

УДК 524.31.01:520.84

## МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ЛИНИИ И ДИФФУЗНЫЕ ПОЛОСЫ В СПЕКТРЕ СВЕРХГИГАНТА $\kappa$ CAS

© 2019 А. Х. Рзаев<sup>1\*</sup>, В. В. Шиманский<sup>2</sup>, Х. А. Рза<sup>1</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) государственный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 23 мая 2018 года; после доработки 5 ноября 2018 года; принята к публикации 5 ноября 2018 года

По ПЗС-спектрам, полученным на эшелле-спектрографе 2-м телескопа обсерватории на пике Терскол, исследованы межзвездные линии и диффузные полосы в спектре сверхгиганта  $\kappa$  Cas. Для корректного выявления межзвездных деталей использовался синтетический спектр звезды, рассчитанный для модели атмосферы с параметрами  $T_{\text{eff}} = 21\,500$  К,  $\lg g = 2.60$ ,  $v \sin i = 83$  км с<sup>-1</sup>,  $[M/H] = 0.0$ ,  $\xi = 15$  км с<sup>-1</sup> и с частичным подбором содержаний основных химических элементов. Отождествлены 11 межзвездных полос и 91 диффузная межзвездная полоса. Дополнительно выявлено 14 абсорбционных деталей, возможно, также являющихся диффузными полосами. Табулированы спектрофотометрические параметры диффузных полос и точности их определения. Приведены атласы областей наблюдаемого и синтетического спектров, где расположены межзвездные диффузные полосы.

Ключевые слова: *звезды: сверхгиганты — звезда: индивидуальные:  $\kappa$  Cas*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Первые диффузные межзвездные полосы (ДМП) (diffuse interstellar bands — DIBs)  $\lambda$  5780 и 5797 Å были обнаружены в виде «стабильных» абсорбционных деталей в спектрах двойных звезд, полученных в Ликской обсерватории [1]. Позднее было установлено межзвездное происхождение ДМП [2] и началось их массовое изучение. В дальнейшем методом классической спектроскопии были обнаружены десятки других интенсивных ДМП, также имеющих межзвездное происхождение [3–6]. С появлением эшелле-спектрографов с ПЗС-камерами в оптическом диапазоне спектра удалось обнаружить и отождествить более 400 слабых ДМП [7]. Объяснить такое количество слабых ДМП можно наличием в межзвездных облаках больших молекул. В настоящее время в качестве возможных носителей ДМП предложено несколько кандидатов (подробнее см. [6, 8]): полициклические ароматические углеводороды (ПАНs) [9–11]; углеродные цепочки [12–14]; фуллерены (C<sub>60+</sub>) [15–18].

Для выявления носителей ДМП и физических условий их формирования предпринимаются попытки найти корреляцию между эквивалентными ширинами  $W_\lambda$  отождествленных ДМП в разных

областях спектра, а также между ДМП и межзвездными линиями. В случае сильной корреляции можно будет заключить, что разные ДМП и молекулярные линии возникают в физически связанных регионах диффузных облаков [19]. Исследование абсорбционных деталей, относящихся к простым молекулам, также представляет интерес. Оно может помочь в определении физических условий в облаке, влияющих на формирование носителей ДМП [19]. Обнаружение большого количества слабых ДМП в конечном счете будет способствовать надежным отождествлениям различных «поглотителей» ДМП [7, 20]. Отметим, что ни одна из ДМП до сих пор уверенно не отождествлена, несмотря на их интенсивное изучение, и природа ни одной из них не установлена.

Для уверенной идентификации различных поглотителей ДМП необходимо не только отождествление слабых ДМП, но и определение их спектрофотометрических параметров с хорошей точностью. Однако только в единичных случаях были составлены атласы и определены спектрофотометрические параметры отождествленных ДМП [7, 20–24]. В частности, в работах [7, 20] детально исследованы ДМП в спектрах звезд HD 204827 ( $E_{B-V} = 1^m11$ ) и HD 183143 ( $E_{B-V} = 1^m27$ ): в спектральном диапазоне  $\lambda$  3900–8100 Å отождествлены 380 и 414 ДМП соответственно, с хорошей точностью

\*E-mail: abid@sao.ru

определены центральные длины волны, полуширины ( $FWHM$ ), эквивалентные ширины всех полос. Отмечено, что обилия больших молекул, создающих ДМП, и физические условия в облаках, расположенных в направлении двух указанных звезд, значительно различаются [7]. Этот результат подтверждает необходимость подобных исследований большего количества звезд с разными координатами и разной степенью покраснения.

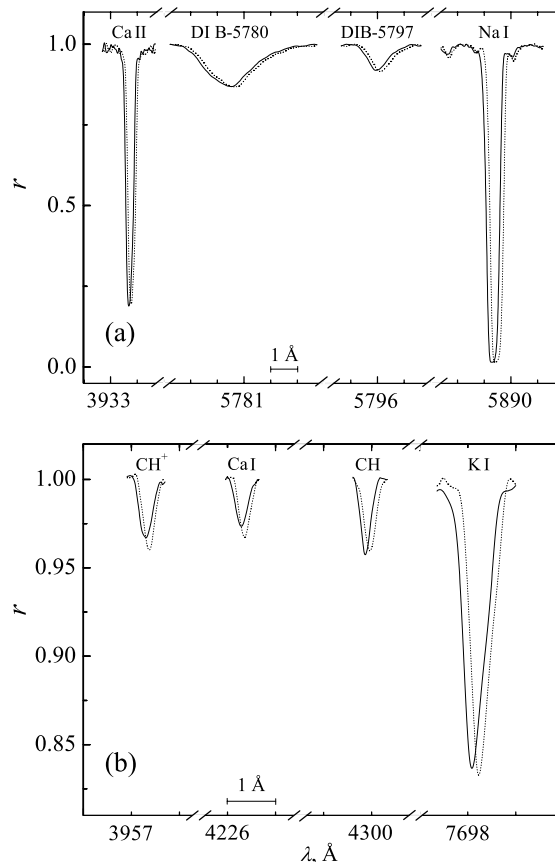
В данной работе на основе ПЗС-спектров с высокими спектральным разрешением и отношением  $S/N$  исследованы межзвездные линии и ДМП в спектре сверхгиганта  $\kappa$  Cas V0.7 Ia (умеренной степени покраснения:  $E(B - V) = 0.^m33$  [25]).

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Спектры были получены на эшелле-спектрографе [26] в фокусе кудэ 2-м телескопа обсерватории на пике Терскол (Россия) в течение десяти ночей с 31 августа по 5 октября 1999 г. В течение двух ночей (1–2 октября) были получены по четыре, в остальные восемь ночей (31 августа, 1 сентября, 26–28 сентября, 30 сентября, 3 октября, 5 октября) — по два спектра, которые были усреднены для каждой ночи. Спектральное разрешение составляло около  $\lambda/\Delta\lambda = 45\,000$ , спектры имеют 87 порядков и одной экспозицией охватывают спектральный диапазон  $\lambda$  3550–10 100 Å. ДМП были обнаружены в диапазоне длин волн  $\lambda$  4750–7000 Å. На границах диапазона ( $\lambda$  4750 и 7000 Å) отношение  $S/N$  для разных спектров составляло  $400 \leq S/N \leq 450$ . Максимальная величина этого отношения приходится на область спектра  $\lambda$  5650 и составляет около  $500 \leq S/N \leq 600$ , для суммарного спектра —  $700 \leq S/N \leq 1300$ . Для отдельных спектров в областях межзвездных линий Ca I  $\lambda$  4226, CH<sup>+</sup>  $\lambda$  4232, CH  $\lambda$  4300, KI  $\lambda$  7698 Å и в области Ca II  $\lambda$  3933 Å это отношение соответственно составляет  $250 \leq S/N \leq 300$  и  $180 \leq S/N \leq 250$ .

