

ПОКАЗАТЕЛИ ЦВЕТА ЗВЕЗД ТИПА Т ТЕЛЬЦА В МОДЕЛЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ОКОЛОЗВЕЗДНОЙ ЭКСТИНКЦИИ

© 2021 г. Д. В. Дмитриев^{1,2*}, В. П. Гринин¹, О. Ю. Барсунова¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

Поступила в редакцию 25.10.2020 г.

После доработки 24.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Рассматриваются модели переменной околозвездной экстинкции применительно к звездам типа Т Тельца. В отличие от более горячих звезд типа UX Ori, для которых применимы упрощенные модели затмений: звезда считается точечным источником света, а экранирующие звезду околозвездные пылевые облака предполагаются однородными. В рассматриваемом в статье случае оба эти упрощения могут не работать. При аккреции на звездах типа Т Тельца образуются горячие аккреционные пятна, а пылевые структуры, экранирующие звезду от наблюдателя, могут быть неоднородными в пределах диска звезды. С учетом этих двух факторов рассчитаны семейства диаграмм цвет–величина. Показано, что в таких моделях форма цветовых треков на диаграммах может сильно отличаться от цветовых треков, рассчитанных в моделях затмений горячих звезд типа UX Ori. Полученные результаты могут быть применимы к звездам типа AA Tau, демонстрирующим затмения внутренними областями околозвездных дисков.

Ключевые слова: звезды типа Т Тельца, аккреционные пятна, переменная околозвездная экстинкция.

DOI: 10.31857/S0320010821010034

ВВЕДЕНИЕ

Переменная околозвездная экстинкция является одним из основных механизмов фотометрической активности молодых звезд (см., например, Хербст и др., 1994, и цитируемую там литературу). В наиболее яркой форме этот вид оптической переменности наблюдается у звезд типа UX Ori, демонстрирующих сильные спорадические ослабления блеска на 2–3 звездные величины. Такие события продолжаются в среднем от нескольких дней до нескольких недель и сопровождаются сильным увеличением линейной поляризации звезд (Гринин и др., 1991). Причиной бурной фотометрической активности звезд этого типа является небольшой наклон околозвездных дисков относительно направления на наблюдателя¹. В результате излучение звезды на пути к наблюдателю проходит сквозь неоднородную атмосферу протопланетного диска и

поглощается в ней, тогда как причиной поляриметрической переменности звезды является рассеянный свет протопланетного диска. Из-за малых угловых размеров дисков наблюдатель регистрирует суммарное излучение звезды и окружающего ее диска. При этом вклад диска в наблюдаемое излучение растет во время затмений по мере ослабления прямого (неполяризованного) излучения звезды. Во время глубоких минимумов, когда прямое излучение звезды заблокировано от наблюдателя газопылевым облаком (экраном), оптический блеск системы “звезда + диск” полностью определяется рассеянным излучением диска. Это обстоятельство позволило понять, почему амплитуды минимумов звезд типа UX Ori ограничены 2–3 звездными величинами: именно таков вклад рассеянного излучения типичного протопланетного диска в оптическое излучение звезды — около 10% в ее ярком состоянии (Гринин, 1988). Одновременно с увеличением линейной поляризации в глубоких минимумах блеска наблюдается еще один интересный эффект. Это так называемый эффект поголубения (blueing effect). Его впервые наблюдали в 1968 г. Гетц и Венцель у CQ Tau (Венцель, 1969). Дальнейшие наблюдения показали, что этот эффект является характерной особенностью поведения показателей цвета звезд типа UX Ori (см., например, Зайцева,

* Электронный адрес: dmitrievdv242@gmail.com

¹ Известны случаи, когда внутренняя и внешняя области дисков имеют разные наклоны. Например, по данным интерферометрии в субмиллиметровом диапазоне околозвездный диск CQ Tau имеет угол наклона $i \approx 37^\circ$ (Пинилла и др., 2018), тогда как по данным интерферометрии на Кеке (в ближней ИК-области спектра) внутренний диск наклонен под углом $i \approx 48^\circ$ (Эйснер и др., 2004).

1973, 1986; Пугач, 1981; Хербст и др., 1983; Бибо, Тэ, 1990). На диаграммах цвет—величина звезда сначала краснеет, затем цветовой трек (при продолжающемся ослаблении звезды) поворачивается в противоположном направлении. Покраснение звезды в рамках модели переменной околозвездной экстинкции объясняется селективным поглощением ее излучения в газопылевом фрагменте диска, пересекающем луч зрения. Этот участок цветowych треков используется для определения закона покраснения и оптических свойств околозвездной пыли (см., например, Пугач, 2004; Натта, Уитни, 2000).

Эффект поглубления, как и рост линейной поляризации, объясняется усилением вклада рассеянного света протопланетного диска во время минимумов (Гринин, 1988). Такая модель хорошо описывает большинство фотополариметрических наблюдений звезд типа UX Ori (см., например, Ростопчина и др., 1997; Шаховской и др., 2003; Натта, Уитни, 2000). Исключения составляют редкие продолжительные затмения, во время которых наблюдалось аномальное поведение позиционного угла поляризации (Гринин и др., 1988, 1994). Модель таких затмений была недавно рассмотрена в статье Шульмана и Гринина (2019). Было показано, что наблюдавшиеся аномалии были вызваны изменениями параметров собственной поляризации рассеянного излучения околозвездных дисков во время обширных минимумов.

