

УДК 524.386:520.82/84

## ПЗС-СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СС CAS. I. КРИВЫЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

© 2013 С. Ю. Горда<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, 620083 Россия

Поступила в редакцию 1 октября 2012 года; принята в печать 6 ноября 2012 года

Представлены результаты спектральных наблюдений затменной переменной звезды с массивными компонентами раннего спектрального класса СС Cas, впервые выполненные с применением ПЗС-приемника. Измеренные полуамплитуды кривых лучевых скоростей компонентов  $K_1 = 123.9$  км/с и  $K_2 = 292.4$  км/с сравнимы с приведенными в литературе величинами, а скорость центра масс системы  $V_0 = -20.4$  км/с, что приблизительно на  $-10$  км/с больше ранее опубликованных значений. Это может свидетельствовать в пользу высказанного в литературе предположения о наличии третьего тела в системе.

Ключевые слова: звёзды: двойные: затменные—звёзды: индивидуальные: СС Cas

### 1. ВВЕДЕНИЕ

СС Cas — затменно-переменная с массивными компонентами раннего спектрального класса O8.5 III + V0 V ( $V = 7^m08$ ,  $P = 3^d366324$ ) — была открыта Пирсом [2] в 1927 г. как спектрально-двойная звезда. Фотометрическая переменность обнаружена в 1930 г. Гутником и Прагером [3] и подтверждена Гапошкиным [4] в 1953 г. В 60–80-х годах прошлого века разными авторами был проведен ряд фотоэлектрических наблюдений СС Cas (см. подробнее, например, [5]), однако, за это время было получено только три кривых блеска с более-менее полным покрытием фаз. По форме кривой блеска звезда относится к типу EB. На всех полученных кривых блеска отмечается большой разброс точек и временные искажения формы на отдельных фазовых углах, что указывает на то, что СС Cas является активной взаимодействующей системой, возможно с сильным звездным ветром, истекающим с поверхности главного компонента.

Основная масса спектральных наблюдений СС Cas, начиная с первого исследования Пирса [2], была выполнена фотографически. На спектрограммах хорошо выделялись линии главного компонента, линии вторичного компонента просматривались только на отдельных спектрах, их измерение не представлялось возможным. В 1985–87 гг. впервые были получены спектрограммы СС Cas с регистрацией светового потока фотоэлектронным устройством — ретионом (Хилл и др. [5]), на которых линии второго компонента выделялись из шумовой дорожки и были пригодны для измерений.

В этой работе получены кривые лучевых скоростей обоих компонентов СС Cas и получена значимая оценка отношения их масс, определен эволюционный статус системы.

При определении параметров орбиты главного компонента некоторые авторы обнаруживали ее эллиптичность с эксцентриситетом порядка 0.1 [2]. При этом чаще всего эллиптичность обнаруживалась при спектральных наблюдениях, фотометрические исследования ее не показывали. Также следует отметить некоторый разнобой в оценках величины периода СС Cas, полученных разными авторами в разное время. Причем фотометрические определения давали, как правило, более короткий период, чем спектроскопические. В начале 70-х годов было зарегистрировано также значительное изменение скорости центра масс системы [5]. Более подробное обсуждение проблемы изменения периода и возможной эллиптичности орбиты можно найти в работах Хилла и др. [5] и Майера [6].

Несмотря на то, что небольшие изменения периода регистрируются давно, причина их остается неустановленной. В основном рассматриваются две возможности — это потеря массы системой за счет сильного звездного ветра, обнаруживаемого в радиодиапазоне [7] и в оптике [8], и наличие третьего тела в системе. Несмотря на то, что первая возможность кажется более вероятной, вторая тоже имеет право на существование, из-за обнаруженного изменения скорости центра масс системы. Как отмечено в работе Хилла и др. [5]: “Такое объяснение (*наличие третьего тела, авт.*) не

