

УДК 524.3-43

ДЖЕТ МОЛОДОЙ ЗВЕЗДЫ RWAURA И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОБЛЕМЫ

© 2017 Л. Н. Бердников^{1,2}, М. А. Бурлак¹, О. В. Возякова¹,
А. В. Додин¹, С. А. Ламзин^{1*}, А. М. Татарников¹

¹ Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

² Отделение астрономии и астрофизики, Обсерватория и научный центр Энтомо, Аддис-Абеба, 33679 Эфиопия

Поступила в редакцию 17 апреля 2017 года; принята в печать 24 мая 2017 года

Сравнив изображения джета молодой звезды RW Aur A, разделенные промежутком времени 21.3 года, мы нашли, что наиболее удаленные от звезды пятна-сгущения в джете возникли приблизительно 350 лет назад. Приведены аргументы в пользу того, что тогда же возник сам джет и началась эпоха интенсивной аккреции на звезду, вызванная перестройкой структуры ее протопланетного диска из-за приливного воздействия спутника RW Aur B. Мы предполагаем, что усиление аккреции — это реакция на изменение условий во внешних областях диска, которая последовала за прохождением звуковой волны, порожденной этими изменениями, по диску в радиальном направлении. Различие параметров синего и красного лепестков джета RW Aur A связано с асимметричным распределением околозвездного вещества над диском и под ним, которое возникло в результате пролета спутника. На основе анализа исторической кривой блеска RW Aur A сделан вывод о том, что глубокие и продолжительные ($\Delta t > 150$ суток) ослабления блеска RW Aur A после 2010 г. не имели аналогов в предшествующие 110 лет. Изменение характера фотометрической переменности звезды мы также связываем с перестройкой структуры внутренних, $r < 1$ а.е., областей ее протопланетного диска и обсуждаем, почему эти изменения начались только через 350 лет после начала фазы активной аккреции.

Ключевые слова: звезды: переменные: Т Тельца, Ae/Ве Хербига — звезды: индивидуальные: RW Aur — двойные: визуальные — межзвездная среда: джеты и истечения — аккреция, аккреционные диски

1. ВВЕДЕНИЕ

RW Aur A принадлежит к объектам типа Т Тельца, которые представляют собой молодые ($t < 10^7$ лет) звезды с массой менее $3 M_{\odot}$, находящиеся на стадии движения к Главной последовательности. Точнее говоря, RW Aur A относится к т.н. классическим звездам Т Тельца (CTTS), активность которых (переменность блеска, избыточная эмиссия в линиях и континууме во всех спектральных диапазонах, наличие интенсивного истечения вещества из их окрестностей и т.п.) так или иначе связана с аккрецией вещества окружающих их протопланетных дисков [1]. Джой и ван Бисбрук [2] обнаружили у звезды спутник, который по последним данным находится от нее на угловом расстоянии $1''5$ [3, 4], что в проекции на небо соответствует 210 а. е., если принять расстояние до RW Aur равным 140 пк [5].

RW Aur A — одна из наиболее активных CTTS, и при ближайшем рассмотрении это представляется довольно странным. Действительно, оценки темпа аккреции вещества протопланетного диска на звезду \dot{M}_{ac} дают величину, превышающую $2 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ [6, 7], в то время как масса и радиус протопланетного диска звезды сравнительно невелики: $M_d = 4 \times 10^{-3} M_{\odot}$ [8] и $R_d < 80$ а.е. [9]. Следовательно, характерное время пребывания RW Aur A в активном состоянии $t_d \sim M_d/\dot{M}_{ac} \lesssim 2 \times 10^4$ лет оказывается намного меньше ее возраста, который заведомо превышает 10^6 лет [10].

Отметив это обстоятельство, авторы [9] предположили, что наблюдаемый высокий темп аккреции является следствием приливного возмущения диска RW Aur A пролетом мимо нее другой звезды — RW Aur B. Расчеты [11] показали, что наблюдаемую структуру внешних областей диска RW Aur A

*E-mail: lamzin@sai.msu.ru

удается воспроизвести, если спутник пролетел мимо главной звезды на минимальном расстоянии около 70 а.е. 400–450 лет назад.

О том, что пролет спутника привел к изменению динамики внутренних областей диска RW Aur A, заговорили после того, как в 2010–2011 г. неожиданно произошло продолжительное ($\Delta t \sim 150^d$) и довольно глубокое ($\Delta V \sim 2^m$) ослабление ее блеска [12], которое повторилось три года спустя в еще большем масштабе: $\Delta t \approx 2$ года, $\Delta V > 5^m$ [13]. В качестве вероятной причины этих явлений рассматривается возможность усиления «запыленного» ветра из внутренних ($r < 1$ а.е.) областей диска [7, 14–16].

Давно известно, что из окрестностей RW Aur A происходит интенсивное истечение вещества (см., например, [17, 18] и приведенные там ссылки). Авторы [19] обнаружили у звезды биполярный джет, который представляет собой коллимированную часть ветра. Следуя общепринятой терминологии, приближающуюся к Земле часть струи мы будем называть синим лепестком джета, а удаляющуюся — красным лепестком. Оказалось, что лучевая скорость и физические параметры газа в синем и красном лепестках существенно отличаются, равно как и их пространственная протяженность (см. [20] и приведенные там ссылки). Каждая из струй состоит из цепочки пятен-сгущений¹, количество которых в струях также различно. Авторы [22] нашли, что ближайšie к звезде ($d < 5''$) пятна постепенно удаляются от нее, меняя при этом свою форму.

Считается, что возникновение сгущений в джетах является следствием нестационарных процессов в зоне формирования ветра — в магнитосфере звезды и/или в самых внутренних областях ее аккреционного диска, — во время которых происходит кратковременное увеличение скорости движения газа (см. [23, 24] и приведенные там ссылки).

