

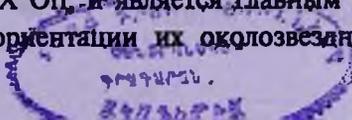
УДК: 524.3

АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКОЙ КРИВОЙ БЛЕСКА  
ЗВЕЗДЫ ТИПА UX Opi CQ TauД.Н.ШАХОВСКОЙ<sup>1</sup>, В.П.ГРИНИН<sup>1,2,3</sup>, А.Н.РОСТОПЧИНА<sup>1</sup>

Поступила 20 декабря 2004

Построена историческая кривая блеска звезды типа UX Opi CQ Tau, охватывающая интервал времени с 1939 по 2003 годы. Показано, что в фотометрическом поведении звезды присутствует циклическая составляющая с периодом около 21 года. Периодограммный анализ показывает, что после вычитания этого цикла остается более короткий цикл продолжительностью около 1020 дней. Поскольку фотометрическая активность звезд типа UX Opi обусловлена изменениями околозвездной экстинкции, оба эти цикла свидетельствуют о существовании в околозвездном диске CQ Tau крупномасштабных отклонений в распределении вещества от аксиальной симметрии. Вращение этих неоднородностей вокруг звезды и вызывает волнообразные изменения ее блеска. Анализ диаграмм "цвет-величина" показал, что оптические параметры околозвездной пыли на луче зрения отличаются в разных фазах 21-летнего цикла: вблизи максимального блеска CQ Tau преобладает поглощение более крупными частицами. Это означает, что уменьшение околозвездной экстинкции в этой части околозвездного диска вызвано уменьшением вклада мелких частиц, что может служить указанием на начавшийся процесс коагуляции пылинок и превращения их в крупные тела и планетозимали.

1. *Введение.* Звезды типа UX Opi относятся к числу фотометрически наиболее активных молодых звезд и состоят в основном из звезд Ae Хербига и звезд типа Т Тельца ранних спектральных классов [1-3]. Их фотометрическая активность обусловлена переменной околозвездной экстинкцией, и отличие от фотометрически спокойных звезд таких же спектральных классов состоит в том, что околозвездные диски звезд типа UX Opi наклонены под небольшим углом к лучу зрения. Грубо говоря, луч зрения проходит сквозь атмосферу диска, касаясь его "поверхности". Доказательства этого были получены в ходе многолетних фотополяриметрических наблюдений звезд типа UX Opi (см. обзоры [4,5] и цитированую там литературу). Они показали, что линейная поляризация этих звезд увеличивается при ослаблении блеска из-за увеличения вклада рассеянного излучения околозвездного диска, причем изменения параметров Стокса происходят по закону, характерному для коронографического эффекта (когда прямое излучение звезды блокируется непрозрачными газопылевыми облаками и наблюдаемое излучение приходит из более протяженной области, в которой образуется рассеянное излучение). Высокая линейная поляризация, наблюдаемая в самых глубоких минимумах звезд типа UX Opi, является главным признаком специфической (почти с ребра) ориентации их околозвездных дисков



[4-6]. Происхождение околозвездных облаков, экранирующих звезды, и их локализация в дисках неизвестны. Тем не менее, фотометрическая активность этих звезд является наиболее ярким проявлением тонкой структуры протопланетных дисков, заслуживающим внимательного анализа.

Неправильный характер переменности блеска и отсутствие периодичности в появлении алголе-подобных минимумов являются наиболее характерными свойствами фотометрической активности звезд типа UX Oг<sub>1</sub>, свидетельствующими о сильно неоднородной (клочковатой) структуре околозвездных дисков. Вместе с тем, по мере накопления наблюдений появляется все больше оснований говорить о том, что на большой шкале времени (годы и десятилетия) переменность блеска звезд этого типа носит более регулярный характер, чем на короткой шкале времени (дни-недели-месяцы). Первое упоминание о многолетних циклах активности у молодых звезд встречается в книге Цесевича и Драгомирецкой [7]. В работах Шевченко и соавторов [8-10] (см. также Хербст и Шевченко [11]) было высказано предположение, что циклическая активность характерна для многих звезд типа UX Oг<sub>1</sub> и вызвана периодическими прохождениями между звездой и наблюдателем гигантских протокомет. Согласно другой точке зрения (Гринин и др. [12], Ростопчина и др. [13], Берту [14]) волнообразный характер кривых блеска отражает наличие крупномасштабных возмущений в околозвездных дисках молодых звезд, которые в результате кеплеровского вращения периодически появляются на луче зрения. Таким образом, исследование долговременной переменности звезд типа UX Oг<sub>1</sub> представляет значительный интерес, поскольку дает возможность изучать крупномасштабные структуры, образующиеся в околозвездных дисках молодых звезд.

