

УДК: 521.8

УНИКАЛЬНАЯ ЗАТМЕННОЯ СИСТЕМА КН 15D: НОВЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

О.Ю.БАРСУНОВА^{1,3}, В.П.ГРИНИН^{1,2,3}, С.Г.СЕРГЕЕВ²

Поступила 6 сентября 2004

Приводятся результаты фотометрических наблюдений молодой затменной системы КН 15D, проводившихся в течение двух наблюдательных сезонов 2002-2004гг. Сравнение наших данных с более ранними результатами Гамильтон и др. и Хербста и др. показывает существование многолетнего фотометрического тренда яркости: за 5 лет блеск системы в полосе I_c уменьшился почти на 1 звездную величину. Показано также, что обнаруженное Хербстом и др. систематическое изменение параметров затмений продолжается в настоящее время. При этом форма кривой блеска существенно не изменилась и по-прежнему характеризуется небольшим поярчением в центральной части затмений. Полученные результаты обсуждаются в контексте рассматриваемых в настоящее время моделей КН 15D.

1. *Введение.* Объект КН 15D ($Sp = K7$; $V = 18 - 21.5$) обнаружен в 1997г. Кернс и Хербстом [1] при фотометрическом исследовании молодого скопления NGC 2264. Согласно Гамильтон и др. [2] это молодая звезда типа WTTS (weak T Tauri star). С периодичностью $48^d.35$ ее блеск ослабевает примерно на 3.5 звездной величины, причем в слабом состоянии объект находится в течение примерно трети периода. Такие параметры затмений не имеют аналогов среди затменных двойных систем, что позволяет отнести КН 15D к числу уникальных астрофизических объектов.

За последний год опубликован ряд важных результатов, которые существенно обогатили сведения об этом объекте. Прежде всего установлен сам факт двойственности КН 15D: с помощью телескопов Кеск, Magellan II и ряда других, Джонсон и др. [3] обнаружили периодические изменения радиальной скорости объекта с амплитудой 10.7 км/с и оценили наиболее вероятные интервалы значений функции масс системы ($0.125 \leq f_M / \sin^3 i \leq 0.5 M_\odot$) и эксцентриситета орбиты $0.68 \leq e \leq 0.80$. Используя Гарвардскую коллекцию фотографических наблюдений скопления NGC 2264, Уинн и др. [4] нашли, что кривая блеска этого объекта в начале 20-го столетия сильно отличалась от наблюдаемой в настоящую эпоху: эффективная продолжительность затмений была существенно меньше, либо они вообще не наблюдались.

По спектрам КН 15D, полученным в области 2 микрон, Токунага и др. [5] и Диминг и др. [6] обнаружили в линиях молекулы H_2 биполярное

истечение. Авторы последней работы пришли к выводу, что ось истечения заметно наклонена к лучу зрения. Спектральные наблюдения (Гамильтон и др. [7]) в ярком состоянии и во время затмений показали, что эквивалентная ширина линии $H\alpha$, а также запрещенных линий [O I]6300/6363 Å в моменты затмений увеличивается синхронно с уменьшением блеска системы. Аналогичным образом ведет себя линейная поляризация (Эйгол и др. [8]). Такое поведение характерно для объектов, источник непрерывного излучения которых в моменты затмений закрывается от наблюдателя полностью, тогда как более протяженная область, в которой образуется рассеянное поляризованное излучение, а также излучение в эмиссионных линиях, не экранируется или экранируется только частично. Подобный коронографический эффект в наиболее яркой форме наблюдается у звезд типа UX Oг и обусловлен эпизодическими затмениями звезд околосветными газопылевыми облаками (см. обзор [9], а также статью Роджерс и др. [10] и цитированную там литературу).

Для объяснения необычных затмений КН 15D предложен ряд моделей, обзор которых дан в [4] (см. также раздел 4 настоящей статьи). Они дают разные показания фотометрического поведения системы, в связи с чем представляют интерес фотометрические исследования этой двойной системы на больших интервалах времени. С этой целью в 2002г. нами начаты фотометрические наблюдения КН 15D. В данной статье представлены результаты, полученные в течение двух наблюдательных сезонов 2002-2004 годов.