Цель данной работы — связать изменение морфологии джета RW Aur A, произошедшее за два последних десятилетия, а также характера фотометрического поведения звезды после 2010 г. с приливным воздействием спутника на внутренние области диска главной звезды.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения RW Aur выполнены с помощью 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ в 2017 г. В оптическом диапазоне изображения окрестностей звезды размером $10' \times 10'$ были получены с помощью фильтра [S II] ($\lambda_c = 672.17$ нм, $FWHM = 5.68$ нм) 20 и

24 февраля, а также фильтра H_α ($\lambda_c = 656$ нм, $FWHM = 7.67$ нм) 28 февраля с суммарным временем накопления 2500 и 2100 с, соответственно. Качество изображения при наблюдениях менялось от $0''.8$ до $1''.3$. Приемник излучения — ПЗС камера E2V CCD44-82 с размером пиксела 15 мкм. Полученные изображения были стандартным образом скорректированы за электронную подложку и плоское поле. Используя координаты более 50 звезд поля, взятых из каталога USNO-B1.0 [25], мы нашли, что масштаб изображения — $0''.1543/\text{пиксел}$.

24 и 28 февраля 2017 г. с помощью инфракрасной камеры-спектрографа ASTRONIRCAM [26] в фотометрическом режиме были также получены изображения области вокруг RW Aur в полосе фильтра [Fe II] ($\lambda_c = 1644.2$ нм, ширина полосы пропускания — 26.2 нм). Масштаб изображения — $0''.2695/\text{пиксел}$, поле зрения — $4'.6$. Итоговое изображение является суммой 80 кадров, полученных 24 февраля с временем накопления 25 с при качестве изображения примерно $1''.3$, и 180 кадров с временем накопления 16 с при качестве изображения около $1''.0$, полученных 28 февраля. Таким образом, суммарное время экспозиции превысило 80 минут.

Итоговые изображения в полосах фильтров [S II], H_α и [Fe II], приведены на трех нижних панелях рис. 1.

3. ПЯТНА В ДЖЕТЕ И ИХ СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Наблюдения [19], позволившие обнаружить джет RW Aur A, охватывали область размером до $30''$ по обе стороны от звезды. В октябре 1995 г. авторы [27] получили гораздо большее по размерам изображение окрестностей звезды в полосе фильтра [S II], близкого по параметрам к нашему. Они нашли, что в синем лепестке пятна прослеживаются вплоть до расстояния почти $120''$ (пятно I), а в красном лепестке — примерно до $55''$ (пятно M) (см. верхнюю панель рис. 1, копию рис. 2 из работы [27]).

Изображения внутренних ($d < 5''$) областей джета в линиях [S II] с высоким угловым разрешением были получены в работах [28, 29] 30 декабря 1997 г. и 10 декабря 2000 г., соответственно. Сравнив эти изображения со своими, полученными 19 декабря 1998 г., авторы [22] определили скорость собственного движения пятен во внутренней области джета и пришли к выводу, что в синем лепестке пятна удаляются от звезды примерно в 1.6 раз быстрее, чем в красном.

Чтобы определить тангенциальную скорость движения пятен μ на большем расстоянии от

¹ Каждое из пятен, по сути дела, представляет собой объект Хербига-Аро, но в каталоге этих объектов [21] порядковый номер HH 229 присвоен всему комплексу пятен.

