

УДК 524.386:520.82/84

СПЕКТРАЛЬНОЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ AM Leo

© 2016 С. Ю. Горда*

Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, 620000 Россия

Поступила в редакцию 4 июня 2015 года; принята в печать 25 ноября 2015 года

Представлены результаты одновременных спектральных и фотометрических наблюдений затменной переменной AM Leo типа W UMa, выполненных на эшелле-спектрометре высокого разрешения 1.2 м телескопа и телескопе-рефлекторе ($D = 0.45$ м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Получены новые значения полуамплитуд кривых лучевых скоростей компонентов $K_1 = 109.6$ км с⁻¹, $K_2 = 252.4$ км с⁻¹ и скорости системы $V_0 = -9.3$ км с⁻¹, сравнимые с данными, приведенными в литературе. Значение полуамплитуды кривой лучевых скоростей более массивного компонента K_1 и отношение масс компонентов $q = 0.412$ оказались несколько меньше значений, полученных другими авторами. Сделано предположение, что возможной причиной этого является наличие горячих или холодных пятен на поверхности компонентов, смещающих эффективный центр яркости видимого диска компонента относительно положения его центра масс. Показано, что зарегистрированные в ходе выполнения фотометрической части работы изменения на кривых блеска AM Leo на временах от одних суток и более могут быть описаны подбором соответствующей модели пятенной структуры.

Ключевые слова: двойные: затменные — звёздные пятна — звёзды: индивидуальные: AM Leo

1. ВВЕДЕНИЕ

Затменно-переменная звезда AM Leo (BD +10°2234 A) является ярким компонентом ($V = 9^m1-9^m7$) визуальной двойной системы ADS 8024 (WDS 11022+0954) ($\rho = 11''4$, $\theta = 270^\circ$). Визуальный компонент (BD +10°2234 B) слабее AM Leo в максимуме ее блеска на 1^m48 в V -цвете [1]. Со времени открытия этой визуальной пары в 1828 г. не было замечено какого-либо значимого изменения ее параметров [2]. Близость значений лучевых скоростей затменной пары и визуального компонента, найденная Прибуллой и др. [3], может свидетельствовать о физической связи компонентов, а неизменность параметров — о большом периоде их орбитального движения.

Переменность яркого компонента (AM Leo) ADS 8024 была открыта Хоффмейстером [4] в 1935 г. Первая фотоэлектрическая кривая блеска получена в 1956 г. Уорли и Эггеном [2]. Они определили фотометрические элементы переменной и классифицировали ее как затменную систему типа W UMa ($P = 0^d3658$). Переменная неоднократно исследовалась фотометрически, с помощью

фотоэлектрических приемников излучения были получены многочисленные кривые блеска. Обстоятельный обзор фотометрических наблюдений AM Leo приведен в работах Хиллера и др. [1] и Альбайрака и др [5].

Многие авторы отмечают временные изменения кривых блеска AM Leo, выражающиеся в возрастании и ослаблении общего блеска системы, изменении глубин минимумов и появлении разновысокости максимумов. Это может свидетельствовать об активности на поверхности компонентов этой контактной тесной двойной системы — появлении и исчезновении ярких и темных областей (пятен). Тем более что у системы зарегистрировано очень слабое рентгеновское излучение [6], которое является индикатором хромосферной и коронарной активности.

Наряду с изменениями кривой блеска наблюдаются изменения периода системы. Предлагались различные гипотезы, объясняющие данное явление. Наиболее вероятной причиной изменения периода AM Leo сейчас принято считать наличие третьего тела в системе. Это предположение впервые было высказано Демирканом и Дирманом [7]. Позднее Альбайраком и др. [5] на основе анализа моментов минимумов по данным, полученным с помощью фотоэлектронных приемников излучения,

*E-mail: Stanislav.Gorda@urfu.ru

было найдено значение периода взаимного обращения AM Leo и третьего тела по орбите, составляющее 45 лет, и получена оценка массы третьего тела $M_3 = 0.18 M_\odot$.

Обстоятельное фотометрическое исследование AM Leo с использованием данных, полученных на ПЗС-матрицах, приведено в работе Хиллера и др. [1]. Используя метод синтеза кривых блеска, они нашли значение отношения масс компонентов $q = 0.398$ и посчитали это значение достаточно объективным, т.к. в системе наблюдается полное затмение. Этот результат согласуется с оценками $q = 0.395\text{--}0.425$, найденными другими авторами [8–10] также по фотометрическим данным.

Если фотометрические наблюдения AM Leo проводились с достаточной регулярностью, то спектральные исследования системы были проведены всего три раза. Так Хилл и др. [11] по одному фотографическому спектру определили спектральный класс и класс светимости компонентов AM Leo. Первые кривые лучевых скоростей этой звезды, построенные на основе спектральных данных, полученных с применением фотоэлектронного приемника излучения, ретикона, были опубликованы Хривнаком [12] в 1993 г. Разделение бленд линий AM Leo на компоненты производилось корреляционным методом. Полученная оценка $q = 0.45$ оказалась несколько больше значений, определяемых фотометрическими методами из кривых блеска. Такое же отношение масс компонентов было найдено в результате еще одного спектрального исследования [3], проведенного с использованием спектрометра высокого разрешения на телескопе ($D = 1.88$ m) обсерватории им. Дэвида Данлэпа (David Dunlap Observatory), оснащенного ПЗС-матрицей прямой засветки. Разделение бленд линий было осуществлено методом Ручинского [13] с использованием функции уширения.

Таким образом, можно отметить, что значения q , получаемые из фотометрических и спектральных наблюдений, близки по величине, но фотометрические несколько меньше.

Для определения параметров компонентов AM Leo нами были проведены одновременные спектральные и фотометрические наблюдения этой короткопериодической тесной двойной системы и получены новые, главным образом спектральные, данные.

Для устранения терминологической путаницы и сравнения с результатами, полученными другими авторами, следует сделать несколько уточнений. AM Leo — переменная типа W UMa и относится к подклассу W. Это означает, что меньший по массе и размерам компонент имеет большую поверхностную яркость. Соответственно более глубокий минимум кривой блеска соответствует его затмению.

В связи с этим в данной работе, как это принято при исследовании переменных звезд, более глубокий минимум и затмеваемый в нем компонент будут называться главными. Следовательно, значение фазы, равное нулю, относится к середине главного минимума. В то же время при построении кривых лучевых скоростей более массивный компонент, как это принято, будет обозначаться индексом 1, менее массивный — индексом 2. Под отношением масс q будем понимать отношение M_2/M_1 , учитывая, что $M_2 < M_1$.

