

УДК 524.387

ЦИКЛИЧНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ ВНЕЗАТМЕННОГО БЛЕСКА И ПЕРИОДА ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ ТИПА W UMa AM Leo

© 2020 г. С. Ю. Горда^{1,*}

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Коуровская астрономическая обсерватория им. К.А. Бархатовой, Екатеринбург, Россия

*E-mail: stanislav.gorda@urfu.ru

Поступила в редакцию 12.05.2020 г.

После доработки 30.06.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Представлены результаты 14-летнего фотометрического мониторинга контактной тесной двойной системы (ТДС) AM Leo типа W UMa. Обнаружены циклические колебания блеска малой амплитуды с периодом 7.6 ± 0.3 года, не связанные с явлениями затмений и приливными деформациями компонентов, а также малоамплитудные циклические колебания периода ТДС практически с тем же значением периода осцилляций. Сделан вывод, что механизмом, генерирующим такие колебания, может являться процесс изменения магнитного поля конвективных оболочек компонентов. На основании зарегистрированного уменьшения значений глубин обоих минимумов кривых блеска и смены их относительных значений сделан вывод о возможном переходе системы из подкласса W в подкласс A в настоящее время. Приведены значения семи новых значений моментов минимумов.

DOI: 10.31857/S0004629920110031

1. ВВЕДЕНИЕ

Затменная переменная звезда AM Leo является маломассивной контактной тесной двойной системой (ТДС) типа W UMa. Уже более сорока лет, начиная с пионерских работ Льюси, Бьерна, Томаса, Шу и др. [1–8], считается, что компоненты ТДС данного типа, имеющие разные массы, окружены общей оптически толстой конвективной газовой оболочкой, прогретой до температуры, близкой к температуре более массивного и горячего компонента. На этот факт указывает практически одинаковая глубина обоих минимумов на кривых блеска таких звезд. Газовую оболочку, окружающую оба компонента, иногда интерпретируют как общую фотосферу компонентов. Наблюдения показывают, что кривые блеска ТДС типа W UMa в определенной степени меняются от цикла к циклу. Изменения в основном связаны с увеличением или уменьшением на величину порядка нескольких сотых звездной величины блеска в максимумах или минимумах кривых блеска [9]. Иногда, когда понижение или увеличение блеска в максимумах и минимумах происходит (синхронно) одновременно, создается эффект небольшого повышения или ослабления общего блеска системы.

Эти эффекты в настоящее время объясняются несколькими причинами. Основная и первая из предложенных еще в 1975 г. Малланом [10] – это

наличие холодных или горячих пятен на поверхности главного или вторичного компонентов (см., напр., [9, 11, 12]). Тем более, что у некоторых звезд типа W UMa обнаружена хромосферная активность [13–15]. Вместе с тем считается, что подобные эффекты на кривых блеска может производить процесс неравномерного прогрева локальных областей общей конвективной оболочки в районе точки L_1 , т.н. “шейки”, при перетекании вещества с одного компонента на другой, происходящего под общей оболочкой [16], либо ее разогрева и расширения [17, 18]. Этот процесс может носить циклический характер [19]. Наличие значительного магнитного поля конвективных компонентов может влиять на квадрупольный гравитационный момент и приводить также к небольшим периодическим изменениям периода системы [8, 19, 20].

Исследование эффекта небольших вариаций кривых блеска некоторых контактных систем проводилось ранее [17, 18, 21], но если исследование вариаций периода велось на достаточно регулярном материале, полученном на значительном промежутке времени (использовались моменты минимумов), то полные кривые блеска так часто и долго, как правило, не наблюдались. Вместе с тем необходимость проведения долговременных рядов фотометрических наблюдений ТДС типа W UMa и последующего анализа полученных

данных вытекает из насущной необходимости отбора конкретных теоретических моделей из числа предложенных в статьях различных авторов, наиболее адекватно описывающих наблюдаемые изменения кривых блеска, периода, а также эволюцию таких систем.

В данной работе представлены результаты 14-летнего фотометрического мониторинга типичного представителя ТДС типа W UMa затменной переменной звезды AM Leo.

2. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ AM Leo

Тесная двойная система AM Leo изучалась давно и достаточно часто. Подробные сведения о ней можно найти в целом ряде публикаций. Поэтому здесь приведены только некоторые ее характеристики, соответствующие целям данной работы.

Затменно-переменная звезда AM Leo (BD+10°2234A) является ярким компонентом ($V = 9.1-9.7^m$) визуальной двойной системы ADS 8024 (WDS 11022+0954) ($\rho = 11.4''$, $\theta = 270^\circ$). Визуальный компонент (BD+10.2234B) слабее AM Leo в максимуме ее блеска на 1.48^m в V цвете [22]. Спектральный класс AM Leo был определен Хиллом и др. [23], как F8 V.

Переменность яркого компонента ADS 8024 (AM Leo) была открыта Хоффмейстером [24] в 1935 г. Первая фотоэлектрическая кривая блеска получена в 1956 г. Уорли и Эгеном [25]. Они же определили фотометрические элементы переменной и классифицировали ее как затненную систему типа W UMa с периодом $P = 0.3658^d$. За прошедшее время переменная неоднократно исследовалась фотометрически, были получены многочисленные кривые блеска с помощью фотоэлектрических приемников излучения. Обстоятельный обзор фотометрических наблюдений AM Leo приведен в работах Хиллера и др. [22] и Альбайрака и др. [26].

Многие авторы отмечают изменения кривых блеска AM Leo, выражающиеся в поднятии и опускании общего блеска системы, изменении глубин минимумов и появлении разновысокости максимумов блеска, так называемый эффект О'Коннелла. Эти явления на кривых блеска наблюдались на временах от одного дня до нескольких месяцев [24, 27, 28]. Вместе с тем, иногда, в течение одного-трех месяцев кривая блеска AM Leo может быть достаточно стабильной, иметь одинаковую высоту максимумов блеска [9] или показывать локальные изменения блеска на отдельных фазах на протяжении одной-двух ночей [28]. Такое поведение кривой блеска AM Leo, возможно, объясняется тем фактом, что компо-

ненты этой контактной системы типа W UMa имеют отношение масс $q = 0.45$, близкое к пограничному между подтипами A и W, и в течение определенных промежутков времени система относится то к подтипу A, то к подтипу W [29]. Известно, что искажения на кривых блеска сильнее проявляются у систем, относящихся к подтипу W [30, 31], когда в главном, более глубоком минимуме при затмении менее массивного компонента наблюдается полное затмение. Это может соответствовать либо тому, что менее массивный, имеющий меньшие размеры компонент, по каким-то причинам, становится немного более горячим, либо, что более вероятно, более массивный главный компонент покрыт значительным числом холодных пятен. Впервые возможность реализации второго варианта была предложена еще в 1975 г. в работе Маллана [10].

Наблюдаемые изменения кривых блеска могут свидетельствовать об активности на поверхности компонентов этой контактной тесной двойной системы, т.е. о появлении и исчезновении ярких и темных областей (пятен). Тем более, что у системы зарегистрировано очень слабое рентгеновское излучение [15], которое является индикатором хромосферной и корональной активности.

Наряду с изменениями кривой блеска наблюдаются изменения периода системы. Ранее предлагались различные гипотезы, объясняющие данное явление [22, 32]. Наиболее вероятной причиной изменения периода AM Leo сейчас принято считать наличие третьего тела в системе. Это предположение впервые было рассмотрено в работах [27, 32]. Позднее Альбайраком и др. [26] на основе анализа моментов минимумов, полученных исключительно с помощью фотоэлектронных приемников излучения, было найдено значение периода взаимного обращения AM Leo и третьего тела по орбите, составляющее 45 лет, получена оценка массы третьего тела, $M_3 = 0.18M_\odot$. Через 12 лет Гордой и Матвеевой [33] была построена световая кривая разностей $O - C$ с привлечением значительного числа новых значений моментов минимумов AM Leo. В результате было найдено несколько большее значение периода, 50 лет, и значительно меньшее значение эксцентриситета взаимной орбиты AM Leo и третьего тела, $e = 0.28$ против $e = 0.73$ у Альбайрака и др. [26]. Оценка массы третьего тела, при условии компланарности орбит компонентов AM Leo и взаимной орбиты с третьим телом, осталась практически той же, $M_3 = 0.15M_\odot$. Значения остальных параметров взаимной орбиты также остались без существенных изменений.

