

УДК 524.31.01-423.4

ПРОЯВЛЕНИЯ ОКОЛОЗВЕЗДНОЙ ОБОЛОЧКИ В ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ ПРОЭВОЛЮЦИОНИРОВАВШИХ ЗВЁЗД

© 2014 В. Г. Клочкова*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 26 февраля 2014 года; принята в печать 7 апреля 2014 года

Рассмотрены основные особенности оптических спектров звезд высокой светимости с газопылевыми околозвездными оболочками: переменность во времени абсорбционно-эмиссионных профилей линии $\text{H}\alpha$, наличие стационарных эмиссионных и абсорбционных полос молекул, многокомпонентные абсорбционно-эмиссионные профили D-линий дублета Na I . Показано, что пекулярности профилей линий (наличие эмиссионного компонента в линиях дублета D Na I , характер молекулярных деталей, асимметрия и расщепление профилей сильных абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня) могут быть связаны с кинематическими и химическими свойствами оболочки и с типом ее морфологии.

Ключевые слова: *звёзды: AGB и post-AGB — околозвёздная материя — линии: профили — звёзды: потеря массы — звёзды: ветер, истечение вещества*

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье рассмотрены особенности оптических спектров, формирующиеся в протяженных газопылевых оболочках далеко проэволюционировавших звезд. Основу исследуемой выборки составляют протопланетарные туманности (PPN) — объекты в стадии эволюции после асимптотической ветви (post-AGB), а также некоторые родственные звезды с большими избытками ИК-излучения. На диаграмме Герцшпрунга—Рассела звезды на кратковременной стадии PPN переходят с асимптотической ветви гигантов к стадии планетарной туманности (PN) с почти постоянной светимостью, становясь все более горячими. Эти потомки AGB-звезд представляют собой маломассивное ядро с типичной массой около $0.6 M_{\odot}$, окруженное протяженной и зачастую структурированной газопылевой оболочкой, которая образовалась за счет потери значительной доли массы звезды на предыдущих этапах эволюции. Интерес наблюдателей и теоретиков к AGB и post-AGB звездам обусловлен тем, что на этих стадиях эволюции происходят процессы синтеза и последующего выноса (третье перемешивание) углерода и тяжелых металлов, синтезированных за счет s-процесса [1, 2], на поверхность звезды. Таким образом, AGB-звезды являются основными поставщиками в межзвездную среду тяжелых металлов, а также значительной доли углерода и азота [3], участвуя таким образом в химической эволюции галактик.

Другой причиной, стимулирующей изучение AGB и post-AGB звезд, является возможность изучения проявлений звездного ветра. Потеря вещества проэволюционировавшими звездами — доминирующий фактор в процессе звездной эволюции на ее завершающих стадиях. Особенности потери вещества (темп потери вещества, смена эпизодов ветра, взаимодействие ветров, а также детали химического состава истекающих верхних слоев) определяют химический состав и структуру околозвездных оболочек, формирующихся у протопланетарных и планетарных туманностей. Таким образом, история звездного ветра остается записанной в форме, деталях структуры и особенностях химического состава околозвездной оболочки.

Однако в настоящее время детали процесса потери вещества на промежутке AGB—PN остаются неясными. Это относится прежде всего к физическим процессам, формирующим сложную структуру оболочек у PPN. Изображения, полученные с телескопом Хаббла [4, 5] и в бортовых экспериментах в ИК-диапазоне [6], редко имеют сферическую форму. Как правило, центральные звезды окружены оболочками в виде протяженных гало, дуг, лепестков, торов. Встречаются и различные сочетания перечисленных деталей, а также биполярные и квадрупольные туманности с пылевыми перемычками. Примерами двух последних типов являются туманности Egg = RAFGL 2688 и IRAS 19475+3119, изображения которых с высоким пространственным разрешением получены с телескопом Хаббла [7]. Асимметричны все PPN и

*E-mail: valenta@sao.ru

Таблица 1. Список сверхгигантов различного типа, изученных по спектрам БТА. Тип объектов и их спектральный класс заимствованы из базы данных SIMBAD. В последней колонке указаны ссылки на статьи, в которых приведены основные результаты, полученные для объектов, включая значения эффективной температуры

Звезда	IRAS	Тип объекта	Sp	T_{eff} , К	Ссылки
EM VES 695	00470+6429	emission	B2–3		[15]
GSC 04501–00166	01005+7910	PPN	B2 Iab:e	21500	[16]
XX Cam		R CrB ¹	G Iab:e	7250	[17]
GSC 02381–01014	04296+3429	PPN	G0 Ia	6300	[18]
BD +48° 1220	05040+4820	PPN	A4 Ia	7900	[19, 20]
BD –6° 1178	05238–0626	var?	F5 III + F3 IV		[21]
HD 56126	07134+1005	puls SR ²	F5 Iab	6600	[22, 23]
St H α 62	07171+1823	emission	B0.5 I	21000	[24]
AI CMi	07331+0021	puls	G5 Iab	4500	[25]
V510 Pup	08005–2356	puls SR	F5 Iae	7300	[26]
HD 82040	09276+4454	binary	M6	3400	[27]
LN Hya	12538–2611	puls SR	F3 Ia		[28, 29]
Z UMi	15060+8315	var Mira ³		5250	[30]
R CrB	15645+2818	var, carb	G0 Iab:pe		[31]
UU Her		puls SR	F2 Ib	6200	[32, 33]
M12 K 413				4800	[34]
M12 K 307		W Vir ⁴		5600	[35]
V4334 Sgr		nova-like	F2–3 II	7250	[36]
V814 Her	17436+5003	puls SR	F3 Ib	7100	[37, 38]
89 Her	17534+2603	puls SR	F2 Ibe		[28]
V886 Her	18062+2410	Be	B1 IIIpe		[39]
V887 Her	18095+2704	puls SR	F3 Ib	6500	[23, 40]
GSC 00439–00590	18123+0511	PPN	G5	4500	[41]
R Sct	18448–0545	RV Tau-type	K0 Ibpv	4500	[42]
HD 179821	19114+0002	puls SR	G5 Ia	5000	[43]
IRC +10420	19244+1115	HG ⁵	F8 I–G0 I	9200	[44, 45]
HD 331319	19475+3119	PPN	F3 Ib	7200	[37]
V5112 Sgr	19500–1709	PPN	F2/F3 Iab	8000	[46, 47]
CGCS 6857	20000+3239	PPN	G8 Ia	5000	[48]
V1027 Cyg	20004+2955	puls	G7 Ia	5000	[49]
QY Sge	20056+1834	puls SR	G0e	6250	[50]
FG Sge	20097+2010	PPN	B4 Ieq–K2 Ib	5500	[51, 52]
V1853 Cyg	20462+3416	puls	B1 Iae	20000	[53]

Таблица 1. (Продолжение)

Звезда	IRAS	Тип объекта	Sp	T_{eff} , К	Ссылки
GSC 01655–00558	20508+2011			4800	[54]
V2324 Cyg	20572+4919	PPN	F0 III	7500	[55]
V1610 Cyg	RAFG L 2688	PPN	F5 Iae	6500	[56, 57]
V448 Lac	22223+4327	puls SR	F9 Ia	6500	[46, 58]
V354 Lac	22272+5435	puls var	G5 Ia	5600	[59–61]
CGCS 6918	23304+6147	PPN	G2 Ia	5900	[62]
ρ Cas	23518+5713	HG ⁵	G2 Ia0e	5900	[63]

¹ Звезда типа R CgB, ² полуправильная переменная, ³ мирида, ⁴ виргинида в составе шарового скопления, ⁵ желтый гипергигант.

около 80% планетарных туманностей [8]. Много неясностей остается и в отношении процессов конденсации пылевых частиц и формирования пылевой фракции оболочек AGB-звезд (см. [9] и ссылки в ней).

Присутствие околозвездной газопылевой оболочки проявляется в особенностях ИК-, радио- и оптических спектров post-AGB сверхгигантов. От спектров классических массивных сверхгигантов оптические спектры PPN отличаются присутствием молекулярных полос, налагающихся на спектр F–G сверхгиганта, и аномальным поведением профилей избранных спектральных деталей. Это могут быть сложные эмиссионно-абсорбционные профили линий H I, Na I, He I, профили сильных абсорбций, искаженные эмиссиями или расщеплением, а также же эмиссии металлов. Причем все эти пекулярности переменны.

В данной статье мы рассмотрим проявления околозвездных оболочек в оптических спектрах PPN, уделяя особое внимание тем звездам, атмосферы которых, согласно предыдущим исследованиям, претерпели эволюционные изменения химического состава. В разделе 2 кратко описаны используемые наблюдательные данные, здесь же приведен список изучаемых звезд с указанием их основных параметров. Помимо PPN, для сравнения мы привлекаем несколько родственных звезд высокой светимости с близкими свойствами, включая объекты с неясным эволюционным статусом. В разделе 3 анализируются имеющиеся сведения об особенностях профилей линий H α , дублета Na I и линий металлов, обнаруженные по спектрам высокого разрешения, о наличии молекулярных полос, а также данные о скоростях истечения вещества для объектов с различной структурой оболочек. Раздел 4 посвящен обсуждению полученных результатов, в разделе 5 приведены основные выводы.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В последнее десятилетие на 6-м телескопе выполняется спектральный мониторинг сверхгигантов с ИК-избытками на эволюционных стадиях AGB и post-AGB, а также нескольких звезд высокой светимости с неясным эволюционным статусом (автор — В. Г. Клочкова). В результате получена коллекция высококачественных спектров, предназначенных в первую очередь для поиска аномалий химического состава звезд, обусловленных ядерным синтезом химических элементов в недрах звезд малых и средних масс (менее 8–9 M_{\odot}) и последующим выносом продуктов синтеза в поверхностные слои звездных атмосфер. Этот наблюдательный материал используется и для поиска пекулярностей спектров PPN, для анализа поля скоростей в атмосферах и оболочках этих звезд с истечением массы, а также для поиска вероятной долговременной переменности спектров и поля скоростей.