Данная статья посвящена изучению фотометрической истории Ae-звезды Хербига CQ Тау. Принадлежность ее к подклассу звезд типа UX Oг<sub>1</sub> была установлена в работе [15], авторы которой обнаружили высокую линейную поляризацию в глубоких минимумах звезды, свидетельствующую о сильном наклоне околозвездного диска к лучу зрения. Этот результат был подтвержден в работе Тести и др. [16], в которой с помощью радиоинтерферометрических наблюдений в миллиметровом диапазоне на месте звезды была обнаружена вытянутая газопылевая структура. Предполагая, что это околозвездный диск, авторы [16] оценили угол наклона оси симметрии диска к лучу зрения  $i \approx 66^\circ$ . Совсем недавно Эйснер и др. [17] на основе интерферометрии в ближней ИК-области спектра подтвердили наличие околозвездного диска CQ Тау и оценили угол наклона  $i \approx 48^\circ$ . По оценкам Натта и др. [18], основанным на наблюдениях в субмиллиметровом диапазоне, масса газопылевого диска CQ Тау порядка  $0.03 M_\odot$ .

2. *Историческая кривая блеска CQ Tau.* На рис.1 показана кривая блеска CQ Tau, построенная по данным фотографических наблюдений, выполнявшихся в разных обсерваториях бывшего СССР и суммированных в статье Миникулова и др. [19]. Эти данные были дополнены результатами

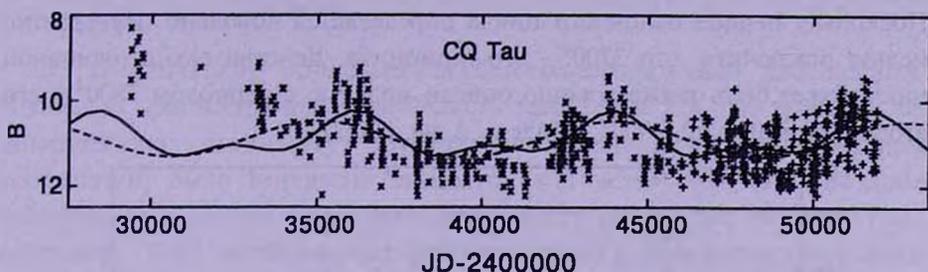


Рис.1. Кривая блеска CQ Tau за 1939-2004гг. x - данные фотографических наблюдений из статьи Миникулова и др. [20]; + - фотометрические наблюдения в полосе *V* из базы данных КраО и [15,20]. Пунктиром и сплошной линией показаны Модель 1 и 2 соответственно (см. текст).

фотометрии в полосе *V* (близкой по своим характеристикам к кривой чувствительности фотопластинок, использованных при фотографических наблюдениях), опубликованными в [11] (149 ночей), а также результатами фотометрических наблюдений в этой же полосе, проводившихся в Крымской астрофизической обсерватории с 1988г. по 2003г. в рамках программы фотополяриметрического мониторинга звезд типа UX Ori (410 ночей). Они частично опубликованы [15,20], частично содержатся в базе данных КраО. Каждая точка на кривой блеска соответствует одной наблюдательной ночи. В тех случаях, когда в течение ночи блеск звезды измерялся несколько раз, приводятся усредненные значения блеска за эту ночь. При этом в периодограммном анализе не использовались самые ранние наблюдения 1939г., пришедшиеся на аномально яркое состояние звезды, не повторявшееся в течение всех последующих лет. Это ограничение никак не сказывается на результатах периодограммного анализа и лишь несколько уменьшает шумы на периодограммах.

