

УДК 524.384-33

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ КЛАССЫ КОМПОНЕНТОВ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ РАЗДЕЛЕННЫХ ЗАТМЕННЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОСКОПИИ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2023 А. Ю. Князев<sup>1,2,3,4\*</sup>, И. Ю. Катков<sup>3,5,6</sup>, О. Ю. Малков<sup>7</sup>, Л. Н. Бердников<sup>3</sup>,  
Н. И. Шатский<sup>3</sup>, А. В. Додин<sup>3</sup>, С. Г. Желтоухов<sup>3,8</sup>, И. А. Страхов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Южно-Африканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, 7935 Южная Африка

<sup>2</sup>Южный Африканский Большой Телескоп, Кейптаун, 7935 Южная Африка

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

<sup>4</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>5</sup>Нью-Йоркский Университет Абу Даби, Абу Даби, 129188 ОАЭ

<sup>6</sup>Центр астрофизики и космических исследований Нью-Йоркского Университета Абу Даби, Абу Даби, 129188 ОАЭ

<sup>7</sup>Институт астрономии РАН, Москва, 191187 Россия

<sup>8</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 18 мая 2023 года; после доработки 2 июня 2023 года; принята к публикации 2 июня 2023 года

Представлены результаты спектральных наблюдений и последующего анализа шести долгопериодических разделенных затменных двойных звезд (DLEB) с компонентами на главной последовательности (ГП) из выборки, сформированной с целью проверки соотношения «масса – светимость» (MLR) для звезд в диапазоне масс  $M/M_{\odot} > 1.5$ . Мы провели анализ всех полученных спектров по методике, которая позволяет выявить двойственность системы и определить  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  для каждого компонента, а также металличность системы  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и величину покраснения  $E(B - V)$  на луче зрения. Были рассчитаны абсолютные параметры изучаемых систем. Анализ полученных спектров показывает, что у трех объектов из шести (V1156 Cyg, EU Gem и V733 Per) мы уверенно обнаруживаем двойственность по их спектрам и определяем спектральный тип и класс каждого компонента. В системе V733 Per оба компонента уже покинули ГП, поэтому система должна быть исключена из нашей выборки, а изучение V1156 Cyg и EU Gem следует продолжить. Спектр OT And не показал двойственности, однако главный компонент системы — горячая звезда A6 V, и поэтому OT And должна остаться в нашей выборке. Двойственности систем IM Del и LX Gem мы также не выявили. Более яркие их компоненты оказались холодным гигантом и сверхгигантом, и по результатам нашего анализа эти системы должны быть исключены из выборки. По такой же методике мы провели анализ двух спектров, полученных для систем EU Gem и LX Gem с помощью LAMOST. Мы показали, что параметры, определяемые из спектров LAMOST, очень хорошо сходятся с параметрами, определенными для спектров, полученных в Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ. Наш анализ позволил построить первое приближение для кривых скоростей системы V1156 Cyg и показать, что в этой системе холодный компонент имеет большую массу.

Ключевые слова: звезды: двойные: спектроскопические — звезды: отдельные: EU Gem, OT And, V1156 Cyg, V733 Per, IM Del, LX Gem

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Соотношение между массой звезды и ее светимостью на главной последовательности (СМС) представляет собой фундаментальный закон, используемый в различных областях астрофизики

(Hertzsprung, 1923; Cester et al., 1983; Demircan and Kahraman, 1991; Malkov, 2007; Torres et al., 2010; Benedict et al., 2016). Особенно важно это соотношение для восстановления начальной функции масс (НФМ), вопрос о форме и происхождении которой до сих пор является одной из важнейших нерешенных проблем астрономии. НФМ

\*E-mail: a.kniazev@saa0.nrf.ac.za

определяют по функции светимости (ФС) звезд. Следует отметить, что НФМ звезд поля может быть получена исключительно этим способом, через ФС и СМС. Независимое определение массы звезды и ее светимости возможно только для компонентов двойных систем определенных типов. Один из них — орбитальные двойные (визуальные двойные звезды с известными параметрами орбиты и тригонометрическим параллаксом). Чаще всего эти звезды являются широкими парами, их компоненты не взаимодействуют друг с другом и в эволюционном смысле аналогичны одиночным звездам. Другой основной источник независимых определений масс — разделенные затменные двойные с компонентами на ГП, в спектре которых представлены линии обоих компонентов (double-lined eclipsing binaries, DLEB). Это в основном тесные пары, вращение компонентов которых синхронизовано приливным взаимодействием, и из-за замедления вращения они, скорее всего, должны эволюционировать иначе, чем одиночные звезды. Можно предположить, что их радиусы и светимости должны отличаться от этих характеристик для одиночных звезд. Сравнивая радиусы DLEB и одиночных звезд, Malkov (2003) обнаружил заметную разницу между наблюдательными параметрами  $B0V-G0V$  компонентов DLEB и одиночных звезд аналогичных спектральных классов. По этим данным  $B$ -тип компонентов DLEB показывает в среднем на 20% меньшие радиусы (то есть более высокие температуры), чем соответствующие изолированные звезды. А компоненты DLEB  $A$ - и  $F$ -типа имеют большие радиусы по сравнению с изолированными звездами этих типов.

Именно на данных, полученных для тесных DLEB, базируется СМС в области масс  $M/M_{\odot} > 1.5$ , однако его распространяют и на одиночные звезды. Использование СМС, построенного на основе тесных DLEB, по-видимому, не совсем правомерно и может приводить к систематически неправильным результатам как при оценке по СМС характеристик звезд с массами  $M/M_{\odot} > 1.5$ , так и при восстановлении с его помощью НФМ (Malkov, 2003; 2007). Вместе с тем имеющиеся для этого диапазона масс наблюдательные данные слишком малочисленны и не позволяют делать определенные выводы о реальном существовании подобного систематического сдвига. Например, в работе Malkov (2007) собраны данные о 133 DLEB, и из них только четыре — это системы с периодом больше 15 дней, которые определенно можно считать не тесными. В обзоре Torres et al. (2010), где были представлены данные о 93 DLEB, таких систем ( $P > 15$  дней) только шесть.

С целью реконструкции СМС для одиночных звезд умеренных и больших масс мы начали проект по изучению долгопериодических ( $P > 15$  дней)

затменных двойных систем, компоненты которых находятся на ГП, еще, по-видимому, не синхронизованы друг с другом, и у них определенно нет обмена массой. Поэтому компоненты этих систем в эволюционном смысле не отличаются от одиночных звезд. В рамках данного проекта нами были последовательно сформированы:

- 1) тестовая выборка, включающая 11 звезд (Kniazev et al., 2020);
- 2) выборка таких систем, расположенных на южном небе, содержащая 32 звезды (Князев и др. (2024), в подготовке);
- 3) выборка еще 30 DLEB северного неба (Pakhomova et al., 2022).

Все объекты этих выборок удовлетворяют определенным критериям отбора, и либо для них идет процесс накопления фотометрических и спектральных данных, либо проводится анализ и готовится публикация.

Использование расположенного в южном полушарии телескопа SALT (Southern African Large Telescope; Buckley et al., 2006; O'Donoghue et al., 2006) с волоконным эшелле-спектрографом HRS (Barnes et al., 2008; Bramall et al., 2010; 2012; Crause et al., 2014) и автоматической системой обработки данных (Kniazev et al., 2016; 2019) позволило получить большой массив спектров высокого разрешения для объектов с  $\text{Dec} \leq 10^{\circ}$  не только для построения их кривых скоростей, но и для предварительной спектральной классификации. В результате анализа накопленного наблюдательного материала (около 250 эшелле-спектров) установлено, что из 32 звезд, отобранных для тестовой и Южной выборок, только 15 систем определенно являются двойными системами, требующими дальнейшего изучения. Еще семь двойных систем из Южной выборки имеют только один компонент, находящийся на ГП, и часть из них могут относиться к системам, где, возможно, был обмен вещества в ходе эволюции, и поэтому их нельзя использовать в анализе СМС. Ситуация с получением спектрального материала высокого разрешения для объектов северного неба не так хороша, поэтому мы решили попробовать использовать спектроскопию низкого разрешения для предварительной спектральной классификации звезд с достаточно неопределенной классификацией или вообще без нее. Как первый результат в этом направлении в данной статье мы представляем результаты спектроскопических наблюдений низкого разрешения и их анализа для шести DLEB систем из нашей Северной выборки.

Данная статья организована следующим образом. В разделе 2 суммирована известная информация об этих двойных системах. В разделе 3 описывается процесс получения спектральных данных и

Таблица 1. Параметры изучаемых систем

Object	RA (2000.0)	Dec (2000.0)	$m_V$ , mag	$P$ , days	$\varpi$ , mas
OT And	23:20:01.22	+41:45:17.47	8.87	20.85	$4.0817 \pm 0.0234$
V1156 Cyg	19:50:37.07	+29:21:17.34	12.67	44.5647	$0.5415 \pm 0.0109$
IM Del	20:22:30.03	+18:33:54.27	11.89	406.8887	$0.2831 \pm 0.0171$
EU Gem	06:39:42.01	+17:11:31.37	13.43	52.27	$0.4062 \pm 0.0317$
LX Gem	06:40:04.99	+15:06:40.03	13.76	92–159.9	$0.3078 \pm 0.0677$
V733 Per	03:31:48.52	+36:12:44.85	11.91	77.53	$0.5367 \pm 0.0210$

их обработка. В разделе 4 представлены идеи анализа полученных данных. В разделе 5 приводятся полученные результаты, а в разделе 6 эти результаты обсуждаются. В разделе 7 суммируются выводы этой работы.

