

УДК 524.3(084)-852/74

## АТЛАС СПЕКТРОВ ИЗБРАННЫХ ЗВЕЗД В НАЗЕМНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

© 2011 Е. Л. Ченцов<sup>1\*</sup>, В. Г. Клочкова<sup>1</sup>, Т. Киппер<sup>2</sup>,  
Н. С. Таволжанская<sup>1</sup>, В. Е. Панчук<sup>1</sup>, М. В. Юшкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup> Обсерватория Тарту, Тыравере, 61602, Эстония

Поступила в редакцию 11 апреля 2011 г.; принята в печать 31 мая 2011 г.

Представлен атлас спектров высокого отношения сигнал/шум и высокого спектрального разрешения ( $R \geq 60000$ ) в плохо изученной коротковолновой области длин волн вплоть до  $3055 \text{ \AA}$ . Спектры хорошо изученных звезд близкой температуры ( $\beta$  Ori,  $\alpha$  Lyr и  $\alpha$  Cyg) сопоставлены со спектром малометаллического А-сверхгиганта KS Per, атмосфера которого обеднена водородом,  $H/He = 3 \times 10^{-5}$ . Изучено поле скоростей в расширяющихся атмосферах и оболочках указанных звезд. Атлас в полном объеме и детальное отождествление спектральных деталей приведены в Интернете.

Ключевые слова: *звезды — свойства, классификация*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность создания спектральных атласов возросла в последние годы в связи с ростом качества наблюдательных данных, обусловленного переходом на современные спектрографы высокого спектрального разрешения с регистрацией спектров на малозумящие матрицы ПЗС. В настоящее время, когда созданы возможности представления атласов и детальных таблиц с отождествлением линий в электронном виде, создание спектрального атласа является высшим уровнем архивации наблюдательных массивов.

Данных об УФ-излучении звезд различных типов систематически не хватает. Причиной тому является небольшое число спектрографов высокого разрешения, пригодных для работы в наземном УФ-диапазоне. Большинство систем скрещенной дисперсии снабжены стеклянными призмами и/или оптоволоконным сочетанием “телескоп-спектрограф”, и то и другое резко снижает пропускание оптики в УФ. Коротковолновая граница диапазона, регистрируемого такими спектрографами, в большинстве случаев находится вблизи  $3900 \text{ \AA}$ .

Ультрафиолетовое излучение является индикатором тех слоев атмосфер, где среди источников непрерывного поглощения и рассеяния преобладает вклад томпсоновского (горячие звезды) и релевского (холодные звезды) рассеяния. Сложности теоретического описания УФ-спектров дополняются дефицитом наблюдательного материала, полученного с низким уровнем шумов и с высоким

спектральным разрешением. В этой области, в частности, лежит предел Бальмеровской серии водорода. Измерения Бальмеровского скачка широко используется для спектральной классификации и определения фундаментальных параметров звезд (см. ссылки в [1]). Исследования бальмеровских спектров с низким спектральным разрешением, положенные в основу эмпирической классификации горячих звезд, были развиты затем в работах со средним спектральным разрешением, когда появилась возможность выбора и/или уточнения теории уширения линий. В настоящую эпоху, когда возможности наблюдений вблизи бальмеровского предела возросли (величина произведения спектрального разрешения на светосилу увеличилась на два-три порядка), следует выполнить новые наблюдения и сравнить параметры моделей атмосфер, определяемые по низким и высоким членам бальмеровской серии. Отдельный интерес представляют также наблюдения звезд с аномальными бальмеровскими скачками.

В данной работе мы представляем спектры трех звезд, принадлежащих населению диска ( $\beta$  Ori,  $\alpha$  Lyr и  $\alpha$  Cyg), в сравнении со спектром аномального А-сверхгиганта KS Per на далеко продвинутой эволюционной стадии. Основные параметры звезд приведены в Табл. 1. Напомним, что  $\alpha$  Lyr — спектрофотометрический стандарт и стандарт лучевой скорости, а  $\beta$  Ori,  $\alpha$  Lyr и  $\alpha$  Cyg являются стандартами в системе двумерной спектральной классификации.

Близкий по эффективной температуре к трем нормальным звездам атласа пекулярный объект

\*E-mail: echen@sao.ru

KS Per относится к малочисленной группе тесных двойных с дефицитом водорода [2]. KS Per имеет измененный в ходе собственной эволюции химический состав. Киппер и Ключкова [3], используя спектральные данные с 6-метрового телескопа, нашли большой дефицит водорода в атмосфере KS Per,  $H/He = 3 \times 10^{-5}$ , и низкую металличность  $[Fe/H] = -0.8$ . Кроме того, выявлен большой избыток азота,  $[N/Fe] = +1.4$ , при пониженном содержании углерода, что согласуется со стадией эволюции звезды. Из-за большого дефицита водорода в спектре KS Per содержатся линии, нетипичные для звезды спектрального класса A.

Основным достоинством данного атласа является расширение рабочего спектрального диапазона в область коротких длин волн, до  $3050 \text{ \AA}$ , т.е. вплоть до перекрытия с областью, традиционно относимой к ракетному ультрафиолету. Высокие спектральное разрешение и отношение “сигнал/шум” делают актуальным детальное описание спектров даже стандартных звезд в области наземного ультрафиолета ( $3000\text{--}3800 \text{ \AA}$ ), которая из-за насыщенности линиями является более информативной, чем видимый диапазон, особенно для горячих звезд.

Рис. 1 демонстрирует различие области Бальмеровского предела в спектрах звезд разной светимости, но близкой температуры. Длинноволновый предел атласа заходит далеко в видимую область спектра, вплоть до  $4500 \text{ \AA}$ , что позволяет сопоставлять наши данные с уже опубликованными по спектрам в традиционной области длин волн. Информативность ближнего УФ-диапазона для изучения спектров звезд хорошо иллюстрирует Рис. 2, где представлены избранные фрагменты спектров для 4-х звезд программы.

