

УДК 524.31.01-355

ПЕРЕМЕННОСТЬ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА ИК-ИСТОЧНИКА IRAS 01005+7910

© 2014 В. Г. Клочкова*, Е. Л. Ченцов, В. Е. Панчук, Е. Г. Сендзикас, М. В. Юшкин

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 22 августа 2014 года; принята в печать 7 сентября 2014 года

По оптическим спектрам высокого разрешения ИК-источника IRAS 01005+7910 определен спектральный класс его центральной звезды $B1.5 \pm 0.3$, отождествлены спектральные детали, рассмотрена переменность их профилей и лучевой скорости. По положению симметричных и стабильных профилей запрещенных эмиссий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II] определена системная скорость $V_{\text{sys}} = -50.5 \text{ км с}^{-1}$. Присутствие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околозвездной оболочки и близость стадии планетарной туманности. Диапазон различий лучевой скорости V_r по ядрам линий около 34 км с^{-1} частично вызван деформациями профилей переменными эмиссиями. Перепад V_r по крыльям линий меньше, около 23 км с^{-1} , и может быть следствием пульсаций или/и скрытой двойственности звезды. Деформации профилей абсорбционно-эмиссионных линий могут быть связаны с изменениями их абсорбционных составляющих из-за вариаций геометрии и кинематики в основании ветра. Линии $\text{H}\alpha$ имеют ветровые профили типа P Cyg III. Показано, что отклонения ветра от сферической симметрии невелики. Относительно низкая скорость ветра (в интервале $27\text{--}74 \text{ км с}^{-1}$ для разных моментов наблюдений) и большая интенсивность длинноволновой эмиссии (превышение над уровнем континуума до семи раз) характерны не для классических сверхгигантов, а для гипергигантов. IRAS 01005 — пример спектральной «мимикрии» маломассивной звезды, находящейся на стадии post-AGB, под массивный гипергигант.

Ключевые слова: *звёзды: AGB и post-AGB — звёзды: ветер, истечение вещества — звёзды: индивидуальные: IRAS 01005+7910*

1. ВВЕДЕНИЕ

ИК-источник IRAS 01005+7910 (далее в тексте IRAS 01005) расположен высоко над плоскостью Галактики, его широта $b = 16^\circ 6'$. В оптическом диапазоне объект отождествлен с пекулярным В-сверхгигантом, $B = 11^{\text{m}}5$, $V = 11^{\text{m}}2$. Положение источника на диаграмме цветов IRAS согласуется со стадией протопланетарной туманности (для краткости далее в тексте — PPN). В соответствии с хронологической последовательностью Льюиса [1], отсутствие излучения в полосах OH и CO [2–6] указывает на то, что объект близок к фазе планетарной туманности (PN). Принципиальные результаты для центральной звезды IRAS 01005 получены Клочковой и др. [7]. Эти авторы, определив фундаментальные параметры данного сверхгиганта ($T_{\text{eff}} = 21500 \text{ К}$, ускорение силы тяжести на ее поверхности $\lg g = 3.0$, металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.31$ и содержания ряда химических элементов), подтвердили для него стадию

post-AGB. Важным результатом этой работы является обнаружение избытка углерода ($\text{C}/\text{O} > 1$) в атмосфере центральной звезды.

В ИК-спектре околозвездной оболочки IRAS 01005 содержатся спектральные детали углеродосодержащей молекулы — фуллерена C_{60} [8, 9]. IRAS 01005 является самым горячим из тех post-AGB звезд, в ИК-спектре которых содержатся не отождествленные пока детали на длинах волн 3.3 и 3.4 мкм [10]. Большая галактическая широта в сочетании с пониженной металличностью указывает на принадлежность IRAS 01005 к старому населению Галактики.

Фотометрическая переменность IRAS 01005 изучалась несколькими группами. Хривнак и др. [11] отметили переменность блеска объекта на очень короткой для PPN шкале, менее нескольких дней. Архипова и др. [12] в ходе долговременного фотометрического мониторинга, проведенного в UBV -полосах для нескольких горячих PPN, включая IRAS 01005, обнаружили быструю нерегулярную переменность их блеска. Опираясь на эти наблюдения малоамплитудной переменности

*E-mail: valenta@sao.ru

Таблица 1. Спектральный материал и средние гелиоцентрические лучевые скорости V_r .

Дата	$\Delta\lambda$, nm	S/N	V_r , км с ⁻¹						
			Основные компоненты Na I, (Ca II)	Запрещ. эмиссии	Абсорбции		Эм./абс. Fe III, (He I)	Абс./эм.	
					крылья	ядра		H β	H α
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
25.01.02	354–500	40	(-71 : , -12 :)	-50 :	-45	-40 :	-78/ - 37	-77/ - 31	
04.02.02	460–607	60	-72.5 , -10.0	-51.0	-46	-44	-44/	-75/ - 35	
22.11.02	538–685	50	-72.5 , -9.9	-49.5	-50	-45			-82/ - 32
25.11.02	538–685	30	-72.3 , -10.3	-50 :	-43	-30			-83/ - 31
27.11.02	452–600	35	-71.5 , -9.3	-51.1	-44	-41	-45/	-86/ - 23	
02.12.02	452–600	45	-72.5 , -10.2	-51.0	-42	-29	-56/ - 26	-87/ - 24	
03.12.02	452–600	30	-71.9 , -10.3	-49.2	-42	-26	-58/ - 25	-86/ - 27	
19.12.02	452–600	50	-72.7 , -10.6	-50.4	-47	-37	-70 : / - 34 :	-80/ - 35	
23.02.03	516–666	55	-72.5 , -9.2	-51 :	-50	-40	-80 : / - 38 :		-101/ - 27
13.04.03	528–676	80	-72.3 , -10.0	-48 :	-43	-33			-100/ - 19
15.11.03	352–500	100	(-70.5, -10.8)	-49.6	-32	-19	(-70/ - 29)	-81/ - 24	
10.01.04	528–676	50	-72.2 , -10.3	-49.8	-50	-51			-124/ - 32
09.03.04	528–676	55	-72.3 , -9.5	-50.6	-46	-37			-110/ - 25
28.08.04	528–676	55	-72.5 , -10.1	-51 :	-48	-45			-86/ - 27
18.01.05	528–676	110	-72.8 , -10.2	-50.9	-55	-53			-77/ - 28
13.11.05	456–601	110	-72.3 , -10.1	-50.6	-45	-37	-64/ - 29	-75/ - 33	
15.11.05	528–678	120	-72.7 , -10.1	-51.0	-43	-30	(-70 : / - 35 :)		-82/ - 28
09.12.06	447–594	130	-72.3 , -10.6	-49.7	-46	-25	-55/ - 22	-80/ - 29	
03.11.08	446–593	160	-71.8 , -10.0	-50.3	-41	-24	-53/ - 18	-85/ - 30	
05.11.08	446–593	160	-72.3 , -10.5	-50.7	-44	-30	-54/ - 20	-90/ - 27	
20.11.10	397–545	75		-50.5	-46	-29	-55/ - 20	-82/ - 30	
29.05.13	391–680	70	-72.5 , -9.8	-50.5	-45	-40	-72/ - 33	-77/ - 30	-87/ - 25
21.08.13	391–680	80	-71.8 , -10.0	-51.1	-40	-27	-60/ - 22	/ - 26	-103/ - 27

блеска для выборки PPN, авторы [12] пришли к выводу о вариациях параметров звездного ветра у этих звезд и (или) о наличии микропульсаций с характерными периодами в несколько часов.

Особенности оптического спектра IRAS 01005 в настоящее время мало изучены. Ху [13] на основе наблюдений с низким спектральным разрешением определил спектральный класс ($Sp = B2\text{Ie}$), отметив, что линия $H\alpha$ в спектре IRAS 01005 имеет

профиль типа P Cyg. В спектрах, отстоящих друг от друга на десять лет, этим автором не было найдено различий. Однако в публикации [7] по спектрам, полученным с эшелльными спектрографами 6-м телескопа БТА, были отождествлены спектральные детали и обнаружена переменность спектра центральной звезды. В спектре присутствуют абсорбционные линии C II, O II, N II, Al III, Si III, линия Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$, эмиссионные детали,

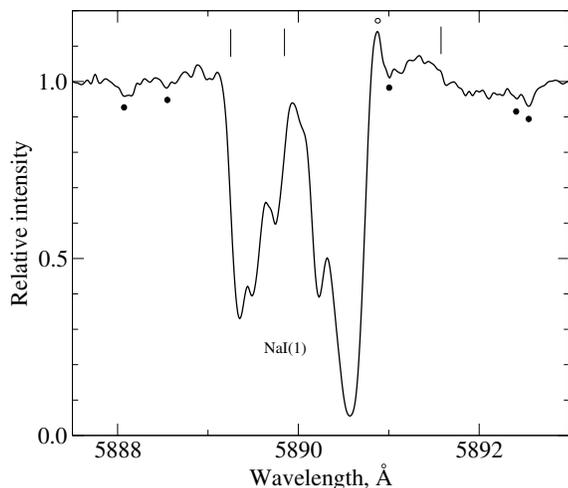


Рис. 1. Участок спектра IRAS 01005 от 13 ноября 2005 г. с многокомпонентной межзвездной абсорбцией Na I(1) 5889.95 Å и эмиссионно-абсорбционной линией Si II(5) 5891.59 Å. На горизонтальной оси — шкала лабораторных длин волн фотосферных абсорбций. Положения линий мультиплета Si II(5) помечены вертикальными штрихами, теллурических абсорбций H₂O — точками, теллурической эмиссии Na I — колечком.