**Таблица 1.** Список полученных спектров и результаты измерения лучевых скоростей компонентов СС Cas

No.	Дата	$n \times t$ , с	JD <sub>☉</sub> 2455000+	Фаза	$V_1$ , км/с	$\sigma_1$ , км/с	$V_2$ , км/с	$\sigma_2$ , км/с
1	30.03.11	3 × 1200	651.1943	0.120	-101.0	0.9	199.6	7.0
2	24.11.11	3 × 1200	889.5081	0.908	55.6	1.2	-194.1	12.8
3	24.11.11	3 × 1200	889.5539	0.921	39.7	2.1	-167.0	17.6
4	24.11.11	2 × 1200	889.5913	0.932	34.3	1.8	-168.1	11.9
5	18.01.12	3 × 1200	945.3149	0.484	-21.3	2.0		
6	19.01.12	3 × 1200	946.3040	0.778	100.4	1.4	-304.5	6.8
7	25.01.12	3 × 1200	952.3784	0.582	37.0	1.9	-165.8	16.2
8	26.01.12	3 × 1200	953.3117	0.860	76.0	1.8	-250.3	5.7
9	31.01.12	3 × 1200	958.3868	0.367	-119.5	1.6	191.8	11.9
10	14.02.12	3 × 1200	972.2281	0.478	-30.5	1.3		
11	14.02.12	3 × 1200	972.3527	0.515	1.6	1.4	-54.6	16.2
12	15.02.12	3 × 1200	973.2356	0.778	95.7	2.6	-301.5	8.5
13	15.02.12	3 × 1200	973.3800	0.821	88.7	2.6	-271.9	8.5
14	20.02.12	3 × 1200	978.3171	0.287	-144.7	1.0	246.5	6.9
15	21.02.12	3 × 1200	979.2282	0.558	27.9	2.8	-110.0	5.7
16	21.02.12	3 × 1200	979.3019	0.580	35.4	3.6	-149.8	33.1
17	21.02.12	3 × 1200	979.4024	0.609	61.9	3.3	-200.5	23.1
18	13.03.12	3 × 1200	1000.1823	0.782	94.9	1.7	-312.3	6.4
19	14.03.12	3 × 1200	1001.2654	0.104	-102.2	2.2	165.9	10.2
20	29.03.12	3 × 1200	1016.2018	0.540	8.3	4.1	-91.5	9.8

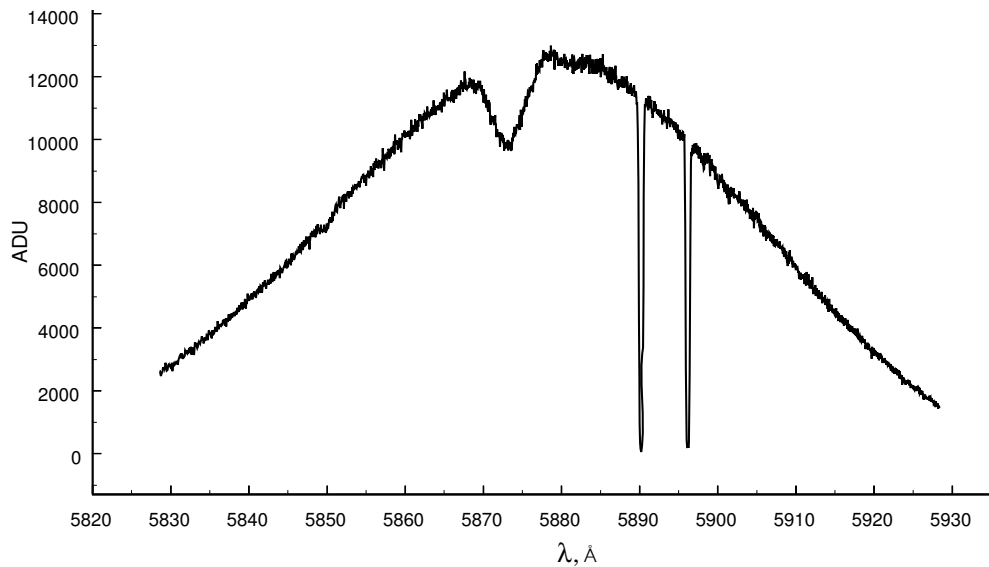
может быть исключено, оно обеспечило бы нам модель, объясняющую вышеупомянутые различия скоростей и отклонения времен минимумов от линейной эфемериды.” Так или иначе, этот вопрос остается пока открытым.