2. СПЕКТРОСКОПИЯ

2.1. Наблюдения и предварительная обработка

Спектральные наблюдения AM Leo были проведены на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения ($R = 30\,000$) альт-азимутального телескопа ($D = 1.21$ m, $F = 12.0$ m) Ковровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета [14] в течение трех периодов: апрель 2013 г., январь–март 2014 г. и 2015 г. В качестве светоприемного устройства использовалась ПЗС-камера, изготовленная в лаборатории перспективных разработок САО РАН, с матрицей E2V 40-42 (2048×2048 , 13.5 мкм), охлаждаемая до температуры жидкого азота системой замкнутого цикла CryoTiger. Одновременно регистрировались 60 перекрывающихся спектральных порядков, охватывающих интервал спектра 3900–7700 Å.

Следует отметить, что получение на данной аппаратуре спектров короткопериодической затменной переменной AM Leo с достаточно высоким отношением сигнал–шум (S/N) связано с определенными трудностями. С одной стороны, звезда имеет блеск менее 9^m , поэтому, чтобы получить спектральные данные с отношением S/N более 20, необходимы экспозиции порядка 20–30 минут. С другой стороны, при времени накопления сигнала более 15–20 минут происходит значительное смещение спектральных линий вследствие эффекта Доплера из-за движения компонентов по взаимной орбите с периодом порядка девяти часов ($p = 0^d 3658$). Поэтому была использована методика получения спектров звезды с минимально возможными экспозициями, но в моменты времени, соответствующие одинаковым фотометрическим фазам. Последующее суммирование спектральных данных, полученных на одних и тех же фотометрических фазах, позволяет получить отдельные спектры с высоким отношением S/N . Конечно, при реализации такой методики накопление большого числа спектров для одной и той же фотометрической фазы не всегда возможно по ряду причин: из-за плохой погоды в нужное время, низкого

Таблица 1. Моменты времени и фотометрические фазы для спектров AM Leo

Дата	JD _☉ 2450000 +	Фаза φ	Дата	JD _☉ 2450000 +	Фаза φ	Дата	JD _☉ 2450000 +	Фаза φ	
Apr 03, 2013	6386.32812	0.8356	Mar 17, 2015	7099.36849	0.1171		7108.19604	0.2493	
	6386.34796	0.8899		7099.38296	0.1567		7108.21052	0.2889	
	6386.36231	0.9291		7099.39744	0.1963		7108.22499	0.3284	
Apr 04, 2013	6387.19848	0.2150		7099.41734	0.2507		7108.24033	0.3704	
	6387.36026	0.6572		7099.43182	0.2903		7108.25481	0.4100	
	6387.37495	0.6974		7099.44654	0.3305		7108.26928	0.4495	
Apr 17, 2013	6400.18688	0.7217	Mar 18, 2015	7100.14859	0.2497		7108.35551	0.6852	
	6400.20060	0.7592		7100.16307	0.2893		7108.37032	0.7257	
	6400.22775	0.8334		7100.17754	0.3289		7108.38480	0.7653	
	6400.34920	0.1676		7100.19265	0.3702		7108.40809	0.8290	
	6400.36665	0.2223		7100.20712	0.4097		7108.42257	0.8685	
	6400.38275	0.2571		7100.22160	0.4493		7108.43704	0.9081	
Apr 29, 2013	6412.23566	0.6598		7100.34030	0.7738	Mar 31, 2015	7113.26865	0.1164	
	6412.25678	0.7175		7100.35478	0.8134		7113.28312	0.1560	
	6412.27277	0.7612		7100.36920	0.8528		7113.29760	0.1956	
Apr 30, 2013	6412.30051	0.8371	Mar 19, 2015	7101.19751	0.1172		7113.31701	0.2486	
	6413.21509	0.3373		7101.21199	0.1568		7113.33149	0.2882	
	6413.22974	0.3773		7101.22646	0.1963		7113.34597	0.3278	
Jan 29, 2014	6687.51283	0.2147		7101.24604	0.2499		7113.36133	0.3698	
Feb 21, 2014	6710.42267	0.8441		7101.26052	0.2894		7113.37579	0.4093	
	6710.44572	0.9071		7101.27499	0.3290		7113.39027	0.4489	
Apr 22, 2014	6770.31363	0.5698		7101.29006	0.3702	Apr 02, 2015	7115.16037	0.2879	
Jan 22, 2015	7045.47031	0.7740		7101.30453	0.4097		7115.17485	0.3275	
	7045.48691	0.8194		7101.31901	0.4493		7115.20450	0.4085	
	7045.50139	0.8590	7101.40579	0.6866	7115.21898	0.4481			
Jan 29, 2015	7045.60706	0.1479		7101.42027	0.7261		7115.30595	0.6859	
	7052.32452	0.5116		7101.43475	0.7657		7115.32043	0.7254	
	7052.38499	0.6769		7101.45852	0.8307		7115.33490	0.7650	
	7052.41865	0.7689		Mar 26, 2015	7108.14764		0.1170	7115.35867	0.8300
	7052.44143	0.8312			7108.16211		0.1565	7115.37314	0.8695
	7052.45590	0.8708		7108.17660	0.1961				

положения звезды над горизонтом, малого углового расстояния между звездой и лунным диском, сбоев в работе аппаратуры.

Первоначально методика была апробирована в марте 2013 г. Три спектра на фотометрическую фазу удалось получить только для одного значения фазы, а также по два спектра для нескольких значений фаз и несколько одиночных спектров. Для увеличения отношения S/N в отдельном спектре применялось бинирование отсчетов пикселей вдоль линии дисперсии (вдоль строк ПЗС-матрицы) на аппаратном уровне. Таким образом, результирующее разрешение составляло $R = 15\,000$. Для удержания изображения звезды на торце оптоволоконка ($d = 5''$) производилось ручное гидирование телескопа по обеим осям на минимальной скорости с визуальным контролем, обеспечиваемым видеокамерой подсмотра поля зрения, установленной в подвесной части спектрометра.

В конце 2013 г. была произведена модернизация подвесной части оптоволоконного спектрометра высокого разрешения [15] и подключена система автоматического гидирования.

Наблюдения 2014–2015 гг. проводились с гидированием в автоматическом режиме. Использовалось оптоволоконно большего диаметра ($d = 10''$), обеспечивающее разрешение $R = 15\,000$ без бинирования. Время накопления сигнала для всех кадров спектра AM Leo составляло 20 минут. Получение спектров осуществлялось следующим образом. Первоначально в определенные моменты снимался ряд спектров звезды. Затем, по мере возможности, в другие ночи мы получали кадры спектров в моменты времени, соответствующие фазам первичного ряда. Если по каким-то причинам сделать это в нужное время не удавалось, съемка осуществлялась в произвольные моменты времени с целью в дальнейшем получить кадры спектров и для этих фотометрических фаз. Время начала экспозиции кадра, соответствующее определенной фотометрической фазе, выдерживалось с точностью ± 5 с, что соответствовало ошибке в значении фазы не более ± 0.0002 доли периода.

