

УДК 524.31.01:520.84

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АТЛАС А-СВЕРХГИГАНТОВ

© 2015 В. Г. Клочкова*, Е. Г. Сендзикас, Е. Л. Ченцов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 22 октября 2014 года; принята в печать 9 декабря 2014 года

По материалам наблюдений, проведенных с высоким спектральным разрешением $R = 60\,000$ на 6-м телескопе БТА в сочетании с эшелльным спектрографом НЭС, детально изучены особенности оптических спектров А-сверхгигантов 3 Pup , $BD +48^\circ 1220$ и $\alpha\text{ Cyg}$, принадлежащих принципиально различающимся стадиям эволюции. Составлен атлас спектров этих звезд в интервале длин волн от 3920 до 6720 Å.

Ключевые слова: *сверхгиганты — звёзды: AGB и post-AGB — атласы — звёзды: индивидуальные: 3 Pup, BD +48°1220, α Cyg*

1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является очередным этапом изучения быстро эволюционирующих звезд высокой светимости (ЗВС) на кратковременных финальных стадиях, на которых энергетика звезды еще обеспечивается ядерным горением. Объектами нашего исследования являются как самые массивные звезды с исходными массами свыше $10 M_\odot$ предположительно на стадиях LBV, B[e]-сверхгигантов, желтых гипергигантов (YHG), светимость которых зачастую близка к пределу Эддингтона, так и звезды средних масс с исходными массами $3\text{--}8 M_\odot$ на стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) и последующей стадии post-AGB. Актуальность идентификации звезд этих типов (LBV, B[e], YHG, AGB или post-AGB), надежного определения фундаментальных параметров и фиксации стадии эволюции ЗВС особенно выросла в последнее время в связи с поиском звезд этих типов в галактиках Местной группы (см. [1, 2] и ссылки в этих статьях). Звезды высокой светимости двух указанных выше типов, принципиально различающиеся по массам и стадиям эволюции, имеют близкие наблюдаемые свойства: особенности оптических и радиоспектров, большие избытки ИК-излучения, сложное и переменное поле скоростей, что свидетельствует о нестабильности их протяженных атмосфер и расширяющихся газопылевых оболочек. Это пересечение наблюдаемых свойств объектов двух типов сформулировало так называемую проблему «спектротропической мимикрии».

Основная особенность оптических спектров самых массивных и маломассивных звезд высокой

светимости — это абсорбционно-эмиссионные профили спектральных линий, иногда аномальной формы, прежде всего, линий $H\alpha$. Это может быть прямой или инверсный P Cyg-профиль, абсорбция с асимметричными эмиссионными крыльями или сочетание разнородных деталей. Напомним, что наличие эмиссии в $H\alpha$, наряду с ИК-избытками, служит основным критерием для отбора кандидатов в post-AGB-звезды [3]. Эмиссионный профиль $H\alpha$ — признак процессов истечения вещества и/или пульсаций. Различия в форме профилей отражают различия в динамических процессах, протекающих в протяженных атмосферах отдельных звезд: сферически симметричное истечение, падение вещества на фотосферу, пульсации.

Наиболее известным примером неопределенности стадии эволюции является случай пекулярного сверхгиганта V1302 Aql (ИК-источник IRC +10420), который в течение нескольких десятилетий, вплоть до последнего, считался представителем стадии post-AGB. Однако некоторые авторы относили этот уникальный объект к самым массивным звездам Галактики, поскольку около 30 лет назад было замечено его сходство с выдающейся LBV Галактики $\eta\text{ Car}$. Лишь совокупность результатов, полученных за счет многолетних наблюдений с применением различных методик на самых крупных телескопах мира, включая 6-м телескоп БТА, привела к истине. В настоящее время объект окончательно отнесен к типу массивных звезд экстремально высокой светимости — желтым гипергигантам.

Примером объекта с неопределенным статусом может служить и малоизученный переменный А-сверхгигант V2324 Cyg, отождествляемый

*E-mail: valenta@sao.ru

Таблица 1. Основные свойства исследуемых звезд. Во втором столбце приведены спектральный класс и тип сверхгиганта. Абсолютные величины M_V для α Cyg, 3 Pup и BD +48°1220 из работ [10], [11] и [12] соответственно приведены в третьей колонке. В двух последних столбцах даны средний момент наблюдений JD и гелиоцентрическая лучевая скорость V_r , измеренная по многочисленным ($n > 500$) симметричным абсорбциям

Звезда ИК-источник	S_p , статус	M_V , mag	V , mag	l , deg	b , deg	JD 2456000 +	V_r , km s ⁻¹
BD +48°1220 IRAS 05040+4820	A4 Ia post-AGB	-5.0	9.74	159.7	+04.8	581.4	-5.5 ± 0.1
3 Pup IRAS 07418 – 2850	A2.7 Ib пекулярный	-5.5	3.93	244.4	-02.5	579.6	+30.5 ± 0.3
α Cyg IRC +50337	A2 Iae массивный	-8.38	1.25	084.3	+02.0	524.5	-5.2 ± 0.1

с ИК-источником IRAS 20572+4919. Наблюдаемый избыток излучения в области 12–60 мкм и положение на диаграмме ИК-цветов позволяют отнести этот объект к стадии post-AGB, т.е. рассматривать его в качестве протопланетарной туманности (PPN) с пылевой оболочкой. По спектрам БТА для V2324 Cyg методом моделей атмосфер определены $T_{\text{eff}} = 7500$ К, ускорение силы тяжести $\lg g = 2.0$, микротурбулентная скорость $V_t = 6.0$ км сек⁻¹ и солнечная металличность [4]. Неожиданной для PPN особенностью химического состава звезды является избыток лития и натрия. Избыток этих элементов в атмосфере позволяет отнести V2324 Cyg к звездам с исходной массой более $4 M_{\odot}$. Синтез ядер легких металлов (Li, Na, Al) возможен за счет так называемого «hot bottom burning» (HBB) в горячих слоях конвективной оболочки у массивных AGB-звезд. Описание HBB и необходимые ссылки доступны в статье Вентуры и др. [5].

