

О ФЛУКТУАЦИЯХ ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ RZ Psc

И.С.ПОТРАВНОВ¹, Н.А.ГОРЫНЯ^{2,3}, В.П.ГРИНИН¹,
Н.Х.МИНИКУЛОВ⁴

Поступила 22 мая 2014

В статье исследуется поведение лучевой скорости звезды типа UX Ori RZ Psc. Существование в околозвездном диске этой звезды внутренней полости радиусом около 0.7 а.е. позволяет предполагать присутствие в ней компаньона. Результаты проведенного исследования лучевой скорости RZ Psc на основе наших собственных измерений и литературных данных не позволяют говорить об обнаружении периодической компоненты в ее изменениях. Два наиболее точных измерения V_r по спектрам высокого разрешения, полученным с интервалом в три месяца, демонстрируют неизменность лучевой скорости на этом промежутке времени с точностью 0.5 км/с. Это накладывает ограничение на массу гипотетического компаньона $M_p \leq 10 M_{Jup}$. Обсуждаются возможные причины наблюдаемых сильных флуктуаций лучевой скорости звезды.

Ключевые слова: *звезды; флуктуации лучевой скорости RZ Psc*

1. *Введение.* Звезда RZ Psc (Sp = K0 IV, Хербиг [1]) относится к числу наиболее загадочных представителей звезд типа UX Ori. Она демонстрирует характерное для звезд этого семейства фотометрическое и поляриметрическое поведение [2-7]. Но при этом минимумы, наблюдаемые у RZ Psc, отличаются от минимумов, наблюдаемых у других звезд этого типа, весьма малой продолжительностью: 1-2 дня [4]. Кроме того, в спектре звезды нет эмиссионной линии H α [1,8], присутствующей в спектрах других звезд типа UX Ori. Необычно также и то, что звезда лежит на высокой галактической широте, вдали от областей звездообразования и молодых звездных ассоциаций. Все это вместе взятое оставляло открытым вопрос об эволюционном статусе звезды.

В ходе недавно проведенных исследований [9-12] было показано, что RZ Psc прошла в недалеком прошлом стадию эволюции звезды типа T Тельца и в настоящее время является самым старым представителем звезд типа UX Ori. Согласно последним оценкам, полученным с помощью расчета траектории движения звезды относительно галактической плоскости, ее возраст составляет примерно 25 ± 5 млн. лет [9,10]. Эта величина заметно превосходит характерное время жизни протопланетных дисков (около 10 млн. лет [13]). В то же время, у RZ Psc обнаружены спектроскопические признаки околозвездного газа, наблюдаемые в линиях резонансного дублета Na I D [14]. Все это говорит о том, что звезда окружена околозвездным

диском, переходным от протопланетного к остаточному (debris). Исследование таких объектов представляет большой интерес для понимания физических процессов, протекающих на поздних стадиях эволюции околозвездных дисков звезд солнечного типа.

В фотометрическом поведении RZ Psc наблюдается цикл активности с периодом 12.4 года [11]. Подобные плавные, циклические изменения блеска в ярком состоянии на больших временных интервалах наблюдаются также у ряда других звезд типа UX Ori (см. например, [15-18]). Одной из причин такого поведения звезд могут быть волны плотности в околозвездных дисках, возникающие из-за гравитационного влияния вторичного компонента, которым может быть маломассивная звезда, коричневый карлик или массивная планета (см., например, [19]). Наличие в околозвездном диске RZ Psc центральной полости, свободной от вещества [11] (предсказанной в работе Шаховского и др.[7]) также может свидетельствовать о том, что во внутренней части диска уже сформировалась планетная система. Присутствие компаньона в системе может быть обнаружено по переменности лучевой скорости звезды. Знание лучевой скорости необходимо также для определения вектора скорости движения звезды в Галактике при расчете ее кинематического возраста.