В начале каждой ночи снимались кадры нулевой экспозиции (bias). Примерно раз в час производилась съемка спектров торий-аргоновой лампы. Это позволило в дальнейшей обработке корректно учесть возможные смещения шкалы длин волн спектрографа относительно элементов ПЗС-матрицы. Всего за весь период наблюдений было получено 92 спектра AM Leo, из них 18 спектров — в 2013 г., 4 — в 2014 г. и 70 — в 2015 г. Список полученных спектров приведен в таблице 1.

Обработка ПЗС-кадров эшелле-спектров AM Leo производилась в пакете DECH [16] по

стандартной схеме: вычитание мастер-кадра нулевой экспозиции, экстракция порядков эшелле-спектра, построение дисперсионных кривых и проведение уровня континуума. Среднее отношение S/N в отдельном спектре варьировалось в пределах 10–30 в зависимости от порядка. Наиболее сильными являлись две линии бальмеровской серии: $H\alpha$ и $H\beta$, остальные практически терялись на уровне шума. Для дальнейшей обработки мы использовали только бленды линии $H\alpha$, расположенной в середине одного из спектральных порядков. В районе линии $H\beta$, которая находилась на краю порядка, величина S/N была в 2.5–3 раза меньше.

2.2. Кривые лучевых скоростей

Данные отдельного спектрального порядка, содержащего линию $H\alpha$, полученные для одних и тех же фотометрических фаз, суммировались с целью увеличения отношения S/N . При этом в шкалу длин волн каждого спектра вносилась поправка, соответствующая доплеровскому сдвигу шкалы в момент наблюдений из-за движения наблюдателя относительно Солнца. В результате из 92 отдельных спектральных порядков, содержащих линию $H\alpha$, были сформированы 22 суммарных спектра, объединенных из двух, трех, четырех, пяти или шести отдельных спектров. Для двенадцати спектров фазы оказались уникальными. Данные о полученных спектрах представлены в таблице 2, где во втором столбце даны усредненные значения фотометрических фаз, а в предпоследнем и последнем столбцах — количество отдельных спектров, объединенных в один суммарный, и соответствующее ему значение S/N . Вычисление фотометрических фаз производилось по эфемериде, полученной нами по фотометрическим данным и приведенной ниже в разделе 3.

Разделение бленд линии $H\alpha$ проводилось классическим методом аппроксимации их суммой гауссиан с применением нелинейного метода наименьших квадратов Марквардта. На рис. 1 приведены примеры разделения линии $H\alpha$. Затем были определены лучевые скорости обоих компонентов. Их значения и формальные оценки погрешностей, полученные в процессе аппроксимации профилей методом Марквардта, приведены в столбцах 3–6 таблицы 2.

Поскольку тесная двойная AM Leo является контактной системой с круговыми орбитами компонентов, значения полуамплитуд кривых лучевых скоростей K_1 , K_2 и гамма-скорости V_0 были получены путем аппроксимации наблюдательных данных синусоидой. На рис. 2 показан результат аппроксимации, а соответствующие значения параметров V_0 , K_1 , K_2 приведены в четвертом

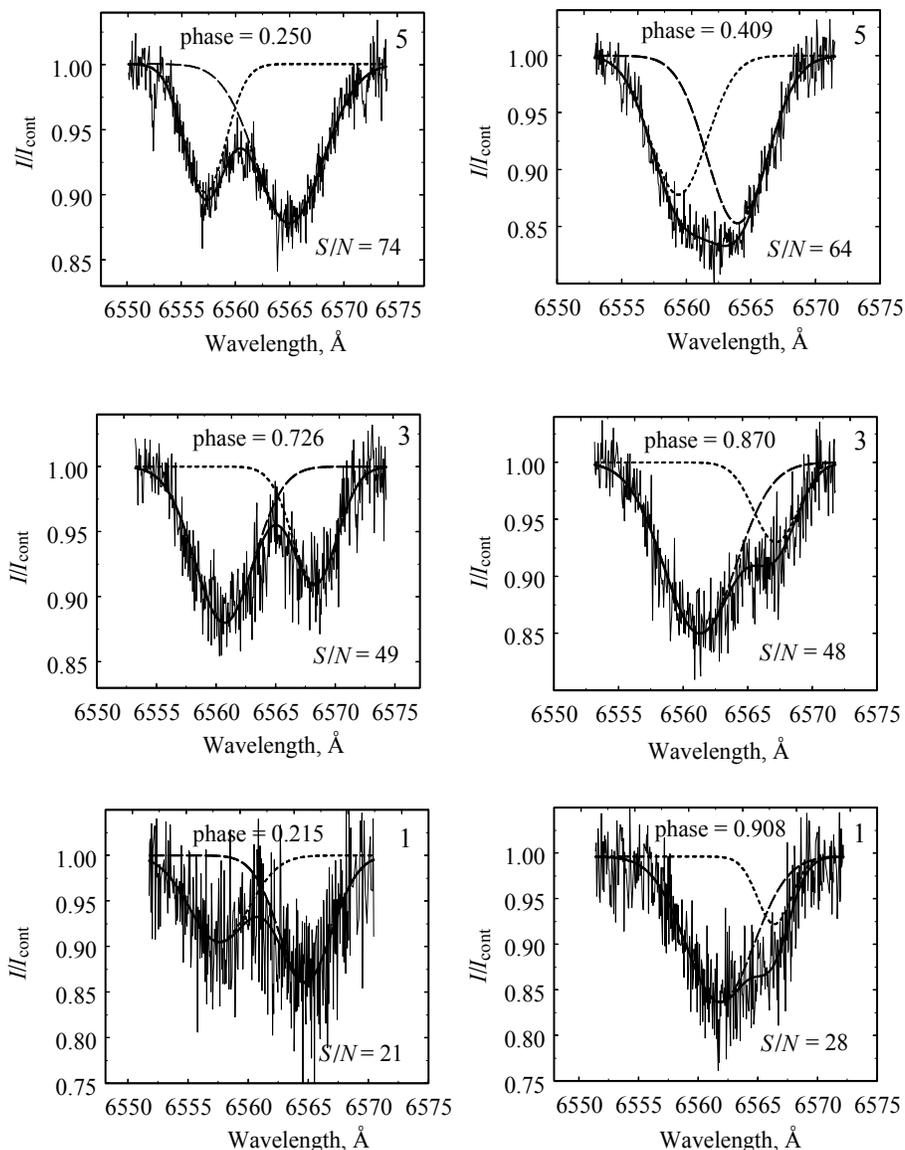


Рис. 1. Примеры аппроксимации профилей линии $H\alpha$ суммой двух гауссиан. Сплошная линия — суммарный профиль, штриховая — профиль главного, менее массивного компонента, пунктирная — профиль вторичного, более массивного компонента. Числа в правом верхнем углу графиков — количество отдельных спектров, объединенных в суммарный спектр.