С середины 80-х годов прошлого века спектральное исследование СС Cas не проводилось, поэтому было интересно включить эту систему в программу спектральных наблюдений на эшелле-спектрометре нового 1.2-м телескопа Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета, тем более, что ранее в обсерватории было проведено ее фотометрическое исследование и получена одна из наиболее полных кривых блеска [9].

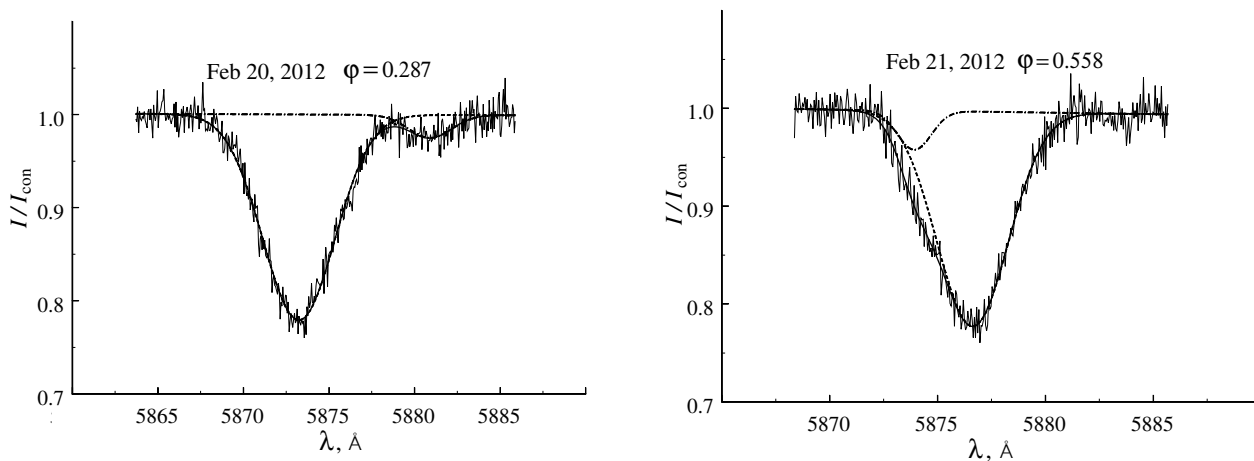
## 2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА

Спектральные наблюдения СС Cas были проведены в период с 30 марта 2011 г. по 29 марта 2012 г. на оптоволоконном эшелле-спектрометре [10] высокого разрешения ( $R = 30\,000$ ) альт-азимутального телескопа ( $D = 1.21$  м,  $F = 12.0$  м) [11]. В качестве светоприемного устройства использовалась ПЗС-камера, изготовленная в лаборатории перспективных разработок САО РАН, с ПЗС-чипом E2V 40-42 (2048 × 2048 px, размер пикселя 13.5 мкм), охлаждаемым до температуры жидкого азота системой замкнутого цикла CRYOTIGER. Одновременно регистрировался 61 спектральный порядок, охватывающий интервал спектра 3900–7700 Å.

Поскольку данное спектральное исследование СС Cas являлось одной из первых наблюдательных



**Рис. 1.** Вид экстрагированного спектрального порядка в районе линии He I  $\lambda$  5876 Å. Справа от широкого профиля линии главного компонента SS Cas хорошо заметен профиль линии вторичного компонента. Две узкие сильные линии — межзвездный дублет натрия.