отождествляемые с линиями Si II и запрещенными линиями [Fe II]. В профилях линий водорода серии Бальмера, резонансного дублета Na I, линий He I и Fe III присутствуют как эмиссионные, так и абсорбционные компоненты. Выявлена значительная переменность оптического спектра: линии нейтрального гелия меняют профиль с прямого P Cуг-типа на обратный на временной шкале дни-месяцы. Линии резонансного дублета Na I содержат пять абсорбционных компонентов со скоростями -11 , -28 , -52 , -65 и -73 км с⁻¹, причем абсорбционный профиль линии λ 5890 наложен на широкий высокоскоростной эмиссионный компонент, ширина которого совпадает с шириной эмиссионных компонентов водородных линий. Обнаруженная переменность спектра служит стимулом к продолжению изучения оптического компонента ИК-источника IRAS 01005.

В данной работе мы приводим результаты долговременного мониторинга IRAS 01005, целью которого является изучение переменности оптического спектра. Причем, в отличие от предыдущей работы [7], здесь мы используем спектральный материал только высокого спектрального разрешения. В разделе 2 кратко описана методика наблюдений и обработки данных. В разделе 3 представлены основные результаты.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

В работе мы используем двадцать три спектра высокого разрешения ($R = 60\,000$), полученных с эшелле-спектрографом НЭС [14, 15] 6-м телескопа БТА в период с 2002 по 2013 гг. Для изучения спектральной переменности важно, что все спектры получены с одним и тем же спектрографом, хотя и в разных диапазонах длин волн. К сожалению, от спектра к спектру сильно различаются также и уровни экспонирования (отношение уровня сигнала к шуму S/N). Даты получения спектров, спектральные интервалы и максимальные значения S/N представлены в первой, второй и третьей колонках таблицы 1. Для обработки спектров использована программа DECH [16], позволяющая, в частности, сглаживать кривые $r(\lambda)$ без существенного снижения разрешения и измерять лучевые скорости по отдельным деталям сложных линий, характерных для наших спектров, путем совмещения прямых и зеркальных изображений их профилей.

Все приведенные в статье лучевые скорости — гелиоцентрические. Использованные для их получения лабораторные длины волн содержатся в таблице 2. Большая часть их взята из базы данных NIST¹ и проконтролирована по спектрам звезд с узкими линиями 10 Lac (O9 V) и ι Her (B3 III), полученным с тем же спектрографом, что и спектры IRAS 01005. В ряде случаев (триплеты He I, дублеты Si II, Mg II и др.) использованы эффективные длины волн. В таблице 2 и в тексте в скобках рядом с символом элемента указан номер мультиплета.

При наличии в спектре теллурических линий по ним выполнены контроль и коррекция лучевых скоростей. Стабильность их системы за время наблюдений контролировалась также по межзвездным линиям, в основном по линиям Na I(1). При этом учитывались помехи от блендирования их теллурическими абсорбциями H₂O и эмиссиями Na I, а в случае линии D2 еще и триплетом Si II(5). Все эти помехи переменны во времени. Рисунок 1 демонстрирует их присутствие в спектре 13 ноября 2005 г., а также сложную структуру профиля линии D2 Na I(1) 5890 Å. Для пяти основных его компонентов гелиоцентрические лучевые скорости, усредненные по всему нашему материалу, составляют -72.5 , -65.3 , -52.2 , -27.7 и -10.2 км с⁻¹. Значения скоростей для двух крайних (наиболее глубоких) компонентов приведены в таблице 1 (колонка 4). Судя по ним, систематические ошибки лучевых скоростей, приводимых в остальных колонках таблицы 1, не превышают 1 км с⁻¹.

¹<http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>

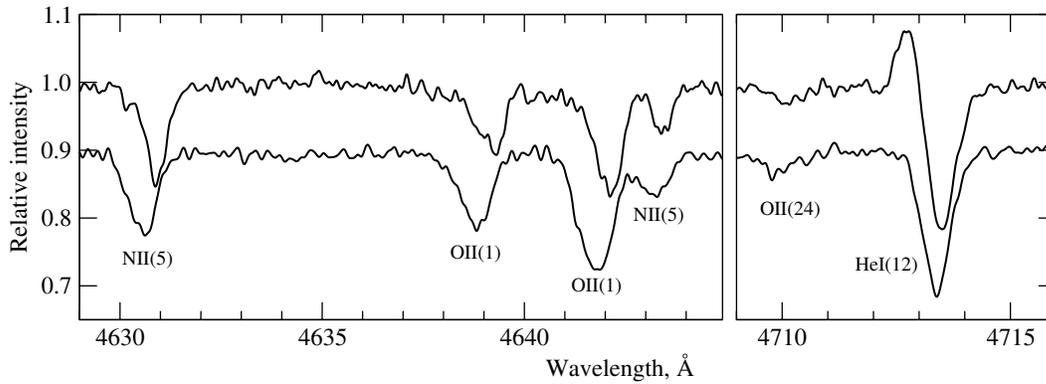


Рис. 2. Вариации формы и положения профилей в спектре IRAS 01005. Фрагменты спектров от 15 ноября 2003 г. (вверху) и от 13 ноября 2005 г. (сдвинут вниз на 0.1) сглажены по семи точкам. Горизонтальная ось размечена по лабораторным длинам волн фотосферных абсорбций в спектре за 13 ноября 2005 г.

Точность измерения скорости по одиночной линии определяется величинами шумов (S/N) и градиентов остаточной интенсивности в ее профиле ($\Delta r/\Delta \lambda$). Как видно на примере, приведенном на рис. 2, в спектре IRAS 01005 профили изменяют форму со временем и от линии к линии. Об ошибках скоростей, найденных по отдельным линиям, можно судить по разбросу значков на рис. 3, представляющем зависимости $V_r(r)$ в спектре, полученном 29 мая 2013 г. Для этого спектра со средним для нашего материала уровнем S/N и наибольшим интервалом длин волн средние значения ошибок: 0.5 км с^{-1} для запрещенных эмиссий, около 1 км с^{-1} для ядер абсорбций и около 3 км с^{-1} для слабых эмиссионных компонентов линий Fe III.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Вариации профилей линий и лучевых скоростей

В работе [7] показано, что форма профилей большинства линий изменяется как со временем, так и в пределах одного спектра, от линии к линии. Профили и предположительные области их формирования можно в первом приближении разделить на три типа:

- узкие эмиссии — протяженная разреженная оболочка;
- эмиссионно-абсорбционные профили — область, переходная от фотосферы к оболочке, в частности, ветер;
- абсорбции — фотосфера.

Из узких эмиссий наиболее просты (симметричны) и стабильны профили запрещенных линий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II]. Присутствие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околосредней оболочки и близость

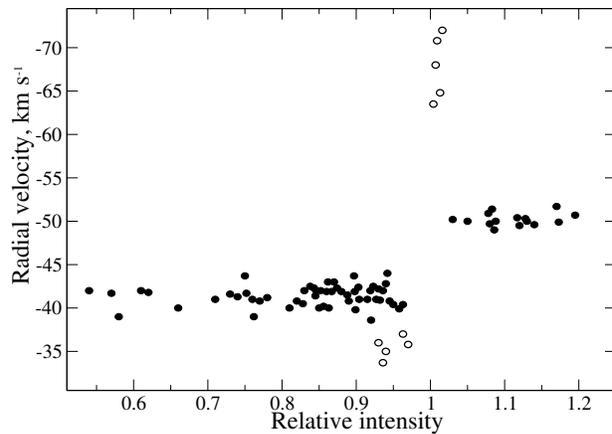


Рис. 3. Зависимости лучевой скорости V_r от остаточной интенсивности r для линий в спектре IRAS 01005, полученном 29 мая 2013 г. Каждый значок относится к отдельной линии. Точки — запрещенные эмиссии ($r > 1.0$, скорости измерены по их вершинам) и абсорбции He I и ионов ($r < 1.0$, скорости измерены по их ядрам), колечки — эмиссионные ($V_r < -60 \text{ км с}^{-1}$) и абсорбционные ($V_r > -40 \text{ км с}^{-1}$) компоненты профилей линий Fe III.

стадии планетарной туманности. Средние значения лучевых скоростей (полученные в разные даты по разным наборам этих линий!) представлены в пятой колонке таблицы 1. Временные вариации скорости для запрещенных эмиссий близки к таковым для межзвездных абсорбций, т.е. к ошибкам измерений. По-видимому, сама скорость за время наших наблюдений оставалась постоянной. Усреднение по всему материалу дает ее величину: $-50.5 \pm 0.2 \text{ км с}^{-1}$. На рис. 4 профиль одной из звездных линий, [N I] 5198 Å, сравнивается с профилем теллурической эмиссии [O I] 5577 Å: первый заметно шире, его полу-полуширина около 10 км с^{-1} .