Во всех ранних моделях затмений звезды типа UX Ori рассматривались как точечные источники излучения. Такое упрощение было оправдано тем, что семейство этих звезд состояло в основном из горячих звезд типа Ae Хербига, светимость которых порядка нескольких десятков светимостей Солнца. Зона испарения пыли в окрестностях таких звезд (определяющая внутреннюю границу пылевого диска), находится на расстоянии порядка $R_{in} \approx 0.5$ а.е. от звезды. Флуктуации плотности в этой зоне считаются одним из потенциальных источников переменной околозвездной экстинкции и имеют характерный пространственный масштаб δH порядка $0.1R_{in}$ (Дуллемон и др., 2003). Это примерно в 4–5 раз больше радиуса типичной Ae звезды Хербига, что и позволяет рассматривать звезду в момент затмения как точечный источник света. В последние годы семейство звезд типа UX Ori заметно пополнилось за счет более холодных молодых звезд типа Т Тельца (см., например, ДеВарф и др., 2003; Бувье и др., 2013; Родригес и др., 2013; Барсунова и др., 2013; Петров и др., 2015; Фачини и др., 2016; Додин и др., 2019). Появились так называемые дипперсы (dippers) — объекты, демонстрирующие переменность типа UX Ori, но с небольшой амплитудой и продолжительностью затмений (см., например, Аленкар и др., 2010;

Сицилия-Агилер и др., 2020; Анселл и др., 2020; Бредалл и др., 2020). Их светимости порядка или меньше светимости Солнца. В этих условиях пыль в протопланетных дисках может сохраняться вплоть до расстояний порядка нескольких радиусов звезды и даже проникать внутрь магнитосферы (Нагель, Бувье, 2020). По этой причине звезду в моменты затмений уже нельзя рассматривать как точечный источник света. Нужно учитывать ее конечные размеры, а также неоднородную структуру экранирующей звезду пылевых облаков. Кроме того, при интенсивной аккреции газа на звездах типа Т Тельца образуются горячие аккреционные пятна, светимость которых нестабильна и в синей области спектра может быть сравнима со светимостью самой звезды (см., например, обзор Петрова, 2003)². Другая особенность звезд типа Т Тельца, вызванная близостью пылевого диска к звезде, состоит в том, что в этих условиях более важную роль в создании спорадических затмений может играть неоднородный дисковый ветер, поднимающий мелкую пыль с поверхности диска (Тамбовцева и Гринин, 2008). Возможность такой интерпретации ослаблений блеска звезд типа Т Тельца обсуждалась в ряде работ (Гринин и др., 2009; Петров и др., 2015; Шенаврн и др., 2015; Додин и др., 2019). Очевидно, что близость околозвездной пыли к холодной молодой звезде делает модель переменной околозвездной экстинкции менее чувствительной к углу наклона диска относительно наблюдателя по сравнению с горячими звездами типа UX Ori. Указанные выше особенности околозвездной активности холодных молодых звезд могут сильно усложнить поведение показателей цвета во время затмений. Ниже мы рассмотрим на примере простых моделей поведение цветowych треков таких звезд на диаграммах цвет—величина.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 показана схематическая картина затмения: звезду закрывает от наблюдателя возмущение пылевого диска, ось вращения которого совпадает с осью вращения звезды. На звезде существуют горячие аккреционные пятна (показанные на рисунке более темными областями). Пунктирными линиями показана магнитосфера, газ в которой не учитывается при расчете показателей цвета, так как он прозрачен в континууме. Магнитосфера предполагается дипольной. Ее ось совпадает с осью вращения звезды.

² У холодных звезд типа Т Тельца может наблюдаться также вращательная модуляция блеска, вызванная наличием холодных (магнитных) пятен на их поверхности. Амплитуда такой модуляции, как правило, невелика (Хербст и др., 1994). Поэтому ее влияние на показатели цвета во время затмений звезд мы не рассматриваем.

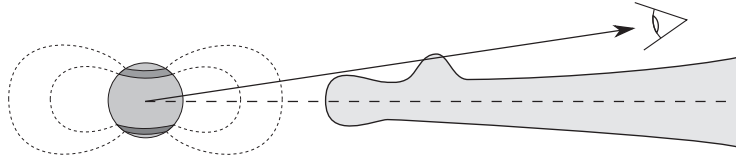


Рис. 1. Схематическая картина затмения.

Для расчетов принята декартова система координат, в которой ось Z совпадает с лучом зрения. Оси X и Y повернуты так, чтобы ось вращения звезды (она же ось диполя магнитосферы) лежала в плоскости YZ , и чтобы наблюдатель смотрел на звезду сверху, как показано на рис. 1. Параметры магнитосферы, формирующей аккреционный поток газа и образующей в ее полярных областях горячие области в виде колец, приняты такими же, как в статьях Хартманна и др. (1994) и Муцеролле и др. (2001). Рассмотрены две модели магнитосферы (табл. 1):

Модель 1: внутренний и внешний радиусы магнитосферы в плоскости околос звездного диска имеют значения $r_{\text{mi}} = 2.0R_*$, $r_{\text{mo}} = 3.0R_*$.

Модель 2: $r_{\text{mi}} = 4.0R_*$ и $r_{\text{mo}} = 6.0R_*$.

Эти параметры определяют размеры и положение аккреционных колец на поверхности звезды. Их температура и светимость зависят от параметров магнитосферы, темпа аккреции \dot{M} , а также от массы и радиуса звезды, и определяются, как и в статье Хартманна и др. (1994), соотношениями

$$L_a = \frac{GM_*\dot{M}}{R_*} \left(1 - \frac{2R_*}{r_{\text{mo}} + r_{\text{mi}}}\right), \quad (1)$$

$$T_r^4 = \frac{L_a}{4\pi\sigma R_*^2} (\cos\theta_i - \cos\theta_o)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь T_r и L_a — температура и светимость аккреционных колец, σ — постоянная излучения. Углы θ_o и θ_i определяют широту верхней и нижней границ аккреционного кольца на поверхности звезды и находятся из соотношения $\sin^2\theta = R_*/r_m$ при $r_m = r_{\text{mo}}$ и r_{mi} .