В данной работе мы используем эти данные, полученные в фокусе Несмита с эшелле-спектрографами НЭС [10, 11] и Рысь [12]. В сочетании с ПЗС-матрицей 2048×2048 элементов и в комбинации с резателем изображений [13] спектрограф НЭС обеспечивает спектральное разрешение $R \approx 60\,000$. С 2011 г. на спектрографе НЭС используется ПЗС-матрица 2048×4096 элементов, что позволило существенно расширить регистрируемый спектральный диапазон. Спектрограф Рысь, оснащенный матрицей ПЗС 1k×1k, обеспечивает $R \approx 25\,000$. Спектры самых слабых объектов программы (звезды K 307 и K 413 в шаровом скоплении M 12, V1027 Cyg, V4334 Sgr, оптические компоненты ИК-источников IRAS 04296+3429, 18123+0511, 23304+6147 и другие звезды с видимым блеском $V \geq 13^m$) были получены в первичном фокусе БТА

с эшелльным спектрографом PFES [14], который в сочетании с матрицей ПЗС $1k \times 1k$ обеспечивает $R \approx 15\,000$. Детали спектрофотометрических и позиционных измерений спектров описаны в ранее опубликованных статьях, соответствующие ссылки на них приведены в таблице 1. Отметим, что применение резателя изображений потребовало значительно модифицировать стандартный контекст ECHELLE системы MIDAS. Экстракция данных из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью пакета программ, описанного в работе Юшкина и Клочковой [64].

3. ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ POST-AGB ЗВЕЗД

Проведенное комплексное исследование звезд программы привело к определению (или к уточнению) их эволюционного статуса. Одним из результатов изучения выборки звезд высокой светимости с ИК-избытками является вывод о неоднородности этой выборки [65]. Как следует из таблицы 1, среди изученных находятся звезды высокой светимости различных типов, начиная от маломассивных переменных виргинид до гипергигантов. В данной статье рассмотрены особенности оптических спектров post-AGB звезд проведем, уделяя основное внимание подвыборке объектов, перечисленных в таблице 2. Здесь собраны объекты, в атмосферах центральных звезд которых выявлены избытки углерода и тяжелых металлов, а их околозвездные оболочки имеют сложную морфологию и, как правило, обогащены углеродом, что проявляется в присутствии в ИК-, радио- и оптических спектрах полос молекул C_2 , C_3 , CN, CO и т.п. Кроме того, объекты из таблицы 2 относятся к тем немногочисленным PPN, в ИК-спектрах которых наблюдается неотжествленная пока эмиссионная полоса на длине волны 21 мкм [76, 77]. Несмотря на активные поиски подходящих химических агентов, в настоящее время нет окончательного отождествления этой крайне редко наблюдаемой детали. Но ее присутствие в спектрах PPN с оболочками, обогащенными углеродом, подсказывает, что эта эмиссия может быть обусловлена присутствием в оболочке сложной молекулы на основе углерода (см. детали и ссылки в статьях [76, 78]).

Помимо подборки родственных объектов с перечисленными выше особенностями, в таблице 2 мы включили источники IRAS 08005–2356, 12538–2611 и 19475+3119. Пока недостаточно изучен объект IRAS 08005–2356, для него нет сведений ни об особенностях химического состава атмосферы, ни о наличии полосы 21 мкм. Однако, IRAS 08005–2356 можно рассматривать в качестве родственного объектам данной выборки, поскольку оптический спектр его центральной

звезды V510 Pup содержит полосы Свана молекулы C_2 , линии водорода и металлов в нем имеют эмиссионно-абсорбционные профили [26], а околозвездная оболочка наблюдается в эмиссии CO [73]. Источник IRAS 12538–2611 ассоциирован с высокоширотным сверхгигантом LN Hya, в оптическом спектре которого обнаружен ряд спектральных особенностей [29], которые заслуживают детального представления в данном контексте. Источник IRAS 19475+3119 также имеет ряд исключительных особенностей, одной из которых является большой избыток гелия в атмосфере центральной звезды [37].

Основными типами спектральных деталей в оптических спектрах PPN являются следующие: (1) абсорбции металлов низкой или умеренной интенсивности, симметричные профили которых не имеют видимых искажений; (2) сложные профили линий нейтрального водорода, меняющиеся со временем и включающие абсорбционные и эмиссионные компоненты; (3) самые сильные абсорбции металлов с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, их переменные профили зачастую искажены оболочечными деталями, вызывающими асимметрию профиля или же его расщепление на компоненты; (4) абсорбционные или эмиссионные полосы молекул, в основном углеродсодержащих; (5) оболочечные компоненты резонансных линий Na I, K I; (6) узкие разрешенные или запрещенные эмиссионные линии металлов, формирующиеся в оболочках. Присутствие деталей типов 2–6 является главным отличием спектров PPN от спектров массивных сверхгигантов.

Наша выборка детально изученных по спектрам высокого разрешения PPN из таблицы 2 практически совпадает со списком C-rich протопланетарных туманностей, фотометрические и спектральные свойства которых активно изучаются Хривнаком и др. [76, 79]. Для нас принципиально важен вывод Хривнака и др. [80] о низкой встречаемости двойных среди post-AGB звезд рассматриваемого типа, сделанный этими авторами в итоге длительного изучения поля скоростей в атмосферах PPN. Напротив, согласно исследованию [81], очень высока доля двойных систем среди переменных звезд типа RV Tau с избытками в ближнем ИК-диапазоне, также принадлежащих стадии post-AGB. Таким образом, результаты Хривнака и др. [76, 79, 80] являются дополнительным свидетельством однородности рассматриваемой здесь выборки PPN.

3.1. Линия $H\alpha$

В спектрах PPN линия $H\alpha$ имеет сложные (сочетание эмиссионных и абсорбционных компонентов), переменные во времени профили различных

Таблица 2. Основные сведения для избранных звезд на стадии post-AGB

Объект	21 мкм	[C/Fe] и [s/Fe]	Морфология оболочки [4, 5, 7, 8]	C ₂	V _{exp} , км с ⁻¹	
					СО	оптика
02229+6208	+	+	биполярная	абс. [66]	10.7 [67]	8–15 [66]
04296+3429	+	+	биполярная + гало + перемычка	эмис. [18] абс. [68]	10.8 [67]	3 [18]
05113+1347	+	+	не разрешена	абс. [68]	8–10 [69]	6.3 [70]
05341+0852	+	+	вытянутое гало	нет [68] абс. [71]		10.8 [71]
07134+1005	+	+	вытянутое гало	абс. [68, 72]	10.2 [67]	11 [72]
08005–2356	нет данных		биполярна	абс. [26] неопред. [68]	100: [73]	42 [26]
12538–2611	–	–	не разрешена	нет [29]		
19475+3119	–	–	квадруполь + гало	нет [37]	16.2, 20.1 [67]	
19500–1709	+	+	биполярная	нет [47]	17.2 и 29.5 [67]	20 и 30 [47]
20000+3239	+	+	вытянутое гало	абс. [48, 68]	12.0 [74]	11.1 [48]
RAFGL 2688	+	+	мультиполярная + гало + дуги	абс. [68] эмис. [56]	17.9, 19.7 [69]	22.8 [68] 60 [56]
22223+4327	+	+	гало+малые лепестки	абс. [68] эмис. [58]	14–15 [69]	14.0 [68] 15.2 [58]
22272+5435	+	+	вытянутое гало + дуги	абс. [61, 68]	9.1–9.2 [67]	10.8 [60] 11.6 [68]
23304+6147	+	+	квадруполь + гало + дуги	абс. [68] эмис. [62]	9.2–10.3 [67]	15.5 [68] ≈ 20 [62]

Наличие (или отсутствие) избытков углерода [C/Fe] и тяжелых металлов [s/Fe] в атмосфере центральной звезды отмечено знаком «+» в третьем столбце в соответствии с результатами Рэдди и др. [66, 70, 71] для IRAS 02229+6208, 05113+1347 и 05341+0852 соответственно; Клочковой и др. [18, 23, 26, 37, 62] для IRAS 04296+3429, 07134+1005, 08005–2356, 19475+3119, 23304+6147 соответственно; Клочковой [47] для V5112 Sgr; Киппера и Клочковой [48] для IRAS 20000+3239; Клочковой и др. [57] и Ишигаки и др. [75] для RAFGL 2688; Децин и др. [58] для V448 Lac; Клочковой и др. [60] для V354 Lac. В последнем столбце приведена скорость расширения оболочки, определенная по положению полос Свана молекулы C₂. Для IRAS 19500–1709 скорость расширения определена по оболочечным компонентам линий Ba II.

типов: с асимметричным ядром, типа P Cyg или инверсного P Cyg, с двумя эмиссионными компонентами в крыльях. Нередко наблюдается и сочетание подобных деталей. Присутствие эмиссии в линии H α указывает на высокий темп потери вещества [82] и является одним из критериев в задачах поиска и отождествления PPN (см., например, обзор [77]). Хорошим пособием, иллюстрирующим указанные основные особенности оптических спектров PPN, может служить атлас спектров звезды HD 56126 [72], которую по совокупности наблюдаемых свойств (типичное двугорбое распределе-

ние энергии в спектре, спектр F-сверхгиганта с переменным абсорбционно-эмиссионным профилем линии H α , наличие молекулярных полос Свана молекулы C₂ в оптическом спектре, формирующихся в истекающей протяженной оболочке, большие избытки углерода и тяжелых металлов, синтезированных в ходе эволюции звезды за счет s-процесса и вынесенных за счет перемешивания в поверхностные слои атмосферы) можно рассматривать в качестве канонической звезды на стадии post-AGB. Удивительна степень переменности профиля H α в спектре этой звезды: как следует из рис. 2 в атласе [72], за десятилетие наблюдений

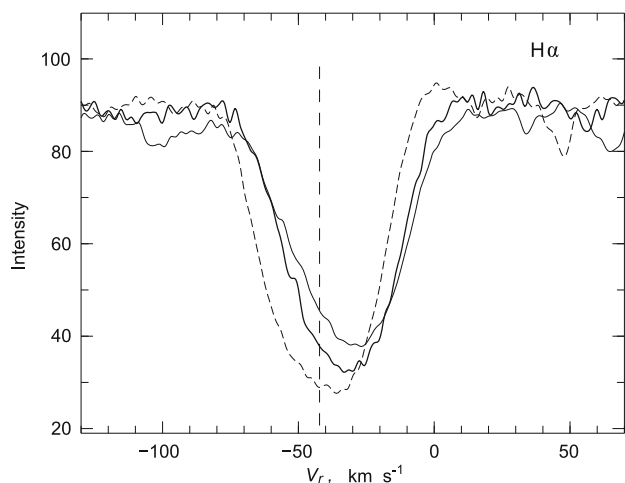


Рис. 1. Переменность ядра профиля $H\alpha$ в спектре V448 Lac [58]. Вертикальной штриховой линией указано значение системной скорости. На этом и на последующих рисунках с фрагментами спектров по оси ординат представлена относительная интенсивность I/I_{cont} . Интенсивность континуума принята за 100.

на БТА зафиксированы все вышеперечисленные типы профиля: асимметричное ядро, прямой или инверсный P Cug, с двумя эмиссиями в крыльях.

