

## ФОТОМЕТРИЯ И СПЕКТРОСКОПИЯ ES Aql, SV Sge И Z UMi, ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД С ПЕРЕМЕННОСТЬЮ ТИПА R СЕВЕРНОЙ КОРОНЫ

А.Э.РОЗЕНБУШ

Поступила 12 июля 2013

Принята к печати 14 августа 2013

Выполнена *UBVR<sub>I</sub>* фотометрия трех холодных звезд с переменностью типа R Северной Короны, ES Aql, SV Sge и Z UMi. ES Aql и Z UMi во время минимумов визуального блеска продемонстрировали поведение блеска и цвета типичное данному типу переменности: уменьшение или увеличение показателей цвета при падении блеска и увеличение при восстановлении нормального состояния. Молекулярный спектр у Z UMi во второй половине минимума при ослаблении около 4<sup>m</sup> был уже нормальный, но линии дублета D Na I были еще заполнены эмиссией. Профили линий D Na I высокого спектрального разрешения у SV Sge систематически показывают смещение до -10 км/с и протяженное коротковолновое крыло, что можно расценивать как следствие постоянного истечения вещества из атмосферы звезды, не приводящего к минимумам визуального блеска уже на протяжении 9 лет. Отождествление межзвездных линий D Na I в спектрах высокого спектрального разрешения позволило подтвердить известный избыток цвета  $E(B - V)$  для Z UMi на уровне  $0^{m}.02 + 0^{m}.11$  и существенно понизить, до  $0^{m}.03$ , его значение у SV Sge. Для последней звезды это одновременно допускает возможность существенно меньшего абсолютного блеска,  $M_p \leq 2^m$ , чем допускалось ранее.

Ключевые слова: *звезды: типа R CrB; фотометрия; спектроскопия; межзвездная экстинкция - объекты: ES Aql, SV Sge, Z UMi*

1. *Введение.* Звезды с переменностью типа R Северной Короны (RCB) обладают уникальной особенностью легко выделяющей их среди других типов переменных звезд: резкие падения блеска с амплитудой до 8<sup>m</sup> и более медленное восстановление нормального блеска с длительностью всего процесса десятки-сотни суток [1,2]. Поэтому анализ фотометрических обзоров неба (в последнее время этот процесс автоматизируется), значительно расширил список звезд-кандидатов в члены этой группы переменных (MACHO [3], EROS-2 [4]). Второй критерий - спектр углеродной звезды с признаком необычной слабости линий водорода - одновременно позволяет оценивать температуру звезды. Спектры новых членов группы RCB звезд демонстрируют в основном признаки холодных углеродных звезд. Первоначально группу (около 30 объектов) составляли главным образом звезды с эффективными температурами 6000-7000 К (теплые звезды) и несколько звезд с температурами выше (до 20000 К) (горячие звезды) и ниже (4000-5000 К) (холодные звезды) этого диапазона. К холодным переменным примыкают очень холодная

( $T_{\text{eff}} \approx 3000\text{K}$ ) DY Per и ей подобные звезды, которые выделяют в подгруппу DY Per ввиду пониженной светимости: абсолютная визуальная величина  $M_V \approx 0^m$  или абсолютная болометрическая  $M_{\text{bol}} \approx -1 + -2^m$ , тогда как у теплых звезд  $M_V \approx M_{\text{bol}} \approx -5^m$  [5].

В данном исследовании рассматриваются 3 звезды из группы холодных звезд: ES Aql, SV Sge и Z UMi. История исследования двух последних звезд начинается в Симеизе (Крымская астрофизическая обсерватория, Украина) и является типичной для слабых звезд. Переменность SV Sge была обнаружена Альбицким [6] в Симеизе и несколько позже Паренаго [7] классифицировал ее как переменную типа RCB, кривая блеска хорошо известна, но цветовые характеристики в активном состоянии известны плохо. Переменность блеска Z UMi также была открыта в Симеизе [8], тип переменности уверенно классифицирован как RCB-тип в 1994г. [9]. Переменность ES Aql обнаружена в начале XX в., но классифицирована как RCB-тип только через 100 лет [10]. Это сравнительно слабые звезды: самая яркая - SV Sge в спокойном состоянии имеет визуальный блеск  $10^m.5$ , что при амплитуде основной переменности  $5^m$  и более ограничивало возможности многоцветной фотометрии, не говоря уже о спектральных наблюдениях. Из наших звезд только Z UMi имеет отрывочные данные о спектре в минимуме блеска [9]: спектроскопия низкого спектрального разрешения, относящаяся к фазе минимального блеска с ослаблением  $6^m$ , показала присутствие только эмиссии D Na I.

Мы проанализируем фотометрическое поведение звезд программы во время минимумов блеска 2006-2009гг. и дополним его результатами наших спектральных наблюдений высокого и низкого спектрального разрешения. Мы оценим межзвездное поглощение, основываясь на свойствах межзвездных линий в спектрах SV Sge и Z UMi.

Данное исследование дополняет спектрофотометрию низкого спектрального разрешения и моделирование распределения энергии в спектрах этих звезд, в ходе которых были оценены эффективные температуры, ускорения силы тяжести и некоторые основные параметры химического состава [11].

**2. Наблюдения.** Фотометрия была выполнена в касегреновском фокусе 1-м телескопа Крымской астрофизической обсерватории (КРАО, Симеиз, Крым), оснащенный ПЗС камерой Arophee Alta U42 (2k×2k) с набором стандартных UBVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> фильтров [12].

Фотометрические условия в месте наблюдений не являются удачными и стабильными для получения качественных данных [13]. Это обстоятельство и то, что изображение редко имело размер порядка 1-1.5 угловых секунды, определили необходимость получения нескольких кадров в каждом фильтре и выбора соответствующего режима камеры: ячейки матрицы объединялись 2×2 и 3×3 (масштаб поля зрения 15.5"/мм или 0".21 на пиксел). Экспозиции варьировали от 5с до 120-240с. Другие стандартные детали методики можно

Таблица 1

UBVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> ВЕЛИЧИНЫ ЗВЕЗД ОКРЕСТНОСТЕЙ ES Aql, SV Sge И Z UMi