**Рис. 2.** Аппроксимация на разделение профилей линий He I  $\lambda$  5876 Å суммой гауссиан. Сплошная линия — суммарный профиль, штриховая — профиль главного компонента, штрих-пунктирная — профиль вторичного компонента.

программ, выполняемых на эшелле-спектрометре, была выбрана схема наблюдений с большим числом регистраций калибровочных спектров

**Таблица 2.** Параметры кривых лучевых скоростей

	Главный компонент	Вторичный компонент
$V_0$ , км/с	$-19.8 \pm 1.4$	$-20.9 \pm 2.9$
$K$ , км/с	$-121.3 \pm 2.2$	$291.3 \pm 4.5$

торий-аргоновой лампы. Каждый цикл наблюдений SS Cas, состоящий из трех последовательных 20-минутных экспозиций, начинался и заканчивался получением спектра торий-аргоновой лампы. Такая схема наблюдений позволяла при дальнейшей обработке учитывать возможные смещения шкалы длин волн спектрографа относительно элементов ПЗС-матрицы.

Для удержания изображения звезды на торце оптоволокну во время экспозиции производилось ручное гидирование, осуществляемое движением телескопа по обеим осям на минимальной скорости. Контроль гидирования проводился по изобра-

Таблица 3. Сводная таблица параметров СС Cas

Параметр	Фотопластинка	Ретикон	ПЗС
	[2, 5]	[5]	настоящая работа
$V_0$ , км/с	$-9.9 \pm 2.4$	$-10.4 \pm 2.0$	$-20.4 \pm 2.1$
$K_1$ , км/с	$138.0 \pm 4.0$	$116.0 \pm 1.8$	$123.9 \pm 2.0$
$K_2$ , км/с		$285.9 \pm 7.3$	$292.4 \pm 4.6$
$P$ , day	3.366277	3.366324	3.366604
$\sigma_1$ , км/с	10.3	5.7	5.9
$\sigma_2$ , км/с		27.9	11.9
$M_1 \sin^3 i$ , $M_\odot$	$18.3 \pm 1.4$	$16.1 \pm 0.8$	$17.5 \pm 1.0$
$M_2 \sin^3 i$ , $M_\odot$	$8.8 \pm 0.8$	$6.5 \pm 0.4$	$7.4 \pm 0.5$
$(a_1 + a_2) \sin i$ , $R_\odot$	$28.3 \pm 0.9$	$26.2 \pm 0.6$	$27.0 \pm 0.4$
$q = M_1/M_2$	$2.1 \pm 0.1$	$2.41 \pm 0.04$	$2.36 \pm 0.05$

жению на экране монитора, построенному видеокамерой подзора поля зрения, установленной в подвесной части спектрометра.

Всего за период наблюдений было получено 20 спектров СС Cas с эффективной экспозицией 1 час (3 снимка по 20 минут). Больше время накопления сигнала, учитывая величину периода системы, приводило бы к заметному размытию спектральных линий из-за движения компонентов по орбите, меньшее — к уменьшению отношения сигнал/шум в спектре. В Таблице 1 приведен список полученных спектров. Время получения спектра приводится для среднего момента каждой триады кадров.

Первичная обработка ПЗС-кадров эшелле спектра СС Cas производилась в пакете DECH [12]. Для удаления следов космических частиц на снимках и повышения отношения сигнал/шум выполнялось медианное усреднение каждой триады кадров. Затем производилось вычитание кадров с нулевой экспозицией (bias), полученных в ту же дату непосредственно перед наблюдениями спектров звезды. Кадры спектров торий-аргоновой лампы, снятые до и после каждой триады кадров звезды, попарно усреднялись. Дальнейшая обработка включала экстракцию порядков эшелле-спектра, построение дисперсионных кривых и проведение уровня континуума.

В полученных порядках спектра СС Cas, как и следует для звезды спектрального класса O9–B0, выделяются абсорбционные линии нейтрального гелия и бальмеровской серии водорода, также заметны линии азота, серы и кислорода. Наиболее сильной является линия He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$ . Остальные линии имеют меньшие глубины и более зашумлены.