Обработка эшелле-изображений (вычитание темнового кадра, учет рассеянного света и т.д.) выполнена с использованием пакета программ DECH95<sup>1</sup>. Для калибровки шкалы длин волн в разные ночи были получены спектры неба, Луны и Прокциона. Нуль-пункт шкалы лучевой скорости устанавливался по теллурическим линиям H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub>. По 60 теллурическим линиям ошибки измерения не превышали  $\pm 0.1 \text{ km s}^{-1}$ . Измерение позиционных и спектрофотометрических параметров ( $W_\lambda$ ,  $FWHM$  и центральная глубина  $R_0 = 1 - r_0$ ) линий осуществлено с помощью пакета программ DECH20T<sup>1</sup>.

<sup>1</sup><http://www.gazinur.com>



**Рис. 1.** Профили межзвездных линий и ДМП  $\lambda$  5780, 5797 Å, полученных в начале (31 августа 1999 г. — сплошная линия) и конце (5 октября 1999 г. — пунктирная линия) наших наблюдений.

### 2.1. Особенности измерения лучевых скоростей и спектрофотометрических параметров линий

На рис.1 в качестве примера приведены профили межзвездных (атомных, ионов и молекулярных) линий и двух ДМП  $\lambda$  5780, 5797 Å, полученных в начале (31 августа 1999 г.) и в конце (5 октября 1999 г.) наших наблюдений. По результатам наблюдений в эти даты видно, что в координатах  $r(\lambda)$  наблюдается сдвиг профилей. Лучевые скорости этих сопоставленных профилей линий (как увидим далее) в пределах ошибок измерений одинаковы для всех дат наблюдений. Величина этого сдвига составляет  $7.2 \text{ km s}^{-1}$  и связана с тем, что гелиоцентрическая поправка лучевой скорости для первой и последней дат наблюдений составляет соответственно  $16.2$  и  $9.0 \text{ km s}^{-1}$ . В зависимости от длины волны для разных участков спектра (т. е. для разных межзвездных линий и ДМП) величина  $\Delta\lambda$  различна. При получении суммарного спектра как для разных участков спектра, так и для разных дат наблюдений эти поправки были учтены. Но для достоверности лучевые скорости и спектро-

**Таблица 1.** Гелиоцентрические лучевые скорости и спектрофотометрические параметры межзвездных линий в спектре  $\kappa$  Cas

Элемент	$\lambda_c, \text{\AA}$	$W_\lambda, m\text{\AA}$	$FWHM, \text{\AA}$	$R_0$	$V, \text{km s}^{-1}$
Ca II	3933.66	$261.1 \pm 4.2$	$0.324 \pm 0.005$	$0.803 \pm 0.006$	$-17.0 \pm 0.5$
CN <sup>+</sup>	3957.71	$10.6 \pm 1.1$	$0.28 \pm 0.030$	$0.036 \pm 0.005$	$-17.1 \pm 1.1$
Ca I	4226.73	$7.8 \pm 1.5$	$0.29 \pm 0.030$	$0.029 \pm 0.005$	$-17.2 \pm 1.5$
CN <sup>+</sup>	4232.54	$13.0 \pm 1.6$	$0.31 \pm 0.040$	$0.041 \pm 0.003$	$-17.1 \pm 0.9$
CO <sup>+</sup>	4250.40	$3.6 \pm 0.5$	$0.24 \pm 0.040$	$0.015 \pm 0.003$	$-17.1 \pm 1.7$
CN	4300.32	$9.9 \pm 1.5$	$0.26 \pm 0.030$	$0.041 \pm 0.002$	$-16.6 \pm 0.8$
Na I	5889.95	$527.4 \pm 2.6$	$0.523 \pm 0.006$	$0.837 \pm 0.006$	$-16.5 \pm 0.4$
Na I	5895.93	$498.2 \pm 2.3$	$0.505 \pm 0.007$	$0.712 \pm 0.004$	$-16.5 \pm 0.4$
K I	7698.97	$88.0 \pm 2.1$	$0.52 \pm 0.020$	$0.167 \pm 0.008$	$-16.9 \pm 0.9$

фотометрические параметры межзвездных линий и ДМП были определены не по суммарному спектру, а для каждого спектра в отдельности. Далее для каждого параметра было найдено среднее значение и среднеквадратичное отклонение от этого среднего.

Измерение лучевой скорости межзвездных линий проводилось на уровне половины интенсивности ( $FWHM$ ) и ядра линии. В первом случае полученные значения лучевой скорости для разных линий (и для разных дат) хорошо совпадали. Среднеквадратичное отклонение от среднего также было значительно меньше, чем во втором случае. Поэтому лучевые скорости отождествленных ДМП также были измерены на уровне  $FWHM$ .

В работах [27–31] межзвездные линии Ca I  $\lambda$  4226  $\text{\AA}$ , Ca II (K), Na I (D<sub>2</sub>, D<sub>1</sub>), K I  $\lambda$  7699, CN<sup>+</sup>  $\lambda$  4232 и CN  $\lambda$  4300  $\text{\AA}$  в спектре  $\kappa$  Cas были исследованы со сверхвысоким разрешением ( $\lambda/\Delta\lambda \approx 130\,000$ – $300\,000$ ), при котором у этих линий наблюдаются три хорошо разделенные компоненты. Однако в нашем случае ( $\lambda/\Delta\lambda = 45\,000$ ) эти компоненты сливаются воедино и показывают одинаковые значения лучевой скорости:  $-17.0 \pm 0.5$ ,  $-17.2 \pm 1.5$ ,  $-17.1 \pm 0.9$ ,  $-16.6 \pm 0.8$ ,  $-16.5 \pm 0.4$ ,  $-16.9 \pm 0.9 \text{ km s}^{-1}$  соответственно для Ca II  $\lambda$  3933, Ca I  $\lambda$  4226, CN<sup>+</sup>  $\lambda$  4232, CN  $\lambda$  4300  $\text{\AA}$ , Na I (D<sub>2</sub>, D<sub>1</sub>) и K I  $\lambda$  7699  $\text{\AA}$  (таблица 1). Влияние отдельных компонент на позиционные и спектрофотометрические параметры этих линий в пределах ошибок измерений не наблюдается. Также с хорошей точностью определяются спектрофотометрические параметры межзвездных линий. В спектре  $\kappa$  Cas было обнаружено одиннадцать межзвездных линий. Лучевые скорости,  $W_\lambda$ ,  $FWHM$ ,  $R_0 = 1 - r_0$  девяти межзвездных линий (без Ca I  $\lambda$  3968, K I  $\lambda$  7664  $\text{\AA}$ ) и точности их определения приведены в таблице 1.