Звезда	Номер каталога UCAC4	U $\sigma_U$	B $\sigma_B$	V $\sigma_V$	R <sub>c</sub> $\sigma_R$	I <sub>c</sub> $\sigma_I$
1	2	3	4	5	6	7
ES Aql 450-112589	1 449-112325	14.714 ±0.159	13.433 ±0.051	12.069 ±0.026	11.357 ±0.019	10.649 ±0.027
	2 450-112668	14.06	12.49	10.82	9.90	9.15
	3 450-112553	16.673 .367	15.756 .067	14.512 .032	13.892 .018	13.144 .089
	4 449-112265	-	16.386 .080	14.879 .027	14.032 .032	13.133 .028
	5 450-112591	16.049 .240	16.301 .070	15.215 .049	14.598 .096	14.051 .044
	6 450-112642	15.638 .029	15.792 .057	15.028 .031	14.579 .054	14.041 .107
	7 ---	-	17.258 .126	16.225 .047	15.707 .122	15.017 .060
	8 450-112611	-	17.242 .262	15.835 .152	15.065 .051	14.237 .060
SV Sge 539-090146	1 538-092215	-	15.451 .036	13.101 .024	11.782 .014	10.494 .013
	2 539-090223	-	16.310 .046	14.109 .016	12.871 .040	11.679 .014
	3 539-090186	-	15.927 .020	13.897 .030	12.826 .047	11.773 .012
	4 539-090297	17.18:	16.728 .132	15.486 .039	14.780 .079	14.095 .064
	5 539-090327	-	13.963 .053	13.133 .036	12.646 .016	13.173 .014
	6 539-090135	-	15.716 .027	14.893 .143	14.442 .110	13.800 .118
Z UMi 866-007160	1 866-007167	13.478 .196	12.559 .058	11.416 .034	10.821 .040	10.250 .055
	2 866-007159	11.735 .172	11.778 .075	11.163 .029	10.826 .030	10.454 .030
	3 866-007172	13.172 .183	13.236 .056	12.602 .047	12.243 .012	11.83
	4 866-007169	14.871 .119	13.684 .034	13.020 .033	12.629 .036	12.233 .040
	5 865-007465	14.52	14.37	13.690 .030	13.28	12.88
	6 866-007165	14.956 .260	14.932 .061	14.195 .040	13.808 .093	13.339 .044

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
	7 866-007155	15.140 .408	15.051 .060	14.343 .037	13.960 .048	13.471 .075
	8 866-007162	15.606 .368	15.279 .054	14.483 .034	14.025 .036	13.577 .052
	9 865-007468	16.69	15.967 .066	15.034 .029	14.492 .047	13.987 .041
	10 866-007170	15.67	16.020 .142	15.435 .149	15.111 .100	14.686 .390
	11 866-007163	16.59 .81	16.522 .111	15.620 .060	15.115 .040	14.642 .142
	14 ---	-	17.488 .174	16.726 .116	16.367 .139	15.910 .379
	15 866-007158	-	18.125 .374	16.898 .116	16.063 .069	15.252 .216
	16 ---	-	18.501 .563	17.312 .097	16.631 .061	16.210 .372
	17 ---	-	18.764 .207	17.354 .040	16.359 .047	15.186 .159

найти в работе по исследованию астроклимата для 1-м телескопа [13]. Подбор звезд поля для ES Aql и SV Sge определялся их изолированностью.

Стандартизация звезд окрестностей (табл.1) была выполнена привязкой к стандартам в экваториальных площадках SA [14]. Уравнения трансформации инструментальной системы в стандартную были получены в результате наблюдений скопления M 67 [15,16] и площадок SA 98, 105, 110, 111 [14]. Внутренняя точность фотометрии оказалась на уровне  $0^m.005$ . Уменьшение результирующей точности (вторая строка для каждой звезды в табл.1, если было три и более измерений) обусловлено ошибками учета средней атмосферной экстинкции [13]. В табл.1 приведен локальный порядковый номер звезды (верхняя строка) и ее номер в каталоге UCAC4 [17] (для Z UMi сохранена нумерация A.Henden, AAVSO). Точность фотометрии звезд сравнения (табл.1) характеризует также точность фотометрии переменных. Звезда сравнения "2" для ES Aql может быть переменной. Предельные звездные величины при единичных экспозициях составили: в полосе  $U$  около  $16^m.5$  для экспозиций порядка 240 с, в полосе  $B \sim 18^m.5 - 120$  с и  $V \sim 20^m - 21^m - 120$  с при изображении около 1.5-2 угловых секунд и при отношении сигнал/шум  $S/N = 1$ . Некоторое увеличение точности и проникающей способности в полосе  $U$  достигалось сложением нескольких изображений. Учет инструментальной системы для переменных, за исключением SV Sge (см. соответствующий пункт ниже), мы не проводили. Эта процедура в случае трансформаций спектра, наблюдаемых у наших звезд

во время минимумов блеска (изменение континуума, исчезновение линий поглощения и появление интенсивных эмиссионных линий), будет некорректной; к тому же программные звезды обладают углеродными спектрами, что также должно отображаться на уравнениях трансформации (полученных в основном по звездам кислородной последовательности).

В течение 1999-2012гг. было получено несколько спектров SV Sge на спектрографе в фокусе куде 2.6-м телескопа ЗТШ КраО, оснащенного ПЗС камерой Andor iKon (2k×2k), в области линий резонансного дублета натрия D Na I и одной из линий субординатного инфракрасного триплета кальция Ca II  $\lambda$ 8542 Å (табл.2). Спектральное разрешение около 30000, отношение сигнал/шум  $S/N \sim 80$  для линий натрия и  $\sim 50$  для линии кальция; протяженность участка спектра до 60 Å. Спектр сравнения для шкалы длин волн задавался аргон-ториевой лампой. Точность шкалы длин волн, определенная по теллурическим линиям воды около 0.03 Å или 1.5 км/с. Для дальнейшего

Таблица 2

ВЫПИСКА ИЗ ЖУРНАЛА НАБЛЮДЕНИЙ SV Sge НА СПЕКТРОГРАФЕ ФОКУСА КУДЕ 2.6-м ТЕЛЕСКОПА ЗТШ

Юлианская дата наблюдений, JD 2450000+	Визуальный блеск звезды	Время накопления, с (число экспозиций)	Область спектральной линии	Входная щель спектрографа, мм
1445.5	11.2	1800 (1)	D Na I	0.6
1453.4	11.2	4560 (2)	Ca II 8542	0.8
2568.3	11.3	1800 (1)	D Na I	0.7
2853.4	11.0	1800 (1)	D Na I	0.6
3873.4	10.8	9900 (6)	D Na I	0.7
5166.2	10.5	2400 (2)	D Na I	0.8
		1800 (1)	Ca II 8542	0.8
5437.3	10.6	7800 (5)	D Na I	0.4
		3600 (2)	Ca II 8542	0.4
5688.6	10.6	9600 (6)	D Na I	0.4
6208.3	10.6	5700 (4)	D Na I	0.6
6463.5	10.6	10800 (6)	D Na I	0.8

анализа для компенсации переменности лучевой скорости звезды ввиду ее возможных малоамплитудных пульсаций мы выполнили сдвиги спектров по шкале длин волн к нуль-пункту одного из спектров (за 2002г.). Сдвиги были в диапазоне 4 км/с, т.е. на уровне ошибок. Можно также сказать, что амплитуда пульсаций лучевой скорости звезды не превышает 4 км/с.