В цитированной выше статье Миникулова и др. [19] было показано, что на кривой блеска CQ Tau, наряду с алголеподобными минимумами, существует более медленная компонента с характерным временем порядка  $10^4$  дней. Из рис.2 в [19] можно увидеть намек на циклический характер этой компоненты. Как следует из рис.1, добавление к данным Миникулова и др. наблюдений, выполненных за последние 15 лет, позволяет более уверенно говорить о том, что медленная компонента изменений блеска имеет циклический характер. Причем продолжительность цикла равна примерно 21 году. Заметим, что это самый продолжительный цикл среди известных у звезд типа UX Ori.

При уточнении периода оказалось, что среди моделей цикла простой

синусоидальной формы наилучшее согласие достигается с периодом  $8900^d$  (Модель 1 на рис.1). Анализ остатка после вычитания этой модели указывает на наличие вторичного цикла с периодом  $3700^d$  или  $332^d$  (эти периоды годично-сопряженные и один из них, вероятно, ложный). Поскольку период основного цикла определяется довольно неуверенно, нельзя исключить, что  $3700^d$  - его гармоника. Действительно, основной цикл может быть также хорошо описан моделью с периодом  $7800^d$  и его второй гармоникой  $3900^d$  (Модель 2 на рис.2).

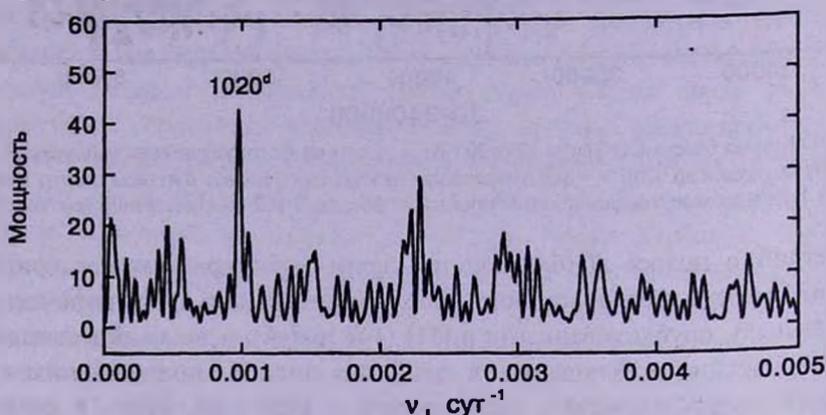


Рис.2. Периодограмма после вычитания из наблюдений Модели 2 (см. текст).

В периодограмме остатка после вычитания Модели 2 хорошо виден период  $1020^d$  (рис.2). Тот же результат получается при вычитании из остатков Модели 1 любого из периодов  $3700^d$  и  $332^d$ . Таким образом, наиболее вероятным вторичным циклом CQ Тау является цикл с периодом  $1020^d$ . Соответствующая этому циклу фазовая кривая показана на рис.3. При ее построении все наблюдения были разбиты на бины по фазам периода  $1020^d$  и усреднены в каждом бине. Отметим, что

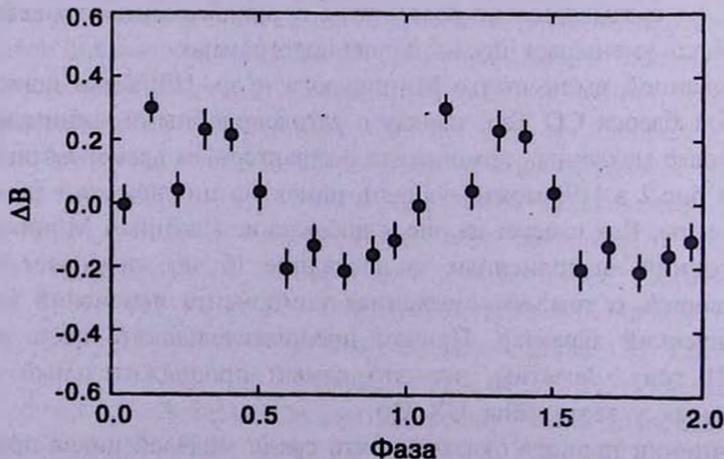


Рис.3. Фазовая кривая цикла  $1020^d$ .

использованные данные перекрывают более 20-ти периодов этого цикла, и на всем этом временном интервале фазовая кривая не претерпела существенных изменений. По-видимому, это один из наиболее долгоживущих фотометрических циклов, обнаруженных или заподозренных у звезд типа UX Ori.