**Таблица 1.** Основные параметры звезд из базы астрономических данных SIMBAD

Star	HD	Sp	B, mag
$\beta$ Ori	34085	B8 Ia	0.1
$\alpha$ Lyr	172167	A0 V	0.0
$\alpha$ Cyg	197345	A2 Ia	1.3
KS Per <sup>1</sup>	30353	A5 Ip	8.1

1 — H-deficient star [3]

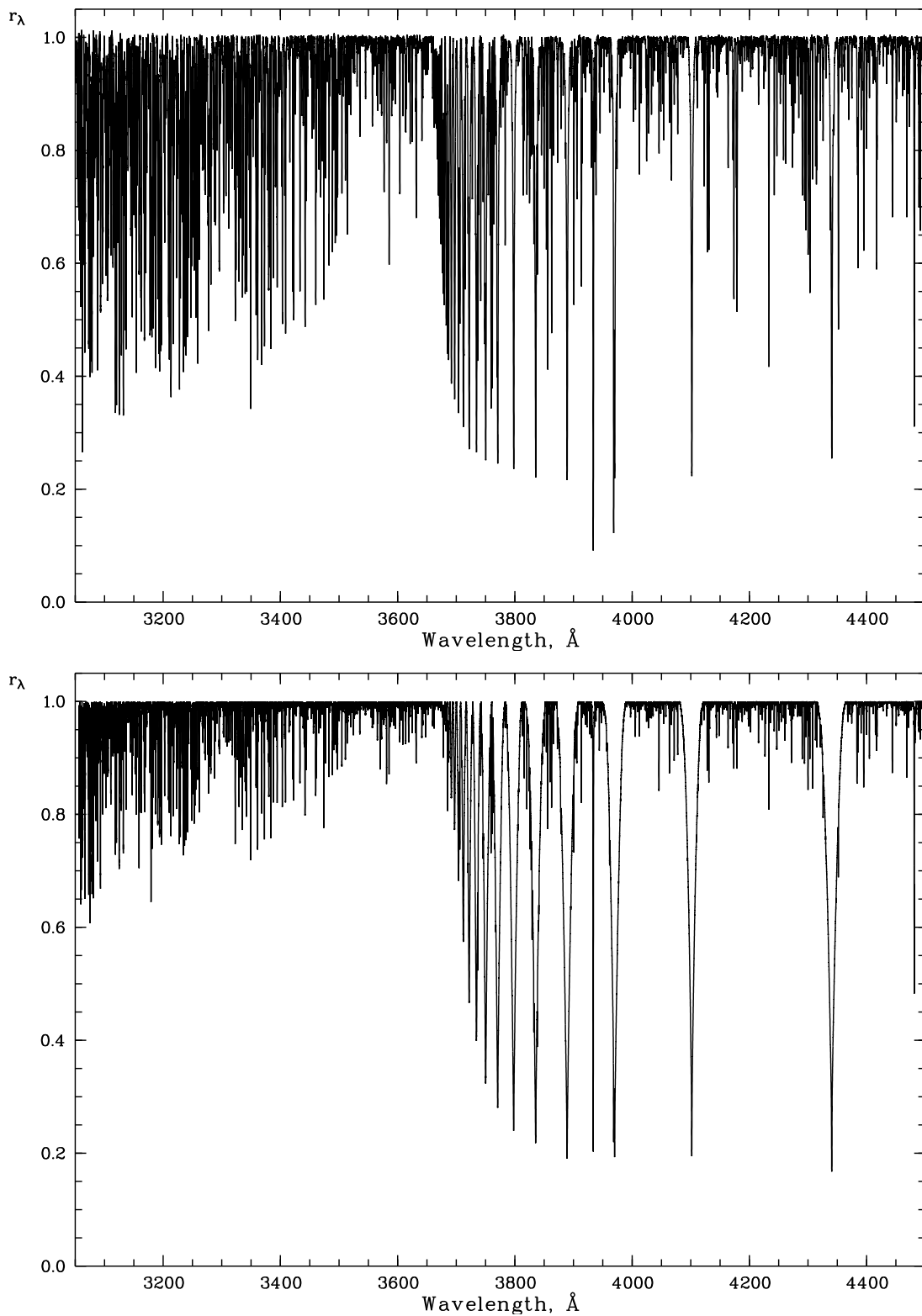
## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Высококачественные спектры звезд в интервале  $\lambda \approx 3050\text{--}4525 \text{ \AA}$  (отношение сигнала к шуму