2. *Наблюдения.* Часть измерений лучевой скорости RZ Psc, представленных в данной статье, была выполнена Н.А.Горыня осенью 2012 и 2013 гг. на 1-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) на горе Кошка с помощью кросс-корреляционного измерителя лучевых скоростей, разработанного Токовининым [20]. Несколько других измерений V_R были сделаны по спектрам, полученным в обсерваториях Терсколе и Nordic Optical Telescope (NOT). Спектральные наблюдения на Терсколе выполнялись с помощью эшелюного спектрографа среднего разрешения MMCS ($R=13500$), установленного в кассегреновском фокусе 2-м телескопа. Стандартная процедура обработки спектров была произведена в пакете Dech-30 [21]. Значение лучевой скорости, измеренное по линиям металлов в области $5000-6500 \text{ \AA}$, составило $V_R = -2 \pm 1.5 \text{ км/с}$.

Два спектра RZ Psc были получены Ильиным [14] в августе и ноябре 2013г. с помощью 2.5-м Nordic Optical Telescope и эшелюного спектрографа FIES с высоким спектральным разрешением $R=46000$. Спектры обрабатывались в пакете FIEStool. Измерения лучевых скоростей выполнялись в процедуре *fixcor* пакета IRAF, определяющей положение кросс-корреляционного максимума, рассчитанного для наблюдаемого спектра и синтетического. Синтетический спектр был рассчитан с параметрами атмосферы, определенными в работе Потравнова и др. [12]. Для измерений были выбраны два участка спектра: $5500-5650 \text{ \AA}$ и $6000-6270 \text{ \AA}$, богатые линиями металлов. Таким путем были получены значения $V_R = -1.22 \pm 0.53 \text{ км/с}$ и

$V_r = -1.20 \pm 0.33$ км/с для дат 19.08.2013 и 21.11.2013, соответственно. Результаты всех перечисленных выше измерений представлены в табл.1. Кроме них в таблицу вошли неопубликованные данные, полученные А.С.Расторгуевым (28.10.1991 и 29.10.1991) и А.С.Расторгуевым и Т.В.Ирсамбетовой (1.11.1991 и 4.11.1991) на 1-м телескопе на горе Майданак.

Таблица 1

ЛУЧЕВАЯ СКОРОСТЬ RZ Psc

Дата	JD+ 2400000	V_r км/с	σ км/с	Обсерватория
28.10.1991	48558.335	-0.13	1.37	1
28.10.1991	48558.381	-1.49	2.03	1
29.10.1991	48559.330	-2.52	1.96	1
01.11.1991	48562.313	-1.68	1.48	1
01.11.1991	48562.360	-4.91	1.17	1
04.11.1991	48565.346	-4.92	2.32	1
04.11.1991	48565.360	-2.70	1.62	1
04.11.1991	48565.376	0.90	2.15	1
17.12.1991	48607.500	-11.75	1.10	2
09.11.2009	55144.330	-2.00	1.50	3
26.10.2012	56227.408	-4.83	0.83	4
29.10.2012	56230.447	-5.56	0.58	4
19.08.2013	56523.720	-1.22	0.53	5
01.09.2013	56537.545	-8.61	3.81	4
01.09.2013	56537.555	-5.56	4.23	4
01.09.2013	56537.569	-2.35	1.31	4
09.09.2013	56545.548	-1.41	0.86	4
09.09.2013	56545.563	-0.38	0.95	4
09.09.2013	56545.572	-0.96	0.80	4
21.11.2013	56617.530	-1.20	0.33	5

Примечание: наблюдения выполнены на Майданаке (1), в CAO (2), Терсколе (3), КраО (4), NOT (5).

Наряду со спектральными наблюдениями, в течение 2012-2013гг. в обсерватории Санглок Института астрофизики Академии наук республики Таджикистан проводились фотометрические *BVR* наблюдения RZ Psc. Средняя точность измерений составляет $0^m.02$.