Таблица 1. Параметры моделей

Модель	\dot{M} [$M_\odot/\text{год}$]	r_{mi} [R_*]	r_{mo} [R_*]
1a	10^{-8}	2	3
1b	10^{-7}	2	3
2a	10^{-8}	4	6
2b	10^{-7}	4	6

При расчетах были приняты следующие значения параметров: $M_* = 1 M_\odot$, $R_* = 2 R_\odot$. Предполагалось, что: 1) затмение происходит при движении пылевого облака (экрана) вверх от плоскости диска параллельно оси Y , совпадающей с проекцией оси вращения звезды на картинную плоскость (рис. 2); 2) оптические свойства пылевых частиц в облаке одинаковы и близки к оптическим свойствам межзвездной пыли ($\tau_\lambda \propto \lambda^{-1}$); 3) в облаке существует градиент плотности пыли вдоль оси Y , в результате чего его оптическая толщина τ является функцией y . Ниже принято:

$$\tau_\lambda(y) = \begin{cases} \tau_\lambda^{(0)} \exp(-(y_0 - y)^2/h^2), & y \geq y_0, \\ \tau_\lambda^{(0)}, & y < y_0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\tau_\lambda^{(0)}$ — оптическая толщина экрана на длине волны λ при $y = y_0$, величины y , y_0 и h выражены в единицах радиуса звезды. Параметр h определяет градиент непрозрачности экрана. Положение экрана относительно центра звезды задает параметр y_0 . При $h \ll 1$ и $\tau_\lambda^{(0)} \gg 1$ экран имеет резкую границу в пределах диска звезды. Поэтому, независимо от сорта и размера частиц в облаке, его перемещение по диску вызывает нейтральное ослабление излучения, при котором цвет звезды остается неизменным во время затмения. Напротив, при $h \gg 1$ изменение оптической толщины экрана в масштабе диска звезды незначительно, и этот предельный случай соответствует приближению, в котором звезда может рассматриваться как точечный источник излучения.

Заметим, что близкая по своим характеристикам модель неоднородного пылевого экрана использована в статье Гринина и др. (2019) при исследовании затмений молодых звезд типа WTTS (weak line T Tauri star), характеризующихся низким темпом аккреции. В указанной выше статье при моделировании затмений учитывался эффект покраснения звезды от центра к краю. Расчеты показали, что влияние этого эффекта на положение и форму цветовых треков на диаграммах цвет-величина незначительно. Поэтому ниже модельные расчеты выполнены без учета этого тонкого эффекта.

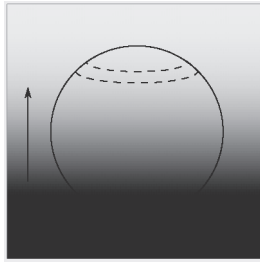


Рис. 2. Схематичное изображение звезды с аккреционным кольцом (его границы обозначены пунктиром), затмеваемой экраном с $h = 1$. Наклон оси вращения звезды $i = 80^\circ$. Следует отметить, что при таком наклоне теоретически должны быть видны оба аккреционных пятна, вблизи двух полюсов звезды, однако в рассматриваемом случае пятно в нижней полусфере звезды закрыто экраном. Стрелкой показано направление оси y .

Таким образом, интенсивность излучения системы “звезда + диск”, регистрируемого наблюдателем, определяется интегралом по диску звезды с учетом расположения на нем горячих аккреционных областей и с учетом рассеянного излучения:

$$I_{\text{obs}}(\lambda) = \iint (I_{\star}(\lambda, x, y) + I_{\text{spot}}(\lambda, x, y))e^{-\tau_{\lambda}(y)} dx dy + I_{\text{sc}}(\lambda), \quad (4)$$

где I_{sc} — интенсивность рассеянного излучения диска, I_{spot} — интенсивность излучения аккреционного кольца, I_{\star} — интенсивность излучения звезды. При интегрировании I_{spot} и I_{\star} равны нулю, если точка (x, y) на диске звезды не попадает на аккреционное пятно или на фотосферу звезды соответственно.

При расчетах принято, что распределение энергии в спектре звезды описывается функцией Планка при эффективной температуре атмосферы $T_{\text{eff}} = 3500$ К. Функцией Планка описывается также и спектр излучения аккреционной области на поверхности звезды. Ее температура T_r зависит от темпа аккреции \dot{M} и размеров области. Последние, в свою очередь, зависят от радиуса звезды и интервала широт на ее поверхности, в который падает на звезду аккрецирующий газ при движении вдоль силовых линий дипольного магнитного поля (см. выше). Мы учитывали также, что эффективная площадь этой области зависит от угла наклона i оси вращения звезды относительно направления на наблюдателя. Заметим, что при $i < 30-40^\circ$ звезда экранирует большую часть горячей области, расположенной в нижнем полушарии. При $i \geq 70^\circ$, характерных для звезд типа UX Ori, эта область также может быть закрыта от наблюдателя, но уже ее собственным околозвездным диском.

Рассеянное излучение диска I_{sc} предполагается постоянным в процессе затмения. За исключением