Для Z UMi, находившейся во время наших наблюдений в минимуме блеска, были проведены также спектральные наблюдения низкого спектрального разрешения (табл.3). Использовался спектрометр СПЭМ (Спектрограф Эопный Монино), установленный в фокусе Нэсмита 2.6-м телескопа ЗТШ КраО и оснащенный ПЗС камерой SPEC-10 (1340×100 пикселей).

ВЫПИСКА ИЗ ЖУРНАЛА НАБЛЮДЕНИЙ НА СПЕКТРОГРАФЕ  
СПЭМ В ФОКУСЕ НЭСМИТА 2.6-м ТЕЛЕСКОПА ЗТШ

Звезда	Дата наблюдений	Визуальный блеск звезды	Спектральный диапазон, Å
Z UMi	06.06.2008	14 <sup>m</sup> .8	5600-7800 3750-6000
	10.03.2009	12 <sup>m</sup> .2	5600-7550 3850-6200
	26.05.2009	11 <sup>m</sup> .8	3720-6170 5600-7890

Спектральное разрешение составляло около  $8 \text{ \AA}$ ,  $S/N > 100$ . Редукция результатов наблюдений проводилась по стандартной методике с помощью пакета программ и параметров атмосферной экстинкции, используемых в КраО и предоставленных в наше распоряжение С.Сергеевым. Звезды сравнения наблюдались в ту же ночь или ввиду нестабильных атмосферных условий в другие ночи с более благоприятными условиями. Результирующие спектры звезды скомпонованы из 2-3 перекрывающихся участков.

### 3. Дискуссия.

3.1. *Индивидуальные объекты.* ES Aql. В 2002г. была выполнена единственная фотометрия в неглубоком ( $\Delta m \sim 3^m - 4^m$ ) минимуме блеска [10]. Наша фотометрия относится к минимуму 2007-2008гг. (табл.4, рис.1).

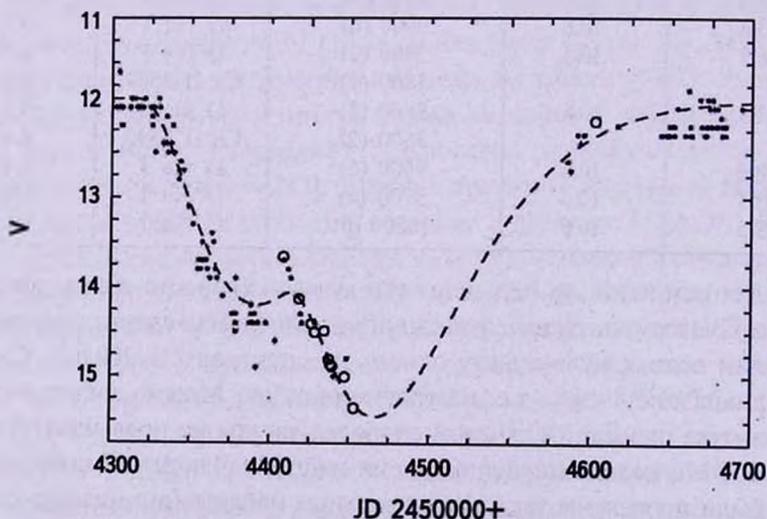


Рис.1. Кривая блеска ES Aql во время минимума 2007-2008гг. Кружки - данные табл.4; точки - наблюдения из базы данных AAVSO. Штриховая линия - аналитическая аппроксимация кривой блеска с параметрами из табл.5.

Таблица 4

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ  $ubvr_i$  ВЕЛИЧИНЫ ES Aql

JD 2450000 +	$u$	$b$	$v$	$r_i$	$i_i$
4170.62	-	16.246	14.287	12.980	11.666
4408.20	16.358	15.550	13.661	12.427	11.127
4418.20	-	16.486	14.131	12.861	11.567
4426.18	-	16.762	14.408	13.128	11.844
4428.16	16.564	16.778	14.505	13.235	11.861
4434.17	16.611	17.066	14.498	13.384	12.068
4437.16	17.134	17.071	14.808	13.529	12.200
4438.17	-	17.265	14.868	13.567	12.244
4439.15	-	17.427	14.889	13.585	12.229
4447.15	-	17.913	15.006	13.662	12.301
4453.16	-	-	15.353	13.903	12.508
4602.55	-	13.915	12.149	11.046	9.928
4971.44	14.714	13.397	11.763	10.725	9.688
4991.51	14.240	13.123	11.558	10.541	9.523
4994.50	13.985	13.118	11.553	10.581	9.545
4999.50	13.824	13.099	11.556	10.566	9.551

Минимум блеска ES Aql в 2007г. также был неглубоким (рис.1), но очень интересным в отношении поведения показателей цвета. Наша фотометрия захватывает вторичное, основное падение блеска. Далее следует пробел в наблюдениях, вызванный периодом соединения звезды и Солнца. Восстановить возможную кривую блеска во время этого пробела можно с помощью эмпирического выражения для кривой блеска во время минимума блеска [1,18]. Данный минимум можно представить двумя

Таблица 5

ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КРИВЫХ БЛЕСКА Z UMi, ES Aql В МИНИМУМАХ БЛЕСКА С ПОМОЩЬЮ ВЫРАЖЕНИЯ

$$m(t) = m_{max} + \Sigma \Delta m_i \times (\tau_i + 1)^{2.7} \times \exp(-2.7 \times \tau_i), \text{ где } \tau_i = (t - T'_i) / \Delta t_i -$$

ПАРАМЕТР ВРЕМЕНИ ДЛЯ  $i$ -ОГО ОСЛАБЛЕНИЯ [1,18]