Для выявления ДМП на фоне спектра звезды использован синтетический спектр, рассчитанный программой STAR [32] для модели атмосферы с параметрами  $T_{\text{eff}} = 21\,500 \text{ K}$ ,  $\lg g = 2.60$ ,  $v \sin i = 83 \text{ km s}^{-1}$ ,  $[M/H] = 0.0$ ,  $\xi = 15 \text{ km s}^{-1}$ , принятыми в основном по данным [33]. Скорость вращения звезды и содержания девяти наиболее важных химических элементов подобраны из условия наилучшего описания всего наблюдаемого спектра. В расчетах применен набор атомных параметров линий из списков [34], а модель атмосферы вычислена программой ATLAS12 [34]. Теоретический спектр удовлетворительно описывает наблюдаемый и позволяет корректно идентифицировать все звездные линии. Отождествление ДМП осуществлялось по спискам, взятым из работ [7, 20–24]. ДМП, сильно блендированные звездными или теллурическими линиями, мы не рассматривали.

Сложности нахождения значения центральных длин волн ДМП отмечены в работе [20], где нуль-пункт шкалы длин волн определялся по линии K I  $\lambda$  7698.9645  $\text{\AA}$  из работы [35]. В уже упомянутых работах [7, 20–24], в которых выполнялись подобные отождествления, даже для известных ДМП  $\lambda$  5780, 5797  $\text{\AA}$  разница в величинах центральной длины волны доходит до 0.24  $\text{\AA}$  (см. таблицу 2 в работе [7]). Из таблицы 1 видно, что значения лучевой скорости всех межзвездных линий находятся в диапазоне  $-17.2 \leq V \leq -16.5$ . Мы предположили, что лучевые скорости всех отождествленных ДМП также должны находиться в этом диапазоне. Лучевые скорости и соответствующие центральные длины волн ДМП, определенные таким образом, приведены в таблице 2. Если длина волны с точностью до  $\pm 0.04 \text{\AA}$  (т.е. не превышает ошибки измерения лучевой скорости для слабых ДМП) совпадает с таковым из указанных

выше шести работ [7, 20–24], то верхний индекс  $a, b, c, d, e, f$  указывает ссылку на соответствующую работу (см. таблицу 2). Индекс « $o$ » означает наше определение, и найденная нами длина волны

отличается от других работ больше чем на  $\pm 0.04 \text{ \AA}$ . Атласы областей, в которых нами были отождествлены ДМП в спектре  $\kappa$  Cas, приведены на рис. 2.

**Таблица 2.** Гелиоцентрические лучевые скорости и спектрофотометрические параметры ДМП в спектре  $\kappa$  Cas. Подробности в тексте.

$\lambda_c, \text{ \AA}$	$W_\lambda, \text{ m\AA}$	$FWHM, \text{ \AA}$	$R_0$	$V, \text{ km s}^{-1}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
4762.62 <sup>a</sup>	17.8 ± 2.5	1.51 ± 0.05	0.014 ± 0.002	−16.7 ± 1.5
4780.04 <sup>c</sup>	19.6 ± 2.1	1.34 ± 0.04	0.015 ± 0.002	−16.8 ± 1.4
4947.38 <sup>b</sup>	5.1 ± 0.9	0.57 ± 0.03	0.008 ± 0.001	−16.9 ± 1.7
4963.90 <sup>c</sup>	9.8 ± 1.5	0.71 ± 0.02	0.013 ± 0.002	−16.5 ± 1.7
4984.73 <sup>d</sup>	7.0 ± 1.4	0.62 ± 0.02	0.010 ± 0.001	−17.2 ± 1.8
5404.56 <sup>b</sup>	21.3 ± 1.8	1.13 ± 0.03	0.018 ± 0.002	−17.0 ± 1.1
5418.87 <sup>b</sup>	4.9 ± 1.0	0.74 ± 0.03	0.007 ± 0.001	−17.1 ± 2.1
5424.10 <sup>b</sup>	9.5 ± 1.3	0.84 ± 0.03	0.012 ± 0.001	−17.0 ± 2.0
5487.70 <sup>a</sup>	42.1 ± 4.3	2.97 ± 0.07	0.015 ± 0.002	−17.1 ± 1.6
5494.10 <sup>c</sup>	9.4 ± 1.2	0.72 ± 0.03	0.013 ± 0.002	−16.5 ± 1.8
5508.35 <sup>c</sup>	16.1 ± 2.5	1.34 ± 0.06	0.012 ± 0.002	−17.1 ± 1.5
5535.20 <sup>b</sup>	3.1 ± 0.6	0.59 ± 0.05	0.006 ± 0.001	−17.2 ± 1.9
5544.96 <sup>c</sup>	8.5 ± 1.3	0.67 ± 0.02	0.013 ± 0.001	−17.0 ± 1.2
5546.48 <sup>a</sup>	2.6 ± 0.5	0.65 ± 0.03	0.005 ± 0.001	−17.1 ± 1.3
5560.03 <sup>b</sup>	2.7 ± 0.5	0.51 ± 0.03	0.007 ± 0.001	−16.8 ± 1.1
5594.60 <sup>b</sup>	5.9 ± 1.2	0.67 ± 0.03	0.010 ± 0.002	−16.9 ± 1.7
5600.76 <sup>o</sup>	5.1 ± 1.0	0.62 ± 0.04	0.008 ± 0.001	−17.2 ± 1.8
5609.73 <sup>c</sup>	8.2 ± 1.6	0.74 ± 0.06	0.011 ± 0.002	−16.7 ± 1.2
5705.08 <sup>b</sup>	49.2 ± 4.6	2.45 ± 0.25	0.021 ± 0.001	−17.0 ± 2.0
5766.25 <sup>a</sup>	10.2 ± 1.4	1.07 ± 0.07	0.010 ± 0.002	−17.0 ± 1.2
5772.61 <sup>b</sup>	4.0 ± 0.8	0.58 ± 0.05	0.008 ± 0.001	−17.0 ± 1.2
5775.90 <sup>b</sup>	3.7 ± 0.8	0.59 ± 0.05	0.007 ± 0.001	−17.1 ± 0.9
5780.55 <sup>f</sup>	268.6 ± 8.7	2.00 ± 0.05	0.132 ± 0.003	−16.7 ± 0.8
5793.21 <sup>b</sup>	3.1 ± 0.7	0.35 ± 0.06	0.008 ± 0.001	−16.8 ± 1.8
5795.62 <sup>o</sup>	3.4 ± 0.7	0.60 ± 0.09	0.006 ± 0.001	−16.8 ± 2.1
5797.16 <sup>o</sup>	70.8 ± 2.8	0.86 ± 0.03	0.081 ± 0.003	−16.8 ± 0.8
5809.22 <sup>b</sup>	5.6 ± 0.9	1.07 ± 0.06	0.008 ± 0.001	−17.2 ± 2.1
5811.79 <sup>o</sup>	5.3 ± 1.0	0.61 ± 0.04	0.008 ± 0.001	−17.0 ± 2.0
5821.28 <sup>o</sup>	3.2 ± 0.7	0.59 ± 0.05	0.006 ± 0.001	−16.8 ± 1.5
5828.40 <sup>d</sup>	4.4 ± 0.9	0.71 ± 0.06	0.006 ± 0.001	−16.8 ± 1.6
5842.76 <sup>o</sup>	2.6 ± 0.6	0.35 ± 0.02	0.007 ± 0.001	−17.0 ± 0.8
5844.96 <sup>a</sup>	5.1 ± 1.0	0.57 ± 0.03	0.009 ± 0.001	−16.7 ± 1.1
5849.88 <sup>a</sup>	26.4 ± 2.2	1.01 ± 0.06	0.026 ± 0.002	−16.8 ± 0.8
5914.79 <sup>b</sup>	6.6 ± 1.2	0.36 ± 0.03	0.018 ± 0.001	−17.1 ± 1.0