продолжительных затмений, вызванных экранированием звезды крупномасштабными возмущениями в диске, это предположение хорошо согласуется с наблюдаемыми изменениями степени линейной поляризации звезд типа UX Ori (Гринин и др., 1991). Его вклад в оптическое излучение звезд типа UX Ori вне затмений составляет, как отмечалось во Введении, в среднем около 10%. В рассматриваемом здесь случае излучение звезды включает также излучение аккреционных колец. Поэтому интенсивность рассеянного излучения может быть представлена в виде: $I_{\text{sc}} = a_{\lambda}(I_{\star} + I_{\text{spot}})$, где коэффициент a_{λ} определяется оптическими свойствами околозвездной пыли. Согласно расчетам Вошинникова и др. (1995) для звезды UX Ori, параметр a_{λ} , согласующийся с результатами фотополариметрических наблюдений, меняется примерно от 0.22 до 0.07 при переходе от синей части оптического спектра (полоса U) к красной (полоса I). Такая зависимость коэффициента a_{λ} от длины волны принята ниже при вычислении $I_{\text{obs}}(\lambda)$. (Заметим, что она не является универсальной, поскольку зависит от параметров диска и оптических характеристик околозвездной пыли. Кроме того, при продолжительных затмениях, вызванных протяженными пылевыми облаками, на околозвездном диске могут появляться движущиеся тени. Они влияют на интенсивность и параметры поляризации рассеянного излучения. Такие эффекты уже наблюдались с помощью телескопа-интерферометра VLTI (Столкер и др., 2017) и рассмотрены недавно в статье Шульмана и Гринина, 2019). Вычисление интенсивности излучения, регистрируемого в полосах фотометрической системы Джонсона, выполнялось путем умножения интенсивности излучения на длине волны, соответствующей максимуму полосы пропускания, на эффективную ширину этой полосы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 показаны теоретические зависимости показателей цвета $U - B$, $B - V$ и $V - I$ от амплитуды ослабления блеска ΔV при затмении в Модели 1a. Диск наклонен под углом 10° к лучу зрения ($i = 80^\circ$). Цифры рядом с теоретическими линиями указывают значения параметра h , определяющего градиент непрозрачности пылевого экрана. Темп аккреции принят равным $10^{-8} M_{\odot}$ в год. Расчеты показали, что при таком темпе аккреции и принятых в Модели 1 размерах магнитосферы влияние аккреционной области на показатели цвета звезды с эффективной температурой 3500 К незначительно. Однако, если мы изменим параметры магнитосферы и уменьшим размеры аккреционных колец (Модель 2b), то это приведет к увеличению их температуры. В результате при том же темпе

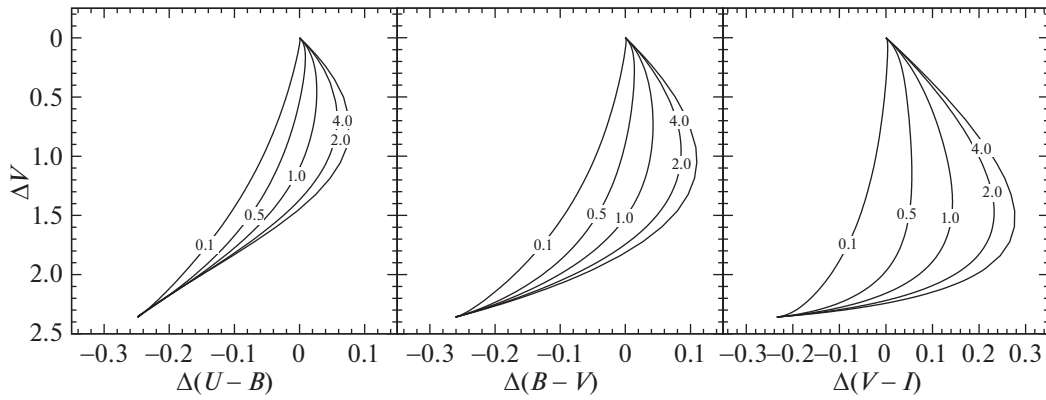


Рис. 3. Диаграммы цвет–величина для модели 1 с темпом аккреции $10^{-8} M_{\odot}$ при $i = 80^{\circ}$ (Модель 1а). Цифры на графиках указывают значения параметра h . Диаграммы нормированы так, что показатели цвета вне затмения равны нулю.

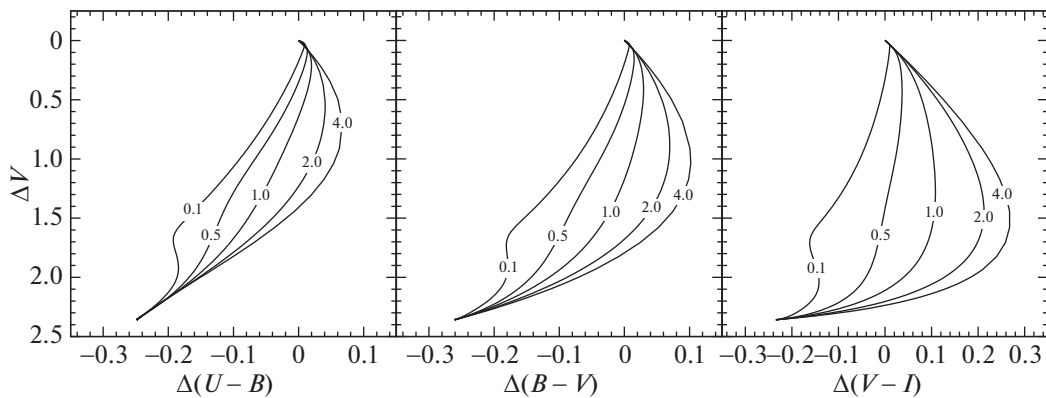


Рис. 4. Диаграммы цвет–величина для модели 2 с темпом аккреции $10^{-8} M_{\odot}$ при $i = 80^{\circ}$ Модель 2а. Параметр h принимает такие же значения, что и на рис. 3.

аккреции $10^{-8} M_{\odot}$ в год влияние аккреционной области на диаграммы цвет–величина будет более существенным (рис. 4).

Поскольку закон экстинкции в пылевом экране во всех моделях одинаков, все различия в поведении цветовых треков на рис. 3 обусловлены одной причиной — градиентом непрозрачности экрана. В моделях с большим градиентом непрозрачности ($h \leq 0.1$) показатели цвета в начальной фазе затмения почти не меняются при падении блеска звезды, и фаза покраснения на этом этапе практически отсутствует. В другом предельном случае ($h \geq 3$) оптическая толщина экрана в пределах диска звезды изменяется незначительно. Этому случаю соответствует “стандартная” форма цветового трека звезды типа UX Ori с начальным покраснением (в нашем случае оно соответствует закону межзвездного покраснения) и последующим поворотом в коротковолновую сторону из-за увеличения вклада рассеянного излучения.