В спектре V448 Lac сложный профиль линии $H\alpha$ состоит из узкого ядра и широких крыльев [58]. Согласно классификации из работы [83], этот профиль можно отнести к типу «EFA» — «абсорбция, заполненная эмиссией». Такого же типа профиль $H\alpha$ наблюдается в спектрах PPN независимо от того, обогащена или нет атмосфера центральной звезды углеродом и тяжелыми металлами. К примеру, EFA-профили $H\alpha$ зарегистрированы у звезд с обогащенными атмосферами, ассоциированных с источниками: IRAS 04296+3429 [18], 05341+0852 [71], 07134+1005 [72], 19500–1709, 22223+4327 [58], 23304+6147. Этот же тип профиля зарегистрирован в спектрах объектов с небогащенными атмосферами звезд: IRAS 05040+4820 [20], 18095+2704 [23], 19475+3119 [37]. Аналогичный вывод можно сделать и том, что EFA-профиль $H\alpha$ наблюдается в спектрах объектов с различной морфологией оболочки.

На рис. 1 мы приводим ядро линии $H\alpha$ в координатах «интенсивность–лучевая скорость (V_r)» в спектрах V448 Lac, полученных в 2005 и 2008 гг. Рисунок иллюстрирует переменность ядра $H\alpha$, а проведенные измерения лучевой скорости [58] указывают на то, что ядро $H\alpha$ систематически сдвинуто в коротковолновую область относительно линий металлов. Авторы [58] сделали вывод о том, что наблюдаемый профиль этой линии в спектре

V448 Lac не согласуется с теоретическим, рассчитанным в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) и при условии нормального (солнечного) содержания водорода. Это расхождение дает основание говорить о вкладе оболочки в формирование профиля и (или) отклонении условий формирования профиля $H\alpha$ от приближения ЛТР. Имеющаяся совокупность наблюдаемых характеристик (значения эффективной температуры T_{eff} , класса светимости, переменный блеск, нестабильность V_r по атмосферным линиям, особенности спектра в оптическом и ИК-диапазонах, включая переменный пекулярный профиль $H\alpha$, асимметрию сильнейших абсорбций и совокупность молекулярных полос, подобие картины распространенности химических элементов в атмосфере и близкая морфология оболочки), позволяет нам говорить об аналогии звезд V448 Lac и HD 56126.

Типичным примером профиля с двумя эмиссионными компонентами может служить приведенный на рис. 2 профиль линии $H\alpha$ для трех моментов наблюдений высокоширотного post-AGB сверхгиганта V5112 Sgr [47]. В спектре этого объекта с неразрешенной [7] даже с помощью космического телескопа оболочкой наблюдается переменность как интенсивностей, так и положений абсорбционной и эмиссионных компонентов $H\alpha$.

Иной тип профиля и иную картину переменности наблюдаем в спектре слабой звезды вблизи AGB, являющейся оптическим компонентом источника IRAS 20508+2011. Мощные протяженные крылья профиля на рис. 3 типичны для столь холодного сверхгиганта ($T_{\text{eff}} = 4800$ К [54]) на стадии вблизи AGB. На эмиссию $H\alpha$ накладывается переменная абсорбция. Согласно классификации [83], профиль $H\alpha$ у этого объекта в самых ранних наших спектрах можно отнести к типу «PE» — «чистая эмиссия». В статье [83] профили типа PE зарегистрированы в спектрах двух объектов на AGB: IRAS 09452+1330 и 10131+3049. Большая протяженность эмиссионных крыльев свидетельствует о высокой скорости звездного ветра вблизи стадии AGB. За пять лет наших наблюдений IRAS 20508+2011 протяженность крыльев $H\alpha$ почти не изменилась, но преобладающей компонентой профиля постепенно становится нестационарная абсорбция. Как показали измерения лучевой скорости [54], абсорбция в $H\alpha$ систематически сдвинута в длинноволновую область относительно фотосферных линий примерно на 10 km s^{-1} (лишь в одну дату наблюдений положение абсорбции в $H\alpha$ соответствует положению линий металлов). Для всех моментов наблюдений интенсивность коротковолновой эмиссии превышает интенсивность длинноволновой.

Из сопоставления профилей $H\alpha$ на рис. 3 следует, что в течение 1999–2003 гг. профиль $H\alpha$ в

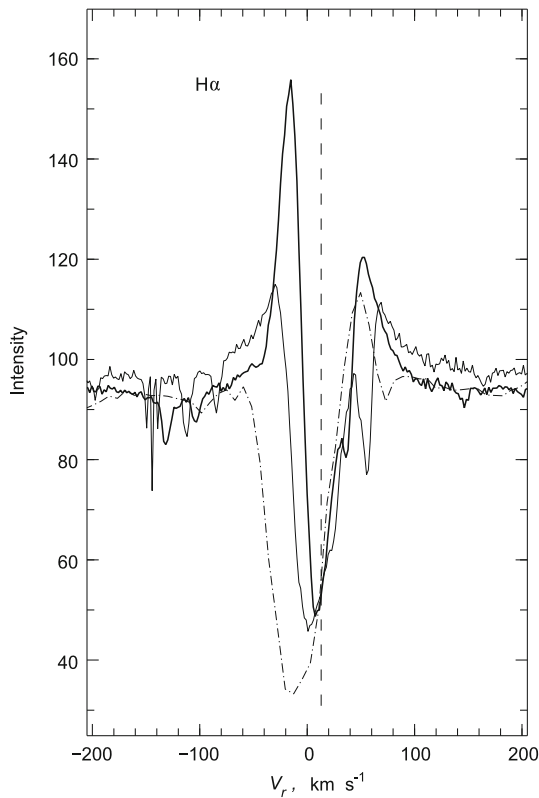


Рис. 2. Переменность абсорбционно-эмиссионного профиля линии $H\alpha$ в спектрах высокоширотного post-AGB сверхгиганта V5112 Sgr [47], полученных в разные даты: сплошная тонкая линия — 2.08.2012, сплошная жирная — 28.09.2010. Штрихпунктирной линией нанесен профиль в спектре с разрешением $R = 25\,000$, полученный 5.07.1996 со спектрографом Рысь [12]. Вертикальной штриховой линией указано значение системной скорости.

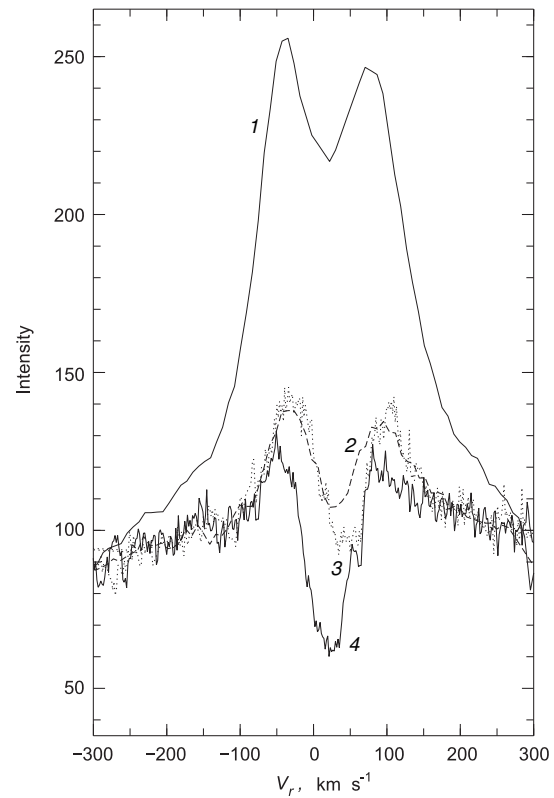


Рис. 3. Переменность абсорбционно-эмиссионного профиля линии $H\alpha$ в спектре оптического компонента ИК-источника IRAS 20508+2011: 1 — наблюдения 1999 г., 2 — 2000 г., 3 — 2003 г., 4 — 2004 г. [54].

спектре IRAS 20508+2011 изменился от состояния мощной колоколообразной эмиссии со слабой абсорбцией в ядре до двухпиковой эмиссии. Интенсивность эмиссии систематически снижалась, и в спектре 2003 г. (профиль 3 на рис. 3) центральная абсорбция оказалась ниже уровня континуума. При этом изменилась и ширина эмиссионных крыльев линии. Наблюдаемый профиль $H\alpha$ можно рассматривать как результат сложения двух линий различной природы: фотосферной абсорбции и мощной эмиссии с широким набором скоростей, формирующейся в протяженной околозвездной структуре. Крылья полученного таким образом эмиссионного профиля простираются до значений лучевой скорости ± 250 км с⁻¹.

Переменность эмиссии в $H\alpha$ хорошо известное явление для AGB- и post-AGB-звезд (см. [84, 85] и ссылки в этих статьях). Различия в типе профилей $H\alpha$ и их переменность обусловлены нестабильностью динамических процессов в протяжен-

ных атмосферах и оболочках этих звезд: это может быть сферически симметричное истечение с постоянной или меняющейся с высотой в атмосфере скоростью, падение вещества на фотосферу, пульсации. Двухкомпонентный эмиссионный профиль указывает на более сложную, несферическую структуру ветра, например — на околозвездный диск. Примером может служить профиль в спектре звезды BD 48°1220 = IRAS 05040+4820, представленный на рис. 4, для которой по наблюдениям на БТА впервые обнаружена спектральная переменность, а также определены детальный химический состав и эволюционный статус [20].

3.2. Молекулярные детали

Обратимся к молекулярной составляющей оптических спектров PPN. Протопланетарные туманности, центральная звезда которых является F–K сверхгигантом с обогащенной углеродом атмосферой, содержат в спектрах детали углеродосодержащих молекул C_2 , C_3 , CN, CH^+ . Список звезд с эмиссией на 21 мкм, в оптических спектрах которых обнаружены полосы молекул C_2 , C_3 и CN,

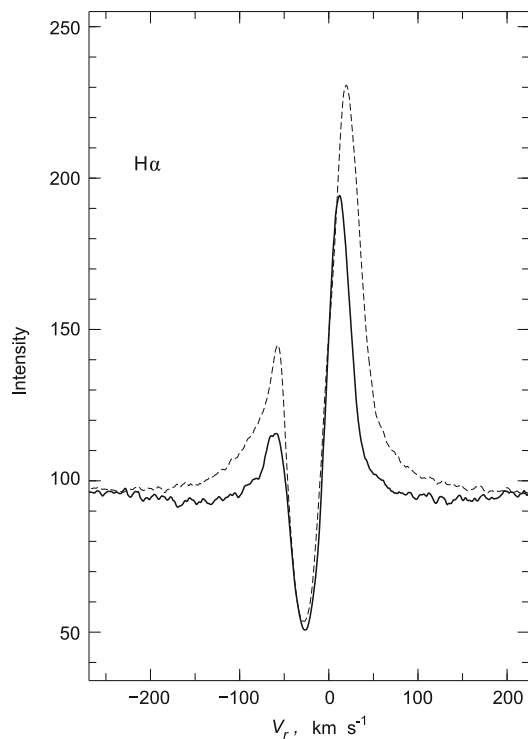


Рис. 4. Переменность абсорбционно-эмиссионного профиля линии $H\alpha$ в спектре BD+48°1220 — оптического компонента ИК-источника IRAS 05040+4820: сплошная линия — наблюдения 08.03.2004, штриховая — 10.01.2004 [20].