Несмотря на большой объем полученных данных, эволюционный статус V2324 Cyg остается пока неясным. На диаграмме ИК-цветов источник IRAS 20572+4919 располагается в области IV, заселенной планетарными и протопланетарными туманностями. В соответствии с хронологическими последовательностями Льюиса [6], отсутствие мазерного излучения в полосах OH и H₂O указывает на приближение объекта к фазе планетарной туманности. Это обстоятельство сочетается с выводами публикаций, в которых ряд авторов [7, 8] рассматривает V2324 Cyg как звезду на стадии post-AGB. Однако стадии post-AGB не соответствуют некоторые свойства звезды, прежде всего, ее невысокая светимость: спектральная классификация указывает на класс светимости III. На это же указывает и слишком высокое значение ускоре-

ния силы тяжести: $\lg g = 2.0$ [4]. Не сочетается со статусом post-AGB-звезды также профиль линии H α и очень высокая скорость ветра, присущие обычно сверхгигантам. Как следует из рис. 1 в статье Клочковой и Ченцова [4], профиль H α с мощной переменной эмиссией скорее указывает на звезду высокой светимости с быстрым ветром.

Для накопления опыта и выработки критериев классификации ЗВС полезным подходом является детальное сопоставление их спектров высокого разрешения в широком интервале длин волн. В данной статье представлен атлас оптических спектров трех А-сверхгигантов, близких по спектральному классу, но различающихся по светимости: массивный сверхгигант α Cyg, пекулярный сверхгигант 3 Pup (A2.7 Ib) и протопланетарная туманность BD +48°1220 (A4 Ia). Звезда 3 Pup (HD 62623 = HR 2996 = MWC 570 = HIP 37677) в Каталоге ярких звезд [9] фигурирует как сверхгигант A2 Iabe.

После рассмотрения основных особенностей и параметров исследуемых звезд в разделе 2 мы кратко представим используемые наблюдательные данные (раздел 3) и составленный нами спектральный атлас (раздел 4).

2. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ А-СВЕРХГИГАНТОВ

Исследуемые нами А-сверхгиганты представлены в таблице 1 в том порядке, в котором их спектры приведены в атласе. Наряду с названием звезды здесь указаны номера ассоциированных ИК-источников, спектральный класс, принятый согласно предшествующим исследованиям звезд, их эволюционный статус, абсолютная величина M_V , видимая звездная величина V , галактические координаты l , b . В двух последних колонках этой

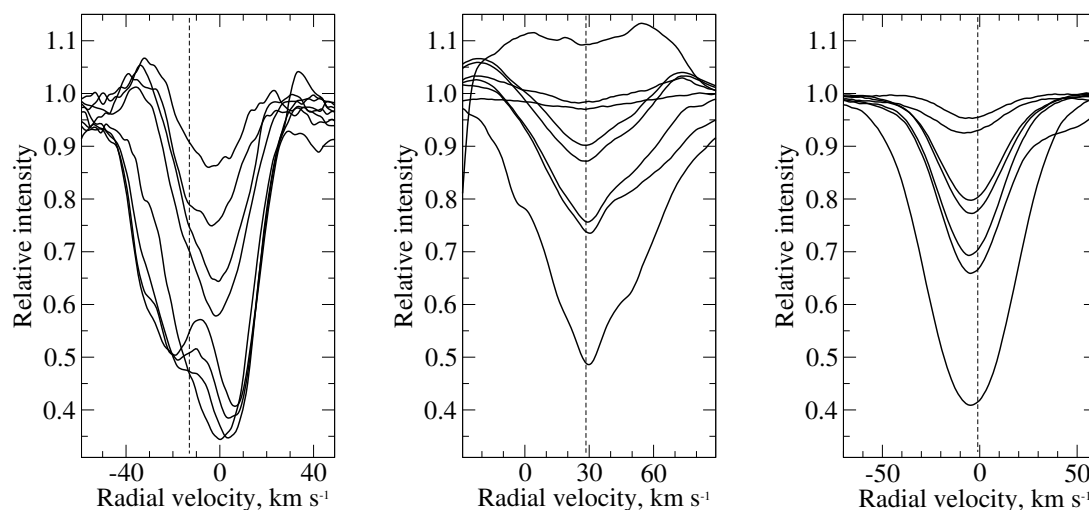


Рис. 1. Профили линий различной интенсивности в спектрах изученных звезд. Слева направо: BD +48° 1220 (сверху вниз: Fe II 6433, 6248, 5535, 5363, 5169, 5018, 4924, 4523 Å), 3 Pup (сверху вниз: [O I] 6300 Å, Fe II 6369, 6084, 5284, 5535 Å; Ti II 4501, 4444 Å; Fe II 4233 Å) и α Cyg (сверху вниз: Fe II 4433 Å; Ti II 4444, 4501 Å; Fe II 5535, 5284, 5015, 6084 Å). Вертикальной штриховой линией указана системная скорость V_{sys} из публикаций [11, 12, 14] для BD +48° 1220, 3 Pup и α Cyg соответственно.

таблицы приведены средний момент наблюдений (JD) и лучевая гелиоцентрическая скорость V_r , измеренная по многочисленным симметричным абсорбциям в спектрах изучаемых звезд. Остановимся несколько подробнее на наблюдаемых параметрах и особенностях звезд.