На рис. 5 показаны диаграммы цвет–величина для Модели 1b при темпе аккреции в десять раз

больше, чем в Модели 1а. Видно, что увеличение потока излучения от горячей аккреционной области на звезде, вызванное увеличением темпа аккреции, приводит к значительным изменениям формы цветовых треков. В моделях с резким краем экрана ($h \leq 0.4$) цвет звезды становится более голубым почти сразу, после короткой фазы покраснения. При этом покраснение вызвано не только селективным поглощением в пылевом экране, но и экранированием аккреционной области, расположенной на нижней полусфере звезды. (При движении экрана вверх эта область закрывается в самом начале затмения). Напротив, в моделях с небольшим градиентом непрозрачности в пределах диска звезды ($h > 3$) существование горячей аккреционной области на звезде практически не влияет на форму цветовых треков, и они имеют такой же вид, как и в моделях без аккреционного пятна.

Следует подчеркнуть, что влияние горячей аккреционной области на показатели цвета звезды во время затмений зависит от контраста излучения этой области на фоне излучения звезды. Последний зависит не только от темпа аккреции, но также и

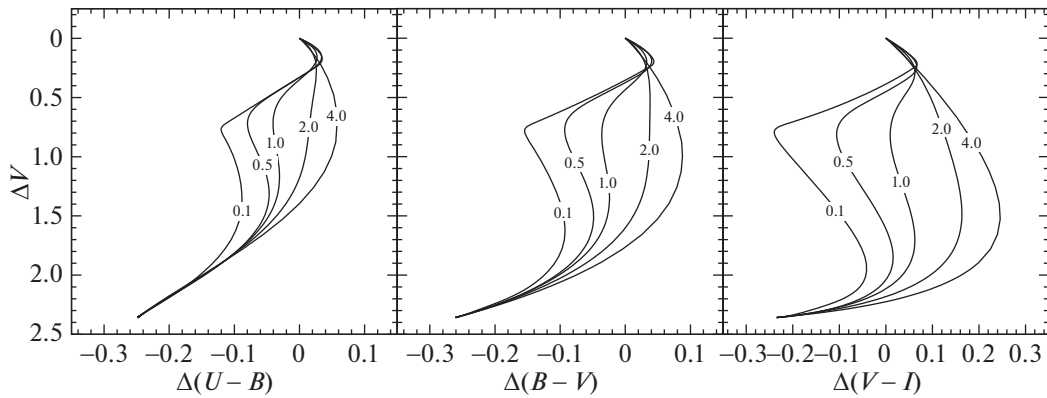


Рис. 5. То же самое, что и на рис. 3, но при темпе аккреции $10^{-7} M_{\odot}$ в год (Модель 1b).

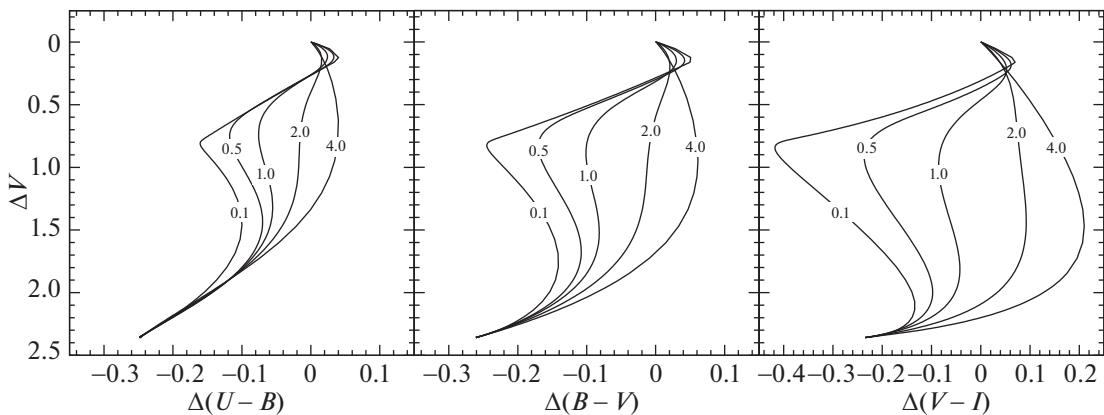


Рис. 6. Диаграммы цвет–величина в модели 2b. Цифры на графиках характеризуют неоднородность пылевого экрана (см. текст).

от эффективной температуры самой звезды. Чем ниже $T_{\text{эфф}}$, тем меньше темп аккреции, при котором влияние аккреционной области на форму цветовых треков становится существенным. Расчеты показали, что при $T_{\text{эфф}} \leq 3000$ К влияние горячей области на цветовые треки становится заметным уже при $\dot{M} = 10^{-9} M_{\odot}$ в год.

Как отмечалось выше, эффективный размер магнитосферы зависит от расстояния, на котором магнитное поле звезды начинает контролировать движение газа в аккреционном диске и направлять его вдоль магнитных силовых линий к звезде. По этой причине положение горячей аккреционной области на поверхности звезды зависит от параметров магнитосферы. Чем больше ее радиус, тем ближе к полюсам магнитного диполя располагаются эти области. Цветовые треки, представленные на рис. 6, соответствуют Модели 2b, в которой радиус магнитосферы вдвое больше, чем в Модели 1b. Остальные параметры в обоих моделях одинаковы. Из сравнения рис. 5 и 6 видно, что в Модели 2b влияние горячей области на цветовые

треки сказывается сильнее, чем в Модели 1b, хотя темп аккреции в обоих случаях одинаков.