Следует отметить, что исследование изменения периода AM Leo частотным методом, проведенное в начале 2000-х годов Ли и др. [19], показало наличие двух максимумов на кривой спектра

мощности, соответствующих периодам порядка 37 и 10 лет. Причем первый период, соответствующий максимуму, по мощности значительно превосходящему второй, можно смело отнести к орбитальному периоду третьего тела. Второй, существенно меньший максимум спектра мощности, возможно, соответствует небольшим изменениям периода системы, природа которых связана с магнитным полем конвективных компонентов (магнитное торможение, эффект Эплгейта) или с периодическим переносом вещества от компонента к компоненту (тепловые осцилляции).

3. НАБЛЮДЕНИЯ AM Leo В КОУРОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Фотометрические наблюдения AM Leo были проведены в период с марта 2007 г. по март 2018 г. на телескопе-рефлекторе АЗТ-3 ($D = 0.45$ м, $F_{\text{Newton}} = 2.0$ м) и с февраля 2019 г. по март 2020 г. на телескопе-рефлекторе системы Риччи-Кретьена AstroSib ($D = 0.5$ м, $F = 4.0$ м) астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Наблюдения проводились в фильтрах *BVR*, реализующих систему, близкую к системе Джонсона-Казинса, с использованием ПЗС-камер Alta U6 фирмы Apogee с чипом Kodak KAF-1001E (1024×1024 , 24 мкм) и с 2015 г. PL A230 фирмы FLI с чипом E2V CCD230-42 (2048×2048 , 15 мкм). Размеры рабочих полей составляли $35' \times 35'$ и $24' \times 24'$ на первом и втором телескопе соответственно.

После предварительной калибровки кадров (вычитания темного кадра и деления на кадр плоского поля) проводилась апертурная фотометрия всех полученных кадров с использованием программы *Miniwin*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, т.к. находится всего в $9'$ от переменной и имеет сравнимый с ней блеск. При проведении фотометрии измерялся суммарный блеск обеих звезд пары как при измерении блеска AM Leo (ADS 8024), так и при измерении блеска звезды сравнения. Таким образом, в апертуру одновременно помещались обе звезды этих визуальных пар.

Всего было получено 80, 94 и 95 участков кривых блеска AM Leo в *B*, *V* и *R* фильтрах соответственно. Основная масса наблюдений приходилась на два весенних месяца — март и апрель. Это объясняется, по крайней мере, двумя причинами.

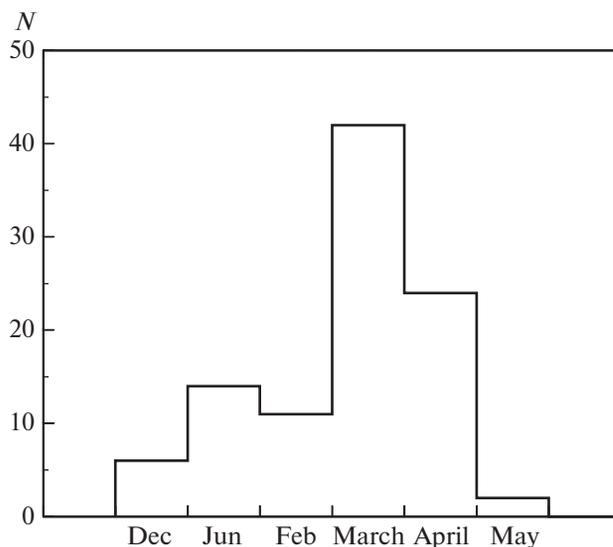


Рис. 1. Распределение количества наблюдений AM Leo в течение наблюдательного сезона в Коуровской обсерватории УрФУ за период 2007–2020 гг.

Первая — это то, что полноценно наблюдать AM Leo на широте Коуровской обсерватории УрФУ можно только 6 мес в году, с декабря по май. В эти месяцы звезда существенную часть ночи находится на высоте более 30° над горизонтом, что является условием проведения хорошей фотометрии, когда значение воздушной массы не превышает 2. Вторая — весной на Урале чаще бывает ясное небо. Распределение наблюдений по месяцам приведено на рис. 1.

4. ИЗМЕНЕНИЕ ВНЕЗАТМЕННОГО БЛЕСКА СИСТЕМЫ AM Leo

4.1. Изменение общего блеска AM Leo

Уже с самых первых ПЗС наблюдений AM Leo, проведенных в 2007 г., было отмечено изменение кривых блеска от ночи к ночи, что присуще звездам этого типа. Характер таких изменений был описан выше, в предыдущем разделе.

Исследование изменений общего блеска системы AM Leo, не связанных с явлениями затмений и эффектами приливных деформаций компонентов, проводилось с использованием метода, применявшегося нами ранее для аналогичных целей при изучении изменений кривых блеска открытой в Коуровской обсерватории новой переменной звезды типа W UMa GSC3599-2569 [34]. Суть метода заключается в вычислении значения средней за ночь разности блеска между кривой (участка кривой) блеска, полученной в данную ночь, и реперной, теоретической кривой, синтезированной на основе достоверно установ-

¹ <http://c-munipack.sourceforge.net>

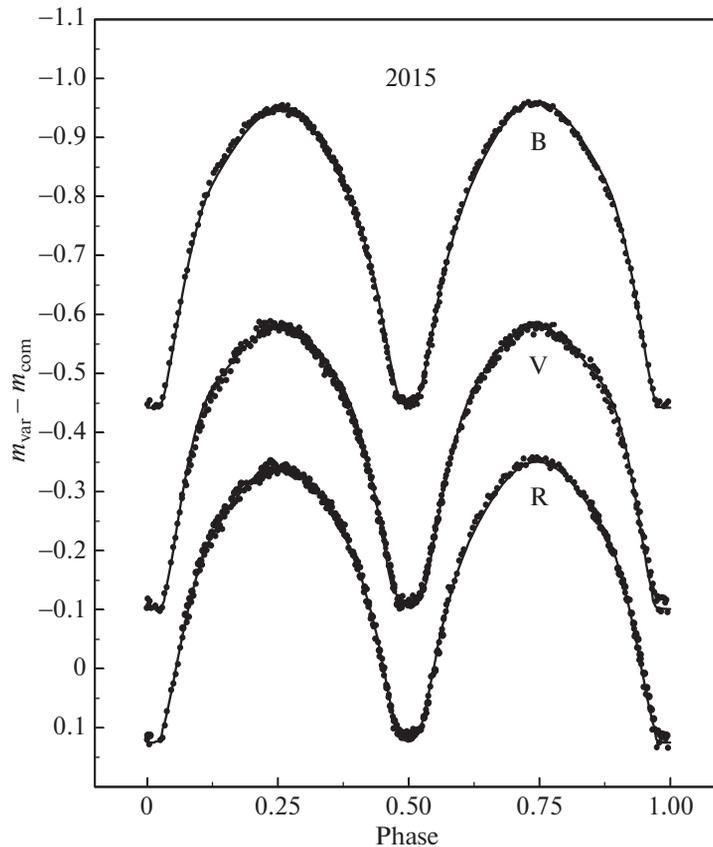


Рис. 2. Кривые блеска AM Leo (точки), полученные в 2015 г., по которым были построены реперные, теоретические кривые блеска (сплошные линии).

ленных значений параметров затменной двойной системы.

Для синтеза теоретической кривой блеска в качестве начальных были использованы параметры AM Leo, приведенные в работе [28]. Синтез выполнен с помощью программы РНОЕВЕ [35]. Были использованы данные ночей JD 245 7100.3 (18.03.2015), JD 245 7108.3 (26.03.2015), JD 245 7113.3 (31.03.2015) и JD 245 7832.3 (19.03.2017), поскольку кривые блеска, построенные на их основе, имели равновысокие максимумы и не меняющиеся значения глубин минимумов. Полученные для трех фильтров теоретические кривые являлись своеобразными нуль-пунктами, относительно которых определялись изменения блеска системы. Выбор значения нуль-пункта в данном случае особого значения не имеет, так как цель всей процедуры — зарегистрировать временные, возможно циклические, изменения блеска малой амплитуды.