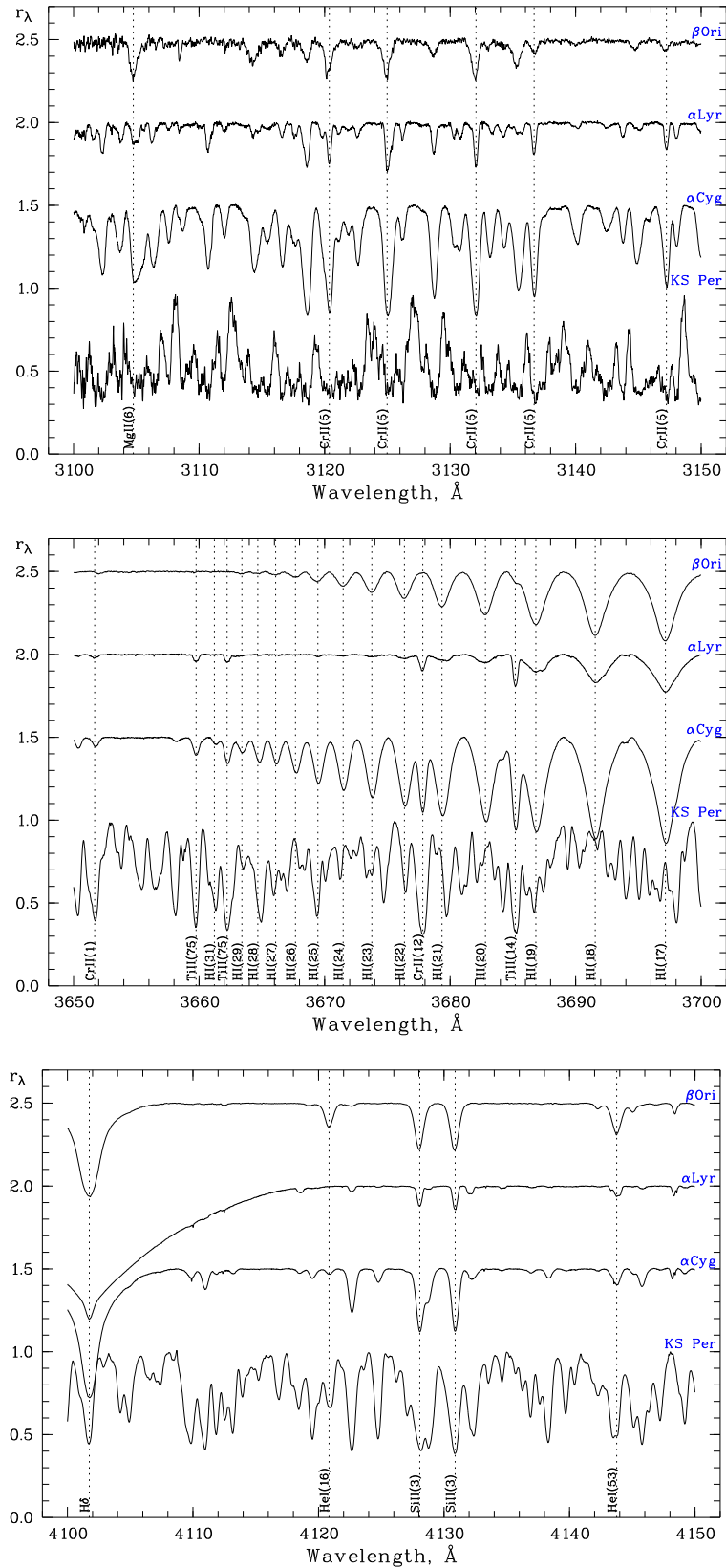
$S/N \geq 100$ , спектральное разрешение  $R \geq 60000$ ) получены нами в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН с кварцевым эшелльным спектрографом НЭС [4] 19 и 20 октября 2008 г. Эшелле спектрограф НЭС работает на 6-м телескопе с 1998 г., но только с 2001 г., после установки матрицы с высокой чувствительностью в ультрафиолете, он стал эффективным средством наблюдений в коротковолновом диапазоне. Светоприемником служит матрица ПЗС Астрономической обсерватории университета г. Уппсала (Швеция), имеющая высокую чувствительность в синем и УФ-диапазонах. Шум считывания составляет  $7.7 e^-$ , темновой ток —  $1.5 e^-/h$ . Число светочувствительных элементов  $2048 \times 2048$ , размер одного элемента  $0.015 \times 0.015 \text{ мм}$ .

Параметры эшелле-решетки и камеры таковы, что, в сочетании с используемой матрицей ПЗС обеспечивается полное перекрытие соседних порядков эшелле-спектра, а в самых высоких УФ-порядках — даже двукратное перекрытие. Решетки скрещенной дисперсии сменные 300 и 600 штр/мм. Шмидтовский корректор камеры и зеркало Манжена (мениск двойного хода в качестве кассегреновского зеркала) изготовлены из плавленного кварца. Полеспрямляющая линза отсутствует, ее функции выполняет манженовское зеркало. Защитное стекло криостата матрицы ПЗС увиолевое. Квантовый выход используемой ПЗС-матрицы в ультрафиолете достигает 70%. В целом, оптический тракт спектрографа построен с минимальными потерями, в том числе и в ультрафиолете, до порядка  $3100 \text{ \AA}$  [5]. Система автоматического гидирования настраивается по фиолетовому участку изображения с учетом направления и величины вектора атмосферной рефракции.

Для исключения следов космических частиц и повышения отношения  $S/N$  мы делали, как минимум, две экспозиции для каждого объекта. Обработка двумерных эшелле-кадров (вычитание темновых кадров, очистка от космических частиц, калибровка длин волн, экстракция одномерных векторов) проводилась с помощью модифицированного [6] контекста ECHELLE-комплекса программ MIDAS. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Источником спектра сравнения служила торий-аргоновая лампа. Окончательная обработка спектров выполнена с помощью специализированной программы DECH [7], которая обеспечивает необходимые для создания атласа процедуры, в частности, позволяет приводить спектры к виду  $I(\lambda)$  и измерять лучевые скорости по отдельным линиям, совмещая по оси  $\lambda$  прямые и зеркальные изображения их профилей.



**Рис. 1.** Нормированные на континуум спектры сверхгиганта  $\alpha$  Cyg (вверху) и звезды главной последовательности  $\alpha$  Lyr (внизу) в полном интервале длин волн, зарегистрированном со спектрографом НЭС БТА.



**Рис. 2.** Фрагменты спектрального атласа,  $r_\lambda(\lambda)$ , для объектов атласа. Сверху вниз:  $\beta$  Ori,  $\alpha$  Lyr,  $\alpha$  Cyg, KS Per. Горизонтальная ось размечена по лабораторным длинам волн слабых абсорпций. Нанесено отождествление избранных линий.

Таблица 2. Гелиоцентрические лучевые скорости по резонансным межзвездным линиям TiII и CaII

Звезда	TiII(2) 3241.98	CaII(1) 3933.66	Источник данных
	TiII(1) 3383.74	CaII(1) 3968.74	
V <sub>r</sub> , км/с			
$\beta$ Ori	9:, 22:	-12:, 1.5:, 9.0	данная работа [10]
$\alpha$ Cyg	-8:	-15, -0.5, 9.0	данная работа [11]
$\gamma$ Cas	-5:	-11.0, -11.8, -5.1, -5.0	данная работа [11]