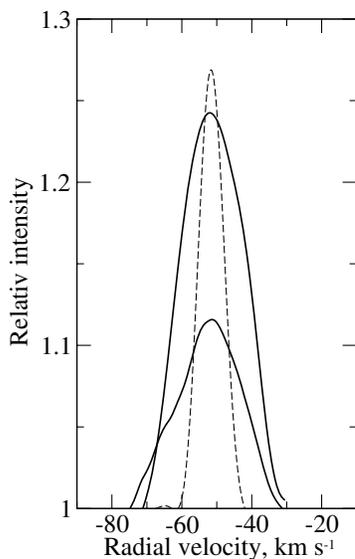


Рис. 4. Профили эмиссий [N I] F1 5198 Å и более слабый O I(22) 6046 Å в спектре IRAS 01005 от 21 августа 2013 г. в сравнении с профилем теллурической эмиссии [O I] F3 5577 Å (штриховая линия, сдвинута по оси V_r).

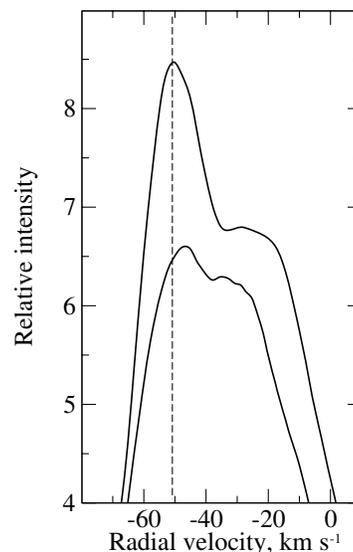


Рис. 5. Вершины профилей $H\alpha$ в спектрах IRAS 01005, сверху вниз: 21 августа 2013 г. и среднее между 22 ноября 2002 г. и 25 ноября 2002 г. Вертикальная штриховая прямая отмечает положение запрещенных эмиссий.

В отличие от лучевых скоростей интенсивности запрещенных эмиссий показывают небольшие колебания (максимальный перепад остаточных интенсивностей составляет 5–6%). Реальность колебаний подтверждается их синхронностью для разных линий, отсутствием изменений за двое суток, а также тем, что вариации относительных интенсивностей линий в дублетах [N I] 5198, 5200 Å, [Fe II] 4814, 5158 Å и др., ограниченные лишь ошибками измерений, существенно меньше (2–3%). В доступной нам области спектра IRAS 01005 присутствует несколько слабых эмиссий O I. При этом сильнейший триплет O I(1) 7773 Å наблюдается в абсорбции [7]. Исходя из его интенсивности можно было ожидать, что более слабые линии, члены мультиплетов (9) (6454–56 Å) и (10) (6156–58 Å), также окажутся абсорбциями с глубинами $R \approx 0.02$, однако в наших спектрах они не выделяются из шумов — возможно, заполнены эмиссиями. Чистые эмиссии принадлежат мультиплетам (5) 4368 Å, (23) 5958 Å и (22) 6046 Å, их средние остаточные интенсивности 1.04, 1.05 и 1.11 соответственно. Профиль последней линии показан на рис. 4. По ширине и средней лучевой скорости ($-50.8 \pm 1 \text{ км с}^{-1}$) эмиссии O I близки к запрещенным. Если в запрещенных линиях, а также в эмиссиях O I излучает протяженная медленно расширяющаяся оболочка звезды, то к ней естественно отнести и излучение в узких эмиссионных компонентах сложных профилей

первых членов серии Бальмера. Их ветровые составляющие за время наших наблюдений заметно изменяли интенсивность, но сохраняли форму P Cyg III по Билсу: красный эмиссионный пик намного выше синего. Образцы верхних частей комплексных профилей $H\alpha$ представлены на рис. 5, а лучевые скорости для абсорбционных и эмиссионных экстремумов их ветровых составляющих по всему нашему материалу — в последней колонке таблицы 1.

По визуальному впечатлению переменность потока от оболочки в линиях водорода выражена сильнее, чем в запрещенных линиях и эмиссиях O I. Количественная оценка затруднена блендированием оболочечных и ветровых эмиссий, но все же возможна — путем сопоставления всех наличных профилей $H\alpha$. Перепад интенсивностей в пиках узких компонентов составляет около 20% с учетом изменений интенсивностей на соответствующих длинах волн в ветровых компонентах. На рис. 5 приведены верхние части профилей $H\alpha$ с относительно сильной (21 августа 2013 г.) и слабой (22–25 ноября 2002 г.) оболочечными компонентами. Видно, что наиболее сильные (и, следовательно, наименее деформированные блендированием) узкие эмиссии $H\alpha$ по ширине близки к запрещенным эмиссиям и минимально смещены относительно них. С ослаблением компоненты ее пик смещается в красную сторону, и найденная по нему лучевая скорость меняется от -50 км с^{-1} 21 августа 2013 г. до -43 км с^{-1} 22–25 ноября 2002 г.

Таблица 2. Отождествление линий в спектре IRAS 01005, их остаточные интенсивности (r) и гелиоцентрические лучевые скорости (V_r). Буквой «e» помечены эмиссии и эмиссионные компоненты. Спектральная переменность не допускает усреднения по нескольким спектрам, поэтому область 3530–4575 Å представлена спектром от 15 ноября 2003 г., область 4590–5455 Å — спектром от 13 ноября 2005 г., и область 5495–6731 Å — спектром от 18 января 2005 г.

Линия (мульти-т)	λ , Å	r	V_r , км с ⁻¹	Линия (мульти-т)	λ , Å	r	V_r , км с ⁻¹	Линия (мульти-т)	λ , Å	r	V_r , км с ⁻¹
15 ноября 2003 г.				He I (22)	3819.64	e 1.00	-70			0.45:	-12.6
He I (36)	3530.49	0.71:	-22:			0.61	-26	He ε	3970.07	0.70:	-68:
He I (34)	3554.43	0.68:	-28:	He I (62)	3833.55	0.83	-20			e 0.83:	-30
He I (31)	3587.29	0.76	-27	H 9	3835.38	0.68	-20:	O II (6)	3973.26	-	-21
He I (6)	3613.64	0.77	-25:			e 0.80:	-32:	O II (6)	3982.71	0.92:	-30:
He I (28)	3634.25	0.74	-23	He I (61)	3838.10			N II (12)	3995.00	0.80	-23
H 24	3671.48	0.94:	-12:	N II (30)	3838.37			He I (55)	4009.27	0.73	-25
H 23	3673.76	0.88:	-13:	N II (30)	3842.18	0.96:	-23:	Fe III (45)	4022.35	0.98:	-23:
H 22	3676.36	0.87:	-19:	N II (30)	3847.41	0.98:	-33:	He I (54)	4023.97	0.96	-25:
H 21	3679.35	0.83:	-15:	Si II (1)	3856.02	e 1.13	-52	Fe III (53)	4025.07	0.93	-21
H 20	3682.81	0.81:	-21:	Si II (1)	3862.60	e 1.10	-48	He I (18)	4026.23	e 0.98	-73
H 19	3686.83	0.79:	-19	He I (20)	3867.50	0.84	-23			0.62	-27
H 18	3691.56	0.73	-16	He I (60)	3871.79	0.81	-24	N II (39)	4035.08	0.97	-33
H 17	3697.15	0.72	-21	C II (33)	3876.2:	0.90		N II (39)	4041.31	0.94	-31:
H 16	3703.86	0.64:	-15:	O II (12)	3882.20	0.94:	-24:	O II (10)	4069.8:	0.89	
He I (25)	3705.02	0.61	-26	He I (2)	3888.65	e 1.01	-77	O II (10)	4072.16	0.90	-28:
H 15	3711.97	0.64	-15			0.66	-31	C II (36)	4074.6:	0.95:	
H 14	3721.94	0.64	-13	H 8	3889.05	0.70		C II (36)	4075.85	0.86	-21
O II (3)	3727.33	0.87:	-27:	O II (17)	3911.96	0.94:	-28:	O II (10)	4075.87		
He I (24)	3732.87	0.81	-18:	C II (4)	3918.98	0.84	-24	O II (10)	4078.86	0.96	-27:
H 13	3734.37	0.65	-12	O II (17)	3919.29			O II (10)	4083.91		
H 12	3750.15	0.63	-14	C II (4)	3920.69	0.76	-26	O II (10)	4085.11	0.95:	-30:
He I (65)	3768.78			He I (58)	3926.53	0.79	-23	Si IV (1)	4088.85	0.91	-19:
H 11	3770.63	0.65	-18	Ca II (1)	3933.66	0.48	-70.5	O II (48)	4089.29		
		e 0.72:	-43:			0.30	-12.4	O II (10)	4092.94	0.95	-29:
He I (64)	3784.86	0.92	-23	He I (57)	3935.91	0.95	-19:	H δ	4101.74	0.78	-70
Si III (5)	3791.41	0.93	-16:	O II (6)	3945.04	0.95	-30:			e 0.98	-34
H 10	3797.90	0.64	-26	O II (6)	3954.36	0.92	-25:	O II (20)	4103.02		
		e 0.69:	-40:	N II (6)	3955.85	0.93:	-29:	O II (20)	4104.9:		
He I (63)	3805.74	0.90	-23:	He I (5)	3964.73	0.70	-24	O II (20)	4110.50	0.96:	
Si III (5)	3806.54	0.90:	-25:	Ca II (1)	3968.47	0.61:	-71.0	O II (21)	4112.03	0.97	-30:

Таблица 2. (Продолжение)