Вид фотометрических кривых блеска, по которым вычислялись реперные кривые во всех трех фильтрах, приведен на рис. 2. Можно отметить “ниточный” характер полученных из наблюдений

кривых блеска в эти ночи. Разброс точек относительно реперных кривых не превышал значения $\pm 0.005^m$. В то же время в другие моменты наблюдений, как правило, кривые блеска значительно менялись от ночи к ночи относительно теоретических кривых. Так, на рис. 3 приведены положения кривых блеска AM Leo относительно теоретических кривых для двух сезонов наблюдений 2010 г. (январь—март, декабрь) и 2013 г. (январь—апрель). Можно заметить значительное изменение положения наблюдательных кривых относительно теоретических, полученных по данным 2015 г. Разброс точек на суммарных кривых блеска порядка $0.02\text{--}0.03^m$ обусловлен изменением кривых блеска от ночи к ночи в течение общего времени наблюдений в указанные периоды. Следует отметить, что в сезоны наблюдений 2010 и 2013 г. кривые блеска менялись относительно мало, в другие сезоны изменения индивидуальных кривых блеска одна относительно другой достигали значений 0.05^m .

Всего было получено 73, 93 и 89 значений разностей наблюдаемых и теоретических кривых

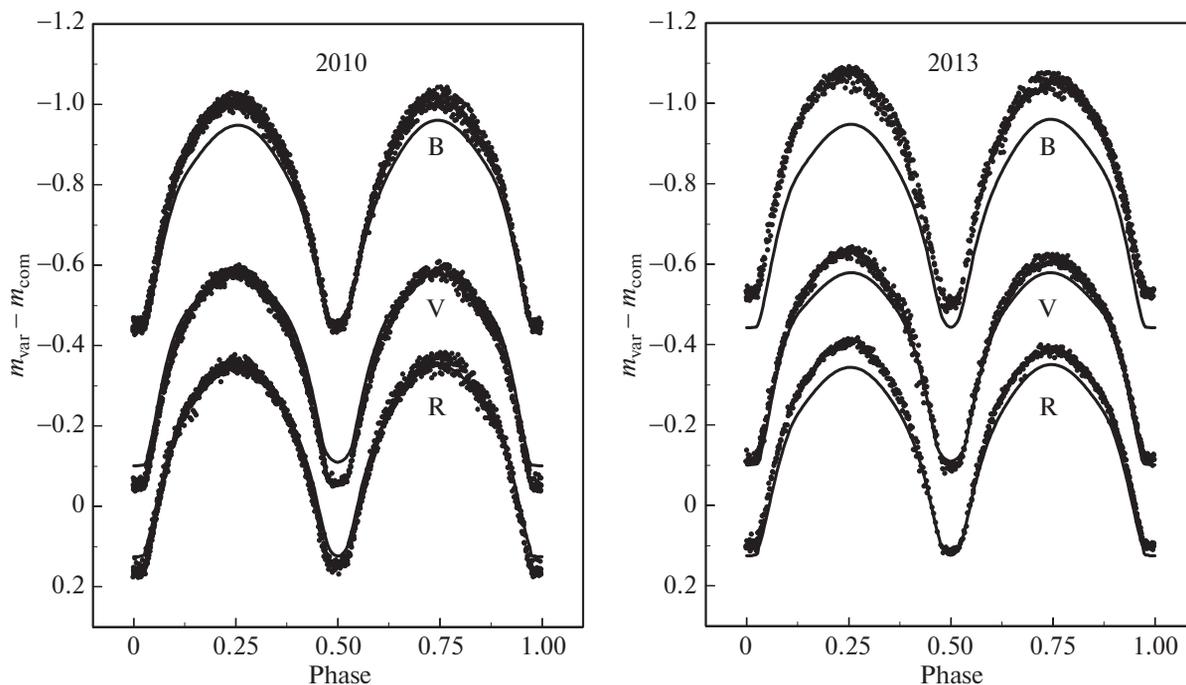


Рис. 3. Кривые блеска AM Leo, полученные в 2010 и 2013 г., обозначения те же, что и на рис. 2.

блеска в *B*, *V* и *R* фильтрах соответственно. Использовались данные только тех ночей, когда разброс точек на кривых блеска не превышал значений $\pm 0.02^m$, а также наблюдения продолжительностью более 2 ч, что соответствует ~ 0.2 долям периода AM Leo. Эти ограничения исключали из рассмотрения слишком плохие фотометрические данные или слишком короткие участки наблюдений, так как оценки разностей, определенные по ним, были бы недостаточно надежны. Полученные зависимости усредненных за ночь значений разностей блеска между наблюдаемыми кривыми блеска и теоретическими кривыми в течение всего времени мониторинга для всех трех фильтров приведены на рис. 4. Значительный разброс точек на полученных зависимостях обусловлен тем, что в каждую отдельную ночь наблюдался только отдельный участок кривой блеска AM Leo, по которому и определялась величина разности в эту ночь. Это значение может отличаться от аналогичного значения, определенного по всей кривой блеска. Например, из-за того, что мы в данную ночь наблюдали компоненты системы только с одной стороны, на которой, к примеру, было меньшее количество пятен, чем на другой, из-за чего блеск системы был переоценен либо недооценен в зависимости от природы пятен — холодные они или горячие. В идеале было бы неплохо каждый раз определять разности потоков по полной кривой блеска каждую ночь. Но это было недостижимо, так как AM Leo находилась на высо-

те, превышающей 30° над горизонтом, ограниченное, иногда достаточно малое по сравнению с периодом звезды, время. На широте Коуровской обсерватории получить полную кривую блеска AM Leo за одну ночь в принципе невозможно, так как период звезды составляет порядка 9 ч, а максимально возможное время наблюдений звезды, как было указано выше, не превышает 6–7 ч.

Тем не менее на полученных зависимостях изменения блеска AM Leo относительно реперной, теоретической кривой $\delta m = \Delta m_{\text{obs}} - \Delta m_{\text{theor}}$, где $\Delta m = m_{\text{var}} - m_{\text{com}}$, во всех трех фильтрах хорошо просматриваются участки повышения и убывания общего блеска системы явно периодического характера (см. рис. 4). На зависимости, полученной в фильтре *B*, наряду с небольшими изменениями в сторону увеличения или уменьшения блеска просматривается тренд со временем в сторону общего уменьшения блеска. Значительно меньший тренд в сторону увеличения блеска просматривается и в фильтре *V*. После устранения небольших линейных трендов данные, полученные во всех трех фильтрах, были объединены в один массив.

Проверка на периодичность полученного набора данных проводилась с использованием программы В.П. Горанского WINEFK, реализующей алгоритм Лафлера-Кинмана. Параметр $1/\theta(\varphi)$, большое значение которого является индикатором наличия периода, показал заметный и