приведен Квоком и др. [86]. Позиционные измерения молекулярных деталей в спектрах указывают на то, что эти детали формируются в расширяющихся околозвездных оболочках. Большая выборка такого типа post-AGB звезд изучена Бэккером и др. (см. [68]) и ссылки в ней) по спектрам с высоким разрешением.

Изучив выборку PPN в достаточно широком диапазоне спектральных классов (температур), мы отождествили в спектрах некоторых из них полосы Свана молекулы C_2 (см. таблицу 2). В этой же таблице указаны скорости расширения, соответствующие положению полос. Наиболее детально изучен спектр яркой звезды HD 56126 [72]. В области длин волн от 4010 до 8790 Å детально отождествлены и измерены положения вращательных линий нескольких колебательных полос молекулы C_2 , выделены полосы поглощения CN и CH, измерены глубины и соответствующие лучевые скорости многочисленных абсорбций нейтральных атомов и ионов, а также межзвездные детали. Помимо уже известной переменности профиля линии $H\alpha$, обнаружена переменность профилей ряда линий Fe II, Ba II. В спектрах, полученных в разные годы, нет признаков эмиссии или переменности

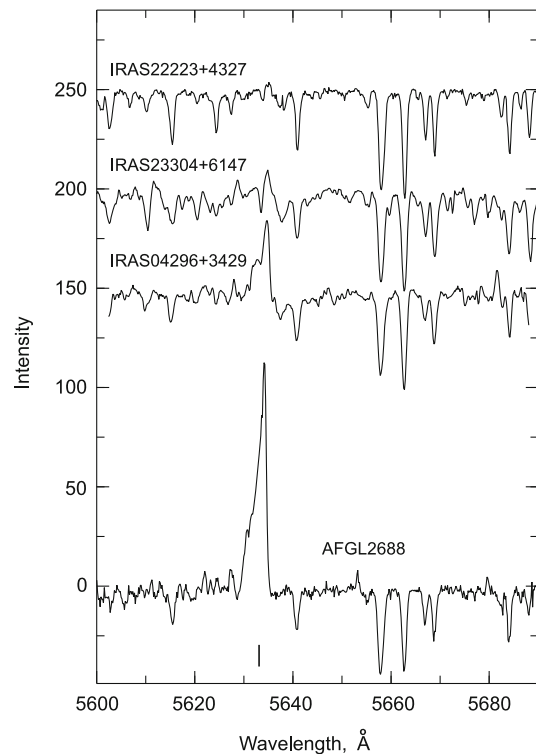


Рис. 5. Фрагмент спектров избранных PPN из таблицы 2, содержащий полосу (0;1) системы Свана молекулы C_2 .

ни в молекулярных полосах C_2 , ни в D-линиях Na I. Этот факт согласуется с достаточно простой эллиптической формой туманности вокруг HD 56126.

По-видимому, эмиссия в полосах Свана или в D-линиях Na I наблюдается в спектрах PPN с яркими околозвездными туманностями, обладающими выраженной асимметрией. Это предположение подтверждается результатами спектроскопии нескольких PPN. По спектрам, полученным на 6-м телескопе, эмиссионные полосы различной (относительно континуума) интенсивности, принадлежащие системе Свана молекулы C_2 , были обнаружены в спектрах центральных звезд источников IRAS 04296+3429 [18], IRAS 08005–2356 [26], RAFGL 2688 [56], IRAS 22223+4327 [58] и IRAS 23304+6147 [62]. Эти объекты по снимкам с HST [4, 7] имеют несимметричную (часто — биполярную) оболочку, что проявляется и в поляризации их оптического излучения.

На рис. 5 приведены фрагменты спектров ряда объектов, содержащие полосу (0;1) системы Свана молекулы C_2 . Как следует из рисунка, наиболее интенсивна полоса Свана в спектре объекта RAFGL 2688, который относится к группе систем, где центральная часть (звезда и внутренние области околозвездной оболочки) испытывает сильное поглощение в газопылевом торе (или диске), а

излучение этой центральной части рассеивается на пылевых частицах биполярной структуры. В наблюдениях RAFGL 2688 [56] на БТА щель спектрографа проецировалась на северный лепесток туманности, что в сочетании с сильным поглощением излучения центральной звезды и обеспечивает превалирование излучения оболочки.

Изучая спектр объекта IRAS 04296+3429, близкого по свойствам к RAFGL 2688, Клочкова и др. [18] показали, что соотношение интенсивностей различных полос системы Свана соответствует механизму резонансной флуоресценции.

3.3. Линии резонансного дублета Na I и диффузные полосы

Помимо переменных во времени эмиссионных компонентов линий нейтрального водорода и молекулярных полос, которые отличают спектры PPN от спектров нормальных сверхгигантов, в спектрах некоторых из этих звезд обнаружены спектральные детали, формирующиеся в околозвездной среде. Часто встречающейся деталью спектров PPN являются околозвездные абсорбционные компоненты резонансных линий Na I и K I, наличие которых естественно для объектов с околозвездным поглощением. Измерения положения околозвездных компонентов широко используется для определения скорости расширения оболочки. Это относится, в частности, к звездам HD 161796, HD 101584 и V354 Lac, в спектрах которых околозвездные компоненты D-линий Na I были выделены в работах [70, 87–89]. Более детально профиль D-линий Na I и другие особенности спектра звезды V354 Lac были изучены по спектрам БТА [60, 61]. Околозвездные абсорбции D-линий Na I отождествлены и в хорошо изученном [22, 68, 72] спектре HD 56126. Гораздо реже околозвездная оболочка проявляется в виде эмиссионных компонентов D-линий Na I. В качестве примеров упомянем спектры звезды V510 Pup, отождествляемой с ИК-источником IRAS 08005–2356 [26], биполярной туманности RAFGL 2688 [57], полуправильных переменных QYSge = IRAS 20056+1834 [50, 90] и 89 Her [91].

Рассмотрим несколько подробнее спектр желтого сверхгиганта QY Sge — представителя группы объектов, у которых излучение центральной звезды перекрывается мощной оболочкой. Рао и др. [90], выделив основные спектральные компоненты (абсорбционный спектр G-сверхгиганта в сочетании с узкими эмиссиями низкого возбуждения и мощной широкой эмиссией в D-линиях Na I), предложили для QY Sge модель с околозвездным тором и биполярным истечением вещества. Согласно их модели, центральная звезда полностью экранирована от наблюдателя, вследствие чего мы

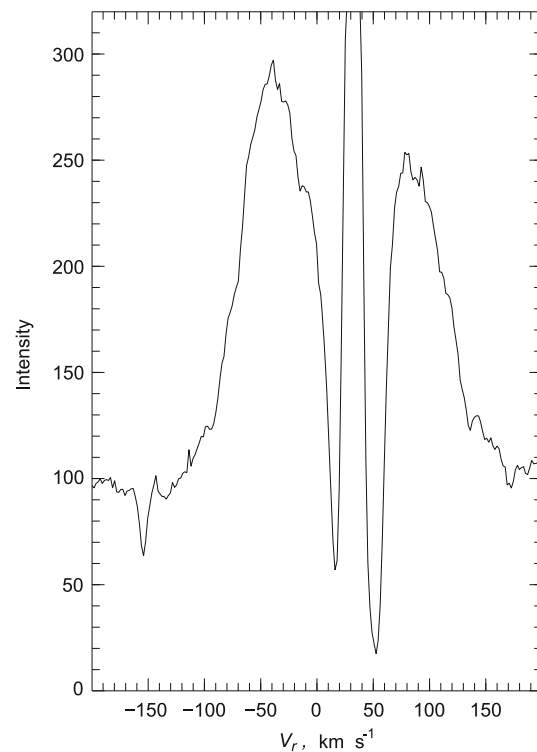


Рис. 6. Профиль линии D₂ Na I в спектре QY Sge.

видим излучение, отраженное от внутренней стенки тора. В результате многократных спектральных наблюдений QY Sge на 6-м телескопе [50] детально изучена картина кинематики в атмосфере и оболочке этой звезды. Как следует из рис. 6, сложный эмиссионно-абсорбционный профиль линии D₂ Na I в спектре QY Sge включает очень широкий (простирается от -170 до $+120$ км с⁻¹) эмиссионный компонент. Широкая эмиссия в центральной части прорезана абсорбцией, которая разделена надвое перекрывающим ее узким (16 км с⁻¹ на $r = 2.5$) эмиссионным пиком. Положение эмиссионных деталей Na I D неизменно, что указывает на их формирование в областях, внешних по отношению к фотосфере сверхгиганта. Картина изменения профилей эмиссионных и абсорбционных линий и лучевых скоростей, измеренных по различным деталям профилей, согласуется с моделью тороидальной пылевой оболочки, закрывающей центральный источник, и биполярных конусов, заполненных высокоскоростным газом. Как в эмиссионных, так и в абсорбционных деталях спектра выявлены детали, свидетельствующие о пространственных и временных неоднородностях в пылевом и газовом компонентах объекта.

На ограниченной выборке объектов трудно найти возможную взаимосвязь между типом околозвездной туманности и наличием эмиссионной ком-

поненты D NaI. Можно предположить, что эмиссия D NaI наблюдается при сложной (биполярной) структуре протяженной оболочки, поскольку три источника IRAS 08005–2356, RAFGL 2688 и IRAS 20056+1834 с биполярными туманностями содержат в спектрах эмиссию D NaI. Однако, вопреки этому предположению, эта эмиссия содержится и в спектре звезды 89 Her, у которой пылевая околозвездная оболочка не наблюдается [7].

Уже несколько десятилетий, начиная с открытия в 30-е годы XX века, в спектроскопии межзвездной среды активно изучаются так называемые диффузные межзвездные полосы (DIBs). Несмотря на многочисленные наблюдения и лабораторные эксперименты, происхождение и химическое отождествление этих деталей остается загадкой (см., к примеру, обзор [92]).

