

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.4-521

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУППЫ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЗВЕЗД ВОЛЬФА-РАЙЕ. I. WN ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ

Л.Н.КОНДРАТЬЕВА, И.В.РЕВА, Э.К.ДЕНИСЮК,
С.А.ШОМШЕКОВА, Г.К.АЙМАНОВА

Поступила 1 сентября 2023

Принята к печати 28 ноября 2023

Фотометрические и спектральные наблюдения 11-ти звезд Вольфа-Райе WN последовательности выполнялись в АФИФ в 2021–2022гг. На основе проведенных наблюдений получены оценки блеска объектов в фильтрах BVRc и абсолютные потоки излучения в эмиссионных линиях. Изменения блеска в пределах $0^m.1 - 0^m.15$ зарегистрированы в звездах WR 1, WR 120, WR 151, WR 152. Изменения эмиссионных потоков обнаружены в спектрах нескольких объектов: WR 120, WR 128, WR 145.

Ключевые слова: *переменные звезды: Вольфа-Райе звезды: фотометрия: спектрофотометрия*

1. *Введение.* Звезды Вольфа-Райе образуются в процессе эволюции массивных О-звезд, которые теряют свои водородные оболочки, покидая Главную последовательность (ГП). Остаточные ядра начинают сжиматься, вызывая в недрах звезды последовательность ядерных реакций, в процессе которых формируются тяжелые химические элементы. Широкие эмиссионные линии, наблюдаемые в спектрах WR звезд, формируются в зонах плотного высокоскоростного звездного ветра [1].

Стадия WR является промежуточным этапом на эволюционном пути массивных звезд к их конечному состоянию нейтронной звезды или черной дыры. Некоторые очень массивные звезды приобретают WR-характеристики еще на стадии ГП, поэтому их оболочки могут содержать некоторое количество водорода [2]. Звезды Вольфа-Райе играют важную роль в эволюции: во-первых, они обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами, такими как He, C, N, во-вторых, они рассматриваются как предшественники сверхновых и как возможные источники рентгеновских вспышек [3–6]. Существуют три основные категории звезд WR: WN, WC и WO, содержащие соответственно избытки азота, углерода и кислорода в их спектрах. Считается, что последовательность WN является результатом цикла CNO (сгорание H),

тогда как звезды последовательностей WC и WO образуются в результате тройного альфа-процесса.

Значительная часть звезд WR - двойные системы. В так называемой "системе встречных ветров" (CWB) формируются симметричные ударные волны [7,8]. В этом случае переменность профилей эмиссионных линий может носить периодический характер и быть связана с орбитальным движением звездных компонентов. Наблюдаемая фотометрическая переменность звезд WR может быть вызвана орбитальным движением компонентов и/или флуктуациями поглощения вдоль луча зрения из-за неоднородности пылевого компонента. Кроме того, спектральная переменность в ряде случаев связана с изменением характеристик звездного ветра [9]. В звездах WR типа CIR (Co-rotating Interaction Regions) наблюдается появление крупномасштабных деталей, накладывающихся на крылья профилей широких эмиссионных линий [10,11].

Физические свойства звезд WR изучаются в широком диапазоне длин волн [12-16]. В то же время по многим объектам существует дефицит экспериментальных данных. В связи с этим мы инициировали фотометрические и спектральные наблюдения со средним разрешением в поисках спектральной и фотометрической активности группы звезд WR. В программу наблюдений включены объекты умеренной яркости, относящиеся к последовательностям WN, WC и WO. Большинство из них слабее 10^m в фильтре V. В данной статье рассматриваются результаты, полученные для звезд WN последовательности. Результаты, полученные для WC и WO звезд, будут опубликованы позднее.

Список объектов, описание наблюдений и обработки данных приведены в разделе 2. В разделе 3 представлены следующие результаты: оценки BVRCs, потоков излучения в эмиссионных линиях и эквивалентных ширин профилей линий. Обсуждение полученных данных представлено в разделе 3.

2. Наблюдения и обработка данных. Спектральные наблюдения проводились в 2021-2022гг. на 0.7-м телескопе АЗТ-8, установленном в обсерватории Каменское Плато Астрофизического института им. В.Г.Фесенкова (АФИФ). Использовался спектрограф с дифракционной решеткой 400 штр/мм, ширина входной щели 10". В качестве детектора использовалась ПЗС-камера SBIG STT-3200 (2184 x 1472, 6.8 мкм). Наблюдения выполнялись в двух спектральных диапазонах: 4300-5300 Å и 6400-7400 Å с дисперсией 1.1 Å / пиксель. Калибровка шкалы длин волн проводилась с помощью лампы, в спектре которой представлены эмиссионные линии He-Ne-Ar. Для обработки спектрограмм применялась стандартная процедура: вычитание темного изображения (dark image) и поправка за атмосферное поглощение. Для каждой WR-звезды подбиралась наиболее близкая к ней стандартная звезда с известным

Таблица 1

СПИСОК ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Название объекта	Sp	α (2000) h m s	δ (2000) o ' "	Другое название
WR1	WN4	00 43 28	64 45 35	HD 4004
WR 2	WN2b	01 05 23	60 25 19	HD 6327
WR 3	WN3ha	01 38 56	58 09 22	HD 9974
WR 120	WN7	18 41 00	-04 26 14	TH14-4
WR 128	WN4(H)+OB?	19 48 32	18 12 03	HD 187282
WR 141	WN5+O5V-III	20 21 31	36 55 12	HD 193928
WR 145	WN7o/CE+?	20 32 06	40 48 29	EM*AS 422
WR 148	WN8H+B3IV/BH	20 41 :21	52 35 12	HD 197406
WR 151	WN4+OV	22 09 33	57 44 30	CX Cep
WR 152	WN3(h)	22 16 24	55 37 36	HD 211564
WR 153	WN6o/O6	22 18 45	56 07 36	HD 211853

распределением энергии из каталога [17]. Учет атмосферного поглощения выполнялся независимо для объекта и стандарта. Коэффициенты прозрачности P_λ были получены для обсерватории - места расположения телескопа АЗТ-8. Исправленный спектр стандартной звезды использовался для кривой спектральной чувствительности аппаратуры и, с учетом разности экспозиций, для калибровки спектра исследуемого объекта в энергетических единицах.