Линия (мульти-г)	λ , \AA	r	V_r , км с^{-1}	Линия (мульти-г)	λ , \AA	r	V_r , км с^{-1}	Линия (мульти-г)	λ , \AA	r	V_r , км с^{-1}
Si IV (1)	4116.10	0.96	-27:	O II (2)	4319.63	0.83	-21	Fe III (4)	4430.95	0.96:	
O II (20)	4119.22	0.91	-26:	O II (2)	4325.76	0.97:		N II (55)	4432.74	0.97:	-28:
He I (16)	4120.82	0.77	-21	C II (28)	4325.9:			He I (50)	4437.55	0.87	-23
Si II (3)	4128.07	e 1.01:	-67:	S III (4)	4332.71	0.97	-27:	N II (15)	4447.03	0.95	-25
		0.88	-29	O II (2)	4336.86	0.93:	-26	O II (35)	4448.21	0.98:	-26:
Si II (3)	4130.89	e 1.00:	-67:	H γ	4340.47	e 1.00	-100	[Fe II] F7	4452.11	e 1.03	-52:
		0.91	-28			0.84	-72	O II (5)	4452.38	0.96	-25
O II (19)	4132.80	0.96:	-31:			e 1.32	-30	[Fe II] F6	4457.95	e 1.03	-49
He I (53)	4143.76	e 1.00	-70	O II (2)	4345.56	0.86	-20	He I (14)	4471.52	e 1.06	-77
		0.66	-25	O II (16)	4347.42	0.95:	-27:			e 0.74	-32
O II (19)	4153.30	0.89	-28	O II (2)	4349.43	0.79	-19			0.70	-26
He I (52)	4168.97	0.91	-23	O II (2)	4351.26	0.92:	-30:	[Fe II] F7	4474.91	e 1.02:	-50:
N II (42)	4176.16	0.97	-23:	[Fe II] F7	4359.74	e 1.10	-51	Al III (8)	4479.93	0.97:	-26:
O II (36)	4185.46	0.96	-24:	S III (4)	4361.48	0.97:	-26:	Mg II (2)	4481.22	e 1.04	-72
O II (36)	4189.80	0.92	-29	O II (2)	4366.89	0.89	-23			0.76	-28
N II (33)	4227.74	0.96:		O I (5)	4368.25	e 1.04	-51:	Al III (8)	4512.56	0.98	-29:
CH ⁺	4232.55	0.96	-12.8	Fe III (122)	4372.31	0.97:		Al III (8)	4529.1:	0.96:	
N II (48)	4241.78	0.95	-26	C II (45)	4372.4:			N II (59)	4530.41	0.98:	
[Fe II] F21	4243.98	e 1.05	-50	C II (45)	4374.27	0.96:	-27:	Si III (2)	4552.62	0.75	-19
O II (101)	4253.8:	0.91		Fe III (4)	4382.51	0.97:	-20:	Si III (2)	4567.82	0.79	-18
C II (6)	4267.14	e 1.05	-68	He I (51)	4387.93	e 1.00:	-85:	Si III (2)	4574.76	0.88	-21
		0.77	-18			0.61	-25	13 ноября 2005 г.			
O II (67)	4275.52	0.93	-28:	Fe III (4)	4395.76	e 1.03	-62:	O II (15)	4590.97	0.90	-50
[Fe II] F21	4276.83	e 1.03:	-51			0.94	-20:	O II (15)	4596.17	0.92:	-52
S III (4)	4284.89	0.97:	-19:	O II (26)	4395.95			N II (5)	4601.48	0.94	-34:
[Fe II] F7	4287.40	e 1.15	-50	C II (40)	4409.98	0.97	-16:	O II (93)	4602.11		
S II (49)	4294.40	0.97:	-20	C II (39)	4411.4:	0.96:		N II (5)	4607.15	0.95:	-37
CH	4300.32	0.96	-12	[Fe II] F7	4413.78	e 1.07	-51	O II (93)	4609.42	0.96:	-49:
O II (54)	4303.83	0.95:		O II (5)	4414.91	0.84	-19	N II (5)	4613.87	0.96:	-39:
C II (28)	4313.10	0.97:	-15:	[Fe II] F6	4416.27	e 1.05	-50	C II (50)	4619.23	0.97:	-47:
O II (78)	4313.43			O II (5)	4416.98	0.89	-21	N II (5)	4621.39	0.97:	-25:
O II (2)	4317.14	0.88	-22	Fe III (4)	4419.60	e 1.04	-57	N II (5)	4630.54	0.88	-37
C II (28)	4317.26					0.93	-19:	O II (1)	4638.85	0.89	-42

Таблица 2. (Продолжение)

Линия (мульти-т)	λ , \AA	r	V_r , км с^{-1}	Линия (мульти-т)	λ , \AA	r	V_r , км с^{-1}	Линия (мульти-т)	λ , \AA	r	V_r , км с^{-1}
O II (1)	4641.81	0.83	-42	S II (15)	4917.21	0.98:	-49:	C II (16)	5151.09	0.96	-54:
N II (5)	4643.09	0.93	-35:	He I (48)	4921.93	0.63	-29	Fe III (5)	5156.11	e 1.04	-69:
C III (1)	4647.42	0.94	-44	S II (7)	4924.12	0.93:				0.91	-31
O II (1)	4649.14	0.78	-43	O II (28)	4924.53			[Fe II] F19	5158.78	e 1.11	-52
O II (1)	4650.84	0.87	-46:	S II (7)	4925.35	0.98:	-41:	O II (32)	5160.02	0.98:	-47:
O II (1)	4661.64	0.87	-42	O II (33)	4941.07	0.98	-41:	Fe III (5)	5193.91	e 1.01:	-64:
O II (1)	4673.75	0.96	-45	O II (33)	4943.00	0.97	-45			0.98	-30:
O II (1)	4676.23	0.89	-42	N II (24)	4994.36	0.97	-41:	[N I] F1	5197.90	e 1.17	-50
N II (62)	4678.14	0.98:	-47:	N II (19)	5001.35	0.90	-47	[N I] F1	5200.26	e 1.09	-51
Si III (13)	4683.02	0.99:		N II (4)	5002.70	0.97:	-44:	O II (32)	5206.65	0.99	-46
Si III (13)	4683.8			N II (19)	5005.15	0.91	-45	S III	5219.32	0.99:	
O II (1)	4696.36	0.98:	-44:	N II (24)	5007.33	0.98	-43:	[Fe II] F19	5261.62	e 1.04	-51
O II (25)	4699.2:	0.94	-50:	N II (4)	5010.62	0.96	-42	[Fe II] F18	5273.35	e 1.03:	-50
O II (25)	4705.36	0.92:	-42:	S II (15)	5014.07	0.97:	-43:	O I (26)	5299.04	e 1.04	-51
O II (24)	4710.01	0.97:	-46:	He I (4)	5015.68	e 1.14	-65	[Fe II] F19	5376.47	e 1.02:	-48:
He I (12)	4713.18	e 1.00:	-75:			0.76	-23	S II (6)	5428.67	0.99:	-40
		0.78	-27	N II (19)	5025.66	0.99:	-42:	S II (6)	5432.82	0.98:	-44:
Si II	4716.65	0.99:	-50:	S II (1)	5027.22	0.98:	-48:	S II (6)	5453.83		
N II (20)	4779.72	0.99:	-34:	S II (7)	5032.45	0.99:	-49:	N II (29)	5454.22	0.92	-48:
N II (20)	4788.13	0.98:	-45:	Si II (5)	5041.03	e 1.05	-53	18 января 2005 г.			
N II (20)	4803.29	0.98:	-48:	N II (4)	5045.10	0.93	-44	N II (29)	5495.67	0.97	-59
Ar II (6)	4806.02	0.98:	-43:	He I (47)	5047.74	0.83	-34	S II (6)	5606.15	0.98:	-59:
Si III (9)	4813.33	0.96:	-38:	Si II (5)	5055.97	e 1.12	-55	S II (14)	5639.97	0.93	-60:
[Fe II] F20	4814.55	e 1.06	-50	Fe III (5)	5073.90	0.96	-28:	S II (11)	5640.33		
Si III (9)	4819.72	0.96	-46	Fe III (5)	5086.72	e 1.00:	-66:	C II (15)	5640.55		
Si III (9)	4828.97	0.97	-46:			0.97	-27:	S II (14)	5647.03	0.97:	
H β	4861.33	1.23	-75	Fe III (5)	5127.5:	e 1.04	-72:	S II (11)	5659.99	0.99:	-58:
		e 2.78	-33			0.94	-27	C II (15)	5662.47	0.97	-60:
O II (57)	4871.52	0.98:	-43:	C II (16)	5133.1:	0.92	-47	N II (3)	5666.63	0.90	-53
[Fe II] F4	4889.63	e 1.03	-49	C II (16)	5139.17	0.98:	-47:	N II (3)	5676.02	0.90	-52:
O II (28)	4890.86	0.98:	-44:	C II (16)	5143.49	0.96	-46	N II (3)	5679.56	0.84	-53
[Fe II] F20	4905.35	e 1.01:		C II (16)	5145.16	0.92	-44:	N II (3)	5686.21	0.95	-57:
O II (28)	4906.83	0.96:	-50:	Ar II (13)	5145.31			Al III (2)	5696.60	0.85	-56

Таблица 2. (Продолжение)