## 2. ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИЗУЧАЕМЫХ ЗВЕЗДАХ

Сведения о базовых параметрах изучаемых систем представлены в таблице 1. Все приведенные величины в фильтре  $V$  взяты из обзора ASAS-SN (Pojmanski, 1997), а параллаксы из Gaia DR3 (Prusti et al., 2016).

### 2.1. OT And

Звезда отнесена к переменным в работе Crawford et al. (1984), где была получена первая кривая блеска, имеющая не очень хорошее покрытие, и впервые определен период  $P = 20.85$  дней. В работе Husar (2005) были опубликованы кривые блеска в фильтре  $V$ , прописывающие оба минимума. В ноябре 2022 года, уже после получения наших спектральных данных, появилась работа Fekel et al. (2022), в которой представлен детальный спектральный и фотометрический анализ системы OT And. Мы будем использовать данные цитируемой работы в разделе 5 этой статьи.

### 2.2. V1156 Cyg

Звезда впервые представлена как переменная с периодом  $P = 44.5647$  дней в работе Wachmann (1966) и вошла в список переменных звезд Kukarkin et al. (1968). Результаты *uvby*-фотометрических наблюдений системы были опубликованы Friedmann and Reimann (1991), которые также оценили избыток цвета  $E(b - y) = 0^m426$  и фотометрическим методом определили спектральный тип и класс главного компонента как F3 V.

### 2.3. IM Del

Впервые звезда была отмечена как переменная Richter (1970) и также была указана как переменная система в работе Kukarkin et al. (1972). В каталоге затменных переменных звезд Malkov et al. (2006) для объекта приведены только глубина первичного минимума в  $0^m5$  в фильтре  $b$ , период и тип переменности «EB» (затменная система типа Бета Лиры). Информация о периоде  $P = 34.34$  дня появилась в каталоге затменных переменных звезд Avvakumova et al. (2013). Значение периода  $P = 406.8887$  дня вместе с кривой блеска опубликовано в каталоге переменных звезд (Jayasinghe et al., 2018) обзора ASAS-SN.

### 2.4. EU Gem

Звезда впервые была отнесена к переменным в работе Kinnunen and Skiff (2000). Она включена в каталог затменных переменных звезд Malkov et al. (2006), где дана информация о периоде  $P = 52.27$  дней и глубине первичного минимума в  $1^m2$  в фильтре  $b$ , а также указан тип переменности «EA».

### 2.5. LX Gem

Впервые информация о переменности звезды опубликована Hoffmeister (1968). Вошла в каталог Samus et al. (2004) с типом переменности «E» (переменная неизвестного типа). В работе Woźniak et al. (2004) был определен период этой системы  $P = 92$  дня. Система включена в каталог затменных переменных звезд Malkov et al. (2006) с информацией о периоде  $P = 145.1$  дней как разделенная система. В работе Heinze et al. (2018) определен период этой системы  $P = 159.9$  дня. Значение периода  $P = 74.8$  дня вместе с кривой блеска опубликовано в каталоге переменных звезд (Jayasinghe et al., 2018) обзора ASAS-SN.

Таблица 2. Журнал наблюдений

Object	Date	$T_{\text{exp}}$ , s	Seeing, arcsec
OT And	2022/09/15	30,300,600	—
	2022/09/17	$4 \times 30$	—
V1156 Cyg	2022/09/15	$3 \times 300$	—
	2022/09/17	$2 \times 300$	—
	2022/11/20	$2 \times 600$	2.1
IM Del	2022/09/17	$4 \times 300$	—
	2022/11/20	$2 \times 600$	1.8
EU Gem	2022/09/27	$2 \times 1200$	1.3
	2022/11/07	$2 \times 1200$	2.0
LX Gem	2022/09/18	$3 \times 600$	—
	2022/11/07	$2 \times 600$	1.2
V733 Per	2022/09/17	$2 \times 600$	—
	2022/11/10	$2 \times 600$	1.4

### 2.6. V733 Per

Как переменная звезда впервые отмечена в работе Hoffmeister (1968). Сведения о периоде  $P = 77.53$  дня и типе кривой блеска «EA» были опубликованы Otero et al. (2005). Объект включен в каталог затменных переменных звезд Avvakumova et al. (2013) как разделенная система.

## 3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

В наблюдениях был использован оптический двухлучевой спектрограф низкого и среднего разрешения TDS (Potanin et al., 2020), который является штатным прибором 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ. Прибор позволяет получать длиннощелевые спектры в спектральном диапазоне 3600–7500 Å со спектральной разрешающей силой  $R \leq 3000$ . Для разделения света он оснащен дихроичным делителем. В качестве дисперсионных элементов установлены голографические решетки с объемным фазированием (Volume-phase holographic grating). Светоприемниками являются камеры Andor Newton 940P с ПЗС  $512 \times 2048$  пикселей.

Наблюдения по нашей программе в сентябре и ноябре 2022 года проводились со стандартной входной щелью  $1''$  в конфигурации с гризмой VRH505–1800 для синего рукава спектрографа и решеткой VRH650–1200 для красного. Были получены спектры в диапазонах длин волн 4310–5440 Å и 5625–7415 Å соответственно. После каждого

объекта наблюдался спектр сравнения для последующей калибровки по длинам волн. Дополнительные детали наблюдений приведены в таблице 2. Качество изображений в сентябре в FITS-заголовки не записывалось.

Для обработки спектральных данных мы использовали систему программ на языке Python, описанную в работе Potanin et al. (2020). Обработка включала в себя коррекцию за искусственный сдвиг сигнала АЦП (bias correction), коррекцию за неравномерность попиксельной чувствительности приемника (flat fielding), обнаружение и устранение следов космических частиц, а также последующие стандартные шаги двумерной спектральной обработки (Kniazhev, 2022). Одномерные данные были получены путем суммирования отсчетов в апертуре, размер которой зависел от качества изображений. Для проведения коррекции обработанных данных за спектральную чувствительность системы наблюдался спектрофотометрический стандарт. Последним шагом обработки было объединение спектров обоих рукавов в один общий спектр. Спектральное разрешение получившихся спектров составляет  $R = 2200\text{--}3200$  для синего рукава и  $R = 2200\text{--}2600$  — для красного.

## 4. АНАЛИЗ ДАННЫХ

### 4.1. Пакет FBS

Анализ полностью обработанных спектров спектрографа HRS мы проводили с помощью пакета FBS (Fitting Binary Stars; Kniazhev, 2020; Kniazhev et al., 2020), специально разработанного нашей группой для этих целей. Пакет использует библиотеку теоретически рассчитанных звездных спектров высокого разрешения и предназначен для определения лучевых скоростей и звездных параметров ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$ ,  $v \sin i$ , [Fe/H]) обоих компонентов двойной системы, а также параметра покраснения спектров  $E(B - V)$  и вклада  $W$  каждого компонента в наблюдаемый спектр ( $W_1 + W_2 = 1$ ). Программа одновременно аппроксимирует наблюдаемый спектр модельным, который получается путем интерполяции сетки звездных моделей, и сворачивает его с функцией, учитывающей инструментальное разрешение и уширение, вызванное вращением звезды  $v \sin i$  со сдвигом, соответствующим конкретному значению лучевой скорости на данную эпоху. Для двойной звезды проводится подгонка двух модельных спектров компонентов, каждого со своей лучевой скоростью и параметрами звездной атмосферы, то есть разложение наблюдаемого спектра на спектры двух компонентов по отдельности. Если имеется несколько спектров двойной системы, полученных в разные эпохи, то программа может находить решение, в котором параметры  $(T_{\text{eff}}, \lg g, v \sin i, [\text{Fe}/\text{H}], W)_{1,2}$

и  $E(B - V)$  удовлетворяют всем спектрам, фитируемым одновременно, а скорости обоих компонентов  $V_{1,2}^j$  определяются для каждой конкретной эпохи  $j$ . Используемые звездные модели должны быть предварительно приведены к разрешению используемого спектрографа (свернуты с инструментальным контуром).

В процессе работы программа **FBS** ищет глобальный минимум функции:

$$\chi^2 = \sum_j \chi_j^2 = \sum_j \sum_\lambda \left( \frac{F_\lambda^j - M_\lambda^j}{\delta F_\lambda^j} \right)^2, \quad (1)$$

где

$$M_\lambda^j = C_\lambda \sum_{k=1,2} w_k S(T_{\text{eff}k}, \lg g_k, [Z/H]_k) * \mathcal{L}(V_k^j, v \sin i_k), \quad (2)$$

где  $F_\lambda^j$ ,  $\delta F_\lambda^j$ ,  $M_\lambda^j$  — это наблюдаемый спектр, полученный в  $j$ -ю эпоху, его ошибки и модель соответственно;  $S$  — модель одного из звездных компонентов, интерполированная на основе используемой библиотеки звездных спектров;  $\mathcal{L}$  — ядро свертки для определения эффекта уширения спектральных линий благодаря вращению звезды (Gray, 1992) и сдвига спектра компонента  $k$  из-за изменения его скорости в эпоху  $j$  (символ «\*» в формуле (2) означает свертку);  $C_\lambda$  — это или полиномиальный мультипликативный континуум, или кривая поглощения при заданном  $E(B - V)$ . Методами поиска минимума этой функции являются любые численные методы, используемые в библиотеке **lmfit**<sup>1)</sup>. Опыт работы с **FBS** показывает, что наиболее устойчивый и правильный результат в плане поиска глобального минимума получается при использовании метода «differential evolution», который и был использован нами.