Результаты фотометрии представлены в табл.2. Кроме этих данных было сделано еще несколько оценок блеска RZ Psc в полосе *V* с точностью около $0^m.1$: 14.08.2013 ($V = 12^m.0$), 17.08.2013 ($V = 11^m.8$), 22.08.2013 ($V = 11^m.6$), 20.11.2013 ($V = 11^m.8$, по сообщению Д.Н. Шаховского).

ФОТОМЕТРИЯ RZ Psc В ТЕЧЕНИЕ 2012-2013гг.

Дата	JD+ 2400000	V	I - V	V - R
17.08.2012	56157.448	11.620	0.689	
20.08.2012	56160.317	11.623	0.734	0.663
05.09.2012	56176.241	11.899	0.747	
22.09.2012	56193.160	11.627	0.738	0.644
22.09.2012	56193.437	11.969	0.758	0.606
23.09.2012	56194.183	12.124	0.841	0.737
23.09.2012	56194.459	11.830	0.804	0.621
24.09.2012	56195.186	11.887	0.722	0.649
24.09.2012	56195.501	11.891	0.790	0.641
27.09.2012	56198.221	11.599	0.775	0.615
27.09.2012	56198.460	11.598	0.770	0.535
28.09.2012	56199.301	11.580	0.763	0.484
23.10.2012	56224.167	11.674	0.732	
16.02.2013	56340.084	11.402	0.892	
18.02.2013	56342.103	11.391	0.913	
15.08.2013	56520.284	11.617	0.673	0.590
19.08.2013	56524.446	11.568	0.714	0.582
21.08.2013	56526.217	11.570	0.745	0.566
23.08.2013	56528.258	11.606	0.713	0.621
23.09.2013	56559.128	12.382	0.804	0.690
23.09.2013	56559.346	11.948	0.780	0.657
24.09.2013	56560.131	11.574	0.785	0.566
24.09.2013	56560.436	11.582	0.698	0.580
25.09.2013	56561.385	11.607	0.721	0.577
28.09.2013	56564.453	11.525	0.692	0.560
29.09.2013	56565.444	11.543	0.660	0.553
30.09.2013	56566.443	11.531	0.691	0.546
03.10.2013	56569.446	11.572	0.682	0.558
04.10.2013	56570.443	11.544	0.683	0.542
11.11.2013	56608.106	11.571	0.709	0.590
13.11.2013	56610.106	12.005	0.803	0.642
17.11.2013	56614.095	11.794	0.840	0.645
21.11.2013	56618.093	12.025	0.840	0.674
27.11.2013	56624.143	11.848		0.650

3. *Предыдущие измерения лучевой скорости RZ Psc.* В литературе опубликовано еще несколько измерений лучевой скорости RZ Psc.

В частности, в работе Шевченко и др. [16] приводятся результаты измерений V_r для 7 ночей в период с 21 января по 3 февраля 1991г. Как и в нашей работе, наблюдения этих авторов выполнялись с помощью кросс-корреляционного измерителя лучевых скоростей [20], установленного на 1-м телескопе обсерватории Майданак. На основании этих измерений Шевченко и др. [16] сделали вывод об отсутствии у RZ Psc переменности лучевых скоростей с амплитудой больше 1.5 км/с. Среднее значение лучевой скорости по этим наблюдениям составляет $V_r = -2 \pm 1.5$ км/с.

Еще одно измерение лучевой скорости звезды сделано в работе Каминского и др. [8]. Авторы исследовали спектр RZ Psc, полученный с помощью 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории и спектрографа LYNX 17 декабря 1991г. Результат их измерений: $V_r = -11.75 \pm 1.1$ км/с - существенно отличается как от данных [16], так и от результатов наших измерений. Это значение лучевой скорости также добавлено в табл.1.

4. *Обсуждение результатов.* Результаты измерений лучевой скорости RZ Psc из табл.1 представлены на рис.1 в виде гистограммы. Видно, что большую часть времени величина V_r находится в пределах ошибок на уровне $V_r \approx -1.5$ км/с, что близко к значению, приводимому Шевченко и др. [16]. Важно отметить, что лучевые скорости, определенные по двум спектрам RZ Psc высокого разрешения с NOT, показывают одинаковые значения, хотя наблюдения разделены трехмесячным интервалом.