Звезда	$i$ -й эпизод образования пылевого слоя	Момент минимального блеска в $i$ -эпизоде, $T'_i$	Продолжительность падения блеска в $i$ -эпизоде, $\Delta t_i$	Амплитуда падения блеска в $i$ -эпизоде, $\Delta m_i$
ES Aql	1	4392	77	2.3
	2	4478	72	2.6
Z UMi	1	4175	25	2.7
	2	4285	180	7.2
	3	4450	150	3.0
	4	4520	110	1.5
	5	4750	250	1.2

независимыми компонентами (рис.1, табл.5). Такое представление позволяет увидеть, что начало нашей фотометрии относится к моменту перехода от первого компонента ко второму, что выразилось в резком увеличении блеска звезды около даты JD 2454408. Показатель цвета  $u-b$  с этого момента начал уменьшаться, стал отрицательным. Амплитуда изменения составила  $1^m.2$ , что типично для звезд с переменностью типа RCB. Остальные показатели цвета ( $b-v$ ,  $v-r_c$  и  $r_c-i_c$ ) стали более красными, что также типично. Обращает на себя внимание скачкообразное поведение показателя цвета  $v-r_c$  и в меньшей степени  $u-b$  в период JD 2454428-...37. Изменения в  $v-r_c$  превышают ошибки измерений: около  $0^m.2$  и  $0^m.02$ , соответственно. В показателе цвета  $r_c-i_c$  ничего необычного не произошло, что видно также по гладким кривым блеска в соответствующих фотометрических полосах в этот интервал времени, а все остальные ( $u$ ,  $b$ ,  $v$ ) показывают отклонение. Такое отличие в поведении показателей цвета нам представляется возможным интерпретировать, основываясь на результате нашего исследования R CrB в минимуме блеска [19,20]: изменения показателей цвета  $u-b$  и  $b-v$  во многом вызваны изменением спектра звезды, линейчатого и молекулярного. Спектральные наблюдения холодных звезд с переменностью типа RCB в минимумах блеска еще немногочисленны и не систематичны (Z UMi [9,21], DY Per [22]). Но из них можно вывести, что 1) в линейчатом спектре появляются немногочисленные эмиссии, включая яркую эмиссию D Na I и 2) молекулярные полосы заметно меняют свою интенсивность (см.ниже Z UMi). То есть можно высказать допустимое предположение, что зарегистрированные нами колебания показателей цвета (например,  $\Delta(u-b) \sim 1^m.5$ ) обусловлены вариациями интенсивности молекулярных полос в спектре звезды. Дополнительный вклад вносит изменение поглощения в континууме: минимум блеска это конденсация углеродных пылинок, которые в ходе минимума меняют свой размер и соответственно волновую зависимость экстинкции.

SV Sge. В период наших наблюдений звезда была в спокойном состоянии (табл.6). Как следует из данных AAVSO, это состояние сохраняется уже с 2004г. Для нашей фотометрии это был яркий объект, поэтому в табл.6  $V$ -,  $I_c$ -величины в некоторые даты отсутствуют;  $U$ -величины были

Таблица 6

UBVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> ВЕЛИЧИНЫ SV Sge

JD 2450000 +	U	B	V	R <sub>c</sub>	I <sub>c</sub>
4174.60	-	12.508	10.521	9.378	8.330
4974.38	-	12.510	-	9.486	-
4993.48	12.8:	12.344	10.373	9.278	8.251
5004.41	13.7	12.706	10.527	9.380	-

определены привязкой к SA-стандартам, так как в поле зрения камеры не было ярких в этой полосе звезд сравнения (табл.1).

В сравнении с нашей более ранней фотометрией [23] звезда показывает несколько более яркий блеск, на  $0^m.2-0^m.3$ , что можно объяснить как переменностью блеска вследствие пульсаций, так и уменьшением околозвездной экстинкции (о рассеянии околозвездной пылевой среды см. ниже).

С 1998г. SV Sge является объектом нашего мониторинга линий дублета натрия D Na I и одной из линий ИК триплета Ca II  $\lambda 8542$  (табл.2) [19,24,25]. Сравнение с профилем линий дублета за 1998г. показывает, что околозвездная абсорбция на скорости около  $-240$  км/с присутствовала только в первую дату, когда звезда медленно восстанавливала нормальное состояние после минимума блеска, и отсутствовала на всех остальных 8 спектрах. Можно видеть, что линии дублета натрия всегда имеют смещение до  $-10$  км/с и протяженное коротковолновое крыло, что можно интерпретировать как свидетельство истечения вещества из атмосферы звезды. Такая интерпретация находится в рамках общеизвестного понимания, что звезды с переменностью типа RCB являются объектами с интенсивной потерей массы. Профили линии He I  $\lambda 10830$  у 9 из 10 звезд обзора [26] указывали на интенсивное истечение вещества не зависимо от состояния соответствующей звезды: в спокойном или активном состоянии был объект. Сравнение наших 9 профилей звездных линий дублета натрия не показывает драматических изменений. Единственное большое отличие относится к профилю за JD 2452568, когда обе линии

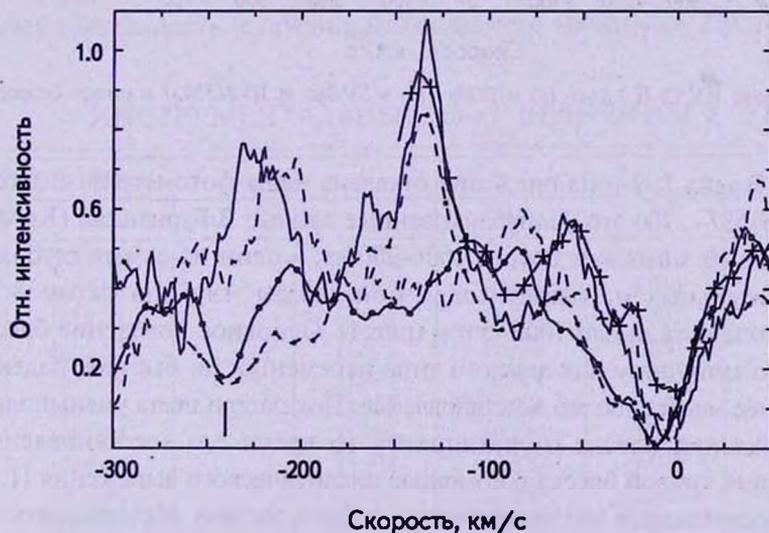


Рис.2. Участок спектра SV Sge в области линий дублета D Na I в шкале скорости. Сплошная и штриховая линии с точками - соответственно линии D1 и D2 Na I за JD 2451445 [19]. Сплошная и штриховая линии - соответственно линии D1 и D2 Na I за 15-16.05.2011. Линия с плюсами - линия D2 за JD 2452568. Вертикальная линия показывает положение околозвездного компонента в первую дату.