Дополнительная особенность программы **FBS** заключается в возможности связать между собой любую пару одинаковых параметров ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$ ,  $v \sin i$ ,  $[Fe/H]_{1,2}$ ), предположив, что они совпадают для обоих компонентов. В текущем исследовании программа **FBS** применялась ко всем полученным спектрам только с одним ограничением — предполагалось, что оба компонента двойной системы имеют одинаковую металличность:  $[Fe/H]_1 \equiv [Fe/H]_2$  (Hawkins et al., 2020).

#### 4.2. Использование пакета **FBS** со спектрами низкого разрешения

Результаты работы пакета **FBS** использовались при анализе спектров как высокого, так и низкого

разрешения ( $R = 800-1000$ , Muhie et al., 2021; Gvaramadze et al., 2021). Необходимо отметить, что во всех опубликованных статьях со спектрами низкого разрешения пакет применялся исключительно в моде определения параметров одной звезды, хотя и показал в этом случае очень хорошую точность при определении металличности и скоростей большой выборки Лирид  $\sigma = 0.16$  dex для металличностей и  $\sigma = 20$  км с<sup>-1</sup> для скоростей (Muhie et al., 2021), и по этим характеристикам хорошо совпадает с использованием программы **ULYSS** в ее приложении к звездным спектрам обзора **LAMOST** (Wu et al., 2011; Liu et al., 2015).

Очевидно, что разложение наблюдаемого спектра низкого разрешения ( $R = 800-3000$ ) на два звездных компонента, с одной стороны, достаточно трудная физическая задача (особенно когда оба компонента очень близки по своему спектральному классу и имеют довольно небольшую разность лучевых скоростей — в этом случае в наблюдаемом спектре может не быть информации о наличии двух спектральных компонентов). С другой стороны, эта задача опасно проста в математическом смысле — описание любого спектра двумя компонентами, скорее всего, математически более выгодно, чем описание одним компонентом (остаточная разность имеет меньший  $\chi$ -квадрат). В то же время сама задача поиска двойных звездных систем на основе спектров низкого разрешения является очевидно востребованной, исходя из наличия огромного количества спектральных данных этого класса различных обзоров: 240 000 спектров звезд в результате обзора **SEGUE** (Yanny et al., 2009), 140 000 — по завершении обзора **SEGUE-2** (Yanny et al., 2009) и более чем 10 миллионов спектров звезд уже полученных в процессе обзоров **LAMOST** и публично доступных в релизе **DR8**<sup>2)</sup>.

Мы предложили очень простой подход для поиска двойных систем в спектральных данных низкого разрешения типа **LAMOST** (Князев и др. 2023, в подготовке). Во-первых, адаптировали спектральную библиотеку Coelho (2014) под спектральное разрешение спектров **LAMOST** (Wang et al., 2019). Во-вторых, сформировали тестовую выборку заведомо одиночных звезд, спектры которых были получены на **LAMOST**. Далее мы промоделировали с помощью **FBS** все спектры из тестовой выборки сперва как одиночные звезды, а потом как двойные. Наиболее подходящими для отбора мы посчитали два критерия:

1) параметр, описывающий, насколько улучшилось качество моделирования спектра двумя

<sup>1)</sup><https://lmfit.github.io/lmfit-py/>

<sup>2)</sup><http://dr8.lamost.org>

звездами по сравнению с моделированием одной звездой:

$$Q = \frac{(\chi_{\text{one star}}^2 - \chi_{\text{two stars}}^2)}{\chi_{\text{one star}}^2} \quad (3)$$

2) параметр  $W_1$ , показывающий вклад компонента А в полный поток на длине волны 5500 Å.

Было показано, что распределение одиночных звезд в пространстве параметров  $Q - W_1$  очень узкое, при этом с учетом средних величин и  $3\sigma$ -ошибки для этих распределений никакая из одиночных звезд тестовой выборки не лежит в области параметров  $Q > 0.10$  и  $W_1 < 0.90$ . Именно ее и следует считать той областью, где оказываются двойные звезды, которые будут найдены при таком подходе. Эта методика была использована при изучении спектров двойных звезд из каталога Avvakumova et al. (2013), полученных на LAMOST (Князев и др. 2023, в подготовке). В окончательном варианте метода мы решили рассматривать каждый спектр, полученный для одной и той же звезды, независимо от других, несмотря на возможность FBS анализировать такие спектры одновременно. В этом решении мы исходили из понимания, что для двойных систем заранее неизвестно, в какой момент фазы будет получен спектр, и поэтому отношение потоков компонентов одной и той же системы может быть разным в разное время для двойных систем с типом кривых блеска «ЕВ», «ЕW» и «Е».

Этой же методике мы следовали при анализе спектров, полученных на КГО ГАИШ МГУ, в данной работе. Использовались теоретические модели звезд из библиотеки Coelho (2014), поскольку оказалось, что модели звезд из этой библиотеки существенно более похожи на наблюдаемые спектры (финальный  $\chi^2$  в два раза меньше) по сравнению с моделями из звездной библиотеки RHOENIX (Husser et al., 2013). Обе библиотеки были предварительно приведены к спектральному разрешению спектров КГО ГАИШ МГУ. Для двух исследуемых объектов — EU Gem и LX Gem) — есть спектры LAMOST, которые мы также включили в рассмотрение. Результаты анализа представлены далее.

#### 4.3. Вычисление абсолютных параметров систем

Имеющийся набор параметров каждого компонента, после анализа с FBS, а также параллакс из данных Gaia,  $V$ -величина для системы и период позволяют рассчитать абсолютные параметры изучаемых звездных систем. Используемые для этой

цели соотношения приведены ниже:

$$\begin{aligned} A_V &= 3.1E_{B-V}, \\ M_V &= m_V + 5 \lg \varpi (\text{mas}) - 10 - A_V, \\ M_{V1} &= M_V - 2.5 \lg W_1, \\ M_{V2} &= M_{V1} - 2.5 \lg (1 - W_1), \\ \lg L_j &= 0.4(M_{\text{bol}\odot} - M_V, j - BC_j), \\ \lg R_j &= 0.5 \lg L_j - 2 \lg T_{\text{eff},j} + 7.52385, \\ \lg M_{\text{star } j} &= \lg g_j + 2 \lg R_j - 4.438, \\ a(R_\odot) &= \sqrt[3]{74.6P^2(m_1 + m_2)}, \\ q_1 &= m_1/m_2, \\ q_2 &= m_2/m_1, \\ RLF F_j &= \frac{R_j(0.6q_j^{2/3} + \ln(1 + q_j^{1/3}))}{0.49q_j^{2/3}a}, \end{aligned} \quad (4)$$

где индекс  $j$  принимает значения 1 и 2 для звездных компонентов системы, а параметры без индекса относятся ко всей системе. Расчеты проводились на языке Python с использованием пакета `uncertainties`<sup>3)</sup>, который позволяет легко рассчитывать ошибки выходных параметров с учетом ошибок входных параметров. Боллометрические поправки определялись путем интерполяции данных из работы Straizys and Kuriliene (1981), ошибки интерполяции также учитывались. Формула для вычисления заполнения полости Роша RLFF (Roche-lobe filling factor) взята из работы Eggleton (1983).

## 5. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты нашего анализа полученных спектров для шести долгопериодических разделенных затменных двойных звезд приведены в таблице 3 и на рис. 1–3. Для каждого спектра, представленного в этой таблице, даны значения показателей двойственности, а также параметры при разложении спектра на спектры двух звезд. Исключение составили системы OT And, LX Gem и IM Del, все спектры которых не показывают двойственности. Последними в данной таблице приведены результаты анализа двух спектров LAMOST для EU Gem и LX Gem.

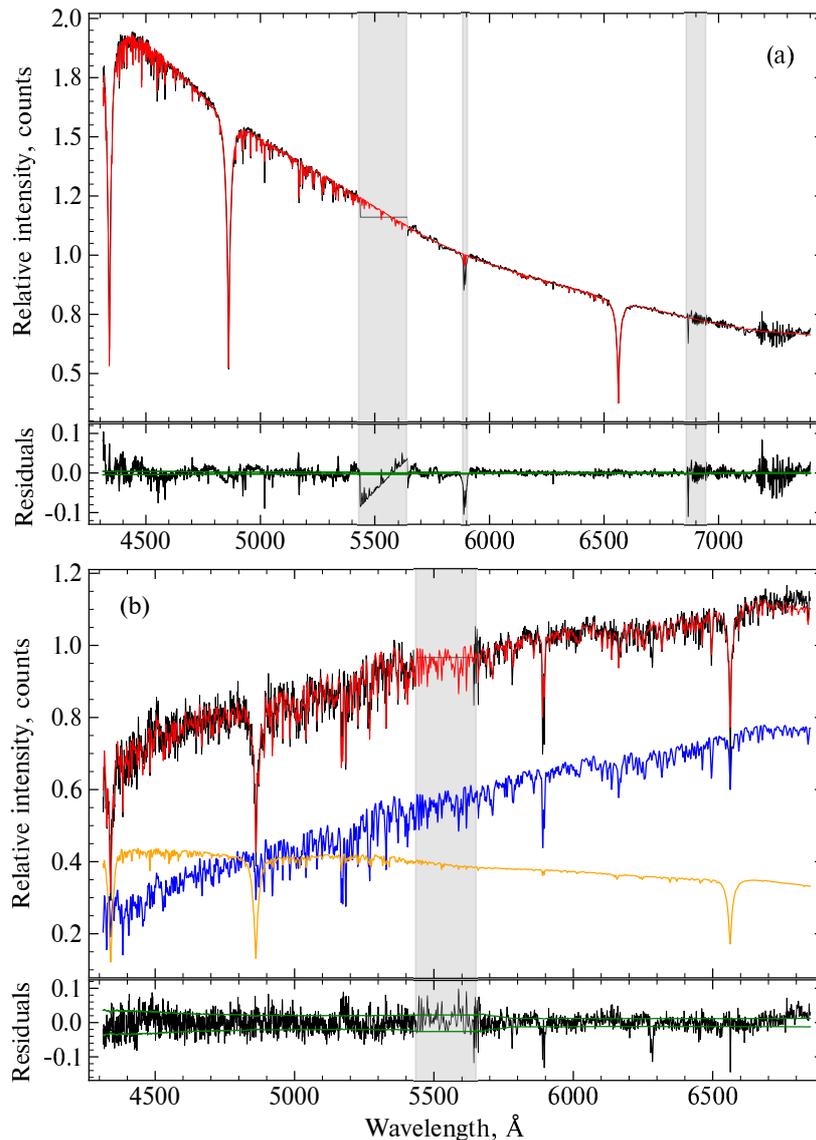
В процессе анализа спектров КГО ГАИШ МГУ исключалась спектральная область 5427–5635 Å, которая не покрывается обоими рукавами спектрографа, а также области линий NaD 5885–5905 Å и атмосферных линий OH 6860–6940 Å. На рисунках эти области показаны вертикальными серыми колонками. Для спектров LAMOST исключался