Во всех рассмотренных выше случаях направление сканирования диска звезды неоднородным экраном происходит в направлении, параллельном оси вращения звезды. В этом случае влияние аккреционных областей на показатели цвета звезды во время затмений максимально. Расчеты показали, что в другом предельном случае, когда пылевой экран неоднороден в направлении оси X и перемещается перпендикулярно оси вращения звезды, излучение горячих аккреционных колец сказывается на цветовых треках в значительно меньшей степени, что следует из принятой здесь геометрии магнитосферы и аккреционных областей. Разумеется, при более сложном расположении аккреционных областей на поверхности звезды поведение цветовых треков при затмениях будет отличаться от рассчитанных в нашей идеализированной модели. Из рис. 7 видно, что они мало чем отличаются от цветовых треков в Модели 1a с темпом аккреции $10^{-8} M_{\odot}$ в год (рис. 3). Таким образом, обсуждаемый эффект зависит не только от градиента непрозрачности в экранирующем звезду облаке,

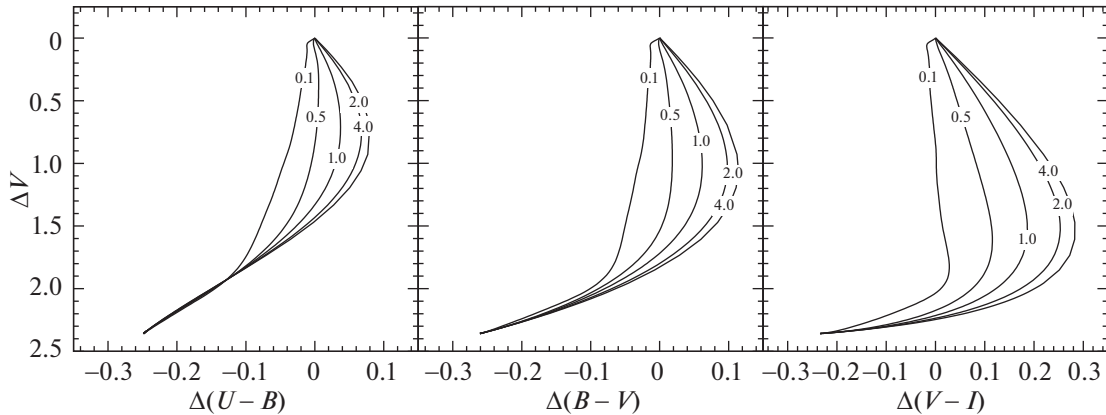


Рис. 7. Диаграммы цвет–величина в Модели 1b при горизонтальном транзите экрана (см. текст).

но также и от направления движения экрана относительно плоскости околозвездного диска, что вполне естественно.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты моделирования показывают, что влияние горячих аккреционных колец вблизи магнитных полюсов может сильно исказить форму цветовых треков звезд типа Т Тельца во время затмений. Искажения возникают в тех случаях, когда затмевающая звезду газопылевое облако имеет значительный градиент непрозрачности в пределах диска звезды в проекции на ось ее вращения. Влияние этого эффекта тем сильнее, чем больше темп аккреции и чем ниже температура звезды. При $T_{\text{эф}} = 3500$ К аккреционные области слабо влияют на форму цветовых треков при $\dot{M} < 10^{-8} M_{\odot}$ в год. При $T_{\text{эф}} = 3000$ К порог чувствительности цветовых треков к излучению аккреционных колец снижается до $\dot{M} \approx 10^{-9} M_{\odot}$ в год. Однако даже в отсутствие аккреционных пятен диаграммы цвет–величина могут быть сильно искажены из-за градиента плотности пыли в экранирующем звезду облаке (рис. 3) по сравнению со “стандартной” моделью затмений, в которой звезда рассматривается как точечный источник света.

Следует отметить, что рассмотренная в статье модель азимутально однородных аккреционных колец соответствует идеальному случаю стационарной аккреции на звезду с дипольным магнитным полем. В режиме нестационарной аккреции излучение аккреционных областей становится нестабильным (см., например, Кулкарни, Романова, 2009). Сильные вариации излучения аккреционных пятен могут быть также вызваны наклоном магнитосферы относительно оси вращения звезды (Бувье и др., 2003; Романова и др., 2004; Аленкар и др., 2010).

Примером звезды, фотометрическая активность которой обусловлена действием двух факторов —

аккреционными пятнами и изменениями околозвездной экстинкции, — является звезда типа Т Тельца AA Tau (Бувье и др., 1999, 2003, 2013). На ее диаграммах цвет–величина хорошо видны разброс точек вблизи яркого состояния звезды и их смещение в синюю область при понижении блеска (см. рис. 3 в статье Бувье и др., 2003, и статью МакГиннис и др., 2015). Из рис. 4–6 следует, что именно таким должно быть поведение показателей цвета звезды во время затмений неоднородным экраном: звезда уже частично закрыта, тогда как горячее аккреционное кольцо в ее верхней полусфере еще светит.

В качестве примера на рис. 8 показана диаграмма “цвет–величина” ($R - I$), I звезды типа AA Tau V695 Peg, основанная на наблюдениях Барсуновой

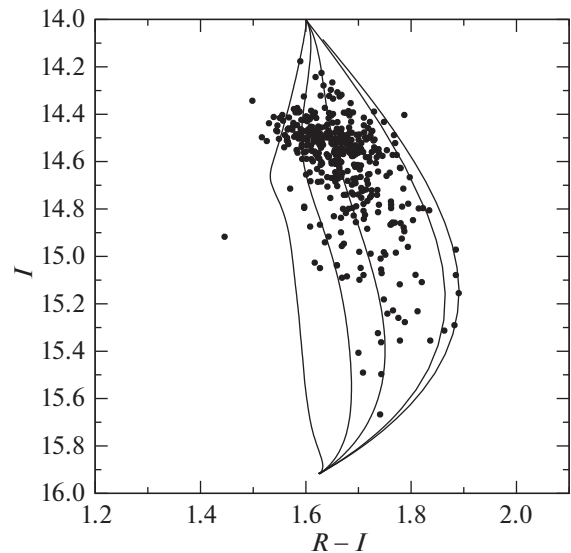


Рис. 8. Диаграмма цвет–величина для звезды типа AA Tau V695 Peg по данным Барсуновой и др. (2013) с наложенными на нее модельными треками с параметром h , равным от левого трека к правому 0.1, 0.5, 1.0, 4, 10 (см. текст).