Существующая корреляция между интенсивностью полос и индексом межзвездного покраснения (см. статью [93] и ссылки в ней), указывает на роль пылевых частиц в процессе формирования DIBs. Близость физических и химических условий в межзвездной среде и околозвездных газопылевых оболочках привела к поиску в спектрах PPN околозвездных деталей — аналогов DIBs. Еще в 1993 г. авторы [94] в спектрах с низким разрешением для нескольких звезд, теряющих массу, отождествили подобные детали, образовавшиеся в околозвездных оболочках. Зач и др. [95] по спектрам более высокого разрешения, полученным нами на БТА, заподозрили вероятное присутствие околозвездных компонентов DIBs в спектрах HD 179821 и V354 Lac. В спектрах HD 331319 и оптического компонента IRAS 23304+6147, полученных со спектрографом PFES [14] с умеренным спектральным разрешением, также были обнаружены сильные абсорбции, положения которых позволили предполагать их околозвездное происхождение [37, 62]. Но недостаточность спектрального разрешения не позволила сделать более определенные выводы. Позже, в спектре V354 Lac по наблюдениям, выполненным на БТА + НЭС с высоким спектральным разрешением $R \geq 60\,000$, были найдены несколько деталей, которые можно было бы отождествить с околозвездными полосами [60]. Средняя величина лучевой скорости по этим деталям согласуется, с учетом ошибок, со скоростью по околозвездному компоненту профиля D-линий NaI. Подобное совпадение может служить подтверждением реальности околозвездных аналогов DIBs.

Луна и др. [96], предприняв систематический поиск DIBs в спектрах высокого разрешения для выборки post-AGB звезд, пришли к выводу о том, что диффузные полосы, содержащиеся в спектрах post-AGB звезд, возникают в межзвездной среде, а физические условия в околозвездных оболочках

этих звезд не способствуют их формированию. Однако недавно Клочкова [47] показала, что в оптическом спектре высокоширотного post-AGB сверхгиганта V5112 Sgr присутствуют слабые абсорбции, положение которых указывает на их формирование в околозвездной оболочке. В диапазоне длин волн 5780–6613 Å были измерены величины $V_r(\text{DB})$ по положениям уверенно выделяемых деталей 5780, 5797, 6196, 6234, 6379 Å. Среднее по нескольким спектрам значение $V_r(\text{DB})$, определенное с точностью лучше $\pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$, отлично согласуется со скоростью по коротковолновой компоненте D-линий NaI. Полученное совпадение позволяет утверждать, что обнаруженные в спектре V5112 Sgr слабые полосы возникают в околозвездной оболочке. К аналогичным выводам для этого же объекта независимо пришел и Киппер [97], использовавший спектры V5112 Sgr, полученные с другой аппаратурой.

Таким образом, в задаче поиска околозвездных диффузных полос начался новый этап.

3.4. Оболочечные эмиссии низкого возбуждения

В спектрах избранных PPN зарегистрированы узкие эмиссии, отождествляемые с линиями металлов низкого возбуждения. Например, в оптическом спектре сверхгиганта HD 101584, детально изученном авторами [87], наряду с симметричными абсорбциями высокого возбуждения и сложными деталями с профилями типа P Cug, выявлены чистые эмиссии металлов, положение которых в спектре соответствует системной скорости и указывает на их возникновение в оболочке звезды. Множество оболочечных эмиссий наблюдается и в спектре звезды 89 Her [91].

В спектре LN Hyа, полученном 01.06.2010, обнаружена неизвестная ранее для этой звезды особенность: слабые эмиссии нейтральных атомов (VI, MnI, CoI, NiI, FeI) интенсивностью в несколько процентов от уровня континуума [29]. В более ранних спектрах, полученных на БТА до июня 2010 г., эти эмиссионные детали отсутствовали. Вместо них наблюдались достаточно сильные абсорбции тех же атомных переходов. Для примера на рис. 7 приведен фрагмент спектра LN Hyа, содержащий одну из таких эмиссий — TiI 5866.40 Å, появившуюся 01.06.2010, в момент возбужденного состояния атмосферы звезды. Из рисунка следует, что в спектре содержится эмиссия TiI 5866.40 Å с интенсивностью около 6%, а в спокойной атмосфере (02.04.2010) наблюдается абсорбция, положение которой соответствует лучевой скорости по другим неискаженным абсорбциям в данном спектре. В последующих спектрах 2011 г.

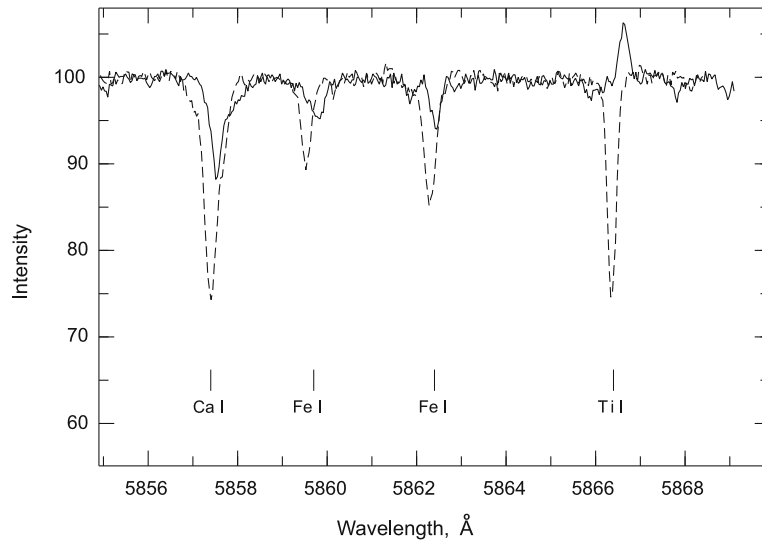


Рис. 7. Фрагмент с эмиссией Ti I 5866.40 Å в спектрах LN Hya, полученных в спокойном (02.04.2010, штриховая линия) и в возбужденном (01.06.2010, сплошная линия) состояниях атмосферы звезды. Указано отождествление основных спектральных деталей данного фрагмента.

интенсивность эмиссий снижается, а некоторые из них исчезают [29]. Атмосфера звезды возвратилась в свое обычное состояние, и ее спектр, включая профиль $H\alpha$, в 2011 г. практически не отличается от спектра 21.02.2003. Не имея возможности проводить параллельный мониторинг физических условий в звездной атмосфере и оболочке, авторы [29] только высказали предположение о том, что на протяжении около 60 суток, с апреля по июнь 2010 г., возникла, быстро усилилась и исчезла нестабильность верхних слоев атмосферы LN Hya. Постоянная во времени средняя скорость $V_{\text{sys}} = -21.6 \text{ км с}^{-1}$, измеренная по слабым симметричным эмиссиям нейтральных атомов (VI, Mn I, Co I, Ni I, Fe I), может быть принята в качестве системной для LN Hya. То же самое значение скорости получено и по эмиссионному компоненту D-линий Na I, положение которого также стационарно во времени.

Отметим, что упомянутые в данном разделе звезды (89 Her, LN Hya, HD 101584) образуют родственную группу по химическому составу: пониженная металличность и дефицит тяжелых металлов.

3.5. Пекулярные профили сильных абсорбций

Систематический мониторинг кандидатов в PPN и родственных объектов с оболочками, проводимый с высоким спектральным разрешением, привел к новому результату — обнаружены пекулярные профили сильнейших абсорбций в спектрах избранных объектов: HD 56126 [72],

V354 Lac [59], V448 Lac [58], V5112 Sgr [47]. Проиллюстрируем этот эффект на примере спектра сверхгиганта V5112 Sgr, в спектре которого он наиболее выражен.

В спектрах V5112 Sgr, полученных в широком интервале длин волн, мы выявили, помимо меняющегося профиля линии $H\alpha$, иные, неизвестные ранее особенности спектра. У самых сильных абсорбций наблюдаются аномальные профили: либо асимметричные с вытянутым коротковолновым крылом, либо расщепленные на отдельные компоненты. На рис. 8 для примера представлен фрагмент спектра V5112 Sgr за 7.07.2001, содержащий расщепленную линию Ba II 4934 Å. На этом рисунке хорошо видна различная ширина компонентов: у длинноволнового она примерно в два раза больше ширины коротковолновых, значительно смещенных относительно системной скорости. Это различие ширины указывает на то, что длинноволновая и смещенные в коротковолновую область компоненты формируются в разных физических условиях. В то же время профили сильных абсорбций металлов группы железа не подвергнуты ни асимметрии, ни расщеплению в спектре этой звезды, что хорошо иллюстрирует тот же рис. 8, где видим очень сильную, но нерасщепленную линию железа Fe II 4924 Å.

Сопоставление профилей линий в спектрах V5112 Sgr, полученных в разные ночи, позволило выявить значительную переменность формы профилей и положения компонент расщепленных линий. Для иллюстрации эффекта переменности

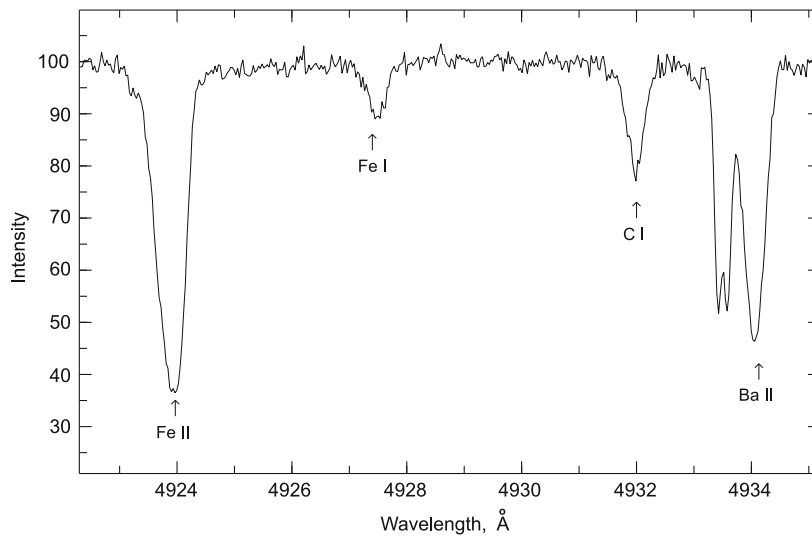


Рис. 8. Фрагмент спектра V5112 Sgr за 7.07.2001, содержащий расщепленную линию Ba II 4934 Å.