дублета были наиболее узкими (рис.2). ИК линия кальция Ca II  $\lambda 8542$  во все 3 даты наших наблюдений имеет асимметричное ядро (рис.3).

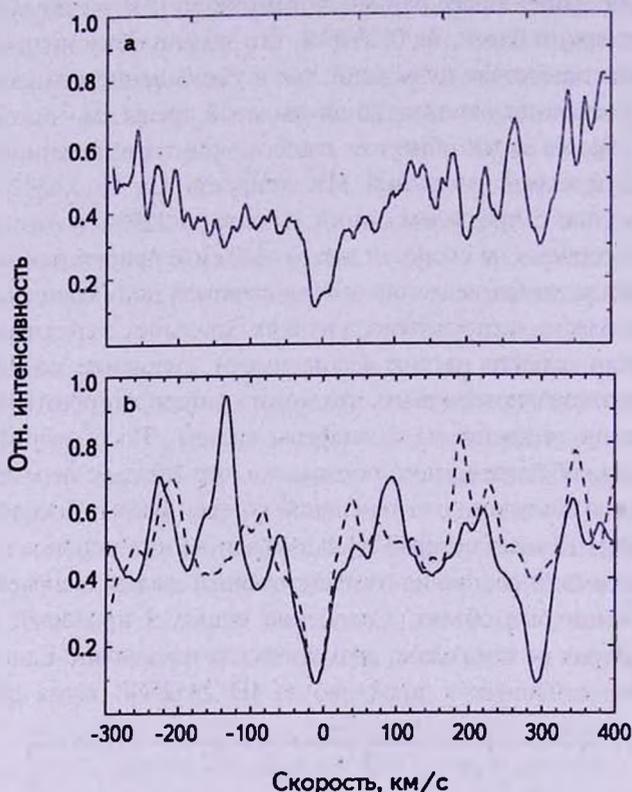


Рис.3. Линии ИК Ca II  $\lambda 8542$  (a) и D Na I (b) у SV Sge за JD 2455437 в шкале скорости.

Z UMi. В табл.1, 7 и на рис.4 представлена наша фотометрия. В табл.7 даты JD 2451587-...700 это неопубликованные данные В.Бурнашева (КраО).

Уникальный минимум блеска 2006-2009гг. - один из самых глубоких и продолжительных из известных у этой звезды: глубина около  $8^m$  и продолжительность около 1000 суток (рис.4). Основное поведение блеска звезды было типичным для данного типа переменности: быстрое падение блеска и более медленное его восстановление. Показатели цвета уменьшились во время падения блеска и увеличились во время его восстановления. Представление кривой блеска с помощью аналитического выражения [1,18] позволяет сказать, что этот минимум мог быть вызван образованием на луче зрения нескольких пылевых слоев разной оптической толщины, которые формально можно рассматривать как независимые эпизоды в развитии минимума блеска. Обычные минимумы блеска у Z UMi можно интерпретировать образованием одного пылевого слоя. На рис.4

показан результат аналитического описания кривой блеска в минимуме блеска с помощью выражения из [1,18] и параметрами табл.5.

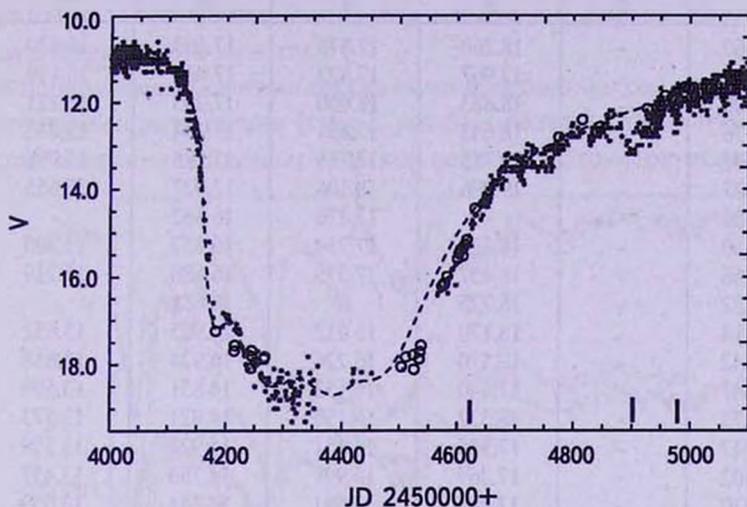


Рис.4. Кривая блеска Z UMi в минимуме 2006-2009гг. Кружки - наша фотометрия, точки - данные AAVSO. Вертикальные линии указывают время получения наших спектров (табл.1). Штриховая линия - аналитическое представление кривой блеска с параметрами табл.5.

Примечательно, что в этом наборе из пяти компонент представления кривой блеска в минимуме блеска есть компонент, который можно назвать главным, а остальным четырем отвести роль дополнительных: 2-й компонент задает длительность и глубину наблюдаемого минимума. Поэтому наблю-

Таблица 7

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ  $ubvr_i$  ВЕЛИЧИНЫ Z UMi

JD2450000+	$u$	$b$	$v$	$r_c$	$i_c$
1	2	3	4	5	6
1587.76		11 <sup>m</sup> .992	10 <sup>m</sup> .963	9 <sup>m</sup> .627	
1605.68		12.057	10.995	9.754	
1618.73		11.968	10.945	9.707	
1665.57		11.873	10.851	9.650	
1677.47		11.883	10.851	9.630	
1684.45		11.870	10.873	9.659	
1691.50		11.906	10.819	9.621	
1700.45		11.934	10.870	9.681	
4182.445	-	-	17.240	16.279	14 <sup>m</sup> .785
4214.517	-	18.364	17.690	16.749	15.351
4215.483	-	-	17.565	16.818	15.419
4243.400	-	-	18.082	17.287	16.001
4244.481	-	-	17.686	17.241	16.100
4245.394	-	-	17.811	17.290	16.087
4251.275	-	-	17.942	17.404	16.228

Таблица 7 (окончание)