Среднее по спектру отношение сигнал/шум варьировалось в пределах 40–80. В качестве примера на Рис. 1 приведен порядок спектра в районе линии He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$  до выполнения процедуры деления на континуум.

### 3. КРИВЫЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Для построения кривых лучевых скоростей была выбрана линия He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$ , как наиболее сильная в спектре СС Cas. В ее профилях в фазах, близких к квадратурам, явно просматривались

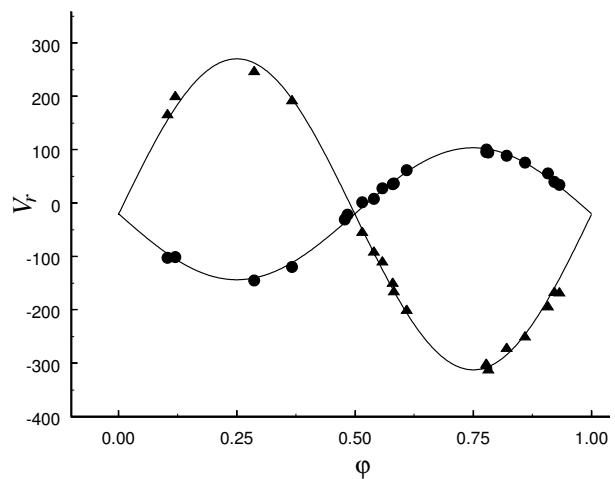


Рис. 3. Кривые лучевых скоростей компонентов СС Cas (сплошные линии), полученные по данным ПЗС-наблюдений. Кружками показаны лучевые скорости главного компонента, треугольниками — вторичного.

**Таблица 4.** Лучевые скорости теллурических линий полосы  $O_2$   $\lambda$  6890 Å и линий межзвездного дублета натрия

$JD_{\odot}$	$V_r$ , км/с	$\sigma$ ,	$V_r$ , км/с	$V_r$ , км/с
2455000+	$O_2$	км/с	Na I	Na I
	$\lambda$ 6890 Å		$\lambda$ 5890 Å	$\lambda$ 5896 Å
651.1943			-12.2	-11.7
889.5081	0.64	0.13	-11.0	-11.0
889.5539	-0.01	0.10		
889.5913	-0.77	0.31		
945.3149	-0.46	0.21	-11.6	-11.2
946.3040	0.80	0.21	-10.1	-9.9
952.3784	0.67	0.21	-10.5	-10.2
953.3117	0.02	0.19	-10.8	-10.6
958.3868	0.01	0.22	-10.8	-10.7
972.2281	0.46	0.23	-11.6	-11.2
972.3527	-0.65	0.18	-10.6	-10.3
973.2356	0.62	0.18	-10.1	-10.2
973.3800	-0.05	0.35	-10.8	-10.9
978.3171	0.15	0.26	-10.7	-10.6
979.2282	0.12	0.16	-11.5	-11.3
979.3019	-0.35	0.18		
979.4024	0.05	0.25		
1000.1823	-0.09	0.33	-11.1	-10.7
1001.2654	0.47	0.23	-10.6	-10.3
1016.2018	0.51	0.20	-10.6	-10.4
среднее	0.11 $\pm 0.46$	0.22	-10.9 $\pm 0.5$	-10.7 $\pm 0.5$

следы второго компонента. Разделение бленды линий проводилось классическим методом аппроксимации их суммой гауссиан с применением нелинейного метода наименьших квадратов Марквардта. На Рис. 2 приведены примеры разделения линии He I  $\lambda$  5876 Å в фазе, близкой к квадратуре (слева), и в фазе затмения (справа), когда профили линий отдельных компонентов SS Cas значительно перекрывались. После разделения профилей были определены лучевые скорости обоих компонентов. Для главного компонента скорости были найдены по всем спектрам. Для вторичного, более слабого, компонента в двух фазах, близких к середине

затмения, определить лучевые скорости не удалось из-за сильного перекрытия профилей. Значения лучевых скоростей компонентов и формальные оценки их погрешностей, полученные в процессе аппроксимации профилей, приведены в четырех последних столбцах Таблицы 1.