Таблица 2. (Продолжение)

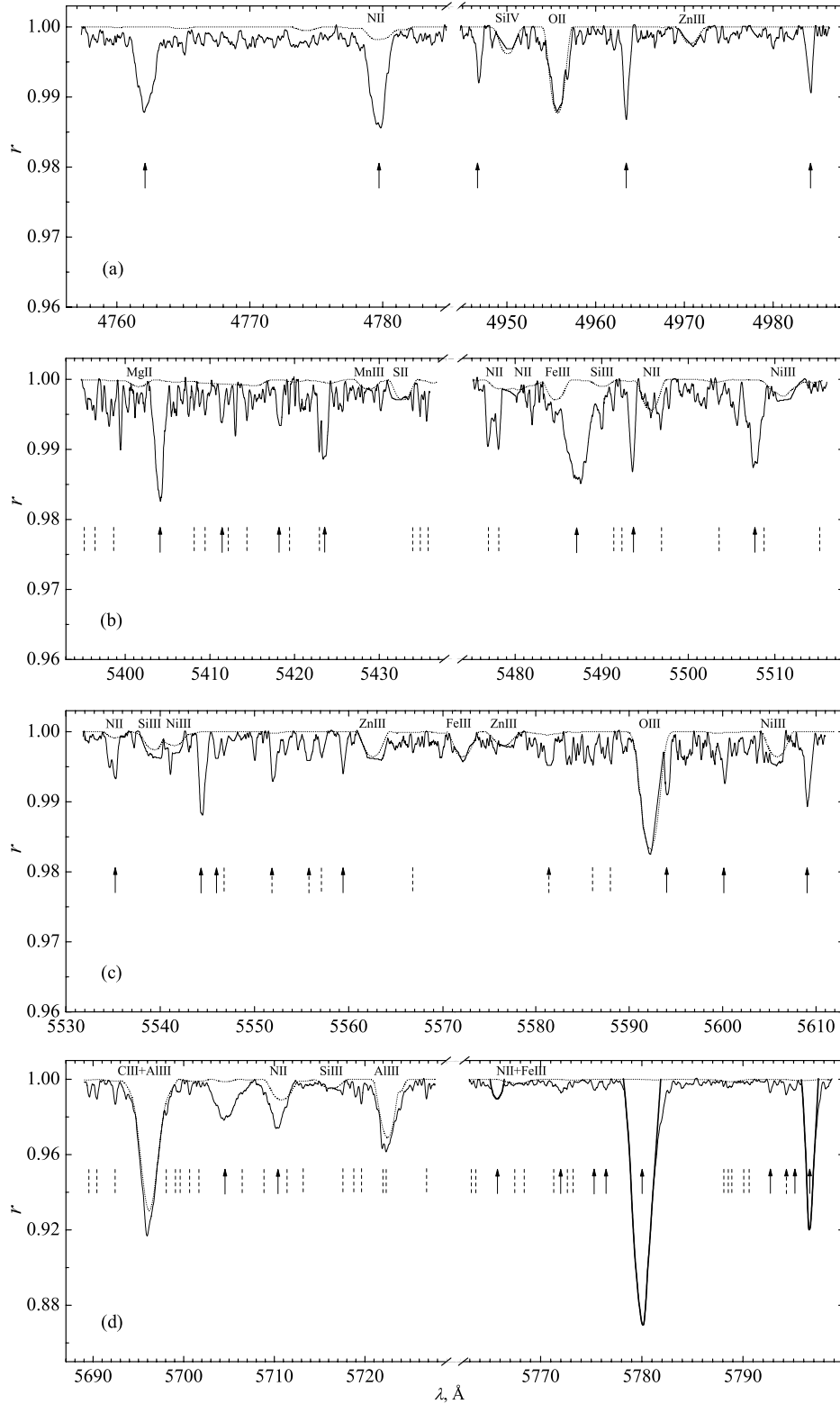
$\lambda_c, \text{\AA}$	$W_\lambda, \text{m\AA}$	$FWHM, \text{\AA}$	$R_0$	$V, \text{km s}^{-1}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
5996.08 <sup>o</sup>	5.5 ± 1.1	0.62 ± 0.04	0.010 ± 0.001	-17.1 ± 1.3
6065.36 <sup>d</sup>	6.1 ± 1.2	0.47 ± 0.02	0.013 ± 0.001	-16.8 ± 0.9
6081.10 <sup>a</sup>	5.9 ± 1.1	0.78 ± 0.05	0.008 ± 0.001	-17.2 ± 1.5
6089.99 <sup>o</sup>	12.6 ± 1.2	0.61 ± 0.04	0.021 ± 0.001	-16.9 ± 1.1
6108.18 <sup>a</sup>	5.2 ± 1.0	0.55 ± 0.05	0.010 ± 0.001	-16.6 ± 1.4
6113.29 <sup>a</sup>	11.8 ± 1.8	0.77 ± 0.06	0.017 ± 0.002	-17.1 ± 1.0
6116.84 <sup>a</sup>	7.9 ± 1.5	1.09 ± 0.07	0.008 ± 0.001	-16.6 ± 1.2
6140.04 <sup>a</sup>	4.1 ± 0.9	0.50 ± 0.05	0.009 ± 0.001	-16.9 ± 1.6
6142.20 <sup>a</sup>	5.3 ± 1.1	0.82 ± 0.03	0.007 ± 0.001	-17.2 ± 2.1
6159.52 <sup>o</sup>	3.4 ± 0.6	0.59 ± 0.03	0.006 ± 0.001	-17.0 ± 1.5
6161.98 <sup>a</sup>	6.3 ± 1.2	0.55 ± 0.04	0.011 ± 0.002	-16.5 ± 2.0
6189.55 <sup>a</sup>	5.4 ± 1.1	0.38 ± 0.04	0.014 ± 0.001	-16.7 ± 1.2
6194.73 <sup>c</sup>	1.9 ± 0.4	0.41 ± 0.06	0.006 ± 0.001	-17.1 ± 2.1
6196.09 <sup>a</sup>	31.4 ± 1.4	0.54 ± 0.02	0.058 ± 0.002	-17.2 ± 1.1
6203.14 <sup>a</sup>	50.1 ± 4.7	1.17 ± 0.07	0.044 ± 0.002	-17.0 ± 1.5
6204.54 <sup>o</sup>	5.3 ± 1.0	0.59 ± 0.04	0.010 ± 0.001	-17.0 ± 2.1
6205.20 <sup>a</sup>	2.7 ± 0.5	0.36 ± 0.05	0.008 ± 0.001	-16.9 ± 1.8
6211.80 <sup>a</sup>	5.7 ± 1.0	0.51 ± 0.04	0.013 ± 0.002	-16.7 ± 1.6
6213.00 <sup>a</sup>	8.7 ± 1.4	0.79 ± 0.03	0.011 ± 0.001	-16.7 ± 1.3
6223.61 <sup>e</sup>	6.1 ± 1.1	0.69 ± 0.05	0.010 ± 0.001	-17.2 ± 1.6
6234.11 <sup>a</sup>	10.7 ± 1.3	0.71 ± 0.04	0.015 ± 0.001	-16.5 ± 1.1
6244.46 <sup>b</sup>	6.8 ± 1.3	0.67 ± 0.05	0.011 ± 0.001	-16.7 ± 2.1
6250.97 <sup>b</sup>	9.1 ± 1.1	0.89 ± 0.07	0.011 ± 0.001	-16.9 ± 1.7
6269.85 <sup>a</sup>	42.8 ± 4.1	1.02 ± 0.05	0.042 ± 0.002	-16.8 ± 1.5
6362.44 <sup>a</sup>	5.6 ± 1.1	0.51 ± 0.03	0.011 ± 0.001	-16.6 ± 1.8
6367.41 <sup>e</sup>	11.8 ± 1.8	0.52 ± 0.05	0.022 ± 0.002	-16.8 ± 1.4
6376.15 <sup>o</sup>	21.1 ± 2.3	0.79 ± 0.04	0.027 ± 0.001	-16.9 ± 1.2
6379.39 <sup>o</sup>	54.3 ± 1.1	0.67 ± 0.02	0.080 ± 0.002	-17.0 ± 0.8
6396.97 <sup>f</sup>	14.9 ± 2.3	0.81 ± 0.03	0.018 ± 0.001	-17.0 ± 1.5
6410.20 <sup>b</sup>	8.4 ± 1.3	0.79 ± 0.05	0.010 ± 0.001	-16.8 ± 2.0
6425.78 <sup>a</sup>	8.3 ± 1.5	0.65 ± 0.06	0.012 ± 0.002	-16.9 ± 1.7
6438.28 <sup>a</sup>	2.4 ± 0.5	0.43 ± 0.02	0.006 ± 0.001	-16.8 ± 2.1
6439.68 <sup>o</sup>	4.6 ± 0.9	0.51 ± 0.03	0.010 ± 0.002	-17.0 ± 2.1
6445.41 <sup>a</sup>	14.4 ± 2.1	0.53 ± 0.02	0.028 ± 0.002	-16.9 ± 1.8
6449.44 <sup>o</sup>	5.1 ± 1.0	0.49 ± 0.02	0.011 ± 0.001	-17.1 ± 2.1
6456.02 <sup>a</sup>	15.2 ± 2.1	0.87 ± 0.09	0.016 ± 0.001	-16.9 ± 1.8
6520.85 <sup>o</sup>	17.1 ± 2.5	1.05 ± 0.05	0.017 ± 0.003	-16.7 ± 1.9
6613.72 <sup>d</sup>	120.6 ± 5.4	0.99 ± 0.02	0.114 ± 0.002	-17.2 ± 0.8