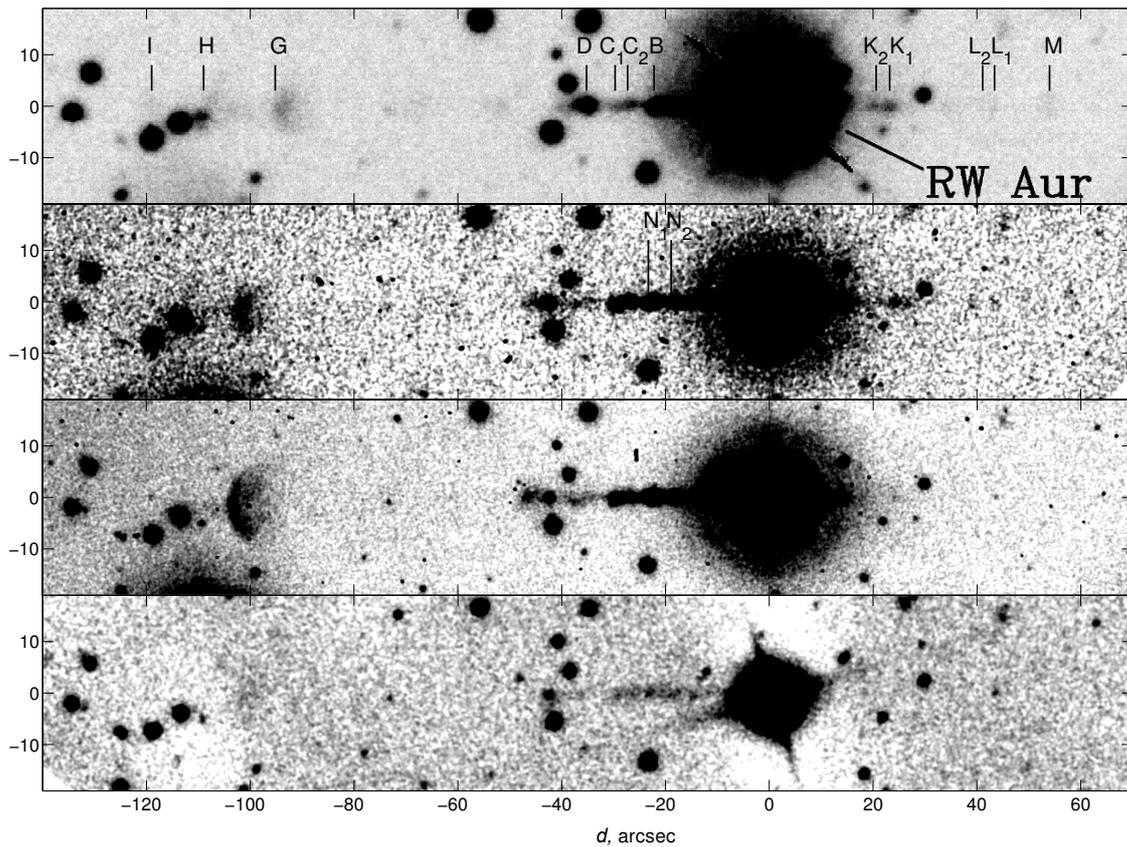


Рис. 1. Изображения окрестностей RW Aur A, полученные в разных фильтрах и в разные эпохи. Верхняя панель — 1995 г., фильтр [S II] (взято из работы [27]); вторая сверху — 2017 г., фильтр [S II]; третья сверху — 2017 г., фильтр H_{α} ; нижняя — 2017 г., фильтр [Fe II]. На всех изображениях ось джета ($PA \approx 130^\circ$) направлена вдоль горизонтальной оси, центр координат совпадает с положением RW Aur A.

звезды и на более длительном временном интервале, мы сравнили полученное нами изображение в фильтре [S II] с данными о расстоянии от пятен до звезды d в аналогичном фильтре в разные эпохи: значения d_{1997} и d_{2000} взяты из таблицы 1 [22], а величины d_{1995} получены по рис. 2 работы [27], который мы обработали так же, как полученные нами изображения. Наши изображения в фильтрах H_{α} и [Fe II] $\lambda = 1.64$ мкм для определения μ не использовались, поскольку положения пятен на изображениях в разных фильтрах несколько отличаются. Для каждого пятна в таблице 1 приведены расстояния от точки с его максимальной интенсивностью до RW Aur A (кроме пятна G), вычисленное по разности координат значение μ , а также «возраст» пятна $t_d = d/\mu$. Пятно G имеет серповидную форму, и мы сочли, что его положение лучше характеризовать координатой наиболее удаленной от звезды точки выпуклой кромки серпа. Отметим, что пятно, которое в таблице обозначено как R_7 , в работе [22] не имеет обозначений.

На рис. 1 детали внутри области с радиусом

$5''$ – $10''$ вокруг RW Aur не различимы. Однако на самом деле на всех наших изображениях A и B — компоненты двойной системы, расстояние между которыми $1''5$, уверенно разделяются, так что центры близких к RW Aur A пятен мы определяли после вычитания крыльев изображений обоих компонентов достаточно надежно.

Из данных таблицы следует, что среднее собственное движение μ шести уплотнений в красном лепестке за последние примерно 20 лет равно $0''18 \pm 0.03/\text{год}$. Это в пределах ошибки совпадает с величиной $0''16/\text{год}$, полученной в [22] по двум пятнам на временном интервале около 2 лет. В синем лепестке эти авторы измерили μ только у пятна B_3 . Оно оказалось равным $0''26 \pm 0.035/\text{год}$, что также совпадает с значением $0''26 \pm 0.02/\text{год}$, найденным для этого пятна нами. Однако среднее значение μ по пятнам B, C₁, C₂, D и G синего лепестка у нас получилось несколько больше: $0''34 \pm 0.02/\text{год}$. Трудно сказать, насколько такое различие значимо, но если вычислить среднее собственное движение по всем пятнам синего лепестка

Таблица 1. Положение и собственное движение пятен в джете RW Aur A

Пятно	d_{1995} , arcsec	d_{1997} , arcsec	d_{2000} , arcsec	d_{2017} , arcsec	μ , arcsec/год	t_d , лет
<i>M</i>	54.0					
<i>L</i> ₁	43.4					
<i>L</i> ₂	41.1					
<i>K</i> ₁	23.2			26.5	0.154	170
<i>K</i> ₂	20.6			24.2	0.170	140
<i>R</i> ₁		11.1		14.0	0.153	92
<i>R</i> ₂		7.9		12.3	0.231	53
<i>R</i> ₄		2.92	3.45	6.8	0.205	33
<i>R</i> _?			0.25	2.6	0.145	18
<i>B</i> ₃			-1.25	-5.4	-0.258	21
<i>N</i> ₃				-14.2		
<i>N</i> ₂				-18.9		
<i>N</i> ₁				-23.3		
<i>B</i>	-22.2			-28.7	-0.305	94
<i>C</i> ₂	-27.3			-34.7	-0.347	100
<i>C</i> ₁	-29.7			-37.2	-0.359	104
<i>D</i>	-35.2			-42.5	-0.341	125
<i>G</i>	-95.2			-103.2	-0.372	280
<i>H</i>	-109.1					
<i>I</i>	-119.0					

джета, то оно получается равным $0''.33 \pm 0.04/\text{год}$, т.е. в 1.8 раз больше, чем у красного, что в пределах ошибки совпадает с отношением, найденным в [22]².

4. ОЦЕНКА ВОЗРАСТА ДЖЕТА

Поделив координаты крайних пятен *M* и *I* на изображении джета в 1995 г. на средние значения μ в соответствующих лепестках и добавив 21.3 года, получим, что они возникли 320 ± 50 и 380 ± 40 лет назад, соответственно.

Часть пятен, видимых на изображении 1995 г., на изображении 2017 г. отсутствует, в частности,

²Средние значения μ соответствуют движению пятен перпендикулярно лучу зрения со скоростью приблизительно 160 км с^{-1} в синем лепестке джета и около 90 км с^{-1} — в красном.