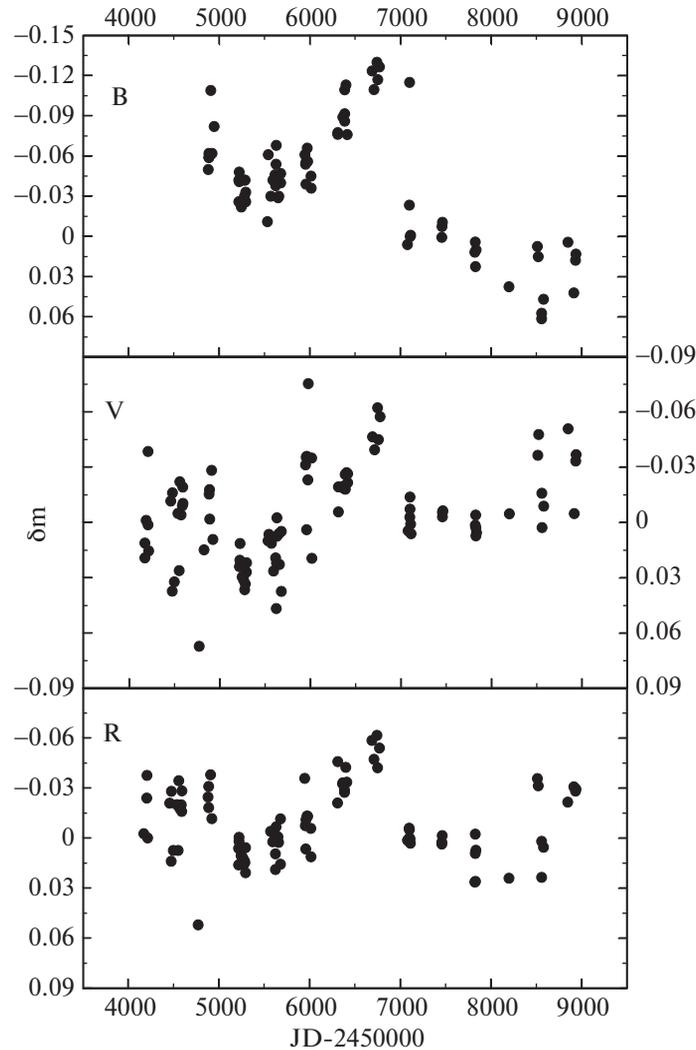


Рис. 4. Изменения общего, внезатмленного блеска AM Leo со временем, $\delta m = \Delta m_{\text{obs}} - \Delta m_{\text{theor}}$.

достаточно широкий пик на частоте, соответствующей периоду $2776^d \approx 7.6^{yr}$.

Поскольку в полученных данных явно прослеживается только один период, с целью его уточнения была произведена аппроксимация данных гармонической функцией синус с использованием следующего соотношения:

$$\Delta m_{\text{obs}} - \Delta m_{\text{theor}} = a + b \sin(2\pi(JD/P + \varphi)), \quad (1)$$

где a и b — масштабные коэффициенты; P — период; φ — фазовый коэффициент. Значения коэффициентов находились нелинейным методом наименьших квадратов. В результате было получено значение периода $P = 2796^d \pm 65^d \approx 7.7^{yr}$, лишь немного отличающееся от найденного с помощью программы WINEFK. Результат аппроксимации данных функцией синус приведен на

верхней панели рис. 5. Здесь следует заметить, что изображенная на рис. 5 функция синус отражает лишь циклический характер изменений общего блеска системы и его период, но никак не форму изменения внезатмленного блеска AM Leo.

4.2. Изменения максимумов и минимумов кривой блеска AM Leo

Изложенный в предыдущем разделе метод определения изменений общего блеска системы относительно реперной кривой блеска работает с хорошей точностью, если в процессе каждого акта наблюдений регистрируется достаточно большая часть кривой блеска исследуемой ТДС. К преимуществам применения данного метода следует отнести его чувствительность к изменению общего блеска системы, так как используют-

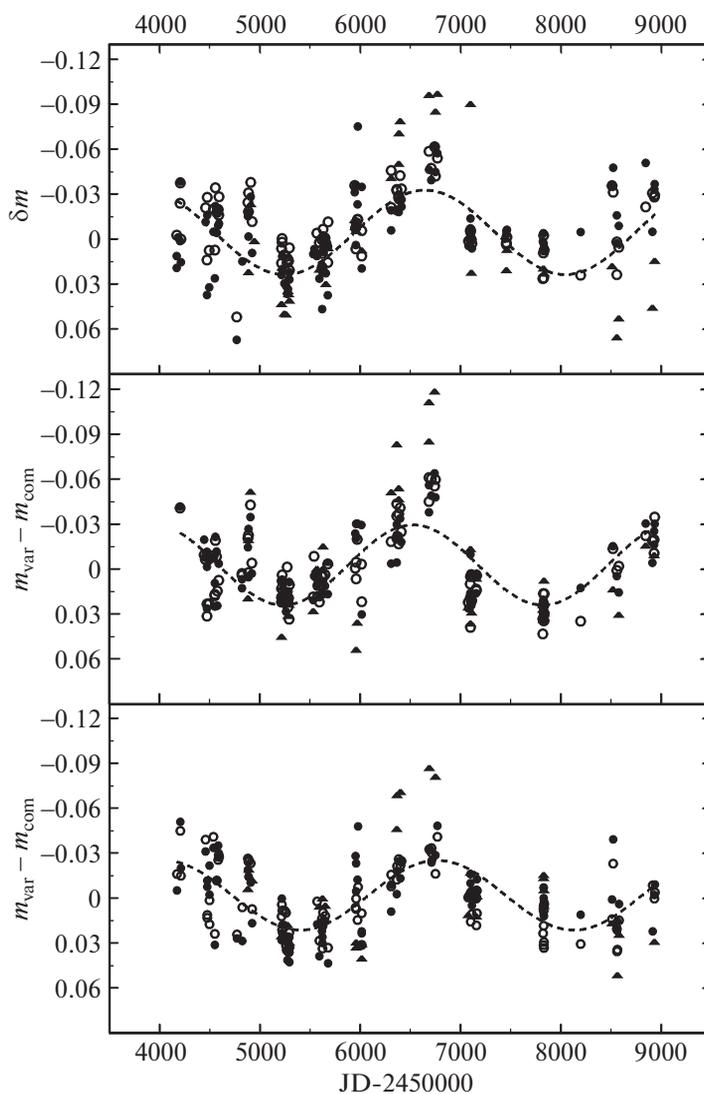


Рис. 5. Изменение общего, внезатменного блеска AM Leo (верхняя панель), а также блеска в максимумах (средняя панель) и минимумах (нижняя панель) кривой блеска после вычета линейных трендов; \blacktriangle – фильтр B ; \bullet – фильтр V ; \circ – фильтр R ; штриховая линия – аппроксимационная синусоида.

ся все наблюдательные точки, полученные в процессе наблюдений.

Вместе с тем для затменных систем важными областями на кривых блеска являются участки максимумов и минимумов. Изменения блеска в этих областях сигнализируют как об изменении температуры того или иного компонента данной ТДС (изменения глубин минимумов), так и об изменении общей светимости, несимметричности распределения по поверхности компонентов пятен и вспященных образований (разновысокость максимумов блеска).

Поэтому представляет интерес сравнить характер изменений общего блеска AM Leo с изменениями в максимумах и минимумах кривой блеска этой ТДС. Тем более, поскольку в данном

случае в более глубоком минимуме наблюдается полное затмение, имеется возможность регистрировать в этот момент блеск только одного в данном случае главного компонента.

За весь период наблюдений в каждом из V и R фильтров было получено по 86 значений разностей блеска AM Leo и звезды сравнения в максимумах (46 в первом максимуме $\phi = 0.25$ и 40 во втором $\phi = 0.75$) и по 92 значения в минимумах (48 в первом и 44 во втором). Несколько меньшее значение разностей блеска было получено в фильтре B . Результаты представлены на рис. 6. Можно заметить, что наряду с имеющимися трендами долговременные изменения блеска в максимумах и минимумах носят также цикличе-