### 3. Циклические вариации закона околозвездного поглощения.

Поскольку фотометрическая активность звезд типа UX Ori (включая ее циклическую компоненту) обусловлена изменениями околозвездной экстинкции, было интересно выяснить, как ведет себя околозвездное покраснение в разных фазах фотометрического цикла. Как известно (см., например, [1-3]), особенностью фотометрического поведения звезд этого типа является неоднозначная зависимость показателей цвета от блеска (так называемый, эффект "поголубения"): покраснение звезды при ослаблениях блеска, начиная с некоторого уровня блеска (разного у разных звезд), сменяется изменением показателей цвета в обратном направлении (рис.4). Общепринятое в настоящее время объяснение этого эффекта состоит в

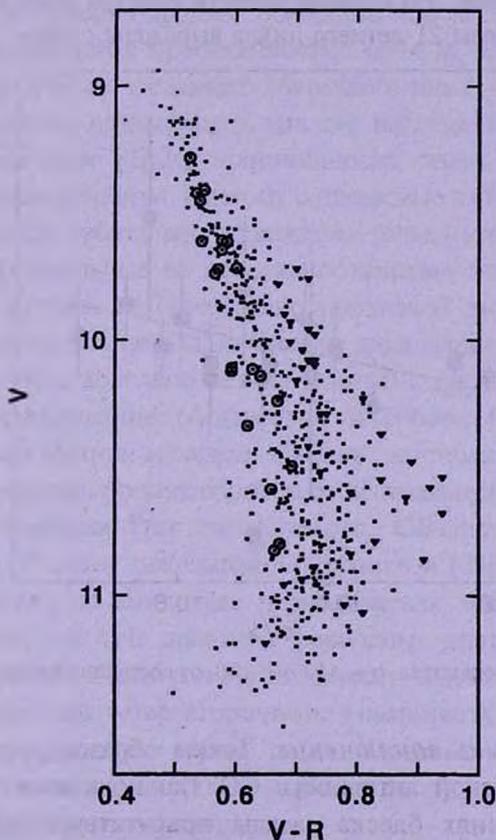


Рис.4. Диаграмма "цвет-величина"  $(V-R)/V$  по данным КраО за 1988-2003гг. Треугольники соответствуют наблюдательному сезону в фазе минимума 21-летнего цикла; кружки - фазе максимума.

том, что в процессе ослабления прямого излучения звезды увеличивается вклад рассеянного излучения околозвездного диска [21]. Поэтому, чтобы корректно определить закон околозвездного поглощения, необходимо учитывать только верхний (прямолинейный) участок цветного трека (рис.4).

Используя *UBVRI*-наблюдения CQ Тау из нашей базы данных, мы определили таким путем закон покраснения для всех наблюдательных сезонов, для которых удалось достаточно уверенно определить наклон верхних участков диаграмм "цвет-величина". Оказалось, что закон покраснения несколько отличается в разных фазах 21-летнего фотометрического цикла: в фазе максимального блеска и вблизи нее наклон цветового трека соответствует более крупным частицам по сравнению с фазами минимального блеска (рис.4). Это также видно на рис.5, где показана зависимость параметра  $\alpha = \Delta V / \Delta(V - R)$  от среднего блеска CQ Тау в полосе *V* в том наблюдательном сезоне, для которого это значение  $\alpha$  было получено. Коэффициент корреляции в этом случае равен 0.52, что соответствует уровню достоверности 0.95. Анализ данных для других полос фотометрической системы показал, что в синей области спектра зависимость наклона цветовых треков от фазы 21-летнего цикла выражена слабее, чем в красной.