это касается яркого пятна *H*, а также самых удаленных от звезды пятен *I* и *M*. С другой стороны, на полученном нами изображении имеются пятна, обозначенные нами как *N*₁–*N*₃, которые не были замечены ранее. Поэтому нельзя исключить, что до 1995 г. в джете имелись пятна, которые находились от звезды дальше пятен *I* и *M*, но к 1995 г. перестали быть видимыми. Формально это означает, что определенный нами возраст джета $t_{\text{jet}} \approx 350$ лет — это нижний предел. Однако поскольку по рис. 4 из [11] видно, что формирование приливных рукавов у диска А-компонента началось не ранее, чем за 200 лет до прохождения спутника через периастр, т.е. примерно менее 650 лет назад, наше значение t_{jet} должно быть близко к реальному. Тем более, что увеличение возраста джета означает уменьшение времени t_{exc} , за которое приливное возмущение из внешних областей дошло до самых внутренних, а величина t_{exc} у нас и так получается довольно короткой: $650 - t_{\text{jet}} \approx 300$ лет.

Поясним сказанное. Как видно по тому же рисунку, в процессе пролета спутника внешние области диска RW Aur A сильно деформируются, и по сути дела превращаются в два спиральных рукава, один из которых тянется в сторону спутника, а другой в противоположном направлении. Однако даже при минимальном сближении звезд влияние спутника на самые внутренние области диска А-компонента крайне мало. Следовательно, всплеск аккреционной активности RW Aur A — это реакция не на гравитационное поле спутника, а на изменение физических условий на внешней границе диска, которая проявляется спустя какое-то время t_{exc} .

Но каким образом соответствующая информация приходит от внешних областей диска к внутренним? В расчетах динамики диска RW Aur A под влиянием пролетающего мимо спутника авторы [11] рассматривали только области, удаленные от главной звезды на расстояние свыше 6 а.е. Поскольку нас интересуют гораздо более близкие ее окрестности, мы вынуждены ограничиться соответствующими оценками. Характерное время перестройки радиальной структуры диска RW Aur A (т.н. «вязкое время»)

$$t_{\text{vis}} = \frac{t_k}{2\pi\alpha} \left(\frac{H}{R_d} \right)^{-2}, \quad t_k = 2\pi \left(\frac{R_d^3}{GM} \right)^{1/2} \quad (1)$$

из работы [30]. Здесь $M = 1.4 M_{\odot}$ [31] — масса звезды, $R_d \approx 60$ а.е. [11] — внешний радиус диска до пролета спутника, α и H — параметр Шакуры–Сюняева и полутолщина диска на внешней границе, соответственно. Характерными для дисков CTTS считаются значения $\alpha \sim 0.01$ и $H/R_d \sim 0.1$ [1], откуда следует, что орбитальный период на внешней границе диска («кеплеровское время»)

$t_k \approx 400$ лет, а $t_{\text{vis}} \approx 6 \times 10^5$ лет. Таким образом, возмущения, которые привели к рождению джета, дошли от периферии к внутренним областям диска за время, много меньшее t_{vis} , но сравнимое с кеплеровским временем.

Оценим теперь, за какое время t_{hyd} пройдет диск звуковая волна, «информирующая» внутренние области об изменении давления на внешней границе диска. По оценке [9] температура этой части невозмущенного диска RW Aug A должна быть приблизительно 30 К, а в нашу эпоху температура газа (уже нагретого приливным взаимодействием) — 80 ± 20 К. Поскольку газ внешних областей диска состоит, главным образом, из молекулярного водорода, получаем, что скорость звука V_s в этой области с точностью около 30 % можно принять равной 0.6 км с^{-1} . Следовательно, $t_{\text{hyd}} \sim R_d/V_s \sim 500 \text{ лет}^3$.

Наблюдаемая сейчас разность скоростей спутника и главной звезды составляет порядка нескольких км с^{-1} [3, 32], поэтому относительная скорость звезд при их сближении примерно на порядок превышала величину V_s . Если отсюда следует, что возмущение распространялось по диску со сверхзвуковой скоростью, по крайней мере, в самых внешних его областях, то время t_{exc} вполне согласуется с ограничением, вытекающим из наших наблюдений: $t_{\text{exc}} \lesssim 300$ лет. Однако вопрос о том как пролет спутника повлиял на внутренние области диска RW Aug A этим совпадением не исчерпывается.

5. АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКОЙ КРИВОЙ БЛЕСКА RW Aug

Мы уже упоминали во Введении, что в текущем десятилетии произошло несколько продолжительных и глубоких ослаблений блеска А-компонента, которые, по-видимому, тем или иным образом связаны с перестройкой структуры внутренних областей диска. Чтобы понять, насколько уникальны эти события, рассмотрим историческую кривую блеска RW Aug.

С тех пор как Л. П. Цераская обнаружила переменность блеска этой звезды [33], характер и возможные причины изменения яркости RW Aug на временных интервалах от минут до нескольких лет обсуждались неоднократно (см., например, [12, 14, 16, 34–40] и приведенные там ссылки). Строго

говоря, при этом использовались данные о суммарном блеске главной звезды и спутника, поскольку расстояние между ними меньше $1''5$. Однако раздельная фотометрия компонентов выполненная в работах [10, 41], показала, что до 2010 г. в полосах фильтров B и V спутник был слабее А-компонента на $2^m - 2^m5$, поэтому можно принять, что изменение суммарного блеска отражает поведение главной звезды.