1	2	3	4	5	6
4266.360	-	18.260	17.876	17.103	16.430
4267.345	-	17.967	17.823	17.468	16.130
4503.500	-	18.883	18.050	17.293	16.121
4511.576	-	18.643	17.831	17.144	15.833
4524.521	-	18.718	17.786	17.285	15.768
4525.527	-	19.296	18.108	17.027	15.655
4534.480	-	-	17.876	16.862	-
4535.430	-	18.626	17.714	16.857	15.505
4537.456	-	18.457	17.573	16.686	15.219
4542.282	-	18.725	-	16.681	-
4573.314	-	18.170	16.212	14.965	13.652
4574.242	-	17.570	16.226	14.924	13.618
4576.347	-	17.640	16.153	14.851	13.599
4577.273	-	18.332	16.190	14.921	13.573
4578.247	-	17.935	16.151	14.922	13.559
4582.402	-	17.869	15.997	14.756	13.457
4600.270	-	17.388	15.591	14.341	13.059
4602.267	-	17.444	15.478	14.256	12.981
4603.287	-	17.479	15.443	14.227	12.963
4604.276	-	17.560	15.422	14.202	12.937
4605.334	-	17.445	15.378	14.179	12.917
4606.276	-	17.256	15.391	14.148	12.896
4609.309	-	-	15.361	14.077	12.810
4611.309	-	17.336	15.306	14.069	12.813
4613.291	-	-	15.262	14.059	12.784
4616.310	-	17.008	15.159	13.956	12.713
4630.332	-	-	14.441	13.260	12.121
4774.15	15.242	14.496	12.808	11.755	10.716
4814.555	14.967	14.219	12.409	11.406	10.382
4926.398	14.189	13.656	12.154	11.216	10.369
4956.48	13.915	13.369	11.862	10.897	-
4967.341	14.096	13.435	11.915	10.975	10.041
4969.312	14.110	13.473	11.955	11.172	10.066
4970.312	13.974	13.465	11.964	11.021	10.071
4973.301	13.953	13.479	11.971	11.018	10.084
4974.320	14.168	13.458	11.961	11.028	10.107
4989.333	13.736	13.133	11.669	10.734	9.831
4990.334	13.631	13.123	11.653	10.748	-
4992.343	13.561	13.120	11.645	10.737	9.769
4996.347	13.745	13.173	11.688	-	-
4997.334	13.593	13.144	11.689	10.801	-
4998.348	13.587	13.180	11.693	10.780	9.848
5001.321	13.751	13.177	11.709	10.766	-
5005.362	13.630	13.176	11.672	10.786	9.837

денный нами минимум блеска можно предложить описать образованием на луче зрения одного плотного пылевого слоя в потоке потери массы звездой, т.е. 2-й компонент можно связать с главной оболочкой, а другие 4 компонента

это дополнительные уплотнения, возникшие в главной оболочке. Если посмотреть на историческую кривую блеска Z UMi, то можно заметить, что в основном наблюдаются минимумы несложной формы, которые можно описать одним компонентом.

В период восстановления блеска нами был получен ряд спектров низкого спектрального разрешения (табл.3, рис.5). Средний спектр имеет разрыв в области соединения краевых участков спектра: фотометрические условия в

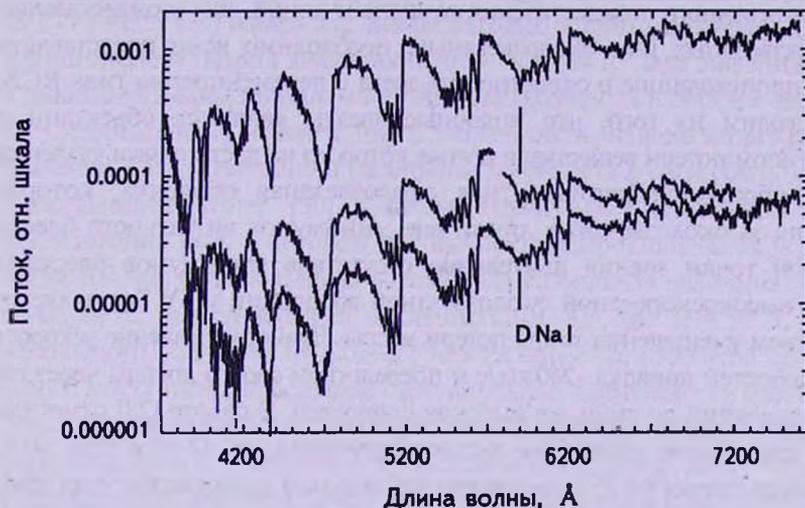


Рис.5. Спектр Z UMi на выходе из минимума 2006-2009гг. Снизу вверх - JD 24564901, ...4624, ...4546. Вертикальные линии - положение линий дублета D Na I. Средний спектр имеет два участка с разными нуль-пунктами шкалы потока (см.текст).

ночь наблюдения были нестабильны. Каких-либо эмиссий не было. Только на спектре за JD 2454624, когда блеск был ослаблен на  $\sim 4^m$ , линии дублета натрия D Na I возможно были заполнены эмиссией, так как известно, что в фазе минимального блеска они очень интенсивны [9]. При ослаблении блеска около  $1^m$  и  $0^m.6$  абсорбции D Na I, H и K Ca II имели нормальную интенсивность. Молекулярные полосы во все три даты спектральных наблюдений имели одинаковую интенсивность.

3.2. *Межзвездное поглощение.* Полнота анализа фотометрии переменной звезды подразумевает определение избытка цвета  $E(B-V)$ , что обычно выводится как разность наблюдаемого показателя цвета, возможно искаженного межзвездным поглощением, и нормальным показателем цвета звезды соответствующего спектрального класса. Но звезды с переменностью типа RCB, особенно холодные звезды, обладают химическим составом и соответственно спектрами, отличающими их от нормальных звезд, поэтому здесь такой подход затруднителен. Также при моделировании распределений энергии в спектрах наших звезд [11] остро стоял вопрос учета межзвездной

экстинкции, так как это заметно отражалось на параметрах атмосферы звезды в случае больших значений экстинкции и соответственно возможных больших ошибках звездных параметров. Здесь мы оценим этот важный параметр из анализа наших спектральных наблюдений высокого разрешения и, опираясь на присутствие межзвездных линий в спектре звезды. Но вначале обратим внимание на присутствие околозвездных компонент, в частности, у линий резонансного дублета натрия. Последние из-за дублирования деталей очень удобны для уверенного отождествления компонент линий. Для отождествления их как межзвездных или околозвездных, необходимо ясно представлять процессы, происходящие в окрестностях звезд с переменностью типа RCB.