<sup>3)</sup><https://pypi.org/project/uncertainties/>

Таблица 3. Результаты анализа полученных спектров

Объект	Дата	Показатели двойственности		Компонент А			Компонент В			Параметры			Параметры Gaia	
		$Q$	$W_1^a$	$T_{\text{eff}}$ , К	$\lg g$	Sp	$T_{\text{eff}}$ , К	$\lg g$	Sp	[Fe/H], dex	$E(B - V)$ , mag	$V_{\text{hel}}$ , km s <sup>-1</sup>	$V_{\text{hel}}$ , km s <sup>-1</sup>	[Fe/H], dex
OT And	15/09/2022	0.06	0.92	7746	3.89	A6 V	—	—	—	-0.89	0.60	-8	—	—
	17/09/2022	0.01	0.80	7794	3.81	A6 V	—	—	—	-0.91	0.35	-23	—	—
V1156 Cyg	15/09/2022	0.18	0.36	8445	4.54	A4 V	5500	2.95	G2 III	-0.20	0.73	-1	-24.16 ± 9.74	—
	17/09/2022	0.30	0.35	8878	4.59	A3 V	5406	3.34	G3 III	-0.26	0.84	-18	-24.16 ± 9.74	—
	20/11/2022	0.46	0.39	8622	3.96	A3 V	5247	3.16	G4 III	-0.32	0.41	-11	-24.16 ± 9.74	—
IM Del	17/09/2022	0.08	0.36	3584	0.74	M1 II	—	—	—	-1.00	0.54	-75	-57.49 ± 0.31	—
	20/11/2022	0.05	0.25	3559	0.72	M1 II	—	—	—	-0.99	0.34	-48	-57.49 ± 0.31	—
EU Gem	26/09/2022	0.34	0.37	8605	3.88	A4 V	5268	3.09	G4 III	-0.69	0.56	73	16.92 ± 6.56	-0.31
	06/11/2022	0.32	0.39	8674	4.14	A4 V	5306	2.61	G3 III	-0.68	0.21	22	16.92 ± 6.56	-0.31
LX Gem	17/09/2022	0.05	0.40	3226	1.26	M4 III	—	—	—	-0.48	0.00	47	58.42 ± 0.66	—
	07/11/2022	0.03	0.36	3262	1.09	M4 III	—	—	—	-0.16	0.00	48	58.42 ± 0.66	—
V733 Per	17/09/2022	0.15	0.18	8384	3.50	A7 IV	5494	3.25	G2 III	-0.29	0.44	-36	-31.34 ± 6.95	-0.11
	10/11/2022	0.22	0.21	8000	3.47	A5 IV	5442	3.26	G2 III	-0.26	0.55	-33	-31.34 ± 6.95	-0.11
LAMOST														
EU Gem	—	0.34	0.30	8255	3.10	A6 IV	5269	3.05	G4 III	-0.71	0.17	40	16.92 ± 6.56	-0.31
LX Gem	—	0.05	0.77	3399	1.19	M5 III	—	—	—	-0.31	0.00	65	58.42 ± 0.66	—
Errors				400	0.25		400	0.25		0.20	0.10	20		

<sup>a</sup> — вклад компонента А в полный поток на длине волны 5500 Å.



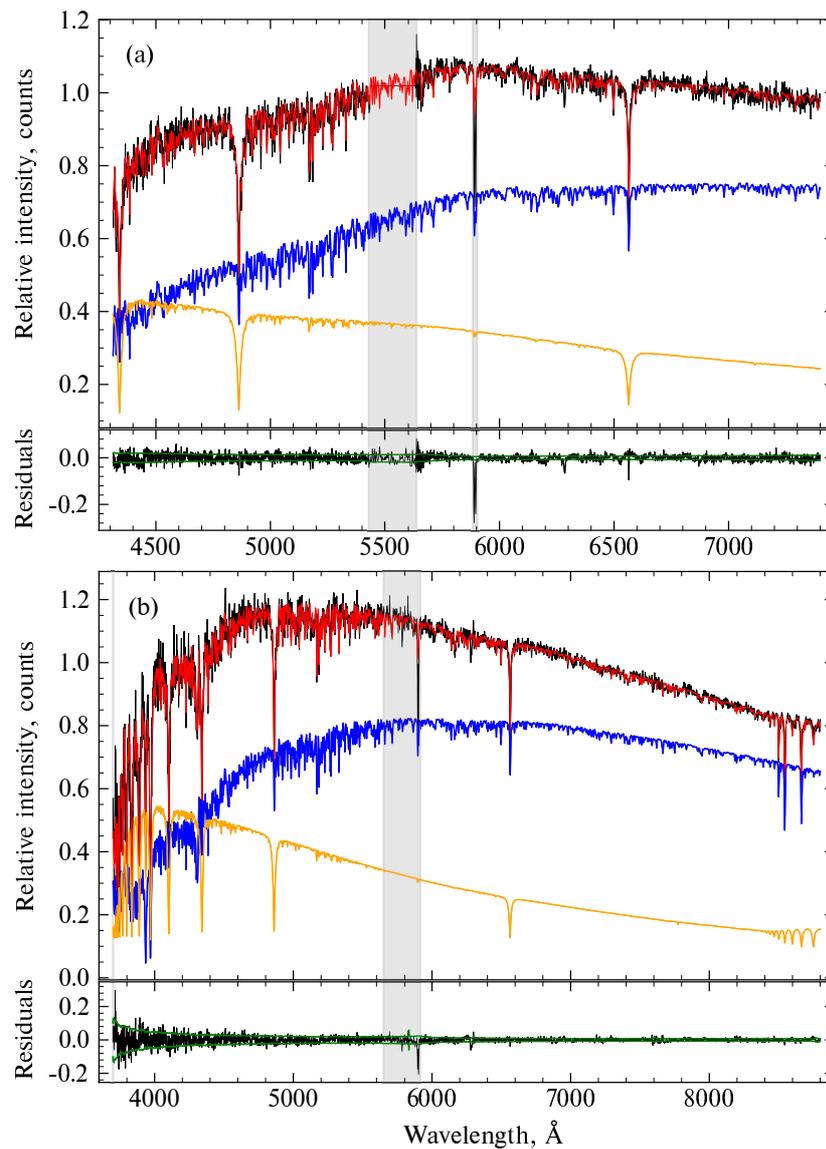
**Рис. 1.** Результат анализа спектров КГО ГАИШ ОТ And и V1156 Cyg. На верхней панели каждого рисунка черным цветом показан полностью обработанный спектр, являющийся результатом объединения спектров синего и красного рукавов. Синим и желтым цветом показаны спектры каждого из модельных компонентов, сумма которых дает красный модельный спектр. На нижней панели каждого рисунка черным цветом показана разница наблюдаемого и модельного спектра вместе с ошибками наблюдаемого потока (показаны зеленым цветом). Серым цветом показаны интервалы длин волн, исключенные из анализа.

диапазон длин волн 5650–5910 Å (Wang et al., 2019).

В работе Kniazev (2020) пояснялось, что выходные ошибки FBS являются ошибками фитинга, которые часто недооценивают реальные ошибки. По этой причине мы оцениваем ошибки, используя каждый полученный спектр одного и того же объекта как независимый (Kniazev, 2020; Malkov and Kniazev, 2022). Эти ошибки, характерные для полученных параметров моделируемых спектров, приведены в нижней строке таблицы 3. Несмотря на формально разные скорости, найденные у компонентов, с учетом недостаточного разрешения

можно считать, что мы не видим значимой разности скоростей компонентов и поэтому в таблице 3 приведена скорость, равная средней скорости обоих компонентов. Данные Gaia релиза DR3 (Prusti et al., 2016; Vallenari et al., 2022) также приводят скорости для пяти изучаемых нами систем. В таблице 3 мы также привели скорости и металличности по данным Gaia.

Здесь необходимо отметить, что в системах DLEB мы называем компонентом A (или первичным компонентом) звезду с большей эффективной температурой и компонентом B (вторичный компонентом) — более холодную звезду.