Представленная на рис. 2 историческая кривая блеска построена нами с использованием фотоэлектрических, фотографических и визуальных наблюдений в предположении, что фотографические и визуальные измерения идентичны фотоэлектрическим в полосах B и V , соответственно. Фотоэлектрические данные взяты из базы данных [37], ROTOP [39] и AAVSO [42], а также из работ [12, 43]. Визуальные оценки блеска взяты из базы данных AAVSO, а 3287 фотографических оценок блеска заимствованы из книги [34], причем 2748 из них основаны на измерениях пластинок Harvard College Observatory (USA) Astronomical Plate Stacks, полученных в период JD 2 414 639–2 437 288. Дополнительно мы оценили блеск RW Aug по 166 фотопластинкам из той же коллекции в интервале JD 2 439 801–2 447 862. Нами были изучены пластинки серии DNB, полученные на камере с диаметром объектива 38 мм, которые имеют разрешение $580''/\text{мм}$ и предельную звездную величину около 15^m . Отметим, что историческая кривая блеска, приведенная на рис. 3 работы [38], построена по результатам измерений 150 фотопластинок из той же коллекции. В цифровом виде эти оценки блеска в работе не приведены, но, скорей всего, содержатся в наших, гораздо более многочисленных данных.

Рассмотрим вначале период, предшествующий 2010 г. Из рис. 2 видно, что в это время блеск звезды в течение сезонов менялся без видимой закономерности, хотя имели место отдельные эпизоды продолжительностью порядка нескольких десятков дней, во время которых блеск звезды ослабевал, а затем возвращался к исходному уровню: примеры подобных эпизодов приведены на рис. 3.

По данным только фотоэлектрических измерений, т.е. с начала 60-х годов, средний блеск RW Aug в полосах B и V равен 11^m2 и 10^m5 , соответственно. Амплитуда сезонных вариаций в полосе фильтра V была около 1^m4 , но при этом блеск звезды за всю историю фотоэлектрических наблюдений никогда не падал ниже 11^m8 . Среди почти 10 000 визуальных оценок блеска до 2010 г. более слабые значения (вплоть до $V = 12^m6$) наблюдались лишь в двух десятках случаев, однако часть из этих оценок, скорей всего, занижена, а в остальных случаях время пребывания в состоянии

³Практически одинаковые оценки времен t_k и t_{hyd} получились у нас не случайно. Если записать выражения для шкалы высот α -диска на его внешнем крае в виде $H = V_s t_k / 2\pi$ [30], то оказывается, что $t_k / t_{\text{hyd}} = 2\pi (H/R_d) \sim 1$, поскольку в нашем случае $H/R_d \sim 0.1$.

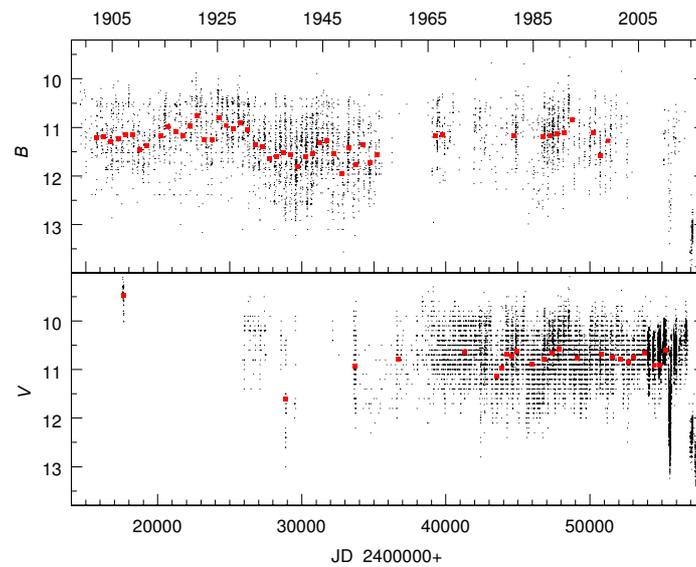


Рис. 2. Историческая кривая блеска RW Aur в полосах пропускания фильтров *B* (верхняя панель) и *V* (нижняя панель). Квадратами показаны средние значения блеска для сезонов (до 2010 г.), в которых имеется свыше 30 измерений.

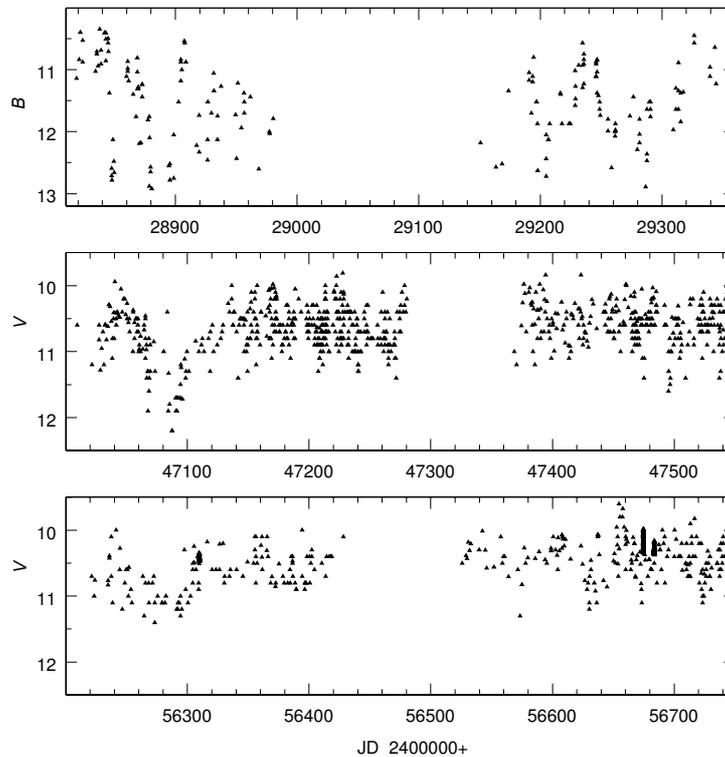


Рис. 3. Избранные участки исторической кривой блеска RW Aur, на которых видны эпизоды ослаблений блеска, происходившие до 2010 г.