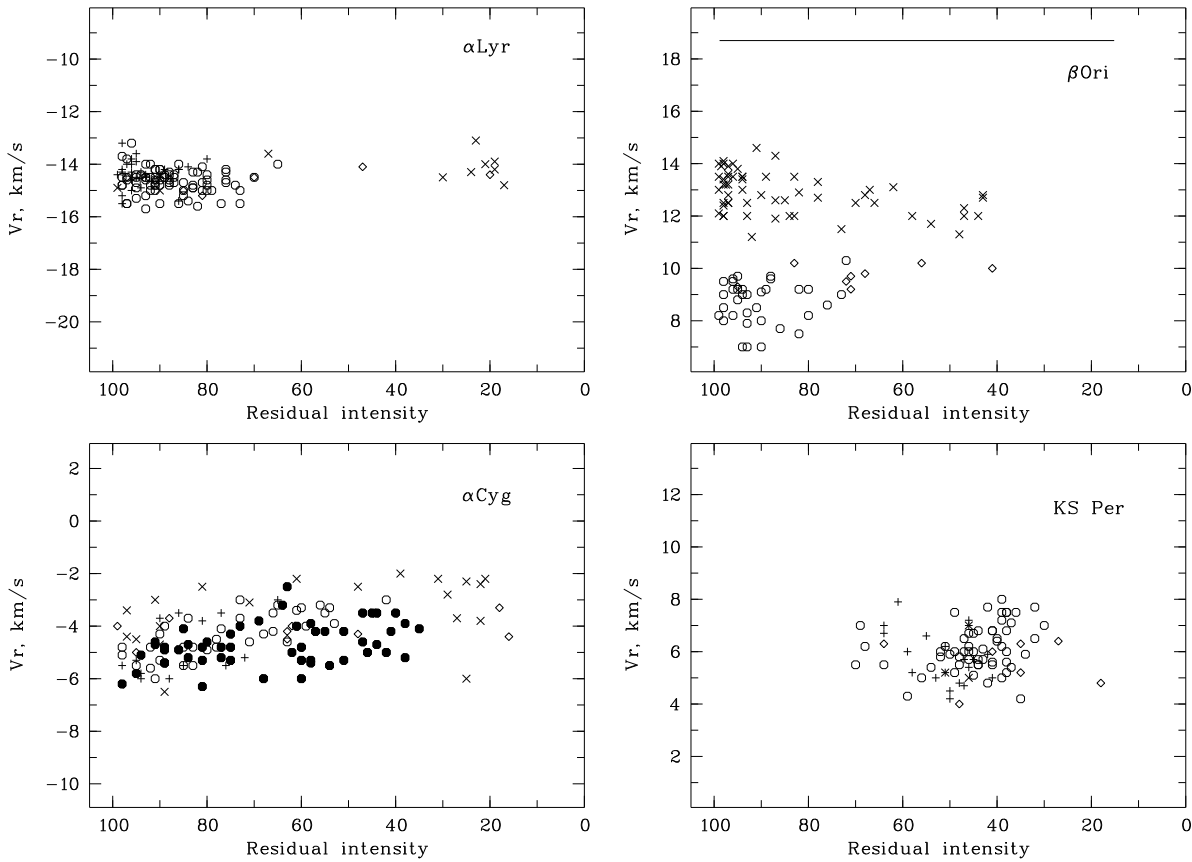


Рис. 3. Зависимости гелиоцентрической лучевой скорости от остаточной интенсивности линии, выраженной в процентах от уровня континуума, для  $\alpha$  Lyr,  $\beta$  Ori,  $\alpha$  Cyg и KS Per. Каждый значок соответствует одной линии. Кружки — FeII и др. ионы группы железа, прямые крестики — FeI и др. нейтральные атомы, косые крестики — Ni, NiI, Si, NiII, OII, ромбики — SiII MgII, SiII, CaII. Заполненные кружки — линии металлов с коротковолновой стороны от бальмеровского предела в спектре  $\alpha$  Cyg. Во фрагменте для  $\beta$  Ori горизонтальной прямой отмечена скорость звезды в целом  $V_{sys} = 18.7$  км/с.

Обработка спектров KS Per проведена с помощью средств пакета IRAF NOAO. Для получения суммарного спектра этой звезды были сложены 5 двумерных эшелле-кадров, каждый из которых получен с часовой экспозицией.

В качестве лабораторных использованы в основном длины волн из таблиц Стриганова и Одиной [8] и из таблиц солнечного спектра [9]. Выявление инструментальных сдвигов спектров звезд

относительно спектров сравнения с помощью телурических линий невозможно: они отсутствуют в области спектра, охваченной атласом. Поэтому возможные систематические ошибки измерений лучевых скоростей оценены по межзвездным линиям. В Табл. 2 наши данные сопоставлены с высокоточными данными других авторов для  $\beta$  Ori,  $\alpha$  Cyg и  $\gamma$  Cas, спектр которой не включен в атлас,

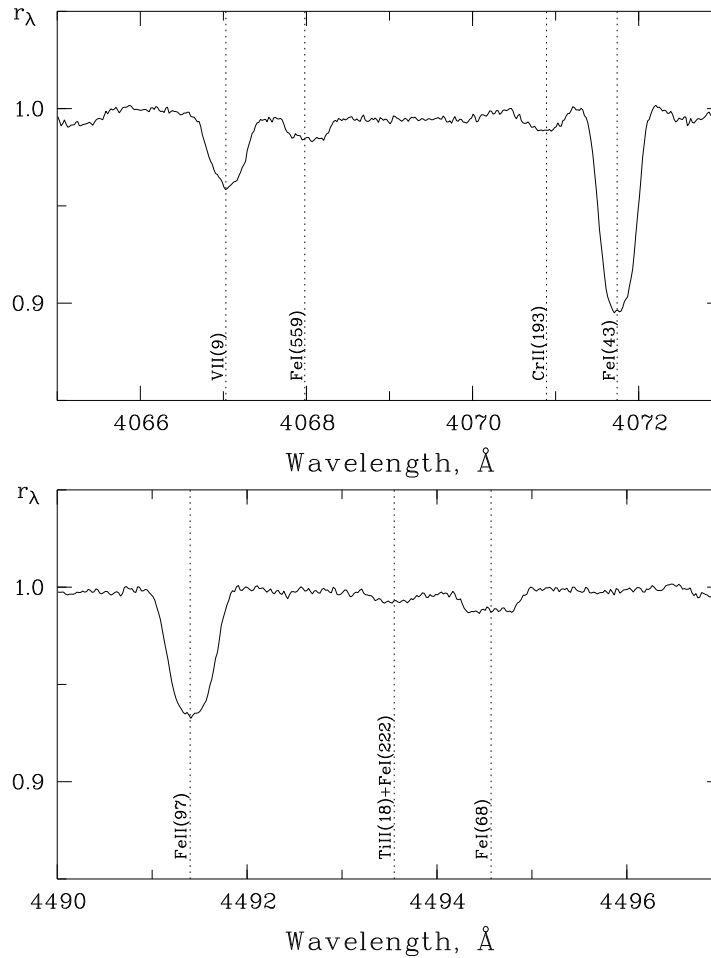


Рис. 4. Фрагменты спектра  $\alpha$  Лyr с “треугольными” (VII(9)4067.0, FeII(37)4491.4 и TiII(18), FeI(222)4493.5 Å) и “прямоугольным” (FeI(559)4068.0 и FeI(68)4494.6 Å) профилями абсорбций.