Таблица 2. (Продолжение)

$\lambda_c, \text{\AA}$	$W_\lambda, \text{m\AA}$	$FWHM, \text{\AA}$	$R_0$	$V, \text{km s}^{-1}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
6622.92 <sup>o</sup>	6.4 ± 1.2	0.55 ± 0.05	0.013 ± 0.002	-17.0 ± 1.2
6624.93 <sup>a</sup>	7.2 ± 1.3	1.05 ± 0.05	0.008 ± 0.002	-16.8 ± 2.0
6632.76 <sup>o</sup>	11.0 ± 1.9	1.13 ± 0.03	0.010 ± 0.001	-16.9 ± 1.1
6646.05 <sup>a</sup>	5.8 ± 1.1	0.67 ± 0.04	0.010 ± 0.001	-17.0 ± 1.2
6660.82 <sup>a</sup>	26.8 ± 2.8	0.75 ± 0.05	0.036 ± 0.001	-17.0 ± 1.1
6664.05 <sup>a</sup>	3.7 ± 0.7	0.71 ± 0.07	0.007 ± 0.001	-16.9 ± 2.0
6672.27 <sup>b</sup>	9.4 ± 1.5	0.68 ± 0.05	0.014 ± 0.002	-16.7 ± 1.9
6689.51 <sup>o</sup>	10.5 ± 1.6	0.94 ± 0.07	0.011 ± 0.001	-17.0 ± 2.1
6699.36 <sup>a</sup>	12.1 ± 1.9	0.86 ± 0.06	0.014 ± 0.002	-16.8 ± 1.8
6709.58 <sup>o</sup>	3.2 ± 0.6	0.51 ± 0.04	0.007 ± 0.001	-17.0 ± 2.1
6747.80 <sup>e</sup>	3.6 ± 0.8	0.49 ± 0.03	0.008 ± 0.001	-16.8 ± 2.0
6758.82 <sup>o</sup>	4.4 ± 0.9	0.51 ± 0.03	0.010 ± 0.001	-17.1 ± 2.1
6770.21 <sup>b</sup>	10.7 ± 1.6	1.08 ± 0.06	0.011 ± 0.001	-17.0 ± 1.7
6780.59 <sup>o</sup>	3.8 ± 0.7	0.50 ± 0.05	0.009 ± 0.002	-17.2 ± 1.9
6801.54 <sup>a</sup>	4.3 ± 0.8	0.46 ± 0.04	0.010 ± 0.001	-17.0 ± 1.8
6827.22 <sup>e</sup>	3.2 ± 0.6	0.42 ± 0.04	0.008 ± 0.001	-17.2 ± 2.0
6841.66 <sup>a</sup>	4.7 ± 0.9	0.53 ± 0.05	0.010 ± 0.001	-17.2 ± 1.8
6843.64 <sup>a</sup>	15.2 ± 3.9	1.38 ± 0.03	0.013 ± 0.002	-17.0 ± 2.1
6860.02 <sup>c</sup>	4.9 ± 0.9	0.94 ± 0.04	0.006 ± 0.001	-17.0 ± 2.3
5411.95	3.9 ± 0.7	0.60 ± 0.03	0.006 ± 0.001	-17.0 ± 1.9
5552.58	4.3 ± 0.6	0.64 ± 0.04	0.007 ± 0.002	-17.2 ± 1.6
5556.27	3.7 ± 0.9	0.92 ± 0.06	0.005 ± 0.001	-16.9 ± 2.1
5581.98	4.9 ± 0.9	1.02 ± 0.04	0.006 ± 0.001	-16.6 ± 1.8
5777.01	3.1 ± 0.5	0.49 ± 0.05	0.006 ± 0.001	-17.1 ± 1.2
5794.86	3.4 ± 0.8	0.39 ± 0.03	0.009 ± 0.001	-17.1 ± 1.9
5804.25	3.2 ± 0.7	0.49 ± 0.04	0.008 ± 0.002	-16.9 ± 2.1
6125.58	3.5 ± 0.9	0.43 ± 0.05	0.008 ± 0.001	-16.9 ± 2.1
6273.12	2.3 ± 0.5	0.29 ± 0.02	0.007 ± 0.001	-16.9 ± 1.2
6396.19	4.0 ± 0.8	0.44 ± 0.03	0.011 ± 0.001	-17.1 ± 2.1
6424.31	4.1 ± 0.6	0.42 ± 0.04	0.010 ± 0.001	-17.0 ± 1.7
6716.61	2.6 ± 0.6	0.46 ± 0.05	0.007 ± 0.001	-16.9 ± 1.8
6798.12	3.4 ± 0.7	0.52 ± 0.03	0.007 ± 0.001	-17.0 ± 2.0
6837.81	3.2 ± 0.6	0.45 ± 0.04	0.008 ± 0.001	-17.2 ± 2.1