2.1. α Cyg

Массивный А-сверхгигант α Cyg на диаграмме Герцшпрунга–Рассела находится вблизи предела Хамфриса–Дэвидсона. Его высокая светимость (класс светимости Ia) проявляется в крупномасштабной макротурбулентности [13], в переменности блеска и поля скоростей в протяженной оболочке. α Cyg является прототипом одноименного типа горячих переменных сверхгигантов, которым присуща малоамплитудная переменность блеска и лучевой скорости. Все абсорбции, за исключением $H\alpha$, в спектре звезды симметричны (см. пример на рис. 1). Благодаря яркости и удобному расположению на северном небе, звезда хорошо изучена и описана в многочисленных публикациях. Основные особенности спектра α Cyg и его переменности представлены в работе Ричардсона и др. [15], которые провели многолетний спектральный мониторинг с высоким спектральным разрешением в сочетании с фотометрией в системе Стрёмгрена. Однако, несмотря на долгую историю наблюдений α Cyg, природа переменности остается непонятой, пока нет определенности в оценках массы звезды и периодов переменности ее блеска [15, 16].

2.2. 3 Pup

Ранее 3 Pup рассматривалась в качестве объекта, родственного звездам, эволюционирующим к планетарной туманности с двойным ядром [17]. Поводом к такой классификации послужило нетипичное для массивных А-сверхгигантов свойство — околосветная протяженная оболочка, пылевая составляющая которой проявляется в избытке ИК-излучения [18]. Согласно данным аппаратуры IRAS [19], 3 Pup отождествлена с ИК-источником IRAS 07418–2850. Лишь после определения близкого к солнечному химического состава атмосферы звезды [20] появился весомый аргумент в пользу того, что 3 Pup является массивным A[e]-сверхгигантом. Феномен A[e]–B[e] проявляется в сочетании сильных эмиссионных Бальмеровских линий, запрещенных эмиссий [Fe II], [O I] с сильным избытком ИК-потока, обусловленным присутствием горячей пылевой оболочки. Все эти особенности, по определению присущие массивным B[e]-сверхгигантам [21], наблюдаются в системе 3 Pup.

Массивные звезды могут наблюдаться в фазе голубых сверхгигантов или на этапе эволюции от главной последовательности, или же эволюционируя после стадии красного сверхгиганта. Согласно обзору [22], сверхгиганты с B[e]-феноменом в оптическом спектре можно рассматривать как объекты, эволюционирующие к стадии красных сверхгигантов.

Внутренняя газовая оболочка влияет на формирование специфических двухпиковых эмиссионных

Таблица 2. Остаточные интенсивности r и гелиоцентрические лучевые скорости V_r (км с^{-1}) для спектральных деталей в спектрах высокого разрешения α Cyg, 3 Pup, и BD +48°1220. Горизонтальные линии отделяют одиночные линии или неразрешенные бленды. Двоеточием отмечены неуверенные измерения

Ident.	λ	α Cyg		3 Pup		BD +48°1220	
		r	V_r	r	V_r	r	V_r
VII(10)	3916.41	0.93	-4.7			0.65:	-11.8:
Fe II(191)	3918.53	0.92	-4.1			0.77:	-12.4:
C II	3918.97						
Fe I(4)	3920.26						
Fe II	3920.64	0.89	-8.6			0.68:	
C II(4)	3920.68						
Fe II	3922.00	0.98	-5.7				
Fe I(4)	3922.91	0.94	-6.6	0.8	17.4	0.62	-13.2
He I(58)	3926.54	0.95	-6.3			0.87:	
Fe I(4)	3927.92	0.94	-8.0	0.83	28:	0.65	-11.6
VII(10)	3929.72					0.85:	-13:
Fe I(4)	3930.30	0.75	-5.4	0.81:	22:	0.35	-8.5
Ti II(34)	3932.01	0.81	-4.6			0.49:	-9.8:
Fe I	3932.63						
S II	3933.26						
Ca II(1)	3933.66						-37
Ca II(1)	3933.66	0.08	-6.4	0.43	24		-12

деталей в оптическом спектре 3 Pup, детально изученных по данным спектрального мониторинга этой звезды, проведенного на БТА в 1997–2008 гг. [11]. Кроме того, в этой же работе уточнен спектральный класс ($A2.7 \pm 0.3 \text{ Ib}$) по эквивалентным ширинам и профилям $\text{H}\delta$ и $\text{H}\gamma$, а по интенсивности триплета $\text{O I } 7774 \text{ \AA}$ оценена светимость $M_V = -5.5 \pm 0.3$.

Как видно из таблицы 2, где приведены измерения глубин и положений абсорбционных и эмиссионных компонентов линий, влиянию оболочки подвержено большинство линий, причем оно усиливается постепенно с ростом интенсивности и длины волны линии.

Несмотря на многочисленные исследования, для этой звезды, являющейся стандартом МК-классификации, до сих пор не решен окончательно вопрос о двойственности [20, 23]. Ченцов и др. [11] обнаружили значительные (до 7 км с^{-1})

изменения скорости от даты к дате по слабейшим фотосферным абсорбциям, что говорит о присутствии компаньона. В целом результаты мониторинга Ченцова и др. [11] не противоречат интерпретации Плетса и др. [20] 3 Pup как звезды с экваториальным диском и маломассивным спутником.

Важная информация была получена Миллоуром и др. [24] с помощью спектро-интерферометра AMBER VLTI с миллисекундным пространственным разрешением, что позволило выделить в системе пылевой и газовый диски, окружающие 3 Pup. Вторичный компаньон не был найден, однако, благодаря хорошему спектральному разрешению аппаратуры, эти авторы изучили поле скоростей объекта и пришли к выводу о необходимости присутствия в системе вторичного компонента, который мог бы обеспечить формирование кеплеровского диска и передачу ему углового момента.