2. Наблюдения. Наблюдения проводились на телескопе АЗТ-8 (0.7-м) Крымской астрофизической обсерватории с помощью CCD камеры AP7p размером 512 x 511 пиксел и размером пиксела 24 x 24 микрона, установленной в первичном фокусе телескопа. Наблюдения выполнялись в трех полосах u, r, i и редуцированы в фотометрическую систему Johnson-Cousins V, R_c, I_c . Поскольку исследуемый объект находится в молодом скоплении NGC 2264, практически все звезды в его окрестности демонстрируют флуктуации блеска разной амплитуды. Для фотометрической привязки нами были отобраны 4 звезды, которые

Таблица 1

ЗВЕЗДЫ СРАВНЕНИЯ

N	I_R	I_1	σ_1	I_2	σ_2
281	13.60	13.57	0.03	13.62	0.04
328	14.53	14.48	0.04	14.47	0.04
353	13.63	13.74	0.03	13.70	0.04
422	13.66	13.62	0.05	13.62	0.05

Примечание. Значения I_R взяты из статьи Флаккомио и др. [11].

показали наименьшую среднеквадратичную амплитуду переменности по отношению друг к другу в течение рассматриваемого интервала времени. Номера этих звезд по каталогу Флаккомио и др. [11], а также звездные величины в полосе I_c приведены в табл.1. В двух последних столбцах даны средние значения I_c , а также их дисперсии, полученные по нашим наблюдениям для двух последовательных сезонов. Видно, что эти значения удовлетворительным образом согласуются с опубликованными в [11]. Использование всех четырех звезд сравнения позволяет снизить влияние флуктуаций блеска каждой из них и обеспечить точность фотометрии в полосе I_c не хуже $0^m.03$.

2.1. *Учет фона неба.* Как видно из рис.1, рядом с объектом КН 15 D находится яркая звезда ($V \approx 6^m$), рассеянный свет от которой характеризуется сильным градиентом в том месте, где находится исследуемый объект. Это обстоятельство представляет серьезную помеху для корректного учета фона неба, особенно в минимумах блеска. Поэтому

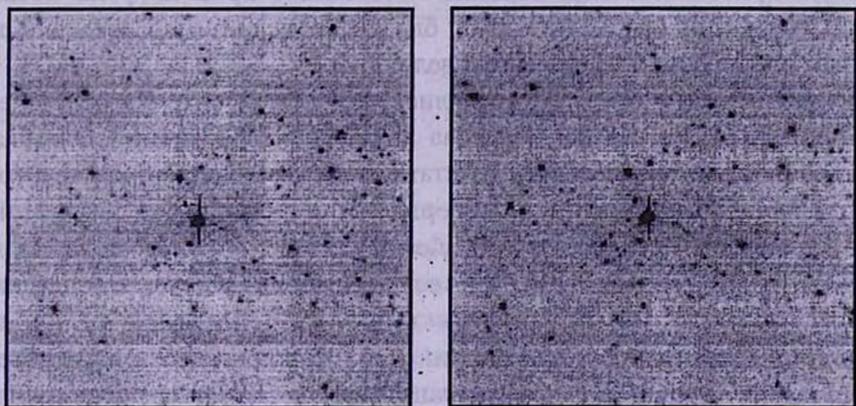


Рис.1. Изображения КН 15D в полосе I_c в ярком состоянии (слева) и во время затмения (справа) по данным настоящей статьи.

стандартная процедура апертурной фотометрии в данном случае не подходит, так как яркость фона неба под объектом может заметно отличаться от той, которую мы определяем по кольцу вокруг объекта. Эта проблема может быть решена несколькими путями, из которых мы выбрали фотометрию с использованием инструментального профиля PSF (Point Spread Function). Предположим, что в небольшой окрестности КН 15D рассеянный свет описывается некоторой плоскостью, определяемой тремя свободными параметрами, например, центральной интенсивностью и градиентами по X и Y . Допустим также, что мы имеем PSF для данного изображения. Тогда подбором положения и интенсивности PSF, а также параметров плоскости можно достичь

наилучшей аппроксимации наблюдаемого распределения яркости в этой небольшой окрестности и отсюда по подобранной интенсивности PSF - найти яркость самого объекта. Задача сводится к многомерной оптимизации целевой функции, для чего нами был разработан и тщательно протестирован специальный алгоритм. На практике варьировались только положение и интенсивности PSF, а параметры плоскости получались путем аппроксимации плоскостью остатка от вычитания PSF. Размер окрестности составлял 5×5 пиксел или 8.8×8.8 угловых секунд. Сама же PSF вначале определялась автоматически для каждого изображения путем отбора PSF одиночных звезд. После усреднения PSF по всем этим звездам проводилась их отбраковка по критерию несоответствия (среднеквадратичного разброса) относительно средней PSF.