с $V > 12^m$, как правило, не превышало нескольких дней (см., например, среднюю панель рис. 3). Сходное поведение, но с еще большей амплитудой переменности, звезда показывала и в полосе фильтра *B*: как видно из верхней панели того же

рисунка, за время порядка месяца блеск звезды в этом диапазоне мог меняться более чем на 2^m5 , что отмечали также в работе [38].

Из рис. 2 также следует, что на протяжении прошлого столетия среднесезонные значения блеска

испытывали волнообразные, аperiodические изменения. Отметим, что понижение среднесезонного уровня блеска в конце 30-х годов до минимального значения, по-видимому, отражает реальные изменения, происходившие со звездой, поскольку минимум наблюдается в полосах B и V . Таким образом, фотометрическое поведение RW Aug в рассматриваемый период на всех временных масштабах было нестационарным и нетривиальным, вероятно из-за того, что переменность блеска обусловлена совместным действием двух факторов: нестационарностью аккреции и экранированием света звезды сравнительно небольшими газо-пылевыми облаками [44].

Однако даже на этом фоне произошедшее в 2010–2011 гг. падение блеска звезды продолжительностью около 200 дней, в ходе которого величина V была слабее 13^m [12], стало весьма экстраординарным событием. А три года спустя произошло еще более масштабное ослабление блеска: оно длилось два года, и в минимуме блеск RW Aug A падал до значений $V \approx 15^m.1$ [13]. Активное изучение звезды в этот период в диапазоне от 5 мкм до 10 кэВ показало, что ослабление блеска А-компонента произошло в результате ее затмения газо-пылевым облаком, удаленном от звезды на расстояние менее 1 а.е. [7, 12, 14–16, 40, 45, 46]. К августу 2016 г. блеск RW Aug вернулся к среднему уровню до 2010 г., но всего через пару месяцев началось новое затмение, которое длится до сих пор (апрель 2017 г.).

Считается, что диск RW Aug A наклонен к лучу зрения под углом $30\text{--}45^\circ$ [9], поэтому вопрос о том, что заставило пыль так высоко подняться и так долго находиться над плоскостью диска, активно обсуждается в вышеуказанных работах. В качестве возможной причины рассматривается усиление «запыленного» ветра из внутренних ($r < 1$ а.е.) областей диска и/или искажение формы (изгиб) этих областей. Однако даже если искажение формы диска связано с наличием близкого маломассивного спутника [7], то возникает вопрос: почему столь глубокие и продолжительные затмения не возникали до 2010 г.?

Тот же вопрос можно сформулировать и по-другому. Каков бы ни был механизм появления крупномасштабных облаков пыли на луче зрения после 2010 г., начало его работы, как и формирование джета, связано с перестройкой внутренних областей диска после пролета спутника мимо RW Aug A. И вопрос тогда звучит так: почему эти два события разделены временным промежутком около 350 лет?

Можно предположить, что масштаб и/или характер процессов, приводящих к появлению пыли на луче зрения, изменился после 2010 г. из-за

того, что до соответствующей области дошла распространяющаяся наружу волна подстройки внешних областей диска к изменившимся условиям на внутренней границе. Если положить $\tau_{\text{vis}} = 350$ лет, то из соотношения (1) следует, что за это время перестройка радиальной структуры диска может произойти вплоть до расстояний приблизительно 0.4 а.е. Любопытно, что примерно на таком расстоянии от RW Aug A, по-видимому, и находится пыль, затмевающая звезду после 2010 г. [15]. Мы не можем сказать, является ли такое совпадение случайным.

6. О ПРИЧИНЕ АСИММЕТРИИ ДЖЕТА RW Aug A

Обсудим вопрос об асимметрии джета RW Aug A, которая проявляется в различии морфологии, физических параметров газа (плотность, температура, степень ионизации) и скорости движения уплотнений синего и красного лепестков. Аналогичное явление наблюдается у джетов CTTS довольно часто, и его причиной, в принципе, может быть асимметрия параметров окружающей среды, либо области, в которой джет формируется (см., например, [47] и приведенные там ссылки). Мельников и др. [20] нашли, что поток массы в красном и синем лепестках джета RW Aug A примерно одинаков (2.6×10^{-9} и $2.0 \times 10^{-9} M_\odot/\text{год}$, соответственно), и на этом основании сделали вывод, что причина асимметрии связана с различием свойств окружающей среды.

Судя по результатам расчетов [11], спутник движется вокруг главной звезды по орбите близкой к параболической, плоскость которой наклонена к плоскости диска ($z = 0$) под углом 18° . Вначале ($t = -\infty$) спутник находился в той области пространства (условно $z > 0$), где находится синий лепесток джета, двигаясь сверху вниз. В какой-то момент спутник пересек плоскость $z = 0$ и достиг периастра, который находился ниже диска. После этого спутник стал удаляться от RW Aug A, вновь пересек плоскость $z = 0$, и сейчас ($t = 0$) находится выше нее. Скорей всего, околозвездный газ над и под плоскостью диска в различной степени испытывал возмущения при пролете спутника. Однако без выполнения соответствующих расчетов трудно сказать, повлияло ли это обстоятельство на распределение вещества *вдоль оси джета* в такой степени, чтобы объяснить наблюдаемую асимметрию его лепестков.