Практически все фотометрические и последнее спектрометрическое исследование [5] не показывали сколько-нибудь заметного эксцентриситета орбиты SS Cas. Поэтому для построения кривых лучевых скоростей были выбраны синусоидальные зависимости. В процессе аппроксимации варьировалось значение периода системы, т.к. для фаз, вычисленных по эфемеридной формуле Хилла и др. [5], наблюдался повышенный разброс лучевых скоростей и систематическое смещение их относительно синусоидальных зависимостей. Новая эфемеридная формула, вычисленная только на основе наших наблюдений, приведена ниже:

$$JD_{\odot}(I_{\min}) = 2455647.4234 + 3^d 3666045 E. \quad (1)$$

Найденная величина периода больше приведенного в работе Хилла и др. [5], но несколько меньше полученного Пирсом [2] и использованного в ряде работ, например, в [9]. В Таблице 2 приведены найденные значения  $V_0$ ,  $K_1$  и  $K_2$ , а на Рис. 3 в графическом виде показана полученная аппроксимация найденных лучевых скоростей компонентов SS Cas синусоидальными зависимостями.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из Рис. 3, кривые лучевых скоростей обоих компонентов, построенные с использованием фаз, вычисленных по эфемеридной формуле (1), хорошо представляются синусоидальными зависимостями, что говорит об отсутствии заметного эксцентриситета их орбит. Полученные значения  $V_0$  для обоих компонентов в пределах погрешностей имеют практически одинаковые значения (см. Таблицу 2). Этот факт подтверждает верность уточненного значения периода, по сравнению с полученным в [5], и служит косвенным подтверждением возможного процесса изменения периода.

Найденные в данной работе параметры SS Cas, вычисленные для среднего значения скорости центра масс системы  $V_0 = (V_0^1 + V_0^2)/2$ , приведены в Таблице 3. Там же для сравнения помещены аналогичные данные из [2] и [5].

Если найденные значения  $K_1$  и  $K_2$  практически мало отличаются от величин, полученных другими авторами, то значение  $V_0$  оказалось на  $-10$  км/с больше. Причиной такого различия скоростей могло быть как реальное изменение скорости центра масс системы, так и наличие инструментального эффекта, например, сдвига шкалы длин волн

спектрографа в период наблюдений из-за изменения температуры. Для проверки подобного эффекта практически на всех полученных эшелле-спектрограммах были измерены лучевые скорости теллурических линий в полосе  $O_2 \lambda 6890 \text{ \AA}$ , а также лучевые скорости линий межзвездного дублета натрия. Результаты представлены в Таблице 4. В последней строке таблицы приведены усредненные по всем спектрограммам значения лучевых скоростей теллурических линий и линий межзвездного натрия. Как можно видеть, среднее значение лучевых скоростей по теллурическим линиям в полосе  $O_2 \lambda 6890 \text{ \AA}$  близко к нулю, а погрешность не превышает  $\pm 0.5 \text{ км/с}$ . Идентичный по точности результат получен по измерениям лучевых скоростей двух линий межзвездного натрия —  $Na I \lambda 5890 \text{ \AA}$  и  $Na I \lambda 5896 \text{ \AA}$ , при этом, средние значения лучевых скоростей обеих линий за весь период наблюдений различаются на величину не более  $0.2 \text{ км/с}$ , т.е. меньше ошибки измерения.