Линия (мульти-τ)	λ, Å	r	V _r , км с ⁻¹	Линия (мульти-τ)	λ, Å	r	V _r , км с ⁻¹	Линия (мульти-τ)	λ, Å	r	V _r , км с ⁻¹
N II (3)	5710.77	0.94:	-60:			0.55	-27.7	Si II (2)	6371.36	e 1.08	-49
Al III (2)	5722.73	0.90:	-53:			0.06	-9.7	DIB	6379.29	0.93:	
Si III (4)	5739.73	0.84	-53	C II (5)	5891.59	e 1.07	-55:	Ne I (1)	6402.25	0.92:	-63:
DIB	5780.37	0.96	-14:			0.96	-18:	[N II] F1	6548.03	e 1.13	-51
DIB	5796.96	0.97:	-16:	Si II (4)	5957.56	e 1.08	-52	Hα	6562.81	2.06	-78
Fe III (114)	5833.94	0.97:	-53:	O I (23)	5958.5:	e 1.05	-52:			e 5.90	-49
He I (11)	5875.72	0.90	-70:	Si II (4)	5978.93	e 1.18	-51			e 4.48:	-24
		e 1.10	-30	Fe III (117)	6032.59	e 1.03:	-59:	C II (2)	6578.05	0.70	-51
Na I (1)	5889.95	0.32	-72.4	O I (22)	6046.39:	e 1.12	-52:	C II (2)	6582.88	0.70:	-55:
		0.39	-65.3	Ne I (3)	6074.34	0.98:	-45:	[N II] F1	6583.45	e 1.1:	-51:
		0.60	-52.8	C II (24)	6095.29	e 1.02:	-53:	DIB	6613.56	0.95	-10.8
		0.40	-27.5	C II (24)	6098.51	e 1.02:	-53:	O II (4)	6641.05	0.97	-53:
		0.05	-10.0	Ne I (1)	6143.06	0.97:	-64:	[S II] F2	6716.47	1.03:	-53:
Na I (1)	5895.92	0.49	-72.5	DIB	6195.96	0.96	-13	O II (4)	6721.35	0.97:	-55:
		0.57	-64.7	[O I] F1	6300.30	e 1.07:	-48:	[S II] F2	6730.85	1.09	-53
		0.74	-52.1	Si II (2)	6347.10	e 1.15	-50				

В оболочке, по-видимому, формируются, по крайней мере частично, также и линии Si II. Об этом говорит прежде всего то, что в доступном нам интервале спектра IRAS 01005 почти все они эмиссионные (исключение составляет абсорбционно-эмиссионный дублет 4128 и 4131 Å). Кроме того, усреднение по всему материалу лучевых скоростей, найденных по пикам эмиссий, дает величину близкую к -50 км с⁻¹. Однако линии Si II отличаются от рассмотренных выше оболочечных эмиссий формой профилей и их изменчивостью. Лучевые скорости для их пиков изменяются со временем от -46 км с⁻¹ до -54 км с⁻¹, остаточные интенсивности — на 10%, а полу-полуширины при этом — на 30%. Затрудняясь дать оценку временной шкалы этих изменений по нашим данным, отметим лишь, что по крайней мере за двое суток (25–27 ноября 2002 г., 13–15 ноября 2005 г., 3–5 ноября 2008 г.) изменения не выходят за пределы ошибок.

Образцы профилей линий Si II представлены на рис. 6. Штриховой кривой на нем показана внешняя огибающая семнадцати профилей самой сильной линии, Si II 5979 Å, совмещенных по оси V_r.

Она напоминает силуэт горы Фудзи на японских гравюрах: острая вершина ($r \approx 1.22$), вогнутые склоны (на половине высоты $\Delta V_r \approx \pm 20$ км с⁻¹) и широкое основание (до ± 90 км с⁻¹). На примере линии Si II 6347 Å можно видеть, как время от времени профиль становится резко асимметричным: «провисает» тот или иной его склон, иногда даже ниже уровня континуума (синий склон 13 апреля 2003 г.). Эти деформации профилей могут быть связаны, как и в случае линий водорода, с изменениями их абсорбционных (фотосферных) составляющих, а также с вариациями геометрии и кинематики в основании ветра. Привлекая данные шестой и седьмой колонок таблицы 1, можно видеть, что сопоставленным на рис. 6 профилям от 13 апреля 2003 г. и от 15 ноября 2005 г. с противоположной асимметрией соответствуют почти одинаковые лучевые скорости для абсорбций.

Как отмечено выше, линии Hα, освобожденные от налагающихся на них узких оболочечных эмиссий, имеют профили P Cug III, т.е. типично ветровые. Рисунок 7 демонстрирует это для двух уровней мощности ветра (по всему материалу остаточная интенсивность красного эмиссионно-

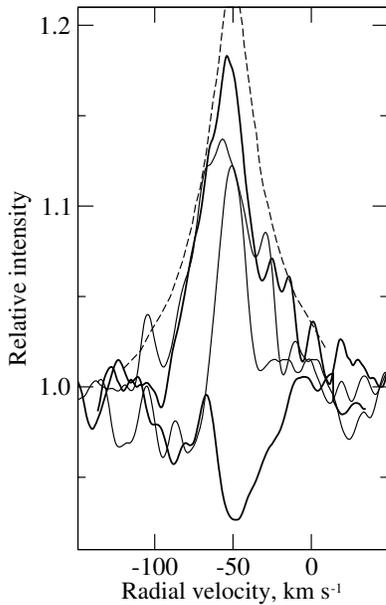


Рис. 6. Вариации профилей Si II в спектре IRAS 01005. Жирные линии — эмиссия Si II (2) 6347 Å и среднее из эмиссионно-абсорбционных профилей Si II (3) 4128 и 4130 Å, то и другое от 29 мая 2013 г. Тонкие линии — профили Si II (2) 6347 Å: слева от 15 ноября 2005 г., справа от 13 апреля 2003 г. Штриховая линия — наружная огибающая набора всех профилей Si II 5979 Å.

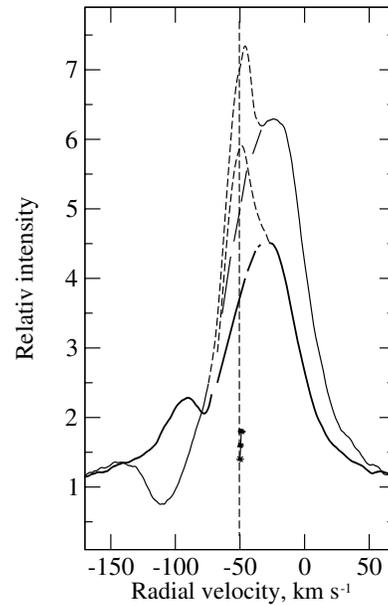


Рис. 7. Профили H α в спектре IRAS 01005 от 9 марта 2004 г. (тонкая линия) и от 18 января 2005 г. (жирная линия). Штрихи — оболочечные эмиссии, прерывистые линии — участки ветровых профилей под ними. Вертикальная штриховая прямая фиксирует лучевую скорость для запрещенных эмиссий, цепочка крестиков рядом с ней — бисектор для нижней части профиля 18 января 2005 г.

го пика изменяется у H α на 50%, а у H β — на 70%). Главные эмиссионные пики и абсорбционные депрессии располагаются по разные стороны от вертикальной прямой, фиксирующей скорость по запрещенным эмиссиям (-50.5 км с^{-1}). Две последние колонки таблицы 1 показывают, что эта ситуация сохраняется для H α и H β также во всех остальных наших спектрах. Причем и величины смещений $\Delta V_r = (V_r + 50.5 \text{ км с}^{-1})$, и их разброс невелики: для абсорбционного минимума H α $-74 < \Delta V_r < -27 \text{ км с}^{-1}$, для главного эмиссионного пика $18 < \Delta V_r < 31 \text{ км с}^{-1}$. Такая относительно низкая скорость ветра, как и большая интенсивность красного эмиссионного пика (превышение уровня континуума до семи раз), характерны не для классических сверхгигантов, а для гипергигантов. IRAS 01005 — пример спектральной «мимикрии» маломассивной звезды, находящейся на стадии post-AGB, под массивный гипергигант.

По-видимому, отклонения ветра от сферической симметрии невелики. На это указывают симметрия профилей H α в нижних частях ($1.2 < r < 1.8$) и близость находимых по ним значений V_r к -50 км с^{-1} , обратная корреляция между интенсивностями синего и красного эмиссионных пиков, а также обратная корреляция между глубиной абсорбционного минимума и высотой красного эмиссионного пика и прямая корреляция глубины

абсорбции с величиной ее синего сдвига. Вывод о незначительных отклонениях ветра от сферической симметрии согласуется с формой околозвездной оболочки IRAS 01005. Изображение объекта, полученное в [17] с высоким угловым разрешением с помощью космического телескопа Хаббла, отнесено авторами [17] к морфологическому типу SOLE, в котором доминирует поток от центральной звезды. Околозвездная оболочка иррегулярна и содержит несколько лепестков разного масштаба.