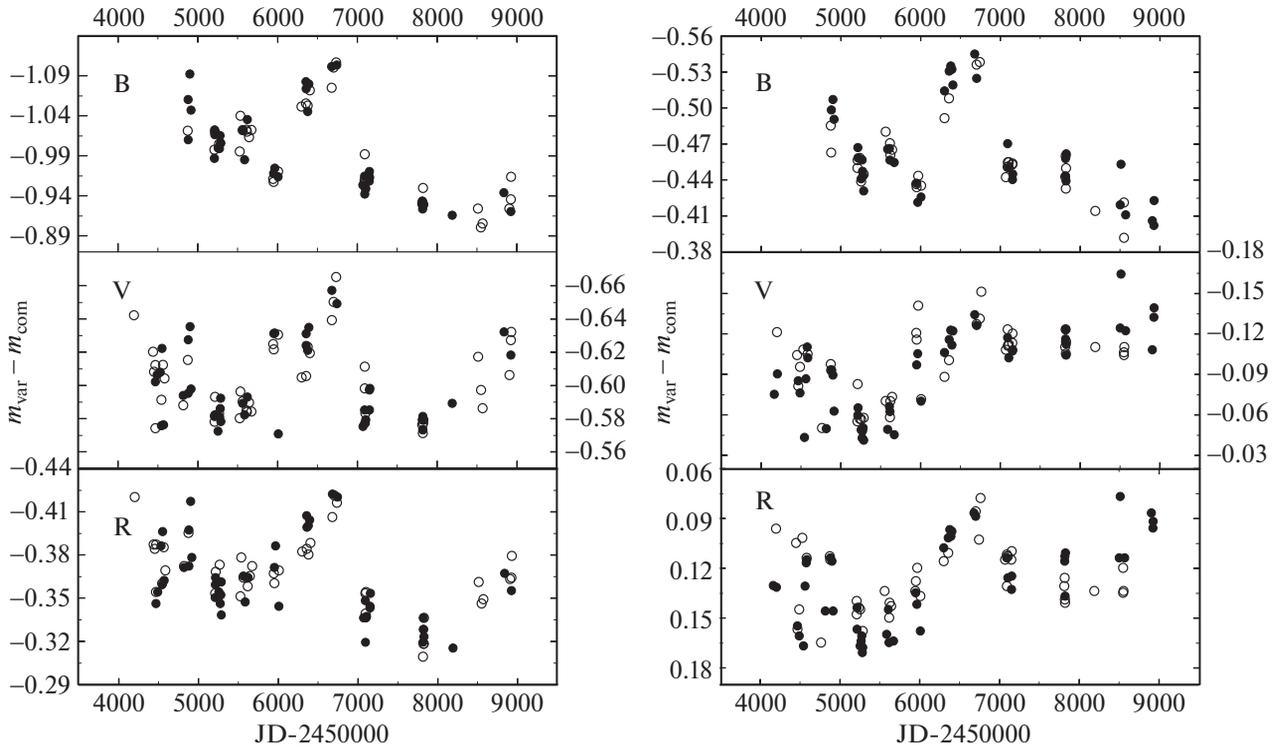


Рис. 6. Изменения блеска AM Leo со временем, в максимумах (слева) и минимумах (справа) кривой блеска; ● – первый максимум ($\phi = 0.25$) и главный минимум ($\phi = 0.0$); ○ – второй максимум ($\phi = 0.75$) и вторичный минимум ($\phi = 0.5$).

ский характер. Что и следовало ожидать, исходя из характера изменений общего блеска AM Leo. Причем не отмечается заметной относительной разницы изменений блеска в первом и втором максимумах или минимумах блеска. Проверка на периодичность полученных данных методами, изложенными в предыдущем разделе, после исключения трендов показала наличие периодов, близких к полученному, при исследовании общего блеска AM Leo (см. табл. 1). Результаты аппроксимации данных функцией синус приведены на средней и нижней панелях рис. 5.

Изменения со временем разностей показателей цвета $B - V$ и $V - R$ AM Leo и звезды сравне-

ния, а также глубин минимумов кривой блеска приведены на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

5. МАЛОАМПЛИТУДНЫЕ ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА AM Leo

В процессе проведения фотометрического мониторинга AM Leo автором был получен массив значений моментов минимумов этой ТДС. Данные, полученные до 2018 г., приведены в работе Горды и Матвеевой [33]. За последние три года были получены еще 7 значений моментов минимумов, приведенные в табл. 2.

Таблица 1. Параметры циклического изменения блеска и малоамплитудных изменений периода AM Leo

N	Данные	JD максимума синусоиды	Период, сутки	Период, годы
1	Общий блеск	2456642 ± 170	2796 ± 65	7.7 ± 0.2
2	Блеск в максимумах	2456513 ± 35	2588 ± 70	7.2 ± 0.2
3	Блеск в минимумах	2456758 ± 44	2726 ± 71	7.5 ± 0.2
4	$\Delta(O - C)$	2456302 ± 235	2847 ± 88	7.8 ± 0.2
5	Средние значения	2456554 ± 195	2739 ± 112	7.6 ± 0.3

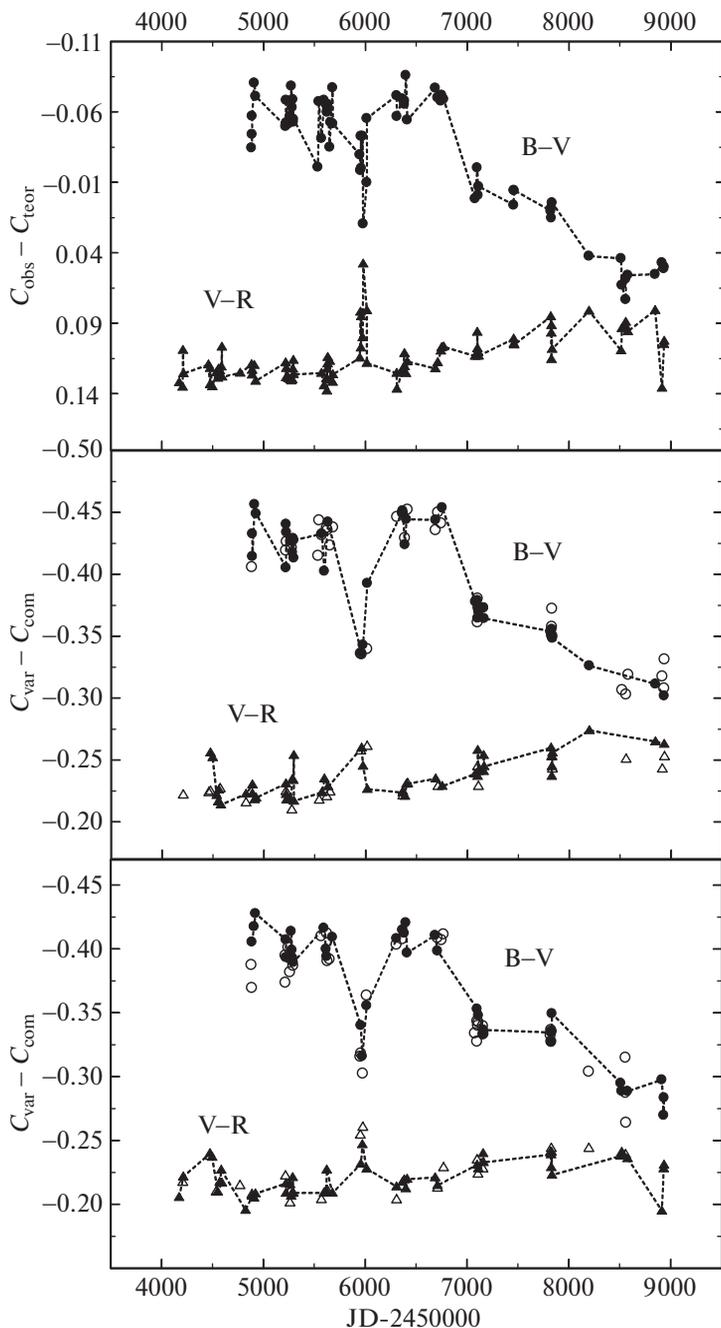


Рис. 7. Изменения показателей цвета AM Leo со временем: общий, внезатменный блеск (верхняя панель), максимумы (средняя панель) и минимумы (нижняя панель) кривой блеска; заполненные значки – первый максимум ($\phi = 0.25$) и главный минимум ($\phi = 0.0$); незаполненные значки – второй максимум ($\phi = 0.75$) и вторичный минимум ($\phi = 0.5$).