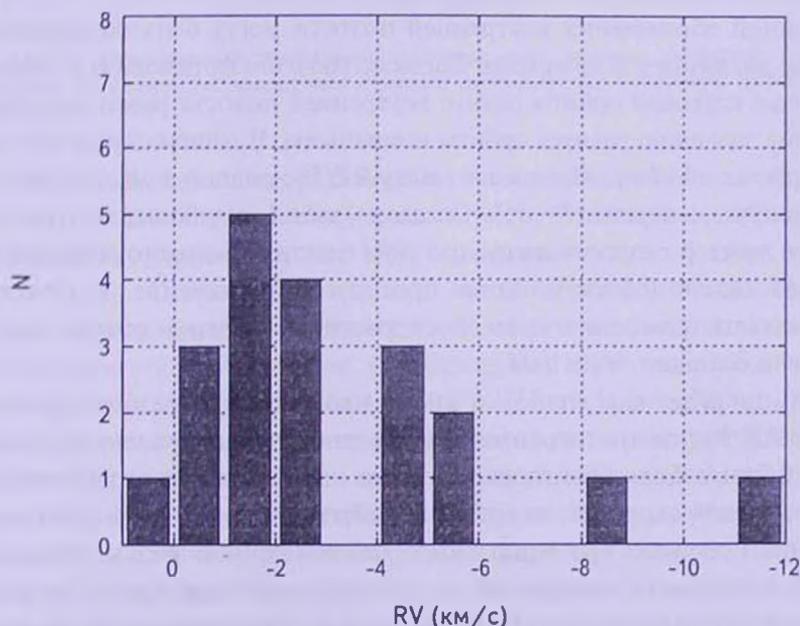


Рис.1. Гистограмма распределения лучевых скоростей RZ Psc. По оси ординат отложено число измерений, попадающих в соответствующий интервал лучевых скоростей. Общее количество измерений равно 20.

В настоящее время эти измерения лучевой скорости RZ Psc являются наиболее точными: с ошибкой около 0.5 км/с.

Предположение об отсутствии систематической переменности V_r выше этого предела позволяет наложить ограничение на массу вторичного компаньона, существование которого в ближайшей окрестности звезды недавно заподозрено в работе де Вита и др. [11].

Дело в том, что по данным [22], у RZ Psc отсутствует избыток в ближней инфракрасной области спектра (в полосах JHK). Это означает, что в ближайшей окрестности звезды пыли нет. С другой стороны, поляриметрические наблюдения RZ Psc [6,7] показали характерное для звезд типа UX Ori увеличение степени поляризации во время фотометрических минимумов, свидетельствующее о присутствии в системе поляризованного рассеянного излучения. На основании этого Шаховской и др. [7] предположили, что в диске, окружающем звезду, существует внутренняя полость, и основная масса околозвездной пыли, рассеивающей излучение звезды, находится на более удаленном расстоянии. Это предположение нашло подтверждение в работе де Вита и др. [11], в которой был обнаружен инфракрасный избыток на длинах волн $> 5\mu\text{м}$, хорошо описываемый функцией Планка при температуре около 500 К. С помощью простого соотношения: $T_d \approx T_{\text{eff}} (r/r_*)^{-1/2}$, где T_d и T_{eff} температура пыли и эффективная температура звезды, соответственно, r_* радиус звезды, был определен радиус внутренней полости: 0.7 а.е.

Причиной образования внутренней полости могут быть возмущения, вызванные движением компаньона. Согласно расчетам Аргимовича и Любова [23] в случае круговой орбиты радиус внутренней полости равен примерно удвоенному значению радиуса орбиты компаньона. В нашем случае это дает радиус орбиты ~ 0.35 а.е. Принимая массу RZ Psc равной 1 массе Солнца, отсюда получаем период $P \sim 75^d$. Согласно табл.1, наибольшая точность измерений лучевой скорости звезды (по двум спектрам высокого разрешения) составляет около 0.5 км/с. Если принять это значение в качестве полуамплитуды изменения лучевой скорости, то верхняя оценка массы компаньона составит $M_p \leq 10 M_{\text{Jup}}$.