Профили линий He I более разнообразны. На рис. 8 сведены пары наиболее различающихся профилей линий He I 5876 и 5016 Å. Линия He I 5876 Å, сильнейшая в видимой области спектра, формируется выше других линий He I, поэтому неудивительно, что в двенадцати из двадцати наших спектров ее профиль повторяет прямой P Cуг-профиль H β либо H α , отслеживая и изменения интенсивности. Это сходство сохранялось, например, с 22 ноября 2002 г. по 3 декабря 2002 г. Другой случай представлен на рис. 8 профилем от 13 апреля 2003 г., сдвиги его экстремумов (используется введенная выше величина ΔV_r): -45 и 22 км с^{-1} , а у H α : -50 и 31 км с^{-1} . Однако достаточно часто такое сходство пропадает. В приведенном на том же рисунке профиле от 13 ноября 2005 г. главный эмиссионный пик находится не

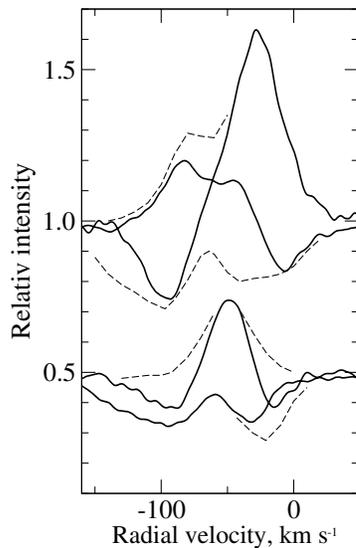


Рис. 8. Профили линий He I в спектре IRAS 01005: 5876 Å (вверху) и 5016 Å (смещена вниз на 0.5). Сплошными линиями показаны профили с наибольшей и наименьшей интенсивностями эмиссий (для 5876 Å от 13 апреля 2003 г. и 13 ноября 2005 г., для 5016 Å от 2 декабря 2002 г. и 29 мая 2013 г. соответственно), штриховыми — огибающие наборов профилей.

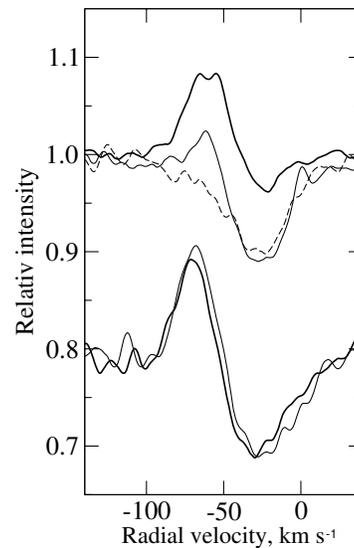


Рис. 9. Сходство эмиссионно-абсорбционных профилей в спектре IRAS 01005 от 21 августа 2013 г. Вверху: профили Fe III (среднее для 5127 и 5156 Å, жирная линия) и He I (5048 Å, тонкая линия); для сравнения приведен профиль абсорбции O II 4267 Å (пунктир). Внизу (сдвиг вниз по вертикали на 0.2): Si II 4267 Å (жирная линия) и He I 4713 Å (тонкая линия).

с красной стороны от абсорбционной депрессии, а с синей, для первого $\Delta V_r \approx -32$ км с⁻¹, для второй -6 км с⁻¹, соответствующие же значения для H β : $+17$ и -25 км с⁻¹. При этом речь не идет о смене прямого P Cyg-профиля He I 5876 Å обратным, так как и эмиссионная, и абсорбционная детали располагаются по одну сторону от «линии -50 км с⁻¹».

Профиль более слабой линии He I 5016 Å проще и стабильнее, он содержит одиночный, довольно узкий (средняя полу-полуширина 18 км с⁻¹) эмиссионный компонент. Из его параметров наиболее заметно изменение остаточной интенсивности, по нашим данным, около 30%, лучевая скорость колеблется вблизи «линии -50 км с⁻¹» от -62 до -43 км с⁻¹.

При переходе к еще более слабым линиям He I обнаруживается и усиливается сходство их профилей с эмиссионно-абсорбционными профилями более тяжелых элементов: Si II, N II, Fe III (рис. 9). У последних они наиболее характерны, поэтому скорости для их экстремумов представлены в восьмой колонке таблицы 1 (сходство профилей позволило в двух случаях отсутствия надежных линий Fe III заменить их измерениями линии He I). Интерпретация профилей линии He I 4713 Å и др. как инверсных P Cyg-профилей, т.е. как проявление глобального сжатия слоев их формирования, представляется иногда допустимой, но большинство на-

ших спектров показывает скорее лишь наложение эмиссии на синий склон абсорбционного профиля. Рисунок 9 (в его верхней части) демонстрирует это на примере профиля чисто абсорбционной линии O II 4676 Å близкой интенсивности.

Линии, формирующиеся в основании ветра и в слое, переходном к фотосфере, также переменны по всем параметрам. Наш материал уверенно фиксирует изменения профилей по крайней мере за двое суток. Это демонстрирует рис. 10. Если различия профилей линий He I 5048 Å и N II 5679 Å, возникшие за шесть часов (левый фрагмент рисунка), еще близки к погрешностям измерений, то за двое суток (правый фрагмент) они достигают существенной, уверенно измеряемой величины: так, эквивалентная ширина линии N II 5679 Å выросла с 0.15 до 0.22 Å.

Более или менее чистые фотосферные абсорбции, как правило, асимметричны: ядро сдвинуто относительно крыльев в красную сторону. Поэтому лучевые скорости были измерены не только по их ядрам, но и по по крыльям профилей, они приведены соответственно в седьмой и шестой колонках таблицы 1. Каждая цифра — результат усреднения по многим абсорбциям данного спектра с помощью построенного для него графика типа рис. 3, причем, поскольку полоса зависимости $V_r(r)$ может быть наклонной, в качестве результата принимался пре-

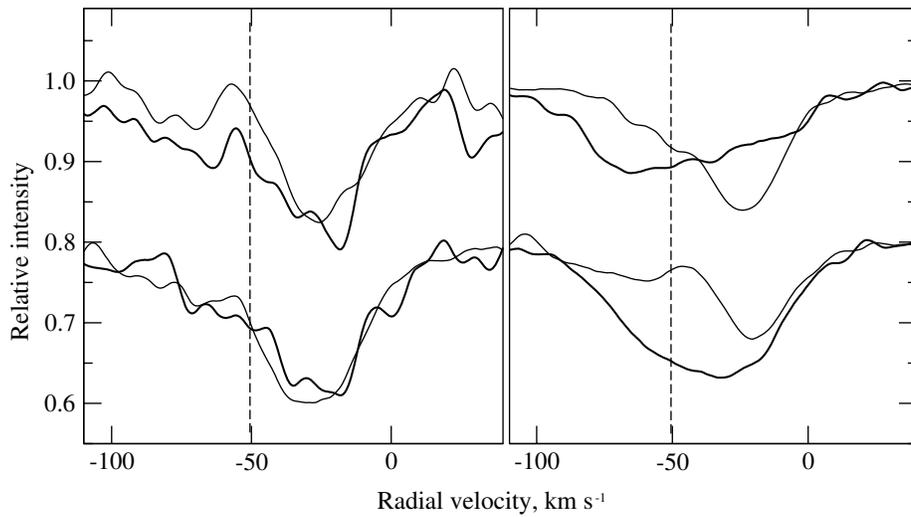


Рис. 10. Изменения со временем профилей He I 5048 Å (вверху) и N II 5679 Å (смещен вниз по вертикали на 0.2) в спектре IRAS 01005: за шесть часов (2/3 декабря 2002 г., слева) и за двое суток (3 и 5 ноября 2008 г., справа). Тонкими линиями показаны более ранние виды профилей, жирными — более поздние.

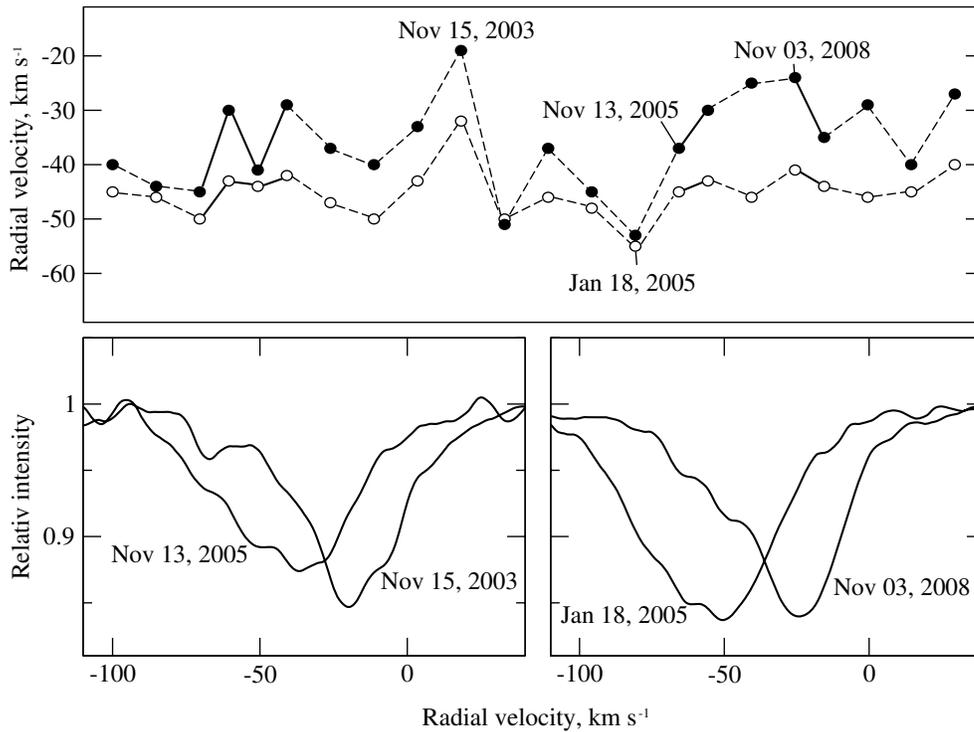


Рис. 11. Вверху: изменение от даты к дате (между 25 января 2002 г. и 21 августа 2013 г.) лучевых скоростей для слабых абсорбций в спектре IRAS 01005, измеренных по их ядрам (точки) и крыльям (колечки). Близкие даты соединены сплошными прямыми, остальные — штриховыми. Помечены даты, для которых ниже приводятся профили линий. Внизу: сопоставление профилей N II 4630 Å (слева) и N II 5679 Å (справа) в даты с большими различиями лучевых скоростей.