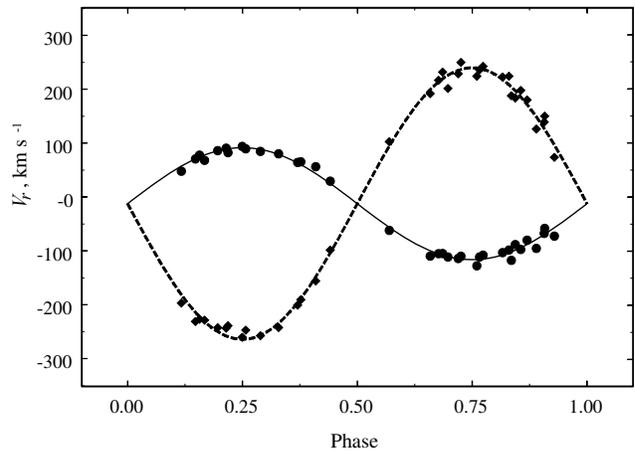
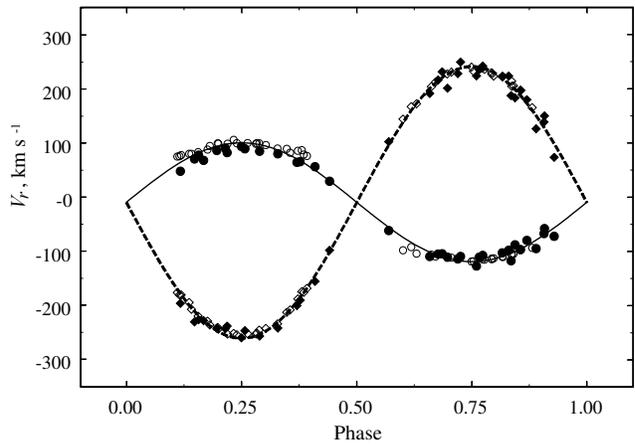
столбце таблицы 3. Для сравнения во втором и третьем столбцах указаны оценки тех же величин из работ [3, 12]. Знаком « \sim » отмечены значения, которые получены посредством оценочной оцифровки по шкалам рис. 3 из работы [12], поскольку данные в цифровом виде приведены не были.

Найденное нами значение $q = 0.412$ оказалось несколько меньше определений Хривнака [12] и Прибуллы и др. [3], но хорошо укладывается в интервал оценок, полученных методом синтеза кривых блеска [8–10]. Как можно видеть из таблицы 3 (четвертый столбец), причина заниженного значения q по сравнению с аналогичными величинами из работ [12] и [3] заключается в меньшем почти

на 10 км с^{-1} значениях полуамплитуды кривой лучевых скоростей K_1 массивного компонента AM Leo. Для выяснения причины такого расхождения наши оценки лучевых скоростей были объединены с данными Прибуллы и др. [3] (см. рис. 3). Таким образом, значения лучевых скоростей, полученные по совокупности данных, для обоих компонентов этой двойной системы практически совпадают. В то же время на фазах в районе первой квадратуры ($\varphi = 0.1\text{--}0.4$) полученные нами значения лучевых скоростей более массивного компонента AM Leo располагаются систематически ниже на $10\text{--}15 \text{ км с}^{-1}$ значений из работы Прибуллы и др. [3]. Найденные по объединенным данным

Таблица 2. Фазы суммарных спектров и значения лучевых скоростей компонентов AM Leo

Год	Фаза φ	V_{r1} , км с ⁻¹	σ_1 , км с ⁻¹	V_{r2} , км с ⁻¹	σ_2 , км с ⁻¹	n	S/N
2013	0.8354	-117.5	9.8	188.2	12.2	3	42
	0.2186	82.5	9.4	-238.5	10.2	2	33
	0.6587	-109.5	23.2	192.1	23.1	2	32
	0.7196	-114.0	10.6	228.9	13.1	2	35
	0.7602	-127.3	11.7	224.5	16.2	2	37
	0.8899	-95.1	16.0	126.5	22.7	1	28
	0.1676	68.3	8.8	-228.3	6.3	1	24
	0.6974	-111.1	15.9	201.8	22.8	1	27
	0.3773	65.6	8.7	-190.5	7.2	1	23
	0.9291	-72.3	25.1	74.0	29.1	1	23
	0.2571	89.6	12.3	-246.9	10.3	1	30
	2014	0.5698	-61.7	17.4	102.8	16.9	1
0.2147		90.8	10.0	-243.1	15.5	1	21
0.8441		-88.0	11.9	184.0	17.4	1	24
0.9071		-67.2	16.0	139.3	16.4	1	17
2015	0.2891	85.0	2.7	-257.1	2.5	6	82
	0.3287	80.4	2.6	-242.1	2.7	6	97
	0.3701	64.5	4.6	-200.5	4.4	5	61
	0.2496	94.0	2.8	-260.0	2.5	5	74
	0.4094	56.5	7.1	-155.5	9.8	5	64
	0.4410	29.7	8.4	-98.2	9.4	5	63
	0.1169	48.0	4.6	-196.4	5.5	4	74
	0.1565	77.8	2.7	-226.6	3.2	4	74
	0.8302	-98.1	4.5	224.4	6.5	4	54
	0.1961	86.4	2.7	-242.4	2.7	4	63
	0.7662	-111.0	4.3	236.2	5.3	4	44
	0.8696	-79.9	6.2	180.4	9.1	3	48
	0.7256	-109.6	4.1	250.0	4.6	3	49
	0.6859	-104.6	4.0	232.2	5.2	3	44
	0.8164	-103.0	4.1	223.0	5.4	2	38
	0.8559	-97.1	7.1	198.2	9.3	2	39
	0.7739	-107.7	5.5	242.7	6.1	2	38
0.1479	70.8	15.5	-230.7	15.5	1	18	
0.6769	-105.1	8.7	216.9	9.6	1	23	
0.9081	-58.1	14.2	150.4	11.0	1	28	

**Рис. 2.** Кривые лучевых скоростей компонентов AM Leo (сплошная линия — более массивный компонент, штриховая — менее массивный), полученные по данным ПЗС-наблюдений. Кружками показаны лучевые скорости вторичного (более массивного) компонента, ромбами — главного (менее массивного).**Рис. 3.** Кривые лучевых скоростей компонентов AM Leo, полученные по данным ПЗС-наблюдений (сплошная линия — более массивный компонент, штриховая — менее массивный). Заполненные значки — наши наблюдения, незаполненные — данные из работы [3]. Кружками показаны лучевые скорости вторичного (более массивного) компонента, ромбами — главного (менее массивного).