но получен при той же конфигурации спектрографа и в одну ночь со спектрами  $\alpha$  Лyr,  $\alpha$  Cyg и KS Per.

Принимая во внимание слабость межзвездных линий в спектрах наших объектов и их блендирование в спектрах  $\beta$  Ori и  $\alpha$  Cyg более сильными звездными линиями, можно заключить, что систематические ошибки приводимых лучевых скоростей вряд ли превышают 1 км/с.

Из обширного первоначального списка линий нами было оставлено свыше 2000 отождествленных линий, оптимальных для позиционных измерений. Подготовленный таким образом список линий и спектральный атлас доступны по Web-адресу <http://www.sao.ru/hq/ss1/UV-atlas-SG/atlas.html>.

### 3. ОПИСАНИЕ АТЛАСА

Спектры объектов представлены в атласе в виде графиков (см. пример на Рис.2) и таблиц. Для примера мы приводим только несколько начальных страниц из обширной Табл. 3, что составляет около 8% этой таблицы. Рисунки содержат графики

зависимостей остаточной интенсивности от лабораторной длины волны, они размещены один под другим в том же порядке, что и объекты в Табл. 1. Для каждой звезды данные  $r(\lambda)$  отдельных эшелевых порядков были соединены в единый массив, который затем был разбит на фрагменты по 50 Å. В каждом из фрагментов атласа спектра указано отождествление нескольких линий.

В первых двух столбцах Табл. 3 приводятся результаты отождествления линий: название химического элемента, номер мультиплета и использованные лабораторные длины волн по [8, 9]. В последующих столбцах этой таблицы для каждой звезды приведены центральные остаточные интенсивности абсорбций “r” и гелиоцентрические лучевые скорости  $V_r$  в км/с, измеренные по абсорбционным ядрам одиночных линий либо четко выделяющихся компонентов 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.

Использованные критерии отождествления линии стандартны: относительная интенсивность в ансамбле линий данного элемента в данной стадии ионизации, лучевая скорость и форма профиля. Но атлас позволял учесть изменение интенсивности от объекта к объекту. Критерий лучевой скорости также не сводился к контролю отождествления по отклонению значения  $V_r$  для данной линии от кривой  $V_r(r)$  для данной звезды, внимание обращалось и на положения соответствующей точки на графиках зависимостей  $V_r(r)$  для других объектов атласа (см. Рис. 3). При этом попутно осуществлен и метрологический контроль: проверены используемые лабораторные длины волн, в ряде случаев предложены их эффективные значения.

Далее рассмотрены особенности спектров отдельных объектов.

### 3.1. $\alpha$ Lyr

Коротковолновый участок нашего спектра сопоставим с длинноволновым участком спектра, полученного с помощью спектрометра орбитальной обсерватории “Soregnicus”: красная граница — 3187 Å, предел разрешения — 0.1 Å [12]. В перекрывающейся области 3055–3187 Å наша Табл. 3 содержит 98 абсорбционных деталей, список из [12] — 82. Наши оценки их остаточных интенсивностей хорошо согласуются с оценками [12],

если принятый в цитируемой работе уровень континуума понизить на 0.05. В области  $\lambda > 3900$  Å в качестве контрольных использованы данные [13–16], полученные со спектральным разрешением и отношением сигнал-шум, превышающими наши. В нашем спектре хорошо видны абсорбции с  $r < 0.995$ , для более глубоких линий остаточные интенсивности в Табл.3 и в указанных работах систематически не различаются. Известная особенность спектра Веги, “прямоугольные” профили некоторых линий (в основном нейтральных металлов), уверенно воспроизводится в нашем атласе (Рис. 4).

На Рис.3 представлена зависимость лучевой скорости от остаточной интенсивности,  $V_r(r)$ , для минимально блендированных линий в спектре  $\alpha$  Lyr. Средние скорости по самым слабым и самым сильным линиям, а при данной интенсивности для разных элементов и стадий ионизации, в пределах ошибок одинаковы. Средняя гелиоцентрическая лучевая скорость для спектра в целом:  $-14.5 \pm 0.2$  км/с. По разбросу значков на Рис. 3 можно судить о суммарных (происходящих от неточностей лабораторных длин волн и вносимых при измерениях) погрешностях лучевых скоростей, приводимых в Табл. 3.

**Таблица 3.** Остаточные интенсивности и гелиоцентрические лучевые скорости для отдельных линий в спектрах  $\alpha$  Lyr,  $\beta$  Ori,  $\alpha$  Cyg и KS Per. Горизонтальные линии в таблице разделяют одиночные линии и бленды. В полном объеме таблица доступна по адресу <http://www.sao.ru/hq/ss1/UV-atlas-SG/atlas.html>

Ident	$\lambda$	$\alpha$ Lyr		$\beta$ Ori		$\alpha$ Cyg		KS Per	
		r	$V_r$	r	$V_r$	r	$V_r$	r	$V_r$
FeII(181)	3055.37					0.71	-5:		
CrII(33)	3055.45								
TiII(47)	3056.77	0.78				0.69	-4:		
TiII(47)	3058.09					0.71			
TiII(5)	3059.52					-	-3:		
FeII(108)	3062.24	0.75	-11:			0.30	-3:		
TiII(47)	3063.50					0.75			
FeII(97)	3065.32					0.63	-2:		
TiII(5)	3066.30	0.65	-15:			0.48	-3:		
I.S.							-12.5		
FeI(56)	3067.12	0.85	-16:			0.68	-5:		
FeI(28)	3067.25								
FeII(122)	3068.76					0.86	-3.5:		
FeII(68)	3070.69	0.95	-15:			0.75	-2:		
TiII(47)	3071.24	0.92	-15.0			0.75			
TiII(5)	3072.10	0.82	-13.2			0.64	-3.0		

Таблица 3. (Продолжение)