дел, к которому стремится значение V_r с приближением к $r = 1.0$.

Лучевые скорости из колонок шесть и семь таблицы 1 представлены графически на рис. 11. Их временные вариации необходимо соотносить с лучевой скоростью звезды в целом — V_{sys} . Резонно принять за такую скорость для запрещенных эмиссий, т.е. считать $V_{\text{sys}} = -50.5 \text{ км с}^{-1}$. В пользу этого говорит то, что V_r для крыльев, относящиеся к наиболее глубоким из доступных нам слоев атмосферы, ближе к предлагаемой V_{sys} , чем V_r для ядер, а еще более то, что абсорбции с $V_r \approx V_{\text{sys}}$ наименее деформированы эмиссионными деталями или вообще свободны от них — см. нижние фрагменты рис. 11, в которых сопоставлены профили двух линий N II для моментов больших расхождений лучевых скоростей. Перепад скорости для ядер составляет по нашим данным 34 км с^{-1} , и часть его может быть вызвана деформациями профилей переменными эмиссионными деталями. Для крыльев перепад меньше, 23 км с^{-1} , и даже с учетом пониженной точности измерений может трактоваться как следствие пульсаций или/и скрытой двойственности звезды. Предположение о наличии пульсационной нестабильности согласуется с аналогичным объяснением быстрой переменности фотометрических параметров этой звезды [12].

3.2. К проблеме двойственности и пульсаций *post-AGB* звезд

Многие из кандидатов в PPN демонстрируют переменность блеска и лучевой скорости с характерным временем процесса в несколько сотен дней, что может говорить об их двойственности. Для нескольких оптически ярких звезд на стадии PPN получены убедительные доказательства орбитального движения. Например, доказана двойственность, определены элементы орбиты и предложена модель системы для высокоширотных сверхгигантов 89 Her [18, 19], HR 4049, HD 44179 и HD 52961 [20]. Природа компаньона для *post-AGB* звезд, заподозренных в двойственности, пока неизвестна, поскольку нет прямых его проявлений в континууме или спектральных линиях — все известные двойные среди *post-AGB* относятся к типу SB1. Компаньоном может быть либо очень горячий объект, либо объект очень низкой светимости на главной последовательности, не исключен и белый карлик, как в случае *Va*-звезд.

Согласно теоретическим расчетам Гаучи [21], пульсации присущи *post-AGB* звездам в широком интервале температур $3.8 \leq \lg T_{\text{eff}} \leq 4.9$. Признаки атмосферных пульсаций ранее обнаружены для ряда звезд на стадии PPN. Примером может

быть хорошо изученная полуправильная переменная *CY CMi* (оптический компонент ИК-источника IRAS 07134+1005). Переменность лучевой скорости этой звезды была впервые заподозрена в работе [22] из сравнения опубликованных данных с результатами, полученными на 6-м телескопе. Несколько позже Лебре и др. [23], проанализировав Фурье-методом переменность профиля H α в спектре *CY CMi* и соответствующий массив лучевых скоростей, пришли к выводу о сложной динамике атмосферы этой звезды, обусловленной пульсациями. Бартье и др. [24], получив в течение почти восьми лет обширный массив качественных спектров *CY CMi*, сделали заключение о существовании переменности лучевой скорости с полуамплитудой 2.7 км с^{-1} и главным периодом $P = 36^{\text{d}}8 \pm 0.2$. Период фотометрической переменности имеет ту же величину, амплитуда очень мала, $0^{\text{m}}02$.

Авторы [25, 26], изучив кинематическую картину в атмосфере и оболочке *CY CMi* по спектральным деталям различной интенсивности, обнаружили ее переменность и также отметили, что переменность скоростей по предельно слабым абсорбциям может быть указанием на двойственность звезды, но может быть и проявлением малоамплитудных пульсаций в околофотосферных слоях. Для решения вопроса о двойственности *CY CMi* важно было бы проследить изменение V_r на промежутке времени в несколько лет, регулярно получая 1–2 спектра в месяц.

Пульсации в атмосферах *V448 Lac* и родственной *post-AGB* звезды *V354 Lac* (IRAS 22272+5435) изучены Хривнаком и др. [27] на основе долговременных наблюдений переменности блеска, цветов и лучевой скорости. Определив периоды, их отношения и амплитуды пульсаций для этих звезд, авторы [27] нашли, что пульсационные свойства *post-AGB* звезд не полностью согласуются с теоретическими расчетами для этой стадии эволюции [28] и отличаются от таковых у классических цефеид. Звезды *CY CMi*, *V354 Lac* и *V448 Lac* с обнаруженной пульсационной нестабильностью входят в группу F-сверхгигантов с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами s-процесса, синтезированными в ходе предшествующей эволюции. Основные сведения для этой группы родственных PPN приведены в статьях [11, 29]. В работе [30] получены указания на переменность скорости по абсорбционным деталям в спектре более горячей *post-AGB* звезды — A-сверхгиганта *BD +48° 1220 = IRAS 05040 +4820*.

3.3. Линии дублета натрия *Na I* и *DIBs*

Для пяти основных компонентов D-линий *Na I* (рис. 1) гелиоцентрические лучевые скорости,

усредненные по всему нашему материалу, составляют -72.5 , -65.3 , -52.2 , -27.7 и -10.2 км с $^{-1}$, что в пределах ошибок совпадает с данными нашей предыдущей публикации [7] и с результатами недавней работы [9]. Слабый компонент D-линий Na I, положение которого соответствует $V_r = -52.2$ км с $^{-1}$, формируется в звездной атмосфере, а два более длинноволновых компонента являются межзвездными, формирующимися в Местном рукаве Галактики. Возможно, что коротковолновый компонент ($V_r = -65.3$ км с $^{-1}$) также формируется в межзвездной среде, в рукаве Персея. Аргументом в пользу этого предположения служит наличие аналогичного межзвездного компонента $V_r \approx -63$ км с $^{-1}$ в спектрах В-звезд HD 4841, HD 4694 и Hiltner 62 [31] — членов ассоциации Cas OB7. Галактическая долгота этих звезд близка к долготе IRAS 01005. Это предположение приводит нас к выводу о большой удаленности объекта IRAS 01005. Расстояние до ассоциации Cas OB7 $d = 2.5$ кпк [32] можно рассматривать как нижнюю оценку расстояния до IRAS 01005.

Отметим, что сильный межзвездный компонент D-линий Na I с близким значением $V_r = -61.6$ км с $^{-1}$ обнаружен [33] и в спектре слабого G-сверхгиганта, отождествляемого с ИК-источником IRAS 23304+6347, лежащего вблизи плоскости Галактики и отстоящего от IRAS 01005 по галактической долготе примерно на 10° .

Относительно самого коротковолнового компонента D-линий Na I со скоростью $V_r = -72.5$ логично предположить, что областью его формирования является расширяющаяся околозвездная оболочка в системе источника IRAS 01005. В этом случае получаем типичную для PPN (см. [29, 34]) скорость расширения оболочки $V_{\text{exp}} \approx 22$ км с $^{-1}$.

В спектрах В-звезд HD 4841, HD 4694 и Hiltner 62 имеются DIBs со скоростями от -11 до -14 км с $^{-1}$ [31]. В спектрах IRAS 01005 мы также отождествили четыре межзвездные полосы DIBs: 5780, 5797, 6195 и 6613 Å. Лучевая скорость, соответствующая положению этих деталей, $V_r = -13.5$ км с $^{-1}$, согласуется со скоростью по трем полосам в работе [9] и с измерениями в работе [35] по полосам 5780 и 6613 Å. Измерения других DIBs в работе [35] искажены большими ошибками. Такое же замечание относится и к измерениям положений компонентов D-линий дублета Na I в этой работе [35].

3.4. Спектральный класс центральной звезды IRAS 01005

Используя только слабые и минимально деформированные абсорбции C II/III, N II/III, O II/III,

Si III/IV и др., а также прямое сравнение спектра IRAS 01005 со спектрами V1853 Cyg (B1 Iae), 9 Cep (B2.3 Ib) и других ранних сверхгигантов из атласа [36], получаем спектральный класс $B1.5 \pm 0.3$. Оценка класса светимости по линиям H I и He I — Ib. В работе [7] для IRAS 01005 получена близкая оценка спектрального класса $B1.7 \pm 0.5$. Необходимо отметить, что проведение спектральной классификации для звезды с пониженной металличностью и измененным в ходе эволюции химическим составом путем сравнения со спектрами звезд I-го типа населения может внести в результат систематические ошибки.

Родственными для IRAS 01005 объектами являются горячие post-AGB сверхгиганты V1853 Cyg [37], V886 Her [38], LS III 52°24 [39] и несколько звезд на южном небе [40, 41]. В статье [42] приведен список из пятнадцати горячих post-AGB звезд, рассмотрены особенности их ИК-спектров и определены параметры околозвездных пылевых оболочек. Среди изученных горячих post-AGB звезд следует выделить близкую по основным параметрам к IRAS 01005 высокоширотную Be-звезду V886 Her (IRAS 18062+2410). Анализ многочисленных наблюдений V886 Her указывает на ее быструю эволюцию к стадии PN [43–45].