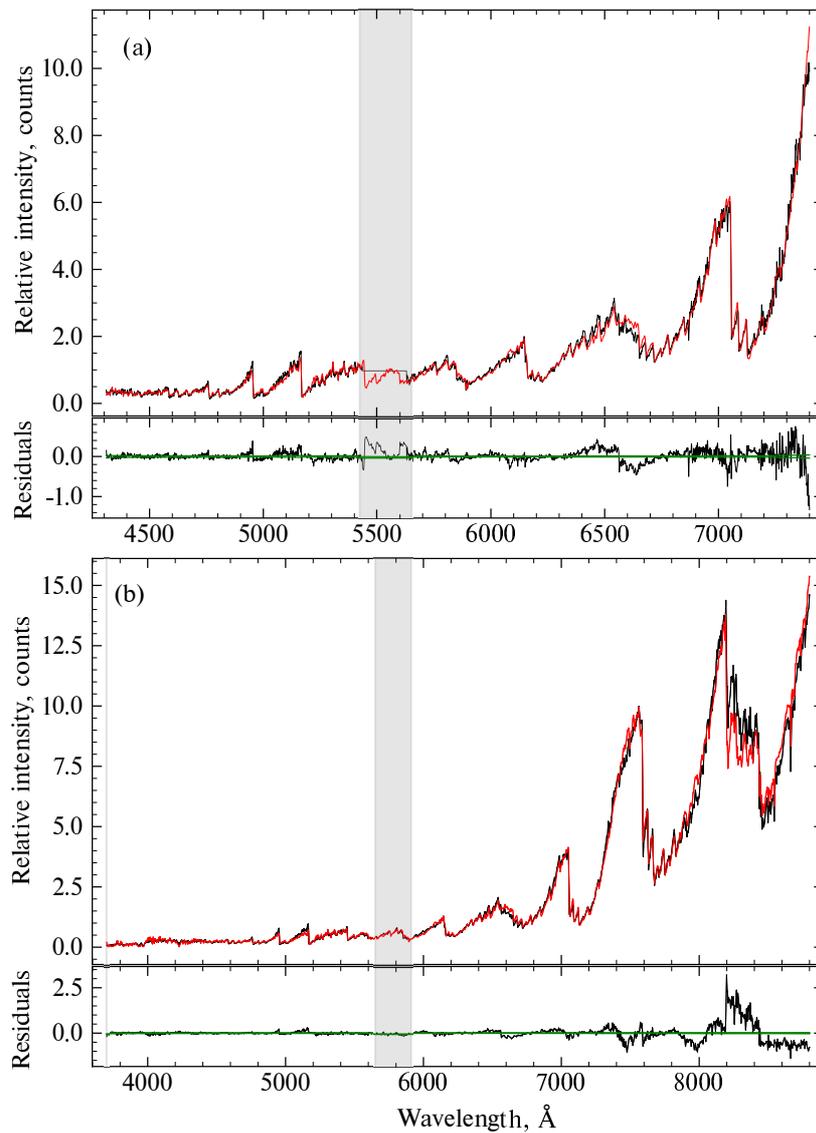


**Рис. 2.** Результат анализа спектров EU Gem из КГО ГАИШ (a) и LAMOST (b). Описание панелей совпадает с описаниями для рис. 1.

Наш спектральный анализ с использованием пакета **FBS** позволил получить следующие результаты:

1. Спектр системы OT And не показывает значимой двойственности. Это обусловлено тем, что оба компонента имеют практически одинаковые массу и спектральный тип (Fekel et al., 2022). Это самый сложный случай для спектрального разложения, и вероятность определить двойственность подобных систем по спектрам низкого разрешения очень мала. Тем не менее определенная нами температура и  $\lg g$  соответствуют звезде ГП класса A6 V, что совпадает с результатами работы Fekel et al. (2022), особенно с учетом того, что эти авторы определяли тем-

пературу не спектрально, а фотометрическими методами и есть произвол в 400 K в зависимости от того, какие фотометрические калибровки принять (см. Fekel et al., 2022). Сильно отличаются найденная нами металличность,  $-0.9$  dex, и  $0.12$  dex из работы Fekel et al. (2022). Однако тут надо отметить, что мы определяли металличность по спектрам, а Fekel et al. (2022) оценивали ее путем сравнения финальных параметров массы  $M$  и радиуса  $R$  с моделями MIST, то есть непрямым методом. Мы уже отмечали сдвиг между металличностью, определяемой спектрально как с моделями Coelho (2014), так и с моделями PHOENIX, и металличностью, для



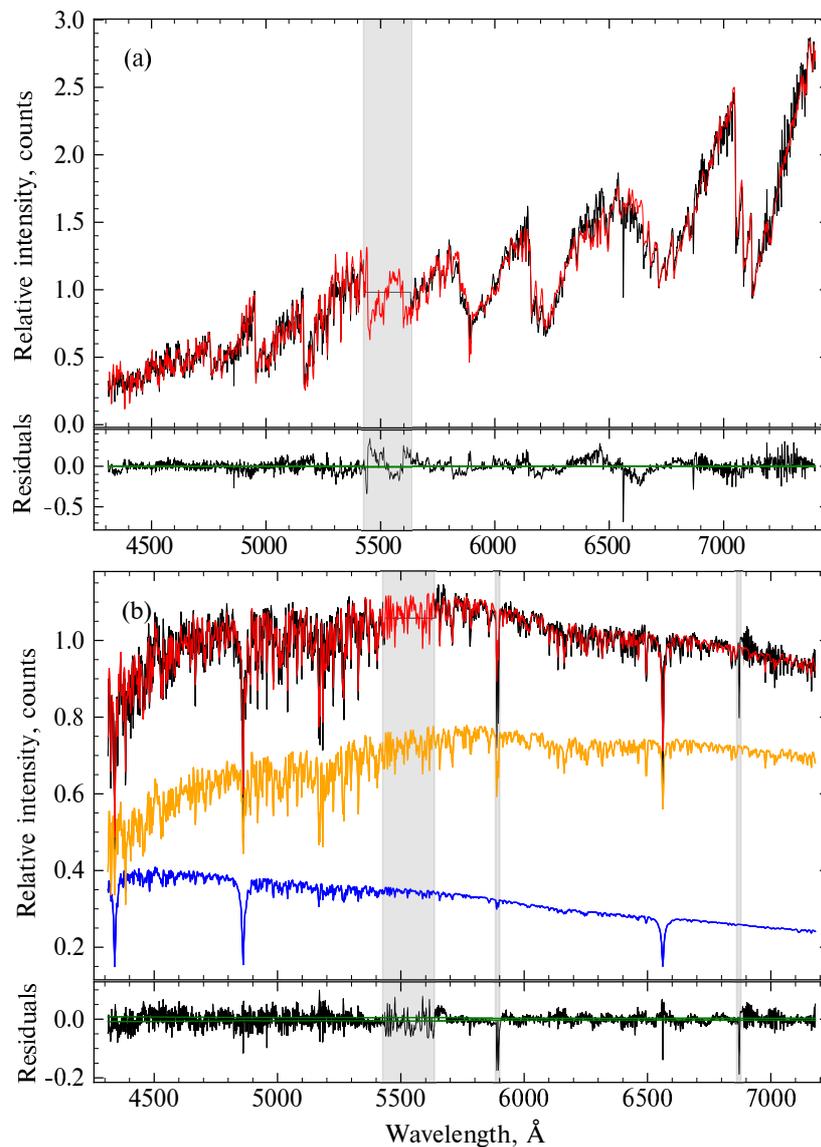
**Рис. 3.** Результат анализа спектров LX Gem КГО ГАИШ (а) и LAMOST (б). Описание панелей совпадает с описаниями для рис. 1. Второй компонент найден не был, поэтому показаны только наблюдаемый и модельный спектры.

оценки которой использовались модели MIST (Kniazev, 2020).

- Спектр системы V1156 Cyg является суммой «горячего» спектра A3–4 V на ГП и гораздо более холодного гиганта G2–4 III. Подобные системы, видимо, должны наиболее часто находиться по спектрам низкого разрешения из-за того, что суммарный спектр содержит линии и энергетическое распределение обоих компонентов, достаточно сильно отличающихся по температуре. Все три спектра показывают одинаковое разложение в рамках принятых ошибок. Скорость системы V1156 Cyg, измеренная по данным Gaia, очень хорошо совпадает с нашими измерениями. Сравнение с оцененными ранее фотометрическим способом спек-

тральным типом и классом главного компонента (Friedemann and Reimann, 1991) показывает, что это средневзвешенный спектральный класс обоих компонентов.

- Более ярким компонентом IM Del является холодный гигант класса M1 II. Данные Gaia приводят измеренную скорость  $-57.49 \pm 0.31 \text{ km s}^{-1}$ , которая достаточно хорошо совпадает с полученной скоростью по обоим спектрам КГО ГАИШ МГУ с учетом ошибок.
- Спектр EU Gem состоит из спектра звезды A4–6 V (по спектрам КГО ГАИШ МГУ) или A6 IV (LAMOST) и более холодного гиганта G3–4 III, вклад которого в полосу фильтра V в два раза превышает вклад горячего компонента.



**Рис. 4.** Результаты анализа спектров КГО ГАИШ IM Del и V733 Per. Описание панелей совпадает с описаниями для рис. 1. Так как второй компонент в спектре IM Del найден не был, даны только наблюдаемый и модельный спектры.

При этом, согласно данным Gaia DR3, измеренная по спектру Gaia температура  $T_{\text{eff}} = 7172$  К, что достаточно хорошо совпадает со средним арифметическим температур обоих компонентов, найденных в нашем анализе. Дополнительно Gaia приводит определенную по их данным величину  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.31$  dex для этой системы, что примерно в два раза выше нашей оценки. Это же касается определенного Gaia  $\lg g = 3.62$  dex, что примерно посередине наших величин  $\lg g$  для обоих компонентов. Системная скорость Gaia близка к измеренной нами в двух случаях: для спектра LAMOST и для данных, полученных в КГО ГАИШ МГУ 6 ноября. От-

личие для другой даты на уровне  $2.7\sigma$  полной ошибки, что достаточно много.