Как указывалось выше, в настоящее время причиной изменения периода AM Leo считается обращение ее по взаимной орбите с третьим телом. Период обращения составляет порядка 50 лет. Однако, если обратить внимание на распределение разностей $O - C$ моментов минимумов, полученных за последние 20 лет, относительно новой световой кривой, приведенной в ра-

боте [33], можно заметить циклический характер этих изменений. Это хорошо видно на графике разностей $O - C$ моментов минимумов и световой кривой, приведенном на рис. 9а. Отметим еще раз, что на возможный второй цикл изменений периода AM Leo указывалось в начале 2000-х годов в работе Ли и др. [19]. Причиной явного проявления в последние годы малоамплитудной цик-

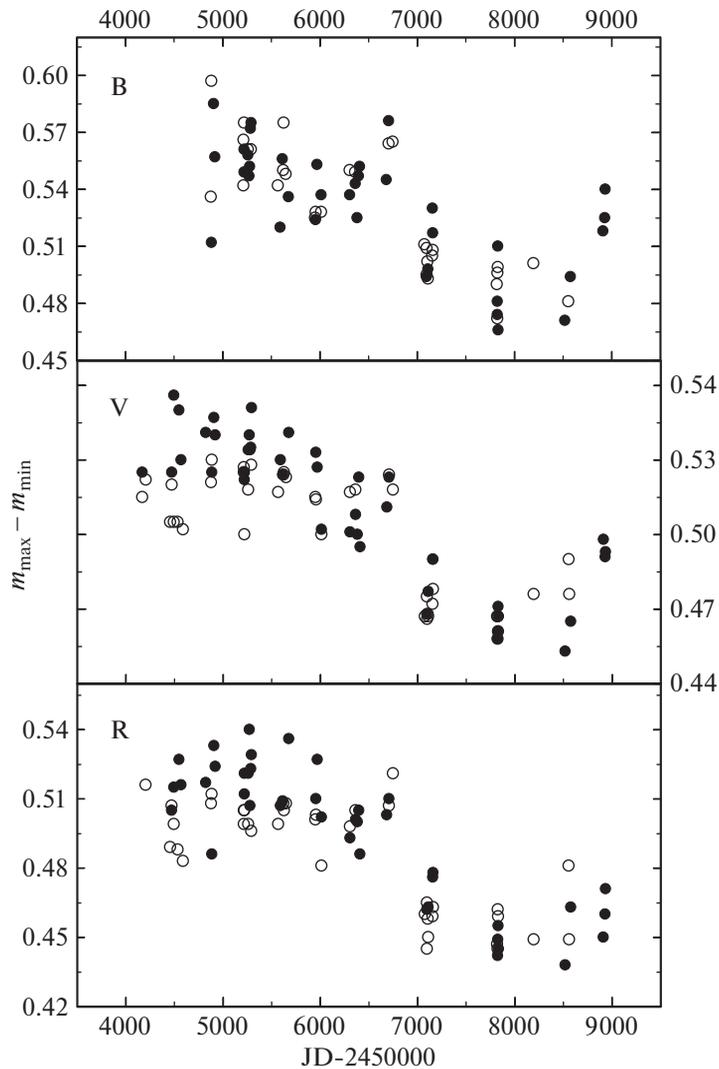


Рис. 8. Изменения глубин минимумов кривых блеска AM Leo со временем в B , V и R фильтрах; ● – главный минимум ($\varphi = 0.0$); ○ – вторичный минимум ($\varphi = 0.5$).

личности изменений периода AM Leo на кривой разностей $O - C$, вероятно, являются: а) повсеместное применение компьютеров в процессе ав-

томатизации наблюдений, существенно упрощающих трудоемкий процесс наблюдений и увеличивающих плотность по времени полученных

Таблица 2. Значения новых моментов минимумов AM Leo

Дата	Фильтры	Тип минимума	$JD_0(\text{Min})$
20.03.2018	<i>BVR</i>	II	$2458198.36330 \pm 0.00010$
06.02.2019	<i>BVR</i>	I	$2458521.54593 \pm 0.00026$
16.03.2019	<i>BVR</i>	II	$2458559.40552 \pm 0.00028$
05.04.2019	<i>BVR</i>	I	$2458579.34403 \pm 0.00015$
05.03.2020	<i>BVR</i>	I	$2458914.21227 \pm 0.00024$
20.03.2020	<i>BVR</i>	I	$2458932.33753 \pm 0.00033$
27.03.2020	<i>BVR</i>	I	$2458936.36127 \pm 0.00030$

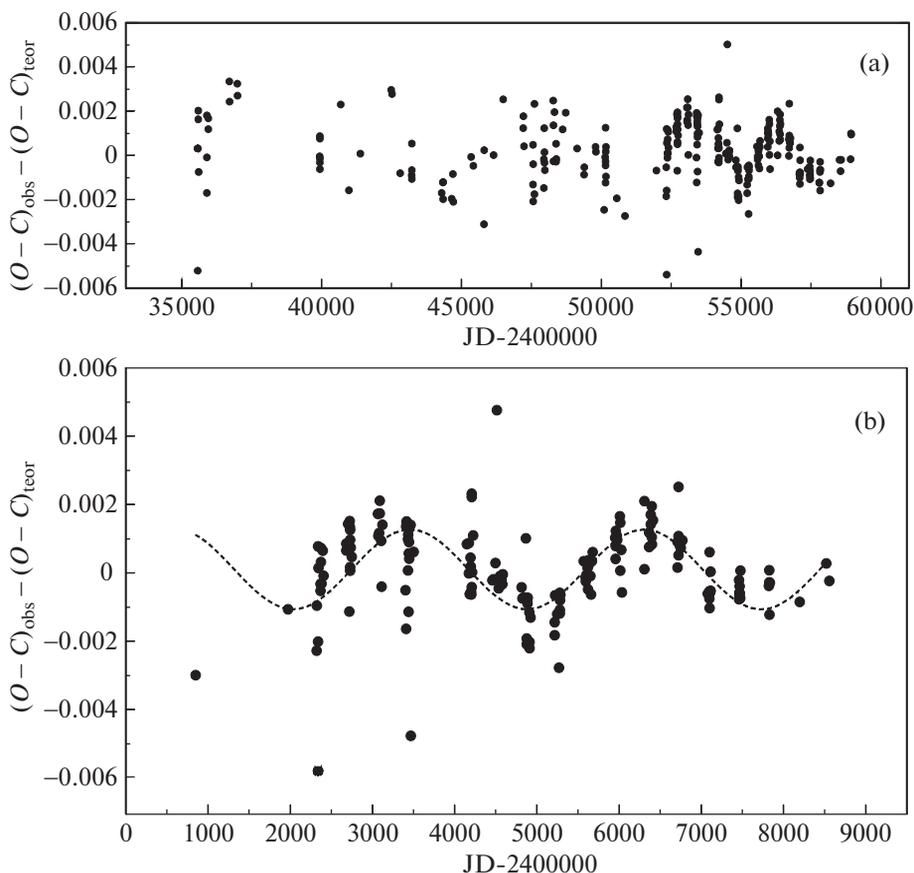


Рис. 9. Изменения разностей значений $O - C$ и световой кривой из работы [33] для всех известных значений моментов минимумов (а) и для моментов минимумов позднее JD 245 0000 (б); пунктирная линия – аппроксимационная синусоида.

данных; б) унификация параметров, применяемых высокоточных панорамных светоприемников – ПЗС-матриц; в) использование единой системы привязки времени компьютеров через сеть интернет. Действительно, как видно из графика, приведенного на рис. 9а, плотность точек моментов минимумов, полученных в последние годы, существенно выше, а их разброс меньше, чем в более ранние периоды наблюдений. Вместе с тем нельзя исключить вероятность того, что какой-то физический процесс, приводящий к небольшому циклическому изменению периода AM Leo, в последние годы существенно активизировался.

Для определения возможного значения периода были использованы разности $O - C$ моментов минимумов и световой кривой, полученные позднее даты JD 245 1000, в которых явно прослеживается периодичность изменений. Значение периода определялось так же, как и в случае анализа изменений блеска, и приведено в предпоследней строке табл. 1, а сами разности и аппроксимационная синусоида показаны на рис. 9б.