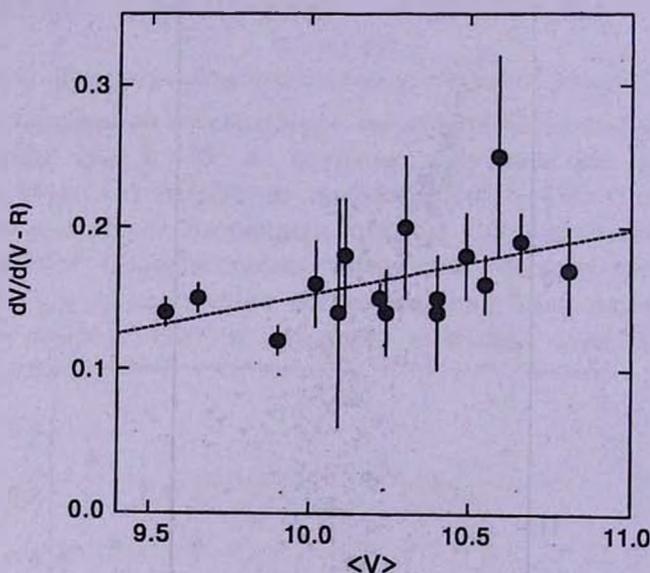


Рис.5. Зависимость показателя  $\alpha = \Delta V / \Delta(V - R)$  от состояния блеска CQ Тау в разных фазах 21-летнего цикла.

**4. Обсуждение и заключение.** Таким образом, сделанный выше анализ фотометрической активности CQ Тау показывает, что в долговременных изменениях блеска звезды присутствует основной цикл, продолжительностью около 21 года, который виден непосредственно на кривой блеска. Второй цикл, который получается после вычитания

первого, примерно в 7.5 раза короче и равен  $1020^d$ . С точки зрения модели переменной околосредней экстинкции, которая применяется в настоящее время для описания фотометрической активности звезд типа UX Ori, долговременная циклическая переменность этих звезд объясняется существованием долгоживущих неоднородностей большого масштаба, вращающихся вместе с околосредним диском вокруг молодой звезды [12-14]. В случае одиночной молодой звезды появление таких крупномасштабных структур может быть вызвано циклоническими движениями в протопланетном диске. Газодинамические расчеты показывают [22-24], что в околосредних дисках, благодаря дифференциальному вращению и силам вязкости, могут возникать как циклонические вихри, так и антициклоны. Антициклоны более устойчивы и могут совершить несколько десятков оборотов вокруг звезды [23]. Поскольку в околосреднем диске могут одновременно существовать вихри разных масштабов, то в этой модели легко объясняется мультициклическая активность (в нашем частном случае - наличие двух фотометрических циклов). Трудность, однако, состоит в том, что для объяснения формы основного цикла протяженность вихря должна быть сравнимой с протяженностью орбиты, на которой он образовался. Только в этом случае начало очередного цикла будет следовать сразу же после завершения предыдущего, как это наблюдается у CQ Tau (рис.1). Согласно же расчетам [22,24] протяженность самых крупных вихрей не превышает 1/3 длины орбиты. Поэтому создаваемые ими зоны тени способны покрыть в процессе орбитального движения только небольшую часть цикла и вызвать лишь локальные во времени ослабления блеска звезды [25].

Хотя CQ Tau пока не обнаружено признаков двойственности, такую возможность исключить нельзя, поскольку доля двойных и кратных систем среди молодых звезд довольно велика (Мэтью и др. [26]). Как показывает численное моделирование (Артимович и Любов [27]), аккреционная активность компонентов молодой двойной системы поддерживается за счет потоков вещества, проникающих в ее центральную область из остатков протозвездного облака (так называемого, СВ-диска (от английского "circumbinary")). Расчеты показывают (Сотникова [28]), что в этом случае возможна заметная по амплитуде периодическая модуляция колонковой плотности частиц на луче зрения с периодом, равным орбитальному.

Другой причиной циклической активности молодой двойной системы может быть дисковый ветер вторичного компонента [29,30], если в нем кроме газа присутствует также пыль. Создаваемая им модуляция экстинкции на луче зрения также имеет период, равный орбитальному, и может иметь большую амплитуду.

Наконец, в молодой двойной системе, наблюдаемой почти с ребра, циклические вариации экстинкции могут быть вызваны волнами плотности,

возбуждаемыми в СВ-диске [28]. Поскольку внутренний радиус СВ-диска в несколько раз превышает большую полуось орбиты вторичного компонента [31], продолжительность циклов в этом случае может быть значительно больше орбитального периода.

Перечисленные выше механизмы циклических изменений околозвездной экстинкции могут объяснить существование фотометрических циклов, но они не дают ответа на вопрос: почему циклические изменения колонковой плотности пыли на луче зрения сопровождаются изменениями размеров пылевых частиц?