5. Двойственности звезды LX Gem не обнаруживается во всех полученных спектрах. Спектр звезды очень хорошо описывается спектром холодной звезды M4. Данные Gaia приводят измеренную скорость  $58.42 \pm 0.66$  км с<sup>-1</sup>, которая с учетом ошибок хорошо совпадает с полученной нами оценкой. Интересно, что параметры, определенные LAMOST для своих данных, дают  $\lg g = 1.214$  dex и  $T_{\text{eff}} = 3200$  К, что очень хорошо согласуется с нашими параметрами. Металличность для этого спектра LAMOST не приводит.
6. Двойная система V733 Per, как показывает наш анализ, состоит из горячего компонен-

Таблица 4. Абсолютные параметры изучаемых двойных систем

Объект	$M_{\text{star}}, M_{\odot}$		$\lg L, L_{\odot}$		$R, R_{\odot}$		$a, R_{\odot}$	RLFF	
	A	B	A	B	A	B		A	B
OT And	$1.96 \pm 0.72$	$1.96 \pm 0.72$	$1.39 \pm 0.16$	$1.39 \pm 0.16$	$2.75 \pm 0.49$	$2.75 \pm 0.49$	$50.2 \pm 6.1$	$\ll 1$	$\ll 1$
V1156 Cyg	$1.95 \pm 1.27$	$3.41 \pm 2.23$	$1.47 \pm 0.13$	$1.69 \pm 0.13$	$2.42 \pm 0.37$	$8.04 \pm 1.24$	$92.6 \pm 15.9$	$\ll 1$	$\ll 1$
IM Del	$3.07 \pm 0.98$	$3.07 \pm 0.98$	$3.36 \pm 0.14$	$3.36 \pm 0.14$	$125.11 \pm 19.96$	$125.11 \pm 19.96$	$423.1 \pm 44.7$	0.48	0.48
EU Gem	$0.70 \pm 0.80$	$1.52 \pm 1.11$	$1.25 \pm 0.23$	$1.55 \pm 0.23$	$1.94 \pm 0.52$	$7.11 \pm 1.88$	$76.8 \pm 18.0$	$\ll 1$	$\ll 1$
LX Gem	$2.93 \pm 1.70$	$2.93 \pm 1.70$	$2.73 \pm 0.24$	$2.73 \pm 0.24$	$73.24 \pm 20.03$	$73.24 \pm 20.0$	$223.5 \pm 41.3$	0.65	0.65
V733 Per	$0.87 \pm 0.28$	$11.57 \pm 3.45$	$1.56 \pm 0.08$	$2.22 \pm 0.08$	$2.80 \pm 0.44$	$13.28 \pm 1.98$	$177.3 \pm 17.6$	$\ll 1$	$\ll 1$

та А5–7 IV, уже сошедшего с ГП, и более холодного гиганта G2 III, вклад которого в фильтре  $V$  в четыре раза превышает вклад горячего компонента. Данные Gaia также приводят гелиоцентрическую скорость системы как  $-31.34 \pm 6.95$  км с $^{-1}$ , что практически совпадает с нашими измерениями, а также температуру  $T_{\text{eff}} = 6099.4$  К, которая, как и в случае EU Gem, примерно равна среднему арифметическому температур для обоих компонентов, определенных нами. Дополнительно Gaia также приводит найденную величину  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.11$  dex для этой системы, что в два раза больше нашей оценки, которая хорошо согласуется для спектров, полученных в КГО ГАИШ в разные даты. Gaia определила  $\lg g$  для этой системы как 2.99 dex, что ближе к этой величине для вторичного компонента и является вполне логичным с учетом того факта, что проект Gaia определяет эти параметры по инфракрасному триплету кальция Ca II  $\lambda 8498$ ,  $\lambda 8542$ ,  $\lambda 8662$ , где вклад горячего первичного компонента пренебрежимо мал.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

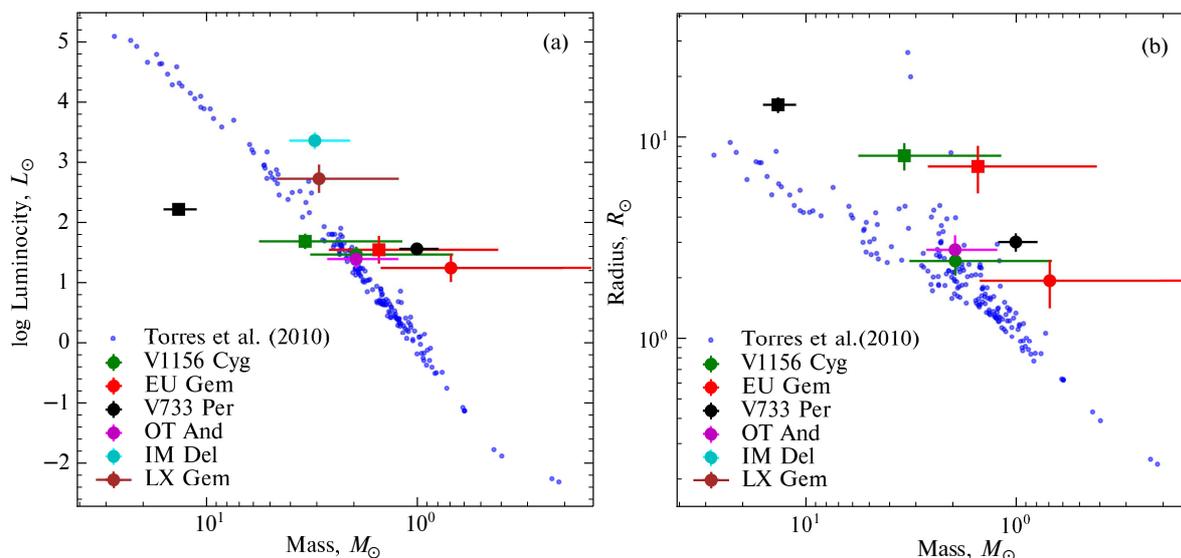
### 6.1. Абсолютные параметры изучаемых систем

Рассчитанные по формулам (4)–(14) величины абсолютных параметров приведены в таблице 4. Для систем OT And, IM Del, LX Gem приведенные параметры рассчитывались в предположении, что система состоит из двух одинаковых компонентов. Для OT And мы знаем, что это действительно так (Fekel et al., 2022). В случае IM Del и LX Gem мы попытались оценить возможные параметры второго компонента, задав его вклад  $W_2 = 0.1$ , предполагая разумные значения параметров  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  звезд ГП и перебирая последовательно спектральные типы В–F. Эти оценки показывают, что такие варианты для вторичных компонентов систем IM Del и LX Gem невозможно подобрать, и

наиболее разумным является предположение, что системы состоят из двух, практически одинаковых компонентов.

Рисунок 5 показывает положение полученных абсолютных параметров двойных систем из данной работы на диаграмме соотношения «масса – светимость» (рис. 5a) и диаграмме соотношения «масса – радиус» (рис. 5b) звезд ГП из работы Torres et al. (2010). Из рисунка видно, что основная масса компонентов двойных систем в нашей работе уже ушла с ГП, и поэтому расположена в области справа от звезд ГП. Только первичный компонент V1156 Cyg и оба компонента OT And расположены на ГП, как и должно быть. В случае системы EU Gem ошибки очень большие, в основном, из-за большого разброса величины покраснения  $E(B - V)$ . Область слева от положения звезд ГП является запретной, поскольку левый край распределения из Torres et al. (2010) показывает положение звезд ГП нулевого возраста. Несмотря на то, что вторичный компонент системы V1156 Cyg расположен в этой области, большая ошибка определения его светимости показывает, что он может лежать и в разрешенной области, справа от ГП. Однако, положение вторичного компонента системы V733 Per нельзя описать ошибками входных параметров. Наш анализ показывает, что самым вероятным источником ошибки является вычисленное расстояние до него, основанное на данных Gaia. Уменьшение расстояния в два раза приводит к смещению положения вторичного компонента в область допустимых значений.

Мы также оценили заполнение полостей Роша (параметр RLFF) для всех компонентов изучаемых систем. Оценка показывает, что ни один из компонентов этих систем не заполнил свою полость Роша, хотя в случае систем IM Del и LX Gem величины этих параметров достаточно велики. Из оценки величины RLFF, в частности, следует, что ни одна из систем V1156 Cyg, EU Gem и V733 Per не является Алголем (Malkov, 2020; 2021).



**Рис. 5.** Полученные абсолютные параметры двойных систем из данной работы, наложенные на диаграммы «масса – светимость» (a) и «масса – радиус» (b) из работы Torres et al. (2010). Главный компонент каждой системы показан заполненным кружком, а вторичный компонент — заполненным квадратиком. Для систем OT And, IM Del, LX Gem приведенные параметры рассчитывались в предположении, что система состоит из двух одинаковых компонентов.