Найденное значение периода в пределах ошибок оказалось практически идентичным периоду изменения общего блеска системы, а сами колебания периода синфазны колебаниям изменения блеска.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Выше предполагалось, что найденные на основе анализа разностей блеска AM Leo и звезды сравнения циклические изменения присущи самой переменной звезде. Однако в данном случае следует проанализировать ряд причин, которые также могут оказывать влияние на изменение разностей блеска AM Leo и звезды сравнения. Это могут быть изменения блеска одного или обоих визуальных компонентов звезды сравнения или визуального компонента AM Leo. В первом случае кривая разностей блеска AM Leo и звезды сравнения смешалась бы как целое по оси звездных величин в соответствии с характером изменения блеска звезды сравнения. Во втором случае, поскольку фотометрия AM Leo и ее визу-

ального спутника проводилась в одной диафрагме, увеличение блеска визуального компонента AM Leo, одновременно со смещением кривой блеска по шкале звездных величин в сторону увеличения блеска, приводило бы к уменьшению значений глубин минимумов. Подобная ситуация наблюдается при наличии третьего тела в тесных двойных системах, создающего дополнительную подсветку, приводящую к уменьшению глубин минимумов кривых блеска. Соответственно при падении блеска визуального компонента AM Leo наблюдался бы обратный эффект. Такие изменения кривых блеска AM Leo в наших наблюдениях явно не наблюдаются. Так, на кривых блеска сезона 2013 г., приведенных на рис. 3, наблюдается совершенно иная ситуация – увеличение блеска AM Leo в максимумах относительно реперных кривых блеска приводит к увеличению глубин минимумов, и наоборот, при постоянстве блеска в максимумах наблюдается как увеличение (см. рис. 3, правая панель), так и уменьшение глубин минимумов (см. рис. 3, левая панель).

К сожалению, в ближайшей окрестности AM Leo нет звезд, сравнимых по блеску с самой переменной и звездой сравнения BD+10°2235, попадающих в один ПЗС-кадр. Поэтому осуществление контроля блеска звезды сравнения с хорошей точностью связано с определенными трудностями. Так, единственная звезда, имеющая блеск слабее звезды сравнения всего на $\sim 1.5^m$ в фильтре V – это BD+10°2238, расположенная на расстоянии $10'$ от нее, очень часто оказывалась на самом краю поля ПЗС-кадра или вообще не попадала в кадр, так как центрирование при наведении телескопа производилось по AM Leo. Поэтому был риск получить некачественную фотометрию при сравнении разностей блеска звезды сравнения относительно этой звезды.

Оценка блеска звезды сравнения была проведена по более слабой звезде TYC 47 00445-1, расположенной на расстоянии $6'$ от звезды сравнения и имеющей блеск на 2.5^m слабее. Поскольку задача исследования постоянства блеска звезды сравнения представляет отдельную трудоемкую задачу и выходит за рамки данной работы, оценки блеска были проведены только в фильтре B . Имеется две причины принятия такого решения. Во-первых, наибольшие изменения внезатмленного блеска AM Leo наблюдаются в фильтре B , во-вторых, точность наземной фотометрии в коротковолновой области спектра всегда несколько меньше, чем в более длинноволновом диапазоне в фильтрах V и R . Поэтому, получив приемлемую точность оценки блеска звезды сравнения в фильтре B , можно быть уверенным, что в других филь-

трах она, по крайней мере, будет не ниже. В результате было найдено, что в период времени с 2009 по 2020 г., когда производились наблюдения AM Leo в фильтре B , значение разности блеска звезды сравнения и звезды TYC 47 00445-1, учитывая значительную величину самой разности, практически не менялось, а именно, $\Delta B = -2.438 \pm 0.014$. В то же время значения внезатменных разностей блеска AM Leo и звезды сравнения в этот же промежуток времени изменялись в следующем диапазоне $\Delta m_B = 0.040 \pm 0.045$, т.е. в три раза больше. Таким образом, учитывая данный факт и выводы, изложенные в первом абзаце данного раздела, можно с большой долей уверенности утверждать, что изменения разностей внезатмленного блеска AM Leo и звезды сравнения вызваны изменением блеска самой переменной звезды.

Как отмечалось выше, эти изменения носят периодический характер, что проявляется, как в изменениях общего, внезатмленного блеска системы, так и в изменениях максимумов и минимумов блеска AM Leo (см. рис. 5). Изменения блеска соответствуют осцилляции периода малой амплитуды. Причем найденные периоды и фазы колебаний практически совпадают (см. табл. 1). Вполне вероятно, что изменения блеска и периода вызваны одним процессом. Изменение магнитного поля конвективных оболочек компонентов этой ТДС вполне может быть таким процессом. В настоящее время именно этим механизмом чаще всего объясняют изменения блеска и периода ТДС типа W UMa, относящихся к подклассу W . Магнитная активность на поверхности компонентов проявляется в увеличении или уменьшении числа холодных пятен или более ярких областей, например, факельных площадок на поверхности компонентов, что приводит к небольшим изменениям общей светимости звезды. В то же время эффект Эпплгейта, обусловленный перераспределением углового момента при перемещении конвективных потоков в изменяемом магнитном поле компонентов, приводит к изменениям периода системы малой амплитуды. Процесс изменения магнитного поля звезд типа W UMa может носить периодический характер типа солнечного, на что указывал еще Маллан [10], оценивший диапазон периодов в 5–10 лет. Найденное в данной работе среднее значение периода 7.6 года вполне укладывается в эти оценки. Для сравнения, у звезды AK Her, являющейся ТДС типа W UMa, Ли и др. [17], нашли три частоты изменения основного периода системы. Одна из частот, соответствующая периоду 7.6 года, интерпретируется ими как проявление магнитного цикла активности. Эти же авторы в другой своей работе [18] при исследовании изменений периода

AP Leo, другой ТДС типа W UMa, нашли две частоты, соответствующие периодам 11.3 и 9.2 года, также интерпретированные ими как проявление магнитного цикла активности.

Наряду с периодическими изменениями блеска AM Leo имеют место долговременные тренды. Наиболее сильно падение блеска AM Leo за десятилетний период отмечается в фильтре B на величину $\delta B = 0.08^m$ (см. рис. 4 и 6). Графики показателей цвета $\Delta(B - V)$ и $\Delta(V - R)$, приведенные на рис. 7, также не показывают заметных осцилляций. Можно заметить, что изменения показателей цвета происходят в противофазе. Уменьшение значения $\Delta(B - V)$ сопровождается увеличением значения $\Delta(V - R)$ и наоборот. Наиболее сильны изменения показателя $\Delta(B - V)$, что соответствует большой амплитуде изменения блеска в фильтре B . В рамках модели магнитной активности на поверхности компонентов это можно объяснить изменением площади, занимаемой яркими областями, например, факельными полями, что наиболее заметно проявляется в синей области спектра. В частности, значимое уменьшение показателя цвета $\Delta(B - V)$ на $\sim 0.1^m$ после 2015 г. (JD 245 7000) может свидетельствовать об уменьшении площади ярких областей на поверхности компонентов. При этом более красный показатель цвета $\Delta(B - V)$, наоборот, немного увеличился, что может свидетельствовать об уменьшении и пятенной активности (имеются в виду темные пятна).

С другой стороны, более значимые изменения блеска звезды в фильтре B , а также показателя цвета $B - V$ по сравнению с изменением блеска в фильтрах V и R и показателя цвета $V - R$ можно объяснить и другими причинами. Поскольку спектральный класс AM Leo есть F8 V, согласно Хиллу и др. [23], то температура поверхности компонентов находится в пределах 6300–6600 К. В соответствии с законом смещения Вина, максимум распределения энергии непрерывного излучения, в области которого изменения вдоль оси длин волн наиболее значительны, приходится на значения $\lambda = 4400\text{--}4600 \text{ \AA}$, т.е. область спектра, регистрируемую в фильтре B , причем вблизи максимума полосы пропускания фильтра. Спектральные же области, регистрируемые в фильтрах V и R , приходятся на монотонно нисходящий участок распределения энергии непрерывного спектра звезды спектрального класса F8. Таким образом, небольшие изменения поверхностной температуры компонентов из-за увеличения или уменьшения площади пятен, приводящие к небольшому сдвигу максимума распределения энергии непрерывного спектра вдоль оси длин

волн, наиболее значимо будут проявляться в изменении блеска звезды в фильтре B и показателя цвета $B - V$. Таким образом, в рамках данного предположения уменьшение значения показателя цвета $B - V$ и увеличение значения показателя цвета $V - R$ могут свидетельствовать просто об уменьшении пятенной активности компонентов. В данном случае отпадает необходимость в предположении наличия горячих областей большой площади на поверхности компонентов.