и др. (2013), дополненных данными последних наблюдательных сезонов. Наряду с периодическими затмениями с периодом $P = 7^d6$ эта звезда демонстрирует ослабления блеска с амплитудой до 1^m3 в полосе I . Из рис. 8 видно, что показатель цвета $R - I$ демонстрирует заметный разброс точек на диаграмме цвет—величина, который может быть описан семейством модельных цветовых треков при темпе аккреции $5 \times 10^{-9} M_{\odot}$ в год и с углом наклона $i = 50^{\circ}$. Внутренний и внешний радиусы магнитосферы в этой модели равны $3.5 R_*$ и $4 R_*$ соответственно.

Причиной затмений звезд типа AA Тау является наклон внутренней области околозвездного диска, вызванный наклоном магнитосферы относительно оси вращения звезды³. В результате звезда экранируется от наблюдателя собственным околозвездным диском, точнее его деформированной (warped) областью (Бувье и др., 1999). Размеры этой области сравнительно невелики: порядка 5–10 радиусов звезды. Поэтому во время затмений возможен сильный градиент плотности пыли в проекции на диск звезды в вертикальном направлении, т.е. так, как это принято в рассмотренных выше моделях.

Согласно Аленкар и др. (2010), переменные типа AA Тау составляют заметную часть семейства классических звезд типа Т Тельца. Как мы убедились выше, в процессе затмений этих звезд веществом их околозвездных дисков возможны сильные отклонения цветовых треков на диаграммах “цвет—величина” от “стандартного” вида, соответствующего затмениям однородным экраном ($h \gg 1$). При этом все треки на рис. 5–6, соответствующие значениям параметра h порядка или меньших единицы, смещены влево относительно “стандартных” треков. В результате может возникнуть иллюзия затмений звезд пылевыми облаками, состоящими из крупных частиц, тогда как на самом деле экранирующую звезду пылевое облако может состоять из мелких частиц, но иметь сильный градиент плотности пыли в пределах диска звезды. Учитывая это, использовать цветовые треки звезд типа Т Тельца с переменностью типа UX Ori для определения закона околозвездной экстинкции следует с большой осторожностью.

Авторы благодарны К.Н. Гранкину, Л.В. Тамбовцевой и П.П. Петрову за полезные замечания. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования РФ (грант № 075-15-2020-780).

³ Внутренний диск AA Тау сильно наклонен относительно плоскости неба ($i \approx 75^{\circ}$, Лумис и др., 2017), что роднит эту звезду с переменными типа UX Ori. Согласно Креплину и др. (2016), у самой UX Ori диск наклонен на угол $i = 70 \pm 5^{\circ}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аленкар и др. (S.H.P. Alencar, P.S. Teixeira, M.M. Guimaraes, P.T. McGinnis, J.F. Gameiro, J. Bouvier, S. Aigrain, E. Flaccomio, and F. Favata), *Astron. Astrophys.* **519**, A88 (2010).
2. Анселл и др. (M. Ansdell, E. Gaidos, C. Hedges, M. Tazzari, A.L. Kraus, M.C. Wyatt, G.M. Kennedy, J.P. Williams, et al.), *MNRAS* **492**, 572 (2020).
3. Барсунова и др. (O.Yu. Barsunova, V.P. Grinin, and S.G. Sergeev), *Astrophysics* **56**, 395 (2013).
4. Бибо, Тэ (E.A. Bibo and P.S. Thé), *Astron. Astrophys.* **236**, 55B (1990).
5. Бредалл и др. (J.W. Bredall, B.J. Shappee, E. Gaidos, T. Jayasinghe, P. Valley, K.Z. Stanek, C.S. Kochanek, J. Gagné, et al.), *MNRAS* **496**, 3257 (2020).
6. Бувье и др. (J. Bouvier, A. Chelli, S. Allain, L. Carrasco, R. Costero, I. Cruz-Gonzalez, C. Dougados, M. Fernández, et al.), *Astron. Astrophys.* **349**, 619 (1999).
7. Бувье и др. (J. Bouvier, K.N. Grankin, S.H.P. Alencar, C. Dougados, M. Fernández, G. Basri, C. Batalha, E. Guenther, et al.), *Astron. Astrophys.* **409**, 169 (2003).
8. Бувье и др. (J. Bouvier, K.N. Grankin, L.E. Ellerbroek, H. Bouy, and D. Barrado), *Astron. Astrophys.* **557**, A77 (2013).
9. Венцель (W. Wenzel), *Non-Periodic Phenomena in Variable Stars*, IAU Coll. 4 (Ed. L. Dutree, 1969), p. 61.
10. Вошинников и др. (N.V. Voshchinnikov, V.P. Grinin, and V.V. Karjukin), *Astron. Astrophys.* **294**, 547 (1995).
11. Гринин (V.P. Grinin), *Sov. Astron. Lett.* **14**, 27 (1988).
12. Гринин и др. (V.P. Grinin, N.N. Kiselev, N.Kh. Minikulov, G.P. Chernova, and N.V. Voshchinnikov), *Astrophys. Space Sci.* **186**, 283 (1991).
13. Гринин и др. (V.P. Grinin, A.A. Arkharov, O.Yu. Barsunova, S.G. Sergeev and L.V. Tambovtseva), *Astron. Lett.* **35**, 114 (2009).
14. Гринин и др. (V.P. Grinin, A.O. Semenov, O.Yu. Barsunova, and S.G. Sergeev), *Astrophysics* **62**, 41 (2019).
15. ДеВарф и др. (L.E. DeWarf, J.F. Sepinsky, E.F. Guinan, I. Ribas, and I. Nadalin), *Astrophys. J.* **590**, 357 (2003).
16. Додин и др. (A. Dodin, K. Grankin, S. Lamzin, A. Nadjip, B. Safonov, D. Shakhovskoi, V. Shenavrin, A. Tatarnikov, and O. Vozyakova), *MNRAS* **482**, 5524 (2019).
17. Дуллемон и др. (C.P. Dullemond, M.F. van den Ancker, B. Acke, and R. van Boekel), *Astrophys. J.* **594** L47 (2003).
18. Зайцева (G.V. Zaitseva), *Astrophysics* **25**, 626 (1986).
19. Зайцева (G.V. Zaitseva), *Var. Stars* **19**, 63 (1973).
20. Креплин и др. (A. Kreplin, D. Madlener, L. Chen, G. Weigelt, S. Kraus, V. Grinin, L. Tambovtseva, and M. Kishimoto), *Astron. Astrophys.* **590**, A96 (2016).