значения параметров приведены в пятом столбце таблицы 3. Величина $q = 0.439$ в данном случае практически совпала с ее значениями, приведенными в работах Хривнака [12] и Прибуллы и др. [3].

Несколько заниженные значения измеренной нами лучевой скорости массивного компонента в фазах первой квадратуры по сравнению с ранее опубликованными данными можно объяснить смещением центра эффективной яркости компонента

Таблица 3. Параметры кривых лучевых скоростей и компонентов AM Leo. ПЗС (ПЗ) — матрица прямой засветки, ПЗС (ОЗ) — матрица обратной засветки

Параметр	Ретикон [12]	ПЗС (ПЗ) [3]	ПЗС (ОЗ) данная работа	ПЗС данная работа и [3]
V_0 , км с ⁻¹	~5	-7.25 ± 0.62	-12.1 ± 1.5	-9.4 ± 1.0
K_1 , км с ⁻¹	~115	115.56 ± 0.97	103.9 ± 1.5	110.2 ± 1.2
K_2 , км с ⁻¹	~255	251.98 ± 1.17	252.0 ± 2.5	250.3 ± 1.2
P , сутки	0.365	0.3658	0.3658	0.3658
σ_1 , км с ⁻¹	~25	7.0	9.2	8.9
σ_2 , км с ⁻¹	~25	4.3	15.0	9.4
$M_1 \sin^3 i$, M_\odot	1.38	1.29 ± 0.04	1.21 ± 0.08	1.24
$M_2 \sin^3 i$, M_\odot	0.62	0.59 ± 0.02	0.50 ± 0.10	0.54
$(a_1 + a_2) \sin i$, R_\odot	~2.7	2.68 ± 0.06	2.59 ± 0.08	2.64 ± 0.06
$q = M_2/M_1$	0.45 ± 0.01	0.459 ± 0.004	0.412 ± 0.008	0.439 ± 0.005

относительно его видимого геометрического центра, совпадающего с центром масс. Это может быть следствием наличия на поверхности звезды темных или светлых областей в моменты наших наблюдений. Запятанность поверхности компонентов звезд типа W UMa в настоящее время не подвергается сомнению. Более заметное влияние этой особенности поверхности компонента на определение его лучевой скорости по нашим данным можно объяснить тем, что мы использовали профили линии $H\alpha$ ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$), более чувствительной к эффектам хромосферно-фотосферной активности, а лучевые скорости, приведенные в работе [3], определялись по области спектра в районе $\lambda = 5180 \text{ \AA}$, где это влияние, вероятно, слабее.

3. ФОТОМЕТРИЯ

3.1. Наблюдения и обработка

Параллельно со спектральными наблюдениями в течение шести ночей февраля—марта 2015 г. были проведены фотометрические наблюдения AM Leo на телескопе АЗТ-3 ($D = 0.45 \text{ м}$, $F_{\text{Newton}} = 2.0 \text{ м}$) астрономической обсерватории Уральского федерального университета, оснащенный ПЗС-камерой A230 FLI на чипе E2V CCD230-42 с обратной засветкой (2048×2048 , 15 мкм). Наблюдения выполнялись в фильтрах BVR , реализующих систему, близкую к системе Джонсона—Казинса. После стандартной редукции (вычитания темного кадра и деления на кадр плоского поля) проводилась апертурная фотометрия с помощью

программы Muniwin.¹ Разности блеска определялись относительно звезды BD +10°2235, которая тоже является визуально-двойной с разделением $13''3$ и практически во всех исследованиях AM Leo использовалась как звезда сравнения. При проведении фотометрии измерялся суммарный блеск обеих звезд пары. Всего было получено 623, 624 и 625 величин разности блеска в B , V и R -фильтрах соответственно.

В каждую из ночей наблюдался хотя бы один из минимумов блеска AM Leo. Даты наблюдений и граничные значения фотометрических фаз и моменты минимумов приведены в таблице 4, которая использовалась для определения фотометрических фаз как для фотометрических, так и для спектральных наблюдений. На основе полученных моментов минимумов блеска была вычислена следующая эфемериды:

$$JD_{\odot, \min} = 2457079.20661 + 0.3658005 E. \\ \pm 0.00030 \quad \pm 0.0000044$$

3.2. Кривые блеска AM Leo

Построенные на основе наших данных кривые блеска AM Leo в трех фильтрах приведены на рис. 4 (верхняя панель). Можно заметить, что имеется заметный разброс значений разностей блеска, полученных в различные даты. Его величина максимальна при наблюдении в синей области

¹<http://c-munipack.sourceforge.net>

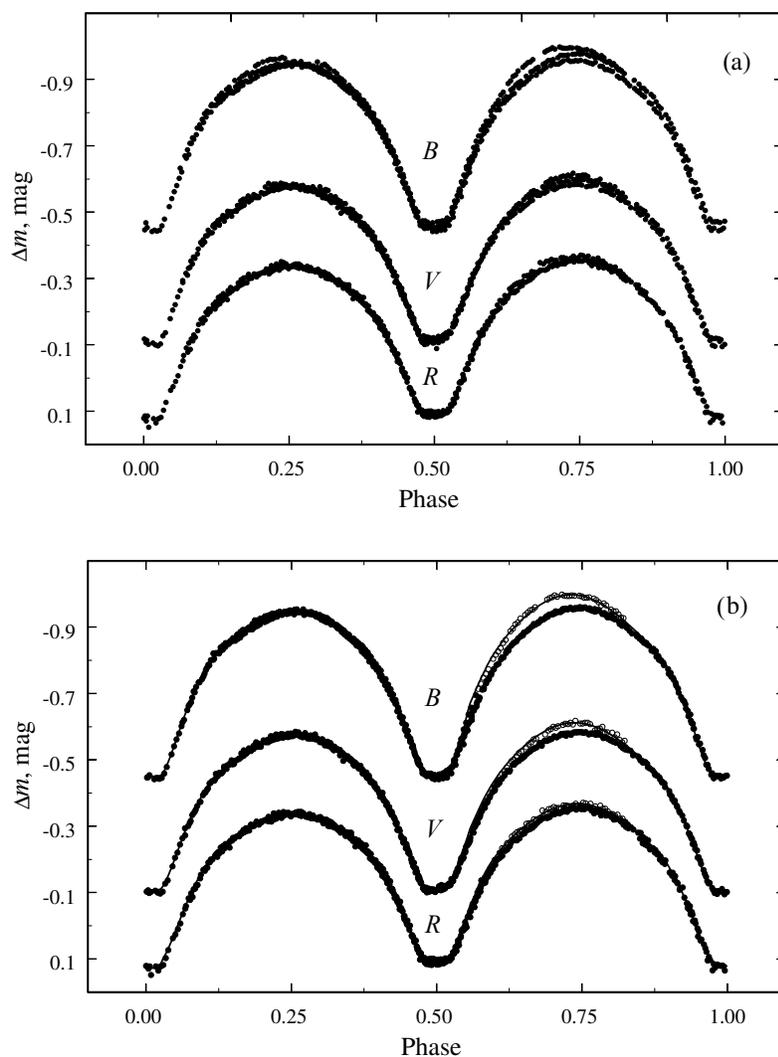


Рис. 4. (а) Кривые блеска AM Leo в трех фильтрах, полученные в течение шести ночей 2015 г. (б) Кривые блеска после проведения процедуры корректировки (заполненные кружки); незаполненными кружками отмечены значения разностей блеска в интервале фаз 0.6–0.8, полученные в ночь на 19 марта 2015 г.; сплошными линиями показаны синтетические кривые блеска, аппроксимирующие данные этой ночи.