2.3. BD +48°1220

Сверхгигант BD +48°1220 (SAO 40039, LSV+48°26) является оптическим компонентом ИК-источника IRAS 05040+4820. Звезда расположена достаточно близко к плоскости Галактики ($b = 4^\circ 8$), что может указывать на ее вероятную принадлежность населению галактического диска. Фьюджи и др. [25], выполнив многоцветные фотометрические наблюдения в оптическом диапазоне выборки звезд высокой светимости, получили для BD +48°1220 звездные величины $B = 10.1$, $V = 9.65$ и определили спектральный класс A4 Ia. Высокая светимость и двугорбое распределение энергии в спектре, указывающее на присутствие околосреднего вещества, выброшенного в ходе предшествующей эволюции, позволяют включить BD +48°1220 в группу звезд на стадии post-AGB.

Клочкова и др. [26] по наблюдениям BD+48°1220 с высоким спектральным разрешением ($R = 60\,000$) обнаружили переменность профилей и положений линий. Позже Клочкова и др. [12] более детально изучили оптический спектр BD +48°1220 в области длин волн от 4500 до 6760 \AA , определив фундаментальные параметры звезды и химический состав ее атмосферы. Методом моделей атмосфер получены следующие параметры: эффективная температура $T_{\text{eff}} = 7900 \text{ K}$, ускорение силы тяжести $\lg g = 0.0$, микротурбулентная скорость $\xi_t = 6.0 \text{ км с}^{-1}$. Металличность звезды почти не отличается от солнечной: $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.10$. Однако химический состав звезды имеет ряд особенностей: большой избыток гелия, полученный по абсорбции $\text{He I } \lambda 5876 \text{ \AA}$: $[\text{He}/\text{H}]_{\odot} = +1.04$, при значительном избытке кислорода $[\text{O}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.72$. Найдено

также измененное соотношение содержания легких металлов: $[\text{Si}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.81$, $[\text{Na}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.87$ при $[\text{Mg}/\text{Fe}]_{\odot} = -0.31$, отношение $[\text{Na}/\text{Mg}]_{\odot} = +1.18$. Ряд особенностей химического состава (близкая к солнечной металличность, избытки углерода, лития и натрия) позволяют рассматривать BD +48°1220 в качестве аналога пекулярного А-сверхгиганта V2324 Cyg, упомянутого во введении. Однако содержание бария в атмосфере BD +48°1220 значительно понижено: $[\text{Ba}/\text{Fe}]_{\odot} = -0.84$, в то время как в случае V2324 Cyg наблюдается небольшой его избыток: $[\text{Ba}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.46$.

Светимость звезды и особенности химического состава (избыток гелия, лития, кремния, натрия, кислорода при $[\text{C}/\text{O}] < 1$) позволяют отнести BD +48°1220 к более массивным post-AGB звездам, у которых на стадии AGB идут ядерные реакции НВВ у основания горячей конвективной оболочки. Кроме того, найдены искажения распространности химических элементов за счет их селективной сепарации на пылинки в оболочке звезды. Аргументом в пользу сепарации является повышенное содержание цинка: $[\text{Zn}/\text{Fe}] = +0.44$ и близкие значения дефицита кальция и скандия. Перечисленные выше особенности распространности химических элементов в атмосфере BD +48°1220 позже были подтверждены по эшелльным спектрам обсерваторий McDonald и Vainu Varri [27]. В целом совокупность параметров ($M_V \approx -5^m$, $V_{\text{lsr}} \approx -20$ км с⁻¹, металличность $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.10$, особенности оптического спектра и химического состава) подтверждают для BD +48°1220 статус He- и O-rich post-AGB-звезды в диске Галактики с исходной массой $M > 4 M_{\odot}$. Отметим также редко встречающуюся особенность химического состава в атмосфере BD +48°1220 — надежно определенный избыток никеля.

Таким образом, для создания атласа нами выбраны три А-сверхгиганта, различающиеся по массе и стадии эволюции. Наблюдаемые свойства этих звезд принципиально различаются, что обеспечивает актуальность сравнения их оптических спектров.

3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Спектры всех объектов, использованные нами для создания атласа, получены в фокусе Несмита 6-м телескопа БТА. Эшелльный спектрограф NES [28] в сочетании с ПЗС-матрицей 2048 × 4608 элементов и в комбинации с резателем изображения [29] обеспечивает спектральное разрешение $R = 60\,000$. Юлианская дата среднего момента

наблюдений приведена в предпоследнем столбце таблицы 1.

Экстракция данных из двумерных эшелле изображений выполнена с помощью модифицированного [30] контекста ECHELLE программного комплекса MIDAS в операционной среде Linux. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием торий-аргоновой лампы с полым катодом. Дальнейшая обработка одномерных спектров, включающая проведение континуума, фотометрические и позиционные измерения, выполнена с помощью версии 7.3.23 программы DECH 20T [31]. Для увеличения точности измерения интенсивностей и положений спектральных линий путём сравнения наблюдаемых спектров с соответствующими синтетическими были отобраны неблендированные линии. Определение позиционного нуля-пункта каждой из спектрограмм выполнено стандартным приёмом — привязкой к положениям теллурических абсорбций и ионосферных эмиссий, которые наблюдаются на фоне спектра объекта. Точность измерения скорости на спектрах, полученных со спектрографом NES, лучше 1 км с⁻¹ по одной линии [12].

4. ОПИСАНИЕ АТЛАСА

Создание спектральных атласов особенно актуально в связи с ростом качества наблюдательных данных, обусловленного переходом на современные спектрографы высокого спектрального разрешения с регистрацией спектров на малозумящие матрицы ПЗС. Кроме того, в настоящее время есть возможность представления графической информации атласов и детальных таблиц с отождествлением линий в электронном виде, что обеспечивает неограниченный доступ пользователей к этим наблюдательным массивам.