Ident	$\lambda$	$g$	$Vg$	$g$	$Vg$	$g$	$Vg$	$g$	$Vg$
TiII(5)	3072.97	0.70:	-14.5			0.40:	-3.5		
FeII(68)	3075.22	0.65	-14.0						
TiII(5)	3075.23					0.43:	-5		
I.S.							-11.5		
FeII(181)	3076.43					0.70:	-5:		
FeII(108)	3077.17	0.86:	-14.5			0.45:	-3:		
TiII(5)	3078.64	0.73	-13:			0.38	-3.9		
TiII(119)	3081.58					0.90:	-6:		
FeII(97)	3083.05					0.77:	-5:		
CrII(47)	3083.62					0.86:			
CrII(71)	3084.46					0.86:	-4		
NiII(7)	3087.08	0.95:	-18:			0.72	-3.5:		
TiII(5)	3088.03	0.73	-15.5			0.42	-6.0		
TiII(90)	3089.41	0.89	-15.9			0.66	-6:		
TiII(119)	3090.05								
MgI(5)	3091.07	0.91	-16:			0.94			
MgI(5)	3092.99								
VII(1)	3093.10	0.67	-17:			0.51	-5:		
CrII(47)	3093.95					0.80:	-4:		
CrII(47)	3094.94					0.85:	-3:		
CrII(126)	3096.11								
FeII(97)	3096.31	0.90:				0.55:			
MgI(5)	3096.89								
TiII(67)	3097.19	0.85:				0.65:	-3:		
CrII(86)	3098.16					0.85:	-7:		
FeI(28)	3099.94	0.90	-15:			0.98:	-4:		
VII(39)	3100.94					0.92	-6:		
NiI(25)	3101.56	0.86:	-12.5:			0.83:	-6:		
NiI(40)	3101.88								
VII(1)	3102.30	0.82	-16.0			0.58	-4:		
CrII(71)	3103.48								
TiII(90)	3103.80	0.90	-15:			0.72			
MgII(6)	3104.76:	0.87:	-12:	0.76	+11:	0.56:	-3:		
TiII(67)	3105.09	0.87:	-17:						
TiII(67)	3106.29	0.87	-14.3						
FeII(68)	3106.55					0.63:			
CrII(125)	3107.57	0.95:	-14.9:			0.77	-5.2		
CrII(55)	3108.67:					0.85	-4:		
TiII(77)	3110.10	0.98:	-14:						
TiII(67)	3110.62								
VII(1)	3110.71	0.84	-15.3:			0.60	-5.5		



Таблица 3. (Продолжение)

Ident	$\lambda$	$g$	$Vg$	$g$	$Vg$	$g$	$Vg$	$g$	$Vg$
CrII(55)	3111.95	0.94							
TiII(67)	3112.07					0.81			
VII(174)	3113.59								
FeII(82)	3114.30	0.92	-15.8:	0.88	9.5:	0.60			
FeII(82)	3114.69	0.95:				0.83:			
CrII(54)	3115.28								
FeII	3115.36								
FeII(96)	3115.49	0.95				0.77			
FeII(82)	3116.59	0.90	-14:	0.90:	9:	0.63	-2.5		
FeII(226)	3117.51								
TiII(67)	3117.67	0.88	-15:			0.75	-5:		
VII(1)	3118.38								
CrII(5)	3118.65	0.73		0.87	-	0.33	-7:		
TiII(67)	3119.80	0.91	-14.8						
CrII(5)	3120.37	0.76	-15.0	0.81	8.0	0.35	-4.1		
VII(1)	3121.15	0.93	-15.5:			0.79:	-6:		
CrII(72)	3121.87	0.95				0.82	-4:		
CrII(55)	3121.96								
CrII(54)	3122.60	0.91	-14.2	0.94:	-	0.63	-2:		
CrII(5)	3124.98	0.70		0.77	8.6	0.34	-2:		
CrII(70)	3125.02								
VII(1)	3125.29								
VII(1)	3126.22	0.92	-14.5			0.78	-5.3		
TiII(121)	3127.88								
CrII(5)	3128.70	0.82	-15.1	0.90	9.8	0.44	-3.5		
VII(1)	3130.27	0.91	-13:			0.75			
TiII(4)	3130.80	0.91	-15.3			0.72			
CrII(5)	3132.06	0.73	-15.0	0.76	6:	0.33	-6.2		
FeII(82)	3133.06			0.94	9:				
SeII(39)	3133.10					0.60			
VII(1)	3133.34	0.93	-15.5:						
FeII(121)	3134.17								
CrII(94)	3134.33	0.92:				0.77			
FeII(82)	3135.36	0.93		0.85	8:	0.47			
MnII(15)	3135.51								
CrII(94)	3135.70								
CrII(5)	3136.69	0.81	-15.8	0.92	-11:	0.44	-4.7		
CrII(54)	3137.55					0.93:			
ZrII(5)	3138.68					0.97	-7:		
VII(122)	3139.76	0.98							
CrII(124)	3140.22	0.96		0.96	7:	0.76			

Таблица 3. (Продолжение)