спектра — фильтре B . В длинноволновой области (фильтр R) разброс от даты к дате минимален, что особенно заметно на фазах второй квадратуры. Такое поведение кривых блеска свидетельствует об изменении поверхностной яркости одного или обоих компонентов. Причиной этого может быть наличие ярких или темных пятен на поверхности компонентов. Такое предположение высказывалось выше для объяснения меньшего, чем у других авторов, значения полуамплитуды изменения лучевой скорости массивного компонента.

Анализ общего изменения разностей блеска AM Leo показывает, что кривые блеска, полученные в две последовательные даты JD 2457099 (17 марта 2015 г.) и JD 2457100 (18 марта 2015 г.), смещены по отношению к кривым блеска для дру-

гих дат на одну и ту же величину. Звезда в эти даты имела несколько больший блеск, по крайней мере, в зарегистрированных фотометрических фазах, причем величина смещения больше в синем фильтре, чем в красном. В эти ночи в фильтре B звезда была в среднем ярче на $0^{\text{m}}020$, в фильтре V — на $0^{\text{m}}015$, и в фильтре R — на $0^{\text{m}}008$. В то же время в последующую дату JD 2457101 (19 марта 2015 г.) увеличение блеска наблюдалось только на фазах вблизи второй квадратуры ($\varphi = 0.60$ – 0.80). Разности блеска на других фазах ($\varphi = 0.12$ – 0.60) совпадали с данными других ночей, при этом увеличение блеска относительно других ночей было переменным, с максимумом в районе фазы $\varphi = 0.75$ и амплитудой в два раза выше, чем в ночи JD 2457099 (17 марта 2015 г.)

Таблица 4. Даты наблюдений, интервалы фотометрических фаз и моменты минимумов блеска AM Leo

Дата ($\Delta\varphi$)	Фильтр	Тип минимума	$JD_{\odot, \min}$ 2457000+	$\overline{JD_{\odot, \min}}$ 2457000+
Feb 25, 2015 (0.26–0.57)	<i>B</i>	II	79.39007	79.38972
	<i>V</i>	II	79.38963	± 0.00031
	<i>R</i>	II	79.38946	
Mar 17, 2015 (0.84–0.25)	<i>B</i>	I	99.32562	99.32576
	<i>V</i>	I	99.32589	± 0.00014
	<i>R</i>	I	99.32576	
Mar 18, 2015 (0.30–0.83)	<i>B</i>	II	100.23981	100.23994
	<i>V</i>	II	100.24002	± 0.00011
	<i>R</i>	II	100.23999	
Mar 19, 2015 (0.12–0.82)	<i>B</i>	II	101.33655	101.33706
	<i>V</i>	II	101.33713	± 0.00048
	<i>R</i>	II	101.33751	
Mar 26, 2015 (0.21–0.95)	<i>B</i>	II	108.28772	108.28768
	<i>V</i>	II	108.28795	± 0.00029
	<i>R</i>	II	108.28737	
Mar 31, 2015 (0.93–0.58)	<i>B</i>	I	113.22644	113.22655
	<i>V</i>	I	113.22706	± 0.00047
	<i>R</i>	I	113.22614	
	<i>B</i>	II	113.40868	113.40889
	<i>V</i>	II	113.40867	± 0.00037
<i>R</i>	II	113.40931		

и JD 2457099 (18 марта 2015 г.). Во всех случаях увеличение блеска в синем фильтре было больше, чем в визуальном или красном, что свидетельствует о наличии на поверхности компонентов областей с повышенной температурой.

Объяснение описанных выше явлений для звезд типа W UMa обычно приводится в рамках пятенной модели. Увеличение площади темных пятен приводит к падению общего блеска системы и наоборот. Аналогично поярчение можно объяснить наличием горячих ярких пятен. Так, в работах [17] и [18] построением соответствующей пятенной модели объясняются небольшие искажения на кривых блеска звезд типа W UMa, а также возрастание или ослабление общего блеска систем,

выражающиеся в смещениях кривых блеска вдоль оси звездных величин.

Для определения параметров AM Leo были построены кривые блеска с использованием данных всех ночей. В значения разностей блеска, полученные в даты JD 2457099 (17 марта 2015 г.) и JD 2457100 (18 марта 2015 г.), были внесены с обратным знаком аддитивные поправки, приведенные выше и соответствующие величинам сдвигов этих кривых блеска относительно данных других ночей. Подобная коррекция суммарной кривой блеска с целью уменьшения величины разброса точек была апробирована нами в работе [18]. Данная операция предполагает в определенном смысле корректировку влияния пятенной структуры на общий блеск системы, поскольку, как показано в работах [17, 18], наличием пятенной структуры в приполярных областях компонентов можно объяснить сдвиг кривых блеска вдоль оси звездных величин.

После проведения данной операции величина среднеквадратической ошибки разброса точек на кривых блеска во всех фильтрах составила не более ± 0.0007 . Скорректированные кривые блеска приведены на рис. 4 (нижняя панель). Видно, что в основном кривая блеска AM Leo достаточно плавная, без резких изменений. Только на интервале фаз $\varphi = 0.6–0.8$ заметно увеличение блеска в одну из ночей (незаполненные кружки). При определении параметров компонентов звезды эти «выскакивающие» значения разностей блеска, полученные в дату JD 2457101 (19 марта 2015 г.), не учитывались.