Спектры изучаемых нами звезд представлены в атласе в виде графиков (см. примеры на рис. 2 и 3) и таблицы 2. Из обширной таблицы 2 мы приводим здесь для примера лишь начало таблицы, что составляет около 1% полного объема этой таблицы. Рисунки содержат графики зависимостей остаточной интенсивности r от лабораторной длины волны, они размещены один под другим в том же порядке, что и объекты в таблице 1. Для перевода наблюдаемых спектров в шкалу лабораторных длин волн мы определили лучевые скорости V_r звезд для момента их наблюдений, отобразив для этой процедуры линии низкой и умеренной интенсивности без явных искажений. Следует подчеркнуть, что по спектрам изучаемых звезд мы не нашли дифференциальных сдвигов этих линий. Это позволило нам

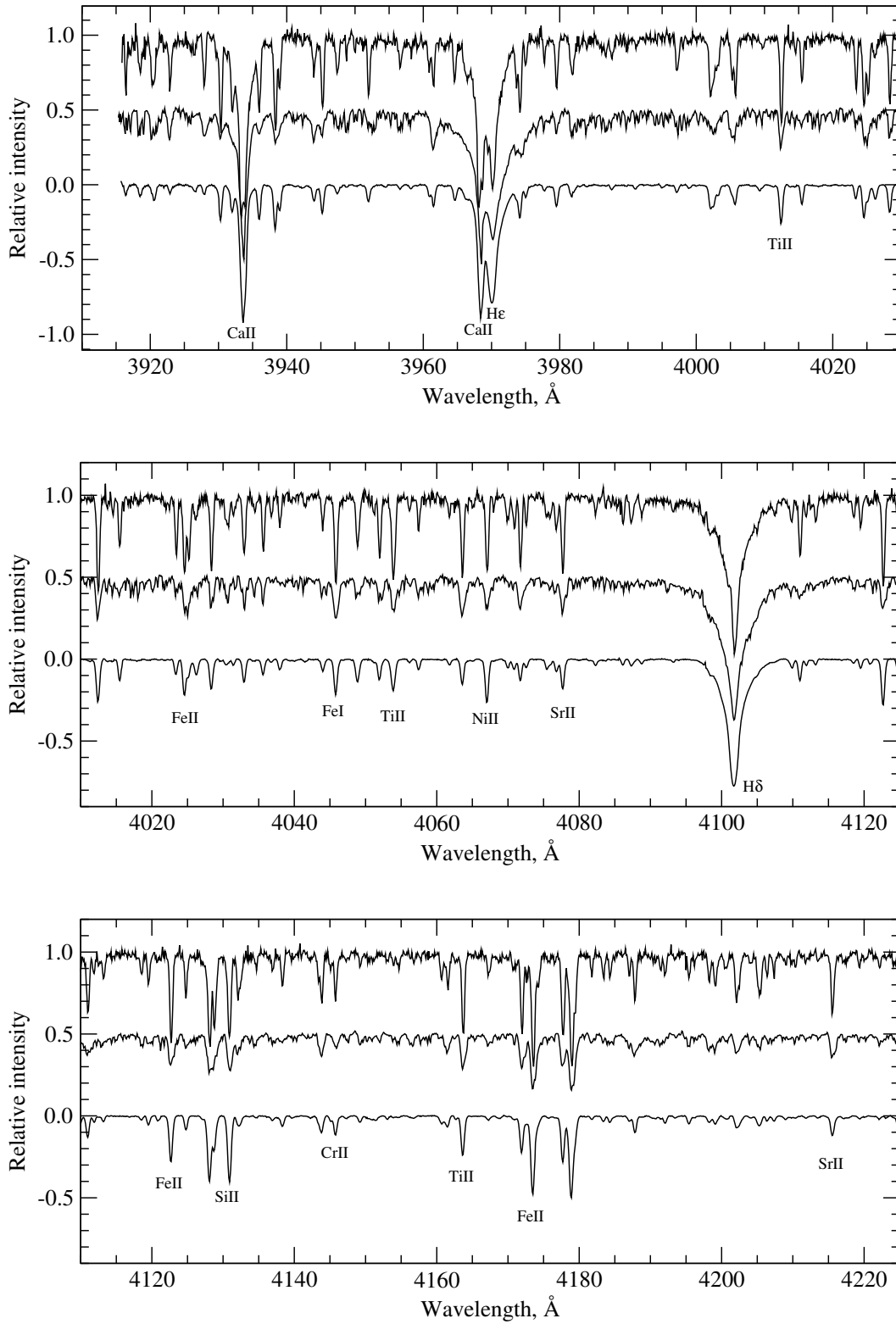


Рис. 2. Три коротковолновых фрагмента атласа в диапазоне длин волн 3920–4220 Å. Сверху вниз здесь и на последующих рисунках расположены фрагменты спектров: BD+48° 1220, 3 Puc, α Cyg, смещенные относительно друг друга по оси ординат.