Мы исходим из того, что подобные звезды являются объектами с высоким темпом потери вещества, в потоке которого на достаточном удалении от звезды образуется перманентная околозвездная оболочка, которая ответственна за околозвездные линии вне минимумов визуального блеска [27]. С этой точки зрения длительное отсутствие минимумов блеска и отсутствие высокоскоростной околозвездной абсорбции у SV Sge является свидетельством уменьшения темпа потери массы. Лучистое давление ускоряет пыль до скоростей порядка  $\sim 240$  км/с и посредством своего дрейфа через газ ускоряет последний до столь же высоких скоростей. В работе [28] отметили у SV Sge двукратное колебание потока излучения на 12 мкм при мало изменившемся потоке на 25 мкм в эпохи наблюдений космических программ IRAS (1983г.) и Spitzer (май 2008г.). Такое возможно при уменьшении температуры перманентной оболочки как следствия увеличения ее радиуса. Масса оболочки, а, следовательно, и ее светимость при этом может не меняться. Время рассеяния перманентной оболочки можно оценить из простых рассуждений, используя закон Больцмана и закон смещения Вина. При скорости выноса пыли  $V \approx 240$  км/с увеличение максимальной длины волны излучения оболочки (3-8 мкм) в два раза, чтобы ИК-избыток на этих длинах волн практически не регистрировался, происходит за несколько месяцев - год. Эквивалентные ширины этих высокоскоростных околозвездных линий при этом уменьшаются в квадратичной зависимости. Постоянное истечение вещества из атмосферы/фотосферы звезды имеет своим следствием отрицательное смещение на несколько км/с линий дублета натрия и протяженное синее крыло этих линий [25]. Таким образом, две компоненты: высокоскоростная (200-300 км/с) и низкоскоростная (до десятка км/с) являются первыми кандидатами на исключение из списка межзвездных.

Исследования межзвездной среды устанавливают различные соотношения между ее характеристиками. В недавнем исследовании [29] приведены соотношения избытка цвета  $E(B - V)$  и эквивалентной ширины  $EW$  межзвездных линий дублета натрия, выведенные из анализа обширного высококачественного спектрального материала:

$$\begin{aligned} \log E(B-V) &= 2.16 \times EW(D2) - 1.91, \text{ для линии } D2 \text{ Na } 15889, \\ \log E(B-V) &= 2.47 \times EW(D1) - 1.76, \text{ для линии } D1 \text{ Na } 15896. \end{aligned} \quad (1)$$

Применение данного соотношения требует определенной осторожности. Сами авторы указывают на возможные отклонения от (1) в направлениях или областях Галактики, где меняется соотношение газ/пыль. Ошибку в избытке цвета авторы оценили в  $0^m.15$ .

Применив это соотношение к SV Sge для известного избытка цвета  $E(B-V) = 0^m.9$  [30] имеем для эквивалентных ширин межзвездных компонент линий дублета натрия значения  $0.863 \text{ \AA}$  и  $0.694 \text{ \AA}$ . Эти значения сравнимы с эквивалентными ширинами линий, наблюдаемых в спектре звезды (рис.2, 3). Следовательно, избыток цвета должен быть меньше вышеприведенного значения. Соответственно и расстояние до объекта должно быть меньше, чем было выведено ранее [30]. К такому выводу нас подталкивает и результат исследования [31], в котором для выборки углеродных звезд, куда входила также SV Sge, была выведена абсолютная визуальная величина  $M_V = 0^m$ . Для областей с галактическими координатами SV Sge ( $l = 50^{\circ}.5$ ,  $b = 4^{\circ}.4$ ) и небольшого удаления от Солнца межзвездные компоненты спектральных линий могут иметь небольшое отрицательной смещение на несколько км/с. Так как наблюдаемые звездные линии дублета натрия также имеют коротковолновое смещение, то межзвездные линии могут участвовать в формировании красного крыла этих линий. Для анализа наблюдаемых линий дублета мы фиксировали несколько параметров, которые представляли в шкале скорости относительно других линий спектра: смещение линий, представленных доплеровским профилем, положение красного крыла линий на половине интенсивности, ширина линий на половине интенсивности и наличие какого-либо постоянного компонента и его скорость смещения. Из анализа этих данных следует, что смещение положения линий происходило в диапазоне  $-4 \div -16$  км/с. Красное крыло линий смешалось в диапазоне  $1 \div 10$  км/с. Эти значения заметно выше, чем диапазон смещения спектров для их совмещения (как описано в пункте редукции наблюдений), т.е. это свойство линий собственно звезды. Следовательно, межзвездные линии если и присутствуют, то не участвуют в формировании красного крыла линий дублета и имеют другие значения скорости. На всех 7 спектрах в обеих линиях натрия присутствует компонента на скорости  $-30 \div -40$  км/с. Околос звездная природа этих линий маловероятна. Но, в то же время, скорость (положение) этих линий значительно отличается от скорости вещества, участвующего в галактическом вращательном движении в данном направлении. Ее эквивалентная ширина значительно меньше вышеприведенных значений, грубо можно оценить ее около  $0.15 \text{ \AA}$ . Этому значению соответствует избыток цвета менее  $0^m.03$ . А это, возвращаясь к данным работы [30], означает, что расстояние до объекта 250-500 пк и абсолютный блеск SV Sge может быть

понижен от предыдущего значения  $-2^m.5$  до  $M_V \approx 2^m$  и более. При этом основной вклад в это изменение вносит уменьшение межзвездного поглощения почти на  $3^m$ . Вопрос межзвездных линий в спектре SV Sge все же можно оставить открытым до получения более качественного материала (спектральное разрешение и отношение сигнал/шум). Но ясно, что  $E(B-V)$  для SV Sge значительно меньше  $0^m.9$ .

Для Z UMi воспользуемся данными [32], которые линии дублета натрия разложили на три компоненты. Самую интенсивную из них со смещением около  $-10$  км/с относительно звезды они связали с ранее выброшенным веществом. Но данное допущение с нашей точки зрения требует коррекции, исходя из вышеописанных процессов, происходящих в атмосфере и ближайших окрестностях звезды. Линии с подобным смещением следует отождествить с постоянно истекающим веществом, а не с "ранее выброшенным" (в последнем минимуме визуального блеска). Два других компонента D Na I с положительным смещением и эквивалентными ширинами  $(0.10+0.07) \text{ \AA}$  и  $(0.32+0.35) \text{ \AA}$  для линий D1  $\lambda 5896$  и D2  $\lambda 5889$  соответственно в работе [32] связали с межзвездной средой. Эти значения ведут к значениям избытка цвета для Z UMi  $0^m.02+0^m.11$ , что совпадает с данными [33] и высокой галактической широтой звезды ( $b=33^\circ$ ).