Сравнение двух методов (апертурной фотометрии и PSF) показало, что существенное расхождение между ними имеет место лишь в минимуме блеска КН 15D, причем первый метод дает часто формально отрицательную яркость объекта, завышая тем самым яркость фона неба. В ярком состоянии оба метода дают близкие результаты со среднеквадратичным разбросом 0.03 звездной величины.

Ошибки фотометрии определялись методом Монте-Карло, то есть многократным внесением гауссова шума в изображение. Ошибка в каждом пикселе определялась из статистически накопленных квантов с учетом шумов считывания и операций, производимых над данным изображением в процессе его обработки. К этой ошибке мы добавляли (в квадратуре) ошибку звездной величины, связанную с ошибками метода, которые мы определили выше (0.03 звездной величины). Результирующая точность фотометрии КН 15D в ярком состоянии объекта обусловлена в основном флуктуациями блеска звезд сравнения и составляет около $0^m.03$; в слабом состоянии она не хуже $0^m.1$.

3. Результаты. На рис.2 и 3 показаны результаты фотометрии КН 15D в полосе I_c , по нашим данным, а также по данным Гамильтон и др. [2], и Хербста и др. [12]. Как и в нашей работе, фотометрические наблюдения в этих двух статьях приведены в системе Козенса. При этом точность измерений блеска составляла около $0^m.01$ - $0^m.02$ в ярком состоянии объекта и $0^m.1$ - $0^m.2$ - в слабом.

Мы видим, что наблюдается фотометрический тренд: яркость КН 15D монотонно уменьшается со временем. На существование этого тренда мы обратили внимание, анализируя наши собственные наблюдения: из рис.2 видно, что в течение наблюдательного сезона 2002-2003гг. и частично в следующем сезоне блеск объекта вне затмений монотонно уменьшался. Добавив к нашим результатам данные работы [12], которые были любезно предоставлены нам Б.Хербстом, мы убедились в том, что этот тренд хорошо

согласуется с поведением блеска объекта в предыдущем наблюдательном сезоне 2001-2002гг. (как видно из рис.2, этот тренд заметен также в поведении яркого состояния объекта в течение наблюдательного сезона 2001-2002гг., во время которого фотометрические наблюдения КН 15D проводились несколькими группами [12] и были наиболее плотными во времени).

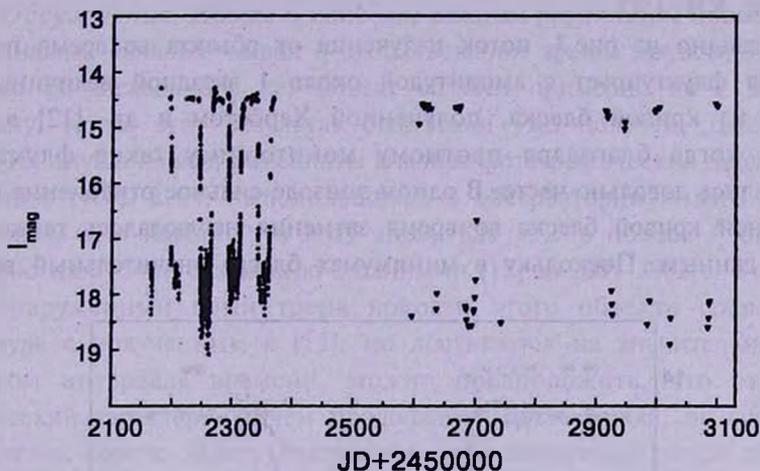


Рис.2. Кривая блеска КН 15D в полосе I_c по данным Хербста и др. [12] (крестики) и нашей работы (треугольники).

Наконец, дополнив эти наблюдения данными за 1999-2000гг. из статьи Гамильтон и др. [2], мы нашли (см. рис.3а), что и более ранние наблюдения этого объекта также показывают существование тренда яркости в том же направлении. При этом, как следует из рис.3а, блеск КН 15D вне затмений уменьшился за два сезона 1999-2001гг. примерно на $0^m.7$, тогда как в течение трех наблюдательных сезонов 2001-2004гг. объект ослабел примерно на $0^m.3$. Это свидетельствует о замедлении фотометрического тренда, а несколько точек на кривой блеска, полученных в конце наблюдательного сезона 2003-2004гг. (рис.2), указывают на его возможное завершение и начало подъема блеска КН 15D. Такое поведение блеска, если оно подтвердится дальнейшими наблюдениями, будет иметь важное значение для понимания механизма затмений этого объекта (см. ниже).