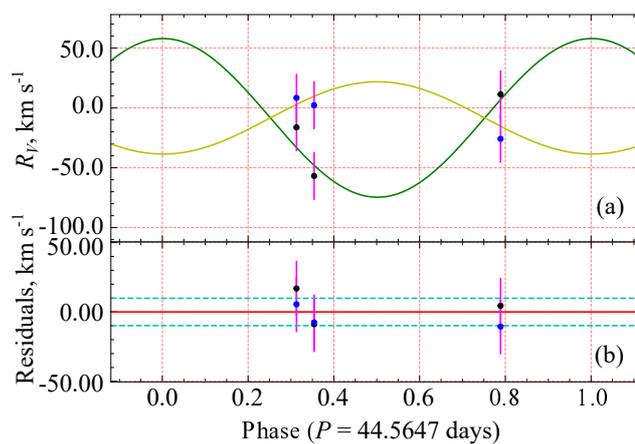
### 6.2. Спектральный метод для очистки фотометрической выборки

Полученные нами результаты показывают полезность выбранного подхода, который позволяет с использованием достаточно малого наблюдательного времени, легко очистить выборку от двойных систем, которые определенно не являются объектами нашего интереса. Мы не обнаружили двойственности в спектрах IM Del и LX Gem, а самыми яркими компонентами этих систем являются холодные гигант и сверхгигант. Для обеих этих систем есть два варианта:

1. Система состоит из двух компонентов одинакового спектрального класса и светимости, которые не могут быть разделены при помощи используемого спектрального разрешения. В этом случае эта система должна быть исключена из выборки, поскольку оба компонента уже сошли с ГП.
2. Система содержит более горячий главный компонент, находящийся на ГП и дающий вклад равный или менее 10% в фильтре  $V$ . Как мы описывали в предыдущем разделе 6.1, таких решений мы не обнаружили.

Следовательно, системы IM Del и LX Gem должны быть исключены из дальнейшего использования в нашей выборке, независимо от конкретной ситуации для каждой из этих систем.

В соответствии с нашим анализом, система OT And не показала двойственности. Тем не менее, основываясь на определенных нами спектральных



**Рис. 6.** Панель (a) — кривая скоростей для V1156 Cyg, посчитанная в предположении периода  $P = 44.5647$  дней и круговой орбиты. Панель (b) — разница между измеренными скоростями и посчитанными моделями для кривых скоростей. Среднеквадратичная ошибка равна  $9.95 \text{ km s}^{-1}$ .

характеристиках ее главного компонента, эта система должна оставаться в нашей выборке, поскольку велика вероятность, что система имеет два очень близких по своим характеристикам компонента. Fekel et al. (2022) уже проделали работу по детальному исследованию этой системы, которое подтверждает наши выводы.

Остальные три системы V1156 Cyg, EU Gem и V733 Per, как видно из нашего анализа, содержат горячий компонент более раннего класса светимости и холодный компонент более позднего класса светимости. В случае V733 Per, оба компонента

уже ушли с ГП, и система должны быть исключена из нашей выборки. В случае V1156 Cyg, главный компонент еще не ушел с ГП, обмена массой нет (вторичный компонент не заполнил полость Роша), и поэтому система остается в выборке для дальнейшего изучения. В случае LX Gem спектры КГО ГАИШ и LAMOST дают слегка разные оценки спектрального класса главного компонента, и поскольку вторичный компонент не заполнил полость Роша, необходимо оставить эту систему в выборке и получить хотя бы один эшелле-спектр для точной оценки спектрального класса главного компонента.

### 6.3. Построение кривых скоростей и оценка параметров

Вопрос возможности использования спектральных данных низкого разрешения (далее в тексте LR;  $R \leq 3500$ ) для построения кривых скоростей и определения масс компонентов, остается открытым. Chen et al. (2022) и Kovalev et al. (2023) использовали метод построения кривых скоростей для спектров LAMOST среднего разрешения (далее в тексте MR;  $R \sim 7500$ ), и предположили, что метод будет работать и для других разрешений. Zhang et al. (2022) развили метод использования нейронных сетей для построения кривых скоростей на основе спектров LAMOST MR. По их оценкам, этот метод позволит строить кривые скоростей для спектральных типов FGK, находящихся на ГП и имеющих разницу скоростей между компонентами более  $50 \text{ км с}^{-1}$ .

Данные LAMOST LR имеют разрешение почти в четыре раза хуже ( $R \sim 2000$ ) и, видимо, только для самых короткопериодических систем с большой разницей скоростей эти данные могут быть использованы для построения кривых скоростей. В нашем случае, спектры КГО ГАИШ имели разрешение лучше данных LAMOST LR, и поэтому нам было интересно попробовать использовать эти данные для построения кривых скоростей. С учетом того, что для построения кривых скоростей надо определить семь параметров, а каждое наблюдение дает по одной скорости для каждого из двух компонентов, нужно иметь не менее трех наблюдений. Тогда, зафиксировав период  $P$ , можно попытаться построить, в нулевом приближении, кривые скоростей для обоих компонент этой системы.

На рис. 6 представлена такая кривая скоростей для системы V1156 Cyg, основанная на наших данных и построенная в предположении, что мы хорошо знаем ее период из оптической фотометрии и система имеет круговую орбиту. Очевидно, что имеющихся наблюдений недостаточно для определения всех параметров с хорошей точностью, однако отношение амплитуд скоростей

( $K_1/K_2 = M_2/M_1 \sim 2.2$ ) показывает, что мы действительно имеем систему, в которой вторичный компонент гораздо более массивный и поэтому имел все основания быстрее проэволюционировать и уйти с ГП.

### 6.4. Некоторые замечания к анализу спектров низкого разрешения двойных систем

Опубликованная в этой работе выборка очень мала и не позволяет сделать статистических выводов. Тем не менее, есть некоторые факты, которые хотелось бы отметить:

1. При моделировании FBS наблюдаемых спектров двойных систем распределением одной звезды, такие параметры как  $T_{\text{eff}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и  $\lg g$  очень хорошо сходятся с параметрами из Gaia и LAMOST.
2. При моделировании FBS наблюдаемых спектров двойных систем распределениями двух звезд, становится очевидным, что  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  главного компонента меняется не очень сильно для систем с компонентами, близкими по параметрам. Однако, результаты могут отличаться значительно для систем с компонентами достаточно разных спектральных классов.
3. Хочется отметить, что при моделировании наблюдаемых LR спектров двойных систем сначала распределением одной звезды, а потом двумя, финальная металличность часто меняется в сторону уменьшения.

Таким образом, можно предполагать, что анализ только свойств главных компонент двойных систем, как, например, в работе Zhang et al. (2019), может приводить к значительным систематическим смещениям определенных параметров в силу означенных выше эффектов.

Можно суммировать, что наша работа указывает на то, что в случае работы со спектрами низкого разрешения с использованием пакета FBS, наиболее легко находятся двойные системы, у которых оба компонента представлены разными спектральными классами. Это происходит в силу того, что FBS использует не только спектральные особенности, но и энергетическое распределение спектров с учетом поглощения. С учетом этой особенности, представляется интересным оценить реальное количество двойных систем типа Алголь (Malkov et al., 2016; Izzard et al., 2018) по данным обзора LAMOST.

## 7. ВЫВОДЫ

Проведены длиннощелевые спектральные наблюдения и их анализ для шести звезд из выборки

долгопериодических разделенных затменных двойных звезд с компонентами на ГП, которая сформирована и используется авторами для построения соотношения масса-светимость для определенно «изолированных» звезд в диапазоне масс  $M/M_{\odot} > 1.5$ . Для всех полученных спектров проведен анализ по методике, позволяющей определить двойственность системы и определить  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  для каждого компонента а также металличность системы  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и избыток цвета  $E(B - V)$ . Наш анализ также позволяет рассчитать абсолютные параметры изучаемых двойных систем.

В данной работе показано, что:

1. Три системы из шести исследованных показали двойственность спектров: V1156 Cyg, EU Gem и V733 Peg. Спектры двойных звезд OT And, IM Del и LX Gem не показали двойственности.
2. Система OT And не показала двойственности, однако ее главным компонентом является горячая звезда ГП, и поэтому эта система должна остаться в нашей выборке.
3. Самыми яркими компонентами систем IM Del и LX Gem являются холодные гигант и сверхгигант, и эти системы должны быть исключены выборки на основании нашего анализа.
4. Спектры систем V1156 Cyg, EU Gem и V733 Peg уверенно показывают двойственность и позволяют определить спектральный тип и класс каждого компонента. Система V733 Peg должны быть исключена из нашей выборки, поскольку оба ее компонента уже ушли с ГП. Система V1156 Cyg должна быть оставлена в выборке, поскольку главный компонент еще не ушел с ГП и обмена массой нет. Система LX Gem должна быть пока оставлена, поскольку спектральный класс главного компонента определен в этой работе недостаточно точно и необходимо получить хотя бы один эшелле-спектр для более точной классификации.
5. Наш анализ позволил построить первое приближение для кривых скоростей системы V1156 Cyg и показал, что в этой системе холодный компонент имеет большую массу.
6. По той же самой методике мы провели анализ двух спектров LAMOST, полученных для систем EU Gem и LX Gem, исследуемых в нашей работе. Мы показали, что определяемые параметры для спектров LAMOST очень хорошо сходятся с параметрами, определенным по спектрам, полученным в КГО ГАИШ.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

А. Ю. Князев благодарит Национальный Исследовательский Фонд Южной Африки (NRF) за

поддержку этой работы. В этой работе использовались данные миссии Gaia Европейского космического агентства (ESA) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные телескопом Gaia Консорциум обработки и анализа данных (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Финансирование DPAC было предоставлено национальными учреждениями, в частности институтами участие в Многостороннем соглашении Gaia.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