Как мы уже отмечали, уплотнения (пятна) в джетах CTTS возникают из-за того, что в зоне формирования ветра эпизодически происходит значительное увеличение скорости движения газа. По-видимому, такого рода эпизод, который длился

всего несколько суток и сопровождался увеличением блеска звезды на $\Delta B \approx 6^m$, наблюдался у звезды DF Tau A [48]. В последней колонке таблицы 1 мы привели оценку возраста пятен t_d (на 2017 г.). Для 7 пятен момент их рождения попадает в диапазон построенной нами исторической кривой блеска RW Aug, однако вспышки, сопоставимые по масштабу со вспышкой DF Tau A, мы в окрестности этих моментов не обнаружили. Отметим, что и в период возникновения гигантского «пузыря» в джете XZ Tau A [23] никаких особенностей на кривой блеска этой звезды заметить не удалось [49]. Либо вспышки RW Aug A и XZ Tau A были пропущены из-за их малой длительности, либо выбросы высокоскоростного газа у CTTS не всегда сопровождаются вспышками заметной амплитуды, что накладывает ограничения на механизм возникновения выбросов, который до сих пор не известен (см. [1, 24] и приведенные там ссылки).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнив изображения джета RW Aug A, разделенные промежутком времени 21.3 года, мы нашли, что наиболее удаленные от звезды пятна-сгущения возникли приблизительно 350 лет назад. По нашему мнению тогда же возник и сам джет, и началась эпоха интенсивной аккреции на RW Aug A, вызванная перестройкой структуры ее протопланетного диска из-за приливного воздействия спутника RW Aug B.

Движущийся по сильно вытянутой орбите спутник прошел через перицентр 400–450 лет назад, сильно изменив структуру внешних областей диска главной звезды, однако его непосредственное влияние на внутренние области диска, по-видимому, было пренебрежимо малым. Поэтому мы предполагаем, что усиление аккреции — это реакция на кардинальное изменение условий во внешних областях диска, которая последовала после того, как звуковая волна, порожденная этими изменениями, прошла по диску в радиальном направлении.

Весьма вероятно, что различие параметров синего и красного лепестков джета связано с асимметричным распределением околозвездного вещества над диском и под ним, которое возникло в результате приливного воздействия спутника на околозвездный газ.

Наконец, резонно предположить, что глубокие и длительные ослабления блеска, которые наблюдаются у RW Aug A после 2010 г. в результате ее затмения «пылевым экраном», также связаны с перестройкой структуры внутренних ($r < 1$ а.е.) областей диска, первопричина которой — близкий пролет спутника. Однако, пока остается загадкой не только природа этого экрана, но и то, почему

он возник только через 350 лет после начала фазы активной аккреции.

Ответы на поставленные вопросы могут быть получены после расчетов, в которых будет рассмотрено влияние пролета спутника на структуру и динамику внутренних областей диска RW Aug A, а также распределение околозвездного вещества вокруг нее.

В данной работе мы намеренно не сравнивали изображения джета RW Aug A, полученные в разных фильтрах. Такое сравнение, дополненное спектральными данными, предполагается сделать в будущем с целью изучения физических условий в ранее не исследованных областях джета, удаленных от звезды на расстояния свыше $30''$. До сих пор, насколько нам известно, даже не были опубликованы изображения этих областей в фильтрах H_α и $[Fe II] \lambda = 1.64$ мкм, поэтому мы сочли уместным привести их на рис. 1.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность всем сотрудникам ГАИШ, которые выполняют пусконаладочные работы на Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, за возможность провести наблюдения, на которых основано наше исследование. В работе использованы данные наблюдений переменных звезд из Международной базы данных AAVSO, пополняемая наблюдателями по всему миру. В работе использованы данные из базы данных SIMBAD, поддерживаемой CDS, Strasbourg, France. Работа АВД (обработка изображений джета) и САЛ (постановка задачи, интерпретация полученных результатов) поддержана Российским Научным Фондом (грант 17-12-01241). При выполнении работы использовалось оборудование, приобретенное за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Hartmann, G. Herczeg, and N. Calvet, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 135 (2016).
2. A. H. Joy, *Astrophys. J.* **102**, 168 (1945).
3. D. V. Bisikalo, A. V. Dodin, P. V. Kaigorodov, et al., *Astronomy Reports* **56**, 686 (2012).
4. G. Csépany, M. van den Ancker, P. Ábrahám, et al., *arXiv:1702.08583* (2017).
5. J. H. Elias, *Astrophys. J.* **224**, 857 (1978).
6. L. Ingleby, N. Calvet, G. Herczeg, et al., *Astrophys. J.* **767**, 112 (2013).
7. S. Facchini, C. F. Manara, P. C. Schneider, et al., *Astron. and Astrophys.* **596A**, 38 (2016).
8. S. M. Andrews and J. P. Williams, *Astrophys. J.* **631**, 1134 (2005).