На рис.3а и 3б показаны свертки кривой блеска объекта с периодом $48^d.35$ за три рассмотренных выше интервала времени. Отчетливо виден тренд яркости КН 15D, о котором говорилось выше. Видно также, что обнаруженное впервые Гамильтон и др. [2] увеличение продолжительности затмений наблюдается и в настоящее время. Из рис.3б, на котором кривые блеска свернуты после удаления тренда, видно, что уменьшение глубины затмений, наблюдавшееся по данным [2] и [12], в 2002-2004гг.,

замедлилось или полностью прекратилось. При этом форма кривой блеска в целом не изменилась. В центральной части затмения по-прежнему наблюдается слабое поярчание, являющееся характерной деталью кривых блеска этого объекта [2,12]. Анализ наших наблюдений в полосах V и R_c подтвердил заключение Гамильтон и др. [2] о нейтральном характере затмений КН 15D.

Как видно из рис.3, поток излучения от объекта во время полного затмения флуктуирует с амплитудой около 1 звездной величины. Это следует из кривой блеска, полученной Хербстом и др. [12] в 2001-2002гг., когда благодаря плотному мониторингу такие флуктуации наблюдались довольно часто. В одном эпизоде сильное отклонение потока от средней кривой блеска во время затмения наблюдалось также и по нашим данным. Поскольку в минимумах блеска значительный вклад в

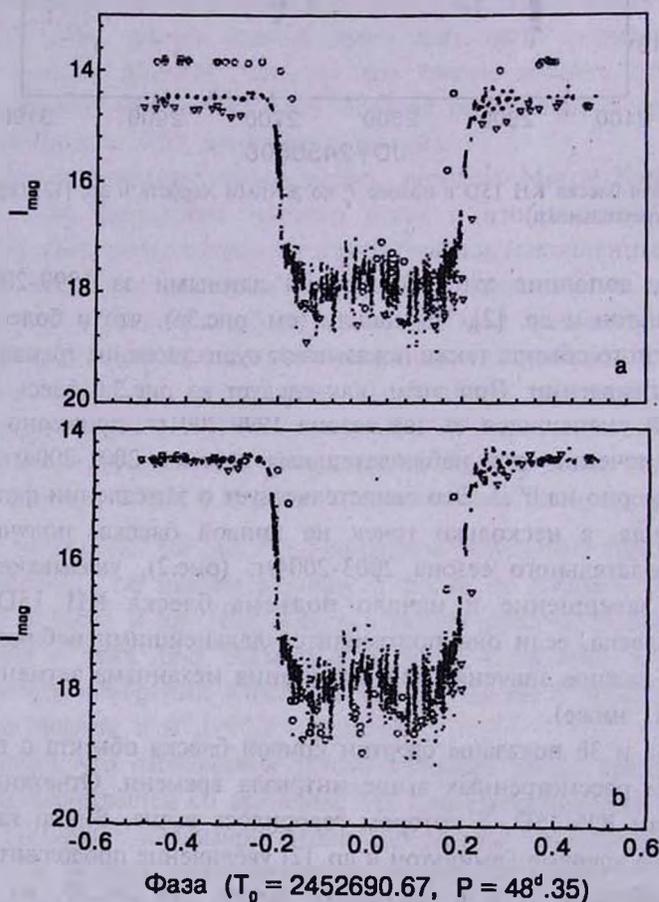


Рис.3. а) Фазовая кривая блеска КН 15D в полосе I_c , свернутая с периодом $48^d.35$; б) то же самое после учета тренда. Круги - данные Гамильтон и др. [2] за 1999-2000гг., крестики - данные Хербста и др. [12] за 2001-2002гг., треугольники - данные настоящей статьи за 2002-2004гг.

наблюдаемый поток дает излучение, рассеянное околозвездной пылью (о чем свидетельствует увеличение линейной поляризации в минимумах [8]), то указанная выше особенность поведения блеска объекта во время затмений свидетельствует о том, что параметры рассеянного излучения КН 15D подвержены сильным флуктуациям.