Простейшее объяснение найденной выше связи между уменьшением количества пыли на луче зрения в фазе максимума 21-летнего цикла и увеличением размеров пылинок состоит в том, что эти два процесса физически связаны между собой: уменьшение количества пыли в какой-либо области околозвездного диска может быть результатом коагуляции мелких частиц (которые вносят основной вклад в экстинкцию). Этот процесс, как известно, сопутствует образованию крупных тел, из которых затем формируются планеты земной группы, а также зародыши планет-гигантов (Сафронов [32]). Вполне возможно поэтому, что наблюдаемый у CQ Tau 21-летний цикл соответствует периоду орбитального движения той части околозвездного диска, в которой этот процесс в настоящее время протекает. При массе звезды  $M_* = 2M_{\odot}$  [33], расстояние этой области до центра диска порядка 10 а.е., что при расстоянии до CQ Tau 150 пк [17] соответствует угловому расстоянию около  $0''.1$ . Такие угловые размеры доступны современным телескопам-интерферометрам и, возможно, в ближайшее время с их помощью удастся получить детальное изображение околозвездного диска этой звезды и исследовать его структуру<sup>1</sup>.

Очевидно, что существование в околозвездном диске крупномасштабных структур, характерный размер которых сравним с расстоянием до центральной звезды, должно сказаться не только на фотометрической активности молодой звезды, но и на ее поляриметрических свойствах. Действительно, предварительный анализ имеющихся в нашей базе данных поляриметрических наблюдений CQ Tau показывает, что в поведении линейной поляризации звезды наряду с быстрой переменностью, связанной с алголе-подобными минимумами, присутствует также более медленная составляющая. К обсуждению свойств этой составляющей и ее связи с фотометрическими циклами мы предполагаем вернуться в одной из следующих статей.

Авторы искренне благодарны Н.Я.Сотниковой и Л.В.Тамбовцевой за полезное обсуждение затронутых в статье вопросов, Н.Х.Миникулову - за

<sup>1</sup> По данным интерферометрических наблюдений Эйсер и др. [17] CQ Tau окружена околозвездным диском, наклоненным к лучу зрения, что согласуется с результатами фотополариметрических наблюдений [15].

предоставление данных фотографических наблюдений CQ Tau, опубликованных в статье [19]. Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президиума РАН "Нестационарные явления в астрономии", гранта ИНТАС N 03-51-6311 и гранта НШ 1088.2003.2.

<sup>1</sup> Крымская астрофизическая обсерватория, Украина

<sup>2</sup> Главная астрономическая обсерватория РАН (Пулково), Россия, e-mail: grinin@VG1723.spb.edu

<sup>3</sup> Астрономический институт им. В.В.Соболева СПбГУ, Россия

## ANALYSIS OF THE HISTORICAL LIGHT CURVE OF THE UX Ori STAR CQ Tau

D.N.SHAKHOVSKOJ<sup>1</sup>, V.P.GRININ<sup>1,2,3</sup>, A.N.ROSTOPCHINA<sup>1</sup>

The historical light curve of the UX Ori star CQ Tau, combined with our photometric data obtained in 1986-2003 is analysed. The long-term cyclic variability with characteristic time of about 21 years is found. Periodogram analysis reveals the presence of a shorter cycle of about 1020 days. Since the photometric activity of the UX Ori type stars is caused by the variable circumstellar (CS) extinction both these results indicate on the existence of the large-scale deviations of CS matter distribution from the axial symmetry. Orbiting the star these inhomogeneities produce the wave-like brightness changes. An analysis of the color-magnitude diagrams shows that the optical parameters of the CS dust is slightly different in the different parts of the 21 year cycle: near the light maximum the extinction is due to the larger particles. This means that decrease of the CS extinction in this part of the CS disk is caused by the decrease of the deposit by the small particles. It is natural to assume that this is a result of the coagulation of the small particles that precedes the formation of the planetesimals and planets.

Key words: *stars: variables: individual: CQ Tau*

## ЛИТЕРАТУРА

1. P.S.Thé, in "The Nature and Evolutionary Status of Herbig Ae/Be Stars", Eds. P.S.Thé et al., ASP Conf., 62, 1994, p.23.
2. Г.В.Зайцева, Астрофизика, 25, 471, 1986.