3.3. Определение параметров компонентов AM Leo

Решение кривых блеска было проведено с использованием пакета Phoebe [19], реализующего метод синтеза кривых блеска на основе кода Вилсона–Девиннея [20]. Для поиска оптимальных значений искомым параметров в пакете применялся симплекс-метод Нелдера–Мида [21]. Определение элементов орбиты и физических параметров компонентов затменной системы проводилось с одновременным использованием данных, полученных во всех трех фильтрах. Отношение масс и расстояние между центрами компонентов были взяты из настоящей работы (см. таблицу 3). Параметры системы находились в классе решений для контактных систем типа W UMa. В качестве начальных значений искомым параметров были взяты данные решения кривых блеска AM Leo из работы [1]. Поскольку при фотометрии блеск AM Leo измерялся совместно с визуальным компонентом, при определении параметров системы вводился блеск т.н. третьего тела, начальное значение которого соответствовало измеренной разности блеска звезд

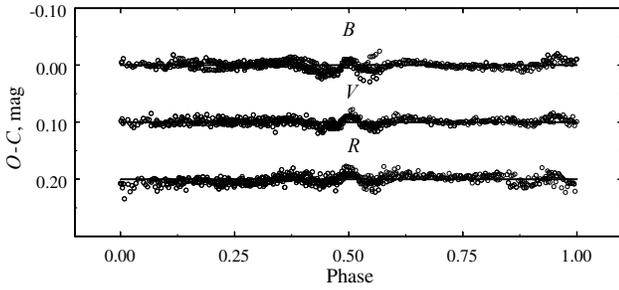


Рис. 5. Разности $O - C$ между наблюдаемыми и синтетическими кривыми блеска. Разности $O - C$, полученные в фильтрах V и R , смещены на $0^{\text{m}}1$ и $0^{\text{m}}2$ соответственно.

пары, приведенной выше. Для учета небольшой разности высот максимумов кривых блеска вводились параметры горячего пятна на более массивном компоненте на долготе, соответствующей фазе $\varphi = 0.75$.

Найденные в процессе решения параметры компонентов AM Leo приведены в таблице 5, где i — угол наклона плоскости орбиты системы к картинной плоскости; a — расстояние между центрами масс компонентов; r_1^{pole} и r_2^{pole} — относительные полярные радиусы компонентов, выраженные в долях величины a ; r_1^{side} и r_2^{side} — относительные радиусы компонентов в направлении перпендикулярном линии, соединяющей их центры; r_1^{back} и r_2^{back} — относительные радиусы компонентов в направле-

Таблица 5. Параметры фотометрической орбиты и компонентов AM Leo

Параметр	Значение	Параметр	Значение
i	$89^{\circ}0 \pm 0^{\circ}5$	q	0.44 ± 0.01
a, R_{\odot}	2.6	Ω	2.699 ± 0.027
r_1^{pole}	0.302 ± 0.009	$\Omega, L1$	2.760 ± 0.025
r_1^{side}	0.316 ± 0.008	$\Omega, L2$	2.493 ± 0.024
r_1^{back}	0.357 ± 0.010	f	22.5%
r_2^{pole}	0.436 ± 0.006	$T_1^{\text{eff}}, \text{K}$	6273 ± 70
r_2^{side}	0.467 ± 0.007	$T_2^{\text{eff}}, \text{K}$	5942 ± 80
r_2^{back}	0.499 ± 0.08	L_1	0.243
R_1, R_{\odot}	0.85 ± 0.07	L_2	0.457
R_2, R_{\odot}	1.22 ± 0.09	l_3	0.300
M_1, M_{\odot}	0.54 ± 0.07	M_1^{bol}	4.78 ± 0.05
M_2, M_{\odot}	1.23 ± 0.08	M_2^{bol}	4.23 ± 0.06

нии, обратном направлению на соответствующий соседний компонент; R_1, R_2, M_1 и M_2 — средние радиусы и массы компонентов; q — отношение масс компонентов; Ω — относительный гравитационный потенциал Копала на поверхности компонентов; Ω_{L1} и Ω_{L2} — относительные гравитационные потенциалы первой и второй точек Лагранжа; $f = 100 \times (\Omega_{L1} - \Omega) / (\Omega_{L1} - \Omega_{L2})$ — степень сверхконтакта; T_1^{eff} и T_2^{eff} — эффективные температуры компонентов; L_1, L_2 и l_3 — относительные светимости компонентов и «третьего тела» ($L_1 + L_2 + l_3 = 1$); M_1^{bol} и M_2^{bol} — абсолютные болометрические звездные величины компонентов. Индексом 1 отмечены параметры главного, менее массивного, компонента. Наилучшее решение получилось при задании значения $q = 0.44$, соответствующего параметрам кривых лучевых скоростей, полученным по объединенным спектральным данным (см. последний столбец таблицы 3). Качество данного решения можно оценить по рис. 5, где показаны величины $O - C$ (разности наблюдаемых величин и синтетических кривых блеска) для всех фильтров. Можно видеть, что приближение наблюдательных кривых блеска синтетическими кривыми достаточно хорошее. Небольшие систематические отклонения отмечаются только в районе вторичного минимума. Среднеквадратический разброс значений $O - C$ равен $\pm 0^{\text{m}}010$, $\pm 0^{\text{m}}005$ и $\pm 0^{\text{m}}007$ в B, V и R -фильтрах соответственно.

Параметры и местоположение горячего пятна на поверхности более массивного компонента, моделирующего разность высот максимумов кривых блеска, приведены в первой строке таблицы 6. Здесь φ — широта центра пятна, отсчитываемая от полюса звезды; λ — долгота центра пятна, отсчитываемая от направления на центры компонентов против часовой стрелки; r — радиус пятна; T_s/T_f — отношение эффективных температур пятна и поверхности звезды.

После определения значений параметров AM Leo по кривым блеска, построенным по всем наблюдательным данным, было проведено моделирование кривых блеска, полученных в дату JD 2457101 (19 марта 2015 г.), на которых присутствует заметное повышение блеска на фазах второй квадратуры. В процессе решения все найденные параметры звезды, кроме параметров, описывающих пятно, были зафиксированы. Для моделирования повышенного блеска на соответствующих фазах были введены начальные параметры еще одного горячего пятна. Рассчитанная в результате модель двух горячих пятен на поверхности более массивного компонента, параметры которой приведены в таблице 6, хорошо описывает наблюдательные данные, что иллюстрирует рис. 4 (нижняя панель). Синтетические кривые блеска,

показанные непрерывными линиями, практически совпадают с точками наблюдаемых кривых во всех фильтрах.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Представленное в данной работе спектральное исследование короткопериодической контактной затменной переменной AM Leo является вторым, выполненным на основе наблюдений с использованием современных приемников излучения — ПЗС-матриц.

Примененный нами метод последовательного получения спектральных данных в моменты времени, соответствующие одним и тем же фотометрическим фазам, с последующем их суммированием позволил получить фазовый ряд спектров достаточно слабой короткопериодической затменной переменной звезды с большим отношением S/N . Найденные по результатам наших спектральных наблюдений на телескопе с диаметром зеркала 1.2 м параметры компонентов AM Leo в целом совпали с данными из работы [3], в которой проводились наблюдения на телескопе с диаметром зеркала около 2 м. Определенные нами значения полуамплитуды кривой лучевых скоростей более массивного компонента и, как следствие, отношение масс компонентов AM Leo оказались немного меньше этих величин, приведенных в работах [12] и [3]. Сравнение полученных кривых лучевых скоростей AM Leo с данными из работы [3] (в обоих исследованиях в качестве светоприемного устройства применялись ПЗС-матрицы) показало, что в наших наблюдениях на фазах первой квадратуры лучевые скорости более массивного компонента систематически меньше. В то же время для всех остальных значений лучевых скоростей обоих компонентов наблюдалось практически полное совпадение наших данных с данными из работы [3]. Причину небольшого несоответствия лучевых скоростей на определенных фазах для разных эпох наблюдений можно объяснить, например, смещением эффективного центра яркости компонента затменной системы, вызванного появлением на поверхности диска более ярких или темных областей (пятен).