4. *Обсуждение.* Новым и наиболее важным результатом проведенного выше анализа является вывод о существовании тренда яркости КН 15D: в целом за последние 5 лет объект ослабел примерно на 1 звездную величину. Когда этот результат был нами уже получен, Джонсон и Уинн [13] опубликовали результаты анализа фотографических наблюдений скопления NGC 2264, выполнявшихся в обсерватории Асыяго в 1967-1982 годах. Они нашли, что в ту эпоху КН 15D в полосе I_c был ярче примерно на $0^m.9$ по сравнению с данными [12] за 2001-2002гг. Учитывая, что обнаруженный нами тренд яркости этого объекта сравним по амплитуде с полученным в [13], но достигается на значительно более коротком интервале времени, можно предположить, что он носит циклический характер, причем продолжительность цикла, по-видимому, существенно короче 30 лет. Отмеченное выше замедление тренда косвенно подтверждает это предположение.

Каким образом такой тренд яркости КН 15D можно объяснить в рамках существующих моделей этой затменной системы?

Очевидно, что одной из возможных причин медленных изменений блеска объекта вне затмений может быть изменение светимости главного компонента двойной системы. Хотя мы не можем сейчас указать конкретный механизм, вызывающий подобные изменения, такое объяснение нельзя сбрасывать со счета. Другой причиной может быть дополнительное, медленно меняющееся со временем поглощение излучения главного компонента по пути к наблюдателю.

Основываясь на наблюдаемых изменениях параметров затмений, Уинн и др. [14] и Чанг и Мюррэй-Клай [15] предложили модель КН 15D, в которой двойная система, состоящая из примерно одинаковых по своим параметрам компонентов, окружена непрозрачным газопылевым кольцом или диском (в дальнейшем для краткости мы будем называть его СВ-диск (от английского "circumbinary")). Предполагается, что двойная система наблюдается почти с ребра, тогда как СВ-диск наклонен к лучу зрения примерно на 20° и медленно прецессирует относительно центра масс системы. Затмения происходят тогда, когда один или оба компаньона в процессе орбитального движения оказываются "в тени" СВ-диска. При этом для объяснения крутого входа и выхода из минимума внутренняя граница СВ-диска должна быть довольно резкой.

Изменения параметров затмений в этой модели обусловлены

прецессией СВ-диска. Предполагается, что в современную эпоху один из компонентов уже практически полностью закрыт СВ-диском и лишь вблизи периастра его излучение слегка просвечивает сквозь диск (чем объясняется небольшой подъем блеска в центральной части затмений). Затмения происходят при уходе второго компонента за непрозрачную границу диска в процессе орбитального движения.

Хотя эта модель объясняет основные свойства кривых блеска КН 15D, происхождение наблюдаемого в современную эпоху тренда яркости объекта в рамках этой модели остается неясным. В принципе, его могла бы дать пылевая атмосфера над прецессирующим диском, но в этом случае становится трудно выполнимым условие существования резкого края СВ-диска.

В модели Гринина и Тамбовцевой [16] причиной продолжительных затмений является дисковый ветер вторичного компонента, который может быть непрозрачен из-за присутствующей в нем пыли. Предполагается, что плоскость двойной системы (совпадающая с плоскостью СВ-диска) наклонена к лучу зрения. Расчеты показывают [16,17], что если пыль в ветре имеет параметры, характерные для околозвездных дисков, и хорошо перемешана с газом в пропорции 1:100 (как в межзвездной среде), то наблюдаемая у КН 15D амплитуда ослаблений блеска достигается при темпе потери массы в, так называемой, медленной компоненте ветра порядка $3 \cdot 10^{-8} M_{\odot}$ в год. Изменение параметров затмений в этой модели происходит в результате движения линии апсид орбиты вторичного компонента [17], но может быть вызвано также и нестабильностями в дисковом ветре. Поярчание, наблюдаемое в центральной части затмения, объясняется низкой плотностью вещества внутри конуса дискового ветра.

Поскольку СВ-диски в двойных системах с эксцентрическими орбитами характеризуются глобальной асимметрией [18], то при небольшом наклоне к лучу зрения в таких системах, наряду с затмениями, обусловленными дисковым ветром вторичного компонента, может наблюдаться также значительно более медленная переменность блеска (подобная той, которую мы нашли у КН 15D), вызванная изменениями экстинкции на луче зрения в результате прецессии СВ-диска [17].

5. *Заключение.* Таким образом, мы показали, что в изменениях блеска КН 15D, наблюдаемых в современную эпоху, присутствует тренд яркости: за 5 лет объект ослабел примерно на 1 звездную величину. Судя по поведению яркого состояния в последнем наблюдательном сезоне, этот тренд, возможно, замедлился и появился намек на изменение блеска в обратном направлении (рис.2). Если такое поведение блеска подтвердится последующими наблюдениями, то можно будет определенно сказать, что

предсказываемый моделями Уинна и др. [14] и Чанга и Мюррей-Клэй [15] "конец света", когда оба компонента системы полностью закрыты от наблюдателя СВ-диска (по оценкам Уинна и др. это должно случиться в 2012г.), - не состоится.