Фотометрические наблюдения проводились на 1-м телескопе Carl Zeiss Jena, расположенном на Тянь-Шаньской Астрофизической обсерватории (ТШАО) АФИФ. Использовался набор фильтров Astrodon BVRc и две ПЗС-камеры: ПЗС Alta F16M (4096×4096, 9 μ) использовалась до ноября 2021г. и была заменена на ПЗС ApogeeU9000D9. Поле зрения составляло 20'×20', а угловой масштаб изображения - 0.38"/пиксель. К сожалению, в середине 2022г. фотометрические наблюдения были прерваны на 3 месяца из-за проблем с ПЗС-камерой. Первичная обработка изображений состояла из стандартных операций со служебными файлами Bias, Dark и Flat. Измерения изображений проводились с использованием стандартных пакетов программ IRAF и MaximDL-6. Стандартами служили близкие к объекту по яркости звезды поля с известными значениями BVRc. Уравнения для перевода инструментальных оценок блеска в стандартную систему BVRc были получены при наблюдениях стандартных площадок [18].

3. Полученные результаты. В нашу программу исследований было включено 18 звезд WR: WN (11), WC (6) и WO (1) последовательностей, большинство объектов слабее 10^m (в фильтре V), некоторые из них плохо изучены. В данной статье рассматриваются результаты, полученные для звезд

WN последовательности. Наблюдения проводились в 2021-2022гг. В табл.2 приведены результаты фотометрических наблюдений звезд WN. В первом столбце указано название объекта, его классификация и яркость в фильтрах В и V из астрономической базы данных SIMBAD. Последующие столбцы содержат даты, юлианские даты и значения BVRc.

Таблица 2

ОЦЕНКИ БЛЕСКА ИССЛЕДУЕМЫХ ЗВЕЗД WN

Название объекта	Дата наблюдений	JD-2400000	B	V	Rc
1	2	3	4	5	6
WR 1 WN4 B=10.72 V=10.14 [19]	2022-01-21	59601.10	10.47±0.05	10.32±0.05	10.35±0.06
	2022-01-27	59607.08	10.46±0.05	10.32±0.05	10.35±0.06
	2022-02-04	59615.06	10.39±0.05	10.21±0.02	10.28±0.06
WR 2 WN2b B=11.49 V=11.33 [20]	2021-11-21	59540.20	11.44±0.07	11.38±0.06	10.98±0.05
	2021-12-01	59550.17	11.43±0.08	11.38±0.07	10.98±0.05
	2021-12-09	59558.18	11.43±0.07	11.38±0.07	10.98±0.06
	2021-12-20	59578.13	11.44±0.07	11.37±0.07	10.97±0.06
	2022-01-21	59601.12	11.43±0.08	11.38±0.08	10.99±0.05
	2022-01-31	59607.09	11.43±0.07	11.37±0.09	10.97±0.07
	2022-02-04	59615.08	11.43±0.08	11.37±0.05	10.99±0.05
WR 3 WN3ha B=10.71 V=10.69 [21]	2022-10-31	59884.37	11.44±0.08	11.38±0.08	10.96±0.07
	2021-11-22	59541.27	10.80±0.04	10.70±0.05	10.54±0.02
	2021-12-01	59550.18	10.80±0.04	10.71±0.05	10.65±0.09
	2021-12-09	59558.24	10.81±0.04	10.71±0.05	10.63±0.09
	2021-12-29	59578.14	10.80±0.04	10.70±0.05	10.53±0.02
	2022-01-27	59607.10	10.81±0.04	10.71±0.06	10.55±0.02
	2022-01-31	59611.10	10.81±0.04	10.71±0.05	10.54±0.03
WR 120 WN7 B=12.93 V=11.67 [22]	2022-02-04	59615.09	10.80±0.04	10.68±0.05	10.66±0.09
	2021-06-18	59380.32	12.25±0.04	11.85±0.04	11.27±0.07
	2021-07-23	59419.20	12.38±0.03	11.90±0.07	11.37±0.07
	2021-07-31	59427.16	12.34±0.04	11.90±0.04	11.37±0.08
	2021-08-06	59433.17	12.32±0.03	11.89±0.05	11.33±0.06
	2021-08-10	59437.31	12.35±0.03	11.91±0.05	11.28±0.06
	2022-04-15	59685.36	12.41±0.03	11.87±0.07	11.40±0.09
WR 128 WN4+OB B=10.49, V=10.54 [21]	2022-04-28	59698.33	12.39±0.03	11.86±0.07	11.43±0.09
	2022-05-23	59719.39	12.39±0.04	11.87±0.07	11.43±0.09
	2021-09-04	59462.15	10.40±0.03	10.46±0.02	10.56±0.04
WR 141 WN5+O5V-III B=10.60 V=9.78 [21]	2021-09-06	59464.28	10.40±0.02	10.47±0.02	10.56±0.04
	2022-06-05	59736.25	10.42±0.02	10.49±0.01	10.61±0.03
	2021-07-24	59420.41	10.58±0.04	9.84±0.03	9.11±0.01
	2021-09-03	59461.39	10.59±0.04	9.84±0.05	9.14±0.01
	2021-10-07	59495.11	10.56±0.05	9.85±0.04	9.08±0.01
	2021-11-09	59528.10	10.54±0.03	9.84±0.01	9.03±0.06
	2022-11-10	59894.05	10.58±0.02	9.86±0.02	9.07±0.04

Таблица 2 (Окончание)