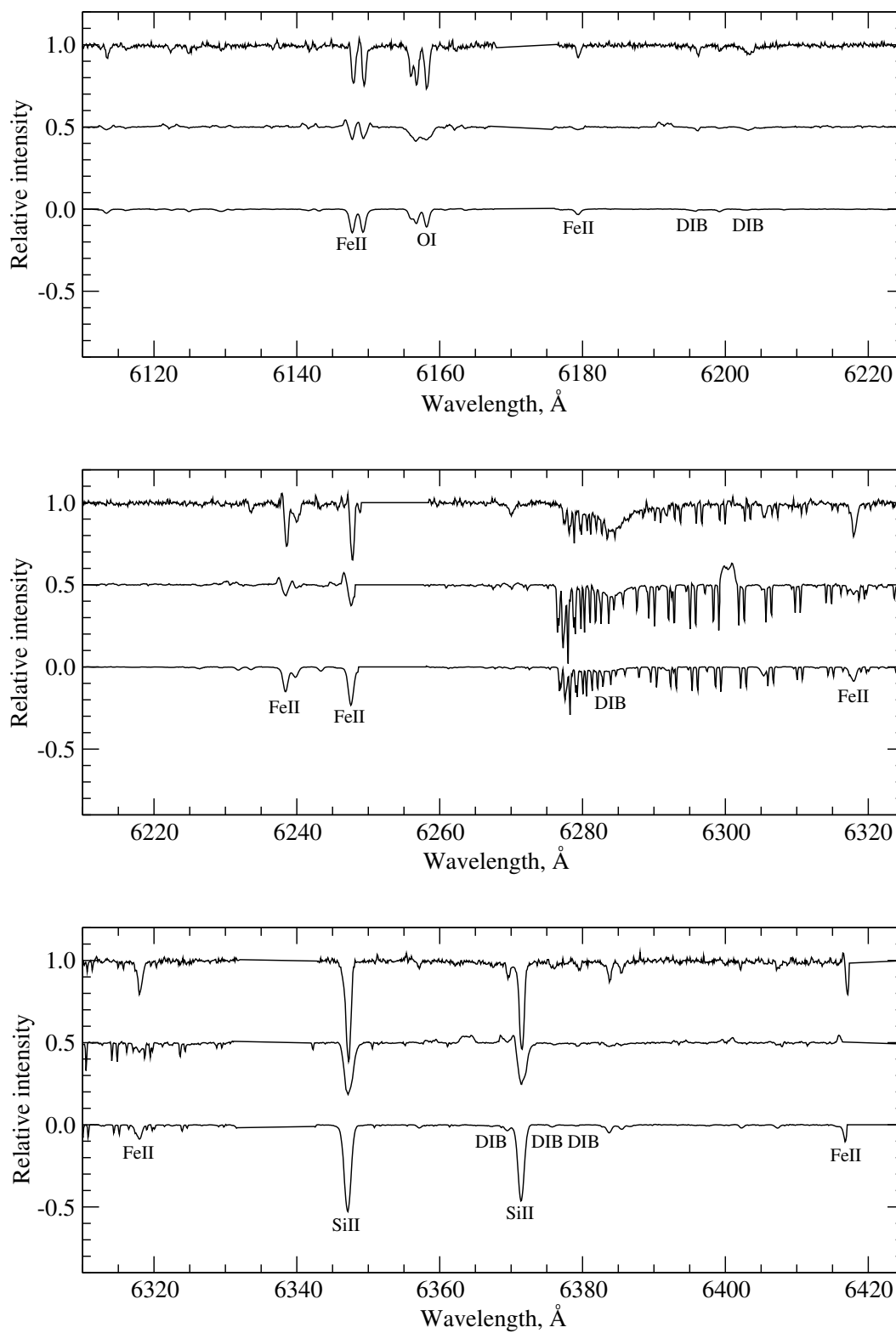


Рис. 3. Фрагменты атласа в диапазоне длин волн 6120–6520 Å. Детали теллурического спектра не удалены.

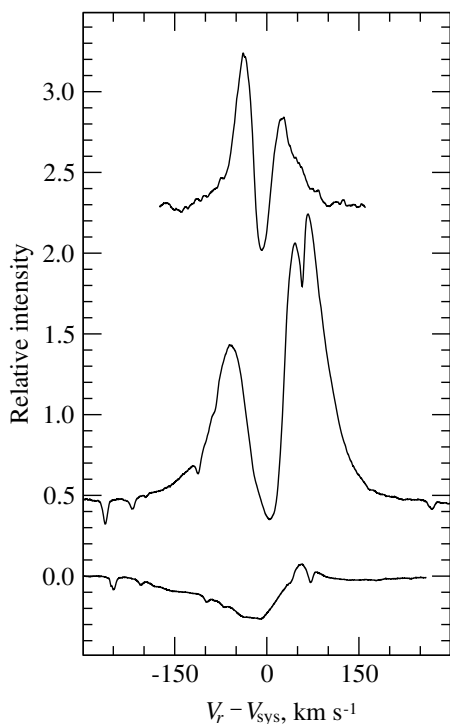


Рис. 4. Центральные части профилей $H\alpha$ в спектрах исследуемых сверхгигантов (сверху вниз): $BD +48^\circ 1220$, $3 Pupp$ и αCyg . Профиль $H\alpha$ в спектре $3 Pupp$ сдвинут вверх на 0.5, а в спектре $BD +48^\circ 1220$ на 2.3 относительно профиля в спектре αCyg . По оси абсцисс для каждой звезды дана разность гелиоцентрической и системной скоростей $V_r - V_{sys}$ в km s^{-1} . Теллурические детали не убраны.

при переводе длин волн в лабораторные применить средние значения $V_r = -5.5, +30.5, -5.2 \text{ km s}^{-1}$ для $BD +48^\circ 1220$, $3 Pupp$ и αCyg соответственно.

Для каждой звезды данные $r(\lambda)$ отдельных эшелельных порядков были соединены в единый массив, который затем был разбит на равные фрагменты по 100 \AA . В каждом из фрагментов атласа спектра указано отождествление нескольких линий. Для отождествления спектральных деталей мы использовали результаты работ [11, 12], а также сведения из базы данных VALD (см. работу [32] и ссылки на предыдущие публикации, касающиеся более ранних версий).

В первых двух столбцах таблицы 2 приводятся результаты отождествления линий: название химического элемента, номер мультиплета и использованные лабораторные длины волн по [32]. В последующих столбцах этой таблицы для каждой звезды приведены центральные остаточные интенсивности абсорбций r и гелиоцентрические лучевые скорости V_r в km s^{-1} , измеренные по абсорбционным ядрам одиночных линий или по четко выделяющимся компонентам бленд. Мы используем центральные

остаточные интенсивности вместо эквивалентных ширин для удобства сопоставления табличных данных с графическими. Горизонтальные линии в таблице разделяют одиночные линии и бленды. Фрагменты спектра и таблицы 2 в полном объеме доступны в электронном виде по веб-адресу: <http://www.sao.ru/hq/ss1/Deneb/atlas.html>. Далее рассмотрим некоторые особенности спектров изучаемых звезд.