Результаты проведенного выше анализа показывают, что для выяснения природы необычных затмений КН 15D важное значение имеет не только информация о кривых блеска этого объекта в моменты затмений (изучению которых уделяется сейчас основное внимание наблюдателей), но и поведение блеска этого объекта вне затмений. Весьма важно было бы также провести фотометрический мониторинг этого уникального объекта в ближней ИК-области спектра.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.Дорошенко и Е.Сергеевой за помощь в наблюдениях, а также Биллу Хербсту за представление данных фотометрических наблюдений КН 15D. Мы благодарны также В.М.Ларионову за полезные замечания. Работа выполнена при поддержке гранта Президиума РАН "Нестационарные явления в астрономии" и гранта ИНТАС № 03-51-6311.

¹ Главная астрономическая обсерватория РАН Пулковое, С.Петербург, Россия

² Крымская астрофизическая обсерватория, Крым, Научный, Украина, e-mail: grinin@VG1723.spb.edu

³ Астрономический институт им. В.В.Соболева, С.Петербургский Университет, Россия

THE UNIQUE ECLIPSING SYSTEM KH 15D: NEW PHOTOMETRIC DATA

O.Yu.BARSUNOVA^{1,3}, V.P.GRININ^{1,2,3}, S.G.SERGEEV²

We present results of the photometric observations of the young eclipsing system KH 15D obtained during the two observational seasons of 2002-2004 years. A comparison of our data with the earlier results by Hamilton et al. and Herbst et al. reveals an existence of the long-term photometrical brightness trend: during 5 years the system brightness in the *I*-band decreased by about one magnitude. It is also shown that a systematic change of the eclipse parameters found by Herbst et al. is continuing up to now. The shape of the light curve did not change essentially and is characterized with a small brightening in the central part of the eclipses. The results obtained are discussed in the context of the current models of KH 15D.

Key words: (stars:)binaries:eclipsing:individual:KH 15D

ЛИТЕРАТУРА

1. *K.E.Kearns, N.L.Eaton, W.Herbst, C.J.Mazzurco*, *Astron. J.*, **114**, 1098, 1997.
2. *C.M.Hamilton, W.Herbst, C.Shih, A.J.Ferro*, *Astrophys. J.*, **554**, L201, 2001.
3. *J.A.Johnson, G.V.Marcy, C.M.Hamilton et al.*, astro-ph 0403099, 2004.
4. *J.N.Winn, P.M.Garnavich, K.Z.Stanek, D.D.Sasselov*, *Astrophys. J.*, **593**, L121, 2003.
5. *A.T.Tokunaga, S.Dahm, W.Gässle et al.*, astro-ph 0401177, 2004.
6. *D.Deming, D.Charbonneau, J.Harrington*, *Astrophys. J.*, **601**, L87, 2004.
7. *C.M.Hamilton, W.Herbst, R.Mundt, C.A.L.Bailer-Jones, C.M.Johns-Krull*, *Astrophys. J.*, **591**, L45, 2003.
8. *E.Agol, A.Barth, S.Wolf, D.Charbonneau*, astro-ph 0309309, 2003.
9. *V.P.Grinin*, in "Disks, Planetesimals and Planets", Eds. F.Garzon et al. ASPC, **219**, 216, 2000.
10. *B.Rodgers, D.Wooden, V.Grinin, D.Shakhovskoj, A.Natta*, *Astrophys. J.*, **564**, 405, 2002.
11. *E.Flaccomio, G.Micela, S.Sciortino et al.*, *Astron. Astrophys.*, **345**, 521, 1999.
12. *W.Herbst, C.M.Hamilton, F.J.Vrba et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **114**, 1167, 2002.
13. *J.A.Johnson, J.N.Winn*, astro-ph 0312428, 2003.
14. *J.N.Winn, M.J.Holman, J.A.Johnson et al.*, astro-ph 0312458, 2004.
15. *E.I.Ciang, R.A.Mjurrey-Clay*, astro-ph 0312515, 2004.
16. *В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева*, *Письма в Астрон. ж.*, **28**, 667, 2002.
17. *В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева, Н.Я.Сотникова*, *Письма в Астрон. ж.*, **30**, 764, 2004.
18. *P.Artymowicz, S.H.Lubow*, *Astrophys. J.*, **467**, L77, 1996.