1	2	3	4	5	6
WR 145 WN7/O7 B=13.46 V=11.83 [23]	2021-07-25	59421.29	13.61±0.11	11.86±0.08	10.58±0.08
	2021-08-10	59437.33	13.65±0.11	11.94±0.10	10.46±0.11
	2021-09-03	59461.32	13.64±0.13	11.93±0.11	10.44±0.10
	2021-10-07	59495.14	13.65±0.11	11.86±0.07	10.40±0.10
WR 148 WN8H+B3IV/BH B=10.87 V=10.30 [21]	2021-08-10	59437.37	10.86±0.04	10.24±0.06	9.85±0.06
	2021-09-03	59461.33	10.85±0.04	10.23±0.05	9.69±0.03
	2022-11-01	59885.34	10.78±0.05	10.17±0.06	9.62±0.03
WR 151 WN4+OV B=12.95 V=12.078 [20]	2021-10-12	59500.23	12.8±0.06	12.08±0.06	11.31±0.01
	2021-11-05	59524.13	12.76±0.06	12.06±0.05	11.32±0.04
	2021-11-12	59540.04	12.92±0.07	12.09±0.06	11.32±0.01
	2021-12-01	59550.09	12.80±0.06	12.09±0.05	11.31±0.10
	2021-12-29	59578.08	12.81±0.06	12.19±0.07	11.31±0.01
	2022-01-31	59607.04	12.75±0.05	12.12±0.06	11.25±0.01
WR 152 WN3(h) B=11.72 V=11.61 [20]	2021-10-12	59500.25	11.51±0.10	11.79±0.05	11.36±0.03
	2021-11-05	59524.14	11.52±0.09	11.81±0.05	11.38±0.05
	2021-11-21	59540.05	11.50±0.10	11.75±0.09	11.27±0.09
	2021-12-01	59550.12	11.51±0.10	11.76±0.09	11.27±0.09
	2021-12-29	59578.09	11.51±0.10	11.79±0.06	11.36±0.05
	2022-01-14	59594.07	11.52±0.08	11.85±0.05	11.37±0.04
	2022-01-21	59601.07	11.58±0.03	11.80±0.06	11.37±0.04
	2022-11-01	59885.05	11.62±0.04	11.80±0.05	11.36±0.05
	2022-12-02	59916.05	11.62±0.05	11.81±0.05	11.40±0.05
WR 153 WN 6+O6 B=9.39 V=9.01 [21]	2021-10-12	59500.27	9.43±0.01	9.00±0.02	8.83±0.01
	2021-11-05	59524.15	9.38±0.03	8.96±0.00	8.85±0.01
	2021-11-21	59540.07	9.42±0.02	9.00±0.01	8.89±0.01
	2021-12-29	59578.12	9.44±0.02	9.02±0.01	8.91±0.02
	2022-01-31	59607.03	9.38±0.01	8.96±0.02	8.44±0.03
	2022-12-02	59916.04	9.40±0.02	9.00±0.02	8.89±0.01

WR 1 (HD 4004). Звезда принадлежит к последовательности WN4. В ряде работ отмечена переменность ее блеска и профилей эмиссионных линий. Фотометрический период $P=16.9$ дня был получен из наблюдений 2004г. [24]. В спектре WR 1 неоднократно наблюдались дополнительные эмиссионные пики, смещающиеся вдоль широкого профиля эмиссионных линий [25,26]. Впечатляющие изменения эквивалентных ширин эмиссионных линий (~50%) в течение ночи были зарегистрированы в работе [26]. Исследования на предмет двойственности объекта дали отрицательный результат. Поэтому источником спектральной переменной считается вращающийся звездный ветер, неоднородная структура которого создает дополнительные выбросы фрагментов вещества [27].

Во время наших наблюдений были зарегистрированы изменения блеска до $0^m.1$ в фильтрах В и V. Сравнение наших фотометрических результатов

с данными каталога [22] показало, что в 2021-2022гг. WR 1 стал на $0^m.3$ ярче в фильтре В и на $0^m.25$ слабее в фильтре V (табл.2). В спектре WR 1 присутствуют эмиссионные линии H I, He II, N IV и NV. В табл.3 приведены значения их потоков в шкале 10^{-12} эрг/см²с и эквивалентные ширины в ангстремах. Точность определения этих параметров составляет 10-15%. В основном наблюдаемые изменения потоков эмиссионных линий и эквивалентных ширин в спектре этого объекта не превышают 20%.

Таблица 3

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 1**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.12.01		2021.12.10		2022.02.01		2022.09.02		2022.10.06	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4540	He II			8.0	30	8.8	28				
4619	N III			14	53	16	52				
4685	He II			92	420	104	385				
4859	He II			8.5	35	10	34				
4945	NV			3.3	13	2.5	8.2				
5411	He II			18	71	19	58				
6560	He II	32	126					35	126	29	138
6583	He II	4.8	20					5.1	16.2	4.3	22
7109	N IV	46	208					50	220	38	229

WR 2 (HD 6327). Объект относится к WN-классу и отличается низким темпом потери массы и высокой температурой. Эмиссионные линии имеют необычную форму. Для объяснения структуры эмиссионных профилей рассматривались следующие варианты: наличие второго компонента, быстрое вращение звезды и сильное магнитное поле [28,29]. По нашим данным (табл.2) блеск звезды в 2021-2022гг. был стабильным. Результаты спектральных наблюдений представлены в табл.4. Абсолютные потоки излучения выражены в шкале 10^{-12} эрг/см²с, эквивалентные ширины - в ангстремах. Точность определения параметров составляет 10-15%.