На самом деле, как видно из рис.1, наблюдаемый разброс лучевой скорости RZ Psc на гистограмме значительно больше указанного выше значения 0.5 км/с. Если проигнорировать два самых больших отрицательных значения лучевой скорости, то средний разброс значений V_r по остальным наблюдениям составит примерно 2 км/с, что для данной звезды находится в пределах точности измерений с помощью кросс-корреляционного измерителя лучевых скоростей. Если принять это значение в качестве полуамплитуды изменений лучевой скорости звезды, то предыдущая оценка массы компаньона вырастет в 4 раза.

Если же два сильных отклонения лучевой скорости от среднего значения, лежащие в правой части гистограммы, реальны, то их невозможно объяснить в рамках простой модели с компаньоном на круговой орбите. В принципе такой тип гистограммы получается, если орбита компаньона сильно эксцентрична. Пример такой гистограммы приведен на рис.2.

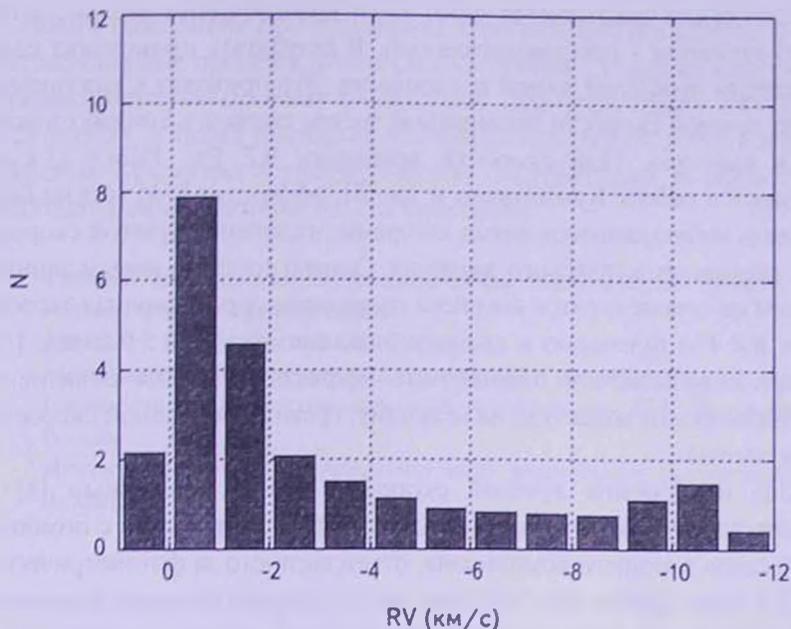


Рис.2. Теоретическая гистограмма распределения лучевых скоростей. График нормирован на количество имевшихся в нашем распоряжении измерений лучевой скорости RZ Psc.

На нем показана теоретическая гистограмма распределения лучевых скоростей для случая компаньона с эксцентриситетом орбиты $e = 0.7$, аргументом перицентра $\omega = 180^\circ$, полуамплитудой лучевых скоростей $K1 = 6$ км/с. Скорость центра масс системы подобрана таким образом, чтобы весь интервал изменений лучевой скорости примерно соответствовал наблюдаемому у RZ Psc. Для моделирования влияния ошибок измерений гистограмма свернута с гауссианой $FWHM = 1.5$ км/с. Видно, что теоретическая гистограмма качественно похожа на гистограмму лучевой скорости RZ Psc. Если принять такое объяснение, то возникает вопрос: почему в фотометрических наблюдениях RZ Psc не наблюдаются циклические изменения блеска с периодом орбитального движения компаньона (см. модели таких систем в [19])? Отсутствие таких изменений заставляет относиться с осторожностью к варианту объяснения гистограммы на основе модели с сильно эксцентрической орбитой.