В третьем столбце Таблицы 4 приведены значения среднеквадратических ошибок измерения лучевых скоростей узких теллурических линий в отдельном спектре, вычисленные по тридцати неблендированным линиям  $O_2$ , зарегистрированным в данном порядке спектра. Усредненное значение среднеквадратической ошибки отдельного измерения теллурической линии, вычисленное по всем спектрам, составляет порядка  $\pm 0.2 \text{ км/с}$ . Можно утверждать, что с такой же точностью были получены лучевые скорости линий межзвездного натрия, т.к. их измерения проводились идентично измерениям теллурических линий.

Полученный результат свидетельствует об отсутствии какого-либо значимого неучтенного инструментального эффекта, вызывающего смещение шкалы длин волн, за все время наблюдений. Следовательно, можно сделать однозначный вывод, что полученная в данной работе величина  $V_0$  — это реальная на данную эпоху величина скорости центра масс системы, определенная по спектральной линии  $He I \lambda 5876 \text{ \AA}$ . Это может говорить в пользу гипотезы наличия третьего тела в системе СС Cas.

Как можно видеть из Таблицы 3 величина среднеквадратического разброса измеренных скоростей относительно кривой лучевых скоростей вторичного компонента  $\sigma_2$ , полученная в данной работе, практически в два с половиной раза меньше значения, приведенного в работе Хилла и др. [5].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной части работы по спектральному исследованию затменной переменной звезды СС Cas

с компонентами раннего спектрального класса на основе двадцати спектрограмм, впервые полученных с помощью ПЗС-приемника на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения, измерены лучевые скорости и построены кривые лучевых скоростей обоих компонентов, что позволило определить величину  $V_0$  и уточнить величину орбитального периода системы. Это второе исследование СС Cas, в котором измерены лучевые скорости вторичного компонента, причем в данном исследовании величина разброса точек на кривой лучевых скоростей оказалась в 2.5 раза меньше, чем в предыдущем исследовании [5].

Полученные значения периода и лучевой скорости центра масс системы заметно отличаются от приведенных ранее в литературе. На основе этого можно сделать предположение о возможном наличии третьего тела в системе СС Cas.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы” (государственный контракт № 14.518.11.7064).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Paczyński, *Acta Astron.* **21**, 417 (1971).
2. J. A. Pearce, *Publ. of the Dominion Astrophys. Obs. Victoria* **4**, 67 (1927).
3. P. Guthnick, *R. Prager, Astron. Nachr.* **239**, 13 (1930).
4. S. Gaposchkin, *Annals of Harvard College Obs.* **113**, 67 (1953).
5. G. Hill, R. W. Hilditch, G. C. L. Aikman, and B. Khesse, *Astronom. and Astrophys.* **282**, 455 (1994).
6. P. Mayer, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* **38**, 58 (1987).
7. D. M. Gibson and R. M. Hjellming, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **86**, 652 (1974).
8. I. D. Howarth and R. K. Prinja, *Astrophys. J. Suppl.* **69**, 527 (1989).
9. Т. С. Полушина, *Переменные звезды* **22**, 834 (1988).
10. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, M. V. Yakorov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 355 (2011).
11. С. Ю. Горда, П. Е. Захарова, В. В. Крушинский, Э. Д. Кузнецов, в *Трудах 40-й международной студ. науч. конф. Физика Космоса* (УрГУ, Екатеринбург, 2011), с. 110.
12. Г. А. Галазутдинов, *Препринт САО РАН* **92**, 1 (1992).

**CCD SPECTROPHOTOMETRY OF CC CAS. I. RADIAL VELOCITY CURVES****S. Yu. Gorda**

We report the results of the first-ever CCD spectroscopic observations of the eclipsing variable CC Cas with massive early-type components. The measured semi-amplitudes of the radial velocity curves of the components,  $K_1 = 123.9$  km/s and  $K_2 = 292.4$  km/s, are comparable with the published data, and the center-of-mass velocity of the system was found to be  $V_0 = -20.4$  km/s, which is about  $-10$  km/s greater than the earlier published results. This fact may support the published hypothesis about the presence of a third body in the system.

Keywords: *stars: binaries: eclipsing—stars: individual: CC Cas*