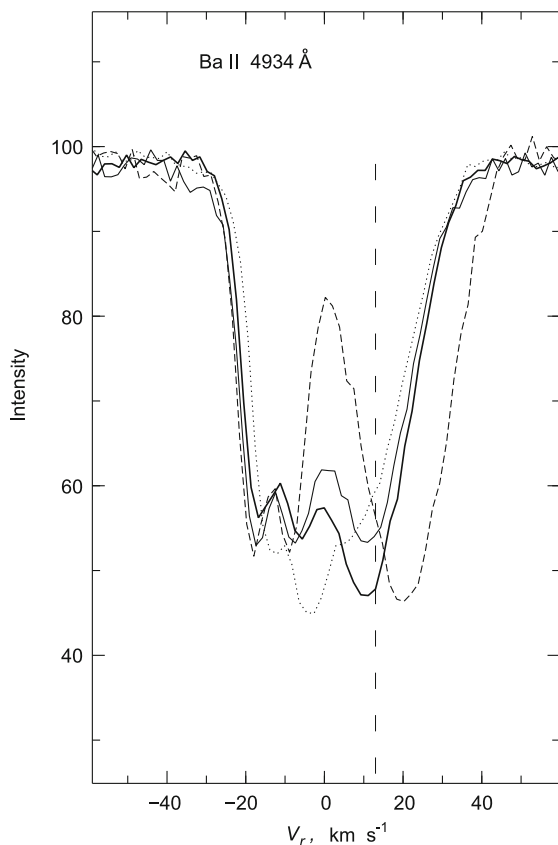


Рис. 9. Переменность профиля линии Ba II 4934 Å в спектрах V5112 Sgr, полученных в разные даты: тонкая сплошная линия — 2.08.2012, жирная сплошная — 13.06.2011, пунктирная — 14.08.2006, штриховая — 7.07.2001 [47].

на рис. 9 для нескольких моментов наблюдений представлены профили линии Ba II 4934 Å, у которой асимметрия профиля и его переменность наиболее выражены. Из этого рисунка следует вывод о переменности положения фотосферной (длинноволновой) составляющей сложного профиля и стабильности коротковолновых компонентов, которые, как показано в [47], формируются в оболочке.

Из приведенных в таблице 2 объектов ближайшим аналогом V5112 Sgr по строению оболочки и особенностям спектра является полуправильная переменная V354 Lac. Спектральный мониторинг этой звезды [60], проведенный на 6-м телескопе БТА с разрешением $R = 60\,000$, позволил обнаружить расщепление самых сильных абсорбций с потенциалом возбуждения нижнего уровня $\chi_{\text{low}} \leq 1$ эВ. Анализ кинематической картины показал, что коротковолновый компонент расщепленной линии формируется в мощной газопылевой оболочке V354 Lac. Это расщепление наиболее отчетливо видно на примере профиля сильной линии Ba II 6141 Å. Смещение коротковолновой компоненты Ba II совпадает со сдвигом околозвездной компоненты D-линий Na I, которая формируется в тех же слоях, где формируются и околозвездные полосы Свана молекулы C_2 . Это совпадение указывает на то, что сложный профиль линии Ba II 6141 Å помимо атмосферной содержит компоненту, формирующуюся в околозвездной оболочке. Подобное расщепление (или же асимметрия профиля из-за более пологого коротковолнового крыла) наблюдается и у других линий Ba II ($\lambda\lambda$ 4554, 5853 и 6496 Å), а также у сильных линий

У II 5402 Å, La II 6390 Å, Nd II 5234, 5293 Å. В спектре V354 Lac линии этих ионов усилены до такой степени, что их интенсивности сравнимы с интенсивностями линий нейтрального водорода. К примеру, эквивалентная ширина линии Ba II 6141 Å достигает $W_\lambda \approx 1 \text{ \AA}$, а у линии H β $W_\lambda \approx 2.5 \text{ \AA}$.

Различие типа пекулярности профилей у двух пар звезд — V5112 Sgr и V354 Lac с расщепленными профилями сильнейших абсорбций избранных элементов, а также HD 56126 и V448 Lac с асимметричными, но нерасщепленными профилями — позволяет предположить, что фактором, вызывающим пекулярность и переменность профилей сильных линий, может быть морфология околозвездной оболочки. Из данных таблицы 2 видим, что у пары звезд V5112 Sgr и V354 Lac с расщепленными абсорбциями оболочка биполярная, в то время как у HD 56126 и V448 Lac нет расщепления, и оболочки имеют менее выраженную структуру. Справедливость этого предположения подтверждается и тем, что в спектре звезды V5112 Sgr, для которой по наблюдениям CO обнаружено медленное ($V_{\text{exp}} = 10 \text{ км с}^{-1}$) и быстрое ($30\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$) расширение [98], мы видим трехкомпонентную структуру профилей сильных абсорбций. Профили расщепленных линий включают фотосферную и две оболочечных компоненты, одна из которых, по аналогии с CO-профилем, возникает в оболочке, сформировавшейся на стадии AGB и расширяющейся со скоростью $V_{\text{exp}}(2) \approx 20 \text{ км с}^{-1}$, другая — в оболочке, движущейся со скоростью $V_{\text{exp}}(1) \approx 30 \text{ км с}^{-1}$ и сформировавшейся позже. Аналогичные пекулярности профилей низковозбужденных абсорбций, переменность оптических спектров, а также эмиссия в полосах Свана были найдены еще для двух объектов из таблицы 2: IRAS 22223+4327 [58] и IRAS 23304+6147 [99].

Расщепление сильных абсорбций низкого возбуждения наблюдается в спектрах различных типов звезд высокой светимости. Известна сложная кинематическая картина в истекающей атмосфере желтого гипергиганта ρ Cas. Современные результаты спектрального мониторинга представлены в публикациях [63, 100]. Еще с середины XX-го века известно двоение абсорбций на избранных фазах кривой блеска в спектрах виргинид (см. результаты [101] для W Vir), классических цефеид [102], звезд типа RV Tau [103] и мирид. В работе Ковтюха и др. [104] прослежено изменение с фазой пульсационного цикла профилей линий с эмиссиями в спектре W Vir, предложена схема из двух ударных волн, локализованных в атмосфере и оболочке. Для объяснения этих изменений построена гидродинамическая модель протяженной атмосферы этой звезды. Двоение линий металлов было найдено с применением современных возможностей

спектроскопии и в спектрах короткопериодической пульсирующей звезды RR Lyr [105].

Сэнфорд [101] связал расщепление абсорбций и наличие сильной эмиссии в линиях водорода и гелия в спектрах пульсирующих звезд с прохождением ударной волны (механизм Шварцшильда [106]). Однако эффективность механизма Шварцшильда для случая PPN вызывает сомнения, поскольку атмосферные пульсации в их атмосферах имеют низкую амплитуду, $\Delta V_r \approx 1\text{--}3 \text{ км с}^{-1}$ [58, 60, 61, 72, 80]. Поэтому остается неясным, каким образом могут возникнуть ударные волны, для генерации которых необходима существенно более высокая амплитуда пульсаций $\Delta V_r \geq 5\text{--}10 \text{ км с}^{-1}$ [107].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ совокупности свойств изученных к настоящему времени сверхгигантов с ИК-избытками прежде всего приводит к выводу о неоднородности выборки этих объектов. Выявлено большое разнообразие особенностей оптического спектра центральных звезд, химического состава их атмосфер и оболочки, а также морфологии и кинематического состояния околозвездной оболочки. В частности, следует отметить наличие среди сверхгигантов с ИК-избытками звезд типа RV Tau. Эти переменные звезды с избытками ИК-излучения в ближнем ИК-диапазоне находятся на стадии post-AGB и, как правило, являются двойными системами [81]. Они имеют специфический химический состав из-за высокой эффективности процессов селективной сепарации [108].

Важным результатом исследований является выделение подвыборки PPN с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами, наработанными в ходе эволюции на AGB. Как следует из таблицы 2, все эти PPN отличаются еще и наличием эмиссии на длине волны 21 мкм, возникающей в околозвездной среде. Попытки найти взаимосвязь между морфологией оболочки и особенностями химического состава атмосферы центральной звезды пока не привели к обнаружению строгой корреляции. Однако можно говорить о том, что объекты с обогащенными атмосферами (объекты IRAS 02229+6208, 04296+3429, 19500–1709, 23304+6147) в основном имеют структурированные (биполярные) оболочки. Но обогащенную атмосферу имеет и объект IRAS 05113+1347, оболочка которого не была разрешена даже с помощью HST, а также объекты IRAS 05341+0852 и 07134+1005 с оболочкой в форме вытянутого гало. Следует обратить внимание и на объект IRAS 19475+3119, который имеет структурированную оболочку в

отсутствие обогащения атмосферы его центральной звезды HD 331319 углеродом и тяжелыми металлами. Однако, в спектре HD 331319 обнаружены и надежно измерены линии гелия. Их присутствие в спектре звезды с $T_{\text{eff}} = 7200$ К приводит к значительному избытку гелия в атмосфере [37], который может рассматриваться как проявление синтеза гелия в ходе предшествующей эволюции. Ранее избытки гелия были найдены для звезд HD 44179 = IRAS 06176–1036 [109] и V5112 Sgr [110].

Профиль линии H α в спектрах PPN, как правило, является сложным (сочетание абсорбционных и эмиссионных компонентов) и переменным во времени. Очевидно, что самые поверхностные слои атмосферы, подверженные влиянию звездного ветра, и истекающая околозвездная оболочка оказывают влияние на формирование профилей линий нейтрального водорода. В данной работе мы не проводим моделирование этих профилей — это задача отдельного исследования. Подчеркнем здесь только важность спектрального мониторинга для решения этой задачи. Показательным является резкое изменение типа профиля H α в спектре V5112 Sgr, которое произошло на рубеже нового столетия: в 1996 г. был зарегистрирован профиль типа обратного P Cug, а 2000-е годы профиль содержал уже две эмиссионные компоненты [47]. Отметим, что это зафиксированное на БТА изменение типа профиля H α происходило параллельно со значительным изменением фотометрических характеристик объекта, обнаруженным Хривнаком и др. [79] в ходе многолетнего мониторинга.

В оптических спектрах PPN с обогащенными атмосферами зачастую наблюдаются спектральные детали углеродосодержащих молекул. В частности, в доступном нам спектральном диапазоне находятся полосы Свана молекулы C₂. На основе сведений из таблицы 2, можно утверждать, что полосы Свана в спектрах PPN наблюдаются в достаточно широком интервале эффективной температуры центральной звезды, начиная со спектров поздних G-звезд ($T_{\text{eff}} \approx 5000$ К). В спектрах более горячих звезд с $T_{\text{eff}} \geq 7500$ К молекулярные детали отсутствуют из-за разрушения молекул излучением горячей звезды. Самая горячая звезда с полосами Свана в нашем списке — это объект IRAS 08005–2356 с температурой центральной звезды $T_{\text{eff}} = 7300$ К. Присутствие полос Свана при достаточно высокой температуре центральной звезды, по-видимому, можно объяснить наличием у объекта двух оболочек с холодной и горячей пылью. Бэккер и др. [68] определили температуру пыли в оболочках IRAS 08005–2356: $T_{\text{dust}} \leq 150$ К и $T_{\text{dust}} \geq 1200$ К. По данным Бэккера и др. [68] полосы Свана молекулы C₂ наблюдаются у объектов с холодной пылевой оболочкой ($T_{\text{dust}} \leq 300$ К).