Согласно [24] причиной спорадических флуктуаций лучевой скорости

RZ Psc может быть геометрическое экранирование диска звезды околозвездными пылевыми облаками. Этот эффект имеет ту же природу, что и эффект Росситера-МакЛафлина (далее Р-М эффект), впервые наблюдавшийся указанными выше авторами при спектральных наблюдениях затменных двойных звезд [25,26]. Физика этого эффекта весьма проста: в начале затмения закрывается один край вращающейся звезды, а при выходе из затмения - противоположный. В результате происходит сдвиг центра тяжести профилей линий поглощения. Это приводит к кажущемуся смещению лучевой скорости затмеваемой звезды сначала в синюю сторону, а затем в красную. При скорости вращения RZ Psc $V \sin i = 23$ км/с, определенной в работе Каминского и др. [8], эффектом Р-М можно было бы объяснить наблюдавшееся этими авторами отклонение лучевой скорости звезды от среднестатистического значения. Однако согласно новым данным, полученным на основе спектра высокого разрешения, проекционная скорость вращения RZ Psc примерно в два раза меньше: $V \sin i = 12 \pm 0.5$ км/с [12]. Это делает невозможным применение эффекта Р-М для объяснения флуктуации скорости вращения на величину, сравнимую с самой скоростью вращения звезды.

Сильное отклонение лучевой скорости звезды по данным [8] от среднестатистического значения невозможно объяснить также с помощью гипотетического внешнего компаньона, ответственного за фотометрический период 12.4 года. Дело в том, что при таком периоде сильные изменения лучевой скорости не могут происходить слишком быстро, например, на интервале времени порядка месяца. Между тем, по данным табл.1 примерно за полтора месяца до наблюдений Каминского и др. [8] лучевая скорость RZ Psc была равна -2.8 ± 2.3 км/с (среднее значение V_r по трем измерениям в ночь 04.11.1991). Таким образом, вопрос о происхождении этой аномалии в распределении лучевой скорости звезды остается открытым.

5. *Заключение.* Выполненный выше анализ измерений лучевой скорости RZ Psc позволяет сделать следующие выводы:

1) Два наиболее точных измерения лучевой скорости, сделанные во время яркого состояния звезды (см. табл.2), дают значение $V_r = -1.2 \pm 0.5$ км/с. Это значение можно считать характерной величиной лучевой скорости RZ Psc. С учетом точности этих измерений оценка верхней границы массы гипотетического компаньона, движущегося во внутренней полости околозвездного диска, составляет $M_p \leq 10 M_{Jup}$.

2) Гистограмма распределения лучевых скоростей RZ Psc, измеренных разными методами, имеет асимметричный характер. Разброс значений V_r в центральной части гистограммы (± 2 км/с) может быть вызван либо ошибками измерений, либо эффектом Росситера-МакЛафлина. Однако причины сильных отклонений лучевой скорости в направлении отрица-

тельных скоростей (одно из которых получено с высокой точностью [8]) не ясны. Необходимы дальнейшие спектральные наблюдения RZ Psc с высоким спектральным разрешением, как для получения высокоточных измерений лучевой скорости звезды, так и для изучения ее необычной спектральной переменности [14].

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН П 21 "Нестационарные процессы в объектах Вселенной". Один из авторов (Н.А.Г.) с признательностью отмечает финансовую поддержку гранта РФФИ (проект 11-02-00608), а также выражает благодарность руководству Симеизского отделения Крымской астрофизической обсерватории за предоставление наблюдательного времени на 1-м телескопе.