4.1. αCyg

Фрагменты спектра αCyg в ограниченной области длин волн $3826\text{--}5212 \text{ \AA}$ с разрешением, близким к нашему, но с более высоким отношением сигнала к шуму ($S/N = 300\text{--}1400$), представлены в атласе [33]. Все абсорбции из этого атласа вплоть до самых слабых с остаточными интенсивностями $r < 0.995$ различимы и в нашем спектре. Остаточные интенсивности систематически не различаются. Ченцов и др. [34] опубликовали атлас спектров четырех звезд в широком диапазоне длин волн $3055\text{--}4520 \text{ \AA}$, включающий наземный ультрафиолет. В атласе [34] спектры хорошо изученных звезд близкой температуры (βOri , αLyr и αCyg), но разной светимости сопоставлены со спектром мало-металлического А-сверхгиганта $KS Per$, атмосфера которого обеднена водородом, $H/He = 3 \times 10^{-5}$.

Коротковолновый участок спектра αCyg , рассматриваемого в данной работе, сопоставим с длинноволновым участком спектра в атласе [34]. Спектры из обоих атласов получены с одним и тем же спектрографом НЭС с одинаковым спектральным разрешением, что позволяет исследовать спектр αCyg в широкой области длин волн $3055\text{--}6720 \text{ \AA}$.

4.2. $BD +48^\circ 1220$

Оптический спектр $BD +48^\circ 1220$ отличается от спектра αCyg наличием множества линий с асимметричными профилями, искаженными эмиссионными компонентами. Это различие хорошо иллюстрируют профили на левой и правой панелях рис. 1. Линия $H\alpha$ в спектре $BD +48^\circ 1220$ имеет сложный двукомпонентный эмиссионный профиль, которому, как следует из сравнения профиля на рис. 4 с данными [12], присуща переменность во времени. В частности отметим, что за десятилетие со времени получения спектров, использованных в работе [12], соотношение интенсивностей коротковолнового и длинноволнового эмиссионных компонентов $H\alpha$ изменилось на обратное. Переменные эмиссионные компоненты наблюдаются и в линиях металлов $Si II$, $Fe I$, $Fe II$. Эта переменность обусловлена несферичностью околозвездной

оболочки, что подтверждается и исследованиями поляризации излучения звезды [35].

Для звезды с эффективной температурой ниже 8000 К неожиданным является присутствие сильной абсорбции нейтрального гелия $\text{He I } \lambda 5876 \text{ \AA}$ с эквивалентной шириной $W_\lambda(5875) = 75 \text{ m\AA}$. Абсорбционный характер линии указывает на ее фотосферное происхождение; это подтверждается и тем, что значение лучевой скорости, соответствующее положению линии, согласуется со скоростью по другим слабым абсорбциям (см. таблицу 2).

Особенностью спектра BD +48°1220 является также присутствие в нем слабых абсорбций, отождествляемых с известными диффузными межзвездными полосами (DIBs). Их список, эквивалентные ширины и соответствующие положению этих деталей гелиоцентрические скорости даны в таблице 2. Среднее значение гелиоцентрической скорости V_r по межзвездным полосам DIBs согласуется со значением скорости по основному компоненту линий Na D: $V_r(\text{DIBs}) \approx -2 \text{ км с}^{-1}$.

4.3. 3 Pup

Характерная особенность спектра 3 Pup — двухпиковые эмиссионные детали профилей множества линий (в основном ионов Fe II) отлично воспроизводятся в нашем атласе. В частности, такие специфические профили с приподнятыми крыльями содержатся на средней панели рис. 1 и на рис. 3. Эмиссионная линия $\text{H}\alpha$ в спектре 3 Pup имеет сложный раздвоенный профиль с превалирующим красным компонентом (рис. 4).

Полезное сопоставление профилей линий различной интенсивности в спектрах 3 Pup и α Cyg выполнено в статье [11]. Сравнение деталей показывает, что в спектре α Cyg все линии симметричны и различаются лишь глубиной. Их формирование идет вблизи фотосферы. У 3 Pup фотосферной можно считать только линию $\text{Mg II } 4481 \text{ \AA}$, а в линиях Fe II очевиден вклад оболочки, которая придает профилям специфическую форму: крылья приподняты эмиссиями, а ядро заострено депрессией. Последняя заметна уже у абсорбций с остаточной интенсивностью $r \approx 0.2$ и с усилением линии нарастает. Сопоставление профилей линий и их параметров в спектрах 3 Pup и α Cyg, полученных с одним и тем же спектральным разрешением, показало, что проявление оболочки 3 Pup не ограничено отдельными линиями. Оно усиливается постепенно с ростом интенсивности и длины волны линии. Сравнение центральных глубин абсорбций в спектрах 3 Pup и α Cyg выполнено на рис. 1 в работе [11].

Естественно, что аномалии профилей линий в спектре 3 Pup сказываются на измерениях лучевых

скоростей. Зависимость $V_r(r)$ по измерениям линий в нескольких спектрах, полученных в различные даты, переменна со временем. Однако для запыщенных эмиссий и узких, принадлежащих оболочке ядер абсорбций сильных линий ионов группы железа изменения скоростей со временем минимальны, а сами скорости по таким линиям близки друг к другу. Средняя скорость для указанных линий может быть принята в качестве лучевой скорости системы в целом: $V_{\text{sys}} = 28.5 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$ [11]. Среднее значение скорости V_r по межзвездным полосам DIBs $V_r = +28.55 \text{ км с}^{-1}$.