И. Ю. Катков благодарит Российский Научный Фонд грант № 21-72-00036 за поддержку развития метода спектральной декомпозиции. Исследования поддержаны в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации грант № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. A. Avvakumova, O. Y. Malkov, and A. Y. Kniazhev, *Astronomische Nachrichten* **334** (8), 860 (2013).
2. S. I. Barnes, P. L. Cottrell, M. D. Albrow, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7014**, p. 70140K (2008).
3. G. F. Benedict, T. J. Henry, O. G. Franz, et al., *Astron. J.* **152** (5), article id. 141 (2016).
4. D. G. Bramall, J. Schmoll, L. M. G. Tyas, et al., *SPIE Conf. Proc.* **8446**, p. 84460A (2012).
5. D. G. Bramall, R. Sharples, L. Tyas, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7735**, p. 77354F (2010).
6. D. A. H. Buckley, G. P. Swart, and J. G. Meiring, *SPIE Conf. Proc.* **6267**, p. 62670Z (2006).
7. B. Cester, S. Ferluga, and C. Boehm, *Astrophys. and Space Sci.* **96** (1), 125 (1983).
8. X.-L. Chen, A.-L. Luo, J.-J. Chen, et al., arXiv e-prints astro/ph:2209.10714 (2022).
9. P. R. T. Coelho, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (2), 1027 (2014).
10. L. A. Crause, R. M. Sharples, D. G. Bramall, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9147**, p. 91476T (2014).
11. R. C. Crawford, S. I. Ingvansson, L. J. Boyd, et al., *Inform. Bull. Var. Stars* **2624**, 1 (1984).
12. O. Demircan and G. Kahraman, *Astrophys. and Space Sci.* **181** (2), 313 (1991).
13. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983).
14. F. C. Fekel, G. W. Henry, J. R. Sowell, et al., *Astron. J.* **164** (5), id. 224 (2022).
15. C. Friedemann and H. G. Reimann, *Inform. Bull. Var. Stars* **3549**, 1 (1991).

16. D. F. Gray, *The observation and analysis of stellar photospheres*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 1992).
17. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, J. S. Gallagher, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503** (3), 3856 (2021).
18. K. Hawkins, M. Lucey, Y.-S. Ting, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **492** (1), 1164 (2020).
19. A. N. Heinze, J. L. Tonry, L. Denneau, et al., *Astron. J.* **156** (5), article id. 241 (2018).
20. E. Hertzsprung, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **2**, 15 (1923).
21. C. Hoffmeister, *Astronomische Nachrichten* **290**, 277 (1968).
22. D. Husar, *Open European Journal on Variable Stars* **0010**, 1 (2005).
23. T. O. Husser, S. Wende-von Berg, S. Dreizler, et al., *Astron. and Astrophys.* **553**, id. A6 (2013).
24. R. G. Izzard, H. Preece, P. Jofre, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473** (3), 2984 (2018).
25. T. Jayasinghe, C. S. Kochanek, K. Z. Stanek, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477** (3), 3145 (2018).
26. T. Kinnunen and B. A. Skiff, *Inform. Bull. Var. Stars* **4896**, 1 (2000).
27. A. Kniazev, *Astrophys. and Space Sci.* **365** (10), article id. 169 (2020).
28. A. Kniazev, *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 334 (2022).
29. A. Y. Kniazev, V. V. Gvaramadze, and L. N. Berdnikov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459** (3), 3068 (2016).
30. A. Y. Kniazev, O. Y. Malkov, I. Y. Katkov, and L. N. Berdnikov, *Research Astron. and Astroph.* **20** (8), id. 119 (2020).
31. A. Y. Kniazev, I. A. Usenko, V. V. Kovtyukh, and L. N. Berdnikov, *Astrophysical Bulletin* **74** (2), 208 (2019).
32. M. Kovalev, S. Wang, X. Chen, and Z. Han, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **519** (4), 5454 (2023).
33. B. V. Kukarkin, Y. N. Efremov, M. S. Frolov, et al., *Inform. Bull. Var. Stars* **311**, 1 (1968).
34. B. V. Kukarkin, P. N. Kholopov, N. P. Kukarkina, and N. B. Perova, *Inform. Bull. Var. Stars* **717**, 1 (1972).
35. X.-W. Liu, G. Zhao, and J.-L. Hou, *Research Astron. and Astroph.* **15** (8), 1089 (2015).
36. O. Malkov and A. Kniazev, *Open Astronomy* **31** (1), 327 (2022).
37. O. Malkov, D. Kovaleva, L. Yungelson, et al., *Baltic Astronomy* **25**, 384 (2016).
38. O. Y. Malkov, *Astron. and Astrophys.* **402**, 1055 (2003).
39. O. Y. Malkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382**, 1073 (2007).
40. O. Y. Malkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **491** (4), 5489 (2020).
41. O. Y. Malkov, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **32** (2), 111 (2021).
42. O. Y. Malkov, E. Oblak, E. A. Snegireva, and J. Torra, *Astron. and Astrophys.* **446** (2), 785 (2006).
43. T. D. Muhie, A. K. Dambis, L. N. Berdnikov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **502** (3), 4074 (2021).
44. D. O'Donoghue, D. A. H. Buckley, L. A. Balona, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372** (1), 151 (2006).
45. S. A. Otero, P. Wils, and P. A. Dubovsky, *Inform. Bull. Var. Stars* **5586**, 1 (2005).
46. P. Pakhomova, L. Berdnikov, A. Kniazev, et al., *Open Astronomy* **31** (1), 106 (2022).
47. G. Pojmanski, *Acta Astronomica* **47**, 467 (1997).
48. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Letters* **46** (12), 836 (2020).
49. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016).
50. S. B. Qian, J. Zhang, J. J. He, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **235** (1), article id. 5 (2018).
51. G. A. Richter, *Zentralinstitut fuer Astrophysik Sternwarte Sonneberg Mitteilungen ueber Veraenderliche Sterne* **5**, 99 (1970).
52. N. N. Samus, O. V. Durlevich, and et al., *VizieR Online Data Catalog II/250* (2004).
53. V. Straizys and G. Kuriliene, *Astrophys. and Space Sci.* **80** (2), 353 (1981).
54. G. Torres, J. Andersen, and A. Giménez, *Astron. and Astrophys.* **18**, 67 (2010).
55. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *arXiv e-prints astro/ph:2208.00211* (2022).
56. A. A. Wachmann, *Astronomische Abhandlungen der Hamburger Sternwarte* **6**, 281 (1966).
57. R. Wang, A.-l. Luo, S. Zhang, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131** (996), 024505 (2019).
58. P. R. Woźniak, S. J. Williams, W. T. Vestrand, and V. Gupta, *Astron. J.* **128** (6), 2965 (2004).
59. Y. Wu, A. L. Luo, H.-N. Li, et al., *Research Astron. and Astroph.* **11** (8), 924 (2011).
60. B. Yanny, C. Rockosi, H. J. Newberg, et al., *Astron. J.* **137** (5), 4377 (2009).
61. B. Zhang, Y.-J. Jing, F. Yang, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **258** (2), id. 26 (2022).
62. J. Zhang, S.-B. Qian, Y. Wu, and X. Zhou, *Astrophys. J. Suppl.* **244** (2), article id. 43 (2019).

## Spectral Types of Long-Period Double-Lined Eclipsing Binary System Components from Low-Resolution Spectroscopy Data

A. Yu. Kniazev<sup>1,2,3,4</sup>, I. Yu. Katkov<sup>3,5,6</sup>, O. Yu. Malkov<sup>7</sup>, L. N. Berdnikov<sup>3</sup>, N. I. Shatsky<sup>3</sup>,  
A. V. Dodin<sup>3</sup>, S. G. Zheltouhov<sup>3,8</sup>, and I. A. Strahov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>South African Astronomical Observatory, Capetown, 7935 South Africa

<sup>2</sup>South African Large Telescope, Capetown, 7935 South Africa

<sup>3</sup>Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

<sup>4</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhiz, 369167 Russia

<sup>5</sup>New York University Abu Dhabi, Saadiyat Island, Abu Dhabi, 129188 UAE

<sup>6</sup>Center for Astrophysics and Space Science, NYU Abu Dhabi, Abu Dhabi, 129188 UAE

<sup>7</sup>Institute of Astronomy of RAS, Moscow, 191187 Russia

<sup>8</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

We present the results of spectral observations and consequent analysis of six long-period double-lined eclipsing binaries (DLEBs) with main-sequence (MS) components from a sample formed with the aim of testing the “mass – luminosity” relation (MLR) for stars in the  $M/M_{\odot} > 1.5$  mass range. We analyzed all the obtained spectra using a technique that allows one to reveal the binary nature of the system and determine  $T_{\text{eff}}$  and  $\log g$  for each component, as well as the system metallicity  $[\text{Fe}/\text{H}]$  and line-of-sight extinction  $E(B - V)$ . We computed the absolute parameters of the systems under consideration. An analysis of the obtained spectra shows that for three of the six objects (V1156 Cyg, EU Gem and V733 Per) we can clearly establish their binary nature and determine the spectral type and class for each component. Both components of the V733 Per system have already left the MS, and therefore the system must be excluded from our sample, whereas studies of V1156 Cyg and EU Gem should continue. OT And did not demonstrate a binary spectrum, however, the main component of the system is a hot A6 V star, and therefore, OT And should remain in our sample. We also revealed no binarity in the IM Del and LX Gem systems. Their brighter components turned out to be a cool giant and a supergiant, and these systems should be excluded from the sample based on the results of our analysis. We used the same technique to analyze the two spectra obtained for systems EU Gem and LX Gem using LAMOST. We have shown that the parameters determined from LAMOST spectra are in good agreement with the parameters determined for spectra obtained at the Caucasian Mountain Observatory (CMO) of SAI MSU. Our analysis allowed us to plot a first approximation of the V1156 Cyg velocity curves and show that the cool component in this system has a larger mass.

Keywords: *stars: binaries: spectroscopic—stars: individual: EU Gem, OT And, V1156 Cyg, V733 Per, IM Del, LX Gem*