WR 3 (HD 9974). Это одна из самых ярких звезд ранней последовательности WN. В ее спектре присутствуют эмиссионные и абсорбционные линии H I, иными словами, атмосфера содержит некоторое количество водорода, и звезда относится к типу WN3ha [30]. Двойственная природа этого объекта не подтверждена, следовательно, водород присутствует в самой атмосфере WR 3 [31]. Однако это не согласуется со стандартными эволюционными треками для WR-звезд. Возможно, что быстрое вращение звезды, пониженная металличность Z и низкая скорость потери массы приводят к тому, что водород из верхних слоев атмосферы смешивается с гелием и азотом из нижних слоев,

Таблица 4

ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 2

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.12.01		2021.12.10		2021.12.29		2022.09.02		2022.10.06		2022.10.12	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4540	HeII			2.0	13							2.1	16
4685	HeII			24	161	24	167					20	166
4859	HeII			1.3	8.5	1.1	8.1					1.7	14
4945	NV			0.7	4.7	0.7	5.1					1.7	14
5411	HeII			4.4	34	4.4	32					4.4	38
6560	HeII	5.0	52					6.3	55	6.1	64		
7109	NIV	1.2	13					1.3	18	1.3	21		

в результате чего все эти элементы оказываются вместе в атмосфере [31]. Во время наших наблюдений яркость объекта и потоки эмиссионных линий в его спектре были достаточно стабильны. В табл.5 приведены значения потоков излучения в эмиссионных линиях в шкале 10^{-12} эрг/см² с и эквивалентные ширины в ангстремах. Точность определения этих параметров составляет 10-15%.

Таблица 5

ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR3

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.12.01		2021.12.10		2021.12.29		2022.09.01		2022.09.02		2022.10.06		2022.10.12	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4540	HeII			0.6	2.2									0.6	2.4
4620	NV			7.8	26	7.7	26	9.3	28					7.5	30
4685	HeII			15	62	17	69	15	57					12	55
4859	HeII+HI			0.3	1.4	0.4	1.7	0.3	1.3					0.3	1.5
4940	NV			0.8	3.3	0.8	3.4	0.8	2.9					0.7	3.4
5411	HeII			1.6	8.1	1.6	8.2	1.7	7.9					1.5	8.3
6560	HeII+HI	3.7	31							3.6	22	4.0	32		

WR 120. Этот объект принадлежит последовательности WN7. Его фотометрическая переменность с амплитудой $0^m.042$ и периодом 6 дней была зарегистрирована в работе [32]. Отмечена спектральная переменность типа CIR, наблюдалось появление крупномасштабных деталей, наложенных на широкие профили эмиссионных линий ($\sigma \sim 7-8\%$) [33].

Наши фотометрические данные показали колебания блеска звезды в пределах $0^m.15$ (табл.2). По сравнению с данными каталога [22] блеск объекта

в 2021-2022гг. повысился на $0^m.6$ в фильтре В и уменьшился на $0^m.25$ в фильтре V. Потоки в эмиссионных линиях в шкале 10^{-12} эрг/см²с и эквивалентные ширины WR 120 для синей и красной областей спектра приведены в табл.6 и 6а. Точность определения этих параметров составляет 10-15%. Наблюдаются волнообразные изменения потоков с амплитудой ~20-25%.

Таблица 6

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 120**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.06.13		2021.07.25		2022.05.08		2022.06.29		2022.09.01	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4514	NIII	1.2	27	0.5	13	0.4	11	0.4	12		
4540	HeII	1.2	27	1.2	23	0.9	23	0.9	25	0.9	26
4640	NIII	2.3	54	2.1	57	2.3	54	2.1	58	2.1	53
4686	HeII	2.5	64	2.5	67	2.4	56	2.4	67	2.3	59
4859	HeII	0.4	10	0.4	11	0.3	7.5	0.4	9.4	0.4	8.6
4933-4944	NV	0.4	10	0.3	8.3	0.3	7.9	0.4	9.5	0.4	8.8
5411	HeII	1.0	16	1.1	18	1.0	17	0.9	18	1.0	17

Таблица 6а

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В "КРАСНОМ" ДИАПАЗОНЕ ДЛИН
ВОЛН В СПЕКТРЕ WR 120**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.06.29		2021.07.31		2021.08.07		2022.04.28		2022.05.07		2022.06.04		2022.06.26		2022.09.02	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
6560	HeII	2.3	27	2.9	38	2.8	33	2.6	36	2.2	26	1.7	31	1.9	28	2.2	28
6683	HeII	3.0	37	2.5	31	3.4	41	3.2	43	3.2	40	2.0	34	2.1	30	2.9	37
7065	HeI	2.8	33	2.1	26			2.2	25	2.1	24	1.4	26	1.1	24	2.2	28
7109+	NIV	4.3	47	4.1	46	5.2	50	3.5	40	3.5	42	2.3	42	1.7	43	2.3	28
7122																	
7177	NIV	0.3	2.2	0.4	5.0			0.4	4.4	0.2	4.0	0.30	3.6	0.2	3.3	0.4	6.0

WR 128. Этот объект принадлежит последовательности WN4. Зарегистрированы флуктуации блеска малой амплитуды и ~2-3% изменения интенсивности эмиссионных линий. Предполагается, что источником переменности является неоднородная структура звездного ветра. Поиски лучевых скоростей, подтверждающих двойную природу объекта, не дали результатов [34]. В процессе наших наблюдений яркость объекта была достаточно стабильной. Абсолютные потоки в эмиссионных линиях в шкале 10^{-12} эрг/см²с приведены в табл.7 и 7а. Точность определения этих параметров составляет 10-15%.