Индексы *a, b, c, d, e, f* соответственно указывают на работы [7], [20–24], *o* — наши определения.

Программа DECH20T позволяет определять эквивалентные ширины линий различными способами. Если профиль линии сложный, можно применить способ аппроксимации гауссианой или построить профиль линии вручную (подробности на сайте <http://www.gazinur.com>). Примеры по-



**Рис. 2.** Атлас спектральных областей  $\kappa$  Cas, в которых наблюдаются диффузные межзвездные полосы. Пунктирная линия — расчетный спектр. Показаны элементы звездных линий. Вертикальные сплошные и пунктирные стрелки соответственно указывают на позиции отождествленных и предполагаемых полос, а вертикальные пунктирные линии — теллурических линий.

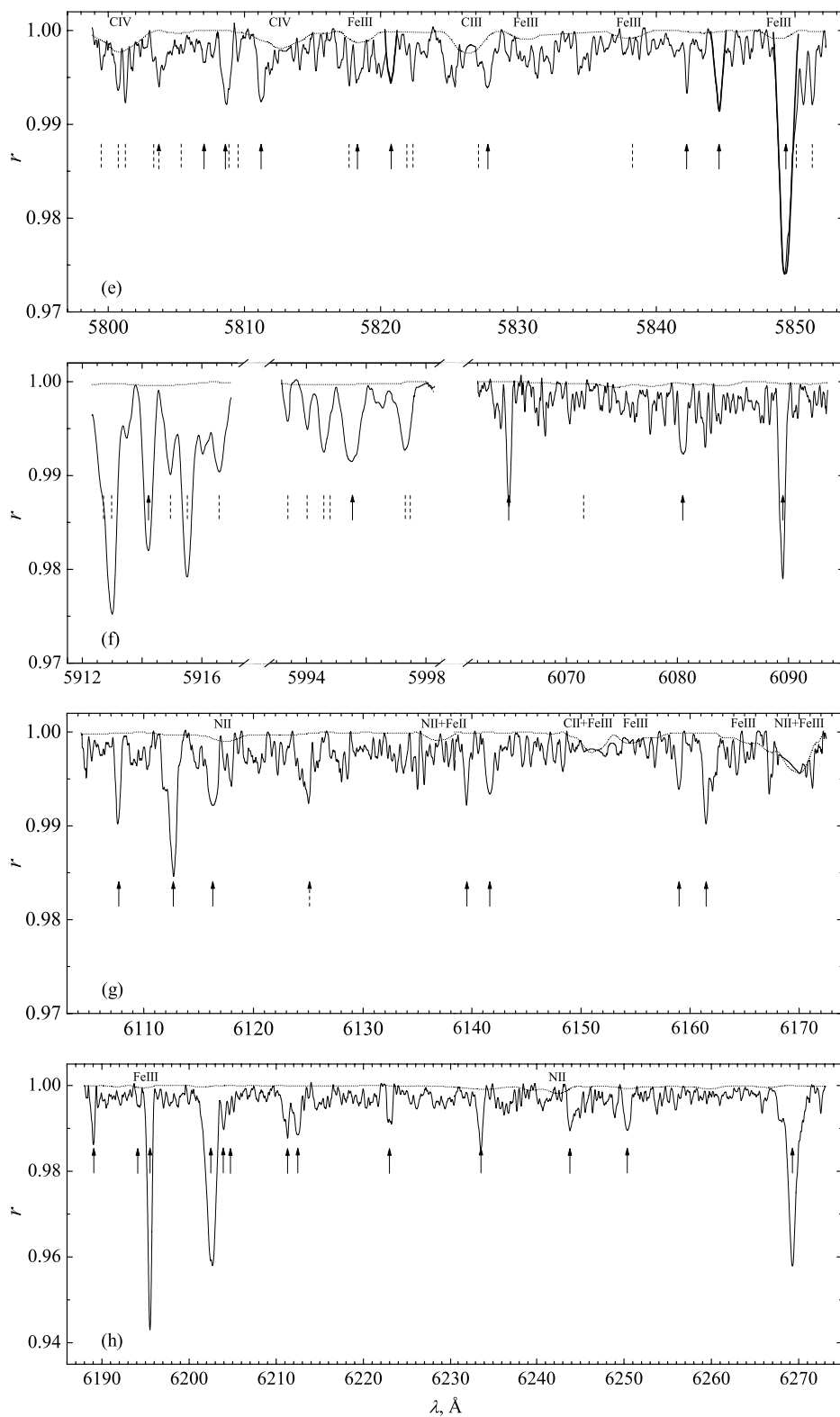


Рис. 2. Продолжение



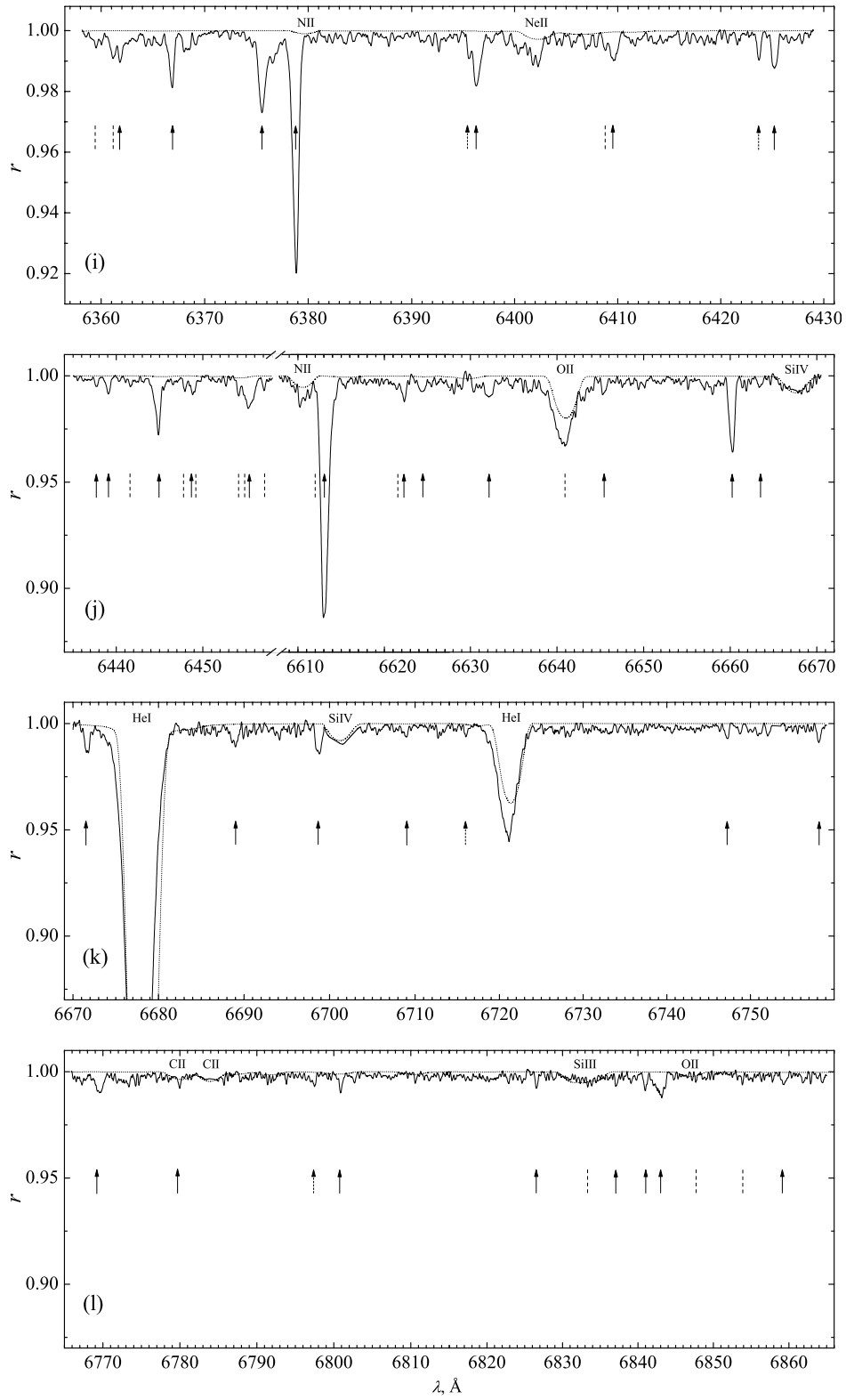


Рис. 2. Продолжение

строения профиля вручную приведены на рис. 2d и 2e (жирные линии). Спектрофотометрические параметры и ошибки их измерения отождествленных ДМП приведены во (2)–(4) столбцах таблицы 2. Отметим, что влияние инструментального профиля незначительно. В синей области спектра, где наблюдаются слабые межзвездные линии Ca I, CO<sup>+</sup>, CN, величина *FWHM* инструментального профиля не превышает 0.09 Å, а в красной области — 0.14 Å.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

В спектре  $\kappa$  Cas в области  $\lambda$  4750–6870 Å нами была отождествлена 91 ДМП, определены их эквивалентные ширины, *FWHM*, центральные глубины и лучевые скорости. Для самых сильных ДМП  $\lambda$  5780, 6613 и 5797 Å эквивалентные ширины определены с точностью до 4%. Для 11 и 19 ДМП, у которых эквивалентные ширины находятся в интервалах  $20.0 \leq W_\lambda \leq 70.0$  и  $9.0 \leq W_\lambda \leq 18.0$  mÅ соответственно, точность определения составляет менее 10% и  $14.0 \pm 2.0\%$ . Для оставшихся 57 слабых ДМП  $2.0 \leq W_\lambda < 9.0$  mÅ точность определения составляет  $20.0 \pm 2\%$ .

Herbig [5] методом классической спектроскопии отождествил 15 ДМП в спектре  $\kappa$  Cas, определил их эквивалентные ширины и центральные глубины. Несмотря на качество спектров (дисперсия 8.0 и 12.0 Å mm<sup>-1</sup>, спектры расширялись до 0.5 мм), только для ДМП  $\lambda$  5705, 5780 и 6613 Å данные с нашими совпадают с точностью лучше 10%.