21. Кулкарни, Романова (A.K. Kulkarni and M.M. Romanova), *MNRAS* **398**, 701 (2009).
22. Лумис и др. (R.A. Loomis, K.I. Oberg, S.M. Andrews, and M.A. MacGregor), *Astrophys. J.* **840**, 23L (2017).
23. МакГиннис и др. (P.T. McGinnis, S.H.P. Alencar, M.M. Guimar+res, A.P. Sousa, J. Stauffer, J. Bouvier, L. Rebull, N.N.J. Fonseca, et al.), *Astron. Astrophys.* **577**, A11 (2015).
24. Муцеролле и др. (J. Muzerolle, N. Calvet, and L. Hartmann), *Astrophys. J.* **550**, 944 (2001).
25. Нагель, Бувье (E. Nagel and J. Bouvier), *arXiv:2010.05973v2* (2020).
26. Натта, Уитни (A. Natta and B.A. Whitney), *Astron. Astrophys.* **364**, 633 (2000).
27. Петров (P.P. Petrov), *Astrophysics* **46**, 506 (2003).
28. Петров и др. (P.P. Petrov, G.F. Gahm, and A.A. Djurvik), *Astron. Astrophys.* **577**, 73P (2015).
29. Пинилла и др. (P. Pinilla, M. Tazzari, I. Pascucci, A.N. Youdin, A. Garufi, C.F. Manara, L. Testi, G. van der Plas, et al.), *Astrophys. J.* **859**, 32 (2018).
30. Пугач (A.F. Pugach), *Astrophysics* **17**, 47 (1981).
31. Пугач (A.F. Pugach), *Astron. Rep.* **48**, 470 (2004).
32. Родригес и др. (J.E. Rodriguez, J. Pepper, K.G. Stassun, and G. Keivan), *Astron. J.* **146**, 112 (2013).
33. Романова и др. (M.M. Romanova, G.V. Ustyugova, A.V. Koldoba, and R.V.E. Lovelace), *Astrophys. J.* **610**, 920 (2004).
34. Ростопчина и др. (A.N. Rostopchina, V.P. Grinin, A. Okazaki, P.S. The, S. Kikuchi, D.N. Shakhovskoy, and N.Kh. Minikhulov), *Astron. Astrophys.* **327**, 145 (1997).
35. Сицилия-Агилер и др. (A. Sicilia-Aguilar, C.F. Manara, J. de Boer, M. Benisty, P. Pinilla, and J. Bouvier), *Astron. Astrophys.* **633**, A37 (2020).
36. Столкер и др. (T. Stolker, M. Sitko, B. Lazareff, M. Benisty, C. Dominik, R. Waters, M. Min, S. Perez, et al.), *Astrophys. J.* **849**, 143 (2017).
37. Тамбовцева, Гринин (L.V. Tambovtseva and V.P. Grinin), *Astron. Lett.* **34**, 231 (2008).
38. Фачини и др. (S. Facchini, C.F. Manara, P.C. Schneider, C.J. Clarke, J. Bouvier, G. Rosotti, R. Booth, and T.J. Haworth), *Astron. Astrophys.* **596**, A38 (2016).
39. Хартманн и др. (L. Hartmann, R. Hewett, and N. Calvet), *Astrophys. J.* **426**, 669 (1994).
40. Хербст и др. (W. Herbst, D.K. Herbst, E.J. Grossman, and D. Weinstein), *Astron. J.* **108**, 1906 (1994).
41. Хербст и др. (W. Herbst, J.A. Holtzman, and R.S. Klasky), *Astron. J.* **88**, 1648 (1983).
42. Шаховской и др. (D.N. Shakhovskoi, A.N. Rostopchina, V.P. Grinin, and N.Kh. Minikhulov), *Astron. Rep.* **47**, 301 (2003).
43. Шенаврин и др. (V.I. Shenavrin, P.P. Petrov, and K.N. Grankin), *Inf. Bull. Var. Stars* **6143**, 1S (2015).
44. Шульман С.Г., Гринин В.П., Письма в Астрон. журн. **45**, 716 (2019) [S.G. Shulman and V.P. Grinin, *Astron. Lett.* **45**, 664 (2019)].
45. Эйснер и др. (J.A. Eisner, B.F. Lane, L.A. Hillenbrand, R.L. Akeson, and A.I. Sargent), *Astrophys. J.* **613**, 1049 (2004).