Таблица 7

ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ ЛИНИЙ
В СПЕКТРЕ WR 128

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.06.13		2021.07.25		2021.08.10		2022.07.15		2022.07.15	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4514+4540	HeII	2.6	10	3.	9.1			2.5	9.1	2.6	8.7
4640	NIII	6.7	22	7.25	21			5.8	19	6.4	21
4686	HeII	26	96	26	90	29	96	24	83	24	80
4859	HeII	3.1	6.3	3.1	11	3.0	11	3.1	12	3.2	10
4933+4944	NV	1.7	7.6	1.7	6.3	1.8	6.7	1.7	6.6	1.9	7.5
5411	HeII	4.4	19	3.8	25	3.6	14	3.5	15	4.1	14

Таблица 7а

ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В "КРАСНОМ" ДИАПАЗОНЕ ДЛИН
ВОЛН В СПЕКТРЕ WR 128

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.06.20		2021.06.30		2021.07.08		2022.06.26		2022.07.21	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
6560	HeII	10	66	9.7	58	9.9	63	10	62	10	61
6683	HeII	0.4	3.0	0.5	3.5	0.5	3.6	0.4	2.5	0.5	3.4
7122	NIV			7.1	57	7.1	60	6.4	56	7.0	65

WR 141 (HD 193928). Эта двойная звездная система принадлежит последовательности WN5+O5. Первые орбитальные параметры были определены по измерениям лучевых скоростей эмиссионных линий NV, 4604 и HeII, 4684 Å [35]. Позднее были получены оценки периода $P = 21.64$ дня, наклона орбиты и масс компонентов [36]. Новое значение орбитального периода системы: $P = 21.68$ дня получено в работе [32].

Данные наших фотометрических наблюдений приведены в табл.2. В 2021г. значительных колебаний блеска объекта обнаружено не было. Результаты спектральных наблюдений приводятся в табл.8 и 8а. Эмиссионные потоки выражены в шкале 10^{-12} эрг/см² с, точность определения этих параметров составляет 10-15%. В спектре WR 128 отмечается постепенное уменьшение потоков в эмиссионных линиях к концу 2022г., при этом эквивалентные ширины линий изменялись незначительно.

WR 145. Это двойная система гибридного типа WN7o/CE + O [37,38]. Период обращения компонентов составляет 22.544 дня [38]. Объект является источником сильного рентгеновского излучения. Причем основная его доля

Таблица 8

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 141**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.07.25		2021.08.10		2021.09.07		2022.07.15		2022.10.13	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4514-4540	NIII	5.8	18			6.9	22			4.0	22
4640	NIII	11	34			13	42	11	39	7.5	46
4686	HeII	45	136	49	154	48	141	39	145	25	152
4859	HeII	4.6	14	5.7	18	5.6	16	4.4	15	3.4	18
4933-4944	NV	2.3	7.1	2.6	6.7	2.8	8.0	1.7	5.9	1.4	8.0
5411	HeII	14	30	14	31			13	29	9.3	38

Таблица 8a

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В "КРАСНОМ" ДИАПАЗОНЕ ДЛИН
ВОЛН В СПЕКТРЕ WR 141**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.06.20		2021.06.30		2021.07.08		2021.08.17		2022.07.21		2022.07.25		2022.10.10		2022.11.01		2022.11.13	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
6560	HeII	34	64	35	67	42	66	37	69	37	65	37	64	30	68	30	64	30	62
6683	HeII	5.7	10	5.8	11	6.5	13	7.2	15	7.3	14	7.4	13	6.6	12	6.3	12	6.0	12
7122	NIV,	60	93	64	120	61	117	65	120	58	105	58	106	53	103	46	110	45	105
7177	HeII																		

приходит от О-звезды [39]. Мэсси и Гроув [40] провели исследования, чтобы определить, где именно формируются линии NIV и CIV: в двух разных звездах или в объекте "переходного" типа WN/WC. Было доказано, что данные эмиссионные линии возникают в одном объекте.

Сравнение наших фотометрических результатов с данными каталога [23] показало, что блеск объекта в 2021г. стал слабее на $0^m.2$ в фильтре В и на $0^m.1$ в фильтре V. Потоки в эмиссионных линиях в шкале 10^{-12} эрг/см² с и эквивалентные ширины в спектре WR 145 для синей и красной областей спектра приведены в табл.9 и 9a. Точность определения этих параметров составляет 15-20%. Существенное уменьшение эмиссионных потоков зарегистрировано в 2022г., но эквивалентные ширины изменялись незначительно (табл.9 и 9a).

WR 148. Этот объект относится к типу WN8h+B3IV/BN. Согласно измерениям лучевой скорости, его орбитальный период составляет 4.317 дня [41,42]. Есть предположение, что спутником звезды WR является компактный

Таблица 9

ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 145

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.07.25		2021.08.10		2022.07.15		2022.07.15		2022.10.12	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4540	HeII					0.29	21	0.29	21	0.28	20
4640	NIII	1.14	67	0.95	66	0.92	60	0.96	60	1.10	60
4685	HeII	1.34	67	1.40	67	1.04	68	1.05	66	1.08	58
4859						0.25	14	0.26	15	0.26	13
5411	HeII	0.88	16	0.90	13	0.70	12	0.66	11	0.64	12
5801+5811	CIII			6.25	60						

Таблица 9а

ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В "КРАСНОМ" ДИАПАЗОНЕ ДЛИН
ВОЛН В СПЕКТРЕ WR 145

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.07.24		2021.08.17		2022.07.20		2022.09.02		2022.10.06	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
6560	HeII	3.4	23	3.3	24	3.1	23	2.9	26	2.6	23
6683	HeII	1.6	11	1.6	10	1.4	10	1.2	10	1.2	10
7065	HeI										
7109+7122	NIV	11	64	11	70	9.5	66	8.1	61	7.9	60

объект или черная дыра. В табл.10 и 10а приведены значения абсолютных потоков в эмиссионных линиях и эквивалентные ширины. Потоки выражены в шкале 10^{-12} эрг/см²с. Точность определения этих параметров составляет 15-20%. Изменения потоков в эмиссионных линиях не выходят за пределы ошибок измерений.