Hobbs методом фотоэлектрического скана со сверхвысоким разрешением ( $\lambda/\Delta\lambda \sim 300\,000$ ) исследовал межзвездные линии Na I(D<sub>2</sub>), KI  $\lambda$  7699 Å [28], Ca II(K), Ca I  $\lambda$  4226 Å [27] и молекулы радикала CO<sup>+</sup> [36] в спектре  $\kappa$  Cas и определил их эквивалентные ширины. Несмотря на разные методы наблюдения, величины  $W_\lambda$  для линий Na I(D<sub>2</sub>), Ca II(K), KI и CO<sup>+</sup> соответственно 520, 250, 110 и менее 2.1 mÅ хорошо совпадают с нашими (см. таблицу 2).

ДМП  $\lambda$  5780, 5797 и 5849 Å в спектре  $\kappa$  Cas были исследованы (определены  $W_\lambda$ ) в работах [19, 37], радикалы CN<sup>+</sup>  $\lambda$  4232 и CN  $\lambda$  4300 Å — в статьях [19, 31, 38], межзвездная линия KI  $\lambda$  6799 и ДМП  $\lambda$  6613 Å — в работе [25]. Сопоставление полученных данных с нашими из таблиц 1 и 2 показывает, что, если эти параметры определялись на основе спектров с  $\lambda/\Delta\lambda \geq 40\,000$ ,  $S/N > 100$ , то имеет место совпадение с точностью меньше 8%. Для спектров  $\lambda/\Delta\lambda \leq 25\,000$ ,  $S/N \sim 100$ , совпадение лучше 20%. В работе [39] в спектре

$\kappa$  Cas ( $\lambda/\Delta\lambda = 60\,000$  и  $S/N \geq 500$ ) были исследованы шесть ДМП:  $\lambda$  5780, 5797, 5830, 6196, 6379, 6614 Å, определены их центральные глубины. Совпадение этих величин с нашими очень хорошее. Все это свидетельствует о достаточной точности наших измерений.

Лучевые скорости межзвездных линий и ДМП были измерены на уровне *FWHM* их профилей. Измерения показали, что в этом случае среднее значение лучевой скорости для всех межзвездных линий (в пределах ошибок измерений) получается одинаковым, а среднеквадратичное отклонение от среднего минимально. Наши измерения продемонстрировали, что лучевые скорости межзвездных линий находятся в интервале  $-17.2 \leq V \leq -16.5$  км с<sup>-1</sup> (таблица 1). По этому принципу были измерены лучевые скорости всех ДМП, наблюдаемых в спектре  $\kappa$  Cas, и определены их центральные длины волн. Найденные величины центральных длин волн хорошо согласуются с аналогичными значениями из других работ. Для 33, 18, 8, 4, 2 и 4 ДМП эти величины с точностью  $\pm 0.04$  mÅ совпадают с данными из работ соответственно [7, 20–24]. В таблице 2 эти ссылки указаны с соответствующими индексами. Для 22 ДМП эти величины были определены нами.