4. *Заключение.*  $UBVR_cI_c$  фотометрия двух холодных звезд с переменностью типа R Северной Короны, ES Aql и Z UMi, показала типичное данному типу переменности поведение блеска и цвета во время минимумов блеска: уменьшение или увеличение показателей цвета при падении блеска и увеличение при восстановлении нормального состояния. Молекулярный спектр у Z UMi во второй половине минимума при ослаблении около  $4^m$  был уже нормальный, только линии дублета Na I D были заполнены эмиссией.

Профили линий D Na I высокого спектрального разрешения у SV Sge систематически показывают смещение до  $-10$  км/с и протяженное коротковолновое крыло, что можно расценивать как следствие постоянного истечения вещества из атмосферы звезды, не приводящего к минимумам визуального блеска уже на протяжении 9 лет.

Отождествление межзвездных линий D Na I в спектрах высокого спектрального разрешения позволило подтвердить известный избыток цвета  $E(B-V)$  для Z UMi  $0^m.02+0^m.11$  и существенно понизить, до  $0^m.03$  и менее, его значение у SV Sge. Для последней звезды это одновременно допускает возможность существенно меньшего абсолютного блеска,  $M_V \leq 2^m$ , чем допускалось ранее.

Автор признателен наблюдателям переменных звезд за возможность использования международной базы данных AAVSO. Это исследование было выполнено с использованием базы данных SIMBAD (Страсбург,

Франция). Автор признателен В.Бурнашеву за любезное предоставление результатов по  $BVR_c$  фотометрии Z UMi, С.Сергееву за любезно предоставленный комплекс программ обработки спектров и другие данные.

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,  
Украина, e-mail: aeros@mao.kiev.ua      arosenbush@gmail.com

## PHOTOMETRY AND SPECTROSCOPY OF ES Aql, SV Sge AND Z UMi, COOL STARS WITH THE VARIABILITY OF THE R CORONAE BOREALIS

A.E.ROSENBUSH

There was  $UBVR_cI_c$  photometry of three cool stars with the variability of the R Coronae Borealis type, ES Aql, SV Sge and Z UMi. ES Aql and Z UMi during its visual light minima showed a behaviour of light and color typical to this type of variability: increases or decreases the color indexes during the fall of light and increase during the recovery to the normal state. The molecular spectrum of Z UMi in the second half of the light minimum by the weakening at about  $4^m$  has already normal, but the doublet lines D Na I were still filled with an emission. The D Na I line profiles of the high spectral resolution at SV Sge systematically show a blue shift to about 10 km/s and extended blue wing, which can be considered as a consequence of constant outflow of matter from the star's atmosphere, not leading to the visual light minimum for over 9 years. The identification of the interstellar D Na I lines in the high resolution spectra has confirmed the well-known color excess of  $E(B-V)$  of the Z UMi to be equal  $0^m.02+0^m.11$  and substantially reduced up to  $0^m.03$  its value at SV Sge. For the last star is at the same time it suffers the possibility of significantly smaller absolute magnitude,  $M_V \leq 2^m$ , than previously allowed.

Key words: stars: R CrB type: photometry: spectroscopy: interstellar extinction -  
objects: ES Aql, SV Sge, Z UMi

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.Э.Розенбуш, *Астрофизика*, 39, 145, 1996.
2. G.C.Clayton, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 108, 225, 1996.
3. C.Alcock, R.A.Allsman, D.R.Alves et al., *Astrophys. J.*, 554, 298, 2001.
4. P.Tisserand, J.B.Marquette, P.R.Wood et al., *Astron. Astrophys.*, 481, 673, 2008.
5. Л.А.Яковина, А.Ф.Пугач, Я.В.Павленко, *Астрон. ж.*, 86, 211, 2009.
6. V.Albitzky, *Astron. Nachrichten*, 235, 317, 1929.
7. П.Паренаго, *Переменные звезды*, 4, 301, 1934.
8. S.Beljawsky, *Переменные звезды*, 4, 345, 1934.
9. P.J.Benson, G.C.Clayton, P.Garnavich et al., *Astron. J.*, 108, 247, 1994.
10. G.C.Clayton, D.Hammond, J.Lawless et al., *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 114, 846, 2002.
11. Л.А.Яковина, А.Э.Розенбуш, Я.В.Павленко, В.М.Каминский, *Астрон. ж.*, 90, №10, 2013 (в печати).
12. M.Bessell, S.Murphy, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 124, 140, 2012.
13. А.Э.Розенбуш, А.П.Видьмаченко, *Кинематика и физика небесных тел*, 27, 72, 2011.
14. A.U.Landolt, *Astron. J.*, 137, 4186, 2009.
15. M.D.Joner, B.J.Taylor, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 102, 1004, 1990.
16. K.A.Montgomery, L.A.Marschall, *Astron. J.*, 106, 181, 1993.
17. N.Zacharias, C.T.Finch, T.M.Girard et al., *Astron. J.*, 145, A44, 2013.
18. А.Э.Розенбуш, *Письма в Астрон. ж.*, 18, 158, 1992.
19. А.Э.Розенбуш, *Астрофизика*, 43, 587, 2000.
20. A.E.Rosenbush, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Suppl. Ser.*, No3, 399, 2001.
21. A.Goswami, N.K.Rao, *Observatory*, 119, 22, 1999.
22. L.Zacs, S.Mondal, W.P.Chen et al., *Astron. Astrophys.*, 472, 247, 2007.
23. A.E.Rosenbush, *Astron. Nachrichten*, 316, 213, 1995.
24. A.E.Rosenbush, A.V.Bondar', *Baltic Astronomy*, 12, 369, 2003.
25. А.Э.Розенбуш, *Астрофизика*, 50, 603, 2007.
26. G.C.Clayton, T.R.Geballe, L.Bianchi, *Astrophys. J.*, 595, 412, 2003.
27. A.E.Rosenbush, *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*, 391, 39, 2008.
28. D.A.Garcia-Hernandez, K.N.Rao, D.L.Lambert, *Astrophys. J.*, 739, 37, 2011.
29. D.Poznanski, J.X.Prochaska, J.S.Bloom, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 426, 1465, 2012.
30. А.Э.Розенбуш, *Астрометрия и Астрофизика*, 44, 13, 1981.
31. G.Knapp, D.Pourbaix, A.Jorissen, *Astron. Astrophys.*, 371, 222, 2001.
32. T.Kipper, V.G.Klochkova, *Baltic Astronomy*, 15, 531, 2006.
33. P.Tisserand, *Astron. Astrophys.*, 539, A51, 2012.