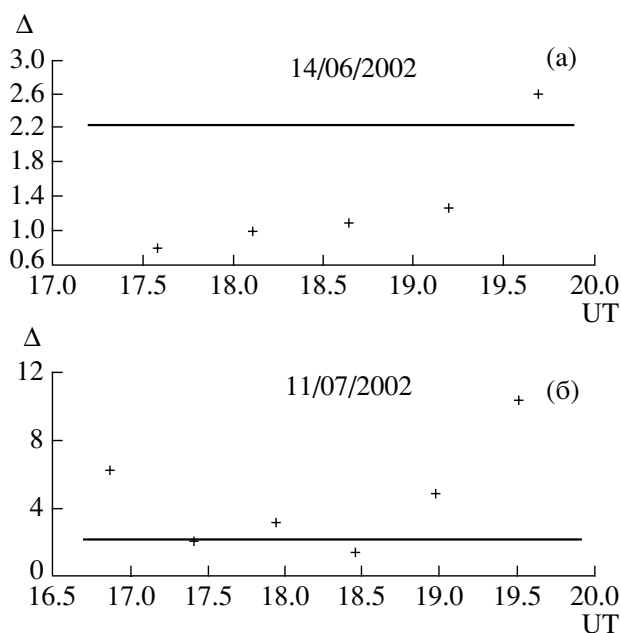


Рис. 8. Отклонения профиля линии эмиссии H α от среднего за ночь профиля для 14 июня 2002 г. в орбитальной фазе $\phi = 0.365$ (а) и для 11 июля 2002 г. в орбитальной фазе $\phi = 0.535$ (б). Прямые линии обозначают критические значения невязки по критерию Фишера по уровню значимости $\alpha = 5\%$.

ких временах предполагается следующее: движение горячего пятна в аккреционном диске [12], хромосферная активность оптического компонента, перезамыкание силовых линий магнитного поля в аккреционном диске [13]. Однозначный механизм, ответственный за S-волновую кратковременную переменность линии эмиссии H α рентгеновской новой V404 Cyg на сегодняшний момент неизвестен. Корректная интерпретация требует большего ряда наблюдений с высоким временным разрешением. Исследования в этом направлении необходимо продолжать.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы являются зависимости между массами компонент рентгеновской новой V404 Cyg, полученные в рамках модели Роша, для диапазона наклонений орбиты $i = 54^\circ - 64^\circ$. На основе полученных зависимостей и спектроскопически определенного значения отношения масс компонент $q = 16.7$ [5] получаем, что масса черной дыры $m_x = 10.65 \pm 1.95 M_\odot$, масса оптической звезды $m_v = 0.64 \pm 0.12 M_\odot$.

Наложить ограничение на наклонение орбиты рентгеновской новой V404 Cyg по наблюдаемой средней кривой лучевых скоростей на сегодняшний момент не представляется возможным. Требуемая

для этого точность составляет $\sim 0.10\%$ от полуамплитуды кривой лучевых скоростей K_v , тогда как точность средней наблюдаемой кривой лучевых скоростей составляет $\sim (2-3)\%$ от ее полуамплитуды K_v . Таким образом, усредненные эффекты орбитальной переменности формы профиля линий поглощения, содержащиеся в кривых лучевых скоростей маломассивных рентгеновских двойных систем ($q \gg 1$) сравнительно слабо сказываются на ее форме. Поэтому в случае маломассивных рентгеновских двойных систем наклонение орбиты нужно искать непосредственно по орбитальной переменности профилей линий поглощения [20, 21]. Для этого необходимо получить высококачественные спектры системы V404 Cyg с разрешением $R \simeq 50\,000$ на крупнейших 8–10-метровых телескопах нового поколения.

Также в работе выявлены характерные времена переменности эмиссионного профиля линии H α . Значимые изменения формы профиля и его эквивалентной ширины происходят за времена $\sim 0.5-2$ ч. Причины, вызывающие вариации фотоионизирующего потока, не установлены до сих пор [13]. Исследования в этом направлении требуют дальнейших спектроскопических наблюдений системы V404 Cyg.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 02-02-17524) и грантом “Ведущие научные школы России” НШ-388.2003.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Makino *et al.*, IAU Circ. № 4782 (1989).
2. R. Sunyaev *et al.*, IAU Circ. № 4800 (1989).
3. B. G. Marsden, IAU Circ. № 4783 (1989).
4. R. M. Wagner, T. J. Kreidl, S. B. Howell, *et al.*, IAU Circ. No. 4797 (1989).
5. J. Casares and P. A. Charles, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **271**, L5 (1994).
6. T. Shahbaz, F. A. Ringwald, and J. C. Bunn, *et al.*, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **271**, L10 (1994).
7. M. R. Wagner, T. J. Kreidl, S. B. Howell, and S. G. Starrfield, Astrophys. J. **401**, L97 (1992).
8. Y. Tanaka, 23rd ESLAB Symp. on Two Topics in X-Ray Astronomy. ESA Publ. Division, SP-296, Eds. Hunt J. Battrick (1989), p. 1.
9. D. Sanwal, E. L. Robinson, E. Zhang, *et al.*, Astrophys. J. **460**, 437 (1996).
10. E. P. Pavlenko, A. C. Martin, J. Casares, *et al.*, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **281**, 1094 (1996).
11. J. Casares, P. A. Charles, T. Naylor, and E. P. Pavlenko, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **265**, 834 (1993).
12. J. Casares and P. A. Charles, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **255**, 7 (1992).
13. R. I. Hynes, C. Zurita, C. A. Haswell, *et al.*, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **330**, 1009 (2002).

14. Д. Худсон, *Статистика для физиков* (М.: Мир, 1970).
15. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Изв. Акад. наук. Сер. физ.* **67**, 293 (2003).
16. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **82** (2005), в печати.
17. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **71**, 420 (1994).
18. R. L. Kurucz, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **40**, 1 (1979).
19. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **81**, 606 (2004).
20. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Письма в "Астрон. журн."* **23**, 889 (1997).
21. T. Shahbaz, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **298**, 153 (1998).

Parameters of the X-Ray Nova V404 Cyg – a Black-Hole Binary

A. M. Cherepashchuk, N. V. Borisov, M. K. Abubekеров, D. K. Klochkov, and E. A. Antokhina

We present the results of spectroscopic observations of V404 Cyg obtained using the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory in 2001–2002. We show results of a statistical analysis of the radial velocity curve of the X-ray binary V404 Cyg. Our analysis of the radial velocity curve based on a synthesized profile of the CaI 6439.075 Å absorption line in the framework of a Roche model enabled us to derive the dependence of the mass of the X-ray component m_x on the mass of the optical component m_v . Based on the orbital inclination estimated based on the ellipticity of the optical component, $i = 54^\circ - 64^\circ$, and the component mass ratio derived from the rotational broadening of the spectral lines, we obtain for the mass of the black hole $m_x = 10.65 \pm 1.95 M_\odot$.