Отметим еще одну особенность появления полос Свана в спектрах изученных объектов. Из таблицы 2 видим, что у одного и того же объекта наблюдаются различия в данных о присутствии и типе околозвездных полос Свана C₂. Сопоставляя сведения о наличии полос Свана из таблицы 3 в статье Бэккера и др. [68] и наши сведения из таблицы 2, приходим к выводу о различиях для общих объектов. К примеру, для RAFGL 2688, в спектре которого на БТА зарегистрирована сильная эмиссионная полоса 5635 Å (рис. 5), Бэккер и др. [68] отмечают наличие абсорбционной полосы 5635 Å. В недавнем исследовании [75] спектра RAFGL 2688 вновь отмечена очень сильная эмиссия в молекулярных полосах. У объекта IRAS 08005–2356 по спектрам БТА [26] зарегистрированы сильные абсорбционные полосы Свана, в то время как в работе [68] для этого объекта отмечена неопределенность. Для IRAS 22223+4327 с мощной структурированной оболочкой авторы [68] отмечают абсорбционные полосы Свана, а в более поздних наблюдениях на БТА у этого объекта зарегистрированы эмиссионные полосы [58].

Причиной обнаруженных различий могут быть как временные изменения физических условий в околозвездных оболочках PPN (из-за отклонения от симметрии и сферичности), так и различия в условиях наблюдений протяженных структур на различных телескопах: различная ориентация щели спектрографа и качество изображения могут изменять вклады потока от центральной звезды и оболочки. Отметим, к примеру, значительное различие интенсивности эмиссионного компонента D-линий Na I в работах [56] и [75]. Многократное различие потока обусловлено не только двукратным различием спектрального разрешения в работах [56] и [75], но и физическими причинами. Очевидно, что могут встречаться объекты с такой ориентацией пылевого диска, при которой центральная звезда не закрыта от наблюдателя, и ее излучение не будет уменьшаться в десятки раз. Тогда по соседству с яркой звездой как тор (или диск), так и рассеивающие лепестки становятся трудно обнаружимыми в оптическом диапазоне, и биполярная туманность не наблюдается. Спектр центральной звезды у системы с такой ориентацией может уже не содержать эмиссионные молекулярные полосы, так как излучение в этих полосах «тонет» на фоне излучения фотосферы. Различие морфологии туманностей типа «протяженное гало» и «биполярная» может быть чисто визуальным, поскольку наблюдаемая форма сильно зависит от наклона оси к лучу зрения и от степени углового разрешения структуры [5]. К примеру, протяженная оболочка HD 56126 по данным Накашimy и др. [111] не имеет явной структуры в виде джетов, полостей и т.п.

Самый новый результат в оптической спектроскопии PPN — это обнаружение обогащения тяжелыми металлами околозвездной оболочки сверхгиганта V5112 Sgr [47]. Расщепление на компоненты профилей сильнейших абсорбций тяжелых металлов в спектре этой звезды со сложной биполярной оболочкой позволяет нам предположить, что процесс формирования структурированной околозвездной оболочки может способствовать обогащению оболочки продуктами звездного нуклеосинтеза. Профили расщепленных линий включают фотосферную и две оболочечные компоненты, одна из которых, по аналогии с CO-профилем, возникает в оболочке, сформировавшейся на стадии AGB и расширяющейся со скоростью $V_{\text{exp}}(2) \approx 20 \text{ км с}^{-1}$, другая — в оболочке, сформировавшейся позже и расширяющейся со скоростью $V_{\text{exp}}(1) \approx 30 \text{ км с}^{-1}$. Надежно отождествлены околозвездные компоненты сильных абсорбций тяжелых металлов и в спектре V354 Lac [60]. Подчеркнем, что именно для этих двух родственных объектов, V5112 Sgr [47] и V354 Lac [60], мы сделали вывод о присутствии в их спектрах абсорбций — околозвездных аналогов DIBs.

Структура околозвездной туманности V354 Lac может быть сложнее, чем это следует из наблюдений на HST (см. таблицу 2). Поляриметрические наблюдения [112] указывают на присутствие кольцеобразной структуры, погруженной в вытянутую туманность. Авторы [113] отмечают, что оси оптического и ИК-изображения туманности почти перпендикулярны. Из полученной кинематической картины туманности на основе картирования эмиссии CO авторы [113] заключили, что структура туманности, помимо тора и сферической компоненты, включает дополнительный компонент (вероятно, джет).

Асимметрия (в частности, биполярность) структуры у избранных PPN зарегистрирована в нескольких видах наблюдений. Принципиальную информацию о морфологии оболочек и свойствах пылинок в околозвездных оболочках дает спектрополяриметрия. Как следует из наблюдений [9], свыше 70% AGB и post-AGB звезд обладают собственной поляризацией. Высокая степень линейной поляризации их излучения уже указывает на асимметрию оболочки. Примерами могут служить объекты с биполярной оболочкой, такие как RAFGL 618 [114] и RAFGL 2688 [57]. Спектр линейной поляризации RAFGL 2688, полученный с хорошим спектральным разрешением ($R = 15\,000$) в диапазоне 5000–6600 Å на 6-м телескопе, позволил впервые разделить детали фотосферного и околозвездного происхождения. В частности, установлено, что

эмиссия в линиях полос системы Свана формируется в оболочке, причем механизмом возбуждения переходов является резонансная флуоресценция [57].

В настоящее время нет общепринятых представлений о формировании отклонений от сферической симметрии у PPN. Проанализировав оптические изображения с высоким пространственным разрешением выборки PPN, полученные с использованием аппаратуры космического телескопа Хаббла, авторы [4, 7] пришли к заключению о том, что определяющим фактором в процессе формирования того или иного типа морфологии звездной оболочки является оптическая толщина околозвездного вещества. Считается, что плотная и обычно сферическая [115] оболочка, образовавшаяся на стадии AGB, расширяется с низкой скоростью, а быстрое расширение испытывает осесимметричная часть оболочки, которая образовалась позже, на стадии post-AGB. Последовательность этих процессов приводит к образованию градиента оптической толщины в направлении от экватора к полярной оси системы. Присутствие компаньона в системе и/или наличие магнитного поля также могут быть теми физическими факторами, вследствие которых в короткий промежуток эволюции между AGB и post-AGB теряется сферическая симметрия звездной оболочки (см. [116, 117] и ссылки в этих статьях). В недавней работе Конинга и др. [118] предложена простая модель PPN, которая сконструирована на основе пары каверн пониженной плотности внутри плотного сферического гало. Авторы показали, что варьированием параметров (плотность вещества в каверне, ее размеры и ориентация) можно воспроизвести все морфологические особенности, наблюдаемые у реальных биполярных PPN.

Обнаружение обогащения тяжелыми металлами околозвездных оболочек сверхгигантов V5112 Sgr и V354 Lac пока остается уникальным результатом. Его развитием может быть спектроскопия высокого разрешения объектов близкой природы. Перспективными объектами нам представляются прежде всего IRAS 04296+3429 и 23304+6147. Как следует из таблицы 2, атмосферы слабых центральных звезд этих источников обогащены тяжелыми металлами, а их околозвездные оболочки имеют сложную структуру.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На основе наблюдений, проведенных на БТА с высоким спектральным разрешением, рассмотрены особенности оптических спектров выборки post-AGB звезд с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами s-процесса, и

с обогащенными углеродом околозвездными оболочками.

Показано, что peculiarity профилей линий (наличие эмиссионного компонента в линиях дублета D Na I, характер молекулярных деталей, асимметрия и расщепление профилей сильных абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня) связаны с кинематическими и химическими свойствами околозвездной оболочки и с типом ее морфологии. В частности, переменность наблюдаемых профилей абсорбционно-эмиссионных линии $H\alpha$ и линий металлов, а также наблюдаемая у нескольких объектов смена типа (абсорбция/эмиссия) полос Свана молекулы C_2 связана с изменениями в структуре околозвездной оболочки.

Тип профиля $H\alpha$ (чисто абсорбционный, чисто эмиссионный, типа P Cyg или инверсного P Cyg, с двумя эмиссионными компонентами в крыльях) не связан с химическим составом атмосферы центральной звезды. Основными факторами, влияющими на тип профиля $H\alpha$ и его переменность, являются темп потери вещества, скорость звездного ветра, кинематика и оптическая толщина оболочки.

Обнаруженное расщепление на компоненты профилей сильнейших абсорбций тяжелых металлов в спектрах сверхгигантов V5112 Sgr и V354 Lac позволяет предположить, что процесс формирования структурированной околозвездной оболочки сопровождается обогащением оболочки продуктами звездного нуклеосинтеза. Подчеркнем, что в спектрах именно этих двух родственных объектов, V5112 Sgr и V354 Lac, мы обнаружили оболочечные абсорбции, аналогичные межзвездным DIBs.

Попытки найти взаимосвязь между особенностями оптического спектра и морфологией околозвездной среды затруднены тем, что наблюдаемая структура оболочки сильно зависит от наклона оси симметрии к лучу зрения и от степени углового разрешения аппаратуры, спектральной и используемой для получения прямых изображений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность всем соавторам, участвовавшим в выполнении на БТА программы спектроскопии сверхгигантов с ИК-избытками. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 14-02-00291 а). В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD и ADS. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Busso, R. Gallino, and G. J. Wasserburg, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **37**, 239 (1999).
2. F. Herwig, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 435 (2005).
3. B. Gustafsson and N. Ryde, *IAU Symp.*, No. 210, 481 (2000).
4. T. Ueta, M. Meixner, and M. Bobrowsky, *Astrophys. J.* **528**, 861 (2000).
5. R. Sahai, M. Morris, C. Sánchez Contreras, and M. Claussen, *Astron. J.* **134**, 2200 (2007).
6. N. L. J. Cox, D. A. García-Hernández, P. García-Lario, and A. Manchado, *Astron. J.* **141**, 111 (2011).
7. N. Siódmiak, M. Meixner, T. Ueta, et al., *Astrophys. J.* **677**, 382 (2008).
8. E. Lagadec, T. Verhoelst, D. Mékarnia, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417**, 32 (2011).
9. J. H. Bieging, G. D. Schmidt, P. S. Smith, and B. D. Oppenheimer, *Astrophys. J.* **639**, 1053 (2006).
10. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, in *Proc. Joint Discussion No. 4 during the IAU General Assembly 2006, UV Astronomy: Stars from Birth to Death*, Ed. by A. I. Gómez de Castro and M. A. Barstow (Editorial Complutense, Madrid, 2007), p. 179.
11. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, *J. Optical Technology* **76**, 87 (2009).
12. V. Panchuk, V. Klochkova, I. Najdenov, et al., Preprint No. 139 (Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, 1999).
13. V. Panchuk, M. Yushkin, and I. Najdenov, Preprint No. 179 (Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, 2003).
14. V. E. Panchuk, J. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1998).
15. A. S. Miroshnichenko, E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, et al., *Astrophys. J.* **700**, 209 (2009).
16. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, A. S. Miroshnichenko, et al., *Astron. and Astrophys.* **392**, 143 (2002).
17. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **14**, 215, (2005).
18. V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk, and K. Volk, *Astron. and Astrophys.* **345**, 905 (1999).
19. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *IBVS*, No. 5584 (2004).
20. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavoilzhanskaya, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **51**, 642 (2007).
21. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 272 (2008).
22. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **51**, 994 (2007).
23. V. G. Klochkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **272**, 710 (1995).
24. V. P. Arkhipova, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, et al., *Astronomy Letters* **32**, 661 (2006).
25. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **41**, 5 (1996).

26. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **48**, 301 (2004).
27. V. G. Klochkova and T. V. Mishenina, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 83 (1998).
28. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **14**, 395 (1988).
29. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **56**, 104 (2012).
30. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **15**, 531 (2006).
31. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **15**, 521 (2006).
32. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Sov. Astron. Lett.* **15**, 264 (1989).
33. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and E. L. Chentsov, *Astron. and Astrophys.* **323**, 789 (1997).
34. V. G. Klochkova and N. N. Samus, *Astron. and Astrophys.* **378**, 455 (2001).
35. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, N. S. Tavganskaya, and V. V. Kovtyukh, *Astronomy Letters* **29**, 748 (2003).
36. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Astron. and Astrophys.* **324**, L65 (1997).
37. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astronomy Letters* **28**, 49 (2002).
38. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **14**, 933 (1988).
39. V. P. Arkhipova, V. G. Klochkova, and G. V. Sokol, *Astronomy Letters* **27**, 99 (2001).
40. T. Sahin, D. L. Lambert, V. G. Klochkova, and N. S. Tavganskaya, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **410**, 612 (2011).
41. V. G. Klochkova, G. Zhao, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astronomy Reports* **45**, 553 (2001).
42. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **22**, 77, (2013).
43. L. Zacs, V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and R. Spelmanis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **282**, 1171 (1996).
44. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **292**, 19 (1997).
45. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **46**, 139 (2002).
46. H. van Winckel and M. Reyniers, *Astron. and Astrophys.* **354**, 135 (2000).
47. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **39**, 765 (2013).
48. V. G. Klochkova and T. Kipper, *Baltic Astronomy* **15**, 395, (2006).
49. V. G. Klochkova, T. V. Mishenina, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 398 (2000).
50. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, E. L. Chentsov, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **62**, 217 (2007).
51. T. Kipper, M. Kipper, and V. G. Klochkova, *Astron. and Astrophys.* **297**, L33, (1995).
52. T. Kipper and V. Klochkova, *Baltic Astronomy* **10**, 393, (2001).
53. V. P. Arkhipova, N. P. Ikonnikova, R. I. Noskova, et al., *Astronomy Letters* **27**, 719 (2001).
54. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, N. S. Tavganskaya, and G. Zhao, *Astronomy Reports* **50**, 232 (2006).
55. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **63**, 112 (2008).
56. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 439 (2000).
57. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and A. S. Miroshnichenko, *Astronomy Reports* **48**, 288 (2004).
58. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astronomy Reports* **54**, 234 (2010).
59. L. Zacs, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **275**, 764 (1995).
60. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavganskaya, *Astrophysical Bulletin* **64**, 155 (2009).
61. V. G. Klochkova, *Astronomy Letters* **35**, 457 (2009).
62. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 88 (2000).
63. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, N. S. Tavganskaya, and I. A. Usenko, *Astronomy Reports* **58**, 101 (2014).
64. M. Yushkin and V. Klochkova, Preprint No. 206 (Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, 2005).
65. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **67**, 385 (2012).
66. B. E. Reddy, E. J. Bakker, and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **524**, 831 (1999).
67. B. J. Hrivnak and J. H. Bieging, *Astrophys. J.* **624**, 331 (2005).
68. E. J. Bakker, E. F. van Dishoeck, L. B. F. M. Waters, and T. Schoenmaker, *Astron. and Astrophys.* **323**, 469 (1997).
69. C. Loup, T. Forveille, A. Omont, and J. P. Paul, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **99**, 291 (1993).
70. B. E. Reddy, D. L. Lambert, G. Gonzalez, and D. Yong, *Astrophys. J.* **564**, 482 (2002).
71. B. E. Reddy, M. Parthasarathy, G. Gonzalez, and E. J. Bakker, *Astron. and Astrophys.* **328**, 331 (1997).
72. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavganskaya, and M. V. Shapovalov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 162 (2007).
73. J. Y. Hu, P. te Lintel Hekkert, S. Slijkhuis, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **103**, 301 (1994).
74. A. Omont, C. Loup, T. Forveille, et al., *Astron. and Astrophys.* **267**, 515 (1993).
75. M. N. Ishigaki, M. Parthasarathy, B. E. Reddy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **425**, 997 (2012).
76. B. J. Hrivnak, K. Volk, and S. Kwok, *Astrophys. J.* **694**, 1147 (2009).
77. S. Kwok, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 63 (1993).

78. A. Li, J. M. Liu, and B. W. Jiang, *Astrophys. J.* **777**, 111 (2013).
79. B. J. Hrivnak, W. Lu, R. E. Maupin, and B. D. Spitzbart, *Astrophys. J.* **709**, 1042 (2010).
80. B. J. Hrivnak, W. Lu, K. L. Wefel, et al., *Astrophys. J.* **734**, 25 (2011).
81. H. van Winckel, *Baltic Astronomy*, **16**, 112 (2007).
82. N. R. Trams, L. B. F. M. Waters, C. Waelkens, et al., *Astron. and Astrophys.* **218**, L1 (1989).
83. C. Sánchez Contreras, R. Sahai, A. Gil de Paz, and R. Goodrich, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **179**, 166 (2008).
84. R. D. Oudmaijer and E. J. Bakker, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **271**, 615 (1994).
85. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
86. S. Kwok, K. Volk, and B. J. Hrivnak, *IAU Symp.*, No. 191, 297 (1999).
87. E. J. Bakker, H. J. G. L. M. Lamers, L. B. F. M. Waters, et al., *Astron. and Astrophys.* **307**, 869 (1996).
88. T. Kipper, *Baltic Astronomy* **14**, 223 (2005).
89. T. Kipper, *Baltic Astronomy* **16**, 191 (2007).
90. N. Kameswara Rao, A. Goswami, and D. L. Lambert, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **334**, 129 (2002).
91. T. Kipper, *Baltic Astronomy* **20**, 65 (2011).
92. P. J. Sarre, *J. Molecular Spectroscopy* **238** (1), 1 (2006).
93. J. Kos and T. Zwitter, *Astrophys. J.* **774**, 72 (2013).
94. T. Le. Bertre and J. Lequeux, *Astron. and Astrophys.* **274**, 909 (1993).
95. L. Zacs, M. R. Schmidt, and R. Szczerba, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **306**, 903 (1999).
96. R. Luna, N. L. J. Cox, M. A. Satorre, et al., *Astron. and Astrophys.* **480**, 133 (2008).
97. T. Kipper, *Baltic Astronomy* **22**, 297 (2013).
98. V. Bujarrabal, J. Alcolea, and P. Planesas, *Astron. and Astrophys.* **257**, 701 (1992).
99. V. G. Klochkova and N. S. Tavganskaya, *Astronomy Letters* (in press).
100. N. Gorlova, A. Lobel, A. J. Burgasser, et al., *Astrophys. J.* **651**, 1130 (2006).
101. R. F. Sanford, *Astrophys. J.* **116**, 331 (1952).
102. R. P. Kraft, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **68** No. 401, 137 (1956).
103. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **136**, 866 (1962).
104. V. V. Kovtyukh, G. Wallerstein, S. M. Andrievsky, et al., *Astron. and Astrophys.* **526**, A116 (2011).
105. M. Chadid and D. Gillet, *Astron. and Astrophys.* **308**, 481 (1996).
106. M. Schwarzschild, *Harvard College Observ. Circ.*, No. 429, 1 (1938).
107. N. Kameswara Rao, *Bull. Astron. Soc. India*, **33**, 159 (2005).
108. S. Giridhar, D. L. Lambert, B. E. Reddy, et al., *Astrophys. J.* **627**, 432 (2005).
109. C. Waelkens, H. van Winckel, N. R. Trams, and L. B. F. M. Waters, *Astron. and Astrophys.* **256** L15 (1992).
110. H. van Winckel, C. Waelkens, and R. D. Oudmaijer, *Astron. and Astrophys.* **312**, 553 (1996).
111. J. Nakashima, N. Koning, S. Kwok, and Y. Zhang, *Astrophys. J.* **692**, 402 (2009).
112. T. M. Gledhill, A. Chrysostomou, J. H. Hough, and J. A. Yates, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **322**, 321 (2001).
113. J. Nakashima, N. Koning, N. H. Volgenau, et al., *Astrophys. J.* **759**, 61 (2012).
114. G. D. Schmidt and M. Cohen, *Astrophys. J.* **246**, 444 (1981).
115. A. Castro-Carrizo, G. Quintana-Lacaci, R. Neri, et al., *Astron. and Astrophys.* **523**, A59 (2010).
116. P. J. Huggins, N. Mauron, and E. A. Wirth, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396**, 1805 (2009).
117. M. L. Leal-Ferreira, W. H. T. Vlemmings, P. J. Diamond, et al., *Astron. and Astrophys.* **540**, A42 (2012).
118. N. Koning, S. Kwok, and W. Steffen, *Astrophys. J.* **765**, 92 (2013).

Circumstellar Envelope Manifestations in the Optical Spectra of Evolved Stars

V. G. Klochkova

We analyze the peculiarities of the optical spectra of luminous stars with circumstellar gas and dust envelopes: the time variability of the absorption-emission profiles of the H α line, the presence of stationary emission and absorption molecular bands, multicomponent absorption-emission profiles of the Na I D doublet lines. We show that the peculiarities of the line profiles (the presence of an emission component in the Na I D doublet lines, the specific type of the molecular features, the asymmetry and splitting of the profiles of strong absorption features with low excitation potential of the low level) can be associated with the kinematic and chemical properties of the envelope and its morphological type.

Keywords: stars: AGB and post-AGB—circumstellar matter—lines: profiles—stars: mass-loss—stars: winds, outflows