9. S. Cabrit, J. Pety, N. Pesenti, and C. Dougados, *Astron. and Astrophys.* **452**, 897 (2006).
10. R. J. White and A. M. Ghez, *Astrophys. J.* **556**, 265 (2001).
11. F. Dai, S. Facchini, C. J. Clarke, and T. J. Haworth, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 1996 (2015).
12. J. E. Rodriguez, J. Pepper, K.G. Stassun, et al., *Astron. J.* **146**, 112 (2103).
13. S. Lamzin, D. Cheryasov, G. Chuntunov, et al., *ASP Conf. Ser.* **510** (2017, in press).
14. P. P. Petrov, G. F. Gahm, A. A. Djupvik, et al., *Astron. and Astrophys.* **577**, A73 (2015).
15. V. I. Shenavrin, P. P. Petrov, and K. N. Grankin, *Inform. Bull. Var. Stars* **6143**, 1 (2015).
16. I. Bozhinova, A. Scholz, G. Costigan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463**, 4459 (2016).
17. P. P. Petrov, G. F. Gahm, J. F. Gameiro, et al., *Astron. and Astrophys.* **369**, 993 (2001).
18. S. H. P. Alencar, G. Basri, L. Hartmann, and N. Calvet, *Astron. and Astrophys.* **440**, 595 (2005).
19. G. A. Hirth, R. Mundt, J. Soli, and T. P. Ray, *Astrophys. J.* **427**, L99 (1994).
20. S. Yu. Melnikov, J. Eisloffel, F. Bacciotti, et al., *Astron. and Astrophys.* **506**, 763 (2009).
21. B. Reipurth, 1999, A general catalogue of Herbig-Haro objects, Second edition, <http://casa.colorado.edu/hhcat>
22. L. López-Martin, S. Cabrit, and C. Dougados, *Astron. and Astrophys.* **405**, L1 (2003).
23. J. E. Krist, K. R. Stapelfeldt, J. J. Hester, et al., *Astron. J.* **136**, 1980 (2008).
24. A. Frank, T. P. Ray, S. Cabrit, et al., in *Proc. of Protostars and Planets VI Conf.*, Ed. by H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, and T. Henning (University of Arizona Press, Tucson, 2014), p. 451.
25. D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, et al., *Astron. J.* **125**, 984 (2003).
26. A. E. Nadzhip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* (2017, in press).
27. R. Mundt and J. Eisloffel, *Astron. J.* **116**, 860 (1998).
28. C. Dougados, S. Cabrit, C. Lavalley, and F. Ménard, *Astron. and Astrophys.* **346**, 260 (2000).
29. J. Woitas, T. P. Ray, F. Bacciotti, et al., *Astrophys. J.* **580**, 336 (2002).
30. П. К. Аболмасов, В. В. Журавлев, А. Ю. Кочеткова и др., *Аккреционные процессы в астрофизике*, под ред. Н. И. Шакуры (ФИЗМАТЛИТ, Москва, 2016).
31. J. Woitas, C. Leinert, and R. Köhler, *Astron. and Astrophys.* **376**, 982 (2001).
32. R. J. White and L. A. Hillenbrand, *Astrophys. J.* **616**, 998 (2004).
33. W. Ceraski, *Astronomische Nachrichten* **170**, 339 (1906).
34. В. П. Цесевич и В. А. Драгомирецкая, *Звезды тунна RW Aur* (Наукова Думка, Киев, 1973).
35. P. P. Chugainov and M. N. Lovkaaya, *Izv. Krym. Astrofiz. Obs.* **78**, 52 (1988).
36. P. P. Chugainov, *VeSon*. **10**, 442 (1990).
37. W. Herbst, D. K. Herbst, E. J. Grossman, and D. Weinstein, *Astron. J.* **108**, 1906 (1994).
38. T. L. Beck and M. Simon, *Astron. J.* **122**, 413 (2001).
39. K. Grankin, S. Melnikov, J. Bouvier, et al., *Astron. and Astrophys.* **461**, 183 (2007).
40. J. E. Rodriguez, P. A. Reed, R. J. Siverd, et al., *Astron. J.* **151**, 29 (2016).
41. S. Antipin, A. Belinski, A. Cherepashchuk, et al., *Inform. Bull. Var. Stars* **6126** (2015).
42. S. Kafka, 2015, *Observations from the AAVSO International Database*. <http://www.aavso.org>
43. E. V. Babina, S. A. Artemenko, P. P. Petrov, and K. N. Grankin, *Bull. CrAO* **109**, 59 (2013).
44. P. P. Petrov and B. S. Kozack, *Astronomy Reports* **51**, 500 (2007).
45. P. C. Schneider, H. M. Günther, J. Robrade, et al., *Astron. and Astrophys.* **584**, L9 (2015).
46. M. Takami, Y.-J. Wei, M.-Y. Chou, et al., *Astrophys. J.* **820**, 139 (2016).
47. M. C. White, G. V. Bicknell, P. J. McGregor, and R. Salmeron, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442**, 28 (2014).
48. J. Z. Li, W. H. Ip, W. P. Chen, et al., *Astrophys. J.* **549**, L89 (2001).
49. A. V. Dodin, N. V. Emelyanov, A. V. Zharova, et al., *Astronomy Letters* **42**, 29 (2016).

On the Jet of a Young Star RW Aur A and Related Problems**L.N. Berdnikov, M.A. Burlak, O.V. Vozyakova, A.V. Dodin, S.A. Lamzin and A.M. Tatarnikov**

Having compared images of a jet of the young star RW Aur A obtained with an interval of 21.3 yr, we have found that the outermost knots of the jet have emerged approximately 350 years ago. We come up with arguments that the jet itself has appeared at the same time, and intensive accretion onto the star has begun due to rearrangement of its protoplanetary disk structure caused by the tidal effect of the companion RW Aur B. More precisely suppose that intensification of accretion is a response to changing conditions in the outer-disk regions which has followed after the sound wave, generated by these changes, has passed the disk in the radial direction. In our opinion difference in the parameters of blue and red lobes of the RW Aur A jet is a result of the asymmetric distribution of the circumstellar matter above and below the disk due to companion's passage. It was found from the analysis of the RW Aur historical light curve that deep and long-term ($\Delta t > 150$ days) light attenuations of RW Aur A observed after 2010 had no precedents in the previous 110 years. We also associate the change in the character of photometric variability of the star with the rearrangement of the structure of inner ($r < 1$ AU) regions of its protoplanetary disk, and discuss why these changes have begun only 350 years after the beginning of the active accretion phase.

Keywords: *stars: variables: TTauri, Herbig Ae/Be—stars: individual: RW Aur—binaries: visual—ISM: jets and outflows—accretion, accretion discs*