Описанные выше долговременные изменения блеска и цвета системы AM Leo могут являться своеобразными индикаторами перехода звезды в более спокойную фазу активности, т.е. из подкласса W в подкласс A . На это может указывать и изменение глубин минимумов. Так, на графиках изменений глубин обоих минимумов, приведенных на рис. 8, видно, что до 2015 г. (JD 245 7000), по крайней мере в фильтрах V и R , более глубоким был первый минимум, соответствующий полному затмению вторичного компонента. Затем, по мере уменьшения значений, глубины минимумов сравнялись по величине, а в отдельные моменты времени второй минимум оказывался немного глубже первого, что присуще контактному ТДС типа W UMa подкласса A . Следует отметить, что эти изменения произошли за достаточно короткий промежуток времени после одного из зарегистрированных максимумов внезатменного блеска AM Leo. Такое достаточно резкое изменение величины показателя цвета $\Delta(B - V)$ и значений глубин минимумов можно охарактеризовать как скачок.

Изменения глубин минимумов AM Leo регистрировались и ранее. Так, в работе Демиркана и Дермана [36] приведены данные изменений глубин минимумов на протяжении 40 лет, с 1955 по 1995 г. За этот промежуток времени значения глубин первого и второго минимумов, как отмечено в работе Ли и др. [19], примерно раз в десятилетие менялись местами, изменяясь в противофазе. Подобные изменения, с периодом 23 года, разностей максимумов и глубин минимумов кривых блеска контактной ТДС BV Peg, являющейся затменной переменной типа W UMa с компонентами такого же спектрального класса, как и у AM Leo (F8 V), приведены в работе Ханни и Авадалла [37]. Правда, значения периода были найдены всего по шести сезонам наблюдений на интервале в 63 года.

Обнаруженные в данном исследовании синхронные изменения показателей цвета и глубин минимумов AM Leo, а также их вероятный периодический характер [19] наводят на мысль о существовании еще одного более длительного цикла активности, помимо найденного на основе изме-

нений внезатменного блеска системы периода ~ 7.6 года. Подобная ситуация наблюдается, например, в виде долгопериодического изменения степени активности 11-летнего солнечного цикла. По всей видимости более длительный период проявляется в переходе кривой блеска AM Leo между подклассами $A \rightleftharpoons W$. Пока не имеется достаточно данных, чтобы констатировать это наверняка.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения 14-летнего фотометрического мониторинга тесной двойной системы AM Leo типа W UMa были получены следующие результаты:

1) обнаружены циклические изменения блеска малой амплитуды с периодом порядка 7.6 года, не связанные с явлениями затмений и приливными деформациями компонентов;

2) обнаружены малоамплитудные циклические изменения периода системы, не связанные с влиянием третьего тела;

3) найденные значения периодов и фаз малоамплитудных колебаний внезатменного блеска и периода ТДС, оказавшиеся практически идентичными, позволили сделать вывод о наличии единого процесса, генерирующего такие колебания;

4) сделано предположение, что таким механизмом может являться процесс изменения магнитного поля конвективных оболочек компонентов, подобно Солнечному циклу активности, приводящий как к изменению площади холодных (темных) и горячих (светлых) пятен, влияющих на изменение общего блеска системы, так и к малоамплитудным изменениям периода системы (эффект Эпплгейта);

5) на основании зарегистрированного уменьшения значений глубин обоих минимумов кривых блеска и смены их относительных значений сделан вывод о возможном переходе системы из подкласса W в подкласс A в настоящее время.

Необходимо проведение дальнейших фотометрических наблюдений AM Leo с целью уточнения найденного значения периода малоамплитудных осцилляций внезатменного блеска и периода ТДС, а также определения величины возможного более длительного периода цикла магнитной активности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FEUZ-2020-

0030, а также при финансовой поддержке постановления 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *L. B. Lucy*, *Astrophys. J.* **151**, 1123 (1968).
2. *P. Biermann and H. C. Thomas*, *Astron. and Astrophys.* **16**, 60 (1972).
3. *F. H. Shu, S. H. Lubow, and L. Anderson*, *Astrophys. J.* **209**, 539 (1976).
4. *F. H. Shu, S. H. Lubow, and L. Anderson*, *Astrophys. J.* **239**, 937 (1980).
5. *L. B. Lucy*, *Astrophys. J.* **205**, 208 (1976).
6. *B. P. Flannery*, *Astrophys. J.* **205**, 217 (1976).
7. *L. B. Lucy and R. E. Wilson*, *Astrophys. J.* **231**, 502 (1979).
8. *S. W. Mochinski*, *Astrophys. J.* **245**, 650 (1981).
9. *S. Zola, K. Gazeas, J. M. Kreiner, W. Ogloza, M. Siwak, D. Koziel-Wierzbowska, and M. Winiarski*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **408**, 464 (2010).
10. *D. J. Mullan*, *Astrophys. J.* **198**, 563 (1975).
11. *L. Binnenijk*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **96**, 646 (1984).
12. *G. Djurasević, H. Rovithis-Livaniou, P. Rovithis, S. Erkapic, and N. Milovanović*, *Astron. and Astrophys.* **367**, 840 (2001).
13. *S. M. Rucinski and O. Vilhu*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **202**, 1221 (1983).
14. *J. A. Eaton*, *Astrophys. J.* **268**, 800 (1983).
15. *K. Stepień, J. H. M. M. Schmitt, and W. Voges*, *Astron. and Astrophys.* **370**, 157 (2001).
16. *C. Maceroni and F. van Veer*, *Astron. and Astrophys.* **277**, 515 (1993).
17. *L. Li, F. Zhang and Z. Hun*, *Astron. and Astrophys.* **368**, 595 (2001).
18. *L. Li, F. Zhang and Z. Hun*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **54**, 73 (2002).
19. *L. Li, Z. Hun, and F. Zhang*, *ASP Conf. Ser.* **279**, 331 (2002).
20. *J. Applegate*, *Astrophys. J.* **385**, 621 (1992).
21. *K. B. Alton, R. H. Nelson and D. Terrell*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 6256, 1 (2018).
22. *M. E. Hiller, W. Osborn, and D. Terrell*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **116**, 337 (2004).
23. *G. Hill, R. W. Hilditch, F. Younger, and W. A. Fisher*, *Mem. Roy. Astron. Soc.* **79**, 131 (1975).
24. *S. Hoffmeister*, *Astron. Nachr.* **255**, 401 (1935).
25. *C. E. Worley and O. J. Eggen*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **68**, 452 (1956).
26. *B. Albayrak, S. O. Selam, T. Ak, A. Elmasli, and I. Özavci*, *Astron. Nachricht.* **326**, 122 (2005).
27. *M. Hoffmann and U. Hopp*, *Astrophys. Space Sci.* **83**, 391 (1982).

28. *O. Demircan, E. Denmar, and H. Dundar*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **95**, 213 (1992).
29. *S. Yu. Gorda*, *Astrophys. Bull.* **71**, 64 (2016).
30. *E. Derman, O. Demircan, and H. Dundar*, *Inform. Bull. Var. Stars № 3630*, 1 (1991).
31. *L. Binnendijk*, *Vistas Astron.* **12**, 217 (1970).
32. *X. Xiong, L. Liu, and Sh-B. Qian*, *Res. Astron. and Astrophys.* **18**, 55 (2018).
33. *Sh-B. Qian, J. He, F. Xiang, X. Ding, and S. Boonrucksar*, *Astron. J.* **129**, 1686 (2005).
34. *S. Yu. Gorda and E. A. Matveeva*, *Inform. Bull. Var. Stars № 6227*, 1 (2017).
35. *S. Yu. Gorda, A. P. Lyaptsev, and A. M. Sobolev*, *Astrophys. Bull.* **70**, 109 (2015).
36. *A. Prsa and T. Zwitter*, *Astrophys. J.* **628**, 426 (2005).
37. *O. Demircan and E. Denmar*, *Astron. J.* **103**, 593 (1992).
38. *M. A. Hanna and N. S. Awadalla*, *J. Korean Astron. Soc.* **44**, 97 (2011).