Диффузная полоса  $\lambda$  4430 Å в спектре  $\kappa$  Cas в явном виде не наблюдается. По-видимому, по ПЗС-спектрам с высоким разрешением выделить такие широкие и мелкие полосы очень сложно [22]. Возможно, это также связано с тем, что данная широкая полоса состоит из отдельных полос. А в спектре  $\kappa$  Cas их число мало, и они слабые. У ДМП  $\lambda$  5780, 5797, 5850, 6614 Å красное крыло более пологое, чем синее (рис. 2d). Это может быть вызвано с наложением слабых полос на красное крыло этих ДМП.

Нами также отождествлены одиннадцать абсорбционных деталей, которые могут быть диффузными полосами. Они представлены в нижней части таблицы 2. Эти детали присутствуют на всех спектрах, не являются звездными и теллурическими линиями. Для этих абсорбционных деталей найденные средние значения спектрофотометрических параметров и среднеквадратичное отклонение от них находятся в разумных пределах. Измерив лучевые скорости по описанному выше принципу, мы также определили их центральные длины волн (таблица 2). На Рис 2. они отмечены пунктирными вертикальными стрелками.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

А. Х. Рзаев благодарит Российский научный фонд за финансовую поддержку работы (проект 14-50-00043, направление «Экзопланеты»).

Работа Шиманского В. В. обеспечена субсидией, выделенной КФУ для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (3.9780.2017/8.9).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. L. Heger, Lick Obs. Bull. **10**, 146 (1922).
2. P. W. Merrill, Publ. Astron. Soc. Pacific **46**, 206 (1934).
3. C. S. Beals and G. H. Blanchet, Publ. Astron. Soc. Pacific **49**, 224 (1937).
4. D. G. York, Astrophys. J. **166**, 65 (1971).
5. G. H. Herbig, Astrophys. J. **196**, 129 (1975).
6. G. H. Herbig, Annual Rev. Astron. Astrophys. **33**, 19 (1995).
7. L. M. Hobbs, D. G. York, J. A. Thorburn, et al., Astrophys. J. **705**, 32 (2009).
8. T. P. Snow, ASP Conf. Ser. **122**, 147 (1997).
9. A. Leger and L. D'Hendecourt, Astron. and Astrophys. **146**, 81 (1985).
10. F. Salama, E. L. O. Bakes, L. J. Allamandola, and A. G. G. M. Tielens, Astrophys. J. **458**, 621 (1996).
11. L. S. Bernstein, R. M. Shroll, G. A. Galazutdinov, and Y. Beletsky, Astrophys. J. **859**, 174 (2018).
12. P. Thaddeus, AIP Conf. Ser. **312**, 711 (1994).
13. M. Tulej, D. A. Kirkwood, M. Pachkov, and J. P. Maier, Astrophys. J. **506**, L69 (1998).
14. B. J. McCall, D. G. York, and T. Oka, Astrophys. J. **531**, 329 (2000).
15. B. H. Foing and P. Ehrenfreund, Nature **369**, 296 (1994).
16. B. H. Foing and P. Ehrenfreund, Astron. and Astrophys. **317**, L59 (1997).
17. E. K. Campbell, M. Holz, D. Gerlich, and J. P. Maier, Nature **523**, 322 (2015).
18. G. A. Galazutdinov, V. V. Shimansky, A. Bondar, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **465**, 3956 (2017).
19. J. Krelowski, P. Ehrenfreund, B. H. Foing, et al., Astron. and Astrophys. **347**, 235 (1999).
20. L. M. Hobbs, D. G. York, T. P. Snow, et al., Astrophys. J. **680**, 1256 (2008).
21. P. Jenniskens and F.-X. Desert, Astron. and Astrophys. Suppl. **106**, 39 (1994).
22. G. A. Galazutdinov, F. A. Musaev, J. Krelowski, and G. A. H. Walker, Publ. Astron. Soc. Pacific **112**, 648 (2000).
23. S. Ó. Tuairisg, J. Cami, B. H. Foing, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **142**, 225 (2000).
24. T. Weselak, M. Schmidt, and J. Krelowski, Astron. and Astrophys. Suppl. **142**, 239 (2000).
25. G. Wallerstein, K. Sandstrom, and R. Gredel, Publ. Astron. Soc. Pacific **119**, 1268 (2007).
26. F. A. Musaev, G. A. Galazutdinov, A. V. Sergeev, et al., Kinemat. Phys. Celestial Bodies **15**, 216 (1999).
27. L. M. Hobbs, Astrophys. J. **170**, L85 (1971).
28. L. M. Hobbs, Astrophys. J. Suppl. **38**, 129 (1978).
29. D. E. Welty and L. M. Hobbs, Astrophys. J. Suppl. **133**, 345 (2001).
30. D. E. Welty, L. M. Hobbs, and D. C. Morton, Astrophys. J. Suppl. **147**, 61 (2003).
31. S. R. Federman, Astrophys. J. **257**, 125 (1982).
32. V. S. Menzhevitski, N. N. Shimanskaya, V. V. Shimansky, and D. O. Kudryavtsev, Astrophysical Bulletin **69**, 169 (2014).
33. M. Kraus, M. Borges Fernandes, and J. Kubát, Astron. and Astrophys. **499**, 291 (2009).
34. F. Castelli and R. L. Kurucz, IAU Symp. **210**, A20 (2004).
35. D. C. Morton, Astrophys. J. Suppl. **149**, 205 (2003).
36. L. M. Hobbs, Astrophys. J. **181**, 795 (1973).
37. G. H. Herbig, Astrophys. J. **407**, 142 (1993).
38. P. Jenniskens, P. Ehrenfreund, and F.-X. Desert, Astron. and Astrophys. **265**, L1 (1992).
39. C. Moutou, J. Krelowski, L. D'Hendecourt, and J. Jamrozczak, Astron. and Astrophys. **351**, 680 (1999).

## Interstellar Lines and Diffuse Bands in the Spectrum of the Supergiant $\kappa$ Cas

A. Kh. Rzaev, V. V. Shimansky, and Kh. A. Rza

We have studied the interstellar lines and diffuse bands in the spectrum of the supergiant  $\kappa$  Cas using the CCD spectra obtained with the Echelle spectrograph of the 2 meter telescope at the peak Terskol observatory. A synthetic stellar spectrum was used to correctly reveal the interstellar features, computed for a model atmosphere with  $T_{\text{eff}} = 21\,500$  K,  $\log g = 2.60$ ,  $v \sin i = 83$  km s $^{-1}$ ,  $[M/H] = 0.0$ ,  $\xi = 15$  km s $^{-1}$  and with partial selection of main chemical element abundances. Eleven interstellar bands and 91 diffuse interstellar bands were identified. A further 14 absorption features were revealed, possibly also diffuse bands. The spectrophotometric diffuse band parameters and their accuracies were tabulated. We present maps of observed and synthetic spectral regions containing interstellar diffuse bands.

Keywords: *stars: supergiants—stars: individual:  $\kappa$  Cas*