5. ВЫВОДЫ

По наблюдениям с высоким спектральным разрешением составлен атлас спектров в интервале длин волн 3920–6720 \AA для трех А-сверхгигантов с различным эволюционным статусом: массивный сверхгигант α Cyg, пекулярный сверхгигант с околозвездным диском 3 Pup и post-AGB звезда BD +48°1220. Сопоставление их спектров приводит к выводу о том, что определение эволюционного статуса сверхгигантов в галактическом поле — задача нетривиальная, поскольку одни и те же значения спектрального класса и близкого класса светимости могут иметь звезды существенно различающихся возрастов и масс, наблюдаемые на принципиально различных эволюционных стадиях. Одну и ту же область диаграммы Герцшпрунга–Рассела занимают post-AGB звезды, эволюционирующие от стадии AGB к планетарной туманности, и массивные сверхгиганты, эволюционирующие от главной последовательности к стадии красного сверхгиганта. Наглядным примером являются post-AGB звезда BD +48°1220 и массивный сверхгигант 3 Pup с близкими особенностями спектров.

Опыт работы со спектрами звезд различных типов приводит нас к мысли о том, что для определенных выводов об эволюционном статусе ЗВС требуется совокупность всех основных параметров звезды, прежде всего, светимости, поля скоростей в атмосфере и детального химического состава. Спектроскопия высокого спектрального разрешения, обеспечивающая необходимые для определения этих параметров сведения, является основным подходом в звездной астрофизике. Необходимую информацию обеспечивают также спектрополяриметрия и наблюдения с высоким пространственным разрешением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 12-07-00739а, 14-02-00291а). Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при

финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004). В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD и ADS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Massey, *New Astron. Rev.* **57**, 14 (2013).
2. R. M. Humphreys, K. Davidson, S. Grammer, et al., *Astrophys. J.* **773**, 46 (2013).
3. S. Kwok, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 63 (1993).
4. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 112 (2008).
5. P. Ventura, R. Carini, and F. D. D'Antona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415**, 3865 (2011).
6. B. M. Lewis, *Astrophys. J.* **338**, 234 (1989).
7. P. Garcia-Lario, A. Machado, S. R. Suso, and S. R. Pottash, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **82**, 497 (1990).
8. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, and G. V. Sokol, *Astronomy Letters* **26**, 609 (2000).
9. D. Hoffleit and C. Jaschek, *The Bright Star Catalogue*, 4th ed. (Yale University Observatory, New Haven, 1982).
10. F. Schiller and N. Przybilla, *Astron. and Astrophys.* **479**, 849 (2008).
11. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and A. S. Miroshnichenko, *Astrophysical Bulletin* **65**, 150 (2010).
12. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavolzhanskaya, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **51**, 642 (2007).
13. B. Boer, C. de Jager, and H. Nieuwenhuijzen, *Astron. and Astrophys.* **195**, 218 (1988).
14. A. Kaufer, O. Stahl, B. Wolf, et al., *Astron. and Astrophys.* **305**, 887 (1996).
15. N. D. Richardson, N. D. Morrison, E. E. Kryukova, and S. J. Adelman, *Astron. J.* **141**, 17 (2011).
16. H. Saio, C. Georgy, and G. Meynet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433**, 1246 (2013).
17. M. Jura and S. G. Kleinmann, *Astrophys. J.* **341**, 359 (1989).
18. A. Meilland, S. Kanaan, M. Borges Fernandes, et al., *Astron. and Astrophys.* **512**, A73 (2010).
19. N. R. Trams, L. B. F. M. Waters, H. J. G. L. M. Lamers, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **87**, 361 (1991).
20. H. Plets, C. Waelkens, and N. R. Trams, *Astron. and Astrophys.* **293**, 363 (1995).
21. H. J. G. L. M. Lamers, F.-J. Zickgraf, D. de Winter, et al., *Astron. and Astrophys.* **340**, 117 (1998).
22. W. J. de Wit, R. Oudmaijer, and J. S. Vink, *Advances in Astronomy* **2014**, id. 270848 (2014).
23. L. O. Loden, *The Messenger*, № 68, 26 (1992).
24. F. Millour, A. Meilland, O. Chesneau, et al., *Astron. and Astrophys.* **526**, A107 (2011).
25. T. Fujii, Y. Nakada, and M. Parthasarathy, *Astron. and Astrophys.* **385**, 884 (2002).
26. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *IBVS*, № 5584, (2004).
27. S. S. Rao, G. Pandey, D. L. Lambert, and S. Giridhar, *Astrophys. J.* **737**, L7 (2011).
28. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, *J. Optical Technology* **76**, 87 (2009).
29. V. Panchuk, M. Yushkin, and I. Najdenov, Preprint № 179, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs. RAS, 2003).
30. M. Yushkin and V. Klochkova, Preprint № 206, (Special Astrophysical Observatory, Nizhnii Arkhyz, 2005).
31. G. A. Galazutdinov, Preprint № 92, SAO (Special Astrophysical Observatory, Nizhnii Arkhyz, 1992).
32. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119 (1999).
33. B. Albayrak, A. F. Gulliver, S. J. Adelman, et al., *Astron. and Astrophys.* **400**, 1043 (2003).
34. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, T. Kipper, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 466 (2011).
35. M. Parthasarathy, S. K. Jain, and G. Sarkar, *Astron. J.* **129**, 2451 (2005).

Spectral Atlas of A-Type Supergiants

V. G. Klochkova, E. G. Sendzikas, and E. L. Chentsov

Using the data from the observations carried out with a high spectral resolution of $R = 60\,000$ at the 6-m BTA telescope in combination with the echelle spectrograph NES, we thoroughly studied the characteristics of the optical spectra of the A supergiants ζ Pup, BD +48°1220, and α Cyg, which belong to essentially different stages of evolution. A spectral atlas for these stars was compiled in the wavelength interval of 3920 to 6720 Å.

Keywords: *supergiants—stars: AGB and post-AGB—atlases—stars: individual: ζ Pup, BD +48°1220, α Cyg*