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Пб, Россия, e-mail: vgega@mail.ru

² Институт астрономии РАН, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Россия

⁴ Институт астрофизики Академии наук республики Таджикистан, Душанбе

ON THE RZ Psc RADIAL VELOCITY FLUCTUATIONS

I.S.POTRAVNOV¹, N.A.GORYNYA^{2,3}, V.P.GRININ¹,
N.Kh.MINIKULOV⁴

In this paper we analyze the behaviour of the radial velocity V_r of the UX Ori type star RZ Psc. Presense of the inner cavity with the radius approximately 0.7 a.u. in the circumstellar disk of this star lets to suppose the existence of the secondary component. The investigation of the radial velocity based on our measurements and the archive data does not demonstrate the periodical component of the radial velocity changes. The two most precise measurements of the V_r , obtained using the high-resolution spectra with an interval about three months, show the absence of radial velocity variations with accuracy 0.5 km/s. This provides the restriction on the upper mass limit of the hypothetic companion: $M_p \leq 10 M_{Jup}$. The possible reasons of the observed strong radial velocity fluctuations are discussed.

Key words: stars: fluctuations of radial velocity of RZ Psc

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.H.Herbig*, *Astrophys. J.*, **131**, 632, 1960.
2. *В.И.Кардаполов, В.В.Саханенок, Н.А.Шутемова*, *Переменные звезды*, **21**, 283, 1980.
3. *А.Ф.Пугач*, *Астрофизика*, **17**, 47 1981.
4. *Г.В.Зайцева*, *Переменные звезды*, **22**, 181, 1985.
5. *W.Wenzel*, *IAU Inform. Bull. Var. Stars*, **3280**, 1, 1989.
6. *Н.Н.Киселев, Н.Х.Миникулов, Г.П.Чернова*, *Астрофизика*, **64**, 334 1991.
7. *Д.Н.Шаховской, В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина*, *Астрон. ж.*, **47**, 580, 2003.
8. *Б.М.Каминский, Г.Ю.Ковальчук, А.Ф.Пугач*, *Астрон. ж.*, **44**, 611, 2000.
9. *V.P.Grinin, I.S.Potravnov, F.A.Musaev*, *Astron. Astrophys.*, **524**, A8, 2010.
10. *И.С.Потравнов, В.П.Гринин*, *Письма в Астрон. ж.*, **39**, 861, 2013.
11. *W.J. de Wit, V.P.Grinin, I.S.Potravnov et al.*, *Astron. Astrophys.*, **553**, 4, 2013.
12. *I.S.Potravnov, V.P.Grinin, I.V.Ilyin, D.N.Shakhovskoi*, *Astron. Astrophys.*, **563**, A139, 2014.
13. *J.P.Williams, L.A.Cieza*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **49**, 67, 2011.
14. *И.С.Потравнов, В.П.Гринин, И.В.Ильин*, *Астрофизика*, **56**, 493, 2013.
15. *В.П.Цесевич, Б.А.Драгомирецкая*, *Звезды типа RW Возничего*, Киев, Наукова думка, 1973.
16. *В.С.Шевченко, Е.А.Витриченко, К.Н.Гранкин и др.*, *Письма в Астрон. ж.*, **19**, 334, 1993.
17. *В.П.Гринин, А.Н.Ростопчина, Д.Н.Шаховской*, *Письма в Астрон. ж.*, **24**, 802, 1998.
18. *А.Н.Ростопчина, В.П.Гринин, Д.Н.Шаховской*, *Письма в Астрон. ж.*, **25**, 243, 1999.
19. *Т.В.Демидова, В.П.Гринин, Н.Я.Сотникова*, *Письма в Астрон. ж.*, **36**, 526, 2010.
20. *А.А.Токовинин*, *Астрон. ж.*, **64**, 196, 1987.
21. *G.A.Galazutdinov*, *SAO preprint*, №92, 1992.
22. *I.S.Glass, M.V.Penston*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **167**, 237, 1974.
23. *P.Arnyowicz, S.H.Lubov*, *Astrophys. J.*, **421**, 651, 1994.
24. *В.П.Гринин, И.С.Потравнов*, *Астрофизика*, **56**, 5, 2013.
25. *R.A.Rossiter*, *Astrophys. J.*, **60**, 15, 1924.
26. *D.V.McLaughlin*, *Astrophys. J.*, **60**, 22, 1924.