Таблица 6. Параметры пятенной структуры поверхности вторичного компонента

N	φ , deg	λ , deg	r , deg	T_s/T_f
1	80	90	10	1.20
2	80	132	16	1.25

В проведенных одновременно со спектральными фотометрическими наблюдениями AM Leo мы зарегистрировали изменения кривых блеска на временах от одних суток и более. Как упоминалось выше, изменения кривых блеска данной переменной, относящейся к типу маломассивных контактных систем типа W UMa, неоднократно отмечались в работах других авторов. Объяснение этого явления также вполне укладывается в рамки пятенной модели, тем более что построенная нами модель пятенной структуры достаточно хорошо описывает изменения на кривых блеска по наблюдениям 19 марта 2015 г. (JD 2457101), а также разновысокость максимумов кривых блеска в другие ночи.

В то же время параметры компонентов AM Leo, найденные методом синтеза по скорректированной кривой блеска, оказались сравнимы с результатами других авторов. Следует отметить, что впервые оценка отношения масс компонентов, определенная по фотометрическим данным, практически совпала со значением, найденным по спектральным данным.

Таким образом, находит косвенное подтверждение высказанное выше предположение о том, что некоторую разницу в значениях лучевых скоростей на фазах первой квадратуры и, как следствие, разницу в отношении масс компонентов, определенных в данной работе и в работах [12] и [3], можно объяснить наличием пятен на поверхности более массивного компонента.

Примененный нами метод получения спектральных данных в моменты времени, соответствующие одним и тем же фотометрическим фазам, с последующим суммированием спектров для увеличения отношения S/N приводит к усреднению данных по времени. Таким образом, на значениях всех вычисленных в данном спектральном исследовании параметров сказалось усредненное за весь период наблюдений (2013–2015 гг.) влияние поверхностной активности компонентов AM Leo. По этой причине невозможно объяснить заниженные значения лучевых скоростей на фазах первой квадратуры, пользуясь фотометрической моделью пятенной структуры, рассчитанной нами на определенный момент времени.

Значение отношения масс компонентов $q = 0.44$, определенное по объединенным спектральным и фотометрическим данным, относящимся к разным состояниям активности этой затменной переменной, представляет собой некую усредненную оценку. Пока рано делать выводы о том, насколько оно близко к истинному значению, т.к. оно получено по результатам всего двух спектральных исследований. Проведение дальнейших исследований этой затменной переменной звезды с использованием более крупных телескопов позволит уточнить значения параметров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Основные результаты получены на оборудовании уникальной научной установки «Коуровская астрономическая обсерватория». Работы проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI59114X0003; базовая часть госзадания, РК № 01201465056; постановление № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. E. Hiller, W. Osborn, D. Terrell, Publ. Astron. Soc. Pacific **116**, 337 (2004).
2. C. E. Worley and O. J. Eggen, Publ. Astron. Soc. Pacific **68**, 452 (1956).
3. T. Pribulla, S. M. Rucinski, G. Conidis, et al., Astron. J. **133**, 1977 (2007).
4. C. Hoffmeister, Astronomische Nachrichten **255**, 401 (1935).
5. B. Albayrak, S. O. Selam, T. Ak, et al., Astronomische Nachrichten **326**, 122 (2005).
6. K. Stępień, J. H. M. M. Schmitt, and W. Voges, Astron. and Astrophys. **370**, 157 (2001).
7. O. Demircan and E. Derman, Astron. J. **103**, 593 (1992).
8. L. Binnendijk, Publ. Astron. Soc. Pacific **96**, 646 (1984).
9. J. B. Hutchings and G. Hill, Astrophys. J. **179**, 539 (1973).
10. S. W. Mochnacki, Astrophys. J. **245**, 650 (1981).
11. G. Hill, R. W. Hilditch, F. Younger, and W. A. Fisher, Mem. Royal Astron. Soc. **79**, 131 (1975).
12. B. J. Hrivnak, ASP Conf. Ser. **38**, 269 (1993).
13. S. M. Rucinski, Astron. J. **124**, 1746 (2002).
14. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, Astrophysical Bulletin **66**, 355 (2011).
15. V. V. Krushinsky, A. A. Popov, and A. F. Punanova, Astrophysical Bulletin **69**, 497 (2014).
16. G. A. Galazutdinov, Preprint No. 92 (Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, 1992).
17. G. Djurašević, H. Rovithis-Livaniou, P. Rovithis, et al. Astron. and Astrophys. **367**, 840 (2001).
18. S. Yu. Gorda, A. P. Lyaptsev, and A. M. Sobolev, Astrophysical Bulletin **70**, 109 (2015).
19. A. Prša and T. Zwitter, Astrophys. J. **628**, 426 (2005).
20. R. E. Wilson and E. J. Devinney, Astrophys. J. **166**, 605, (1971).
21. J. A. Nelder and R. Mead, Computer J. **7**, 308 (1965).

Spectrometric and Photometric Study of the Eclipsing Variable AM Leo

S. Yu. Gorda

The results of quasi-simultaneous spectroscopic and photometric observations of a W UMa-type eclipsing variable star AM Leo are presented. The observations were carried out with a 1.2-m telescope equipped with a high-resolution echelle spectrometer, and a telescope-reflector ($D = 0.45\text{m}$) of the Kouravka Astronomical Observatory of Ural Federal University. New values of semi-amplitudes of the radial velocity curves of the components, $K_1 = 109.6\text{ km s}^{-1}$ and $K_2 = 252.4\text{ km s}^{-1}$ and the systemic radial velocity $V_0 = -9.3\text{ km s}^{-1}$ are obtained, comparable to the data published in the literature. The semi-amplitude of the radial velocity curve of a more massive component K_1 and the mass ratio of the components $q = 0.412$ appeared to be slightly smaller than the values obtained by other authors. An assumption was made that a possible reason of this is the presence of hot and/or cold spots on the surface of the components, shifting the effective center of brightness of the visible disk of the component with respect to its center of mass position. It was shown that the AM Leo light curve variations on the time scales of one and more days, registered within the photometric part of the study may be described by the choice of appropriate model of the spot structure.

Keywords: *binaries: eclipsing—starspots—stars: individual: AM Leo*