3. *W.Herbst, D.K.Herbst, E.A.Grossman*, *Astron. J.*, **108**, 1906, 1994.
4. *V.P.Grinin, N.N.Kiselev, N.Kh.Minikulov, G.P.Chernova, N.V.Voshchinnikov*, *Astrophys. Space Sci.*, **186**, 283, 1991.
5. *V.P.Grinin*, in "Disks, Planetesimals and Planets", Eds. F.Garzón et. al., *ASP Conf.*, **219**, 2000, p.216.
6. *A.Natta, V.Whitney*, *Astron. Astrophys.*, **364**, 633, 2000.
7. *В.П.Цесевич, Б.А.Драгомирецкая*, *Звезды типа RW Возничего*, Наукова Думка, Киев, 1973.
8. *V.S.Shevchenko, K.N.Grankin, M.A.Ibragimov, S.Yu.Mel'nikov, S.D.Yakubov*, *Astrophys. Space Sci.*, **202**, 137, 1993.
9. *V.S.Shevchenko, K.N.Grankin, M.A.Ibragimov, S.Yu.Mel'nikov, S.D.Yakubov*, *Astrophys. Space Sci.*, **202**, 121, 1993.
10. *В.С.Шевченко, О.В.Ежкова*, *Письма в Астрон. ж.*, **27**, 47, 2001.
11. *W.Herbst, V.S.Shevchenko*, *Astron. J.*, **118**, 1043, 1999.
12. *В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина, Д.Н.Шаховской*, *Письма в Астрон. ж.*, **24**, 925, 1998.
13. *А.Н.Ростопчина, В.П.Гринин, Д.Н.Шаховской*, *Письма в Астрон. ж.*, **25**, 291, 1999.
14. *C.Bertout*, *Astron. Astrophys.*, **363**, 984, 2000.
15. *А.А.Бердюгин, С.В.Бердюгина, В.П.Гринин, Н.Х.Миникулов*, *Астрон. ж.*, **67**, 812, 1990.
16. *L.Testi, A.Natta, D.S.Shepherd, D.J.Wilner*, *Astron. Astrophys.*, **403**, 323, 2003.
17. *J.A.Eisner, B.F.Lane, L.A.Hillenbrand, R.L.Akeson, A.I.Sargent*, *Astrophys. J.*, **613**, 1049, 2004.
18. *A.Natta, V.Grinin, V.Mannings*, in "Protostars and Planets IV", Eds. V.Mannings, A.Boss, S.S.Russell, Tucson: Univ. Arizona Press, 2000, p.559.
19. *Н.Х.Миникулов, В.Ю.Рахимов, Н.А.Валчкова*, *Астрофизика*, **36**, 55, 1993.
20. *А.А.Бердюгин*, *Изв. КрАО*, **87**, 107, 1993.
21. *В.П.Гринин*, *Письма в Астрон. ж.*, **14**, 65, 1988.
22. *H.H.Klar, P.Bodenheimer*, *Astrophys. J.*, **582**, 869, 2003.
23. *P.Goden, M.Livio*, *Astrophys. J.*, **523**, 350, 1999.
24. *P.Goden, M.Livio*, *Astrophys. J.*, **537**, 369, 2000.
25. *P.Barge, M.Viton*, *Astrophys. J.*, **593**, L117, 2003.
26. *R.D.Mathieu, A.M.Ghez, E.K.N.Jensen, M.Simon*, in "Protostars and Planets IV", Eds. V.Mannings, A.Boss, S.S.Russell, Tucson: Univ. Arizona Press, 2000, p.559.
27. *P.Artimowics, C.Lubow*, *Astrophys. J.*, **467**, L77, 1996.
28. *Н.Я.Сотникова*, (частное сообщение).
29. *В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева*, *Письма в Астрон. ж.*, **28**, 667, 2002.
30. *В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева, Н.Я.Сотникова*, *Письма в Астрон. ж.*, **30**, 764, 2004.
31. *C.Lubow, P.Artimowics*, in "Protostars and Planets IV", Eds. V.Mannings, A.Boss, S.S.Russell, Tucson: Univ. Arizona Press, 2000, p.731.
32. *В.С.Сафронов*, *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет*. Наука, М., 1996.
33. *А.Н.Ростопчина*, *Астрон. ж.*, **76**, 194, 1999.