Таблица 10

ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 148

л(ь)	Ионы	2021.07.25		2022.07.16		2022.07.17		2022.09.01		2022.10.13	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4634+4640	NIII	2.2	9.0	3.5	15	3.5	15	3.5	15	3.4	16
4685	HeII	5.3	16	6.3	26	6.3	26	6.1	26	5.7	28
4859	HeII	1.2	3.9	1.2	5.2	1.1	4.6	1.1	4.7	1.0	4.9
5411	HeII	0.7	2.1	0.8	3.1	0.8	2.9	0.7	2.8	0.8	3.7

Таблица 10а

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ В
СПЕКТРЕ WR 148**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.07.24		2021.08.17		2022.09.02		2022.10.06		2022.10.10		2022.11.01	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
6560	HeII	7.4	27	7.5	26	6.1	28	6.0	29	6.6	28	6.7	28
6583	HeII	1.6	5.9	1.5	5.5	1.1	5.1	1.0	5.0	1.4	5.8	1.4	5.4
7065	HeI	1.1	4.3	1.2	4.5	0.9	5.0	1.0	5.5	1.0	4.7	1.1	5.1
7109	NIV	1.1	4.1	1.1	4.3	1.2	5.5	1.2	5.4	1.1	4.7	1.1	5.1
7122													

WR 151. Эта двойная система состоит из звезд O5V и WN5 [43]. Орбитальный период $P=2.12691$ день был определен по лучевым скоростям компонентов [43]. Во время главного затмения, когда впереди располагается

Таблица 11

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 151**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.08.10		2021.09.07		2022.07.25		2022.10.12	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4640	NIII					0.7	25		
4686	HeII	3.1	78	2.9	99	3.0	100	3.2	82
4859	HeII	0.4	12	0.4	10.3	0.3	10	0.4	9.7
4933	NV			0.2	4.9	0.2	5.5	0.2	6.5
4944									
5411	HeII	1.0	21	1.1	19			0.9	16

Таблица 11а

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В "КРАСНОМ" ДИАПАЗОНЕ ДЛИН
ВОЛН В СПЕКТРЕ WR 151**

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.08.17		2021.09.04		2021.12.01		2022.09.02		2022.09.25		2022.10.06	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
6560	HeII	2.1	41	2.1	45	1.9	35	2.2	36	2.8	36	2.2	37
6683	HeI	0.6	12	0.6	12	0.4	8.3	0.6	9.9	0.5	7.0	0.5	9.3
7109	NIV	2.8	53	2.6	52	2.5	47	2.7	52	3.2	48	2.8	51
7122													
7177	HeII			0.3	5.0	0.2	4.5			0.1	2.1		

В процессе наших наблюдений регистрировались изменения блеска в пределах $0^m.1$ (табл.2). Эти изменения могут быть вызваны колебаниями поглощения в оболочках. По сравнению с данными каталога [20] блеск объекта в 2021-2022гг. вырос на $0^m.2$ в фильтре В и ослабел на $0^m.15$ в фильтре V. В табл.12 и 12а приведены значения абсолютных потоков в эмиссионных линиях и эквивалентные ширины. Потоки выражены в шкале 10^{-12} эрг/см²с. Точность определения этих параметров составляет 10-15%.

Таблица 12

$\lambda(\text{\AA})$	Ионы	2021.08.10		2022.07.16		2022.07.17		2022.10.12	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4540						1.0	10		
4620	HeII			3.2	29	3.0	30	3.3	30
4686	HeII	10	107	9.8	92	9.6	92	10	98
4859	HeII	1.0	11	1.0	10	1.0	11	1.0	9.7
4933-4944	NV	0.5	6.0	0.5	5.2	0.4	5.2	0.5	4.8
5411	HeII	1.4	15	1.3	15	1.3	17	1.3	14

Таблица 12а

[illegible]

WR 153 (GP Cep). Объект состоит из двух пар звезд (WR+O и WR+O). Кривая блеска имеет два орбитальных периода: 6.68 дня и 3.46 дня. В первой паре звезда класса O имеет большую массу, а во второй паре более массивен компонент WR [45]. Результаты наших наблюдений - значения абсолютных потоков в шкале 10^{-12} эрг/см² и эквивалентные ширины эмиссионных линий приведены в табл.13. Точность определения этих параметров составляет 15-20%. По нашим данным существенных изменений фотометрических и спектральных параметров этой звезды не обнаружено.

Таблица 13

**ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ
ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ WR 153**

λ (Å)	Ионы	2021.08.17		2021.11.28		2021.12.01		2022.07.17		2022.07.18		2022.07.21		2022.10.12		2022.10.13		2022.11.12	
		Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW	Fabs	EW
4540	HeII							7.5	7.1					7.6	6.0	7.3	7.0		
4640	NIII							17	17					15	16	14	15		
4686	HeII							61	55					61	58	65	70		
4859	HeII							2.1	2.1					2.4	2.2	1.9	2.3		
4933	NV							4.0	4.0					4.3	3.9	4.4	5.7		
4944																			
5411	HeII							10	8.4					8.9	8.6	9.0	9.0	9.0	9.0
6560	HeII	16	20	17	20	16	20			17	20	19	23					20	26

Фрагменты спектрограмм исследуемых звезд WN последовательности приведены на рис.1.

4. *Обсуждение результатов.* Проведены фотометрические и спектральные наблюдения группы звезд Вольфа-Райе WN-последовательности. Были зарегистрированы изменения блеска объектов WR 1 ($\Delta V = 0^m.1$), WR 120, WR 151 ($\Delta B = 0^m.15$, $\Delta V = 0^m.15$), WR 152 ($\Delta B = 0^m.1$). Наши результаты сравнивались с данными, полученными в 2000-2014гг. в фильтрах В и V в каталогах [19-23]. Зарегистрировано увеличение блеска WR 1 и WR 152 на $\sim 0^m.2 - 0^m.3$ в фильтре В и на $0^m.1 - 0^m.15$ в фильтре V. Для WR 120 получены значительные расхождения с каталожными данными ($\Delta B = 0^m.5$).