Ident	$\lambda$	г	Vг	г	Vг	г	Vг	г	Vг
VII(152)	3141.49					0.98:	-4:		
FeII(7)	3142.22								
VII(52)	3142.48	0.97				0.84			
CrII(85)	3142.74								
TiII(4)	3143.76	0.91	-14.8			0.77	-5.2		
VII(122)	3144.73	0.96:		0.95	9.5	0.69			
CrII(5)	3145.10	0.95:							
CrII(85)	3145.77					0.91	-4:		
VII(1)	3145.98								
CrII(5)	3147.23	0.83	-14.9	0.93	8.0	0.51	-4.0		
TiII(4)	3148.04	0.90	-15.5	0.98:	-	0.75	-5.5		
CrII(54)	3149.84	0.95:		0.97:	-	0.69			
CrII(54)	3150.11								
VII(138)	3151.32					0.96	-4:		
FeI(311)	3151.36	0.98	-14:						
TiII(10)	3152.25	0.87	-15.6						
FeII(66)	3154.20	0.79	-15.0	0.73	9.0	0.41	-4.2		
TiII(10)									
TiII(10)	3155.67	0.90	-15.0	0.97:		0.74	-3:		
FeII(67)	3155.95								
TiII(4)	3157.40	0.98:				0.90	-5.2		
CrII(70)	3158.03	0.97	-15.5:			0.87	-6.0		
CaII(4)	3158.87	0.70	-14.5	0.89	9.5:	0.58	-2:		
CrII(54)	3160.11	0.98:	-14.4:			0.95	-2:		
TiII(10)	3161.20	0.87	-14.7			0.69	-2.5		
TiII(10)	3161.77	0.80				0.54			
FeII(7)	3161.95			0.94	7.5:				
TiII(10)	3162.56	0.80				0.47			
FeII(120)	3162.80			0.88	9.6				
FeII(7)	3163.10	0.91:							
CrII(69)	3163.93					0.90			
VII(8)	3164.83					0.94	-4:		
TiII	3164.90								
ZrII(5)	3165.95					0.94	-6:		
FeII(6)	3166.67	0.93	-15.0			0.69	-3.8		
FeII(66)	3167.86	0.84	-14.7	0.80	+9.2	0.47	-3.5		
TiII(10)	3168.52	0.82	-14.9			0.61	-5.5		
CrII(123)	3169.19	0.98	-14:			0.88	-5:		
FeII(6)	3170.34	0.88	-14.8	0.91	7	0.58	-3.9		
CrII(71)	3172.08	0.95	-14.4			0.77	-5.6		
CrII(83)	3173.58	0.99	-17:			0.95	-6:	0.46	3:

Таблица 3. (Продолжение)

Ident	$\lambda$	$r$	$Vr$	$r$	$Vr$	$r$	$Vr$	$r$	$Vr$
FeII(38)	3174.09			0.97:	10.5:				
FeII(157)	3175.08	0.99:				0.89	-4.9		
MgII(13)	3175.78								
FeII(82)	3177.54	0.87	-15.5	0.82	7.5	0.47	-4.6	0.32:	4:
CaII(4)	3179.34	0.65	-13.2:	0.78	-				
FeII(157)	3179.49					0.49			
FeII(157)	3180.13	0.94							
FeII(38)	3180.14			0.90:	-				
CrII(9)	3180.73	0.79	-17:	0.89:	9:	0.47	-6.7		
CaII(4)	3181.27	0.74		0.93:	8.5:				
CrII(9)	3181.42					0.62			
FeII(7)	3183.12	0.83	-13:	0.88	9.7	0.49	-2:		
TiII(3)	3184.12	0.99:							
CrII(123)	3184.36					0.94			
SiIII(8)	3185.13								
FeII(7)	3185.32	0.91	-15.0	0.94	8.5:	0.65	-4.4	0.36	
FeII(6)	3186.74	0.80	-15.0	0.78	11	0.41	-3.0		
FeII(120)	3187.30	0.91	-15.1			0.57	-5.5		
VII(8)	3187.71	0.95							
HeI(3)	3187.75			0.78	10.5:				
VII(8)	3188.53:	0.94	-15.1:			0.81	-6.5:	0.39:	4:
TiII(120)	3189.48	0.99	-15.5:						
CrII(123)	3189.83					0.97:	-5:		
VII(8)	3190.69								
TiII(26)	3190.87	0.79		0.96	-	0.54	-7:		

3.2.  $\beta$  Ori

Опубликованные спектры  $\beta$  Ori, отобранные как наиболее пригодные для сопоставления с нашим, получены с помощью спектрометра “Copernicus” [17] и спектрографа UVES 8.2-м телескопа ESO, Paranal (спектр взят из архива UVES: <http://www.sc.eso.org/santiago/uvesspop/interface.html> и обработан нами). Спектр “Copernicus” простирается до 3214 Å, спектр UVES начинается с 3044 Å, предел разрешения в первом 0.4 Å, во втором — на порядок выше. Наиболее коротковолновый представительный интервал длин волн: 3104–3214 Å. В нем наша Табл. 3 содержит 47 абсорбционных деталей, список из [17] — 37, а спектр UVES — 58. Центральные глубины абсорбций в этом интервале нашего спектра больше, чем в спектре UVES, на 6%, с увеличением длины волны систематическое

различие глубин линий постепенно уменьшается и, начиная с  $\lambda \approx 3300$  Å, исчезает.

Зависимости  $Vr(r)$  для  $\beta$  Ori представлены на Рис. 3 и обобщены в Табл. 4. Для сравнения в таблице приведены данные, полученные нами по спектру UVES. Оба спектра фиксируют расширение атмосферы  $\beta$  Ori: все измеренные скорости меньше скорости звезды в целом,  $V_{\text{sys}} = 18.7$  км/с [18]. Уверенно выявленные дифференциальные сдвиги групп линий, формирующихся в разных слоях атмосферы, говорят о нарастании скорости расширения с высотой слоя:  $Vr(\text{HeI}) > Vr(\text{SiII}) > Vr(\text{FeII})$ . Сильнейшие линии H $\beta$  и FeII находятся за красной границей нашего спектра, поэтому существенных сдвигов внутри групп не заметно, но в сходном с нашим спектре UVES отчетливо видны характерные для  $\beta$  Ori [18] бальмеровский прогресс и “железный регресс” (красный сдвиг членов 42-го мультиплета относительно более слабых абсорбций FeII).

**Таблица 4.** Средние гелиоцентрические лучевые скорости для групп линий в спектре  $\beta$  Ori

Группы линий	НЭС	UVES
	20.10.08	22.09.02
Линии нейтрального водорода		
Серия Бальмера	12.5	17.5 – 14.0
H $\alpha$		7.0
Серия Пашена		17.5
HeI	13.1 – 12.7	17.0 – 15.5
CII, NII, OII	13.0	16.2 – 17.4
AlIII, SiIII	12.7	16.8
SII, FeIII	12.8	14.8
MgII, SiII, CaII	10.0	12.5 – 13.5
FeII	8.8	10.0 – 13.5

**Таблица 5.** Средние гелиоцентрические лучевые скорости в спектре  $\alpha$  Cyg 19.10.08

Область спектра	$r=0.95$	$r=0.35$	$r=0.25$
$\lambda < 3600 \text{ \AA}$	-5.2	-4.0	
$\lambda > 3700 \text{ \AA}$	-4.8	-3.2	
HI(Balmer)	-3:	-2:	-2:
H $\gamma$			-6.0

### 3.3. $\alpha$ Cyg

Область перекрытия нашего спектра  $\alpha$  Cyg со спектром, полученным с помощью заатмосферного спектрометра IUE [19], невелика: 3055–3100 Å. Все детали IUE-спектра воспроизведены в Табл. 3, но неопределенность уровня континуума в нем затрудняет сравнение остаточных интенсивностей, как и в случае с  $\alpha$  Lyr. С красной стороны от бальмеровского предела для контроля использован атлас [20], представляющий спектр  $\alpha$  Cyg с разрешением, близким к нашему, но с более высоким отношением сигнала к шуму. Все абсорбции из этого атласа с  $r < 0.995$  различимы и в нашем спектре, остаточные интенсивности систематически не различаются.