4. ВЫВОДЫ

По двадцати трем спектрам высокого разрешения, полученным нами на 6-м телескопе с высоким спектральным разрешением, $R = 60\,000$, определены спектральный класс центральной звезды $B1.5 \pm 0.3$ и класс светимости Ib, отождествлены многочисленные спектральные детали, рассмотрена переменность их профилей и лучевой скорости.

По положению симметричных и стабильных профилей запрещенных эмиссий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II] определена системная скорость $V_{\text{sys}} = -50.5$ км с $^{-1}$. Присутствие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околозвездной оболочки и близость стадии планетарной туманности.

Различия лучевой скорости V_r по ядрам линий, около 34 км с $^{-1}$, частично вызваны деформациями профилей переменными эмиссиями. Перепад V_r по крыльям линий меньше, примерно 23 км с $^{-1}$, и может быть следствием пульсаций или/и скрытой двойственности звезды. Деформации профилей абсорбционно-эмиссионных линий могут быть связаны с изменениями их абсорбционных (фото-сферных) составляющих с вариациями геометрии и кинематики в основании ветра. Наш материал позволяет утверждать, что за двое суток изменения достигают уверенно измеряемой величины.

Линии $\text{H}\alpha$ имеют ветровые профили типа P Cyg III. Показано, что отклонения ветра от сферической симметрии невелики. Зафиксированы низкая скорость ветра (в интервале 27–74 км с⁻¹ для разных моментов наблюдений) и большая интенсивность длинноволновой эмиссии (превышение уровня континуума до семи раз), что характерно не для классических сверхгигантов, а для гипергигантов.

Для пяти основных компонентов D-линий Na I 1 гелиоцентрические лучевые скорости составляют: $V_r = -72.5, -65.3, -52.2, -27.7$ и -10.2 км с⁻¹, что в пределах ошибок совпадает с опубликованными данными. Слабый компонент, $V_r = -52.2$ км с⁻¹, формируется в звездной атмосфере, два более длинноволновых компонента являются межзвездными, формирующимися в Местном рукаве. Наличие компонента $V_r = -65.3$ км с⁻¹, по-видимому, возникающего в межзвездной среде рукава Персея, позволяет рассматривать $d = 2.5$ кпк как нижнюю оценку расстояния до IRAS 01005. Самый коротковолновый компонент, $V_r = -72.5$ км с⁻¹, может формироваться в околосредной оболочке, расширяющейся с типичной для PPN скоростью $V_{\text{exp}} \approx 22$ км с⁻¹.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 14-02-00291 а). 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 SAO/NASA ADS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. W. Lewis, *Astrophys. J.* **338**, 234 (1989).
2. L. Likkell, *Astrophys. J.* **344**, 350 (1989).
3. L. Likkell, T. Forveille, A. Omont, and M. Morris, *Astron. and Astrophys.* **246**, 153 (1991).
4. L.-A. Nyman, R. S. Booth, U. Carlström, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **93**, 121 (1992).
5. A. Omont, C. Loup, T. Forveille, et al., *Astron. and Astrophys.* **267**, 515 (1993).
6. J. Y. Hu, P. Te Lintel Hekkert, S. Slijkhuis, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **103**, 310 (1994).
7. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, A. S. Miroshnichenko, et al., *Astron. and Astrophys.* **392**, 143 (2002).
8. Y. Zhang and S. Kwok, *Astrophys. J.* **730**, 126 (2011).
9. S. Iglesias-Groth and M. Esposito, *Astrophys. J.* **776**, L2 (2013).
10. B. J. Hrivnak, T. R. Geballe, and S. Kwok, *Astrophys. J.* **662**, 1059 (2007).
11. B. J. Hrivnak, W. Lu, R. Maupin, and B. D. Spitzbart, *Astrophys. J.* **709**, 1042 (2010).
12. V. P. Arkhipova, M. A. Burlak, V. F. Esipov, et al., *Astronomy Letters* **39**, 619 (2013).
13. J. Y. Hu, in: *Proc. Torun Workshop on Post-AGB Objects as a Phase of Stellar Evolution*, Ed. by R. Szczerba and S. K. Górny (Kluwer Acad. Publ., 2001), p. 317.
14. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, in: *Proc. IAU General Assembly, Joint Discussion № 4*, Ed. by A. I. Gomez de Castro and M. A. Barstow (Editorial Complutense, Madrid, 2007), p. 179.
15. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, *J. Optical Technology*, **76**, 87 (2009).
16. G. A. Galazutdinov, Preprint № 92 (Special Astrophysical Observatory, Mizhnii Arkhyz, 1992).
17. N. Siódmiak, M. Meixner, T. Ueta, et al., *Astrophys. J.* **677**, 382 (2008).
18. A. A. Ferro, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **96**, 641 (1984).
19. L. B. F. M. Waters, C. Waelkens, M. Mayor, and N.R. Trams, *Astron. and Astrophys.* **269**, 242 (1993).
20. H. van Winckel, C. Waelkens, and L. B. F. M. Waters, *Astron. and Astrophys.* **293**, L25 (1995).
21. A. Gautschy, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **265**, 340 (1993).
22. V. G. Klochkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **272**, 710 (1995).
23. A. Lèbre, N. Mauron, D. Gillet, and D. Barthès, *Astron. and Astrophys.* **310**, 923 (1996).
24. D. Barthès, A. Lèbre, D. Gillet, and N. Mauron, *Astron. and Astrophys.* **359**, 168 (2000).
25. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavganskaya, and M. V. Shapovalov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 105 (2007).
26. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **51**, 994 (2007).
27. B. J. Hrivnak, W. Lu, J. Sperauskas, et al., *Astrophys. J.* **766**, 116 (2013).
28. A. B. Fokin, A. Lèbre, H. Le Coroller, and D. Gillet, *Astron. and Astrophys.* **378**, 546 (2001).
29. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 279 (2014).
30. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavganskaya, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **51**, 642 (2007).
31. A. S. Miroshnichenko, E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, et al., *Astrophys. J.* **700**, 209 (2009).
32. F. Cazzolato and S. Pineault, *Astron. J.* **125**, 2050 (2003).
33. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astronomy Letters* **41** (in press).
34. C. Loup, T. Forveille, A. Omont, and J. F. Paul, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **99**, 291 (1993).
35. R. Luna, N. L. J. Cox, M. A. Satorre, et al. *Astron. and Astrophys.* **480**, 133 (2008).

36. E. L. Chentsov and A. N. Sarkisyan, *Astrophysical Bulletin* **62**, 257 (2007).
37. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, et al., *Astronomy Letters* **27**, 719 (2001).
38. V. P. Arkhipova, V. G. Klochkova, and G. V. Sokol, *Astronomy Letters* **27**, 99 (2001).
39. G. Sarkar, D. A. Garcia-Hernández, M. Parthasarathy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421**, 679 (2012).
40. G. Sarkar, M. Parthasarathy, and B. E. Reddy, *Astron. and Astrophys.* **431**, 1007 (2005).
41. D. R. C. Mello, S. Daflon, C. B. Pereira, and I. Hubeny, *Astron. and Astrophys.* **543**, A11 (2012).
42. G. Gauba and M. Parthasarathy, *Astron. and Astrophys.* **417**, 201 (2004).
43. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, et al., *Astronomy Letters* **25**, 25 (1999).
44. M. Parthasarathy, P. Garcia-Lario, Y. Sivarani, et al., *Astron. and Astrophys.* **357**, 241 (2000).
45. V. P. Arkhipova, V. F. Esipov, N. P. Ikonnikova, et al., *Astronomy Letters* **33**, 604 (2007).

Spectral Variability of the IR Source IRAS 01005+7910 Optical Component

V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, E. G. Sendzikas, and M. V. Yushkin

High-resolution optical spectra of the IR source IRAS 01005+7910 are used to determine the spectral type of its central star, $B1.5 \pm 0.3$, identify the spectral features, and analyze their profile and radial-velocity variations. The systemic velocity $V_{\text{sys}} = -50.5 \text{ km s}^{-1}$ is determined from the positions of the symmetric and stable profiles of the forbidden [N I], [N II], [O I], [S II], and [Fe II] emission lines. The presence of the [N II] and [S II] forbidden emissions indicates the onset of the ionization of the circumstellar envelope and the fact that the star is very close to undergoing the planetary nebula stage. The broad range of radial velocity V_r estimates based on the line cores, which amounts to about 34 km s^{-1} , is partly due to the deformations of the profiles caused by variable emissions. The variations of the V_r in the line wings are smaller, about 23 km s^{-1} , and may be due to pulsations and/or hidden binarity of the star. The deformations of the profiles of absorption-emission lines may result from variations of their absorption components caused by the variations of the geometry and kinematics in the wind base. The $H\alpha$ lines exhibit P Cyg III type wind profiles. Deviations of the wind from spherical symmetry are shown to be small. The relatively low wind velocity ($27\text{--}74 \text{ km s}^{-1}$ from different observations) and the strong intensity of the red emission (it exceeds the continuum level by up to a factor of seven) are typical for hypergiants rather than the classical supergiants. IRAS 01005 is an example of spectral mimicry of a low-mass post-AGB star masquerading as a massive hypergiant.

Keywords: *stars: AGB and post-AGB—stars: winds, outflows—stars: individual: IRAS 01005+7910*