Спектральные наблюдения в основном выполнялись со спектральным разрешением 1.1 Å /пиксель, поэтому исследование профилей эмиссионных линий не проводилось. Основной целью проекта было определение потоков излучения в эмиссионных линиях. Для большинства исследованных звезд наблюдаемые изменения потоков в эмиссионных линиях не выходили за пределы ошибок измерений. Довольно высокие значения погрешностей

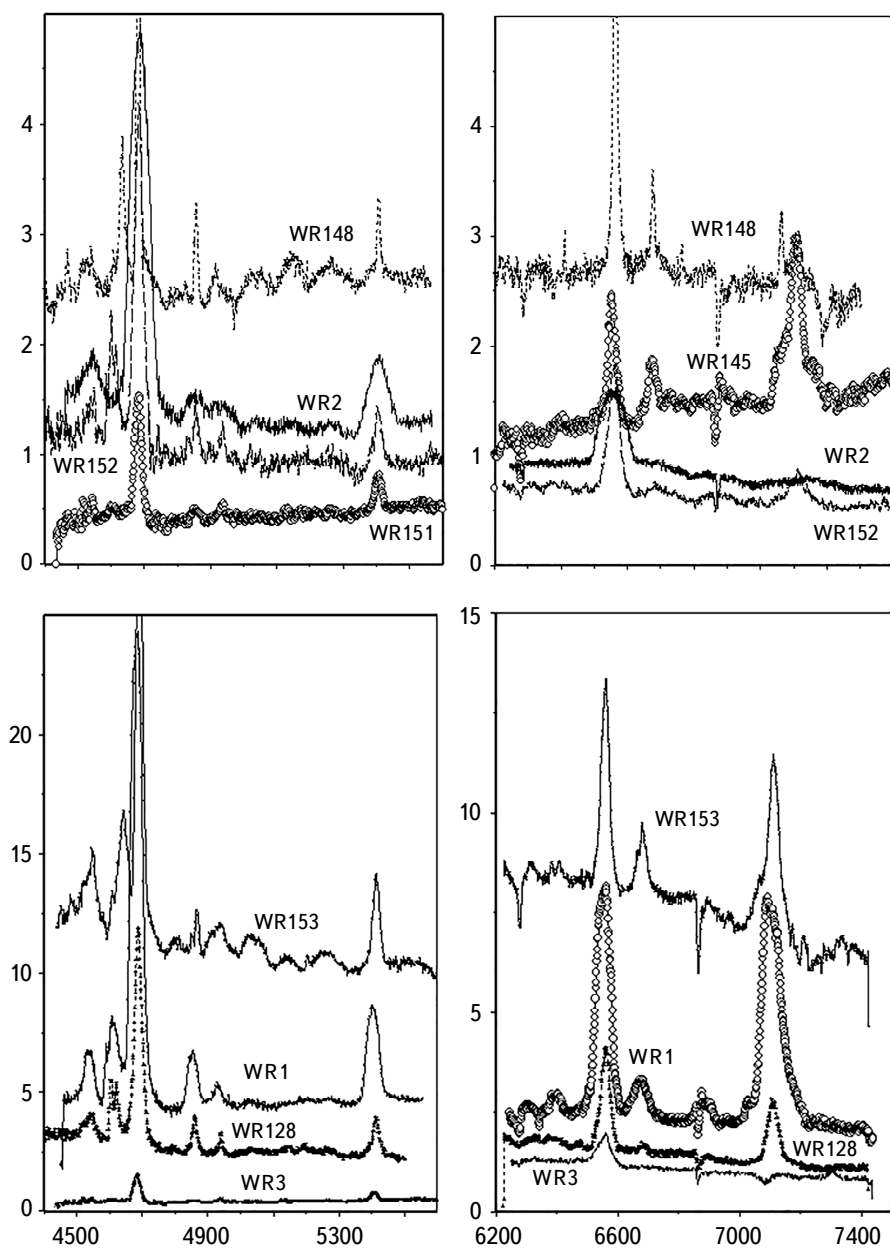


Рис.1. Спектрограммы звезд WN последовательности. Ось X - шкала длин волн, ось Y - потоки излучения в шкале 10^{-12} эрг/см² с Å.

(15-20%) обусловлены тем, что в ряде объектов (WR148, WR 151) спектр буквально заполнен множеством слабых эмиссионных линий, и определить истинный уровень непрерывного спектра довольно трудно. Широкие крылья

эмиссионных линий в другой группе звезд (WR145, WR154) также сокращают участки свободного континуума и приводят к большим ошибкам при определении потоков излучения. В спектре WR 120 зарегистрированы значительные волнообразные вариации потоков в эмиссионных линиях (до 30%). В спектрах WR 128 и WR 145 изменения потоков в эмиссионных линиях ненамного превышают диапазон ошибок, но четко прослеживается тенденция их ослабления в конце 2022г. К сожалению, наши спектральные и фотометрические наблюдения проводились не синхронно, так как соответствующие телескопы расположены в разных обсерваториях с разными погодными условиями. Это затрудняет выбор источников переменности: изменения поглощения на луче зрения, увеличение плотности звездного ветра, флуктуация скорости потери массы или горячие пятна на поверхности звезды. Один из включенных в нашу программу объектов, WR 120, вошел в список одиночных звезд с переменностью типа CIR. Быстро вращающееся ядро такой звезды взаимодействует со структурой движущегося ветра, образуя зоны совместного вращения, в которых формируются закрученные спиральные неоднородности. Эволюция быстро вращающегося ядра связана с возможным коллапсом звезды на стадии до сверхновой и с мягкими гамма-всплесками. В ходе наших наблюдений были зарегистрированы нерегулярные колебания блеска объекта и потоков излучения в линиях. К звездам типа WR с переменностью CIR относится также объект WR 1.

Более подробное обсуждение результатов будет выполнено во второй части данной работы.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (программа № BR20280974).

Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы,
Казахстан, e-mail: lu_kondr@mail.ru

PHOTOMETRIC AND SPECTRAL STUDY OF THE GROUP OF GALACTIC WOLF-RAYET STARS. I. WN SEQUENCE

L.N.KONDRATYEVA, I.V.REVA, E.K.DENISSYUK,
S.A.SHOMSHEKOVA, G.K.AIMANOVA

Photometric and spectral observations of 11 W-R stars were carried out at the FAI in 2021-2022. The studied group included representatives of the WN, WC,

and WO sequences. Based on the observations estimates of the brightness of objects in the B V Rc filters and absolute fluxes of radiation in the emission lines were obtained. Changes in brightness within $0^m.1 - 0^m.15$ were detected in the stars WR 1, WR 120, WR 151, and WR 152. Changes in the emission fluxes were detected in the spectra of several objects: WR 120, WR 128, and WR 145.

Keywords: *variable stars: W-R stars: photometry: spectrophotometry*

ЛИТЕРАТУРА

1. J.Groh, G.Meynet, C.Georgy *et al.*, Astron. Astrophys., **558A**, 131, 2013.
2. S.Marchenko, A.Moffat, P.Crowther *et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **353**, 153, 2004.
3. S.Woosley, A.Heger, Astrophys. J., **637**, 914, 2006.
4. D.Vanbeveren, N.Mennekens, Astron. Astrophys., **636**, 99, 2020.
5. C.-Ch.Yoon, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **470**, 3970, 2017.
6. J.Callingham, P.Tuthill, B.Pope *et al.*, Nature Astron., **3**, 82, 2019.
7. J.Thomas, N.Richardson, J.Eldridge *et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **504**, 5221, 2021.
8. S.Desforges, N.St-Louis, A.-N.Chen *et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **465**, 1227, 2017.
9. G.Grafener, S.Owoccki, L.Grassitelli *et al.*, Astron. Astrophys., **608A**, 34, 2017.
10. N.St-Louis, P.Tremblay *et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **474**, 1886, 2018.
11. E.Aldoretta, N.St-Louis, N.Richardson *et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **460**, 3407, 2016.
12. T.Shenar, D.Sablowski, G.Hainich *et al.*, Astron. Astrophys., **627**, 151, 2019.
13. K.Dsilva, T.Shenar, H.Sana *et al.*, Astron. Astrophys., **641**, A26, 2020.
14. F.Tramper, S.Straal, D.Sanayal *et al.*, Astron. Astrophys., **581A**, 110, 2015.
15. S.Lepine, A.Moffat, Astrophys. J., **514**, 909, 1990.
16. P.Crowther, G.Ratel, J.Bestenlehner, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **521**, 585, 2023.
17. V.Tereschenko, A.Kharitonov, L.Knyazeva, Spectrophotometric Catalogue of Stars ISBN-10: 365968371: LAP Lambert Academic Publishing, 2015, p.312.
18. A.Landolt, Astron. J., **146**, 131, 2013.
19. N.Kharchenko, A.Piskunov, S.Roser *et al.*, Astron. Nachr., **325**, 740, 2004.
20. E.Hog, C.Fabrizius, V.Makarov *et al.*, Astron. Astrophys., **355**, L27, 2000.
21. J.Ducati, 2002yCat, 1322.
22. N.Zacharias, C.Finch, T.Girard *et al.*, 2012yCat, 1322, 201, 2012.
23. S.Caballero-Nieves, E.Nestan, D.Gies *et al.*, Astron. J., **147**, 40, 2019.

24. *A.-N.Chené, N.St-Louis, A.Moffat et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **484**, 5834, 2019.
25. *T.Morel, L.Georgiev, Y.Grosdidier et al.*, Astron. Astrophys., **349**, 457, 1999.
26. *A.Niedzielski*, Astron. Astrophys., **360**, 227, 2000.
27. *A.Flores, G.Koenigsberger, O.Cardona et al.*, Astron. J., **133**, 2859, 2007.
28. *W-R.Hamann, G.Grafener, A.Liermann*, Astron. Astrophys., **457**, 1015, 2006.
29. *A.-N.Chene, N.St-Louis, A.Moffat et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **484**, 5834, 2019.
30. *P.Masset, P.Conti*, Astrophys. J., **244**, 173, 1981.
31. *S.Marchenko, A.Moffat, P.Crowther et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **353**, 153, 2004.
32. *S.Marchenko, A.Moffat, K. van der Hucht et al.*, Astron. Astrophys., **331**, 1022, 1998.
33. *N.St-Louis, A.-N.Chené, O.Schnuuz et al.*, Astrophys. J., **698**, 1951, 2009.
34. *I.Antokhin, A.Cherepashchuk*, PAZh, **11**, 838, 1985.
35. *W.Hiltner*, Astrophys. J., **101**, 356, 1945.
36. *A.Grandchamps, A.Moffat*, IAUS, **143**, 258, 1991.
37. *H.Demers, A.Moffat, S.Marchenko et al.*, Astrophys. J., **577**, 409, 2002
38. *V.Muntean, A.Moffat, A.-N.Chene et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **399**, 1977, 2009
39. *G.Rauw, Y.Nazé, N.Wright et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 221, 2015.
40. *P.Massey, K.Grove*, Astrophys. J., **344**, 870, 1989.
41. *A.Moffat, W.Seggewiss*, Astron. Astrophys., **86**, 87, 1980.
42. *L.Drissen, R.Lamontagne, A.Moffat et al.*, Astrophys. J., **304**, 188, 1986.
43. *K.Hutton, A.Henden, D.Terrell*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **121**, 708, 2009.
44. *C.Cappa, J.Vasquez et al.*, RMxAC, **33**, 142, 2008.
45. *K.Panov, W.Seggewiss*, Astron. Astrophys., **227**, 117, 1990.