На Рис. 3 заметен небольшой радиальный градиент скорости в атмосфере  $\alpha$  Cyg: цепочки значков, представляющие участки спектра по разные стороны от бальмеровского предела, заметно сдвинуты друг относительно друга по вертикали (“длинноволновая” лежит выше “коротковолновой”) и наклонены ( $V_r$  растет с уменьшением  $r$ ). Отметим

также отрицательный сдвиг линии H $\gamma$  относительно более высоких членов серии Бальмера: зона формирования ее ядра заходит, по-видимому, в основание ветра. Опорные точки кривых  $V_r(r)$  на Рис. 3 даны в Табл. 5.

### 3.4. KS Per

Фрагмент Рис. 3, относящийся к KS Per, резко отличается от верхних: зависимость  $V_r(r)$  для KS Per ограничена  $r < 0.7$ , а большая часть значков на Рис. 3 сосредоточена в области  $r < 0.5$ . Как и в случаях других объектов, из Табл. 3 для KS Per отбирались линии, минимально искаженные блендированием, и, естественно, таковые находились в основном среди наиболее сильных линий. Линии в спектре KS Per не очень широки (по нашей оценке проекция скорости вращения  $V \sin i \approx 30$  км/с), но дефицит водорода увеличивает прозрачность в континууме и тем самым создает густой абсорбционный “лес”, особенно в ультрафиолете [3]. Дифференциальные сдвиги разных групп линий не выявлены. Среднее значение гелиоцентрической лучевой скорости по нашему спектру:  $6.2 \pm 0.4$  км/с, что близко к значениям  $\gamma$ -скорости из работ [21, 22]:  $7 \pm 1$  км/с и  $3 \pm 2$  км/с соответственно.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантами Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 11-02-00319 а и 09-07-00492 а). В.Е.П. благодарит программу ОФН РАН за поддержку программы спектроскопии звезд в УФ-диапазоне на 6-метровом телескопе. В работе использованы данные из баз SIMBAD и SAO/NASA ADS.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova and M. V. Yushkin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **65**, 174 (2010).
2. M. Parthasarathy, D. Branch, D. J. Jeffery, and E. Baron, *New Astron. Review* **51**, 524 (2007).
3. T. Kipper and V. Klochkova, *Baltic Astron.* **17**, 195 (2008).
4. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, *Optical Technology Journal* **76**, 87 (2009).
5. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **64**, 392 (2009).
6. М. В. Юшкин и В. Г. Ключкова, Препринт № 206, (Нижний Архыз, САО РАН, 2005).
7. Г. А. Галазутдинов, Препринт № 92, (Нижний Архыз, САО РАН, 1992).
8. Ф. Р. Стриганов и Г. А. Одинцова, *Таблицы спектральных линий атомов и ионов*, (М. Энергоиздат, 1982).

9. A. K. Pierce and J. B. Breckinridge, *Contr. Kitt Peak Obs. No. 559* (1973).
10. R. J. Price, I. A. Crawford, M. J. Barlow, and I. D. Howarth, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **328**, 555 (2001).
11. D. E. Welty, D. C. Morton, and L. M. Hobbs, *Astrophys. J. Suppl.* **106**, 533 (1996).
12. J. B. Rogerson, *Astrophys. J. Suppl.* **71**, 1011 (1989).
13. A. F. Gulliver, S. J. Adelman, C. R. Cowley, and J. M. Fletcher, *Astrophys. J.* **380**, 223 (1991).
14. Y. Takeda, S. Kawonomoto, and N. Ohishi, *Publ. Astronom. Soc. Japan* **59**, 245 (2007).
15. Y. Takeda, S. Kawonomoto, and N. Ohishi, *Astrophys. J.* **678**, 446 (2008).
16. H-S. Kim, I. Han, G. Valyavin, et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **121**, 1065 (2009).
17. P. L. Selvelli, L. Crivellari, and R. Stalio, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **27**, 1 (1977).
18. E. L. Chentsov, *IAU Coll.* **169**, *Variable and non-spherical winds in luminous hot stars*, Ed. by B. Wolf, O. Stahl, and A. W. Fullerton, (Springer, 1999), p.206.
19. L. Sapar and A. Sapar, *Tartu Astrof. Obs. Teated*, **108**, 3 (1990).
20. B. Albayrak, A. F. Gulliver, et al., D. Kocer, *Astronom. and Astrophys.* **400**, 1043 (2003).
21. J. F. Heard, *Publ. David Dunlap Obs.* **2**, 269 (1962).
22. R. Margoni, R. Stagni, and A. Mammano, *Astronom. and Astrophys.* **75**, 157 (1988).

## ATLAS OF SPECTRA OF SELECTED STARS IN GROUND-BASED ULTRAVIOLET

**E.L. Chentsov, V.G. Klochkova, T. Kipper, N.S. Tavolzhanskaya, V.E. Panchuk, M.V. Yushkin**

We present an atlas of spectra of high signal-to-noise ratio and high spectral resolution ( $R \geq 60000$ ) in a poorly studied short-wavelength region up to 3055 Å. The spectra of well-studied stars of close temperatures ( $\beta$  Ori,  $\alpha$  Lyr and  $\alpha$  Cyg) are compared with the spectrum of a low-metallicity A-type supergiant KS Per, the atmosphere of which is poor in hydrogen,  $H/He = 3 \times 10^{-5}$ . We study the velocity field in the expanding atmospheres and envelopes of these stars. A complete atlas and detailed identification of spectral features are available in the Internet.

Key words: *stars: general: atlases*